

T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



## GFRP İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ TÜNELLERİN SONLU ELEMENLAR METODU İLE ANALİZİ

Yüksek Lisans Tezi

**Mahmoud ALSHEKH HAMMOUD**

Danışman

**Dr. Öğr. Üyesi Sertaç TUHTA**

SAMSUN  
2022



## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığımı taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet  (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır

İmza

... / ... / 20...

Mahmoud ALSHEKH HAMMOUD

## TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

**Tez Başlığı :** GFRP İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ TÜNELLERİN SONLU ELEMENLAR METODU İLE ANALİZİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 31/05/2022 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 18

Tek kaynak oranı : % 5 çıkmıştır.

İmza

... / ... / 20...

Dr. Öğr. Üyesi Sertaç TUHTA

## ÖZET

### GFRP İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ TÜNELLERİN SONLU ELEMANLAR METODU İLE ANALİZİ

Mahmoud ALSHEKH HAMMOUD

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, Haziran/2022

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sertaç TUHTA

Mevcut altyapı ve yapı stoklarının önemli bir bölümünü oluşturan mevcut beton yapıların onarımı ve güçlendirilmesi, inşaat mühendisliği faaliyetlerinin önemli bir parçası haline gelmiştir. Çatlama, parçalanma ve su sızıntısı gibi hasarlar, bozulmuş tünellerde sıklıkla meydana gelir ve tünel işletme güvenliğini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Çoğu onarım çalışmasında, bozulmuş betonarme tünel kaplamaların kolayca değiştirilemediğinden, tünel kaplamaları harici takviye malzemeleri ilave edilerek güçlendirilmektedir. Tünel kaplamaların bütünlüğünü iyileştirmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir, diğer yöntemlere kıyasla GFRP, yüksek çekme mukavemeti, düşük ağırlık, kolay kullanım ve uygulama, korozyona karşı dayanıklıdır gibi birçok olumlu özelliğe sahiptir. Bu nedenle, böyle bir betonarme kaplamayı korumak için, tünelin GFRP örtü ile güçlendirmektedir.

Bu çalışmada, betonarme tünel kaplama rijitliğinin artırmak amacıyla cam fiber takviyeli polimer (GFRP) takviyeli betonun etkinliği deneysel ve analitik olarak araştırılmıştır. (GFRP), betonarme yapıların güçlendirilmesinde önemli ölçüde kullanılan pratik yapı malzemesidir. 7 m çapında ve 35 m uzunluğunda betonarme bir tünelin etrafına 4 mm kalınlığında GFRP örtü uygulanarak güçlendirme yapılmıştır. Betonarme tünelin ve GFRP' li güçlendirilmiş betonarme tünelin modal parametreleri arasındaki farklar karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile ilk 5 mod incelenmiştir. GFRP ile Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş betoarme tünelin periyod, gerilme, kesme kuvveti ve momentlerin SAP2000 programını kullanarak hesaplanmıştır. Güçlendirme yapıldıktan sonra periyodunun %3.51-%9.64 ortalama olarak %7.00 oranında azaldığı, Mmax değerlerini %5.04-%24.40 ortalama olarak %18.38 oranında azaldığı, Smax değerlerini %9.62 ortalama olarak oranında arttığı ve Vmax değerlerini %24.22-%75.95 ortalama olarak %48.67 oranında arttığı görülmektedir. Periyotlardaki azalmalar yapıyı rezonans aralığından uzaklaştırır ve rijitliği arttırmaktadır. Analiz sonuçları incelendiğinde, bu çalışmada beton tünelin GFRP ile güçlendirilmesinin beton tüneli daha güvenli hale getirdiği görülmektedir. Tüm bu bulgular ışığında beton tünellerde GFRP güçlendirme yöntemi kullanılabilir.

**Anahtar Sözcükler:** GFRP; Tünel Kaplama; Sonlu Elemanlar Metodu; Modal Parametreler; Güçlendirme.

## ABSTRACT

### ANALYSIS OF TUNNELS REINFORCED WITH GFRP USING FINITE ELEMENT METHOD

Mahmoud ALSHEKH HAMMOUD

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Master, June/2022

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Sertaç TUHTA

The repair and strengthening of existing concrete structures, which make up a significant part of existing infrastructure and structure stocks, has become an essential part of civil engineering activities. Damage such as cracking, shredding and water leakage frequently occurs in degraded tunnels and can significantly affect the security of tunnel operations. In most repair work, broken concrete cannot be easily replaced by tunnel linings, so tunnel linings are reinforced by adding external reinforcements. Various methods have been developed to improve the integrity of tunnel coatings, compared to other methods, the GFRP has many positive features, such as high tensile strength, low weight, easy handling and application, and corrosion resistance. Therefore, protecting such a reinforced concrete lining strengthens the tunnel with the GFRP textile.

In this study, the effectiveness of the fabric-reinforced concrete (GFRP) has been experimentally and analytically researched to increase the rigidity of the tunnel lining. The glass fiber reinforced polymer (GFRP) is a practical option for building concrete structures. Reinforced by applying a 4 mm thick GFRP cover around a 7 m diameter and 35 m long concrete tunnel. The differences between the modal parameters of the reinforced concrete tunnel and the GFRP reinforced concrete tunnel are compared. The differences between the modal parameters of the concrete tunnel and the GFRP reinforced concrete tunnel were compared. The first 5 modes were examined with the finite element method. The period, stress, shear force, and moments of strengthened and non-strengthened reinforced concrete tunnels with (GFRP) were calculated using the SAP2000 program. After strengthening, the period decreased by 3.51%-9.64% on average 7.00%,  $M_{max}$  values decreased by 5.04%-24.40%, on average 18.38%,  $S_{max}$  values increased by 9.62% on average, and  $V_{max}$  values were 24.22%-75.95% on average 48.67%. rate is increased. Decreases in the periods move the structure away from the resonance range and increase the rigidity. When the analysis results are examined, it is seen that the strengthening of the concrete tunnel with GFRP in this study makes the concrete tunnel safer. In the light of all these findings, GFRP reinforcement method can be used in concrete tunnels.

**Keywords:** GFRP; Tunnel Lining; Finite Element Method; Modal Parameters; Strengthening.

## ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu derece önemli ve yapılması gerekli bir çalışmayı bana öneren, çalışmalarımı adım adım kontrol ederek yardımcı olan, araştırma, disiplin ve sonuca ulaşabilme yöntemlerini öğreten Danışman Hocam Sayın Doktor Öğretim Üyesi Sertaç TUHTA' ya minnet ve şükranlarımı sunmayı her zaman için bir borç bilirim. Öğrenim hayatım boyunca bana emeği geçen tüm hocalarımı saygıyla anar, kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim. Öğrenim hayatım süresince desteklerini esirgemeyen başta Annemi ve Babamı ve Kardeşlerim olmak üzere tüm aile fertlerine teşekkürlerimi sunarım. Bu tez çalışmasının Türkiye'ye faydalı olmasını temenni ederim.

Adı SOYADI

Mahmoud ALSHEKH HAMMOUD

# İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI .....	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI .....	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI .....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
TABLolar DİZİNİ .....	xi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>1</b>
<b>3. TÜNELLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....</b>	<b>3</b>
3.1. Tarihçe .....	3
3.2. Tünellerin Sınıflandırması .....	4
3.2.1. Enkesitlerine Göre Sınıflandırma.....	4
3.2.2. İşlevlerine Göre Sınıflandırma.....	5
3.3. Tünel Kaplamaları .....	9
3.3.1. Kaplama Çeşitleri.....	9
3.3.2. Kaplamalara Etkiyen Yükler.....	11
<b>4. FRP' NİN TANIMI.....</b>	<b>13</b>
4.1. FRP Tarihçesi.....	14
4.2. Lifler .....	15
4.2.1. Cam Lifleri.....	16
4.2.2. Karbon Lifleri .....	16
4.2.3. Aramid Lifleri.....	16
4.2.4. Bazalt Lifleri .....	17
4.3. Matriks .....	17
4.3.1. Epoksi .....	18
4.3.2. Polyester.....	19
4.3.3. Vinil Ester .....	20
4.4. Kompozit.....	20
4.5. (FRP) Çeşitleri ve Genel Özellikleri .....	22
4.5.1. Karbon Fiberler .....	24
4.5.2. Cam Fiberler .....	24
4.6. FRP ile Güçlendirmenin Tipik Nedenleri .....	25
4.6.1. Sismik ve Rüzgar Yükleri .....	25
4.6.2. Fonksiyon Değişimi .....	25
4.6.3. İnşaat ve Tasarım Hataları.....	26
4.6.4. onarımlar .....	26
4.6.5. Korozyon.....	26
4.7. FRP' nin Uygulanması.....	26
4.7.1. Uygulama den Önce Hazırlık.....	26
4.7.2. Yüzey Hazırlığı.....	27
4.7.3. Astar.....	27
4.7.4. Malzemeyi Doygun Hale Getirmek .....	28
4.7.5. Kürlenme.....	28
<b>5. TÜNEL HASARLARI.....</b>	<b>28</b>
5.1. İnşaat sırasındaki hasarlar .....	29
5.2. Deprem Hasarları .....	31
5.3. Hasar Tipleri .....	32
<b>6. MATERYAL METOD VE UYGULAMA.....</b>	<b>34</b>
6.1. Materyal .....	34

6.1.1. Betonarme.....	34
6.1.2. Tek yönlü GFRP .....	34
6.2. Metot.....	35
6.3. Uygulama.....	35
<b>7. GFRP UYGULANMASI ÖNCE VE GFRP UYGULADIKTEN SONRA DURUMDAKİ TÜNELLEİN KARŞILAŞTIRMALARI.....</b>	<b>36</b>
7.1. Modların Periyot ve Frekans Değerleri Karşılaştırması.....	36
7.2. Maksimum Moment (Mmax) Karşılaştırılması .....	44
7.3. Maksimum Gerilme (Smax) Karşılaştırılması .....	50
7.4. Maksimum Kesme Kuvveti (Vmax) Karşılaştırılması.....	56
<b>8. SONUÇ .....</b>	<b>62</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>63</b>
<b>ÖZ GEÇMİŞ.....</b>	<b>66</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

a	: Isıl Genleşme Katsayısı
AFRP	: Aramid Fiber Reinforcement Polymer
BHA	: Birim Hacim Ağırlığı
BHK	: Birim Hacim Kütlesi
CRFP	: Carbon Fiber Reinforcement Polymer
E	: Elastisite Modülü
FRP	: Fiber Reinforcement Polymer
G	: Kayma Modülü
GFRP	: Glass Fiber Reinforcement Polymer
M	: Moment
OMA	: Operational Modal analysis
PCM	: Polymer Cement Mortar
S	: Gerilme
SAP2000	: Structural Analysis Program
S(FR)	: Steel Fibre Reinforced
TBM	: Tunnel Boring Machine
U	: Poisson Oranı
V	: Kesme Kuvveti
$\alpha$	: Asal Gerilme Doğrultusundan Sapma Açısı
$\gamma$	: Zeminin Birim Hacim Ağırlığı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Zemin türü ve kullanım amacına göre tünellerde kullanılan başlıca enkesit tipleri.	5
Şekil 3.2. Karayolu tünellerine ilişkin tipik bir enkesit şekli.....	6
Şekil 3.3. Demiryolu tünellerine ilişkin tipik iki enkesit şekli.....	6
Şekil 3.4. Metro ve kanal tünellerinden örnek bir görünüm .....	6
Şekil 3.5. Maden galerilerine ilişkin örnek bir görünüm .....	7
Şekil 3.6. Su iletim tüneli enkesit örnekleri.....	7
Şekil 3.7. Kanalizasyon ve bazı servis tünellerinin kesit örnekleri.....	8
Şekil 3.8. Depolama amaçlı tünel tipi bir otoparkın görünüm.....	8
Şekil 3.9. Tüm bölümün tek seferde beton dökülmesini sağlayan kalıp şeması.....	9
Şekil 3.10. Bierbaumer teorisine göre tünel kaplamalarına etkileyen yükler belirlenirken zemin kütlesi .....	11
Şekil 3.11. Terzaghi' ye göre kesit .....	11
Şekil 3.12. Tünelere etki eden dikey ve yatay zemin basınçlarının şematik gösterimi.....	12
Şekil 4.1. Güçlendirici liflerin gerilme-birimim grafiği.....	15
Şekil 4.2. Farklı modüle sahip epoksi matris reçinelerinin gerilme-gerinim eğrileri.....	18
Şekil 4.3. Genel amaçlı polyester reçine için gerilim-gerinim eğrileri .....	19
Şekil 4.4. Lifli polimerlerin ve alüminyum ve çeliğin yoğunluklarının karşılaştırılması .....	21
Şekil 4.5. Lifli polimerler, alüminyum ve çeliğin kesme mukavemeti karşılaştırması.....	21
Şekil 4.6. Yaygın elyaf türleri (karbon, aramid ve cam).....	22
Şekil 4.7. FRP' lerin gerilme-şekil değiştirme grafiği .....	22
Şekil 4.8. tek yönlü ve çift yönlü GFRP malzemeleri.....	25
Şekil 4.9. Uygulamadan önce Hazırlık .....	26
Şekil 4.10. Yüzeye astar uygulaması .....	27
Şekil 5.1. Taşıyıcıya betonarme prekast segmentlerin yüklenmesi .....	29
Şekil 5.2. Betonarme prekast segmentlerin yüklenmesi sırasında hasarTünel imal aşamasında .....	29
Şekil 5.3. Yapım sırasında sıralanan segmentte görünen çatlaklar .....	30
Şekil 5.4. inşaat sırasında sıralı segmentte görünen çatlakların analizi .....	31
Şekil 5.5. Deprem nedeniyle tünellerde oluşan aksel sıkışma ve açılma .....	31
Şekil 5.6. Deprem nedeniyle tünellerde oluşan boyuna eğilme .....	32
Şekil 5.7. Deprem nedeniyle tünellerde oluşan ovalleşme / ötelenme.....	32
Şekil 5.8. Destek yapısındaki hasar türleri.....	33
Şekil 6.1. Tünel SAP2000 3D modeli.....	35
Şekil 7.1. GFRP' siz 1. Mod tünel deforme olmuş durumu.....	38
Şekil 7.2. GFRP' li 1. Mod tünel deforme olmuş durumu .....	38
Şekil 7.3. GFRP' siz 2. Mod tünel deforme olmuş durumu.....	39

Şekil 7.4. GFRP' li 2. Mod tünel deforme olmuş durumu .....	39
Şekil 7.5. GFRP' siz 3. Mod tünel deforme olmuş durumu.....	40
Şekil 7.6. GFRP' li 3. Mod tünel deforme olmuş durumu .....	40
Şekil 7.7. GFRP' siz 4. Mod tünel deforme olmuş durumu.....	41
Şekil 7.8. GFRP' li 4. Mod tünel deforme olmuş durumu .....	42
Şekil 7.9. GFRP' siz 5. Mod tünel deforme olmuş durumu.....	43
Şekil 7.10. GFRP' li 5. Mod tünel deforme olmuş durumu.....	43
Şekil 7.11. GFRP' siz 1. Mod tünel Mmax diyagramı.....	45
Şekil 7.12. GFRP' li 1. Mod tünel Mmax diyagramı.....	45
Şekil 7.13. GFRP' siz 2. Mod tünel Mmax diyagramı.....	46
Şekil 7.14. GFRP' li 1. Mod tünel Mmax diyagramı.....	46
Şekil 7.15. GFRP' siz 3. Mod tünel Mmax diyagramı.....	47
Şekil 7.16. GFRP' li 3. Mod tünel Mmax diyagramı.....	47
Şekil 7.17. GFRP' siz 4. Mod tünel Mmax diyagramı.....	48
Şekil 7.18. GFRP' li 4. Mod tünel Mmax diyagramı.....	48
Şekil 7.19. GFRP' siz 5. Mod tünel Mmax diyagramı.....	49
Şekil 7.20. GFRP' li 5. Mod tünel Mmax diyagramı.....	49
Şekil 7.21. GFRP' siz 1. Mod tünel Smax diyagramı.....	51
Şekil 7.22. GFRP' li 1. Mod tünel Smax diyagramı .....	51
Şekil 7.23. GFRP' siz 2. Mod tünel Smax diyagramı .....	52
Şekil 7.24. GFRP' li 2. Mod tünel Smax diyagramı .....	52
Şekil 7.25. GFRP' siz 3. Mod tünel Smax diyagramı .....	53
Şekil 7.26. GFRP' li 3. Mod tünel Smax diyagramı .....	53
Şekil 7.27. GFRP' siz 4. Mod tünel Smax diyagramı.....	54
Şekil 7.28. GFRP' li 4. Mod tünel Smax diyagramı .....	54
Şekil 7.29. GFRP' siz 5. Mod tünel Smax diyagramı.....	55
Şekil 7.30. GFRP' li 5. Mod tünel Smax diyagramı .....	55
Şekil 7.31. GFRP' siz 1. Mod tünel Vmax diyagramı .....	57
Şekil 7.32. GFRP' li 1. Mod tünel Vmax diyagramı .....	57
Şekil 7.33. GFRP' siz 2. Mod tünel Vmax diyagramı .....	58
Şekil 7.34. GFRP' li 2. Mod tünel Vmax diyagramı .....	58
Şekil 7.35. GFRP' siz 3. Mod tünel Vmax diyagramı .....	59
Şekil 7.36. GFRP' li 3. Mod tünel Vmax diyagramı .....	59
Şekil 7.37. GFRP' siz 4. Mod tünel Vmax diyagramı .....	60
Şekil 7.38. GFRP' li 4. Mod tünel Vmax diyagramı .....	60
Şekil 7.39. GFRP' siz 5. Mod tünel Vmax diyagramı .....	61
Şekil 7.40. GFRP' li 5. Mod tünel Vmax diyagramı .....	61

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 4.1. Termoset matrislerin genel özellikleri (fib Uluslararası Beton Federasyonu vd., 2007) .....	17
Tablo 4.2. FRP' lerin fiziksel ve mekanik özellikleri .....	23
Tablo 4.3. FRP.leri oluşturan matrislerin özellikleri.....	23
Tablo 4.4. FRP.lerin ve çeliğin yoğunlukları (kg/m <sup>3</sup> ).....	23
Tablo 4.5. Cam Fiber Üretiminde kullanılan Camların Özellikleri .....	25
Tablo 6.1. Betonarme ve GFRP Tabakalarının Kalınlıkları .....	36
Tablo 7.1. GFRP Tünel Uygulanmadan Önce Periyot ve Frekans Değerleri .....	36
Tablo 7.2. GFRP tabakası Tünel Uyguladıktan sonra Periyot ve Frekans Değerleri.....	37
Tablo 7.3. Mod 1.nin Periyot ve Frekans Değerleri Karşılaştırması .....	38
Tablo 7.4. Mod 2.nin Periyot ve Frekans Değerleri Karşılaştırması .....	39
Tablo 7.5. Mod 3.nin Periyot ve Frekans Değerleri Karşılaştırması .....	41
Tablo 7.6. Mod 4.nin Periyot ve Frekans Değerleri Karşılaştırması .....	42
Tablo 7.7. Mod 5.nin Periyot ve Frekans Değerleri Karşılaştırması .....	43
Tablo 7.8. Max ve Min Moment karşılaştırması.....	44
Tablo 7.9. Mod 1.nin Max ve Min Moment karşılaştırması .....	45
Tablo 7.10. Mod 2.nin Max ve Min Moment karşılaştırması .....	46
Tablo 7.11. Mod 3.nin Max ve Min Moment karşılaştırması .....	47
Tablo 7.12. Mod 4.nin Max ve Min Moment karşılaştırması .....	48
Tablo 7.13. Mod 5.nin Max ve Min Moment karşılaştırması .....	49
Tablo 7.14. Max Gerilme Karşılaştırması.....	50
Tablo 7.15. Mod 1.nin Max ve Min Gerilme karşılaştırması.....	51
Tablo 7.16. Mod 2.nin Max ve Min Gerilme karşılaştırması.....	52
Tablo 7.17. Mod 3.nin Max ve Min Gerilme karşılaştırması.....	53
Tablo 7.18. Mod 4.nin Max ve Min Gerilme karşılaştırması.....	54
Tablo 7.19. Mod 5.nin Max ve Min Gerilme karşılaştırması.....	55
Tablo 7.20. Maksimum Kesme Kuvveti (V <sub>max</sub> ) Karşılaştırılması .....	56
Tablo 7.21. 1.Mod (V <sub>max</sub> ) Karşılaştırılması.....	57
Tablo 7.22. 2.Mod (V <sub>max</sub> ) Karşılaştırılması.....	58
Tablo 7.23. 3.Mod (V <sub>max</sub> ) Karşılaştırılması.....	59
Tablo 7.24. 4.Mod (V <sub>max</sub> ) Karşılaştırılması.....	60
Tablo 7.25. 5.Mod (V <sub>max</sub> ) Karşılaştırılması.....	62

## 1. GİRİŞ

Tüneller geçmişten günümüze medeniyetlerin refah düzeyinin artmasında önemli rol oynayan yapılardır. Taşıma, su getirme veya alma, sığınak, depolama gibi kullanım amaçları farklılık gösterebilir. Tüneller, dış etkenlerden izole edilmiş bir yapı ile iki bölgeyi birbirine bağlamakta ve bu bağlantı yapısı üzerinden farklı maddelerin, araçların veya kişilerin transferini sağlamaktadır. İnşaat yöntemleri, boyutlar, ekonomik ve çevresel faktörler açısından farklılık gösterir. Dünya nüfusu hızlı artış göz önüne alındığında bu yapılara olan ihtiyaç her geçen gün artacaktır. Daha doğrusu, tünellerin inşa edileceği zemin konusunda araştırma büyük önem taşımaktadır. Kazı yöntemlerini aç-kapa, delme-patlatma ve makineli tünel açma olarak sıralayabiliriz. Bu yöntemler için tünel destek yapıları farklılık gösterir ve ihtiyaç duyulan detaylar ve üretim akışı değişmektedir. Gelişmiş ülkelerde yaygın olarak dağıtılan, bozulmuş tünel kaplamalarının güçlendirilmesi, inşaat mühendisliğinin önemli bir parçasıdır. Su sızıntısı, bozulmanın en yaygın nedenidir. Ancak, bozulmalar, yetersiz tasarım, öngörülemeyen jeolojik koşullar veya tüneli destekleyen arazideki bir değişiklikten kaynaklanabilir. Güçlendirmelerin bir başka yaygın nedeni de, birçok tünelin tasarlanan yaşam beklentisini aşmış olması ve bu nedenle inşaat malzemelerinin kendilerinin bozulmasıdır. Son zamanlarda, beton elemanlara takviye için FRP kompozitlerinin uygulanması, yapı mühendisliğinde en önemli ve gelecek vaat eden teknolojilerden biri olarak ortaya çıkmıştır. FRP' nin sadece beton ve betonarme yapılarda değil, çelik, yığma ve kompozit yapılarda da kullanımına yönelik olumlu sonuçlar veren çalışmalar mevcuttur. Cam fiber takviyeli polimer (GFRP) malzemeler, yüksek korozyon ve kimyasal dirençleri nedeniyle beton tünellerin güçlendirilmesi için öne çıkmaktadır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Chryssanthakis çalışmalarında, ayrı eleman yöntemiyle bir tünelde elyaf takviyeli püskürtme beton sayısal simülasyonu araştırılmıştır. Sonuçlar, tünelde birincil destek olarak S(FR) ve ardından kaya saplamalarının kullanılmasıyla, kaya "kullanıldığı duruma kıyasla yaklaşık yarı yarıya azaldığını göstermiştir.

Kasimzade ve Tuhta (2005) çalışmalarında, CFRP betonarme kirişler analitik ve deneysel olarak sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir.

Kasimzade ve Tuhta (2005) çalışmalarında, Kompozit Sargı ile Güçlendirilmiş Betonarme Kolonların etkinlikleri araştırılmıştır.

J.R. Correia (2005) makalesinde hızlandırılmış neme maruz kalma altında cam elyaf takviyeli polyester (GFRP) profillerin maruz kaldığı fiziksel, kimyasal, mekanik ve estetik değişikliklere ilişkin deneysel araştırmaların sonuçlarını sunmuştur. Dayanıklılık testleri, bu malzemenin bu zor koşullar altında genel olarak iyi davranışını kanıtlamıştır.

A. Mukherjee çalışmalarında Tropikal ortamlarda beton üzerine harici olarak yapıştırılmış GFRP levhaların performansı araştırılmıştır. beton üzerine harici olarak yapıştırılan GFRP levhanın etkinliği ve dayanıklılığı üzerindeki nem, sıcaklık, alkalilik ve stres seviyesinin sinerjik etkileri üzerine yapısal ölçek testleri tartışılmıştır.

Kasimzade ve Tuhta (2012) tarafından yapılan çalışmada, CFRP betonarme kirişin taşıyabileceği yük ve momentin, uygulanan CFRP katman sayısına bağı olarak yüzde 70-120 oranında arttığı gözlemlenmiştir. (Kasimzade and Tuhta, 2012)

Hara (2014) çalışmalarında, eski tüneli korumak için tünel kaplamasının sayısal analizi sunuldu. Önerilen tünel kaplaması FRP oluklu levhadan yapılmıştır. Sayısal analizden FRP oluklu levha, çatlakları temsil eden eski bir tünelin onarımına ve / veya suyu süpürmeye yönelik yeterli mukavemet ve sertliği gösterir. Ek olarak, oluklu levha hafiftir ve sızan suyu akıtmak için drenaja sahiptir. Sertleştirilmiş şeridi enine kesite yapıştırmak için ankraj civatalarının zımbalanması engellenir ve mukavemet ve rijitlik için daha iyi performans gösterdiğini sonuçlarını elde edilmiştir.

Dejun Liu (2016) çalışmalarında, tünel kaplamasının eğilme direncini arttırmanın bir yolu olarak tekstil takviyeli betonun (TRC) etkinliği deneysel ve analitik olarak araştırılmıştır. TRC' nin eğilme direncini önemli ölçüde arttırdığını gösterilmiştir.

Jiang vd. (2017) çalışmalarında. FRP-PCM yönteminin bozulmuş tünel kaplamaları üzerindeki güçlendirme sonuçların tahmini araştırılmıştır. FRP-PCM yönteminin farklı sağlık derecelerine, zemin sınıflarına, gevşeme basıncına ve beton dayanımına sahip tünellere uygulanabilirliği araştırılmıştır. Farklı derecelerde FRP ızgaralarının performansı, daha yüksek kesme mukavemetinin olduğunu gösteren doğrudan kesme testi sonuçlarının karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır.

Kasimzade ve Tuhta (2017) çalışmalarında. OMA' nın CFRP ile güçlendirilmiş yapıların periyodunu ve rijitliğini değerlendirmek için kullanılabileceği gösterilmiştir.

Tuhta (2018) çalışmasında. Betonarme döşemelerin CFRP ile güçlendirilmesi ile binanın rijitliği artırıldığını gösterilmiştir.

Gora (2018) çalışmasında. cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) levhalarla sarılmış dikdörtgen betonarme kolonların eşmerkezli ve eksantrik yükleme altındaki davranışını simüle etmek için üç boyutlu bir sonlu eleman (FE) modeli geliştirilmiştir. FE analiz sonuçları, GFRP sargısının beton kopmasını geciktirerek güçlendirilmiş kolonların performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir.

Zhang vd.(2019) çalışmalarında, çelik-beton kompozit ile güçlendirilmiş tünel kaplamalarının betonarme bölümlerinin yapısal davranışı araştırılmıştır.

Hammoud ve Tuhta (2022) çalışmalarında, CFRP ile güçlendirilmiş betonarme tünelin modal parametreleri arasındaki farkları karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile (CFRP) olan ve olmayan durumun ilk 5 modu incelenmiştir. İlk 5 modun olduğu periyotlarda %7.86-%30.24 arasında iyileşmeler gözlemlenmiştir.

### **3. TÜNELLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER**

#### **3.1. Tarihçe**

Tarih öncesi çağlarda, insanoğlu ahşap ve kerpiç kullanmaya başlamadan önce sığınak olarak mağaraları seçmiş ve bu mağara sığınaklarını gerektiği gibi genişletmiş ve farkında olmadan da olsa yer altı kazılarına başlamıştır. Tünellerin ve diğer yeraltı yapılarının tarihi açılış sırası:

1) Sığınak, 2) Tapınak, 3) Maden Galerileri, 4) Su Temini ve Su Taşımacılığı, 5) Savaş Tüneli, 6) Taşıma Tüneli, 7) Kanalizasyon Yapısı, 8) Koruma, 9) Hidroelektrik Güç Elemanları, 10) Malzeme Rezervi Yapı, 11) Petrol ve gaz rezervlerinin yapısı da benzer şekilde genellenebilir. insanlar, mağaraların barınak olarak kullanılmasından sonra tapınak amaçlı ilk yeraltı yapılarını inşa ettiler. Mısır'daki Abu Simbel (MÖ 1200) ve Hindistan'daki Bhaj Tapınağı bu görüşü desteklemektedir. Burada, diğer ihtiyaçların yanı sıra korunmak için Göreme'de bir yeraltı şehrinin kurulduğunu söylemektedir. (Kum Fırtınası, 1963).

Bütün bu tünellerin açılmasında uygulanan yöntemler oldukça ilkel olmuştur. 1556 yılında Georg Bauer tarafından yazılan De Re Metallicas Georg' da anlatılan Agricola takma yapısındaki yöntem, uzun süredir kullanılan ve ortalama 350 yıldır yeraltı inşaatlarında kullanılan tünel açma yöntemini göstermektedir. Tarih öncesi çağlarda başlayan yeraltı kazıları konusundaki bilgisini yüzyıllar boyunca geliştirmiş ve bu birikimini tarihsel dönemlerde maden işlerinde ve savaş taktiği olarak kullanmaya başlamıştır. Mısırlılar ve Romalılar da sıklıkla su getirmek amacıyla tüneller açmışlardır.

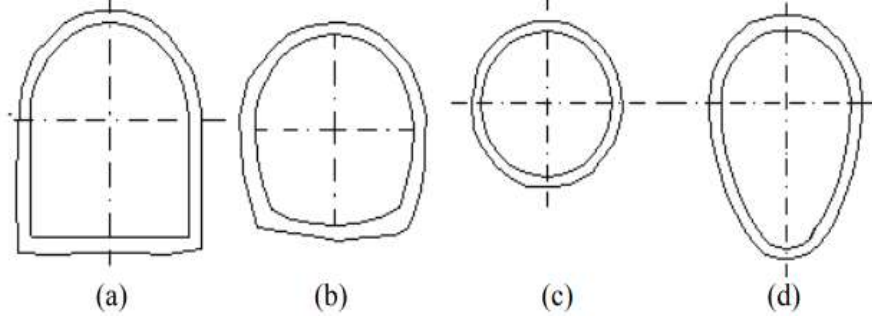
1823 ve 1843 yılları arasında tünel açma yöntemlerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Times nehri' nin altındaki geçen tünelde Fransız mühendis Brunel Patentli tarafından Bukli yöntemi ilk kez uygulanmıştır. Bu 4.20 m ve Bu 4.80 m çapında halen kullanımda olan ikiz tüneldir.

Yine bu zamanda Lord Cohrane' da sulu zeminlerde kuyu ve galeri açmak için basınçlı havadan yaralanma yöntemine ilişkin patentini 1830 tarihinde almıştır. Büyük tünellerin sayısının artması demir yollarının gelişmesiyle beraber olmuştur. Demiryollarında uygulanan eğimlerin küçük, yarıçaplarının ise büyük olması nedeniyle mühim tünellerin açılması zorunlu olmuştur. İlk demiryolu tünelinin 1826 da Fransa' da St. Etienne-Tere Noire hattı üzerinde açılmış olduğu iddia edilmektedir. Günden güne trafik yoğunluğunun artmasıyla işletme ekonomisi bakımından karayolu tünel inşaatı önem kazanmıştır. (Kökçüoğlu, 2006).

### **3.2. Tünellerin Sınıflandırması**

#### **3.2.1. Enkesitlerine Göre Sınıflandırma**

Tünellerin kesit türleri üzerinde buldukları ulaşım yolunun tipine ve bu yol tabanından gelen etkilere göre değişiklik göstermektedir. Tüneller genellikle dairesel bir kemer ve iki dikey yan duvardan oluşan enine kesitli kayalık topraklar üzerine inşa edilir (Şekil 3.1a). Yumuşak zeminlerde açılan tüneller yatay basınçları karşılayacak kesitlere sahip olmalıdır. (Şekil 3.1b ve 3.1c). Bu tür zeminlerde açılan tünel kesitlerinin tam daire veya at nalı şeklinde olması tercih edilir. (Beykont, 1951).



Şekil 3.1. Zemin türü ve kullanım amacına göre tünellerde kullanılan başlıca enkesit tipleri.

Dairesel kesitli tüneller teorik olarak iç ve dış kuvvetleri en iyi karşılayan tünellerdir. Öte yandan, en küçük çevreye sahip en büyük kesite de sahiptirler. Ancak bu avantajların yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Birincisi, karoların yuvarlak olmasıdır. Diğeri, erişim yolu için çok fazla dolgu gerektirdiğinden beton kaplamanın zorluğudur. Günümüzde at nalı şeklindeki kesit (bakınız Şekil 1b) kemerli ve dairesel kesitli şekiller arasındadır (bakınız Şekil 1a ve 1c) ve hem tasarım mühendisi hem de müteahhit tarafından diğerlerinden daha fazla tercih edilmektedir. Yeterince düz olduğu için kavisli kenarları ve tabanı da bir kayış gibi çalışır, böylece dış kuvvetleri daha iyi karşılayabilir. Yumurta şeklindeki kesitler (Şekil 1d), taşkın akışlarını, atık su ile geçen kombine kanalizasyon tünellerinde kullanılan kesitlerdir. Burada, aç-kapa yöntemli miyle yapılanlar ve su altı tünelleri dışında, örtülmesinin zorluğundan dolayı dikdörtgen kesitli tünellerin tercih edilmediğini belirtmek yerinde olacaktır. (Beykont, 1951).

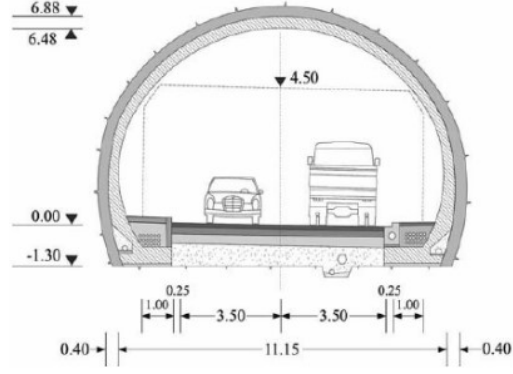
### 3.2.2. İşlevlerine Göre Sınıflandırma

Tünellerin işlevlerine göre sınıflandırılması aşağıda verilmiştir:

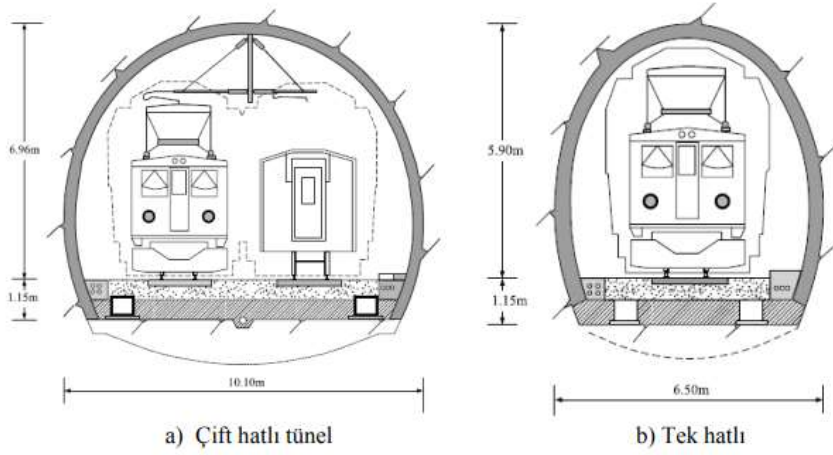
a) Barınak ve tapınak tünelleri.

b) demiryolu, Karayolu, metro ve su yolu gibi ulaşım tünelleri:

Karayolu ve demiryolu tünellerinin kesit örnekleri Şekil 3.2’ de ve Şekil 3.3’ te gösterilmektedir. metro ve kanal tünelleri ile ilgili olanlar Şekil 3.4’ te gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Karayolu tünellerine ilişkin tipik bir enkesit şekli



Şekil 3.3. Demiryolu tünellerine ilişkin tipik iki enkesit şekli.



Şekil 3.4. Metro ve kanal tünellerinden örnek bir görünüm

c) Maden galerileri:

Bu galeri, yeraltı cevherini yüzeye çıkarmak için açılır.

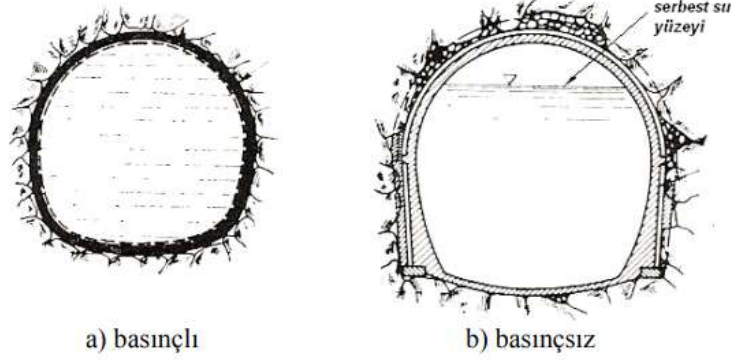
Bunların örnek bir görünümü Şekil 3.5' te verilmiştir.



Şekil 3.5. Maden galerilerine ilişkin örnek bir görünüm

d) Su iletim tünelleri:

Bu tüneller, suyu herhangi bir kaynaktan büyük şehirlere taşımak için inşa edilmiştir. Bu tip tünellerde su basınçlı veya basınçsız olarak iletilebilir. Bu nedenle, bu tür tünel kaplamaları, iç basınçlara ve üzerlerine etki eden diğer yüklere dayanmalıdır.

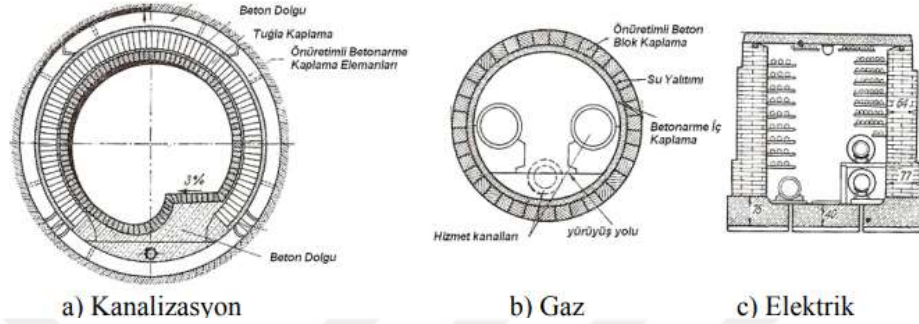


Şekil 3.6. Su iletim tüneli enkesit örnekleri

e) Kanalizasyon ve kamu hizmeti tünelleri:

Kanalizasyon tünelleri su iletim tünellerine benzese de genellikle yerçekimi akışına sahiptirler. Kaplamaların tasarımı buna göre yapılır ancak dayanıklılıkları için kanalizasyon suyunun yıkıcı etkilerine karşı gerekli tedbirlerin alınması kaçınılmazdır. (Öztürk, 2007).

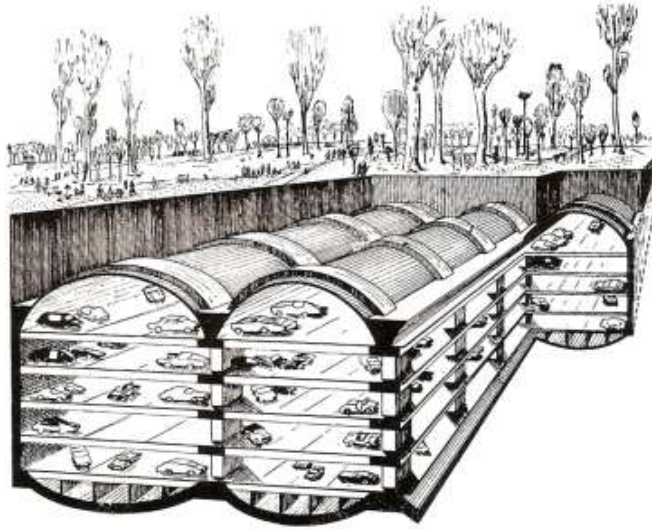
Elektrik, gaz, telefon ve diğ er iletim borularını içeren ve herhangi bir arıza durumunda arızaya ulaşımı kolaylaştırmak için yapılmış olan servis tünellerine servis tünelleri denir. Kesit örnekleri Şekil 3.7' de verilmiştir.



Şekil 3.7. Kanalizasyon ve bazı servis tünellerinin kesit örnekleri

f) Stokaj tünelleri:

Yeraltı yapıları çeşitli malzemeleri, atıkları ve radyoaktif maddeleri depolamak için kullanılır. Burada en önemli husus, envanter kalemlerinin özelliklerine göre gerekli tedbirlerin alınmasıdır. Şekil 3.8' de depolama için bir tünel otoparkını göstermektedir.



Şekil 3.8. Depolama amaçlı tünel tipi bir otoparkın görünüm

g) Korunma amaçlı tüneller.

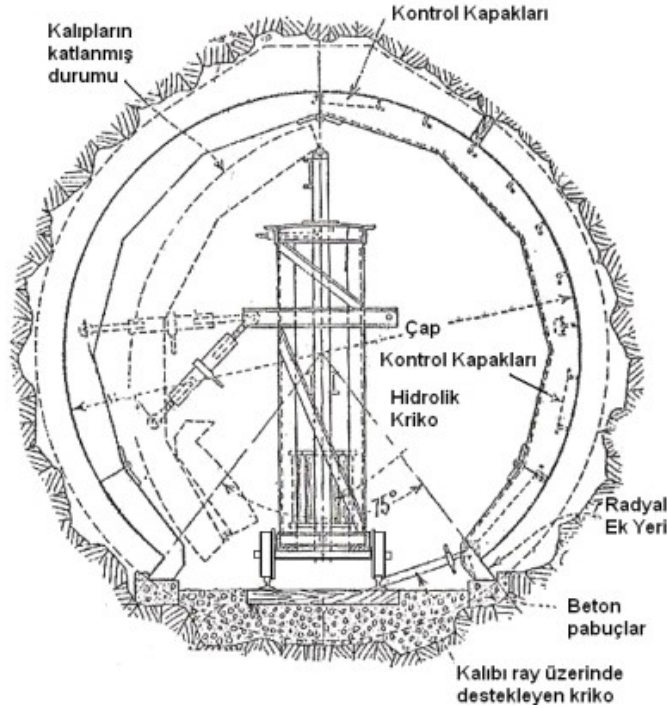
### 3.3. Tünel Kaplamaları

#### 3.3.1. Kaplama Çeşitleri

Sağlam kaya zeminler de dahil olmak üzere tüm zeminler üzerine inşa edilen tüneller, genel olarak mukavemet, dayanıklılık, süneklik ve rijitlik, özellikle yeterli stabilite kazandırmak için kaplanır.

##### 3.3.1.1. Dökme Beton Kaplamalar

Dökme beton kaplamalar, hem kaya aynı zamanda yumuşak zemin üstüne inşa edilen tünellerde çoğunlukla kullanılan bir kaplama türüdür. Plastisitesi yardımıyla kalıp ile zemin arasına yerleştirmeyi sağlar ve düz bir yüzey oluşturulabilir. Günümüzde gelişmiş vasıta ve gereçler yardımıyla rahat oldukları için kullanımları artmıştır. Alt geçitlerde olduğu gibi, aç-kapa yöntemiyle meydana getirilen tünel kaplamaları ve su altı tünel kaplamaları, koşullar kalıp yapımını ve betonun kalıba yerleştirilmesini kolaylaştırdığı için dökme beton ile yapılır. (Öztürk, 2007).



Şekil 3.9. Tüm bölümün tek seferde beton dökülmesini sağlayan kalıp şeması

### **3.3.1.2. Püskürtme Beton Kaplamalar**

Püskürtme beton, onarım veya inşaat için önceden kuru veya ıslak olarak hazırlanabilen ve binanın uygulama yüzeyine veya uygulama alanına yüksek hızda hava basıncı ile püskürtülen betondur. (TS 11747, 1995).

Tünel kaplamalarında püskürtme betonun tercih edilme nedenleri aşağıda özetlenmiştir:

1) Tünel zeminin gevşemesi nedeniyle, yer değiştirmeler, boşlukları (çatlaklar, derzler vb.) doldurarak kaya kütlelerinin rijitliğini ve mukavemetini artırmak, kaya kütlelerinin yüklerini bitişik duraylı kayalara aktarmak ve bir kabuk gibi hareket etmek, onları mümkün olduğunca durdurmak veya azaltmak.

2) Hafriyat yüzeyinin su ve havanın bağıl nemine karşı yalıtılarak bozulmaya karşı korunması.

3) Hızlı ve kolay uygulama

### **3.3.1.3. Prefabrike Kaplamalar**

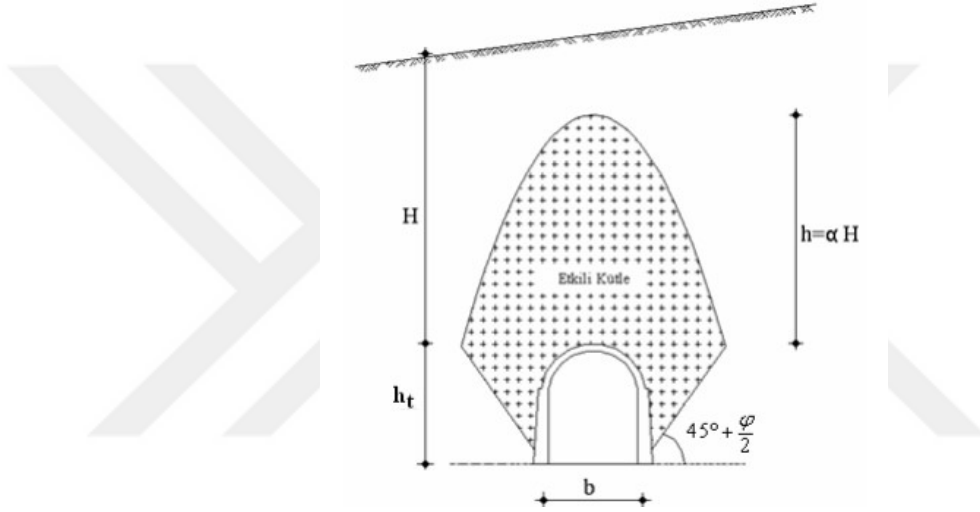
Bu kaplamalar için hafriyat cihazının ardından kısa sürede prefabrik elemanlar yerleştirilerek kapalı bir form verilir ve bağlantılar yapılır. Bu tip kaplama özellikle yerleşimlerde zemin kütlelerinin tünel üzerine oturmasını önemli ölçüde azaltır. Günümüzde çok çeşitli prekast kaplamalı elemanlar mevcut olmasına rağmen, en yaygın olarak kullanılanları prekast betonarme ve fiber donatılı betondan yapılan kaplamalı elemanlardır. Nadir durumlarda, bu amaçla yumuşak dökme demir ve çelik kaplamalar da kullanılır. Prefabrik elemanların takviyesi, üst ve alt paspaslardan ve bunlara kaynaklı etriyelerden oluşur. Üretimi özel ekipman ve kalifiye işçi gerektiren bu elemanların beton kaplamasının montaj ve nakliye sırasında zarar görebileceğine, çelik fiber prefabrik beton elemanlarda ise böyle bir problemin olmayacağına burada dikkat edilmelidir. Teknik anlamda çelik liflerin beton içerisinde homojen dağılımı sayesinde prefabrike elemanların birleşim yerleri de güçlendirilmektedir. (Gökçe, 2015).

### 3.3.2. Kaplamalara Etkiyen Yükler

#### 3.3.2.1. Zemin Yükleri

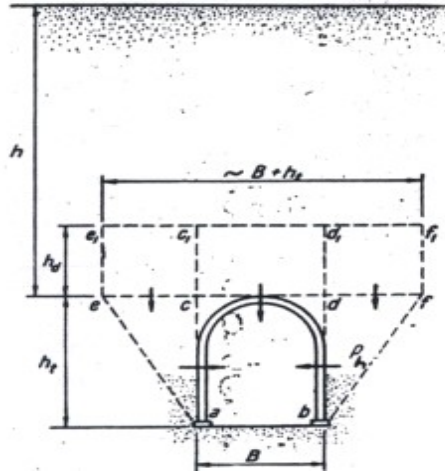
##### a) Düşey Yüklerin Belirlenmesi

Bierbaumer Teorisi: Bu teoriye bakılırsa tünel kaplamasına etkiyen düşey yük,  $H$  tünel üstündeki zemin örtü kalınlığını,  $\alpha$  bir katsayıyı işaret etmek suretiyle yüksekliği  $h = \alpha \cdot H$  olan bir parabol tarafından sınırlanan zeminin kütesinin ağırlığı olarak dikkate alınmaktadır. (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Bierbaumer teorisine göre tünel kaplamalarına etkiyen yükler belirlenirken zemin kütesi

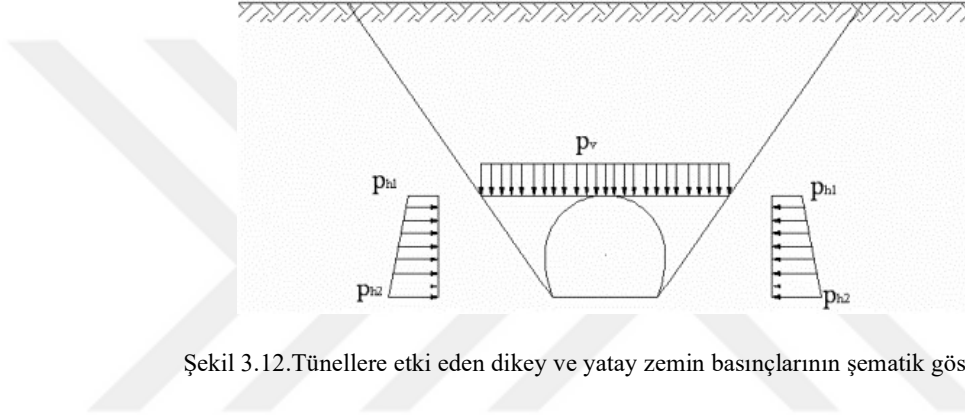
Terzaghi Teorisi: Terzaghi, kum ve kaya zeminler için yaptığı araştırmalarda, kaplamaya bindirmelerin Şekil 3.11’ de görüldüğü gibi ve ilgili ( $h_d$ ) yükseklikleri (tünele etki eden zeminin yüksekliği) çizelgelerde verilmiştir. (Öztürk, 2014).



Şekil 3.11. Terzaghi’ ye göre kesit

### b) Yatay Yüklerin Belirlenmesi:

Tünellerin tasarımında düşey yükler ile birlikte yatay yükler de dikkate alınmalıdır. Tünele yatay basınçlar; Tünelin kesit şekline, boyutlarına, açıldığı yerin mekanik özelliklerine ve iksanın yatay kuvvetlere karşı direncine bağlıdır ve bunden dolayı hesaplamaları düşey basınçlardan daha karmaşıktır. Teknik literatürde yatay basınçların tünel tavanına tesir eden düşey basınçların 1/4 ile 1/3' ü içinde değişmiş olduğu sadece birtakım hususi durumlarda bu durumun düşey basıncın birkaç katı olabileceği belirtilmektedir. (Öztürk, 2007).



Şekil 3.12. Tünelere etki eden dikey ve yatay zemin basınçlarının şematik gösterimi

Rankine' nin teorisine göre, kohezyonlu zeminlerde tünel tavan seviyesindeki yatay basınç:

$$p_{h1} = H \cdot \gamma \cdot \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \sqrt{\tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right)}$$

bağıntısıyla,

taban

seviyesinde

ise:

$$p_{h2} = (H + h_1) \cdot \gamma \cdot \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \sqrt{\tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right)}$$

bağıntısıyla hesaplanması gerekmektedir. (Öztürk, 2007)

### 3.3.2.2. Hareketli Yükler

#### a) Tünel İçinden Etkiyenler

Tünel içerisinde hareket eden araçlar veya taşınmakta olan malzeme nedeniyle tünele etkiyen hareketli yükler, dışarıdan gelen yer ve su basıncından daha küçük bir sırada kalmaktadır. Tünelden geçen bu yükler ters yönde olduğundan dış yükleri azaltırlar. ancak bazı durumlarda tünelin içinden gelen hareketli yükleri dikkate almak daha sakıncalı olabilir.

#### b) Örtü Zemini Yüzeyinden Etkiyenler

Yer örtüsü üzerindeki yapılar ve/veya araçlar sığ tünellerde ek yük görevi görür. Kaplama zeminin kalınlığı 8 m' den fazla ise ek yüklerin ihmal edilebileceği teknik literatürde belirtilmelidir. (Öztürk, 2007).

### 4. FRP' NİN TANIMI

FRP (elyaf takviyeli polimer) olarak anlatılan lif takviyeli polimerler; Yüksek mukavemetli lifler, plastik esaslı bağlayıcı reçine matrisi ve muhtelif katkı maddelerinin bir araya gelmesiyle oluşan ve bütün dünyada yaygın olarak kullanılan yeni nesil bir takviye malzemesidir. Bu malzemelerin çoğunlukla kullanılan çelik levha-plaka takviyesine bakılırsa en büyük avantajı, korozyona dayanıklı olmalarıdır. Ayrıca birçok dış etkene metallere göre daha dayanıklıdırlar. Hafif, ince, süratli ve uygulaması pratik olan bu uzun ömürlü malzemeler, liflerin hizası değiştirilerek ayarlanabilmekte ve mukavemetleri ayarlanabilmektedir, ve beton ve çeliğin giremediği bölgelere girebildiği için güçlendirmede büyük avantaj sağlar. (Aytaç, 2011). Kolon ve kirişlerin güçlendirilmesi amacıyla kirişlerin alt yüzeylerine yapıştırılan çelik levhaların çelik yapılarda kullanılan çelik profillerden hiç bir farkı yoktur. Çelik levhalar beton yüzeye epoksi tipi yapıştırıcı ile uygulanır. Burada mühim olan çelik levhayı betona yapıştıran malzemenin özellikleridir. Çelik levhaların betonarme yüzeylere yapıştırılmasıyla meydana getirilen güçlendirmede iki temel sıkıntı vardır. Biri, havaya maruz kalan çelik levhaların kısa müddette paslanması; öteki ise ağır çelik levhayı yapıştırmada kullanılan malzeme sertleşinceye kadar hususi iskele sistemleri ile desteklemektir. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için çelik levhalar yerine, yüksek çekme dayanımlı liflerden dokunmuş ve epoksi ortam içerisine alınmış özel bileşik kumaşlar kullanılmaktadır. Sentetik kumaşlar, yüksek mukavemetli liflerden oluşturulmuş bir malzemedir. Bu dokular polimer, epoksi vb. ve betonarme elemanlara empenye edilerek yapıştırılır. Kumaşlar inceliklerinden ötürü mevcut betonarme elemanların etrafına sarılarak betonarme elemana sürekli olarak yapıştırılabilmektedir. Kısaca betonarme elemanların (kolon, kiriş, döşeme) basınç ve/yada eğilme dayanımını artırmak için etkin olarak kullanılacak bu malzemelerle yapılacak güçlendirme işlemleri, mevcut depremde uygulanabilir güçlendirme içinde gösterilmektedir. Ülkemizdeki yönetmelik ve yöntemin hesaplama şekilleri sunulmuştur. (Aytaç, 2011).

#### 4.1. FRP Tarihçesi

Modern kompozit çağı, bilim adamlarının plastikleri geliştirmesiyle başladı. O zamana kadar, bitki ve hayvanlardan elde edilen doğal reçineler, tek yapıştırıcı ve bağlayıcı kaynağıydı. 1900'lerin başında vinil, polistiren, fenolik ve polyester gibi plastikler geliştirildi. Bu yeni sentetik malzemeler, doğadan türetilen tekli reçinelerden daha iyi performans gösterdi. ancak plastikler tek başına bazı yapısal uygulamalar için yeterli gücü sağlayamadı. 1935'te Owens Corning, ilk cam elyafı olan cam elyafını tanıttı. Fiberglas, plastik bir polimer ile birleştirildiğinde, aynı zamanda hafif olan inanılmaz derecede güçlü bir yapı oluşturdu. Bu, Elyaf Takviyeli Polimerler (FRP) endüstrisinin başlangıcıdır. Kompozitlerdeki en büyük ilerlemelerin çoğu, savaş zamanının ihtiyaçlarının sonucuydu. Moğolların kompozit yayı geliştirmesi gibi, II. Dünya Savaşı da FRP endüstrisini laboratuvarlardan gerçek üretime girdi. Mühendisler kısa sürede kompozitlerin hafif ve güçlü olmanın ötesindeki diğer faydalarını fark ettiler. Örneğin, fiberglas kompozitlerin radyo frekanslarına karşı şeffaf olduğu keşfedildi ve malzeme kısa sürede elektronik radar ekipmanını (Radomlar) korumak için uyarlandı. İkinci Dünya Savaşı'nın sonunda, küçük bir niş kompozit endüstrisi tüm hızıyla devam ediyordu. Askeri ürünlere olan talebin azalmasıyla birlikte, birkaç kompozit yenilikçisi artık iddialı bir şekilde diğer pazarlara kompozitleri tanıtmaya çalışıyordu. İlk kompozit ticari tekne gövdesi 1946'da tanıtıldı. Bu sırada genellikle "kompozitlerin dedesi" olarak anılan Brandt Goldsworthy, sporda devrim yaratan ilk fiberglas sörf tahtası da dahil olmak üzere birçok yeni üretim süreci ve ürünü geliştirdi. Goldsworthy, ayrıca, güvenilir şekilde güçlü fiberglas takviyeli ürünlere izin veren bir süreç olan, pultrüzyon olarak bilinen bir üretim sürecini de icat etti. Günümüzde bu işlemden üretilen ürünler arasında merdiven korkulukları, alet tutamakları, borular, ok milleri, zırhlar, tren zeminleri ve tıbbi cihazlar bulunmaktadır. 1970'lerde kompozit endüstrisi olgunlaşmaya başladı. Daha iyi plastik reçineler ve geliştirilmiş takviye lifleri geliştirildi. Dupont, yüksek gerilme mukavemeti, yüksek yoğunluğu ve hafifliği nedeniyle vücut zırhında tercih edilen ürün haline gelen kevlar olarak bilinen bir aramid elyaf geliştirdi. Karbon fiber de bu zamanlarda geliştirildi; giderek daha önce çelikten yapılmış parçaların yerini almıştır. Kompozit endüstrisi hala gelişmeye devam ediyor ve büyümenin çoğu artık yenilenebilir enerjiye odaklanıyor. Özellikle rüzgar türbini kanatları, sürekli olarak

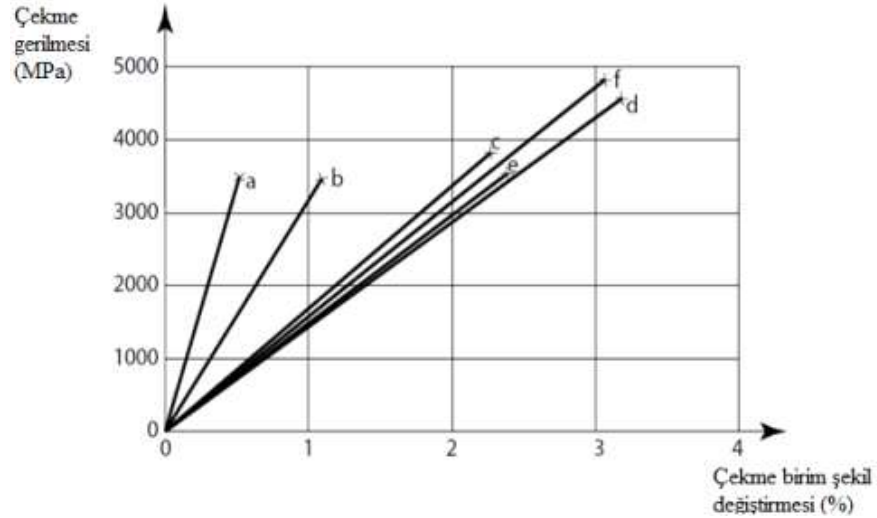
boyutların sınırlarını zorlamakta ve gelişmiş kompozit malzemeler gerektirmektedir. Bu konuda malzeme araştırmaları devam etmektedir.

#### 4.2. Lifler

Takviyede kullanılacak FRP kompozitler, inşaat sektöründe tasarım kolaylığı, farklı fiziksel değerler için farklı kompozit malzemelerin kullanılabilme imkanı, uygulama ve kullanım kolaylığı gibi imkanlar sunmaktadır. Uygulandıkları yapı ve yapı elemanındaki dinamik yüklerden yük taşıma kapasitesini artırma, dayanıklılığı artırma, yorulma direncini güçlendirme gibi fırsatlar sunar. (Alihassan, 2021).

FRP malzemelerindeki ana yük taşıyan bileşen liflerdir. Lifler, dayanıklı, sert ve hafif oldukları için polimerik kompozitlerde kullanılır. En sık kullanılan elyaf türleri cam, karbon ve aramid esaslı olanlardır. Son zamanlarda bazalt lifleri de ticari olarak mevcuttur. Tüm bu lifler, çekme yükü altında herhangi bir akma göstermeden kırılana kadar lineer elastik davranış sergilerler.

Kullanım ve çevre koşullarına göre en uygun elyaf seçilebilir. Karbon ve aramid lifleri ana yönlerde farklı mekanik ve ısıl özellik değerlerine sahip yani anizotropik, cam lifleri ve bazalt lifleri ise izotropiktir.



Şekil 4.1. Güçlendirici liflerin gerilme-birim grafiği

a) karbon (yüksek modüllü); b) karbon (yüksek dayanımlı); c) aramid; d) s-cam; e) e-cam; f) basalt. (Gökçen, 2019).

#### 4.2.1. Cam Lifleri

Cam elyaflar, polimerik matrisli kompozitler için en yaygın olarak kullanılan takviye elyaflarıdır. İmalat sırasında, cam elyafın bir bağlayıcı ile kaplanması, ara bağlantıda esnek bir katman sağlayarak bağın gücünü artırır ve malzemedeki boşlukların sayısını azaltır. En yaygın cam elyafları E-cam, S-cam ve alkaliye dayanıklı camdan yapılan tiplerdir. E-glass, tüm cam türleri arasında en ekonomik olanıdır ve fiber takviyeli plastik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

kullanım alanına sahiptir. S-cam, E-camdan daha yüksek çekme mukavemetine ve elastisite modülüne sahiptir. ancak S-glass' ın yüksek maliyeti, Ecam' dan daha yaygın olarak kullanılmasını engellemiştir. Çok yüksek sıcaklıklara, kimyasal korozyona veya zamana bağlı yüklere maruz kaldığında cam elyafların çekme mukavemeti azalır. (Gökçen, 2019).

#### 4.2.2. Karbon Lifleri

Mukavemeti (3000–5000 N/mm<sup>2</sup>) ve elastisite modülleri (230000–300000 N/mm<sup>2</sup>) oldukça yüksektir. Özgül ağırlıkları 1.9 g/cm<sup>3</sup> 'tür.

Bu lifler genellikle önce poliakrilanitril (PAN) polimerlerinin liflere dönüştürülmesi, ardından çekme gerilmeleri altında oksidasyon ve karbürasyon işlemlerinin uygulanmasıyla elde edilir. Karbürizasyon sıcaklığı 1000-3000°C arasında değişmekte olup, yüksek sıcaklıkta üretilenlerin elastik modülleri daha yüksektir. Bununla birlikte, çekme mukavemeti 1500°C civarındaki bir maksimum değer üzerinde azalmaktadır. Yüksek elastisite modülüne sahip karbon fiberlere grafit de denir.

#### 4.2.3. Aramid Lifleri

Aramid, en düşük özgül ağırlığa ve en fazla Yüksek özgül mukavemete (kuvvet/özgül ağırlık) sahiptir.

Günümüzde kullanılan aramid elyaf türleri şunlardır:

- Kevlar 29 (maksimum darbe ve hasar toleransına sahip kompozitler için)
- Kevlar 49 (genellikle takviye edici plastiklerde)
- Kevlar 149 (Mevcut tüm aramid elyafların en yüksek çekmesi olan modül)

Kevlar liflerinin basınç dayanımı, çekme dayanımının %20' sinden azdır. Kevlar 49, çekmede gevrek bir davranışa sahiptir ancak basınç yükü altında süneklik

ve büyük miktarda enerji emer. Düşük sürünme özelliğine sahiptir. Yüksek sıcaklıklara karşı direnci diğer liflere göre daha yüksektir. Sıcaklık arttıkça çekme mukavemeti ve modülü doğrusal olarak azalır. Bununla birlikte, 180 derecede orijinal güçlerinin %80' inden fazlasını korurlar. Kevlar lifleri su emme özelliğine sahiptir. Su emme miktarı lif tipine göre değişir. UV ışınlarına karşı hassastır. Birçok kimyasala dayanıklıdır. Köprü kolonlarını güçlendirmek ve yapıları patlamaya karşı korumak için kullanılır. (Alihassan, 2021).

#### 4.2.4. Bazalt Lifleri

Bazalt lifleri, cam liflerinden daha iyi fiziksel mekanik özelliklere sahip olan, ancak karbon liflerinden önemli ölçüde daha ucuz olan, ezilmiş volkanik lav kalıntılarının eritilmesiyle elde edilen tek bileşenli malzemelerdir. Başlıca avantajları yangına dayanıklılık, titreşim ve ses yalıtımı, kimyasal maddelere karşı dayanıklılık olarak sıralanabilir. (Alihassan, 2021).

#### 4.3. Matriks

Lifleri saran ve onları bir arada tutan malzemedir. Matrisin ana görevi, stresleri liflere aktarmaktır. Bunun dışında lifleri dış etkenlerden (nem, kimyasallar ve oksidasyon) korur. Matris olarak genellikle termoset polimerler kullanılır. Örneğin, epoksi polyester, vinylester, fenolik gibi. (Aytaç, 2011).

Tablo 4.1. Termoset matrislerin genel özellikleri (fib Uluslararası Beton Federasyonu vd., 2007)

Özellikler	Polyester	Epoksi	Vinil ester
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	1200-1400	1200-1400	1150-1350
Çekme dayanımı (MPa)	34.5-104	55-130	73-81
Boyuna modül	2.1-3.45	2.75-4.10	3.0-3.5
Poisson oranı	0.35-0.39	0.38-0.40	0.36-0.39
Termal genişleme katsayısı (106/°C)	55-100	45-65	50-75
Nem içeriği (%)	0.15-0.60	0.08-0.15	0.14-0.30

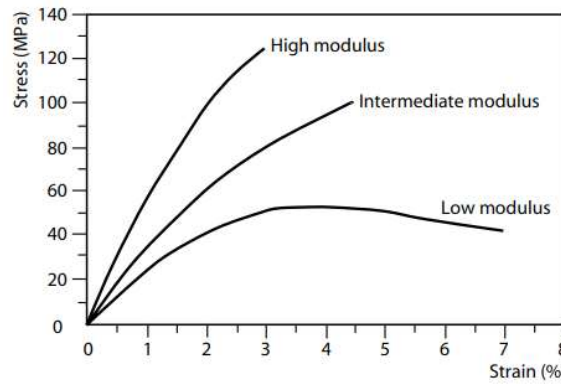
### 4.3.1. Epoksi

Epoksi reçine terimi, molekül başına ortalama birden fazla epoksi grubu içeren bileşiklerin halka açma polimerizasyonu ile hazırlanan bir termoset reçine sınıfını tanımlar. Liflerin eklenmesinden önce, polimerizasyonu başlatmak için sıvı reçineye az miktarda reaktif sertleştirme maddesi eklenir. Çapraz bağlantılar oluşur ve epoksi sıvı reçine asolid malzemeye dönüşür. Çapraz bağların yoğunluğu, başlangıç reçinesinin kimyasal yapısına, sertleştirme ajanına ve reaksiyon koşullarına bağlıdır. Kürlenme işlemi sırasında oluşan çapraz bağlar, katı epoksinin nihai özelliklerini belirlemede önemli bir role sahiptir. Çapraz bağlantıların yoğunluğu arttıkça çekme modülü ve çekme mukavemeti, termal kararlılık ve kimyasal direnç iyileşir. Öte yandan, kırılma tokluğu ve gerinim-dökülme azalır.

Çeşitli fenolikler ve aromatik aminler ile yüksek performanslı epoksiler hazırlanmıştır. Epoksi reçineler kısmen kürlenebilir; böylece takviye, sıvı reçine ile önceden emprenye edilebilir ve bir ön emprenye vermek üzere kısmen kürlenebilir.

Epoksi reçinelerin başlıca avantajları, yüksek mekanik özellikler, kolay işlenebilme, kürlenme sırasında düşük büzülme (yapıştırıcı olarak kullanıldığında iyi bağ özelliklerine yol açar) ve iyi olmasıdır.

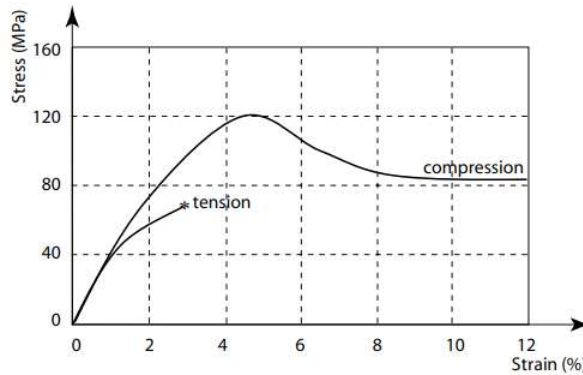
Çok çeşitli liflere yapışma. Epoksiler yüksek korozyon direncine sahiptir ve diğer polimerik matrislere göre su ve ısıdan daha az etkilenir. Bu tür reçinelerin kürlenmesi, 5°C ile 150°C arasında değişen sıcaklıklarda gerçekleştirilebilir. Epoksi reçineler, geniş bir sertlik aralığına ve diğer mekanik özelliklere Şekil 4.2' de karşılaştırılmıştır. (fib Uluslararası Beton Federasyonu vd., 2007).



Şekil 4.2. Farklı modüle sahip epoksi matris reçinelerinin gerilme-gerinim eğrileri

### 4.3.2. Polyester

Genel amaçlı polyester doymamış reçineler olarak adlandırılanlar, doymuş diasit olarak ortoftalik veya izoftalik asit ve doymamış diasit olarak fumarik olmak üzere etilen glikol kullanılarak yapılır. Diasit seçimine bağlı olarak çok çeşitli polyesterler mevcuttur. Polyesterlerin esnekliği, diasit ve diol seçimi ile kontrol edilebilir. Nispeten esnek polyesterler, yüksek oranda alifatik öncülerden üretilir; artan cam geçiş sıcaklıklarına sahip yüksek modüllü (sert) polyesterler, büyük miktarlarda aromatik diasitlerle ve/veya aromatik diollerle kombinasyonlardan elde edilebilir. Polyester reçineler, bir reaktif içinde çözünen doymamış polyesterlere dayalı düşük viskoziteli sıvılardır. monomer, örneğin stiren. Organik peroksit gibi ısı ve bir serbest radikal başlatıcının eklenmesi, düşük viskoziteli çözeltiyi üç boyutlu bir ısıyla sertleşen matrise dönüştüren bir çapraz bağlanma reaksiyonu ile sonuçlanır. Çapraz bağlama, peroksitler ve uygun aktivatörler kullanılarak oda sıcaklığında da gerçekleştirilebilir. Polyester reçineler, iyi UV direncine sahip olacak ve dış mekan uygulamalarında kullanılmak üzere formüle edilebilir. 30 yıldan fazla bir süredir kullanılmakta olan, sadece bazı renk bozulmalarından ve küçük mukavemet kayıplarından etkilenen birçok cam elyaf takviyeli polyester yapı vardır. Üstün dayanıklılık ve lif erozyonuna karşı direnç, stiren metil metakrilat (MMA) ile desteklendiğinde elde edilebilir. Polyester reçinelerin yanma direnci, gerekli direnç derecesine bağlı olarak, dolgu maddeleri veya özel olarak formüle edilmiş alev geciktirici polyester reçine kullanılarak elde edilebilir. Halojenleri bir polyester reçineye dahil etmenin, yangın geciktiriciliği iyileştirmenin etkili bir yolu olduğu bulunmuştur. Polyester reçineler, korozyon direnci gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. (fib Uluslararası Beton Federasyonu vd., 2007).



Şekil 4.3. Genel amaçlı polyester reçine için gerilim-gerinim eğrileri

### 4.3.3. Vinil Ester

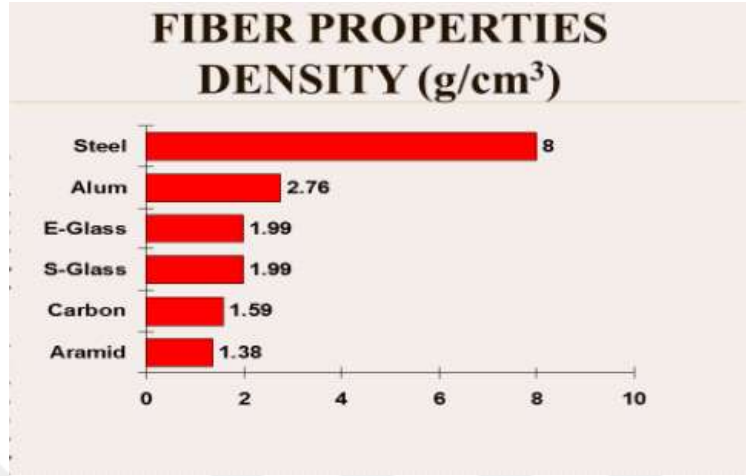
Vinil esterler, metakrilat ve akrilat bazlı reçinelerdir. Bazı varyasyonlar üretilen ve ester köprü grupları içerir. Kimyasal yapıları nedeniyle bu reçineler daha az çapraz bağa sahiptir ve polyesterlere göre daha esnektir ve daha yüksek kırılma tokluğuna sahiptir. Ayrıca cam elyaflarla güçlendirildiğinde çok iyi ıslanma ve iyi yapışma özelliklerine sahiptirler. Özellikleri, epoksi reçinelerin ve polyesterlerin özelliklerinin iyi bir kombinasyonudur ve onları cam elyaf takviyeli kompozitlerin üretimi için tercih edilen seçim haline getirir. (fib Uluslararası Beton Federasyonu vd., 2007).

### 4.4. Kompozit

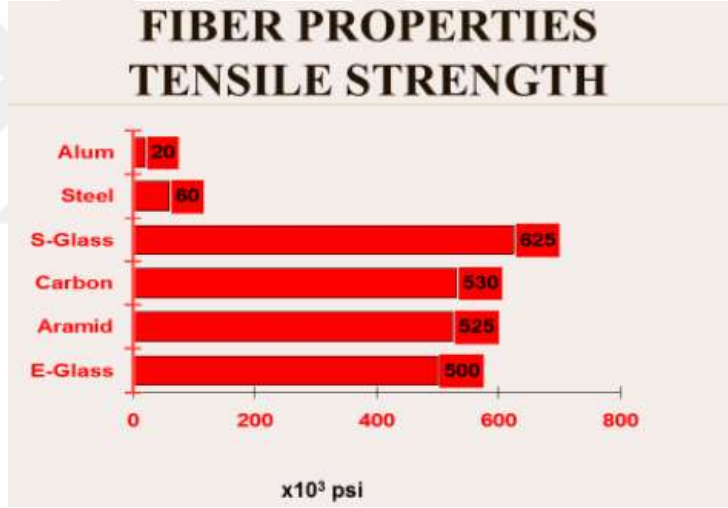
Kompozit malzeme, matris ve liflerin bir araya gelmesiyle oluşur. Lifler sürekli veya süreksiz olabilir. Sürekli lifler bir yönde veya iki dikey yönde yönlendirilebilir. Betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılan kompozitlerde kalınlık küçüktür ve lifler düzleme paralel olarak yer alır. Süreksiz liflerdeki oryantasyon düzlemde rastgele olabilir. Bazı kompozitlerde tüm lifler ana eksene paralel olarak yönlendirilir, bu kompozitlerin bu doğrultudaki verimleri maksimumdur. ancak, yalnızca matris liflere dik yönde çalışır; bu nedenle, mekanik özellikler büyük ölçüde azalır.

Bazı kompozitlerde lifler iki dik yönde ( $0^{\circ}/90^{\circ}$ ) bulunabilir. (Aytaç, 2011).

Özetle; matris fazı içine konan fiberler mükemmel bir mikro yapıya sahip yük taşıyabilen elemanlardır. Bu fiberler çeşitli maddelerden üretilirler. Yüksek sıcaklıklarda üretilen cam, karbon ve aramid benzeri malzemeler endüstride çeşitli işlemlerden geçirilerek lif haline getirilir. Bunlar mikron kalınlıkta liflerdir. Çekme dayanımları bir hayli yüksektir. Bu lifler reçinelerle, katkı maddeleri yardımı ile iyi aderans sağlarlar. Bu üç malzeme yanında çelik ve alüminyumun yoğunlukları ve çekme mukavemetleri Şekil 4.4' te ve Şekil 4.5' te karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.4. Lifli polimerlerin ve alüminyum ve çeliğin yoğunluklarının karşılaştırılması



Şekil 4.5. Lifli polimerler, alüminyum ve çeliğin kesme mukavemeti karşılaştırması

Bu üç elyaf türü de kuvvetli, sert ve devamlı biçimde üretilebilmektedirler. (Alihassan, 2021).

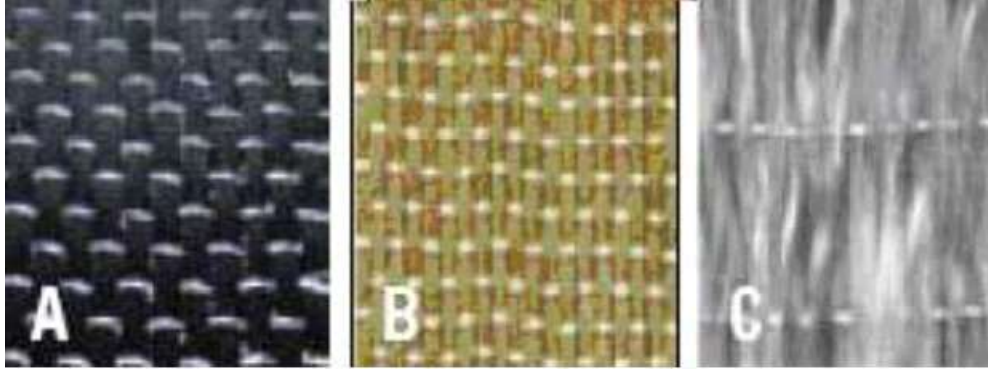
Fiber kompozitlerin çalışmasını etkileyen başlıca faktörler şunlardır;

Elyaf Yönü

Uzunluk

Liflerin mekanik ve fiziksel özellikleri

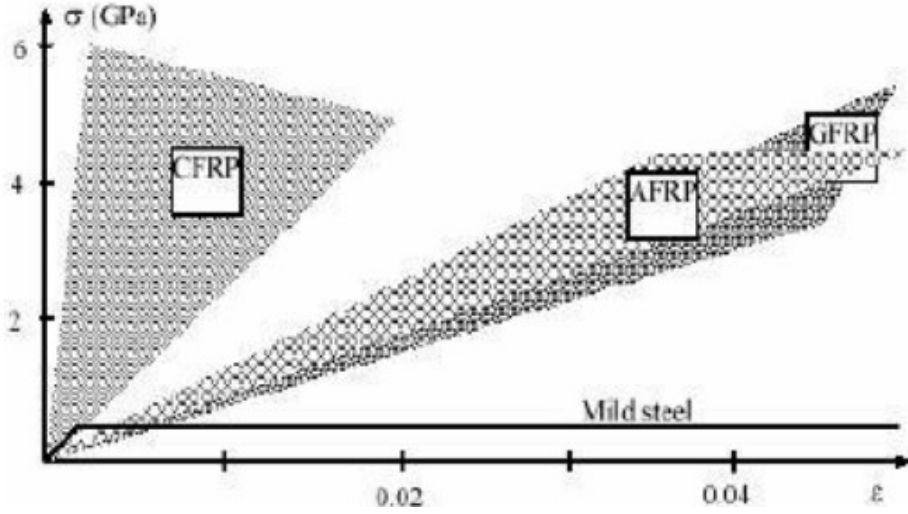
Reçinelerin mekanik özellikleri Reçineler ve elyaf arasındaki aderans ve bağ gücü.



Şekil 4.6. Yaygın elyaf türleri (karbon, aramid ve cam)

#### 4.5. (FRP) Çeşitleri ve Genel Özellikleri

Daha önce de açıklandığı gibi yapıda en çok kullanılan frp türleri; karbon elyafı, aramid elyafı, cam (cam) elyafı 3 başlık altında toplanabilir. FRP'lerin stres-gerinim grafiği Şekil 4.7' de verilmiştir.



Şekil 4.7.FRP'lerin gerilme-şekil değiştirme grafiği

FRP'lerin fiziksel ve mekanik özellikleri tablo 4.2.'de gösterilmektedir. (Alihassan, 2021).

Tablo 4.2. FRP' lerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiber Tipi	Elastisite Modülü (GPa)	Sınır Gerilme MPa	Uzama Miktarı (%)
Karbon			
Dayanımlı	220-240	3790-4820	1.4
Aşırı Yüksek Dayanımlı	220-240	4820-6200	1.5
Yüksek Modül	340-520	1720-3100	0.5
Aşırı Yüksek Modül	520-690	1380-2400	0.2
Glass			
E-glass	69-72	1860-2680	4.5-5.4
S-glass	86-90	3440-4140	
Aramid			
Genel Amaçlı	69-83	3440-4140	2.5
Yüksek Performans	110-124	3440-4140	1.6

FRP Matrislerinin tipleri ve özellikleri tablo 4.3' te verilmektedir.

Tablo 4.3. FRP.leri oluşturan matrislerin özellikleri

	Matris Tipleri			
	Polyester	Fenolik	Vinylester	Epoksi
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	1200	1200	1150	1100-1400
Çekme Dayanımı (MPa)	50-60	50-40	70-80	50-90
Elastisite Modülü (GPa)	3.0	3.0	3.5	3.0
Kırılmadaki Uzama (%)	2.0-3.0	1.0-2.0	4.0-6.0	2.0-8.0

Tablo 4.4. FRP.lerin ve çeliğin yoğunlukları (kg/m<sup>3</sup>)

Çelik	GFRP	CFRP	AFRP
7900	1200-2100	1500-1600	1200-1500

Yapılacak uygulamalara göre kullanılacak liflerin seçiminde çeşitli faktörler rol oynamaktadır. Bunlar; yapı tipi, beklenen yükleme, çevresel koşullar. Kısaca açıklamak gerekirse; Cam elyaflar çokça kullanılacak takviye edici elyaflardır. Diğer liflere göre ucuz olmasına rağmen işlenme özellikleri de oldukça iyidir. Karbon fiberler, yüksek dayanıklılık ve yüksek sertlik elde etmek için en yaygın olarak

kullanılan takviye malzemesidir. Aramid lifleri çok sıkı organik sentetik liflerdir. Karbon ve aramid lifleri birçok kimyasal etkiye dayanıklı iken, cam lifler alkaliler tarafından çeşitli etkilere maruz kalmaktadır. Cam ve karbon lifleri ultraviyole radyasyondan etkilenmez. Bununla birlikte, aramid lifleri, ultraviyole ışık altında renk değişimine ve mukavemet azalmasına maruz kalır. Aramid ve cam elyafları iletken değildir ancak karbon fiber iletkenliğe sahiptir. Karbon ve cam elyafların basınç dayanımı, çekme dayanımına çok yakındır. Aramid' in basınç dayanımı, çekme dayanımından oldukça düşüktür. Karbon, aramid ve cam elyafların toksik etkisi tehlikesi olmayan ve kirlilik açısından tehlikeli olmayan malzemelerdir. (Alihassan, 2021).

#### **4.5.1. Karbon Fiberler**

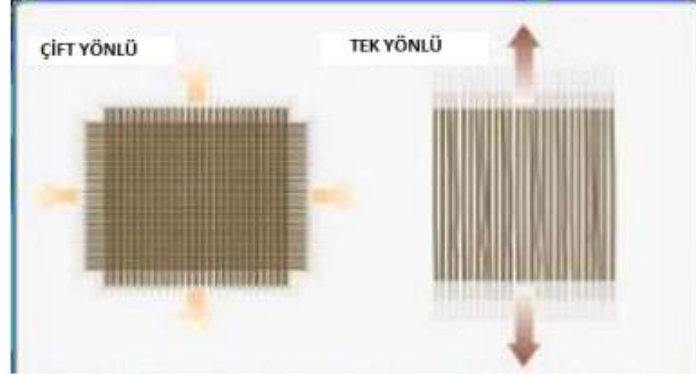
Karbon fiberler yüksek elastikiyet modülüne ve çekme mukavemetine sahiptir. Grafit levhalar karbon fiber eksenine paralel olarak yönlendirildiğinde mukavemet en yüksek değerine ulaşabilir. Bu nedenle, bu liflerin mukavemeti çok daha yüksektir. Ayrıca bu lifler tasarım malzemesi olarak kullanılmaktadır. (Ziada, 2019).

#### **4.5.2. Cam Fiberler**

Bu liflerin adı kaynaklarda GFRP veya CTP olarak geçmektedir. Genel olarak cam elyafı genel amaçlı elyaflar ve özel amaçlı elyaflar olmak üzere iki ayrı gruba ayrılır.

Cam elyafın %90' dan fazlası genel amaçlı elyaf olarak üretilmektedir. Bunlar ASTM standartlarına göre E-cam elyafları olarak bilinir. Ayrıca GFRP kumaşlar tek yönlü ve çift yönlü olarak üretilmektedir. (Ziada, 2019).

GFRP diğer liflere göre daha az maliyetli ve şeffaf olduğu için bu çalışmada kullanılmasına karar verilmiştir. Ek olarak, GFRP malzemesinin maliyetini daha da azaltmak için tek yönlü GFRP malzemesi kullanılacaktır. Şekil 4.8' de görüldüğü gibi, tek yönlü GFRP malzemesinin performansı, dikey yüklere maruz kaldığında daha düşüktür.



Şekil 4.8. tek yönlü ve çift yönlü GFRP malzemeleri

Bu liflerin üretimi sırasında çeşitli cam bileşimleri kullanılır. Bu bileşenler özellikleri ile birlikte Tablo 3.1' de verilmiştir.

Tablo 4.5. Cam Fiber Üretiminde kullanılan Camların Özellikleri

Cam Bileşimi	Camın Özellikleri
E	Elektriksel direnç Yüksek Mukavemet Sertlik
C	Korozyona karşı dirençliği yüksektir
S	Elastisite modülü yüksektir. Yüksek sıcaklara karşı direnci yüksektir.

#### 4.6. FRP ile Güçlendirilmenin Tipik Nedenleri

##### 4.6.1. Sismik ve Rüzgar Yükleri

Bir deprem veya kuvvetli rüzgar etkisi altında, bir yapı hareketi absorbe edecek kadar esnek olmalıdır. Yapıya ağırlık eklenmesi kütleyi ve dolayısıyla çökme olasılığını artırır. Bu da çok ince (0.5 mm) olan ve yapıya ağırlık katmayan FRP' yi en ideal çözüm haline getirmektedir. (Alihassan, 2021).

##### 4.6.2. Fonksiyon Değişimi

Bazen bir yapı tasarlandığından farklı olarak kullanılabilir, bu durumda eklenen veya değişen yükleri karşılamak için güçlendirilmesi gerekir. Bunun bir örneği, daha sonra çatıya yerleştirilen çok ağır bir makinedir. (Sipahioğlu, 2006).

#### 4.6.3. inşaat ve Tasarım Hataları

Bazen bir iř tamamlandıktan sonra proje yapım hatalarından veya betonun istenilen kalitede olmamasından dolayı takviye gerekir. FRP, eksik çeliği yerini tutması veya dūřuk beton mukavemetini telafi etmek için kullanılabilir. (Alihassan, 2021).

#### 4.6.4. onarımlar

Bazı yapılar zaman ve çevresel faktörler nedeniyle aşınmaya ve hasara maruz kalmaktadır. Bu yapılar dikkatli bir çalışma ile özgün hallerine geri döndürülebilir. FRP kompozitler tuzlu suya %100' e kadar dayanıklı olduğu için su altında kullanıldığında da mükemmel sonuçlar verir.

#### 4.6.5. Korozyon

FRP ürünleri kimyasal bozulmaya karşı çok dirençlidir. Bu özelliklerinden ötürü yapı elemanlarını zararı olan kimyasal ve çevresel saldırılardan korumak ve onarmak için kullanılabilirler. (Alihassan, 2021).

### 4.7. FRP' nin Uygulanması

#### 4.7.1. Uygulama den Önce Hazırlık

FRP ile güçlendirmeye başlamadan önce büyük onarımlar yapılmalıdır. Kırılan beton parçaları temizlenmeli, paslanmış veya hasar görmüş elik parçalar belirlenmeli ve ana kırık ve çatlaklara epoksi enjeksiyon uygulanmalıdır. güçlendirme Korozyona uğramış ve beton paslanmış ise donatı temizlenmeli ve korozyon önleyici kimyasallar uygulanmalıdır. şekil 4.9' da uygulama öncesi hazırlanmış bir kolon görölmektedir. (Sipahioğlu, 2006).



şekil 4.9. Uygulamadan önce Hazırlık

### 4.7.2. Yüzey Hazırlığı

Yüzey hazırlanırken ardışık yüzeyler arasındaki basamak farkı 1 mm' yi geçmemelidir. Yüzeyde herhangi bir yükselti veya çukur olmamalıdır. Keskin köşeler yuvarlatılmalıdır. Daha büyük yarıçap daha yüksek performans sağladığı için yuvarlatılmış köşelerin yarıçapı 10 mm' den az olmamalıdır. Uygulamadan önce yüzey kumlanmalı veya taşlama makinesi ile düzeltilmelidir. (Sipahioğlu, 2006)

### 4.7.3. Astar

Yapışmayı arttırmak ve yüzeyin FRP reçinesi tarafından çizilmesini önlemek için, alt tabaka doyana kadar rulo fırça ile düşük viskoziteli epoksi astar uygulanmalıdır.

Astar ve sertleştiriciyi belirtilen oranlarda ekleyin ve karışım homojen hale gelene kadar yaklaşık 2 dakika bekleyin. Karıştırma, düşük hızlı bir karıştırıcı kullanılarak yapılır. Hazırlanacak astar miktarı malzemenin çalışma süresi içerisinde kullanılacaktır.

Çalışma süresi geçtikten sonra karışık astar kullanılamaz. Bu süre ortam sıcaklığına ve malzeme miktarına göre değişebilir. Astar yüzeye fırça veya rulo ile düzgün bir şekilde uygulanmalıdır. Gerekirse, ilk kat betona nüfuz ettikten sonra ikinci kat astar uygulanmalıdır. Kullanılacak astar miktarı beton yüzeyin pürüzlülüğüne göre değişiklik gösterebilir. İkinci kat astarı uygulamadan önce ilk katın parmaklara bulaşmaması için en az 3 saat beklemek gerekmektedir. Bir gecede beklemek yaygın bir uygulamadır. Yüzeye astar uygulaması Şekil 4.10' da görülmektedir. (Sipahioğlu, 2006).



Şekil 4.10. Yüzeye astar uygulaması

#### **4.7.4. Malzemeyi Doygun Hale Getirmek**

Reçine, fırça veya rulo kullanılarak beton yüzeye uygulanmalıdır. Kullanılacak malzeme miktarı yüzeyin emiciliğine göre değişir. İç köşelerde kullanılan malzeme miktarı, FRP alt tabakaya yapışmayı sağlamak için düz yüzeyde kullanılan malzemeden daha fazla olacaktır. Daha önce epoksi yapıştırıcı uygulanmış beton yüzeye FRP uygulanır. FRP' de kalan hava boşluklarını gidermek ve epoksi yapıştırıcının malzemeye penetrasyonunu arttırmak için lastik dişli merdane ile lifler yönünde bastırılarak iki veya üç kez geçirilmelidir. FRP parçaların lifleri doğrultusunda uçtan uca birleştirilmesi sırasında en az 20 cm bindirme uzunluğu kullanılmalıdır. Bindirme bölgesinde daha önce uygulanan malzeme üzerine epoksi yapıştırıcı sürülmeli ve yapıştırılacak parça uygulanmalıdır.

Lepleme lifler yönünde yapılmalıdır, liflere dik yönde üst üste bindirmeye gerek yoktur. İlk kat epoksi yapıştırıcı uygulamasından sonra en az 30 dakika malzemeye dokunulmamalıdır. Yeri değişen veya herhangi bir şekilde ayrılan malzeme bu süre içinde bir rulo veya spatula yardımıyla yeniden konumlandırılabilir. Reçinenin uygulanacağı yüzeyin üzerinden iki veya üç kez bastırılarak geçirilmelidir. Bu işlem sırasında rulo veya spatula kullanılmalıdır. Malzeme ya masa üzerinde ıslatılmalı ya da yüzey reçine ile kaplandıktan sonra kuru malzeme yüzeye uygulanmalıdır. (Sipahioğlu, 2006).

#### **4.7.5. Kürlenme**

Dış mekan uygulamalarında malzeme üzeri örtülerek yağmur, kum, toz gibi etkenlerden izole edilmelidir. FRP işlemi bitse bile malzeme plastik branda kullanılarak yağmurdan korunmalıdır ancak bu koruma malzemesi uygulanan FRP ile temas etmemelidir. Uygulama en az 24 saat süreyle kürlenmelidir. (Sipahioğlu, 2006).

### **5. TÜNEL HASARLARI**

Tünellerde inşaat aşamasında ve sonrasında zemin basınçları, oturmalar, yükselen su seviyeleri, hafriyat çalışmaları ve titreşim, yangın ve araç kazaları nedeniyle hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu hasarlar, destek yapısında ve portallarda olduğu gibi, çatlak ve kırıklarla da meydana gelebilir. Ayrışma çökmeler ve eğim kaymaları şeklinde görülebilir. Bu kısımda tünellerde oluşabilecek hasar

mekanizmaları özetlenerek neden-sonuç ilişkisi kurulacaktır. inşaat ve işletme esnasında oluşabilecek hasar türleri değerlendirilecektir. (Hepbostancı, 2017).

### 5.1. İnşaat sırasındaki hasarlar

TBM kullanılarak kazılan tüneller için üretilen segmentler (parçalar), TBM'ye ulaşmadan önce taşıma işlemlerine tabi tutulur ve bu taşımalar sırasında dökme olarak depolanır. Bu kazıklar arasında yük transferi takozlarla sağlanmaktadır. Segmentin konumu destek noktası ile örtüşmüyorsa segment erken yüklenebilir. Kurulum işlemi Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Taşıyıcıya betonarme prekast segmentlerin yüklenmesi

Şekil 5.2' de yükleme sırasında kaldırma aparatının temas ettiği yüzeyde oluşan çatlak göstermektedir. Kaldırma işlemleri sırasında kırılma ve çatlamayı önlemek için dış yüzeylerde yanak mesafesinin yeterliliği ve conta dışındaki beton kalınlığı önemlidir. Bununla birlikte kaldırma noktaları alakalı kaldırma aparatının şekline bağlı olarak güçlendirilebilir.



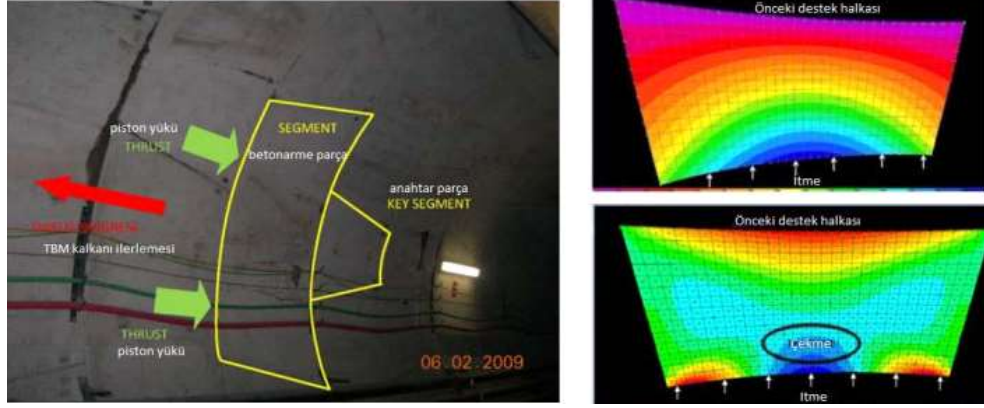
Şekil 5.2. Betonarme prekast segmentlerin yüklenmesi sırasında hasarTünel imal aşamasında

kullanılan makine ve ekipmanların hafriyat yöntemlerine göre farklılaşması sonucunda tünel yardımcı yapısına değişik yükler ve titreşimler uygulanabilmektedir. Bu durumları göz önünde bulundurursak TBM kazılarında segment blokları arasında değişik hareketlere niçin olarak hasara olabilir. Bunlar yükleme mekanizmasına bağlı olarak kırık ve çatlaklar olarak ortaya çıkar. İnşaat aşamasında ortaya çıkan çatlaklar Şekil 5.3' te gösterilmiştir. (Hepbostancı,2017).



Şekil 5.3. Yapım sırasında sıralanan segmentte görünen çatlaklar

TBM kazısı sırasında çatlak oluşumunu etkileyen faktörler, levhaların yeterli dayanım kazanamadan bozulması olabilir. TBM kazısı sırasında, kalıptan çıkarma, depolama, yükleme, şafta boşaltma ve TBM' ye nakliye gibi birçok aşamadan geçen parçalar, TBM kazısı yapılarına ve iç yük dağılımı gerçekleşene kadar yerinde takılır ve ardından cıvatalanır. TBM kazısı sırasında kazı yükü, kazıcı kafasını tahrik eden ana piston vasıtasıyla tünel eksenini boyunca segmente aktarılır. Şekildeki çatlak oluşumunun birincil nedeni bu olsa da, halkanın arkasına implante edilen tabaka da bunda önemli bir rol oynar. Şekil 5.4' te Focaracci, a. (1998) yayınında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak piston pozisyonunun etkisinden kaynaklanan çatlakların hesaplanmasını göstermektedir. (Hepbostancı, 2017).

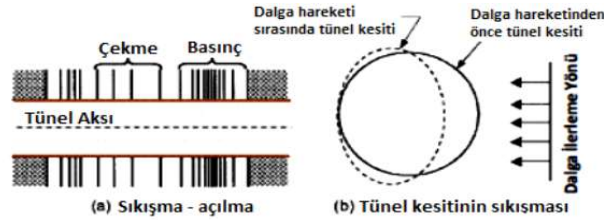


Şekil 5.4. inşaat sırasında sıralı segmentte görünen çatlakların analizi

## 5.2. Deprem Hasarları

Tünel eksenine paralel aksel deformasyon oluşacaktır. Deprem sırasında oluşacak hasar mekanizmaları özetlenmiştir. Sıkıştırma durumunda, çökmelerin yanı sıra yapısal çatlaklar ve kırılmalar meydana gelebilir. Açılması durumunda halka yapılarında boşluklar, ayrılmalar, çökmeler meydana gelebilir.

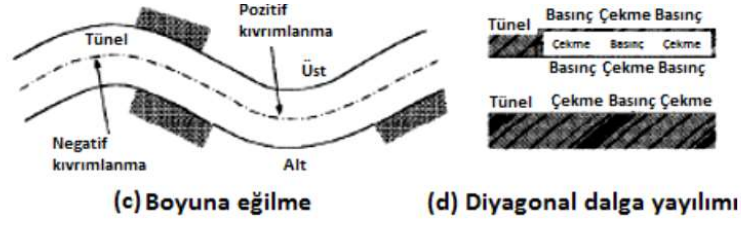
a)Eksenel sıkışma ve açılma:



Şekil 5.5. Deprem nedeniyle tünellerde oluşan aksel sıkışma ve açılma

Tünellerde aksel deformasyon: Tünel/galeri eksenine paralel dalga yayılımlarının neden olduğu deformasyonlardır. Bunlar kaya kütlelerinin kısılmasına (basınç) ve uzamasına (çekilmesine) neden olur. Kaya kütlelerinin özellikle çekme gerilmesi altındaki çok düşük mukavemeti göz önüne alındığında, sarsıntı, tünel duvarında kaya parçalarının dökülmesine (patlamalara) neden olur. Şiddetli ve uzun süreli sarsıntı durumunda, duvarlardaki süreksizliklerin çekme gerilmesi altında açılması beklenmelidir. (Hepbostancı, 2017).

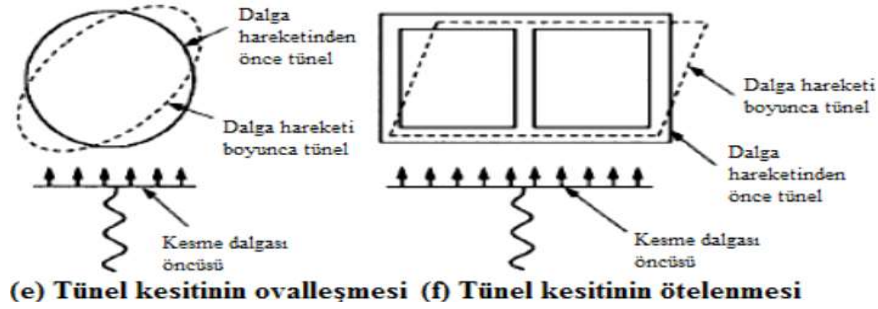
## b) Boyuna eğilme



Şekil 5.6. Deprem nedeniyle tünellerde oluşan boyuna eğilme

Tünel eksenini bükülmesi: Tünel/galeri eksenine paralel yayılan dalgalar tünel eksenini katlanmaya zorlar. Şekilden de görüleceği üzere tünelin üst kısmı çekme gerilmesine, alt kısmının ise basınç gerilmesine maruz kaldığı negatif eğilme alanında özellikle çekme gerilmesine maruz kalan bölgede kırılma, hasar meydana gelmektedir. Basınç gerilimine maruz kalan alanlarda aşırı basınç gerilimi konsantrasyonları vardır. Gerilme yoğunluğu seviyesine ve çatlama parametrelerine bağlıdır. (Hepbostancı, 2017)

## c) Ovalleşme / Ötelenme

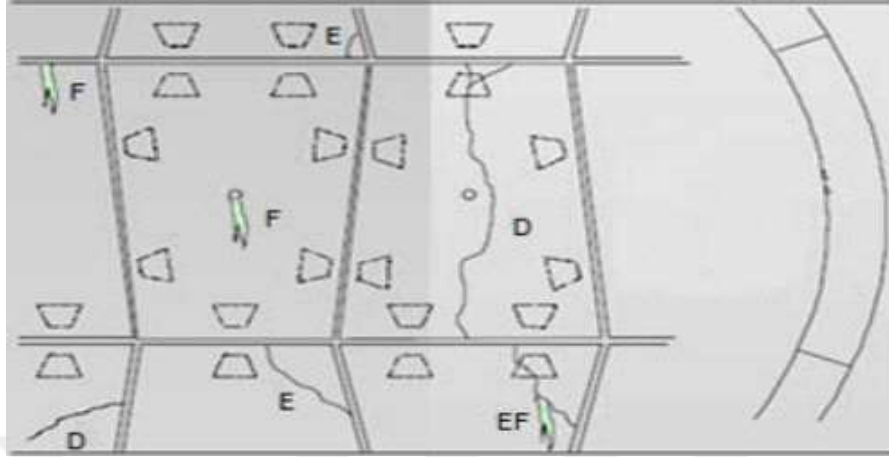


Şekil 5.7. Deprem nedeniyle tünellerde oluşan ovalleşme / ötelenme

Ovalleşme ve ötelenme: Kayma dalgası normal veya tünel eksenine yakın yayıldığında, dairesel tünellerde tünel kesiti oval, dikdörtgen kesitli tünellerde öteleme olur. (Hepbostancı, 2017).

## 5.3. Hasar Tipleri

Destek yapı kapasitesinin aşılmış olduğu alanlarda kırılmalar ve çatlaklar meydana gelir. Tünel kaplamasında oluşabilecek hasar türleri Şekil 5.8' de verilmiştir. Burada D çatlaklar, E çatlaklar, F su sızıntılarıdır. Bu hasar türlerinin giderilmesinde iki aşamalı bir güçlendirme.



Şekil 5.8. Destek yapısındaki hasar türleri

İlk aşamada tünelde su kaçakları ve mesnet kısımlarında gözle görülür yer değiştirmeler varsa bu alanlarda zemini sağlamlaştırmak için derz dolgu uygulaması yapılır. onarım için uygulanacak derz, zeminin yıkama durumuna göre değerlendirilmelidir. Yıkama durumunda zemindeki su akışından dolayı yapılan halka enjeksiyon veya dolgu enjeksiyonunun yıkanıp gitmesine neden olacak ve enjeksiyon harcı ortamdan uzaklaşacaktır. Bu durumda ortamda enjeksiyon kalmayacak ve tasarım değerlerine bağlı olarak enjeksiyon harcı su akışının olduğu boşluklar doldurulamayacak ve işlem sonuç vermeyebilir. İkinci aşama, tünel destek yapısındaki yerel hasarın giderilmesi olacaktır. Yerel onarım için kimyasal enjeksiyon malzemelerinin kullanılması, küçük ölçekli su sızıntılarını durdurmak için uygun bir yöntemdir. ancak malzeme teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte daha kolay yöntemler de uygulanabilir hale gelmektedir. Hasarı önlemek için enjeksiyonla toprak iyileştirme, destek yapılarını onarmak için kısa vadeli bir önlem olabilir. Uzun vadeli önlem, üretim aşamalarında aşırı yüklerin uygun dağılımını sağlayan tasarımda ek detaylar oluşturularak hasarı önlemektir. Su sızıntısı hasarı durumunda öncelikle kimyasal enjeksiyon ile su kesilecek ve ortam bir çatlak ve kırık sistemine dönüşecektir. Destek yapısı için uygun onarım yöntemleri daha sonra düşünülebilir. (Hepbostancı, 2017).

## 6. MATERYAL METOD VE UYGULAMA

### 6.1. Materyal

Bu çalışmada önceden bahsedildiği gibi betonarme tünel alt yüzeyine SAP2000 programı vasıtasıyla GFRP malzemesi eklenecektir. Tünele GFRP malzemesi eklenmeden önce ve eklendikten sonra analiz yapıp iki durumu karşılanacaktır.

Bu çalışmada kullanılacak ana malzemeler aşağıda sıralanmıştır.

#### 6.1.1. Betonarme

Tünel yapımında kullanılacak betonun özellikleri:

Materyalin Kütle ve Ağırlığı:

- 1- (BHA) Birim Hacim Ağırlığı= $23.3814 \text{ kN/m}^3$
- 2- (BHK) Birim Hacim Kütle= $2.33814 \text{ kN/m}^3$  dir.

Materyalin Mekanik Özellikleri:

- 1-Elastisite Modülü  $E=32000000 \text{ kN/m}^2$
- 2- Poisson Oranı  $U=0.2$
- 3- Isıl Genleşme Katsayısı  $a=0.00001 \text{ 1/C}^\circ$
- 4- Kayma Modülü  $G=13333333 \text{ kN/m}^2$  dir.

Donatı Kütle ve Ağırlığı:

- 1- (BHA) Birim Hacim Ağırlığı= $76.9729 \text{ kN/m}^3$
- 2- (BHK) Birim Hacim Kütle= $7.8429 \text{ kN/m}^3$  dir.

Donatı Mekanik Özellikleri:

- 1-Elastisite Modülü  $E=200000000 \text{ kN/m}^2$
- 2- Poisson Oranı  $U=0.3$
- 3- Isıl Genleşme Katsayısı  $a=0.0000117 \text{ 1/C}^\circ$

#### 6.1.2. Tek yönlü GFRP

Tek Yönlü GFRP' nin BHA ve mekanik özellikleri Rahmani vd. (2011) çalışmalarından yararlanılmıştır.

Materyalin Kütle ve Ağırlığı:

1-Birim Hacim Ağırlığı=18.639 kN/m<sup>3</sup>

2- Birim Hacim Kütlesi=1.9006 kN/m<sup>3</sup>' dir.

Materyalin Mekanik Özellikleri:

1- Elastisite Modülü

E1=40000000 kN/m<sup>2</sup>

E2=40000000 kN/m<sup>2</sup>

E3=8001000 kN/m<sup>2</sup>' dir.

2- Poisson Oranı

U12=0.25

U13=0.25

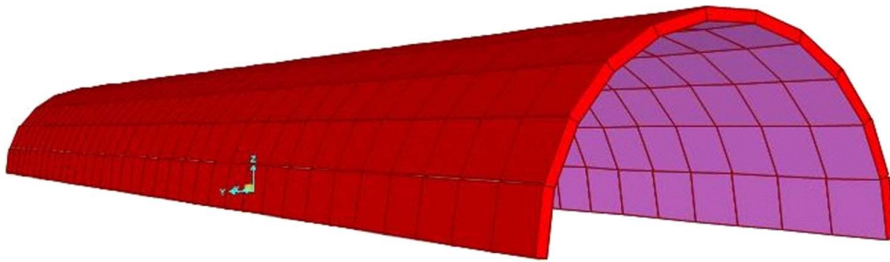
U23=0.25

## 6.2. Metot

Mevcut bir tünel yapının sonlu elemanlar metodu ile SAP2000 programı vasıtasıyla analizi yapılmıştır. Aynı tünele 4 mm kalınlığında GFRP kumaşı uygulanarak tekrar analiz yapıp dinamik parametrelerinin karşılaştırılmıştır.

## 6.3. Uygulama

İlk olarak SAP2000 programına tünelin özellikleri ve GFRP malzemenin Özellikleri girilmiştir. Bu çalışmada GFRP malzemesi tünelin tüm alt yüzeye Uygulanmıştır. Böylece tünelin üzerindeki tüm çatlaklar kapatılmıştır. Betonarme tünelin çapı 7 m, uzunluğu 35 m ve zemin yüksekliği 10 m. Betonarme tünelde kullanılan beton C30' dir. Betonarme kalınlığı 0.20 m' dir. GFRP kalınlığı 4 mm.



Şekil 6.1. Tünel SAP2000 3D modeli

Tablo 6.1. Betonarme ve GFRP Tabakalarının Kalınlıkları

Tabaka No	Materyal	Kalınlık (mm)
1	Betonarme	200
2	GFRP	4

## 7. GFRP UYGULANMASI ÖNCE VE GFRP UYGULADIKTEN SONRA DURUMDAKİ TÜNELLEİN KARŞILAŞTIRMALARI.

### 7.1. Modların Periyot ve Frekans Değerleri Karşılaştırması

Tünel GFRP tabakası uygulanmadan önce periyot ve frekans değerleri Tablo 6.2' de verilmiştir.

Tablo 7.1. GFRP Tünel Uygulanmadan Önce Periyot ve Frekans Değerleri

Mod	Periyot (s)	Frekans (hz)	Dairesel Frekans	Özdeğer (rad <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
1	0.0629	15.9083	99.9546	9990.9175
2	0.0447	22.3869	140.6612	19785.5743
3	0.0360	27.8033	174.6930	30517.6402
4	0.0359	27.8467	174.9658	30613.0350
5	0.0339	29.5297	185.5406	34425.3038
6	0.0299	33.4241	210.0099	44104.1693
7	0.0287	34.8702	219.0960	48003.0690
8	0.0237	42.1073	264.5681	69996.2833
9	0.0232	43.1239	270.9553	73416.7988
10	0.0205	48.7630	306.3868	93872.8678
11	0.0199	50.3382	316.2841	100035.6066
12	0.0194	51.4889	323.5145	104661.6012

Tünel kaplaması alt yüzeyine GFRP uyguladıktan sonra periyot ve frekansları Tablo 6.3' te verilmiştir.

Tablo 7.2. GFRP tabakası Tünele Uygulandıktan sonra Periyot ve Frekans Değerleri

Mod	Periyot (s)	Frekans (hz)	Dairesel Frekans	Özdeğer (rad <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
1	0.0604	16.5682	104.1012	10837.0608
2	0.0431	23.1939	145.7318	21237.7531
3	0.0325	30.7537	193.2310	37338.2107
4	0.0325	30.7682	193.3225	37373.5949
5	0.0310	32.2985	202.9375	41183.6108
6	0.0285	35.1396	220.7886	48747.6265
7	0.0267	37.4696	235.4284	55426.5442
8	0.0219	45.5781	286.3759	82011.1694
9	0.0218	45.8509	288.0895	82995.5764
10	0.0187	53.5029	336.1684	113009.1833
11	0.0179	55.7957	350.5749	122902.7867
12	0.0171	58.4672	367.3603	134953.5940

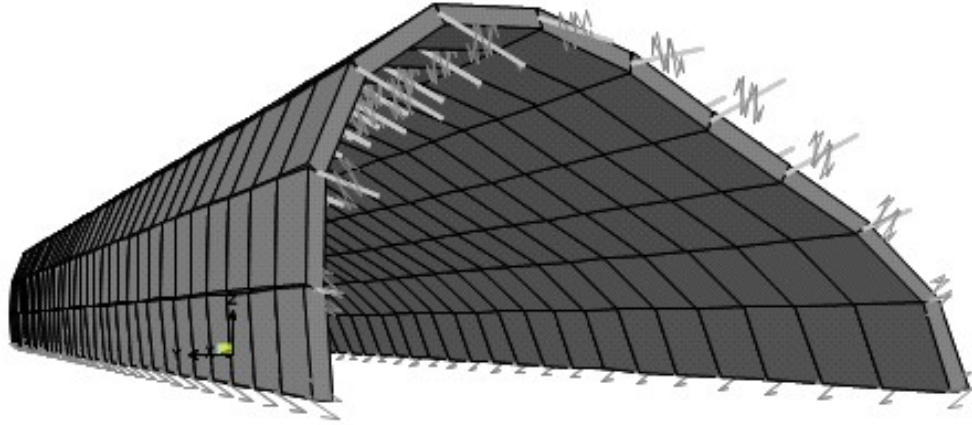
Mod 1:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Periyot=0.0629 s, Frekans=15.9083 hz.

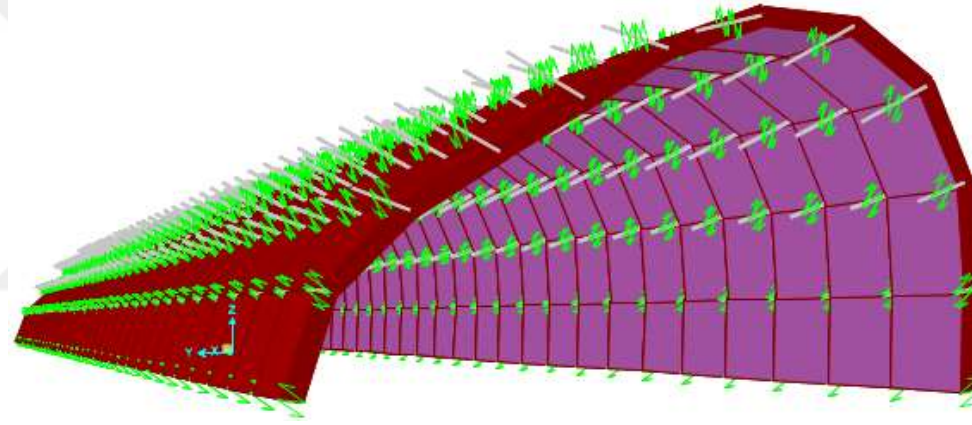
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Periyot=0.0604 s, Frekans=16.5682 hz.

Şekil 7.1 ve 7.2' de iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Mod değerlerinin daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.1' de 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.1. GFRP' siz 1. Mod tünel deforme olmuş durumu



Şekil 7.2. GFRP' li 1. Mod tünel deforme olmuş durumu

Tablo 7.3. Mod 1.nin Periyot ve Frekans Değerleri Karşılaştırması

	Periyot (s)	Frekans (hz)
GFRP' siz	0.0629	15.9083
GFRP' li	0.0604	16.5682

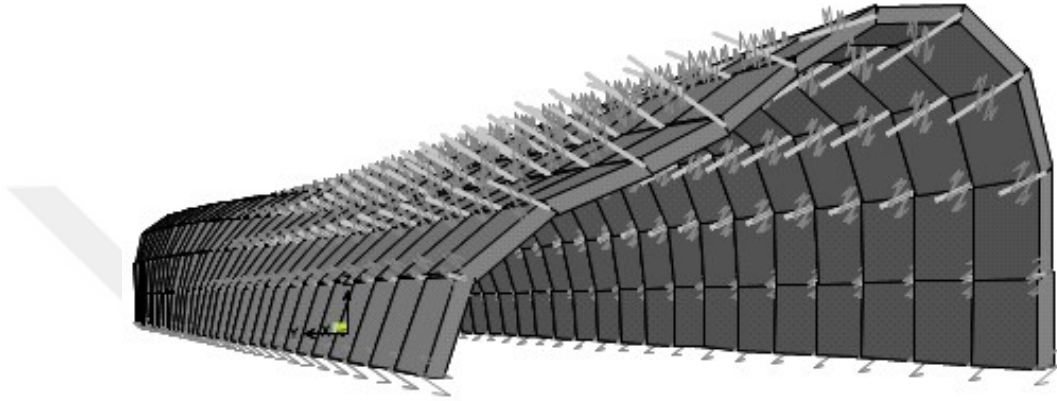
Mod 2:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Periyot=0.0447 s, Frekans=22.3869 hz.

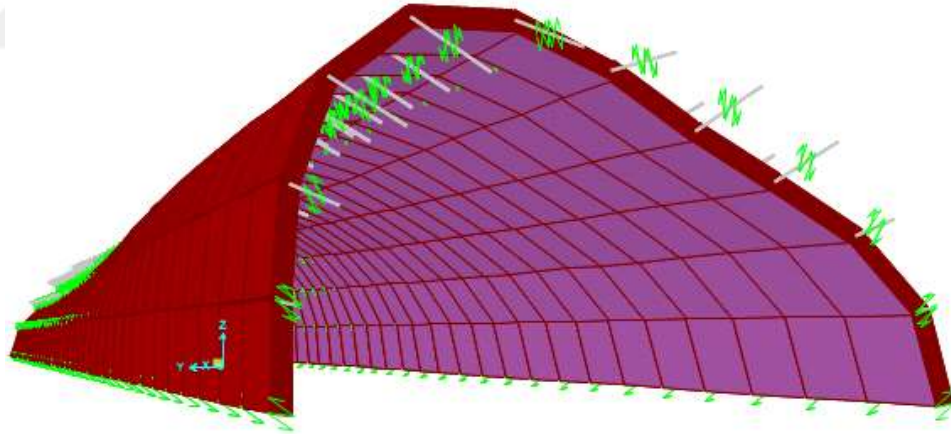
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Periyot=0.0431 s, Frekans=23.1939 hz.

Şekil 7.3 ve 7.4’ te iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Mod değerlerinin daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.2’ de 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.3. GFRP’ siz 2. Mod tünel deforme olmuş durumu



Şekil 7.4. GFRP’ li 2. Mod tünel deforme olmuş durumu

Tablo 7.4. Mod 2.nin Periyot ve Frekans Değerleri Karşılaştırması

	Periyot (s)	Frekans (Hz)
GFRP’ siz	0.0447	22.3869
GFRP’ li	0.0431	23.1939

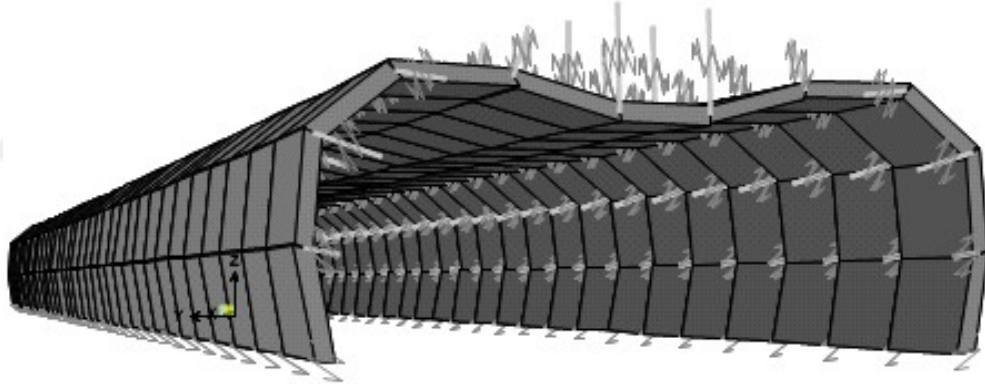
Mod 3:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Periyot=0.0360 s, Frekans=27.8033 Hz.

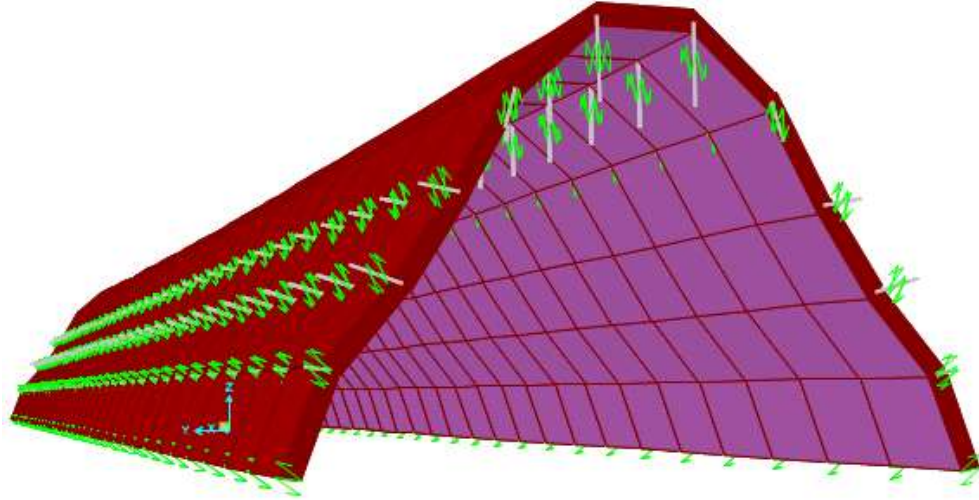
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Periyot=0.0325 s, Frekans=30.7537 Hz.

Şekil 7.5 ve 7.6' de iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Mod değerlerinin daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.3' te 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.5. GFRP' siz 3. Mod tünel deforme olmuş durumu



Şekil 7.6. GFRP' li 3. Mod tünel deforme olmuş durumu

Tablo 7.5. Mod 3.nin Periyot ve Frekans Değerleri Karşılaştırması

	Periyot (s)	Frekans (hz)
GFRP' siz	0.0360	27.8033
GFRP' li	0.0325	30.7537

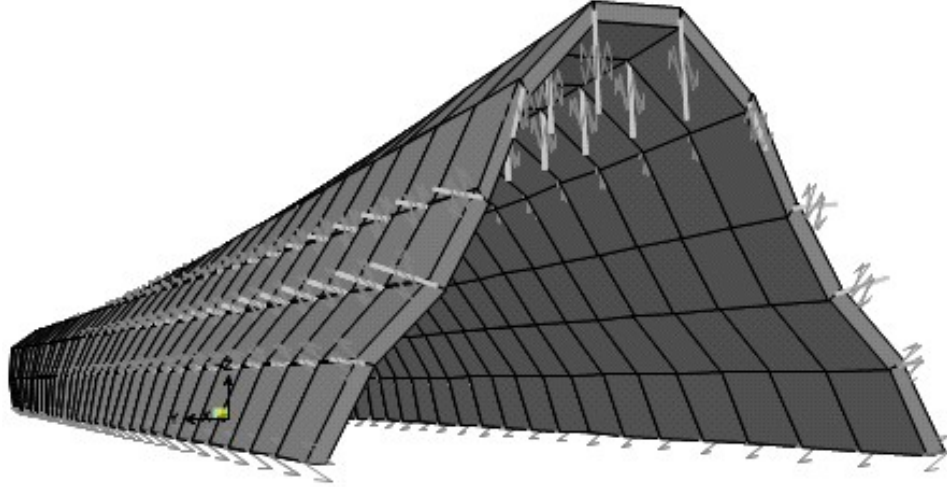
Mod 4:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Periyot=0.0359 s, Frekans=27.8467 hz.

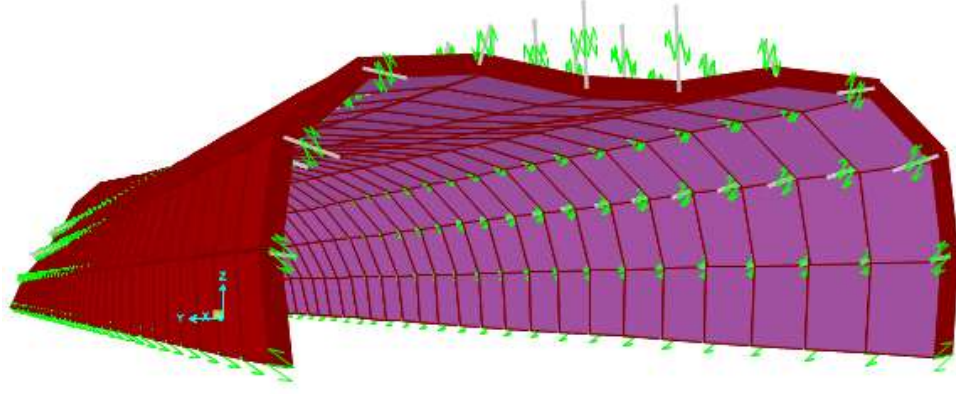
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Periyot=0.0325 s, Frekans=30.7682 hz.

Şekil 7.7 ve 7.8' de iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Mod değerlerinin daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.4' te 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.7. GFRP' siz 4. Mod tünel deforme olmuş durumu



Şekil 7.8. GFRP' li 4. Mod tünel deforme olmuş durumu

Tablo 7.6. Mod 4.nin Periyot ve Frekans Değerleri Karşılaştırması

	Periyot (s)	Frekans (hz)
GFRP' siz	0.0359	27.8467
GFRP' li	0.0325	30.7682

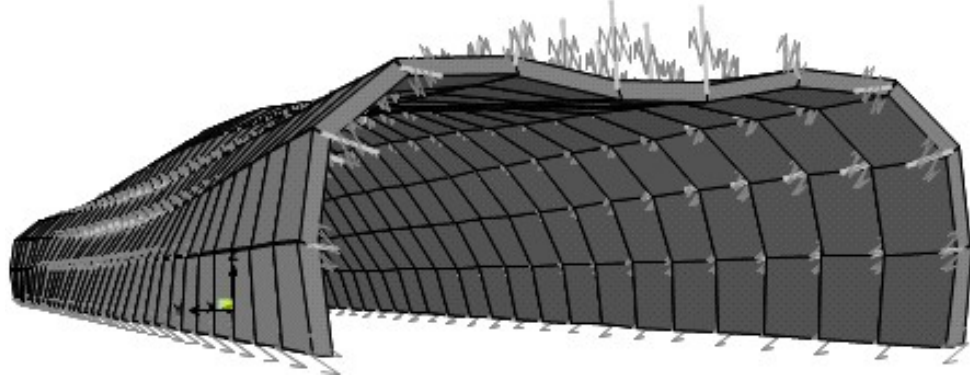
Mod 5 :

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Periyot=0.0339 s, Frekans=29.5297 hz.

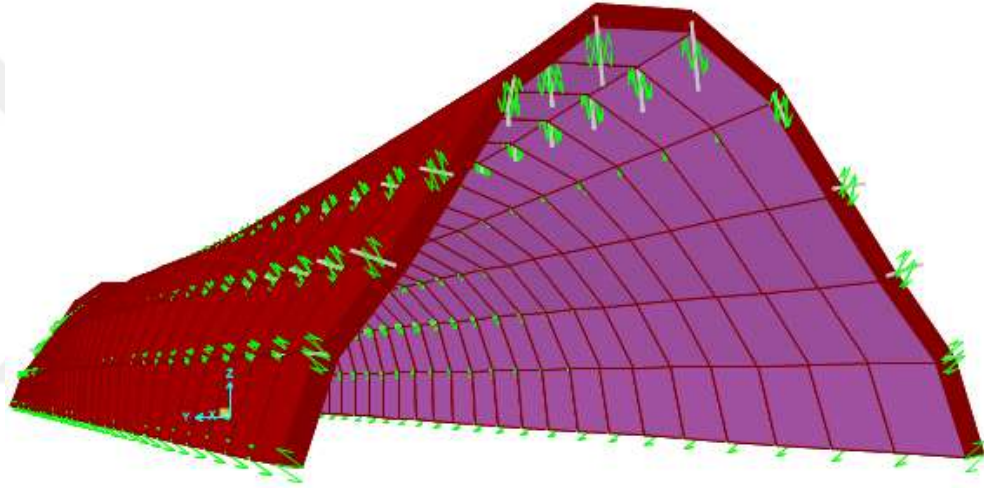
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Periyot=0.0310 s, Frekans=32.2985 hz.

Şekil 7.9 ve 7.10' da iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Mod değerlerinin daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.5' te 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişim açıkça görülmektedir.



Şekil 7.9. GFRP' siz 5. Mod tünel deforme olmuş durumu



Şekil 7.10. GFRP' li 5. Mod tünel deforme olmuş durumu

Tablo 7.7. Mod 5.nin Periyot ve Frekans Değerleri Karşılaştırması

	Periyot (s)	Frekans (hz)
GFRP' siz	0.0339	29.5297
GFRP' li	0.0310	32.2985

## 7.2. Maksimum Moment (Mmax) Karşılaştırılması

SAP2000 programında tünele 4 mm kalınlığında GFRP uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra maksimum moment değerleri tablo 7.6' da gösterilmektedir.

Tablo 7.8. Max ve Min Moment karşılaştırması

Mod	Mmax (kN) GFRP' siz	Mmax (kN) GFRP' li
1	1256.84	1002.45
2	1582.04	1502.27
3	2887.61	2182.99
4	4493.90	3549.68
5	4453.99	3509.74
6	3296.58	2493.84
7	3671.87	3664.50
8	5210.01	4345.59
9	3327.47	3895.65
10	5989.36	5686.83
11	5053.56	4213.68
12	7065.11	4047.76

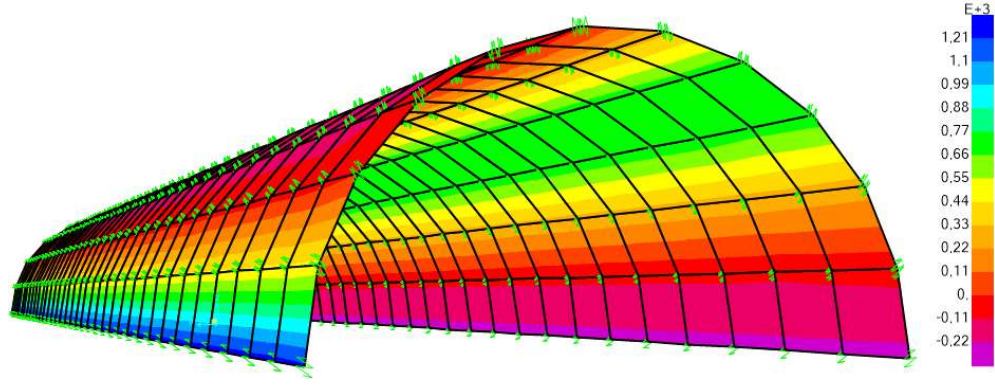
Mod 1:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Moment Değerleri Mmax=1256.84 kN.

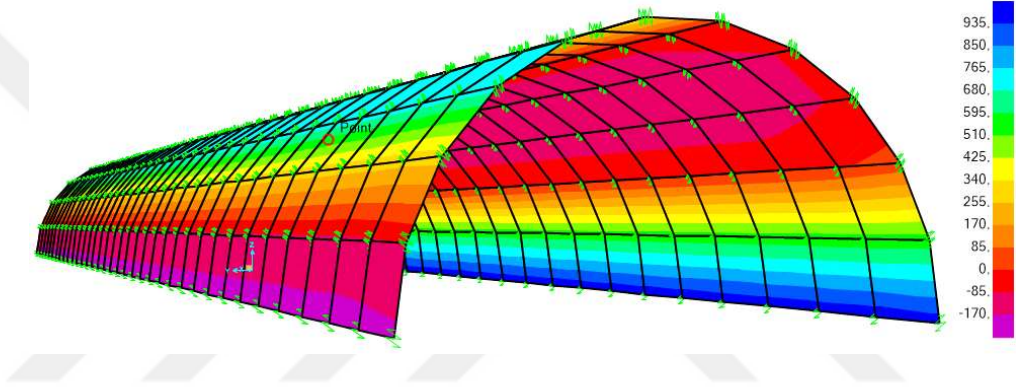
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Moment Değerleri Mmax=1002.45 kN.

Şekil 7.11 ve 7.12' de iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Moment Değerleri Mmax daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.7' de 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.11. GFRP' siz 1. Mod tünel Mmax diyagramı



Şekil 7.12. GFRP' li 1. Mod tünel Mmax diyagramı

Tablo 7.9. Mod 1.nin Max ve Min Moment karşılaştırması

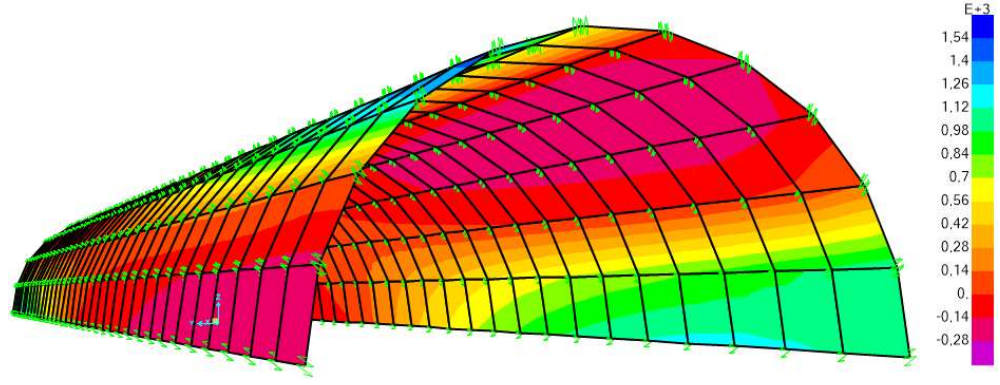
Mod	Mmax (kN) GFRP' siz	Mmax (kN) GFRP' li
1	1256.84	1002.45

Mod 2:

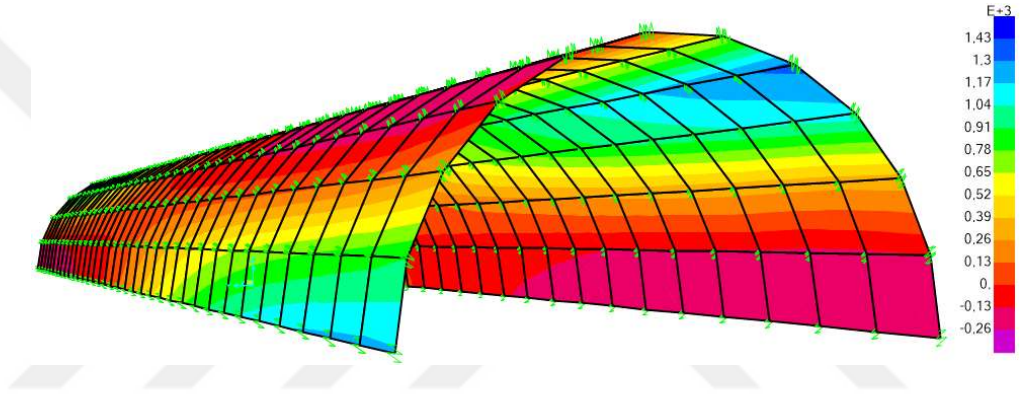
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Moment Değerleri Mmax=1582.04 kN.

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Moment Değerleri Mmax=1502.27 kN.

Şekil 7.13 ve 7.14' te iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir. Moment Değerleri Mmax daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.8' de 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.13. GFRP' siz 2. Mod tünel Mmax diyagramı



Şekil 7.14. GFRP' li 1. Mod tünel Mmax diyagramı

Tablo 7.10. Mod 2.nin Max ve Min Moment karşılaştırması

Mod	Mmax (kN) GFRP' siz	Mmax (kN) GFRP' li
2	1582.04	1502.27

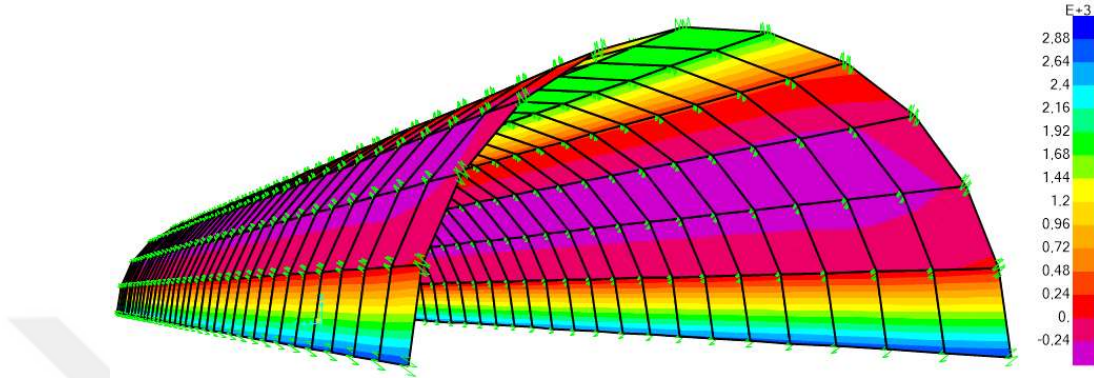
Mod 3:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Moment Değerleri Mmax=2887.61 kN.

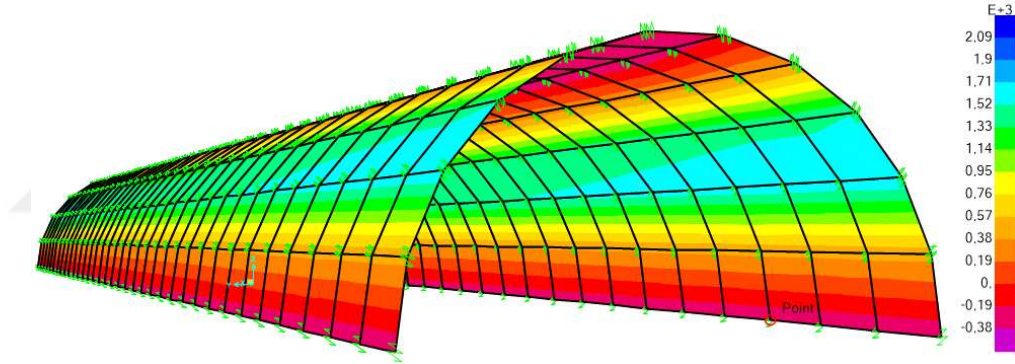
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Moment Değerleri Mmax=2182.99 kN.

Şekil 7.15 ve 7.16' da iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Moment Değerleri Mmax daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.9' da 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.15. GFRP' siz 3. Mod tünel Mmax diyagramı



Şekil 7.16. GFRP' li 3. Mod tünel Mmax diyagramı

Tablo 7.11. Mod 3.nin Max ve Min Moment karşılaştırması

Mod	Mmax (kN) GFRP' siz	Mmax (kN) GFRP' li
3	2887.61	2182.99

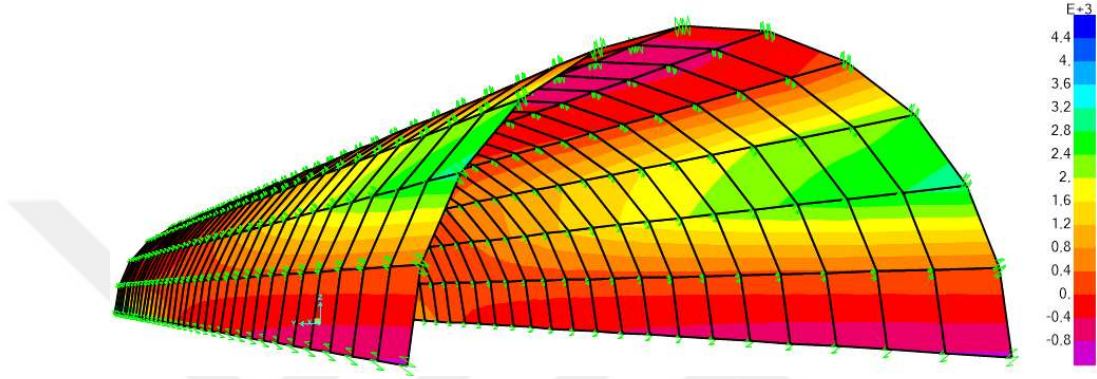
Mod 4:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Moment Değerleri Mmax=4493.90 kN.

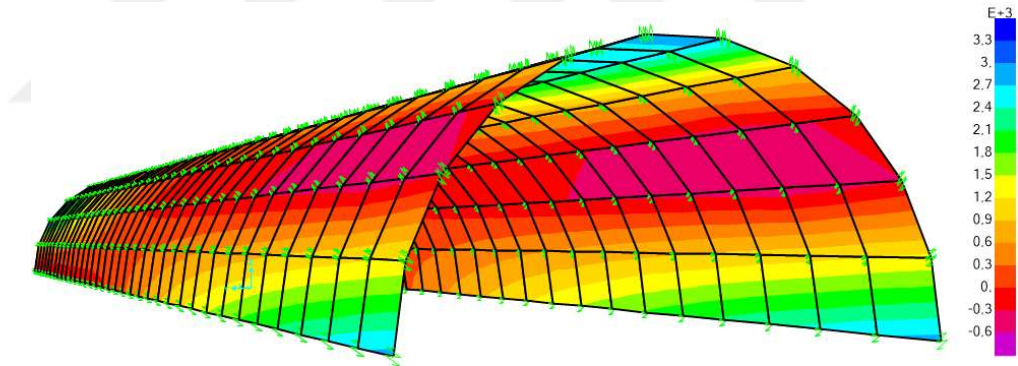
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Moment Değerleri Mmax=3549.68 kN.

Şekil 7.17 ve 7.18’ de iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Moment Değerleri Mmax daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.10’ da 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.17. GFRP’ siz 4. Mod tünel Mmax diyagramı



Şekil 7.18. GFRP’ li 4. Mod tünel Mmax diyagramı

Tablo 7.12. Mod 4.nin Max ve Min Moment karşılaştırması

Mod	Mmax (kN) GFRP’ siz	Mmax (kN) GFRP’ li
4	4493.90	3549.68

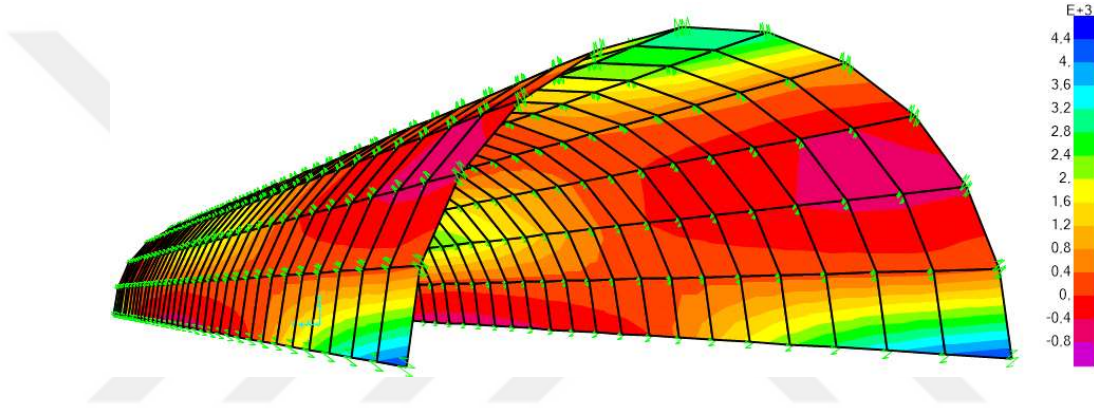
Mod 5:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Moment Değerleri Mmax=4453.99 kN.

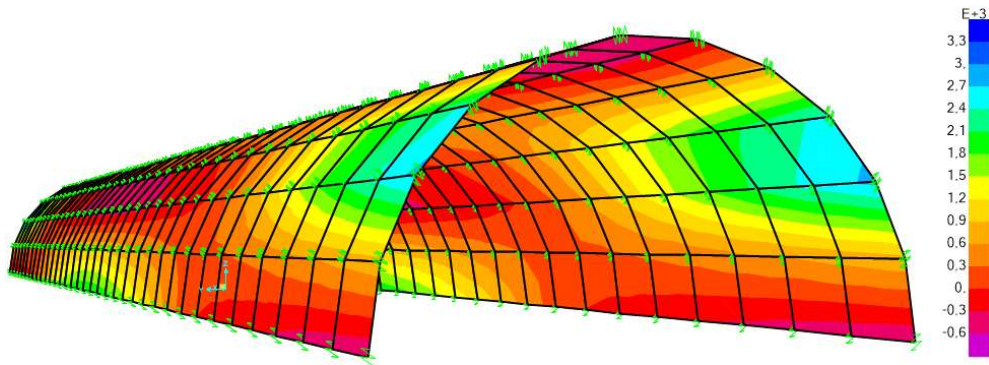
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Moment Değerleri  $M_{max}=3509.74$  kN.

Şekil 7.19 ve 7.20' de iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Moment Değerleri  $M_{max}$  daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.11' de 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.19. GFRP' siz 5. Mod tünel Mmax diyagramı



Şekil 7.20. GFRP' li 5. Mod tünel Mmax diyagramı

Tablo 7.13. Mod 5.nin Max ve Min Moment karşılaştırması

Mod	Mmax (kN) GFRP' siz	Mmax (kN) GFRP' li
5	4453.99	3509.74

### 7.3. Maksimum Gerilme (Smax) Karşılaştırılması

SAP2000 programında tünele 4 mm kalınlığında GFRP uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra maksimum gerilme değerleri tablo 7.12' de gösterilmektedir.

Tablo 7.14. Max Gerilme Karşılaştırması

Mod	Smax (kN/m <sup>2</sup> ) GFRP' siz	Smax (kN/m <sup>2</sup> ) GFRP' li
1	190088.50	184945.70
2	226989.40	408728.40
3	422807.50	413406.10
4	648723.40	646496.70
5	653143.10	717836.00
6	498839.10	798602.30
7	590540.50	775149.00
8	759477.50	1190992.0
9	520112.90	1237237.00
10	851484.60	1569876.00
11	731796.10	1795052.00
12	1056623.00	736325.40

Mod 1:

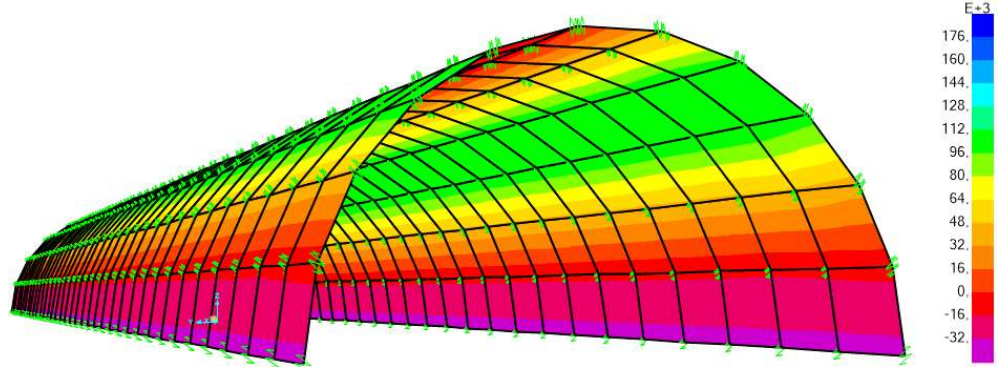
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı

aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Smax=190088.50 kN/m<sup>2</sup>.

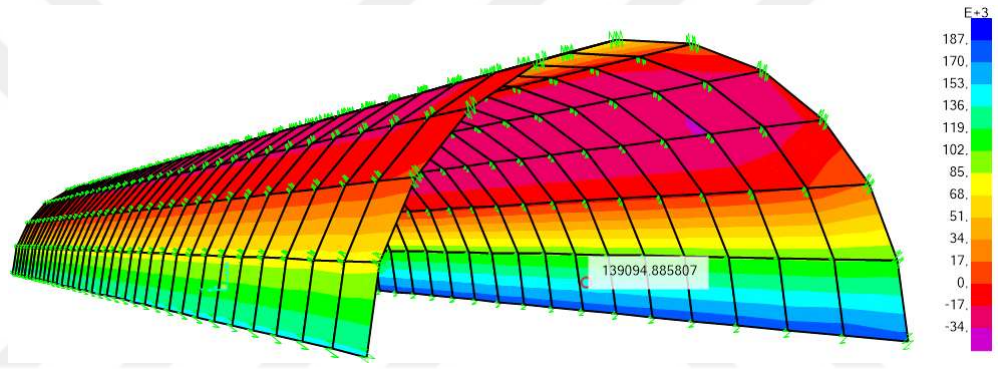
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Smax=184945.70 kN/m<sup>2</sup>.

Şekil 7.21 ve 7.22' de iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Gerilme Değerleri daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.13' te 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.21. GFRP' siz 1. Mod tünel Smax diyagramı



Şekil 7.22. GFRP' li 1. Mod tünel Smax diyagramı

Tablo 7.15. Mod 1.nin Max ve Min Gerilme karşılaştırması

Mod	Smax (kN/m <sup>2</sup> ) GFRP' siz	Smax (kN/m <sup>2</sup> ) GFRP' li
1	190088.50	184945.70

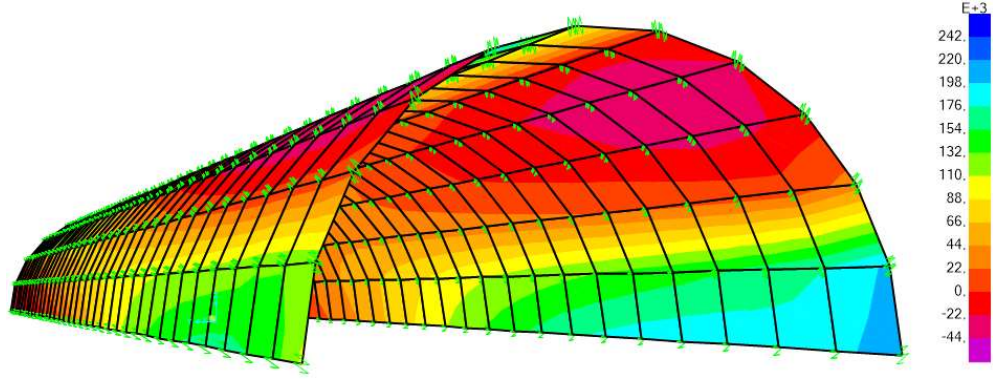
Mod 2:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Smax=226989.40 kN/m<sup>2</sup>.

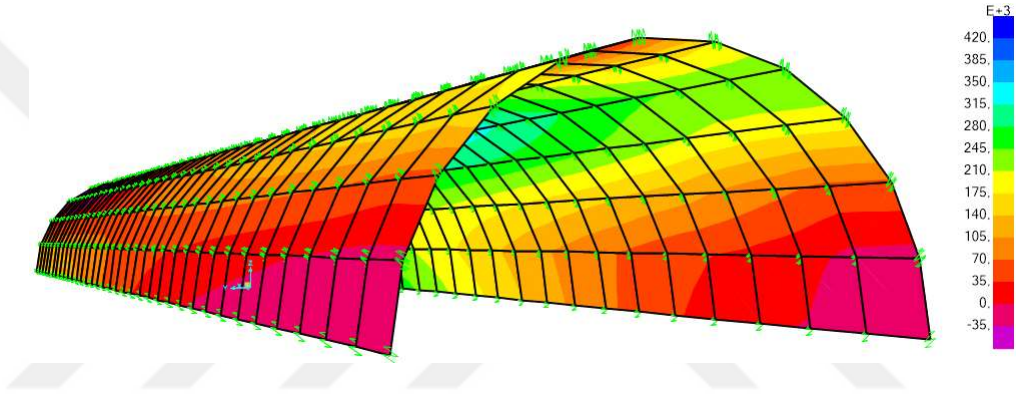
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır Smax=408728.40 kN/m<sup>2</sup>.

Şekil 7.23 ve 7.24' te iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Gerilme Değerleri daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.14' te 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.23. GFRP' siz 2. Mod tünel Smax diyagramı



Şekil 7.24. GFRP' li 2. Mod tünel Smax diyagramı

Tablo 7.16. Mod 2.nin Max ve Min Gerilme karşılaştırması

Mod	Smax (kN/m <sup>2</sup> ) GFRP' siz	Smax (kN/m <sup>2</sup> ) GFRP' li
2	226989.40	408728.40

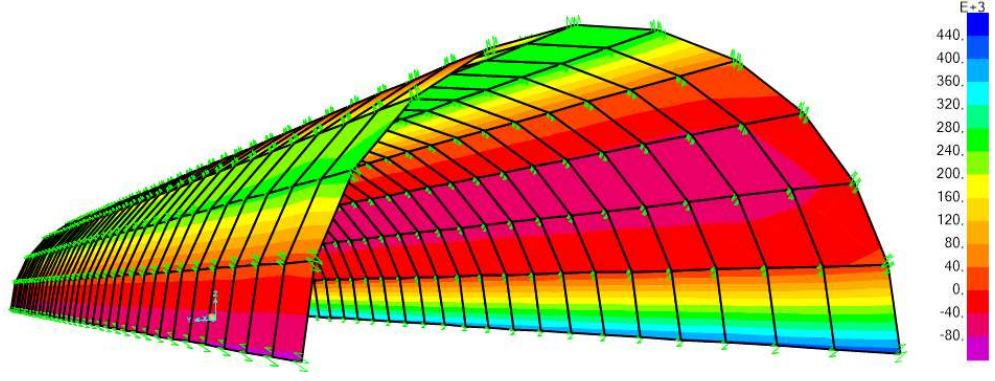
Mod 3:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Smax=422807.50 kN/m<sup>2</sup>.

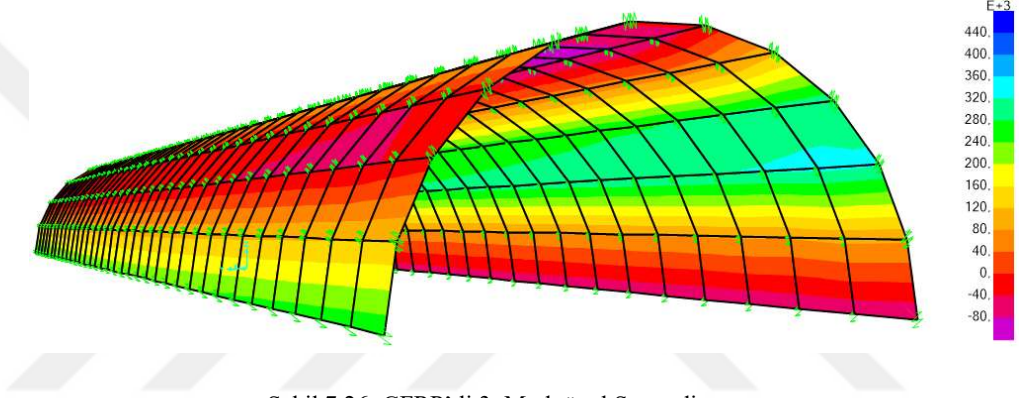
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Smax=413406.10 kN/m<sup>2</sup>.

Şekil 7.25 ve 7.26' da iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Gerilme Değerleri daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.15' te 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.25. GFRP' siz 3. Mod tünel Smax diyagramı



Şekil 7.26. GFRP' li 3. Mod tünel Smax diyagramı

Tablo 7.17. Mod 3.nin Max ve Min Gerilme karşılaştırması

Mod	Smax (kN/m <sup>2</sup> ) GFRP' siz	Smax (kN/m <sup>2</sup> ) GFRP' li
3	422807.50	413406.10

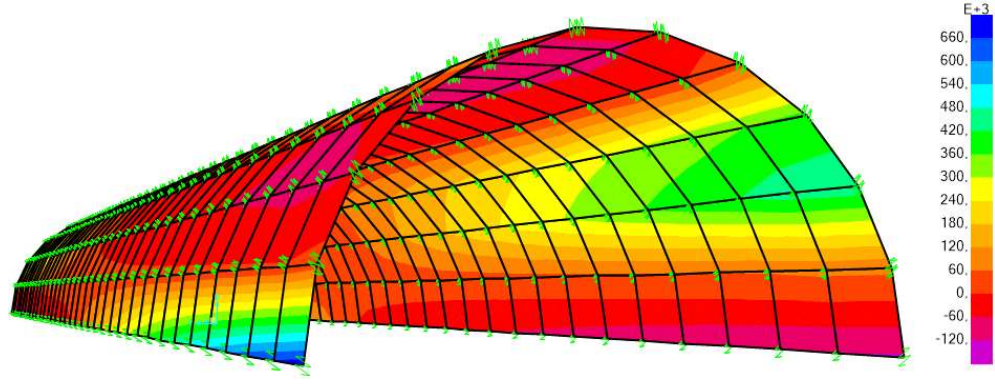
Mod 4:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Smax=648723.40 kN/m<sup>2</sup>.

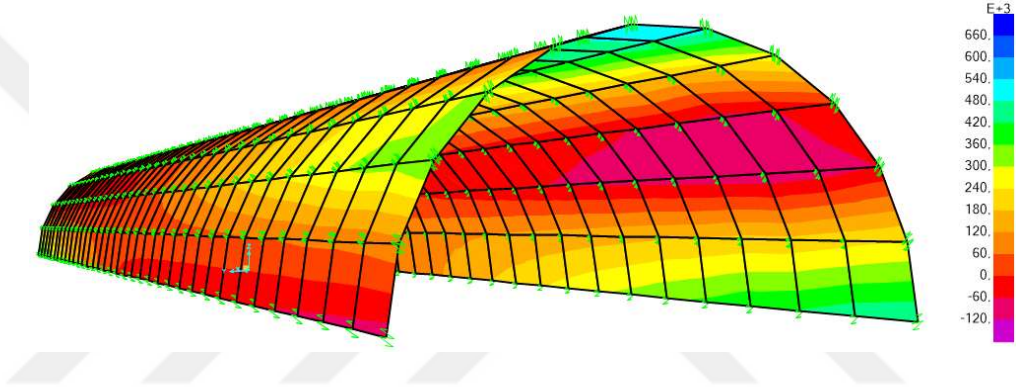
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Smax=646496.70 kN/m<sup>2</sup>.

Şekil 7.27 ve 7.28' de iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Gerilme Değerleri daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.16' da 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.27. GFRP' siz 4. Mod tünel Smax diyagramı



Şekil 7.28. GFRP' li 4. Mod tünel Smax diyagramı

Tablo 7.18. Mod 4.nin Max ve Min Gerilme karşılaştırması

Mod	Smax (kN/m <sup>2</sup> ) GFRP' siz	Smax (kN/m <sup>2</sup> ) GFRP' li
4	648723.40	646496.70

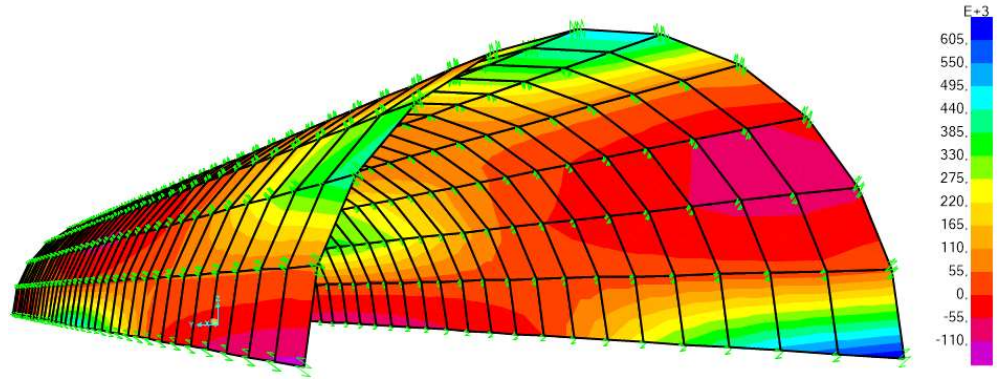
Mod 5:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır Smax=653143.10 kN/m<sup>2</sup>.

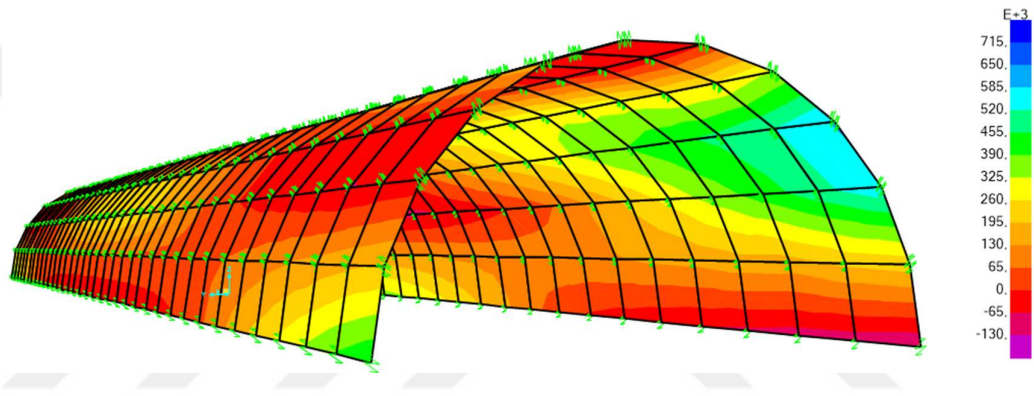
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır Smax=717836.00 kN/m<sup>2</sup>.

Şekil 7.29 ve 7.30' de iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Gerilme Değerleri daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.17' de 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.29. GFRP' siz 5. Mod tünel Smax diyagramı



Şekil 7.30. GFRP' li 5. Mod tünel Smax diyagramı

Tablo 7.19. Mod 5.nin Max ve Min Gerilme karşılaştırması

Mod	Smax (kN/m <sup>2</sup> ) GFRP' siz	Smax (kN/m <sup>2</sup> ) GFRP' li
5	653143.1	717836.00

#### 7.4. Maksimum Kesme Kuvveti (Vmax) Karşılaştırılması

SAP2000 programında tünele 4 mm kalınlığında GFRP uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra Kesme Kuvveti (Vmax) değerleri tablo7.18' de gösterilmektedir.

Tablo 7.20. Maksimum Kesme Kuvveti (Vmax) Karşılaştırılması

Mod	Vmax (kN/m) GFRP' siz	Vmax (kN/m) GFRP' li
1	807.27	1002.77
2	1272.49	1978.06
3	3019.82	4125.62
4	4483.48	6774.42
5	4061.30	7145.7
6	3109.58	4909.7
7	2773.41	6440.77
8	5583.64	10420.37
9	2797.30	7653.57
10	6210.57	14012.26
11	6638.18	9688.2
12	8759.45	8907.98

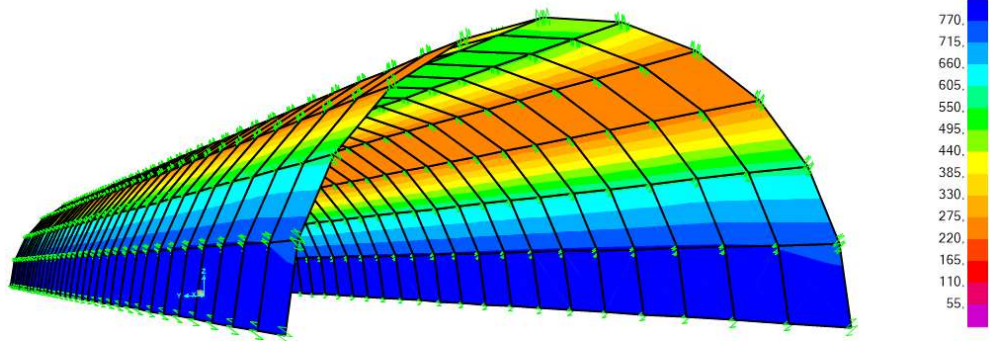
Mod 1:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Kesme Kuvveti (Vmax)=807.27 kN/m.

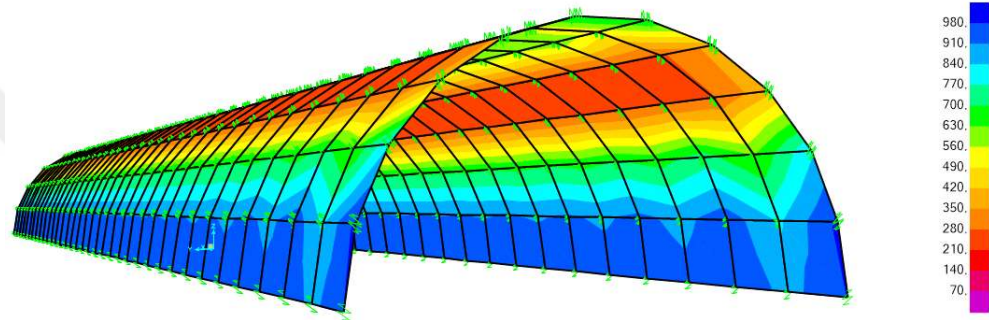
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Moment Değerleri (Vmax)=1002.77 kN/m.

Şekil 7.31 ve 7.32' de iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Moment Değerleri Mmax daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.19' da 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.31. GFRP' siz 1. Mod tünel Vmax diyagramı



Şekil 7.32. GFRP' li 1. Mod tünel Vmax diyagramı

Tablo 7.21. 1.Mod (Vmax) Karşılaştırılması

Mod	Vmax (kN/m) GFRP' siz	max (kN/m) GFRP' li
1	807.27	1002.77

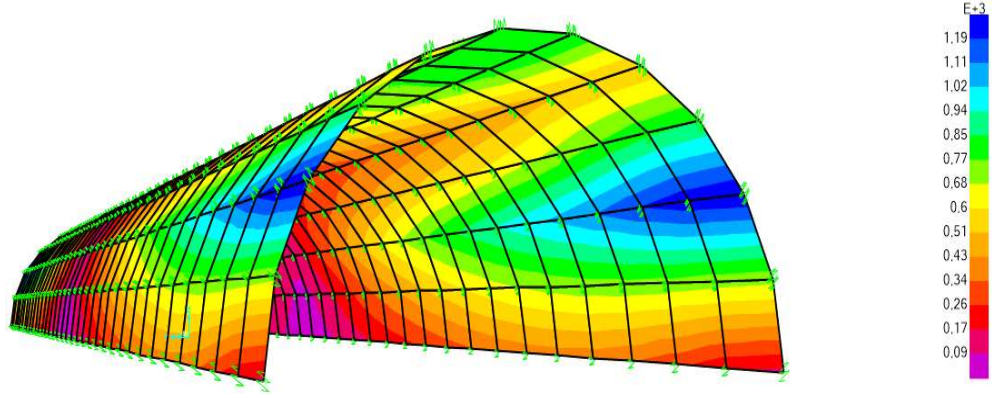
Mod 2:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Kesme Kuvveti ( $V_{max}$ )=1272.49 kN/m.

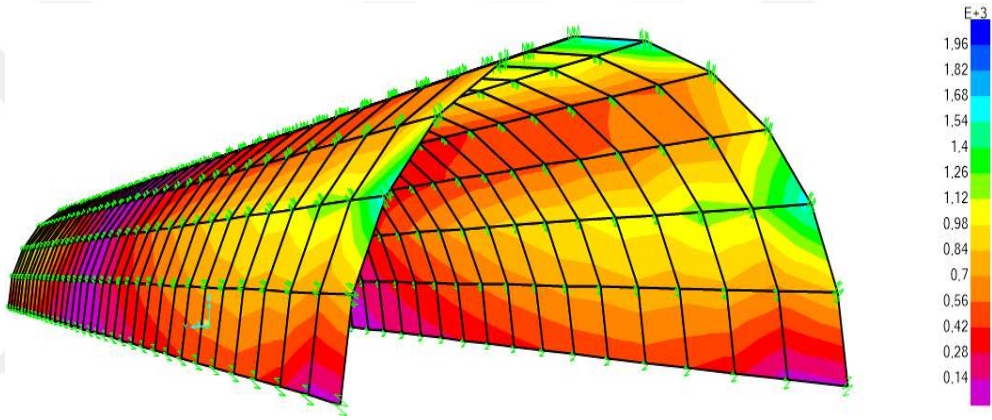
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Moment Değerleri ( $V_{max}$ )=1978.06 kN/m.

Şekil 7.33 ve 7.34' te iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Moment Değerleri  $M_{max}$  daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.20' de 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.33. GFRP' siz 2. Mod tünel Vmax diyagramı



Şekil 7.34. GFRP' li 2. Mod tünel Vmax diyagramı

Tablo 7.22. 2.Mod (Vmax) Karşılaştırılması

Mod	Vmax (kN/m) GFRP' siz	max (kN/m) GFRP' li
2	1272.49	1978.06

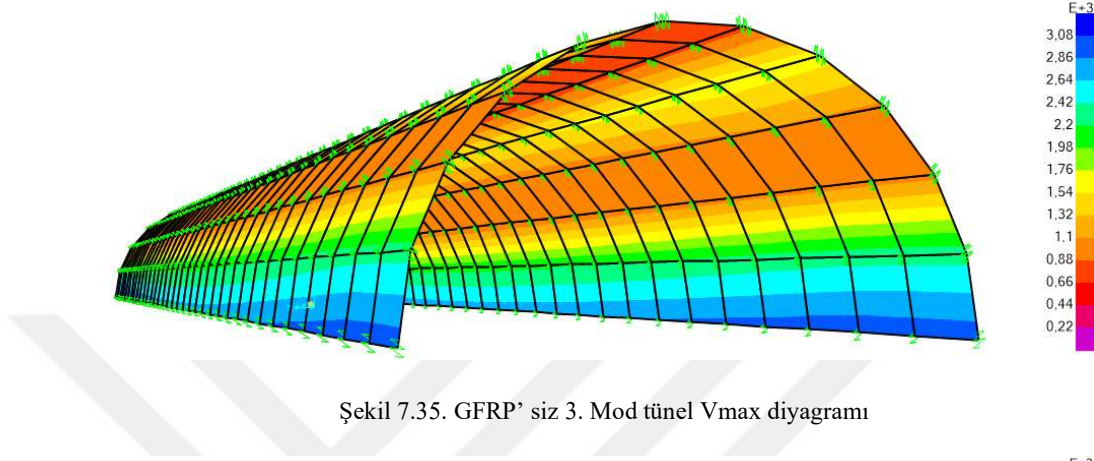
Mod 3:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Kesme Kuvveti ( $V_{max}$ )=3019.82 kN/m.

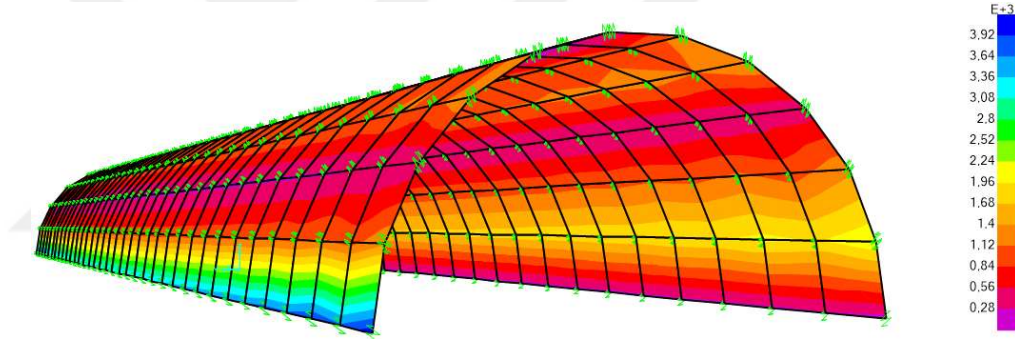
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Moment Değerleri ( $V_{max}$ )=4125.62 kN/m.

Şekil 7.35 ve 7.36' da iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Moment Değerleri Mmax daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.21' de 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.35. GFRP' siz 3. Mod tünel Vmax diyagramı



Şekil 7.36. GFRP' li 3. Mod tünel Vmax diyagramı

Tablo 7.23. 3.Mod (Vmax) Karşılaştırılması

Mod	Vmax (kN/m) GFRP' siz	max (kN/m) GFRP' li
3	3019.82	4125.62

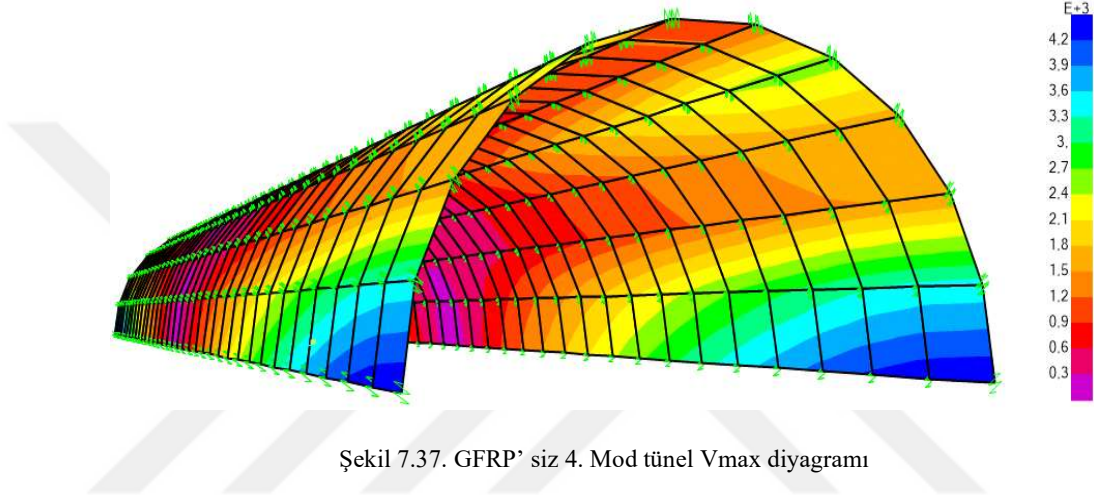
Mod 4:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Kesme Kuvveti (Vmax)=4483.48 kN/m.

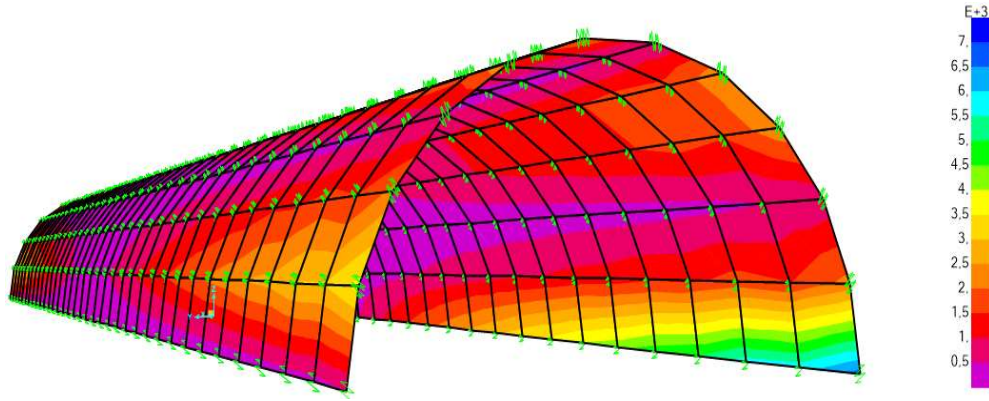
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Moment Değerleri (Vmax)=6774.42 kN/m.

Şekil 7.37 ve 7.38’ de iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Moment Değerleri  $M_{max}$  daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.22’ de 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.37. GFRP’ siz 4. Mod tünel Vmax diyagramı



Şekil 7.38. GFRP’ li 4. Mod tünel Vmax diyagramı

Tablo 7.24. 4.Mod (Vmax) Karşılaştırılması

Mod	Vmax (kN/m) GFRP’ siz	max (kN/m) GFRP’ li
4	4483.48	6774.42

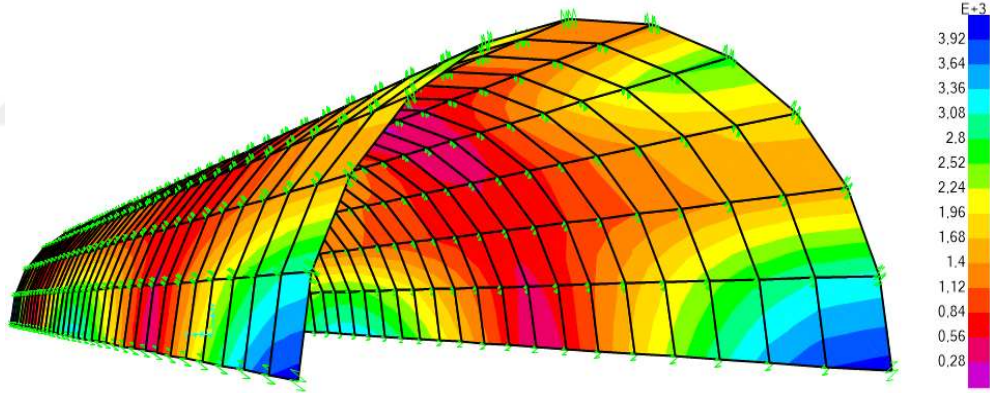
Mod 5:

4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulanmadan önce SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Kesme Kuvveti ( $V_{max}$ )=4061.3 kN/m.

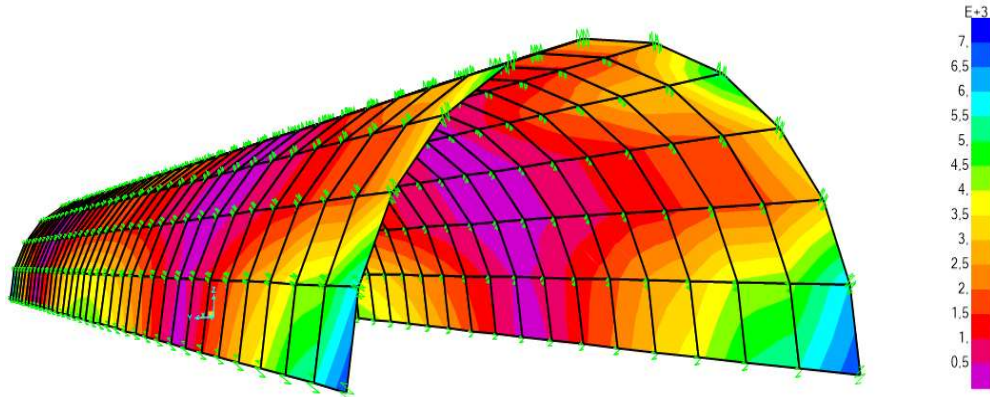
4 mm kalınlığında GFRP kumaşı tünele uygulandıktan sonra SAP2000 programı aracılığıyla çıkarılan değerler bunlardır: Moment Değerleri ( $V_{max}$ )=7145.7 kN/m.

Şekil 7.39 ve 7.40' ta iki durum arasındaki değişim görsel olarak gösterilmektedir.

Moment Değerleri  $M_{max}$  daha net bir şekilde karşılaştırılması için Tablo 7.23' te 4 mm kalınlığında GFRP malzemesinin tünele uygulandıktan sonraki değişimi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.39. GFRP' siz 5. Mod tünel  $V_{max}$  diyagramı



Şekil 7.40. GFRP' li 5. Mod tünel  $V_{max}$  diyagramı

Tablo 7.25. 5.Mod (Vmax) Karşılaştırılması

Mod	Vmax (kN/m) GFRP' siz	Vmax (kN/m) GFRP' li
5	4061.3	7145.7

## 8. SONUÇ

Bu çalışmada 200 mm kalınlığında betonarme tünel kaplamasının alt yüzeyine 4 mm kalınlığında bir GFRP kumaş kaplanarak yapılan güçlendirme neticesinde, yapının ilk beş mod' taki parametrelerin değişim yüzdeleri aşağıda sıralanmıştır.

İlk beş mod incelediğimizde yapının GFRP takviyesinden önceki periyodunun güçlendirme yapıldıktan sonra %3.51-%9.64 ortalama olarak %7.00 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

İlk beş mod Maximum moment değerlerini karşılaştırdığımızda güçlendirme yapıldıktan sonra Mmax değerleri %5.04-%24.40 ortalama olarak %18.38 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

GFRP güçlendirme malzemesi elastisite modülünün yüksek olduğu için, oluşturduğumuz karma kesitin de elastisite modülünü arttırmıştır. Böylece moment değerlerinin büyük oranda azalmasını sağlamıştır.

İlk beş mod Smax değerlerini incelediğimizde GFRP ile güçlendirme yapılmadan önce değerlerin, güçlendirme yapıldıktan sonra %9.62 ortalama olarak oranında artışı görülmektedir.

İlk beş mod Vmax değerleri güçlendirme yapıldıktan sonra %24.22-%75.95 ortalama olarak %48.67 oranında artmıştır.

Betonarme tünelin GFRP ile güçlendirilmesi ile periyotlarda bir azalma açıkça görülmektedir; Periyotlardaki azalmanın yapıyı rezonans aralığından çıkardığı ve rijitliğini arttırdığı da bilinmektedir.

analiz sonuçları incelediğimizde, bu çalışmada betonarme tünelin GFRP ile güçlendirilmesinin tünelin daha güvenli hale getirdiği açıkça görülmektedir. Yukarıda bahsedilen tüm bu gerçeklerin ışığında betonarme tünellerde GFRP takviye yöntemi kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- Adanur, S., Mosallam, A. S., Shinozuka, M., & Gumusel, L. (2011). A comparative study on static and dynamic responses of FRP composite and steel suspension bridges. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(15), 1265–1279. <https://doi.org/10.1177/0731684411418391>.
- Alihassan, A. 2021. *GFRP ile Güçlendirilmiş Endüstriyel Betonarme Bacaların Sonlu Elemanlar Metodu ile Analizi*. Yüksek Lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Samsun.
- Aytaç, E. (2011). *CFRP güçlendirme malzemesi ve güçlendirme teknikleri*. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı.
- Bakkour, F., Tuhta, S., & Günday, F. Determination of Modal Parameters of Reinforced Concrete Box Culvert Retrofitted With Gfrp Using Finite Element Method. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 9(04), S. 1–9. Doi: 10.17605/OSF.IO/63CPZ.
- Bastianini, F., Corradi, M., Borri, A. and Di Tommaso A. 2005. Retrofit and Monitoring of an Historical Building Using “Smart” CFRP with Embedded Fibre Optic Brillouin Sensors. *Construction and Building Materials*, 19:7, 525-535. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.004.
- Chryssanthakis, P., Barton, N., Lorig, L., & Christianson, M. (1997). Numerical simulation of fiber reinforced shotcrete in a tunnel using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3–4), 54.e1-54.e14. [https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(97\)00094-4](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(97)00094-4).
- Correia, J. R., Cabral-Fonseca, S., Branco, F. A., Ferreira, J. G., Eusébio, M. I., & Rodrigues, M. P. (2006). Durability of pultruded glass-fiber-reinforced polyester profiles for structural applications. *Mechanics of Composite Materials*, 42(4), 325–338. <https://doi.org/10.1007/s11029-006-0042-3>.
- fib Fédération internationale du béton, du Béton, F., & Concrete, I. F. S. (2007). *FRP Reinforcement in RC Structures*. International Federation for Structural Concrete (fib).
- Gora, Abdurra'uf Mukhtar and Jaganathan, Jayaprakash and Anwar, M.P. and Alengaram, U. Johnson (2018) Finite element analysis of rectangular reinforced concrete columns wrapped with FRP composites. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 431. 072005/1-072005/8. ISSN 1757-899X.
- Gökçen, C. 2019. *FRP ile Güçlendirilmiş Betonarme Elemanlarda FRP-Beton Sıyrılma Davranışının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Gökçe, O. 2015. *Tünellerde Çelik Hasır Yerine Çelik Tel Kullanımının Mekanik Açısından Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Günaydın, M., Adanur, S., Altunışık, A.C. ve Sevim, B., 2015. Static and Dynamic Responses of Halvagar Footbridge Using Steel and FRP Materials, *Steel and Composite Structures*, 18, 51-69.
- Hammoud, M. A., Tuhta, S., & Günday, F. Determination of Modal Parameters of Reinforced Concrete Tunnel Retrofitted With CFRP Using Finite Element Method. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 9(04), Pp. 10–18. Doi: 10.17605/Osf.Io/Qmwwg.

- Hara, T. (2013). Structural Behavior of FRP Tunnel Lining. *Advanced Materials Research*, 831, 115–119. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.831.115>.
- Hepbostancı, O. E. 2017. *Tünel Tasarımına Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü.
- Jiang, Y., Wang, X., Li, B., Higashi, Y., Taniguchi, K., & Ishida, K. (2017). Estimation of reinforcing effects of FRP-PCM method on degraded tunnel linings. *Soils and Foundations*, 57(3), 327–340. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.05.002>.
- Kasimzade, A.A., & Tuhta, S. (2005) Finite Element, Analytical, Experimental Investigation of Reinforced Concrete Beams Strengthened with GFRP and Related Structure Analysis Problem' s Solutions, *AACEU*, Scientific Works No 0, pp.18-26.
- Kasimzade, A.A., & Tuhta S. (2012). Analytical, Numerical And Experimental Examination of Reinforced Composites Beams Covered with Carbon Fiber Reinforced Plastic, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 42, pp. 55- 70.
- Kasimzade, A.A., & Tuhta, S. (2017) OMA of Model Steel Structure Retrofitted with GFRP Using Earthquake Simulator, *Earthquakes and Structures*, vol. 12, pp. 689-697.
- Keskin, R. S. O., Arslan, G., & Sengun, K. (2017). Influence of CFRP on the shear strength of RC and SFRC beams. *Construction and Building Materials*, 153, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.170>.
- Kolymbas, D. (2005). *Tunnelling and tunnel mechanics: A rational approach to tunnelling*. Springer Science & Business Media.
- Kökçüoğlu, H. 2006. *Sonlu Elemanlar Metodu ile Tünel Modellemesi ve Bir Uygulama*. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Liu, D., Huang, H., Yue, Q., Xue, Y., & Wang, M. (2015). Behaviour of tunnel lining strengthened by textile-reinforced concrete. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(8), 964–976. <https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1076009>.
- Mukherjee, A., & Arwihar, S. (2007). Performance of externally bonded GFRP sheets on concrete in tropical environments. Part I: Structural scale tests. *Composite Structures*, 81(1), 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.05.013>.
- Mukherjee, A., & Arwihar, S. (2007b). Performance of externally bonded GFRP sheets on concrete in tropical environments. Part II: Microstructural tests. *Composite Structures*, 81(1), 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.05.002>.
- Norris, T., Saadatmanesh, H., & Ehsani, M. R. (1997). Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets. *Journal of Structural Engineering*, 123(7), 903–911. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1997\)123:7\(903\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1997)123:7(903)).
- Öztürk, H. T. 2007. *Tüneller ve Tasarım İlkeleri*. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Öztürk, O. 2014. *Metro Tünellerinin İstanbul Örneğinde Çok Yönlü İncelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ulaştırma Mühendisliği Programı, İstanbul.
- Peila, D., Viggiani, G., & Celestino, T. (2020). *Tunnels and Underground Cities. Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art: Volume 1: Archaeology, Architecture and Art in Underground Construction* (1st ed.). CRC Press.
- Quagliarini, E., Monni, F., Lenci, S., & Bondioli, F. (2012). Tensile characterization of basalt fiber rods and ropes: A first contribution. *Construction and Building Materials*, 34, 372–380. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.080>.

- Sandstrom, G. E. (1963). *History of Tunnelling, the: Underground Workings Through the Ages* (1st ed.). London: Barrie & Rockcliff.
- Sipahioğlu, M. 2006. *Betonarme Binaların Fiber Takviyeli Polimer Sistemi ile Onarım ve Güçlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Samsun.
- Şahin, Y., “*Kompozit Malzemelere Giriş*”, Gazi Kitabevi, Ankara, 2-33 (2000).
- Tuhta, S., Abrar, O., & Günday, F. (2019). Experimental Study on Behavior of Bench-Scale Steel Structure Retrofitted with CFRP Composites under Ambient Vibration. *European Journal of Engineering Research and Science*, 4(5), 109–114.
- Tuhta, S., Günday, F., & Alihassan, A. (2020). The Effect of CFRP Reinforced Concrete Chimney on Modal Parameters Using Finite Element Method. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 7(2), 1–6.
- Tuhta, S., Günday, F., & Pehlivan, N. C. (2019). Investigation of CFRP Retrofitting Effect on Masonry Dome on Bending Moment Using Finite Element Method. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 6(6), 18–22.
- Tuhta, S., Günday, F., & Warayth, M. O. (2021). The Effect of GFRP Steel Silo on Modal Parameters Using Finite Element Method. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 8(7), 41-46.
- Tuhta, S., Günday, F., & Aydın, H. (2019). Dynamic Analysis of Model Steel Structures Retrofitted with GFRP Composites under Microtremor Vibration. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 3(2), 729–733.
- Zhang, J. L., Liu, X., Ren, T. Y., Yuan, Y., & Mang, H. A. (2019). Structural behavior of reinforced concrete segments of tunnel linings strengthened by a steel-concrete composite. *Composites Part B: Engineering*, 178, 107444.
- Ziada, M., Tuhta, S., Gençbay, E. H., Günday, F., & Tammam, Y. (2019). Analysis of Tunnel Form Building Retrofitted with using Finite Element Method. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 3(2), 822–826.

## ÖZ GEÇMİŞ

Mahmoud ALSHEKH HAMMOUD, Homs Ibn Khaldon Lisesi' ni bitirdikten sonra Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat bölümünden 08.06.2020 tarihinde mezun oldu. 2020 yılında OMÜ İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans programına girdi. İyi derecede İngilizce/ Arapça bilmektedir.

### İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0000-0003-3797-5365.

### Yayınlar:

1. ALSHEKH HAMMOUD Mahmoud, TUHTA Sertaç and GÜNDAY Furkan (2022) "Determination of Modal Parameters of Reinforced Concrete Tunnel Retrofitted with CFRP Using Finite Element Method", International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology, 9(04), Pp. 10–18. Doi: 10.17605/Osf.Io/Qmwigv.