

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BETONDA DONATI OLARAK**  
**KULLANILAN KARBON FİBER**  
**TAKVİYELİ POLİMERLERİN ÇELİK**  
**DONATI İLE KARŞILAŞTIRMALI YAŞAM**  
**DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ**

**Onur YILDIZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mimarlık Anabilim Dalı**

**Yapı Programı**

**Danışman**

**Prof. Dr. Gökçe TUNA**

**Temmuz, 2025**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONDA DONATI OLARAK KULLANILAN KARBON  
FİBER TAKVİYELİ POLİMERLERİN ÇELİK DONATI İLE  
KARŞILAŞTIRMALI YAŞAM DÖNGÜSÜ  
DEĞERLENDİRMESİ**

Onur YILDIZ tarafından hazırlanan tez çalışması 09.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Gökçe TUNA  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Gökçe TUNA, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ezgi KORKMAZ, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Çiğdem TEKİN, Üye  
Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Danışmanım Prof. Dr. Gökçe TUNA sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Betonda Donatı Olarak Kullanılan Karbon Fiber Takviyeli Polimerlerin Çelik Donatı ile Karşılaştırmalı Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Onur YILDIZ

İmza



*Aileme*

## TEŞEKKÜR

---

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında bilgi, deneyim ve yönlendirmeleriyle bana rehberlik eden değerli tez danışmanım Prof. Dr. Gökçe TUNA'ya yardımları ve sağladığı destek için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunmamda eleştirileri ve önerileriyle çalışmamı zenginleştiren jüri üyelerim Prof. Dr. Çiğdem ÇELİK ve Doç. Dr. Ezgi KORKMAZ hocalarıma sağladıkları yardımdan ve değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Çalışma sürecim boyunca beni cesaretlendiren ve yanımda olan anneme, babama ve kardeşime; anlayışlarıyla ve destekleriyle tez sürecimi tamamlamam için büyük emek veren dostlarım Nur FIRAT ve Halis FIRAT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Onur YILDIZ

# İÇİNDEKİLER

---

|                                                                                                                       |             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>SİMGE LİSTESİ</b>                                                                                                  | <b>vii</b>  |
| <b>KISALTMA LİSTESİ</b>                                                                                               | <b>viii</b> |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                                                                                  | <b>x</b>    |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                                                                                                  | <b>xiii</b> |
| <b>ÖZET</b>                                                                                                           | <b>xv</b>   |
| <b>ABSTRACT</b>                                                                                                       | <b>xvii</b> |
| <b>1 GİRİŞ</b>                                                                                                        | <b>1</b>    |
| 1.1 Literatür Özeti.....                                                                                              | 4           |
| 1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı.....                                                                                       | 10          |
| 1.3 Yöntem ve Hipotez .....                                                                                           | 11          |
| <b>2 KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMERLERİN (CFRP) YAPI ÜRÜNÜ OLARAK KULLANIMI VE ÇELİK DONATI İLE KARŞILAŞTIRILMASI</b> | <b>14</b>   |
| 2.1 Yapı Ürünü Olarak CFRP'nin Kullanım Alanları .....                                                                | 15          |
| 2.2 Beton Kirişlerde Çubuk Donatı Olarak Kullanılan CFRP'nin Diğer Kompozit Ürünlerle Karşılaştırılması.....          | 29          |
| 2.3 Beton Kirişlerde Çubuk Donatı Olarak Kullanılan CFRP'nin Çelik Donatı ile Karşılaştırılması .....                 | 37          |
| <b>3 YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ</b>                                                                                | <b>46</b>   |
| 3.1 Yaşam Döngüsü Süreçleri .....                                                                                     | 49          |
| 3.2 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Metodolojisi.....                                                                   | 53          |
| 3.2.1 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin Hedef ve Sınırlarının Belirlenmesi                                             | 53          |
| 3.2.2 Envanter Analizi                                                                                                | 54          |
| 3.2.3 Çevresel Etki Değerlendirmesi                                                                                   | 56          |
| 3.2.3.1 Sınıflandırma                                                                                                 | 56          |
| 3.2.3.2 Karakterizasyon                                                                                               | 58          |
| 3.2.3.3 Normalizasyon                                                                                                 | 59          |

|                                                                                           |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2.3.4 Gruplama                                                                          | 59         |
| 3.2.3.5 Ağırlıklandırma                                                                   | 61         |
| 3.2.4 Verilerin Açıklanması ve Yorumlanması                                               | 61         |
| 3.3 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde Kullanılan Alternatif Metotlar .....                 | 62         |
| <b>4 CFRP'LERİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ VE YAPI İLİŞKİSİ</b>                        | <b>65</b>  |
| 4.1 CFRP'lerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi .....                                        | 66         |
| 4.1.1 CFRP'lerin Hammadde Edinimi Süreçlerinin YDD Bağlamında İncelenmesi                 | 67         |
| 4.1.2 CFRP Üretim Süreçlerinin YDD Bağlamında İncelenmesi                                 | 75         |
| 4.1.3 CFRP'lerin Kullanım Süreçlerinin YDD Bağlamında İncelenmesi                         | 82         |
| 4.1.4 CFRP'lerin Geri Dönüşüm ve Atık Oluşum Süreçlerinin YDD Bağlamında İncelenmesi      | 86         |
| 4.2 Bulgular ve Bölüm Değerlendirmesi .....                                               | 92         |
| 4.2.1 Hammadde Edinimi ve Üretim Süreçleri Bağlamında Çelik ve CFRP'nin Karşılaştırılması | 97         |
| 4.2.2 Kullanım Süreçleri Bağlamında Çelik ve CFRP'nin Karşılaştırılması                   | 98         |
| 4.2.3 Yaşam Döngüsü Sonu ve Geri Dönüşüm Bağlamında Çelik ve CFRP'nin Karşılaştırılması   | 99         |
| <b>5 SONUÇ</b>                                                                            | <b>102</b> |
| <b>KAYNAKÇA</b>                                                                           | <b>107</b> |
| <b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>                                                          | <b>117</b> |

## SİMGE LİSTESİ

---

|                               |                   |
|-------------------------------|-------------------|
| NH <sub>3</sub>               | Amonyak           |
| Sb                            | Antimon           |
| Ar                            | Argon             |
| Eq                            | Equivalent        |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | Etan              |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | Etilen            |
| H <sub>2</sub>                | Hidrojen          |
| HCl                           | Hidrojen Klorür   |
| HCN                           | Hidrojen Siyanür  |
| CO <sub>2</sub>               | Karbon dioksit    |
| CO                            | Karbon monoksit   |
| Kg                            | Kilogram          |
| SO <sub>2</sub>               | Kükürt dioksit    |
| MJ                            | Megajoule         |
| MPa                           | Megapascal        |
| CH <sub>4</sub>               | Metan gazı        |
| N <sub>2</sub>                | Nitrojen          |
| NO <sub>x</sub>               | Nitrojen Oksitler |
| N <sub>2</sub> O              | Nitröz oksit      |
| O <sub>2</sub>                | Oksijen           |
| PAN                           | Poliakrilonitril  |
| NaOH                          | Sodyum Hidroksit  |
| NaCl                          | Sodyum Klorür     |
| H <sub>2</sub> O              | Su                |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|        |                                                                                                                         |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AASHTO | American Association of State Highway and Transportation Officials – Amerikan Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği |
| ACI    | American Concrete Institute – Amerikan Beton Enstitüsü                                                                  |
| ADPf   | Fosil Kaynak Tüketimi                                                                                                   |
| AP     | Asidifikasyon Potansiyeli                                                                                               |
| BFRP   | Bazalt Elyaf Takviyeli Polimer                                                                                          |
| CFRP   | Karbon Fiber Takviyeli Polimer                                                                                          |
| CSA    | Canadian Standards Association – Kanada Standartlar Birliği                                                             |
| EEA    | European Environment Agency - Avrupa Çevre Ajansı                                                                       |
| EN     | European Norms                                                                                                          |
| EP     | Ötrofikasyon Potansiyeli                                                                                                |
| EPD    | Environmental Product Declaration – Çevresel Ürün Beyanı                                                                |
| ETP    | Ekotoksosite Potansiyeli                                                                                                |
| FIB    | The International Federation for Structural Concrete – Uluslararası Yapısal Beton Federasyonu                           |
| FRP    | Fiber Takviyeli Polimer                                                                                                 |
| GFRP   | Cam Elyaf Takviyeli Polimer                                                                                             |
| GWP    | Küresel Isınma Potansiyeli                                                                                              |
| HCT    | Kanserojen Toksisite                                                                                                    |
| HTP    | İnsan Toksisitesi Potansiyeli                                                                                           |
| IBU    | Institut Bauen und Umwelt                                                                                               |
| IRP    | İyonize Edici Radyasyon                                                                                                 |
| ISO    | International Organization for Standardization – Uluslararası Standardizasyon Örgütü                                    |
| LOP    | Arazi Kullanımı                                                                                                         |
| ME     | Deniz Ötrofikasyonu                                                                                                     |
| MEX    | Deniz Ekotoksitesi                                                                                                      |
| MRI    | Midwest Research Institute – Midwest Araştırma Enstitüsü                                                                |
| MRS    | Mineral Kaynak Azalması                                                                                                 |
| NEPA   | Ulusal Çevre Politikası Yasası                                                                                          |
| ODP    | Stratosferik Ozon Tükenimi                                                                                              |
| OFP    | Fotokimyasal Ozon Oluşumu                                                                                               |

|         |                                                                                           |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| OHH     | İnsan Sağlığına Zararlı Ozon Oluşumu                                                      |
| PMFP    | Partikül Madde Oluşumu                                                                    |
| REPA    | Resource and Environmental Profile Analysis – Kaynak ve Çevre Profil Analizi              |
| SETAC   | Society of Environmental Toxicology and Chemistry – Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği |
| SOP-FFP | Kaynak Kullanımı                                                                          |
| TA      | Karasal Asidifikasyon                                                                     |
| TE      | Karasal Ekotoksisite                                                                      |
| UV      | Ultraviyole                                                                               |
| VOC     | Uçucu Organik Bileşikler                                                                  |
| W       | Su Tüketimi                                                                               |
| WCP     | Su Kullanımı                                                                              |
| WoS     | Web of Science                                                                            |
| YDD     | Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi                                                             |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                   |                                                                                                                                                                                                            |           |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Şekil 1.1</b>  | Web of Science (WoS) ve Scopus veri tabanlarından elde edilen bilgilere göre 2015-2024 arasında CFRP'lerin yapı ile ilişkisi üzerine yayınlanmış çalışmaların sayısının yıllara göre değişimi. ....        | <b>5</b>  |
| <b>Şekil 1.2</b>  | Web of Science (WoS) ve Scopus veri tabanlarından elde edilen bilgilere göre 2015-2024 arasında CFRP'lerin yapı ile ilişkisi üzerine yayınlanmış çalışmaların sayısının yıllara göre değişimi. ....        | <b>6</b>  |
| <b>Şekil 1.3</b>  | Web of Science (WoS) ve Scopus veri tabanlarından elde edilen bilgilere göre 2015-2024 arasında CFRP'lerin YDD'si üzerine yayınlanmış çalışmaların sayısının yıllara göre değişimi. ....                   | <b>7</b>  |
| <b>Şekil 1.4</b>  | Web of Science (WoS) ve Scopus veri tabanlarından elde edilen bilgilere göre 2015-2024 arasında yapı ürünü olarak CFRP'lerin YDD'si üzerine yayınlanmış çalışmaların sayısının yıllara göre değişimi. .... | <b>8</b>  |
| <b>Şekil 2.1</b>  | CFRP ürünlerin Karbon Fiber Liflerden Elde Edilmesi (Kim, Y.J., vd.) .....                                                                                                                                 | <b>16</b> |
| <b>Şekil 2.2</b>  | MC Bauchemie Binası Cephe Paneli Teknik Çizimi (Von der Heid, A.C., Grebe, R) .....                                                                                                                        | <b>17</b> |
| <b>Şekil 2.3</b>  | MC Bauchemie Binası Cephe Görüntüsü, Almanya (Hempel, J.) .....                                                                                                                                            | <b>18</b> |
| <b>Şekil 2.4</b>  | Kolon Güçlendirme Çalışmalarında CFRP'nin Uygulanması Gereken Kritik Bölge (ACI 440.2R-17, 2017) .....                                                                                                     | <b>19</b> |
| <b>Şekil 2.5</b>  | CFRP ile Kiriş Güçlendirme Çalışmalarında Yaygın Olarak Kullanılan Teknikler (Davies, P., vd.), (Grace, N.F., vd.), (Zhishen, W., vd.), (Amran, Y.H.M., vd.) .....                                         | <b>20</b> |
| <b>Şekil 2.6</b>  | Yığma Yapı Üzerinde Yapılan Güçlendirme Çalışmasında Cephedeki Uygulamanın Şematik Gösterimi ve Kompozit Güçlendirme Elemanlarının Ankraj Detayları (Triantafillou, T. C., Fardis, M. N.)                  | <b>22</b> |
| <b>Şekil 2.7</b>  | Tonoz Güçlendirme Çalışması Uygulama Fotoğrafı (Bastianini, F., vd.) .....                                                                                                                                 | <b>22</b> |
| <b>Şekil 2.8</b>  | Tonoz Güçlendirme Çalışması Kesit Detayı (Bastianini, F., vd.) .....                                                                                                                                       | <b>23</b> |
| <b>Şekil 2.9</b>  | Tarihi Yapı Kubbesi Üzerinde Yapılacak Çalışma İçin Hazırlanan Deney Düzenegi (Jasieńko, J., vd.) .....                                                                                                    | <b>23</b> |
| <b>Şekil 2.10</b> | Körpü ve Altyapı Tesislerinde Kullanılan CFRP Donatılar ve Kirişler; a: CFRP ankraj ucu, b: CFRP ard germe detayı, c: CFRP donatılarla hazırlanmış kirişler (Kim, Y.J., vd.) .....                         | <b>25</b> |
| <b>Şekil 2.11</b> | Rosensteinsteg-II Köprüsü, Almanya (Khorgade, P., vd.) .....                                                                                                                                               | <b>26</b> |
| <b>Şekil 2.12</b> | A20 Otobanı Köprü Projesi, Almanya (Khorgade, P., vd.) .....                                                                                                                                               | <b>26</b> |

|                   |                                                                                                                                                                                       |           |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Şekil 2.13</b> | Steve Jobs Theater, Apple Park, ABD (Foster + Partners).....                                                                                                                          | <b>27</b> |
| <b>Şekil 2.14</b> | The Cube Projesi, Dresden Teknik Üniversitesi Kampüsü, Almanya (HENN).....                                                                                                            | <b>28</b> |
| <b>Şekil 2.15</b> | CFRP, GFRP, BFRP ve AFRP için Emniyet Katsayısı ( $F_{fu}$ ) Uygulanmış Çekme Dayanımı Değerleri (Prince Engineering; Hensher, D.A.; Peter, D., vd.). ....                            | <b>34</b> |
| <b>Şekil 3.1</b>  | Web of Science (WoS) ve Scopus veri tabanlarından elde edilen bilgilere göre 2001-2024 arasında YDD ile ilgili yayınların sayısının yıllara göre değişimi. ....                       | <b>48</b> |
| <b>Şekil 3.2</b>  | Web of Science (WoS) ve Scopus veri tabanlarından elde edilen bilgilere göre 2001-2024 arasında yapıların YDD bağlamında incelendiği yayınların sayısının yıllara göre değişimi. .... | <b>49</b> |
| <b>Şekil 3.3</b>  | Yapı ürününün yaşam döngüsü süreçleri ve birbirleri ile ilişkileri (Tuna Taygun, G.). ....                                                                                            | <b>50</b> |
| <b>Şekil 3.4</b>  | EN 15978 standartlarına göre yapı yaşam döngüsü süreçlerinin gruplandırılması (CEN 2011) ....                                                                                         | <b>51</b> |
| <b>Şekil 3.5</b>  | Yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmalarının yürütülmesinde gerçekleştirilen işlemlerin ve ele alınan kavramların birbiriyle ilişkisi (Rashid A., Yussof, S.; ISO 14040).....         | <b>53</b> |
| <b>Şekil 3.6</b>  | 2000-2016 yılları arasında geliştirilmiş olan YDD metotları ve ortaya çıktıkları ülkeler (Rosenbaum, R.K.).....                                                                       | <b>63</b> |
| <b>Şekil 4.1</b>  | Karbon Fiber Takviyeli Polimerler'in yaşam döngüsü süreçlerinde geçebileceği aşamaların alternatif senaryolar çerçevesinde gösterilmesi .....                                         | <b>67</b> |
| <b>Şekil 4.2</b>  | CFRP Üretiminde Hammaddelerin İşlenme Süreçleri.....                                                                                                                                  | <b>75</b> |
| <b>Şekil 4.3</b>  | Lignin kaynaklı karbon fiber kullanımı durumunda üretim için gerekli olan hammaddeler ve bu hammaddelerin birleşim süreçleri .....                                                    | <b>76</b> |
| <b>Şekil 4.4</b>  | PAN kaynaklı karbon fiber kullanımı durumunda üretim için gerekli olan hammaddeler ve bu hammaddelerin birleşim süreçleri .....                                                       | <b>76</b> |
| <b>Şekil 4.5</b>  | Açık reçine banyolu pultrüzyon süreçlerinin şematik gösterimi (Baran, I.).....                                                                                                        | <b>78</b> |
| <b>Şekil 4.6</b>  | Reçine enjeksiyon bölmeli pultrüzyon süreçlerinin şematik gösterimi (Baran, I).....                                                                                                   | <b>78</b> |
| <b>Şekil 4.7</b>  | Pultrüzyon süreçlerinin yürütülmesi için gerekli olan girdiler ve süreç sonucunda oluşan çıktılar.....                                                                                | <b>79</b> |
| <b>Şekil 4.8</b>  | CFRP'lerin Yanması Sonucunda Salındığı Gözlemlenen Partikül ve Zararlı Gazlar .....                                                                                                   | <b>85</b> |
| <b>Şekil 4.9</b>  | CFRP'lerin ayrıştırılması süreçlerinde akışkan yatak yönteminin kullanımı (Wei, Y., Hadigheh, S.A.). ....                                                                             | <b>88</b> |
| <b>Şekil 4.10</b> | Birer Kilogram Çelik Donatı, Hasır/Kumaş Formunda CFRP ve Bar Formunda CFRP Üretiminin Küresel Isınma Etkisi, Asidifikasyon                                                           |           |

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Potansiyeli ve Fosil Kaynak Tüketimi Kriterleri Çerçevesinde Karşılaştırılması (Stoiber, N. Vd.) ..... | 95 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.11</b> Birer Megapaskal (Mpa) Dayanıma Sahip Çelik Donatı, Hasır/Kumaş Formunda CFRP ve Bar Formunda CFRP Üretiminin Küresel Isınma Etkisi, Asidifikasyon Potansiyeli ve Fosil Kaynak Tüketimi Kriterleri Çerçevesinde Karşılaştırılması (Stoiber, N. Vd.)..... | 96 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|



## TABLO LİSTESİ

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1.1</b> | Literatürde yapı ürünü olarak CFRP'nin yaşam döngüsü değerlendirmesi üzerine yapılan çalışmalarda incelenen konular .....                                                                                                                                                                                          | 9  |
| <b>Tablo 2.1</b> | Kiriş Güçlendirme Çalışmalarında Yaygın Olarak Kullanılan Tekniklerle İlgili Avantajlar ve Dezavantajlar .....                                                                                                                                                                                                     | 21 |
| <b>Tablo 2.2</b> | FRP'lerin Yapı Ürünü Olarak Karşılaştırılmasında Kullanılan Parametreler .....                                                                                                                                                                                                                                     | 30 |
| <b>Tablo 2.3</b> | CFRP, GFRP, BFRP ve AFRP'nin Çekme Dayanım Verileri (ACI 440.1R-15; Landesmann, A., vd.; Adhikari, S.). .....                                                                                                                                                                                                      | 33 |
| <b>Tablo 2.4</b> | CFRP, GFRP, BFRP ve AFRP'nin Basınç Dayanım Verileri.....                                                                                                                                                                                                                                                          | 35 |
| <b>Tablo 2.5</b> | CFRP, GFRP, BFRP ve AFRP'nin Elastisite Modülü Değerleri (Landesmann, A., vd.; Adhikari, S; Hasan, A.M.; Sovjak, R., vd.; El-Tahan, M., vd.; Yavuz, G.). .....                                                                                                                                                     | 36 |
| <b>Tablo 2.6</b> | CFRP ve Çelik Donatının Çekme Dayanımı, Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü Verileri (Orumu, S.T.; Achamyeh, T. vd.; Fayed, S., vd.; Landesmann, A., vd.; Adhikari, S; Hasan, A.M.; Sovjak, R., vd.; El-Tahan, M., vd.; Yavuz, G.). .....                                                                         | 37 |
| <b>Tablo 2.7</b> | Donatı Alternatifleri Olarak Çelik ve CFRP'nin 600cm x 30cm x 50cm Boyutlarındaki Örnek Betonarme Kiriş Üzerinden Karşılaştırılması. ....                                                                                                                                                                          | 39 |
| <b>Tablo 2.8</b> | 38m Uzunluğunda Tek Şeritli Üst Geçit Projesinde Alternatif Senaryolarda Kullanılan Malzeme ve Yapı Ürünü Miktarı (Khorgade, P., vd.). .....                                                                                                                                                                       | 43 |
| <b>Tablo 3.1</b> | SimaPro ve ReCiPe'ye göre çevresel etki analizinde kullanılan çevre etkisi kategorileri ve ilgili oldukları ölçüm birimleri.....                                                                                                                                                                                   | 58 |
| <b>Tablo 3.2</b> | Çevresel etki analizinde kullanılan ara değerlendirme kategorilerinin ve toplam çevre etkisinin değerlendirilmesinde kullanılan üst kategorilerin ilişkilendirilmesi .....                                                                                                                                         | 60 |
| <b>Tablo 4.1</b> | PAN ve lignin işlenmesiyle CFRP hammadde edinimi süreçlerindeki girdi ve çıktılar .....                                                                                                                                                                                                                            | 68 |
| <b>Tablo 4.2</b> | 1kg PAN temelli karbon fiber ve 1kg lignin temelli karbon fiber üretimindeki birincil enerji ihtiyacı ve süreç sonucunda gözlemlenen CO2 salınımı düzeyleri (Das, S.) .....                                                                                                                                        | 70 |
| <b>Tablo 4.3</b> | 1kg karbon fiber ve reçine edinim süreçleri için literatürde “küresel ısınma etkisi (GWP)”, “asidifikasyon potansiyeli (AP)” ve “fosil kaynak tüketimi (ADPf)” kriterleri çerçevesinde tespit edilen minimum ve maksimum değerler (Hohmann, A.; Avrupa Komisyonu; Prenzel, T., vd.; Janssen M., vd.; Das, S.)..... | 72 |

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                       |            |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Tablo 4.4</b>  | 1kg PAN temelli karbon fiberin ve 1kg epoksi reçinenin üretim süreçlerinin incelenmesiyle elde edilen çevre etkisi değerleri (Backes, J.G., vd.; Avrupa Komisyonu; Plastics Europe; IBU) .....                                                                        | <b>74</b>  |
| <b>Tablo 4.5</b>  | PAN ve lignin temelli CFRP'lerin üretim süreçlerinin aşamalarıyla birlikte bu süreçteki katı, sıvı, gaz girdi ve çıktıların türleri.....                                                                                                                              | <b>80</b>  |
| <b>Tablo 4.6</b>  | Küresel Isınma Etkisi, Asidifikasyon Potansiyeli ve Fosil Yakıt Kullanımı Kriterleri Çerçevesinde 1 Kg CFRP'nin Hammadde Edinim ve Üretim Süreçlerinin (A1-A3) Çevre Etkisi Değerleri (Stoiber, N., vd.; Kromoser, B., vd.; Solidian EPD) .....                       | <b>81</b>  |
| <b>Tablo 4.7</b>  | Küresel Isınma Etkisi, Asidifikasyon Potansiyeli ve Fosil Yakıt Kullanımı Kriterleri Çerçevesinde 1 Kg Beton Üretimine Yönelik Çevre Etkisi Değerleri (Becke, A., vd.).....                                                                                           | <b>84</b>  |
| <b>Tablo 4.8</b>  | Kullanım ömürleri tamamlanan CFRP'lerin dolgu malzemesi olarak depolanması ya da enerji kazanımlı yakılması sonucunda enerji tüketimi ve küresel ısınma potansiyeli kriterleri çerçevesinde oluşan çevre etkisi (Wei, Y., Hadigheh, S.A.) .....                       | <b>86</b>  |
| <b>Tablo 4.9</b>  | 1kg CFRP atığının işlenmesi için mekanik, termal ve kimyasal geri dönüşüm süreçlerindeki çevresel etki düzeyleri (Wei, Y., Hadigheh, S.A.) .....                                                                                                                      | <b>89</b>  |
| <b>Tablo 4.10</b> | Küresel Isınma Etkisi, Asidifikasyon Potansiyeli ve Fosil Yakıt Kullanımı Kriterleri Çerçevesinde 1 Kg Çelik Üretimine Yönelik EPD verileri .....                                                                                                                     | <b>93</b>  |
| <b>Tablo 4.11</b> | Küresel Isınma Etkisi, Asidifikasyon Potansiyeli ve Fosil Yakıt Kullanımı Kriterleri Çerçevesinde 1 Kg Çelik Üretimine Yönelik Minimum ve Maksimum Çevre Etkisi Değerleri (Dünya Çelik Birliği; Omar, S., Abdelhadi A.; Khorgade, P., vd.; Stoiber, N., vd.).....     | <b>94</b>  |
| <b>Tablo 4.12</b> | 600cm x 30cm x 50cm Boyutlarındaki Betonarme Kiriş için Gerekli Olan Miktardaki Çelik ve CFRP'nin Hammadde Edinimi ve Üretim Süreçlerinde GWP, AP ve ADPf Çerçevesinde Gözlemlenen Çevresel Etki Düzeyleri (Stoiber, N., vd.; Kromoser, B., vd.; ATSM Chomarat) ..... | <b>98</b>  |
| <b>Tablo 4.13</b> | 600cm x 30cm x 50cm Boyutlarındaki Betonarme Kiriş için Gerekli Olan Miktardaki Çelik ve CFRP'nin Bertaraf Süreçlerinde GWP, AP ve ADPf Çerçevesinde Gözlemlenen Çevresel Etki Düzeyleri (Arcelor EPD, Infrabuild EPD, Solidian EPD) .....                            | <b>100</b> |
| <b>Tablo 4.14</b> | 600cm x 30cm x 50cm Boyutlarındaki Betonarme Kiriş için Gerekli Olan Miktardaki Çelik ve CFRP'nin Geri Dönüşüm Süreçlerinde GWP, AP ve ADPf Çerçevesinde Gözlemlenen Çevresel Etki Düzeyleri (Arcelor EPD, Infrabuild EPD, Solidian EPD).....                         | <b>100</b> |

## ÖZET

---

# **BETONDA DONATI OLARAK KULLANILAN KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMERLERİN ÇELİK DONATI İLE KARŞILAŞTIRMALI YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ**

Onur YILDIZ

Mimarlık Anabilim Dalı

Yapı Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Gökçe TUNA

Dünya genelinde artan nüfus ve üretim miktarı nedeniyle derinleşen çevresel krizleri doğrudan etkileyen doğal kaynak kullanımının %32-60'ı, enerji kullanımının ise 40%'ı yapı endüstrisiyle ilişkili süreçlerden kaynaklanmakta; bu süreçlerde her yıl yaklaşık 10 milyar ton atık oluşmaktadır. Tez çalışmasında karbon fiber takviyeli polimerlerin (CFRP) yapı ürünü olarak kullanılmasıyla yapı endüstrisinde bu bağlamda sağlanabilecek iyileştirmelerin ortaya konması amaçlanmıştır. Söz konusu iyileştirmelerin düzeyinin tespit edilebilmesi için yapı ürünü olarak CFRP'lerin çelik gibi yaygın bir alternatifle çevre etkisi bağlamında karşılaştırılması uygun bulunmuş, bu karşılaştırma yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) çerçevesinde yürütülmüştür. Ürünlerin yaşam döngüsünün hammadde

edinimi–üretim, kullanım, bertaraf ve geri dönüşüm aşamaları tez kapsamına dahil edilmiştir.

Tezin ilk bölümünde CFRP'nin yapı ürünü olarak kullanımı üzerine kapsamlı bir literatür taraması yapılmış, edinilen kaynaklar tez konusuna yakınlık düzeylerine göre derlenmiştir. İkinci bölümde CFRP'nin yapı taşıyıcı sistem içerisindeki kullanım alanları ve gösterdiği mekanik performans incelenmiştir. Betonarme kirişlerde çubuk donatı olarak çelik yerine CFRP kullanılması durumunda gereksinim duyulan ürün miktarının nasıl değiştiğinin tespit edilebilmesi adına teorik olarak bir kiriş üretilmiş ve yaklaşık mekanik hesaplamalar yapılmıştır.

Üçüncü bölümde ise YDD metodolojisi incelenmiş, yapı ürünü özelinde yürütülen YDD çalışmalarında sağlıklı sonuçlara ulaşmak için dikkat edilmesi gereken noktalar tespit edilmiştir. Dördüncü bölümde tez boyunca edinilen bilgiler karşılaştırmalı bir YDD analizinde kullanılmış, belirlenen EPD raporlarındaki çevresel etki değerleri ikinci bölümde tespit edilen ürün miktarları üzerinden CFRP ve çelik için yeniden hesaplanmıştır.

Sonuç olarak üretim aşamasındaki asidifikasyon yükü dışındaki alanlarda CFRP'nin kütle avantajı ve geri dönüşüm olanakları yardımıyla daha düşük çevresel etki değerleri gösterdiği gözlemlenmiştir. Günümüzde mekanik nitelikleri nedeniyle kullanımı yaygınlaşan CFRP'nin bu açıdan da önemli bir alternatif olduğu düşüncesi YDD verileri ile desteklenmiştir. Bunun yanında literatürde henüz yeterli veri bulunmamakla birlikte CFRP'nin lignin gibi doğal çevreye daha az zarar veren kaynaklardan üretilmesiyle söz konusu çevre etkilerinin orta-uzun vadede daha da azaltılabileceği çalışmadaki analizler sonucunda öngörülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Yapı ürünü, donatı, karbon fiber takviyeli polimerler, CFRP, yaşam döngüsü değerlendirmesi

## ABSTRACT

---

# **Life Cycle Assessment of Carbon Fiber Reinforced Polymers Used as Reinforcing in Concrete in Comparison with Steel Reinforcing Bars**

Onur YILDIZ

Department of Architecture  
Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Gökçe TUNA

Ever-growing population and production levels are amplifying the environmental crises. Recent researches show that the construction sector accounts for 32–60 % of global raw-material extraction, 40 % of energy consumption, and produces roughly 10 billion ton of waste each year. This study investigates the environmental improvements attainable by replacing conventional steel reinforcement with carbon-fibre-reinforced polymers (CFRP). To quantify the potential benefits in this context, CFRP products are compared with conventional steel reinforcement in terms of environmental impact. A life cycle assessment (LCA) framework was used in this regard including raw material acquisition, manufacturing, use, disposal and recycling stages of the life cycle.

A comprehensive literature review of CFRP as building material was presented in the first chapter and the data collected from eligible resources were organized according to their relevance to the research topic. Current applications of CFRP in construction industry were reviewed and mechanical performance of CFRP within

load bearing systems were examined in the second chapter. A theoretical reinforced-concrete beam was modeled and approximate mechanical calculations were performed to determine how the required quantity of CFRP reinforcement differs from that of steel. Principles of the LCA methodology were presented in the third chapter. Critical points to obtain robust results in product-specific assessments were identified to be used in the following part of the thesis. In the fourth chapter, environmental impact levels in EPD reports were recalculated for both CFRP and steel. Calculations were made according to the difference in the need of reinforcement amount in the use of different materials. The data obtained in the second chapter were used again in this phase of the study.

Except for acidification during production, CFRP exhibited lower impacts in all categories, primarily due to its superior strength-to-weight ratio and the feasibility of closed-loop recycling. Although current inventories are incomplete, sensitivity analysis indicates that producing CFRP from bio-based precursors such as lignin could further reduce environmental burdens in the medium to long term. These findings substantiate the view that CFRP, already valued for its mechanical advantages, is also a promising low-impact alternative for sustainable construction.

**Keywords:** Building material, reinforcement, carbon fiber reinforced polymers, CFRP, life cycle assessment

# 1 GİRİŞ

---

İnsan yaşamının devam ettirilebilmesi adına çeşitli pratiklerin gündelik yaşam düzeyinde sürdürülmesi gerekmektedir. Doğadaki koşulların bunu sürekli olarak gerçekleştirmeye uygun olmadığı durumlarda insanlar çevresel şartları bu nedenle değiştirmekte ve doğadan ayırıştırılmış alanlar oluşturmaktadır. Doğada bulunan kaynakların malzeme olarak değerlendirildiği, bazı durumlarda oldukları gibi bazı durumlarda da işlenerek kullanıldığı bu süreçlerde yapma çevreler oluşturulmaktadır.

Kendi var oluşu nedeniyle doğal çevrenin bir üyesi olan, ancak ürettikleriyle yapma çevreyi oluşturan insan, barınma ve beslenme ile ilgili ihtiyaçlarını karşılamak için korunaklı mekanlar oluşturmakta, çevreyi etkileyen süreçleri tetiklemektedir. Bu ihtiyaçlar ısı konforu, iç mekan hava kalitesi, uygun akustik koşullar, güvenlik vb. olarak sıralanabilir. Belirtilen çeşitli ihtiyaçların nasıl karşılanacağı, içerisinde bulunulan doğal çevre ile doğrudan ilişkilidir. Doğal çevreyi oluşturan hava şartları, kaynaklara erişim olanakları, ısı ve ışığa ne kadar erişilebildiği, insanın oluşturacağı yapma çevrenin niteliklerini belirlemektedir. Farklı şartlar altında farklı ihtiyaçların oluştuğu, dolayısıyla farklı üretim ve kullanım yöntemlerinin geliştirildiği gözlemlenmektedir. Birçok durumda istenen mekansal koşulların oluşturulması adına doğal çevrenin manipüle edilmesi gerekmektedir.

Yapma fiziksel çevre, belirtilen ilişki çerçevesinde sürekli olarak doğal kaynakları kullanmakta, enerji tüketmekte, çeşitli gazlar salmakta ve farklı miktarda atıklar oluşturmaktadır. Doğal çevre öğelerinin belirtilen amaçlarla kullanımı sonucu gelecekte kullanılacak kaynak stoklarının azaldığı, doğadaki canlı organizmaların yaşadığı hava, toprak ve su gibi ortamların kirlendiği gözlemlenmektedir. Dolayısıyla yapma çevrenin oluşturulması ve sürdürülmesi

süreçlerinde doğal çevrenin yapısı sürekli olarak değişmekte, doğal çevrenin bir üyesi olan insanın sağlığı da bu değişimlerden etkilenmektedir.

Doğal çevrede insan sağlığını en çok tehdit eden değişimlerden biri olan küresel ısınma da geçmişten beri artan nüfusa ve üretim ihtiyaçlarına bağlı olarak yapay çevre ile ilişkili faaliyetler nedeniyle sürekli olarak artmaktadır. Son birkaç on yıl içerisinde bunu azaltmakla ilgili çalışmalar yapılmasına rağmen günümüzde bu artışın daha da hızlandığı görülmektedir. Küresel ısınmanın en önemli nedenlerinden olan sera gazları üzerine yapılan hesaplamalar, 2018'deki karbon dioksit salınımının 1990 yılına göre yaklaşık 60% daha yüksek olduğunu göstermektedir (Stoddard, I.).

Yapı yaşam döngüsü süreçlerinden kaynaklanan çevresel etkiler de yoğun biçimde hissedilen küresel ısınmayı önemli oranda artırmaktadır. Avrupa Çevre Ajansı (European Environment Agency - EEA) ve Eurostat'ın 2023 yılı verilerine göre Avrupa Birliği ülkelerindeki enerji tüketiminin 40%'ı ve sera gazı salınımının üçte biri yapılardan kaynaklanmaktadır (Avrupa Komisyonu). Yapıların ve yapı malzemelerinin yaşam döngüsünde sıkça gerçekleşen CO<sub>2</sub> salınımı, özellikle deniz suyu yüzeyinin asitlik seviyesini ve kimyasını küresel ölçekte değiştirmektedir. Okyanuslar ve denizler gibi büyük su kütleleri, insan eylemlerinden kaynaklanan karbondioksitin yaklaşık 25%'ini soğurmaktadır, ancak küresel ısınmanın artmasıyla birlikte bu oranın düşmesi ve atmosferdeki sera gazı birikiminin daha da hızlanması öngörülmektedir (De Vries, T.). Atmosferdeki ve denizlerdeki yüksek CO<sub>2</sub> miktarının canlıların fizyolojilerini, gelişimlerini, üremelerini, duyuusal algılarını ve davranışlarını da değiştirdiği gözlemlenmektedir. Bu durum karaların kıyı bölgelerini de etkilemekte ve insanlar dahil birçok canlının besin kaynaklarını kirlenmektedir (Doney, S.C. vd.).

İnsan yaşamını da etkileyen bu olumsuz süreçlerin iyileştirilmemesi durumunda günümüzde karşılaşılan iklim krizlerinin artacağı ve bundan bütün canlı yaşamının etkilenebileceği kabul edilmektedir. Bu nedenle doğal ve yapma çevre arasındaki bu karşılıklı etkileşimin incelenmesi ve içinde yaşamak durumunda olduğumuz doğal çevreye zarar veren yaşam döngüsü süreçlerinin iyileştirilmesiyle ilgili yeni yaklaşımların geliştirilmesi gerekmektedir. Yapı endüstrisinin birçok disiplinle sıkı bir ilişki içerisinde olması da bu alandaki iyileştirmelerin dünyadaki toplam çevre etkisinin azaltılmasına önemli katkılar sağlayabileceğini göstermektedir.

Yapı tasarımının önemli aşamalarından biri olan malzeme seçimi bu bağlamda yapının çevreyle kurduğu ilişkideki belirleyici ögelerden biri olarak değerlendirilmektedir. Malzeme seçimleri hem yapı kimliğinin oluşumuyla hem de doğal çevre etkisinin nasıl oluşacağıyla ilgili önemli rol oynamaktadır. Seçilen malzemelerin nitelikleri, yapı yaşam döngüsünün üretim, taşıma, kullanım, geri dönüşüm ve atık oluşumu süreçlerini biçimlendirmektedir. Bu süreçlerin her biri her malzeme için farklı düzeylerde ekonomik ve çevresel maliyet oluşturmaktadır. Dolayısıyla yapı sektörünün günümüzde neden olduğu çevresel etkinin azaltılabilmesi adına yapı malzemesi kullanımının azaltılması ya da bu malzemelerin niteliklerinin değiştirilmesi gerekmektedir.

Günümüzde yapıların cephelerinde, döşeme kaplamalarında, duvarlarında ve diğer parçalarında çeşitli ürünlerin kullanıldığı, ancak yapıların taşıyıcı sistemlerinin büyük bölümünün betonarme strüktürler ile oluşturulduğu görülmektedir. Bu yapılardaki üretimlerin önemli bir kısmı ise çelik ile ilişkili olarak yapılmaktadır. Dolayısıyla bu alanda yapılacak iyileştirmelerin yapı endüstrisine önemli katkılarının olabileceği düşünülmektedir.

Güncel durum göz önünde bulundurulduğunda yüksek çevre etkisine neden olan çelik üretim süreçleri ve çelik donatıların korozyona uğrayarak yapı dayanımı düşürmesi, söz konusu geliştirmelerin etkili olabileceği alanlar arasında yer almaktadır.

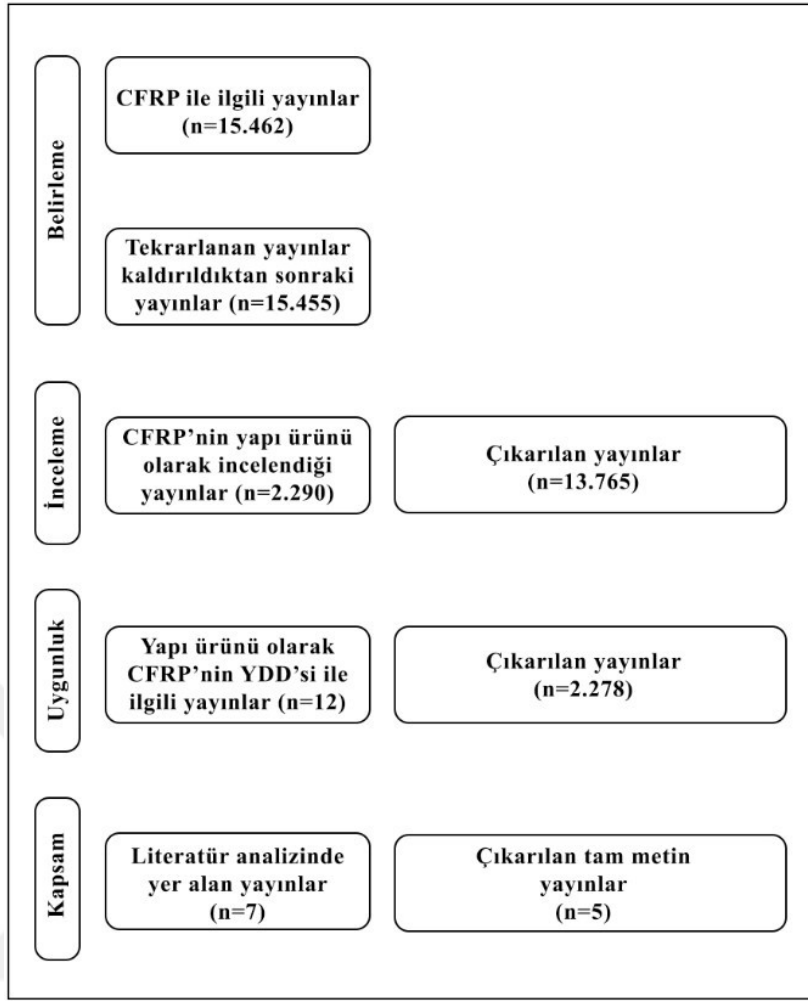
Günümüzde bu alanda yeni alternatiflerle ilgili geliştirme çalışmaları yürütülmekte, yapı taşıyıcı sistemleri ile bağlantılı iyileştirmeler sayesinde nasıl kazanımların sağlanabileceği araştırılmaktadır. Gelişen teknoloji yardımıyla hafiflikleri ve korozyona uğramamaları nedeniyle çeşitli kompozit ürünlerle ilgili denemelerin yapıldığı, yüksek mekanik nitelikleri sayesinde özellikle Karbon Fiber Takviyeli Polimerler (CFRP)'in taşıyıcı sistemler için yeni olanaklar yaratma konusunda ön plana çıktığı görülmektedir. Günümüzdeki güçlendirme çalışmalarında CFRP'nin yaygın olarak kullanılıyor olması da bu alanda önemli bir alternatif olduğu düşüncesini desteklemektedir. Literatürde CFRP'nin yaşam döngüsü ve yapı ile ilişkisi üzerine yürütülen çalışmaların giderek arttığı, ancak henüz bilgi üretilmesi gereken pek çok alanın bulunduğu gözlemlenmektedir.

## 1.1 Literatür Özeti

Dünya genelinde artan nüfus ve buna bağlı olarak birçok alanda üretimin artışı, insan sağlığı ve doğal çevrenin sürdürülebilirliği için olumsuz sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Çeşitlenen ve artan üretim-tüketim süreçleri sonucunda birçok atık oluşmakta, karbon salınımı gerçekleşmekte ve doğal kaynaklarda önemli azalmalar gözlemlenmektedir. Bu bağlamda yapı sektörü kaynaklı doğal kaynak tüketimi ve atık oluşumu süreçlerinin de dünyadaki toplam doğal çevre etkisini önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Birleşmiş Milletler ve Avrupa Birliği, doğal çevreye verilen zararın azaltılması için çeşitli sürdürülebilirlik hedefleri açıklamakta, bu hedefler kapsamındaki yasal düzenlemeleri teşvik edecek programlar oluşturmaya çalışmaktadır. Bu hedeflere ulaşma amacıyla pek çok araştırma yürütülmekte ve konu üzerindeki bilgi birikiminin artırılması için çaba gösterilmektedir.

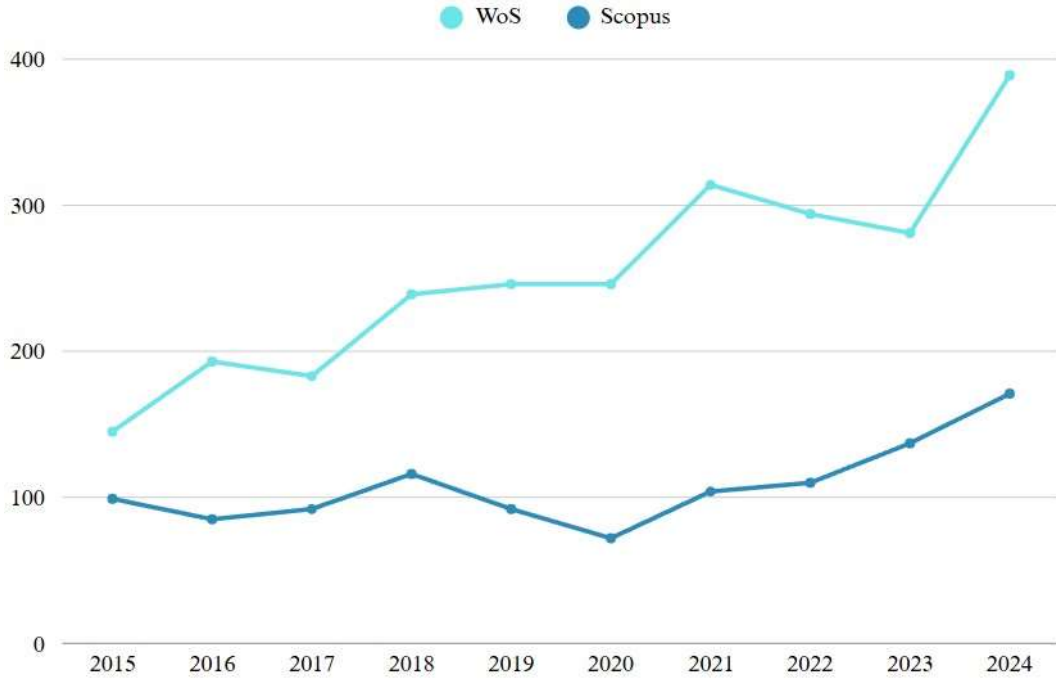
Özellikle CFRP'ler ile ilgili ne düzeyde bilgi üretilmiş olduğunun tespit edilmesi tez çalışması için önemli bulunmaktadır. Bu amaçla yapılan taramalarda Web of Science ve Scopus kaynaklarından literatürdeki bilimsel çalışmalar toplanmakta, bu çalışmalar çeşitli kriterlerle filtrelenmektedir. Literatür araştırması çerçevesinde bu filtrelemenin nasıl yapıldığı ise Şekil 1.1'de yer alan PRISMA diyagramında gösterilmektedir. Söz konusu süreçte elde edilen literatürün teze uygun duruma getirilmesi için ise elde edilen bilimsel çalışmaların çeşitli kriterler ile ayrıştırılması ve ilgi düzeylerine göre derlenmesi gerekmektedir.

Söz konusu PRISMA rehberinin oluşturulması sırasında öncelikle literatürde CFRP ile ilgili yapılmış bilimsel çalışmalar içerisinde yapı ürünlerinin incelenmediği çalışmalar çıkarılmakta, incelenecek kaynak sayısının azaltılması sağlanmaktadır. Eldeki kaynaklar içerisinde teze uygunluk düzeyleri en yüksek olanların ayrıştırılması için ise yapı ürünü olarak CFRP'nin YDD'sine yönelik çalışmalar içeren kaynaklar seçilmekte ve önceliklendirilmektedir. Belirtilen biçimde gruplanan kaynakların önem düzeylerine uygun detaylarda taranması ile literatür araştırmasının etkinliği artırılmakta ve söz konusu alandaki bilimsel literatür teze kullanılabilir duruma getirilmektedir.



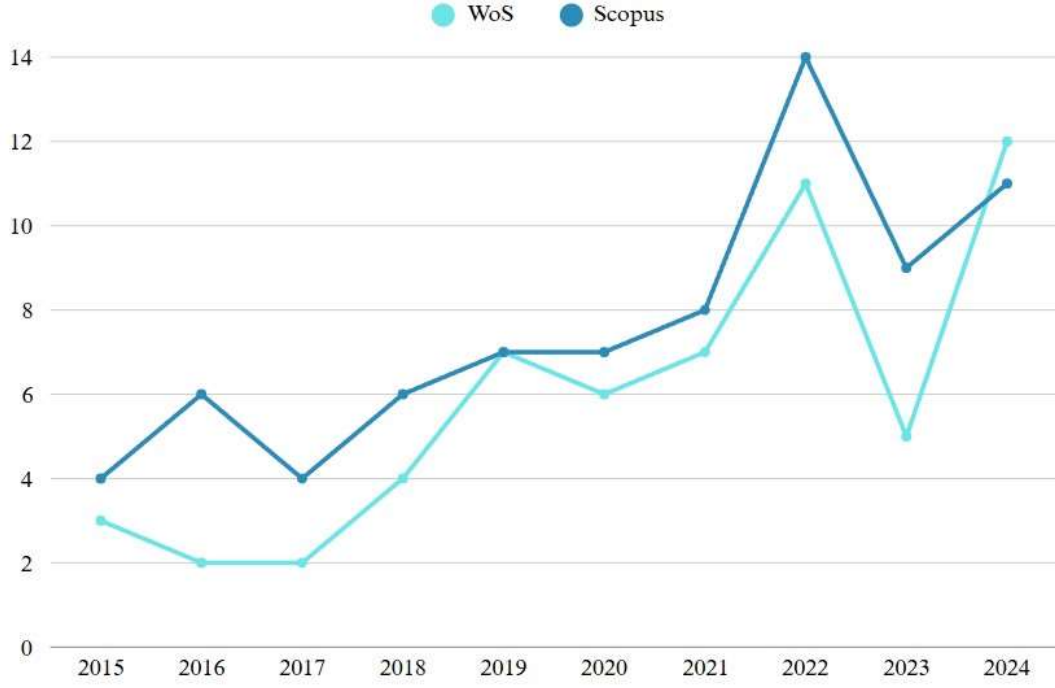
**Şekil 1.1** Web of Science (WoS) ve Scopus veri tabanlarından elde edilen bilgilere göre 2015-2024 arasında CFRP'lerin yapı ile ilişkisi üzerine yayınlanmış çalışmaların sayısının yıllara göre değişimi.

CFRP'nin yapılarda kullanımı ile ilgili dünyada son yıllarda önemli sayıda bilimsel araştırma yapılmaktadır. Özellikle yapı güçlendirme çalışmalarında günümüzde tercih edilen bir alternatif olmasıyla da ilişkili olarak CFRP'nin yapılarda kullanımının güncelliğini koruyan bir inceleme alanı olduğu görülmektedir. Dünyada yaygın olarak kullanılan bilimsel veri tabanlarından olan Web of Science ve Scopus üzerinden yapılan incelemelerde bu alandaki araştırma sayılarının yıllara göre değişimi ise Şekil 1.2'de sunulmaktadır. Söz konusu araştırmalarda büyük oranda karbon fiberler, donatı, betonarme, yapı ürünü, güçlendirme, polimerler, gerilim direnci, süneklik, deprem, dayanım, ayrışma, korozyon, vb. anahtar kelimelerin kullanıldığı görülmektedir.



**Şekil 1.2** Web of Science (WoS) ve Scopus veri tabanlarından elde edilen bilgilere göre 2015-2024 arasında CFRP'lerin yapı ile ilişkisi üzerine yayınlanmış çalışmaların sayısının yıllara göre değişimi.

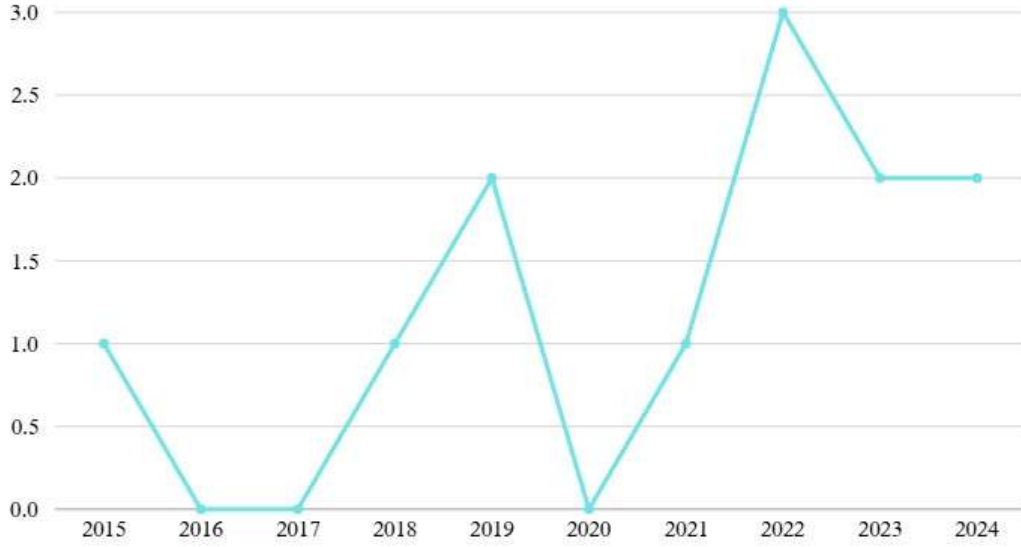
CFRP'nin yapıda kullanımı üzerine yapılan araştırmalardaki artışla ilişkili olarak CFRP'nin yaşam döngüsü süreçlerinin de giderek daha fazla incelendiği gözlemlenmektedir. CFRP'lerin YDD kapsamında incelendiği çalışmalarda en çok kullanılan temaların ise geri dönüşüm ve küresel ısınma olduğu görülmektedir. Söz konusu çalışmalar bu alanda önemli bilgilerin üretilmesine katkı sağlamakta, ancak WoS ve Scopus veri tabanlarından alınarak Şekil 1.3'te sunulan veriler, bu alandaki çalışmaların yoğunluğundaki dikkate değer artışın yaklaşık on yıl gibi kısa bir süre önce başladığını göstermektedir. Bu nedenle CFRP yaşam döngülerindeki olumlu ve olumsuz noktaların sağlıklı bir biçimde tespit edilebilmesi ve CFRP yaşam döngüsü süreçleri ile ilgili uygun iyileştirmelerin yapılabilmesi adına bu çalışmaların artırılması ve çeşitlendirilmesi gerekmektedir.



**Şekil 1.3** Web of Science (WoS) ve Scopus veri tabanlarından elde edilen bilgilere göre 2015-2024 arasında CFRP'lerin YDD'si üzerine yayınlanmış çalışmaların sayısının yıllara göre değişimi.

CFRP'lerin yaşam döngüsü süreçlerinin incelendiği çalışmaların ve CFRP'lerin yapı ürünü olarak ele alındığı çalışmaların ortak kümesindeki araştırmalar tez kapsamında işlenen konuyla en yakın ilişkiye sahip örnekler olarak öne çıkmaktadır. Ancak Şekil 1.2 ve Şekil 1.3'te gösterilen çalışmaların yalnızca küçük bir bölümünün yapı, CFRP ve YDD kavramlarının üçünü birden barındırdığı görülmektedir.

Yapı ürünü olarak CFRP'nin kullanılmasıyla hem ürünün kendi yaşam döngüsünün nasıl olacağı hem de yapı çevre etkisinin bundan nasıl etkilenebileceği ile ilgili çalışmaların sayısı Şekil 1.4'te görüldüğü üzere günümüzde dahi yıl bazında tek hanede kalmaktadır. Bu çalışmalarda incelenen konuların ve varılan sonuçların değerlendirilmesiyle söz konusu alandaki literatürün zenginleştirilebileceği düşünülmektedir.



**Şekil 1.4** Web of Science (WoS) ve Scopus veri tabanlarından elde edilen bilgilere göre 2015-2024 arasında yapı ürünü olarak CFRP'lerin YDD'si üzerine yayınlanmış çalışmaların sayısının yıllara göre değişimi.

CFRP'nin yapılardaki kullanım alanlarının genişlemesiyle birlikte çeşitliliğin artmaya başladığı gözlemlenen çalışmalarda genel olarak sürdürülebilir kalkınma, yapı ürünleri arasındaki korozyon direnci farkı, iklim değişikliği ve küresel ısınma konuları araştırılmaktadır. Tablo 1.1'de içerikleriyle birlikte sunulan bu çalışmalarda söz konusu kavramlar farklı bakış açılarıyla ele alınmakta, yapı ürünü olarak CFRP'nin yaşam döngüsü süreçleri çevre etkisi ve ekonomi bağlamında incelenmektedir. Sunulan çalışmalarda yapı sektörünün çevre etkisinin azaltılması adına CFRP'nin nasıl kullanılabileceğiyle ilgili çeşitli alternatifler geliştirilmekte ve çevre etkisi bağlamında sağlanabilecek iyileştirmeler YDD metodolojisi ile somutlaştırılmaktadır. Dünya genelinde yüksek miktarda üretilen betonarme yapılar üzerine de araştırmaların yapıldığı görülmektedir. Yapı özelinde sağlanabilecek küçük iyileştirmelerin dahi yapı endüstrisinin genelinde önemli etkilere katkı sağlayabilmesi adına bu alandaki çalışmalar önemli bulunmaktadır. Bu bağlamda Almanya ve Avusturya'da önemli çalışmalar yürütüldüğü ve yapı ürünü olarak CFRP'nin yapı yaşam döngüsü ile ilgili potansiyellerinin değerlendirildiği görülmektedir. Özellikle Almanya'da yapı üretimi ile ilgili en geniş araştırma programlarından biri olan C3 (Carbon Concrete Composite) projesi kapsamında çelik donatı yerine CFRP'nin nasıl kullanılabileceği ile ilgili çalışmalar yürütülmektedir.

**Tablo 1.1** Literatürde yapı ürünü olarak CFRP'nin yaşam döngüsü değerlendirmesi üzerine yapılan çalışmalarda incelenen konular

| ARAŞTIRMACI          | YIL  | ARAŞTIRMA KONUSU                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Maxineasa, S.G., vd. | 2015 | CFRP ile kiriş güçlendirmenin çevre etkisi bağlamında incelenmesi                                                                                                                                                                                                                                |
| Orcesi, A.D., vd.    | 2019 | Çelik köprülerin yaşam döngüsünü uzatmak için önleyici güçlendirme bağlamında CFRP kullanımının geleneksel yöntemlerle YDD çerçevesinde karşılaştırılması                                                                                                                                        |
| Stoiber, N., vd.     | 2020 | Köprü yapıları üzerinden CFRP ve çelik donatıların YDD metodolojisi ile karşılaştırılması. GWP, ADPf ve AP kriterleri bağlamında incelemelerin yapılması.                                                                                                                                        |
| Abbate, E., vd.      | 2022 | Onarılabilir CFRP'nin kapalı yaşam döngüleri oluşturmak amacıyla geri dönüştürülmesi ve bunun döngüsel ekonomi bağlamında incelenmesi                                                                                                                                                            |
| Backes, J.G., vd.    | 2023 | Cephe panellerinde CFRP ve çelik kullanımının YDD bağlamında karşılaştırılması                                                                                                                                                                                                                   |
| Hammerl, M., vd.     | 2023 | Çelik donatılı betonarme döşeme yerine donatı olarak CFRP'nin ve GFRP'nin yüksek dayanımlı betonla birlikte kullanıldığı döşemelerin küresel ısınma potansiyeli bağlamında incelenmesi                                                                                                           |
| Kromoser, B., vd.    | 2023 | Betonarme kirişlerde donatı olarak çelik yerine CFRP kullanılmasının cradle to gate sınırı içerisinde YDD çerçevesinde incelenmesi. Kullanım ömrü tamamlanan CFRP'lerin yapılardan ayrıştırılmasında kullanılan tekniklerin CFRP'nin yapısal bütünlüğünün korunması bağlamında değerlendirilmesi |

Literatür araştırması kapsamında erişilebilen ve Tablo 1.1’de sunulan çalışmalar arasından ise özellikle Fransa merkezli bir bilimsel dernek olan RILEM’in hazırladığı bir raporda yer alan bir çalışma dikkat çekmektedir. Yeni bir giriş profilinin CFRP donatılarla üretilmesinin söz konusu yapı elemanının üretim süreçlerindeki çevre etkisini nasıl değiştirebileceğinin araştırıldığı bu çalışmada hem mekanik dayanım hem de çevre etkisi bağlamında önemli bilgiler üretilmektedir. Benzer araştırma ekipleri tarafından betonarme döşemeler ve çelik köprülerde CFRP kullanımı ile ilgili yapılmış çalışmalar da bulunmaktadır. Literatürdeki genel kanı ise CFRP’nin çevre etkisi açısından olumlu potansiyele sahip bir yapı ürünü olduğu yönündedir.

Yapı tasarımında malzeme ve ürün seçiminde sağlıklı kararların verilebilmesi için ise yapı-ürün ilişkisinin bütün yaşam döngüsü boyunca incelenmesi ve çevre etkisinin hangi aşamalarda nasıl şekillendiğinin anlaşılması önemli bulunmaktadır.

İncelenen çalışmalarda CFRP’nin yapı ürünü olarak betonarme yapılardaki kullanım alanlarının incelendiği, ancak yapı özelinde yürütülen çevre etkisi değerlendirmelerinin çoğunlukla hammadde edinimi ve üretim süreçleriyle sınırlandırıldığı görülmektedir.

Konvansiyonel yapı üretim tekniklerine CFRP’nin entegre edilip edilemeyeceğinin araştırılması, betonarme taşıyıcı eleman donatısı olarak CFRP’nin yaşam döngüsünün cradle-to-cradle yaklaşımıyla değerlendirilmesi ve hem ürün hem de yapı genelinde sağlanabilecek potansiyel faydaların YDD metodolojisi bağlamında ortaya koyulmasının gerektiği düşünülmektedir.

## **1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı**

Literatürde çoğunlukla kapsam dışında bırakılmış olan yaşam döngüsü süreçlerinin de dahil olduğu ve yapı ürünü olarak CFRP’nin doğal çevreyle ilişkisinin bütünsel olarak değerlendirildiği bir çalışmanın yürütülmesiyle bilimsel literatüre katkı sağlanabileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda ele alınan çalışmada YDD metodolojisi ile yapı ürünü olarak CFRP’nin çevre etkisi performansın ölçülebilir duruma getirilmesi ve CFRP kullanımı ile yapı endüstrisinde sağlanabilecek çevresel iyileşmenin düzeyinin tespit edilmesi hedeflenmektedir.

CFRP'nin yapı ile ilişkisinin çevre etkisi bağlamında incelendiği tez çalışmasında analiz sonuçlarının somutlaştırılabilmesi adına özgün veriler konvansiyonel betonarme yapılar kapsamında oluşturulmaktadır. CFRP'lerin betonarme yapı taşıyıcılarındaki kullanımı ise hasır ve kumaş biçiminde de olabilmekte, ancak bu tez kapsamında değerlendirmeler çubuk donatılar üzerinden yapılmaktadır.

Yapılan incelemeler çubuk donatı olarak CFRP'nin hammadde edinimi, üretim, kullanım, geri dönüşüm ve atık oluşumu süreçlerini içermekte, elde edilen veriler analiz edilirken YDD metodolojisi sınırları içerisinde kalınmaktadır. CFRP'nin yapı taşıyıcılarında çubuk donatı olarak kullanılmasının çevre etkisi bağlamında nasıl sonuçlar doğurduğunun detaylı biçimde incelenebilmesi için ise yaygın bir çubuk donatı olan çelikle ilgili YDD verileri de çalışma kapsamına dahil edilmekte ve tez bu iki ürün üzerinden ilerletilmektedir.

CFRP yaşam döngüsünü bütün olarak ele alan araştırmaların sınırlı olması nedeniyle tez çalışmasında çevresel etki karşılaştırmaları EPD raporları referans alınarak yapılmaktadır. Çelik ve CFRP'nin YDD değerlerinin konuma bağlı altyapı olanakları ve enerji kaynakları gibi dış koşullardan etkilenmemesi, bunun yerine ürün niteliklerinin ön plana çıkabilmesi adına yalnızca Avrupa Birliği ülkelerinde üretilmiş olan EPD raporları tez kapsamında değerlendirilmektedir.

### **1.3 Yöntem ve Hipotez**

Tez çalışmasında CFRP'nin yapı ürünü olarak kullanımı ile ilgili yapı sektöründeki uygulamalar ve literatürdeki bilimsel araştırmalar incelenmekte, bunların arasından tezin kapsamına uygun olanlar detaylı biçimde analiz edilmektedir. Literatürden edinilen bilgiler yardımıyla CFRP'ler diğer FRP'ler ve çelik ile öncelikle mekanik nitelikler bağlamında karşılaştırılmakta, bu bağlamda CFRP'nin yapılarda donatı olarak yeterli performans gösterip gösteremediği hem dayanım verileri hem de uygulama örnekleri üzerinden kontrol edilmektedir.

Yapılan mekanik değerlendirmelerin ardından tez kapsamında çubuk donatı formunda incelenen CFRP'nin yapı sektörünün çevre etkisinin azaltılmasına sağlayabileceği katkıların nesnel biçimde tespit edilebilmesi adına çubuk formunda üretilen CFRP ve çelik donatıların çevre etkileri karşılaştırılmakta; söz konusu

karşılaştırmanın sistemli şekilde yapılabilmesi için ise YDD metodolojisi kullanılmaktadır.

YDD metodolojisi çerçevesinde yaşam döngüsünün A1-A3, B, C4 ve D kodlarıyla ifade edilen hammadde edinimi, üretim, kullanım, atık oluşumu ve geri dönüşüm süreçlerini kapsayan bu karşılaştırmalarda veri kaynağı olarak EPD raporları kullanılmaktadır. Günümüzde CFRP yaşam döngüsünün söz konusu aşamalarını bütün olarak kapsayan verilerin çoğunlukla EPD çalışmalarında sunuluyor olması tez çalışmasında bu yöntemin izlenmesinde belirleyici olmaktadır.

Tez çalışmasında CFRP'nin yapı ürünü olarak ele alınması nedeniyle mekanik niteliklerin öncelikli tutulması gerekmektedir. Dolayısıyla değerlendirmeye alınan EPD çalışmalarında ağırlık üzerinden belirlenen fonksiyonel birim, yapı özelindeki karşılaştırmalarda yanıltıcı olabileceği gerekçesiyle değiştirilmektedir. Bu amaçla tez içerisinde teorik olarak bir kiriş üretilmektedir. Söz konusu kirişte çubuk donatı olarak çelik ya da CFRP kullanılması durumunda aynı mekanik gerekliliklerin hangi miktarda ürün ile karşılanabildiği belirlenmekte, fonksiyonel birimi bu miktar oluşturmaktadır.

Söz konusu donatı miktarının belirlenmesinde yapılan statik hesaplamalar için ise Amerikan Beton Enstitüsü (American Concrete Institute – ACI) tarafından yayınlanan rehberler referans alınmaktadır. Ürün miktarının tespit edilmesinde gerilim dayanımları doğrudan kullanılmamakta, söz konusu rehberlerde her ürün için belirtilmiş olan güvenlik katsayıları da hesaplamalara dahil edilmektedir. CFRP'nin yeni bir yapı ürünü olması nedeniyle bu işlemler sırasında CFRP için ACI tarafından belirlenmiş güvenlik katsayıları ve ifade edilen dayanım düzeyleri ile ilgili en olumsuz değerler kabul edilmekte ve hesaplamalar bu şekilde tamamlanmaktadır.

Literatürde birim ağırlık üzerinden elde edilen veriler de bu mekanik hesaplamalar sonucunda iki ürün için farklı olduğu görülen gerekli ürün miktarları ile çarpılmakta ve yaşam döngüsü aşamaları bu yeni değerler ile analiz edilmektedir. Elde edilen verilerdeki marjinal değerlerin karşılaştırmayı etkilememesi için ise gözlemlenen en uç çevresel etki değerleri her iki ürün için de kapsam dışında bırakılmakta ve değerlendirmeler kalan verilerin ortalamaları üzerinden yapılmaktadır.

Birim ağırlık başına hammadde edinimi ve üretim süreçlerinde yüksek çevre etkisi gösteren CFRP'nin donatı olarak taşıyıcı sistemlerde kullanılması durumunda mekanik nitelikleri yardımıyla günümüzdeki betonarme yapı yaşam döngüsü süreçlerini çevre etkisi bağlamında iyileştirebileceği hipotezi belirtilen kapsam çerçevesinde ve açıklanan yöntem ile sınanmaktadır.



## 2

# KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMERLERİN (CFRP) YAPI ÜRÜNÜ OLARAK KULLANIMI VE ÇELİK DONATI İLE KARŞILAŞTIRILMASI

---

İnsan sağlığını ve doğal çevreyi olumsuz yönde etkileyen üretim süreçlerinin iyileştirilmemesi durumunda günümüzde karşılaşılan iklim krizlerinin artacağı ve bundan bütün canlı yaşamının etkilenebileceği kabul edilmektedir. Bu nedenle doğal ve yapma çevre arasındaki bu karşılıklı etkileşimin ve içinde yaşamak durumunda olduğumuz doğal çevreye zarar veren yaşam döngüsü süreçlerinin iyileştirilmesiyle ilgili yeni yaklaşımların geliştirilmesi gerekmektedir. Yapıların yaşam döngüsünü ve çevreyle ilişki kurma biçimini belirleyen tasarım ve malzeme seçim süreçleri de bu yaklaşımların geliştirilmesi adına önemli bulunmaktadır. Dolayısıyla yapı tasarlanırken çevreye daha az zarar veren yaşam döngüsü süreçlerini oluşturmak hedefler arasında tanımlanmalıdır. Tasarım öncesinde doğal çevreye ait veriler değerlendirilmeli ve mekan tasarımına yönelik kararlar bu girdilerden hareketle alınmalıdır.

Yapı tasarımının önemli bölümlerinden biri olan malzeme seçimi de yapının çevreyle kurduğu ilişkideki belirleyici öğelerden biri olarak değerlendirilmektedir. Malzeme seçimleri hem yapı kimliğinin oluşumuyla hem de doğal çevre etkisinin düzeyi ile ilgili önemli rol oynamaktadır. Seçilen malzemelerin nitelikleri yapı yaşam döngüsünün üretim, taşıma, kullanım, geri dönüşüm ve atık oluşumu süreçlerini biçimlendirmektedir. Bu süreçlerin her biri her malzeme için farklı düzeylerde ekonomik ve çevresel maliyet oluşturmaktadır. Dolayısıyla yapı sektörünün günümüzde neden olduğu çevresel etkinin azaltılabilmesi adına yapı malzemesi kullanımının azaltılması ya da bu malzemelerin niteliklerinin değiştirilmesi gerekmektedir.

Tekil yapı örnekleri özelinde malzeme kullanımının azaltılmasının yanında yapı kullanım ömrünün uzatılmasıyla sağlanabilecek dolaylı yapı malzemesi tasarrufu da önemli bulunmaktadır. Yapı kütlelerinin önemli bölümünü oluşturan ve yapı sağlığı bağlamında belirleyici rolü bulunan taşıyıcı sistemler, söz konusu geliştirmelerin sağlanması gereken en önemli alanlardan biri olarak değerlendirilmektedir.

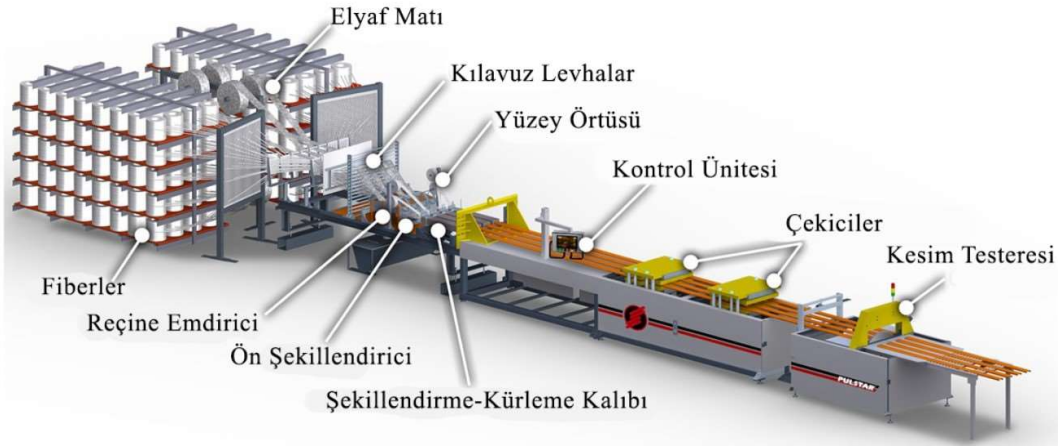
Birçok durumda yapı taşıyıcı elemanlarının çevresel koşullardan (nem, kimyasallar, vb.) etkilendiği ve dayanımlarının düştüğü gözlemlenmektedir. Günümüzde yapı sağlığının geliştirilmesi adına yapıların sıkça maruz kaldığı çevresel etkenlere karşı yüksek dirençli çeşitli malzemeler ve ürünler geliştirilmektedir. Dünyadaki en yaygın yapı sistemlerinden olan betonarme sistemlerde donatı olarak kullanılan çeliğe alternatif olarak geliştirilen çeşitli kompozit ürünler bulunmaktadır. Bu ürünler arasındaki CFRP'ler, farklı çevresel şartlara dayanımı ve mekanik performansı ile diğer kompozit donatılardan ayrılmaktadır. Bu bölüm içerisinde CFRP söz konusu bağlamda çeşitli parametreler çerçevesinde diğer kompozitlerle ve çelik donatılarla karşılaştırılmaktadır.

## **2.1 Yapı Ürünü Olarak CFRP'nin Kullanım Alanları**

CFRP, karbon fiber liflerin dokuma benzeri bir yapıya sahip olacak şekilde bir araya getirilmesi ve polimer bir matrise daldırılmasıyla oluşturulan dirençli ve dayanıklı bir üründür (Vijayan, D.S., vd.). Diğer kompozit ürünler gibi CFRP'yi oluşturan bileşenler de birbirlerinden farklı niteliklere sahiptir. Bu bağlamda karbon lifler, ürünün mekanik direncini ve dayanımını belirleyici bileşen olarak tanımlanmaktadır (Melinda, A., vd.).

Matris içerisinde bir arada tutulan karbon liflerden oluşan bir ürün olan CFRP genellikle nanoteknoloji alanındaki gelişmelerle birlikte değerlendirilmektedir. CFRP'nin yeterli nitelikler gösterebilmesi adına karbon atomlarının arasındaki bağlar üzerinde mikro ölçekte yapısal değişiklikler uygulanmaktadır. Karbon atomlarının birbirlerine bağlanma şekillerinin düzenlenmesi ile karbon nanotüpler üretilmekte, bu nanotüplerin işlenmesi ile de karbon lifler oluşturulmaktadır. Üretilen lifler, bir arada kalabilmeleri için matris içerisine daldırılmakta ve sonuç olarak nitelikleri ve biçimleri istenen şekilde düzenlenebilen kompozitler elde edilmektedir. Karbon liflerden CFRP'lerin üretildiği süreç bir üretim bandı

üzerinde gerçekleşmekte ve söz konusu üretim süreci Şekil 2.1’de sembolik olarak gösterilmektedir.



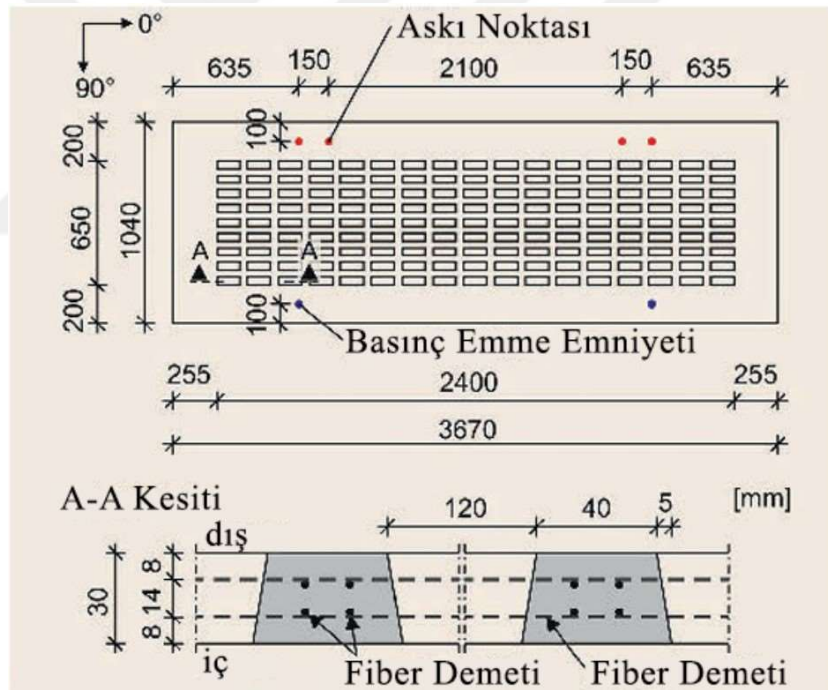
**Şekil 2.1** CFRP ürünlerin Karbon Fiber Liflerden Elde Edilmesi (Kim, Y.J., vd.)

Henüz yüksek maliyetli bir ürün olmasına karşın CFRP kullanımının bu liflerin ve matrisin sahip olduğu niteliklerden dolayı pek çok sektörde yaygınlaştığı görülmektedir. CFRP’nin ana bileşeni olan karbon fiberin piezorezistif niteliğe sahip olması, korozyona ve çeşitli kimyasallara karşı direnci, esnekliği, hafifliği ve uzun süreli kullanımlardaki yorgunluğa dayanımı bu faydalı nitelikler arasında sayılmaktadır (Inpil, K.). CFRP’ler söz konusu nitelikleri nedeniyle taşımacılık, yapı endüstrisi, korozyon dirençli ekipman üretimi, su altı tesisleri, elektronik vb. birçok sektörde kullanılmaktadır. Özellikle uzun süreli kullanım gerektiren alanlarda yaygınlaşmakta, çeşitli optimizasyon süreçlerinden geçmesi için gerekli olan araştırma çalışmalarının sayısı da yıllar içerisinde sürekli olarak artmaktadır.

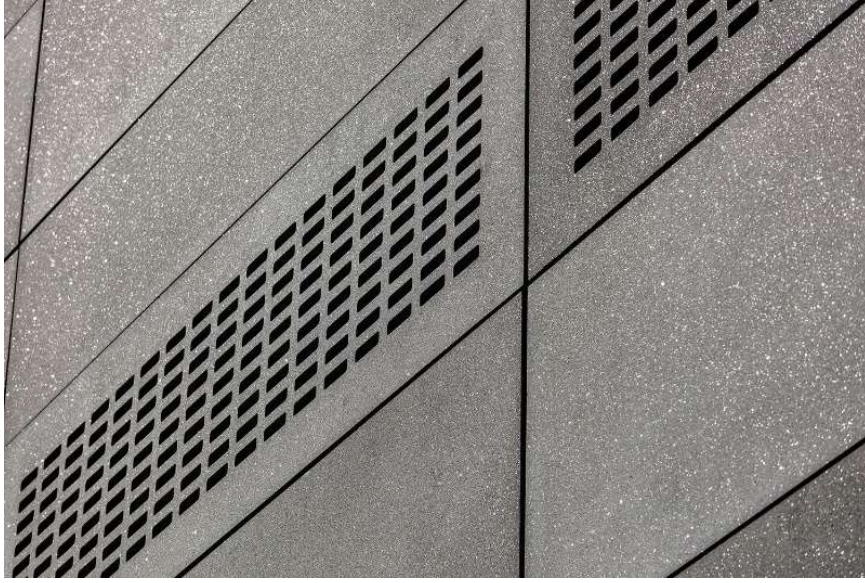
CFRP’ler, yapı endüstrisinde konvansiyonel alternatiflere göre henüz yeni olmalarına karşın karbon fiberlerin nitelikleri ve mekanik performansı nedeniyle yapı ürünü olarak üzerinde durulan ürünlerdir. CFRP’nin yeni bir yapı ürünü olarak nasıl değerlendirilebileceği ile ilgili çalışmaların sayısı günümüzde artmakta, bu sayede CFRP’nin potansiyel faydaları ve yapıda kullanımı durumunda dikkat edilmesi gereken nitelikleri ile ilgili bilgi birikimi derinleşmektedir. Alandaki çalışmaların derinleşmesi, CFRP’lerin yapılarındaki kullanım alanlarını da genişletmektedir. Başta yüksek maliyet nedeniyle henüz yapı piyasasındaki konvansiyonel ürünlerin yerini almamış olmasına rağmen pek çok alanda tercih edilebilir bir ürün olarak değerlendirilmektedir. Güncel durumda CFRP’lerin yapı

ürünü olarak en yaygın kullanım alanları cephe kaplamaları, döşemeler ve özellikle de taşıyıcı elemanlar olarak sıralanabilir.

Cephe kaplamalarının dayanımlarını uzun süre koruyabilmesi adına bu elemanların içerisinde donatı olarak CFRP'nin kullanıldığı örnekler bulunmaktadır. Özellikle içerisinde beton bulunan ve cepheye döşenen birimlerden oluşan sistemlerde söz konusu birimlerin bir arada kalabilmesinde ve çevresel şartlar karşısında sistem bütünlüğünün korunabilmesinde CFRP donatılarının etkili olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 2.2'deki ve Şekil 2.3.'teki görseller, beton plakalar ve CFRP donatılar ile Almanya/Bochum'da üretilmiş bir cephe sistemini göstermektedir. Söz konusu projedeki beton cephe kaplamasında kullanılan plakaların üç santimetre kalınlıkta üretilebildiği belirtilmektedir (Von der Heid, A.C., Grebe, R.). Bu gibi çalışmalar CFRP'lerin kullanılmasıyla hafif cephe sistemlerinin üretilebildiğini göstermektedir.



**Şekil 2.2** MC Bauchemie Binası Cephe Paneli Teknik Çizimi (Von der Heid, A.C., Grebe, R)



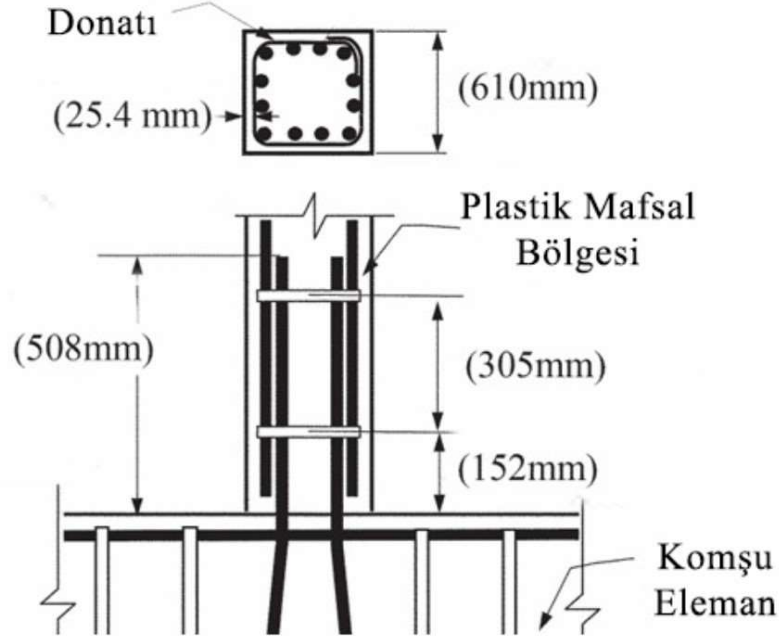
**Şekil 2.3** MC Bauchemie Binası Cephe Görüntüsü, Almanya (Hempel, J.)

Cephe çalışmalarındaki avantajlarının yanında taşıyıcı nitelikteki yapı elemanlarında da CFRP'nin kullanıldığı görülmektedir. CFRP'lerin bu elemanların dayanımını artırarak yapı sağlığının korunmasına katkıda bulunduğu gözlemlenmekte; kolonlar, kirişler, perde duvarlar ve yığma duvarlar gibi taşıyıcı sistem elemanları özelinde birçok CFRP uygulaması bulunmaktadır. Bu uygulamalar yapı elemanlarının taşıma kapasitelerinin artırılması, yapı ağırlığının azaltılması ve uzun vadeli dayanıklılığın sağlanması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

CFRP kullanımı, günümüzde özellikle yapıların güçlendirilmesi ve mevcut yapıların performansının yükseltilmesi için etkili bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Taşıyıcı elemanların yüzeylerine çeşitli biçimlerde uygulanması, söz konusu elemanın eğilme, kesme, basınç ve çekme kuvvetlerine karşı dayanımını artırarak yapının kullanım ömrünü uzatmakta ve yapısal bütünlüğünü korumaktadır (ACI 440.2R-17, 2017).

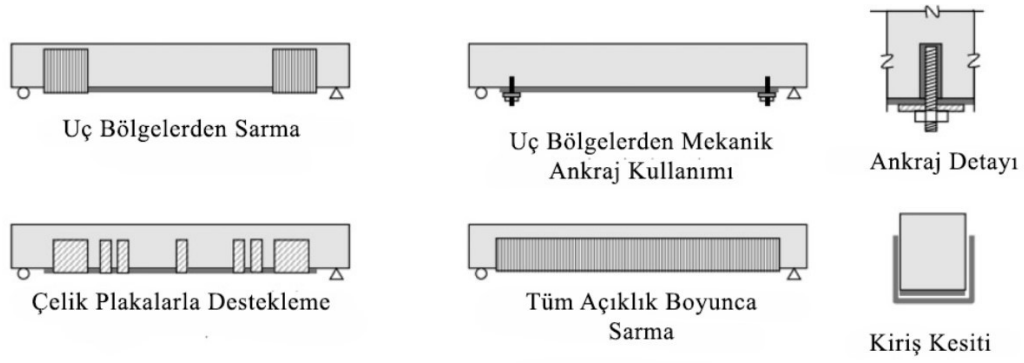
Günümüzde yaygın olarak kullanılan betonarme yapıların taşıyıcı elemanlarından olan kolonların güçlendirildiği çalışmalarda özellikle düşey çelik donatıların birleştiği noktaların belirleyici nitelikte olduğu ortaya konmaktadır. Yapılara büyük kuvvetlerin etki ettiği deprem gibi durumlarda deformasyonun yoğunlaştığı ve ciddi hasarların gözlemlendiği bölgenin bu kısımda olduğu bilinmektedir. Çok katlı betonarme yapılarda alt kat kolonundan gelen filizlerin mevcut kat kolonundaki düşey donatılarla birleştiği bölüm bu nedenle CFRP güçlendirme çalışmasının

yapılması gereken bölge olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.4'teki görsel, örnek bir çalışmada kolonun hangi yönde ve ne şekilde sarıldığını göstermektedir.



**Şekil 2.4** Kolon Güçlendirme Çalışmalarında CFRP'nin Uygulanması Gereken Kritik Bölge (ACI 440.2R-17, 2017)

Taşıyıcı sistemlerin iyileştirilmesi amacıyla CFRP'ler yapıların döşemelerinde, kirişlerinde ve taşıyıcı duvarlarında da güçlendirme elemanı olarak kullanılmaktadır. Kolonlar gibi bu elemanların da deformasyon direncini artırmak adına statik hesaplamalar sonucunda gerekli görülen yüzeylere CFRP bantlar ya da barlar uygulanmaktadır. Hafif olmaları nedeniyle özellikle geniş açıklıklara sahip yapıların kiriş ve döşemelerinde yaygın olarak kullanıldıkları gözlemlenmektedir. Yapı endüstrisinde CFRP ile güçlendirme çalışmalarında her projenin özel koşulları bulunmakla birlikte yaygın olarak kullanılan belirli teknikler bulunmaktadır. Söz konusu uygulama teknikleri Şekil 2.5'te betonarme kirişler üzerinden şematik olarak gösterilmektedir. Bu bağlamda kullanılan alternatifler yalnızca uç bölgelerden sarma, uçlarda mekanik ankraj kullanımı, çelik plakalarla destekleme ve tüm açıklık boyunca CFRP ile sarma teknikleridir. Yapı piyasasında güçlendirme projesine uygun olarak seçilebilecek bu alternatiflerin çeşitli avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.



**Şekil 2.5** CFRP ile Kiriş Güçlendirme Çalışmalarında Yaygın Olarak Kullanılan Teknikler (Davies, P., vd.; Grace, N.F., vd.; Zhishen, W., vd.; Amran, Y.H.M., vd.)

- Şekil 2.5’te gösterilen alternatiflerden biri olan ‘uç bölgelerden yapılan sarma’ tekniğinde CFRP tabakasının betonla olan aderansı sınırlı kalmakta ve özellikle orta büyüklükteki açıklıkta yeterli yük transferi sağlanamaması nedeniyle ayrılma (debonding) riski artmaktadır. Bu tür uygulamalarda CFRP’nin etkinliğinin düşmesi ve ani biçimde kırılma gerçekleşmesi olasılığı söz konusudur.
- Bir diğer alternatif olan ‘uç bölgelerde mekanik ankraj kullanımı’, tabaka soyulmalarını önleyici bir işlev görerek CFRP-beton arayüzündeki bağ dayanımını artırmaktadır. Ancak bu yöntemin uygulama süreci, yüksek hassasiyet ve ilave detaylandırma gerektirmektedir.
- Çelik plakalarla destekleme uygulaması, CFRP tabakasının üzerine ilave rijitlik kazandırmak amacıyla tercih edilmekte olup, taşıma kapasitesine katkı sağlamaktadır. Fakat çelik ile CFRP arasındaki termal genleşme farklılıkları uzun vadede uyumsuzluklara yol açabilmektedir.
- Son olarak, CFRP tabakasının tüm açıklık boyunca kirişi sarması, yük aktarımının daha homojen gerçekleşmesini sağlamakta ve sistemin genel davranışını olumlu yönde etkilemektedir. Bu yöntem, literatürde en yaygın ve güvenilir güçlendirme tekniklerinden biri olarak tanımlanmaktadır.

Belirtilen yöntemler ele alınan her uygulama için ayrıca değerlendirilmekte, CFRP uygulamasının hangi yöntemle yapılacağı çeşitli mühendislik hesaplamaları sonucunda belirlenmektedir. Tablo 2.1’de söz konusu tekniklerle ilgili olumlu ve olumsuz noktalar ayrıca ifade edilmektedir.

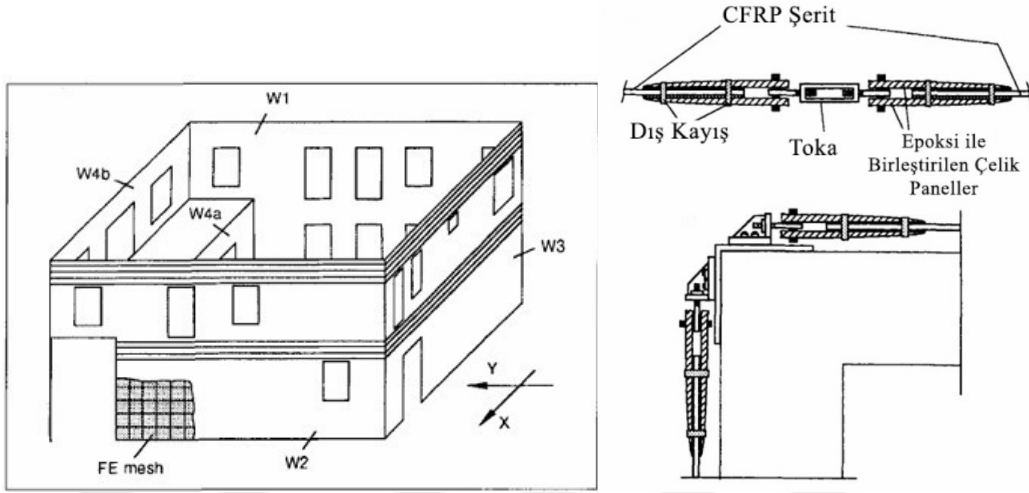
**Tablo 2.1** Kiriş Güçlendirme Çalışmalarında Yaygın Olarak Kullanılan Tekniklerle İlgili Avantajlar ve Dezavantajlar

| <b>YÖNTEM</b>                        | <b>AVANTAJ</b>                                            | <b>DEZAVANTAJ</b>                                                             |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Uç Bölgelerden Sarma</b>          | -Uç bölgelerde çatlamayı önleyebilir                      | -Orta açıklıkta yeterli yük transferi sağlanamaz<br>-Ayrılma riski yüksektir. |
| <b>Uç Bölgelerde Ankraj Uygulama</b> | -Ayrılma riski azdır<br>-Prematüre kırılmalar önlenabilir | -Detaylı işçilik ve uygulama maliyeti<br>-Donatıya zarar verme riski          |
| <b>Çelik Plakalarla Destekleme</b>   | -Rijitlik artar<br>-Taşıma kapasitesine katkı sağlanır    | -Çelik ve CFRP arasında termal uyumsuzluk<br>-Ağırlık artışı                  |
| <b>Tüm Açıklık Boyunca Sarma</b>     | -Yük aktarımı homojendir<br>-En yaygın yöntemdir          | -Dikkatli uygulama gereksinimi<br>-Detaylı yüzey hazırlığı                    |

CFRP ile taşıyıcı eleman güçlendirme teknikleri yalnızca betonarme yapılarda değil, aynı zamanda yığma yapılarda da kullanılmaktadır. Taşıyıcı niteliklerini kaybetmekte olan duvarlar, kemerler, tonozlar, vb. yığma yapı elemanları güçlendirme elemanı olarak CFRP'nin uygulandığı alanlar içerisinde bulunmaktadır. Yapının ağırlaşmasının istenmediği ve güçlendirme uygulamasının gerekli olduğu durumlarda CFRP'nin yapı ürünü olarak kullanıldığı pek çok örnek bulunmaktadır.

Yunanistan'ın Patras kentinde yığma duvarlardan oluşan yaklaşık 150 yaşında üç katlı bir yapının cephesinin dışarıdan CFRP bantlarla sarılarak güçlendirilmesi, literatürde bu alanda yapılmış ilk çalışmalardan biri olarak değerlendirilmektedir. Yapıdaki uygulamaların ele alındığı bir çalışmada taşıyıcı duvarların güçlendirme öncesi ve sonrasındaki yapısal davranışları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Yapı elemanlarının bir arada hareket edebilmesi adına CFRP'ler bu çalışmada yapı cephesini şeritler halinde tamamen saracak biçimde

yerleştirilmektedir. Yapılan bu uygulama ve yapı yüzeyi ile CFRP'nin yük altında ayrışmaması için kullanılan ankraj işlemleri Şekil 2.6'da gösterilmektedir (Triantafillou, T. C., Fardis, M. N.).

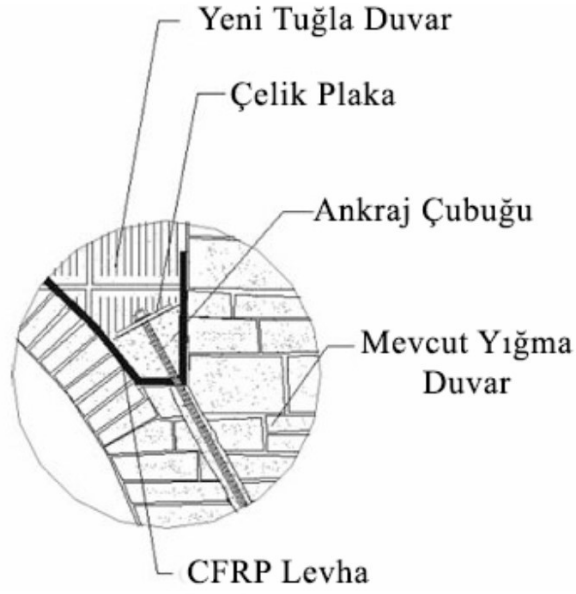


**Şekil 2.6** Yığma Yapı Üzerinde Yapılan Güçlendirme Çalışmasında Cephedeki Uygulamanın Şematik Gösterimi ve Kompozit Güçlendirme Elemanlarının Ankraj Detayları (Triantafillou, T. C., Fardis, M. N.)

İtalya'da 17. yüzyılda inşa edilmiş bir sarayın taşıyıcı elemanlarındaki uygulama bu bağlamda literatürde detaylı verilerin elde edilebileceği bir örnek olarak yer almaktadır. 1997'deki Umbria-Molise depreminde büyük hasar alan bu yapının CFRP'lerin kullanılmasıyla güçlendirildiği görülmektedir (Bastianini, F., vd.). CFRP'lerin özellikle yapının hasarlı duvarlarına ve tonozlarına uygulandığı, Şekil 2.7'deki görselde ve Şekil 2.8'de yer alan detay çiziminde gösterilmektedir.



**Şekil 2.7** Tonoz Güçlendirme Çalışması Uygulama Fotoğrafı (Bastianini, F., vd.)



**Şekil 2.8** Tonz Güçlendirme Çalışması Kesit Detayı (Bastianini, F., vd.)

Yığma yapıların duvar ve tonozlarında olduğu gibi kubbelerinde de CFRP bir güçlendirme elemanı olarak kullanılabilir. Polonya’da bu bağlamda yapılan bir çalışmada altı farklı güçlendirme modeli üzerinden deneyler yürütülmüş ve kubbelerin destek bölgelerinde karşılaşılan karmaşık gerilme durumları simüle edilerek çeşitli testler yapılmıştır. Hem farklı CFRP uygulama tekniklerinin hem de CFRP’ye alternatif olarak değerlendirilebilecek farklı FRP’lerin değerlendirildiği çalışmada mekanik nitelikler bağlamında en etkili sonucun epoksiyle taşıyıcı elemana yapıştırılan CFRP şeritlerin kullanımıyla elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır (Jasieńko, J., vd.).



**Şekil 2.9** Tarihi Yapı Kubbesi Üzerinde Yapılacak Çalışma İçin Hazırlanan Deney Düzenegi (Jasieńko, J., vd.)

Yapı endüstrisinde güçlendirme elemanı olarak yakın geçmişten bu yana kullanılan CFRP'lerin zaman içerisinde mekanik niteliklerini koruduğu ve yapı sağlığını desteklemeye devam ettiği gözlemlenmektedir. Yapı taşıyıcı niteliklerinin kontrol edilmesi amacıyla yapılan araştırmalarda CFRP ile güçlendirilen örnek bir yapıda 13 yıllık kullanım sonrasında önemli bir dayanım kaybı görülmediği belirtilmektedir (Michels, J., vd.).

CFRP'ler üzerlerine etkiyen kuvvetlere karşı gösterdikleri direncin değişmesiyle manyetik alanda değişikliklere neden oldukları için (piezorezistif nitelik) bu gibi yapı sağlığı görüntüleme sistemlerinde sensörlerle de birlikte kullanılabilir. CFRP'ler bu bağlamda hem yapının güvenliğinin sağlanmasında hem de yapıdaki yüklerin nasıl dağıldığının kesintisiz olarak denetlenmesinde faydalı bulunmaktadır. Herhangi bir titreşim ya da salınım anında yapı taşıyıcı sistemlerinde gerçekleşen hareketler CFRP'nin gösterdiği mekanik direnç miktarını da değiştirmekte, bu direnç farkıyla oluşan manyetik alan değişimi CFRP çevresindeki akıllı sensörler tarafından algılanmakta ve yapıya etkiyen yükler hassas biçimde hesaplanabilmektedir. Yapı sağlığının etkili biçimde izlenebilmesi için bu gibi akıllı sistemlerle birlikte kullanılabilir olması, CFRP'ler adına önemli bir özellik olarak değerlendirilmektedir.

Mevcut yapıların güçlendirme çalışmalarının dışında yeni üretilen çeşitli yapılarda da CFRP'nin taşıyıcı niteliklerinden faydalanılmaktadır. Özellikle köprülerde, taşıyıcıların yüksek çekme gerilimine dayanması gereken yapılarda, yüksek neme ve yoğun kimyasal etkiye maruz kalan altyapı tesislerinde bu kullanımın yaygınlaştığı görülmektedir. Örneğin ABD'nin Florida, Michigan ve Kentucky eyaletlerinde uygulanan bazı köprü projelerinde donatı olarak CFRP'nin kullanıldığı görülmektedir. Hem ön germe hem de ard germe sistemlerde kullanılabilen CFRP'nin söz konusu konumlardaki uygulamaları Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



(a)



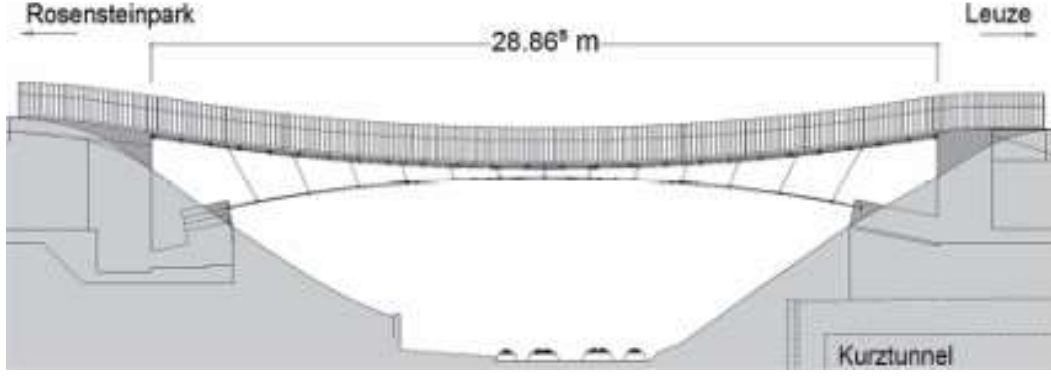
(b)



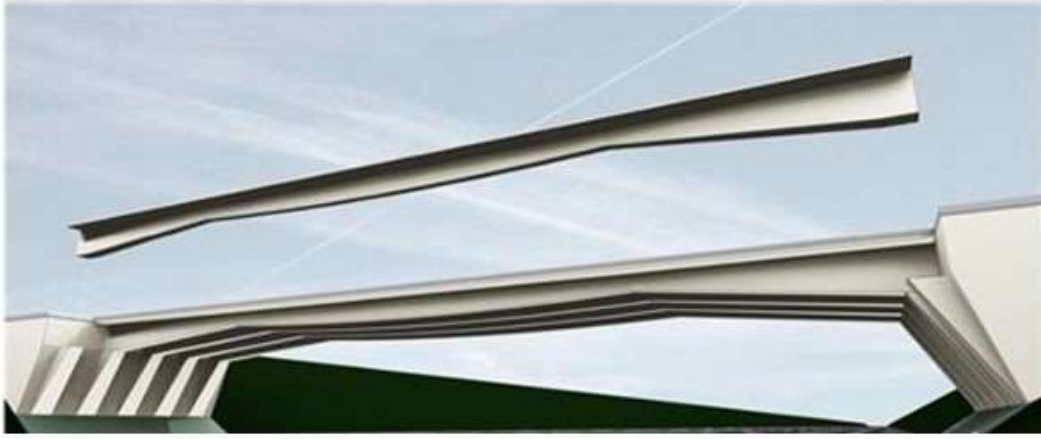
(c)

**Şekil 2.10** Köprü ve Altyapı Tesislerinde Kullanılan CFRP Donatılar ve Kirişler;  
a: CFRP ankraj ucu, b: CFRP ard germe detayı, c: CFRP donatılarla hazırlanmış  
kirişler (Kim, Y.J., vd.)

Almanya'nın Stuttgart kentinde yer alan Rosensteinsteg-II köprüsünde (Şekil 2.11) ve A20 otobanında yapılması planlanan bir taşıt köprüsünde (Şekil 2.12) donatı olarak çelik yerine CFRP'lerin kullanıldığı görülmektedir (Khorgade, P., vd.). CFRP'nin bu iki yapıda hem aktif hem de pasif donatı olarak kullanımı üzerinden yapılan değerlendirmeler yapı ürünü olarak CFRP'nin özellikle hafifliği ve çekme dayanımı nedeniyle bu gibi uygulamalarda tercih edilebileceğini göstermektedir. Konvansiyonel yöntemlerle üretimi ile karşılaştırıldığında CFRP kullanımının hem donatı ağırlığının hem de ihtiyaç duyulan beton ağırlığının azaltılmasına katkıda bulunduğu değerlendirilmektedir.



**Şekil 2.11** Rosensteinsteg-II Köprüsü, Almanya (Khorgade, P., vd.)



**Şekil 2.12** A20 Otobanı Köprü Projesi, Almanya (Khorgade, P., vd.)

CFRP'lerin yüksek dayanım kriterlerini bu şekilde hafif üretimlerle sağlayabilmeleri nedeniyle çevresel açıdan uzun vadeli faydalar sağladığı, korozyona karşı dayanıklılığı nedeniyle bakım gereksiniminin düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle yeni yapılardaki kullanım alanları da genişlemekte, köprüler dışında kamusal alanlar ve ortak kullanılan çeşitli yapılarda da CFRP'ler donatı olarak tercih edilmeye başlamaktadır.

CFRP'nin yapı ürünü olarak kullanıldığı diğer bir proje de Foster+Partners mimarlık ofisi tarafından Apple firması için tasarlanmış olan Steve Jobs Theater yapısıdır. Bu projede CFRP'ler yapının çatısını oluşturmaktadır. Hafif olmaları nedeniyle tercih edilen CFRP'lerin paneller biçiminde bir araya getirilmesiyle oluşturulan çatı diski, yapının örtüsü olarak çalışmasının yanında yapı kullanımı için gerekli olan aydınlatma gibi gereksinimleri karşılayacak sistemleri de

taşımaktadır. 41 metre açıklığın geçildiği yapıdaki çatının ve söz konusu sistemlerin bütün ağırlığı ise yapı çevresini saran cam duvarlar tarafından taşınmaktadır. CFRP'nin hafifliği yardımıyla uygulanabilmiş olan yapı, belirtilen nitelikleri sağlamakla birlikte yanal yüklere karşı da yeterli dayanımı göstermektedir. Yapılan değerlendirmelerde yapının 8.0 büyüklüğünde bir depreme dayanabilecek nitelikte üretildiği belirtilmektedir (Duddy, L.). Yapının formu ve çatının kurgulanış biçimi ise Şekil 2.13'te gösterilmektedir.



**Şekil 2.13** Steve Jobs Theater, Apple Park, ABD (Foster + Partners)

Günümüzde CFRP'nin konvansiyonel yapılarda donatı olarak kullanımıyla ilgili çalışmaların sayısı da artmaktadır. Bu amaçla kullanımın önemli bir örneği olan ve Dresden Teknik Üniversitesi'nin kampüsünde 2022 yılında inşa edilmiş olan "The Cube" isimli yapı iki kattan oluşmakta ve 234 m<sup>2</sup>'lik bir alan üzerinde yer almaktadır. Şekil 2.14'te gösterilen ve literatürde dünyanın ilk karbon fiber donatılı betonarme binası olarak yer alan bu yapı, içerisinde laboratuvar da bulunan iki katlı bir etkinlik binası olarak kullanılmaktadır. Yapı, Alman Eğitim ve Araştırma Bakanlığı destekli C<sup>3</sup> (Carbon Concrete Composite) inisiyatifi kapsamında bir çalışma olarak ele alınmış, Dresden Teknik Üniversitesi Beton Konstrüksiyon Enstitüsü ve HENN mimarlık ofisinin iş birliğiyle uygulanmıştır.

CFRP'lerin yapı ürünü olarak değerlendirilmesiyle hem beton yüzeylerin kesitlerinin inceltildiği hem de yapının üretim süreçlerinde gerçekleşen karbon dioksit salınımı düzeyinin azaltıldığı ifade edilmektedir. Bu bağlamda yapının tasarımcısı olan HENN Mimarlık firmasının yetkilileri, söz konusu yapının üretimi

sırasında konvansiyonel yapım yöntemleriyle karşılaştırıldığında karbon emisyonlarında 50%'ye yakın düşüş sağladıklarını, beton gereksinimini de dörtte bire indirdiklerini aktarmaktadır (Bahadursingh, N.). Söz konusu donatılar yapının strüktürel durumunun izlenmesini sağlayabilmekte, üzerinden geçirilen elektrik akımının kontrollü biçimde değiştirilmesiyle de yapının cepheden ısıtılmasına yardımcı olabilmektedir (Aydın, E.).



**Şekil 2.14** The Cube Projesi, Dresden Teknik Üniversitesi Kampüsü, Almanya (HENN)

Taşıyıcı elemanların desteklenmesini ya da yenilikçi strüktürlerin oluşturulmasını gerektiren projelerde CFRP'nin ve diğer Fiber Takviyeli Polimer (FRP)'lerin nasıl kullanılabileceğiyle ilgili çalışmalar hem akademik araştırmalar hem de yapı uygulamaları bağlamında yürütülmekte, konu ile ilgili sürekli olarak yeni bilgiler üretilmektedir. Çalışma prensipleri ve üretim teknikleri birbirlerine benzemekle birlikte günümüzde kullanılan FRP'ler gösterdikleri mekanik performans ve çeşitli nitelikleri bağlamında ayrılmakta ve kullanım amaçları farklılaşmaktadır. Dolayısıyla CFRP'nin yapı piyasasında yaygın olarak kullanılmasının nedenlerinin anlaşılması adına bu ürünler arasında taşıyıcı sistemler bağlamında ne gibi farkların olduğunun da incelenmesi gerekmektedir.

## **2.2 Beton Kirişlerde Çubuk Donatı Olarak Kullanılan CFRP'nin Diğer Kompozit Ürünlerle Karşılaştırılması**

Yapı ürünü olarak FRP'lerin kullanılması, yapı sistemine kazandırdıkları performans üzerinden değerlendirildiğinde çok sayıda avantaj sağlamaktadır. Birçok FRP'nin özellikle yüksek çekme dayanımı ve yüksek elastisite modülüne sahip olduğu görülmektedir. Söz konusu niteliklerinin düşük ağırlıkta kullanımla dahi sergilenebilmesi de birçok araştırmacıyı bu ürünler üzerinde çalışmalar yapmaya yönlendirmektedir. Hafiflikleri nedeniyle taşıyıcı sistem tasarımındaki donatı ağırlığının azaltılması, temel sistemleri de dahil olmak üzere taşıyıcı elemanların kesitlerinin küçültülebilmesi ve genel olarak daha az yapı malzemesi kullanılması gibi ek yararlar da sağlamaktadırlar.

FRP'ler, belirtilen genel yapıları nedeniyle yapı endüstrisi için önemli potansiyeller barındırmakla birlikte birbirlerinden farklı niteliklere sahiptirler. Günümüzde yaygın olarak kullanılan FRP türlerinden olan CFRP, Cam Elyaf Takviyeli Polimer (GFRP), Bazalt Elyaf Takviyeli Polimer (BFRP) ve Aramid Fiber Takviyeli Polimer (AFRP) farklı davranışlar sergilemekte ve birbirlerinden ayrılmaktadır. CFRP üretiminde temel malzeme olarak karbon fiberler kullanılırken GFRP'ler cam elyaf malzemelerden üretilmekte, BFRP'nin ana yapısını içerisindeki bazalt belirlemekte ve AFRP de aramid liflerinden elde edilmektedir. Söz konusu temel malzemelerdeki farklar bu kompozit ürünlerin davranışlarının belirlenmesindeki ana etken olarak değerlendirilmektedir. Bu farklılıkların anlaşılması ve yapı ürünlerinin değerlendirilmesi için ise literatürde sıklıkla karşılaşılan belirli parametreler kullanılmaktadır. Söz konusu parametreler fiziksel nitelikler, mekanik performans ve dayanıklılık başlıkları altında incelenmektedir.

FRP'lerin fiziksel nitelikleri çerçevesinde ürünün yoğunluğu, ağırlık-dayanım oranı, sertliği ve rijitliği incelenmektedir. FRP'lerin mekanik performansları ise temel olarak çekme dayanımı ve basınç dayanımı üzerinden karşılaştırılmaktadır. Bu parametrelerin çeşitli değişkenlerden etkilendiği, tek başlarına değerlendirilmemesi gerektiği aktarılmaktadır. Bu değişkenlerin ürüne ne kadar etkiyebildiği ve dayanımı hangi oranda değiştirebildiği ise elastisite modülü - eğilme dayanımı ve sünme dayanımı kriterleri üzerinden incelenmektedir. Bu

parametreler Tablo 2.2’de ayrıca sunulmakta ve çalışma kapsamında derlenecek veriler bu başlıklar altında gruplandırılmaktadır.

**Tablo 2.2** FRP’lerin Yapı Ürünü Olarak Karşılaştırılmasında Kullanılan Parametreler

|                            |                         |
|----------------------------|-------------------------|
| <b>Fiziksel Nitelikler</b> | Yoğunluk                |
|                            | Ağırlık – Dayanım Oranı |
|                            | Sertlik                 |
|                            | Rijitlik                |
| <b>Mekanik Nitelikler</b>  | Çekme Dayanımı          |
|                            | Basınç Dayanımı         |
|                            | Elastisite Modülü       |
|                            | Eğilme Dayanımı         |
|                            | Sünme Dayanımı          |
| <b>Dayanım</b>             | Korozyon Direnci        |
|                            | Yorgunluk Dayanımı      |
|                            | Kırılgenlık             |
|                            | Nem Oranı               |

Birçok faydalı niteliğe sahip oldukları için yapılarda nasıl kullanılabilecekleriyle ilgili araştırmalara konu olan FRP’lerin belirtilen nitelikleriyle ilgili yapılan ölçümlerin sonuçları ürünlerin hangi alanlarda nasıl farklılaştığını göstermektedir. Bu farklılıklar ürün içerisinde kullanılan lif tipinin dışında üretim yöntemlerinden, FRP’nin kesitinden, kullanılan liflerin yönünden ve kompoziti oluşturan matris türünden de kaynaklanabilmektedir (Selzer, R., Friedrich, K.).

FRP’leri oluşturan liflerin bir arada tutulabilmesini ve ürünün istenen formda şekillendirilmesini sağlayan matrisin oluşturulmasında yaygın olarak kullanıldığı görülen epoksi ve polyester bazlı matrisler üzerinde yapılan araştırmalar bu matrislerin kompozit ürünlere olan etkisini göstermektedir. Yapılan çeşitli çalışmalardan elde edilen sonuçlar, bu bağlamda epoksi bazlı kompozitlerin basınç altındaki dayanımının polyester bazlı kompozitlere göre daha yüksek olduğunu tespit etmektedir (Dhawan, V., Singh, S., Singh, I.).

Belirtildiği gibi FRP içerisinde bulunan elyaf miktarı da kompozit ürünün niteliklerinin belirlenmesinde önemli bulunan bir parametredir. Lif miktarının artırılmasıyla FRP'nin mekanik nitelikleri bağlamında ek kazanımlar sağlanmakta; her FRP'nin davranışı ve mekanik performansı, söz konusu yapısal niteliklerin değişmesinden farklı şekilde ve oranda etkilenmektedir.

Yapı taşıyıcı sistemleri için kullanılan değerlendirme yöntemleri, bu ve benzeri değişkenlerin uluslararası kurumlar tarafından standartlaştırılmasıyla daha sağlıklı biçimde ele alınabilecektir. Bununla birlikte günümüzdeki FRP incelemelerinde ve yapılan karşılaştırmalarda sıklıkla başvurulmuş bazı veri kaynakları bulunmaktadır. Literatürde CFRP'nin diğer FRP türleriyle karşılaştırıldığı çalışmalarda yaygın olarak kabul edilen değerlerin Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) tarafından yayınlandığı gözlemlenmektedir. Özellikle 2015'te yayınlanan ACI 440.1R-15, 2017'de yayınlanan ACI 440.2R-17 ve sonraki yıllarda yayınlanan kaynaklar bu anlamda önemli bulunmaktadır.

Taşıyıcı elemanların mekanik performanslarının değerlendirilmesinde kullanılan parametrelerden biri çekme dayanımıdır. Çekme dayanımı, yapı ürününün bütünlüğünü koruyarak gösterebildiği en üst gerilme direncini ifade etmektedir. FRP'lerin yapı ürünü olarak uygunluklarının karşılaştırılmasında sıklıkla bu değer incelenmektedir. FRP'lerin yapıların kirişlerinde, döşemelerinde ve yüksek çekme direncine gereksinim duyulan diğer taşıyıcı sistem elemanlarında kullanılmasının en önemli nedenlerinden biri ise genel olarak bu bağlamda gösterdikleri yüksek değerlerdir. Günümüzde betonarme sistemlerde çekme gerilmeleri yaygın olarak çelik donatılarla karşılanmakta, bu çözüm de yapı yaşam sürecinde korozyon ve malzeme yorgunluğu gibi sorunlarla karşılaşılması riskini beraberinde getirmektedir.

CFRP, GFRP, BFRP ve AFRP'lerin söz konusu sorunlara karşı çeşitli alternatif çözümler sunuyor olmaları yapı endüstrisindeki uygulamalarda ve bilimsel araştırmalarda bu ürünlerle giderek daha sık karşılaşılmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte FRP'lerin lif türleri ve özgün ürün yapıları çekme dayanımlarını da etkilemekte ve farklılaştırmaktadır.

FRP'leri oluşturan elyaf türünün yoğunluğu, kompozit ürünün çekme dayanımıyla ilişkili bulunmaktadır. Örneğin BFRP'lerde bazalt fiberlerin yoğunluğunun

GFRP'lerde kullanılan cam elyaflardan daha yoğun olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla BFRP'nin de GFRP'den daha yüksek çekme dayanımı gösterdiği belirtilmektedir (Parnas, R., vd.; Li, X., vd.). CFRP'ler ise karşılaştırmada kullanılan FRP'lerin hepsinden daha yüksek çekme dayanımına sahiptir (Fawzia, S., vd.; Hensher, D.A.). Çekme dayanımı kriteri çerçevesinde CFRP'nin gösterdiği yüksek değerlerin, CFRP'nin yapı ürünü olarak diğer FRP'lere göre daha sık kullanılmasının temel nedeni olduğu da çeşitli araştırmalarda ifade edilmektedir (Chen, D., vd.; Deak, T., Czigany, T.; Zaki, M., vd.).

FRP'lerin çekme dayanım verileri ile ilgili Amerikan Beton Enstitüsü (American Concrete Institute - ACI), Amerikan Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği (American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO), Uluslararası Yapısal Beton Federasyonu (The International Federation for Structural Concrete - FIB), Kanada Standartlar Birliği (Canadian Standards Association - CSA) ve Uluslararası Standardizasyon Örgüsü (International Organization for Standardization - ISO) tarafından ifade edilen değerler pek çok çalışmada referans veri olarak kabul edilmektedir. Tablo 2.3'te gösterilen değerler de bu kaynaklardan hem direkt hem de dolaylı olarak elde edilmiş verilerden oluşmaktadır. Söz konusu kaynaklar, çekme dayanımı bağlamında FRP'ler arasında CFRP'nin öne çıktığını ifade etmektedir. Bununla birlikte standart aralıkta kabul edilen alt sınır ve üst sınır arasındaki dayanım farkının fazlalığı CFRP'nin üretim yöntemlerinin ve içerdiği lif oranının dikkatli biçimde takip edilmesi gerektiğini göstermektedir. Çekme dayanımı kapasitesi bağlamında CFRP'yi takip eden ürünlerin ise sırasıyla AFRP, BFRP ve GFRP olduğu görülmektedir.

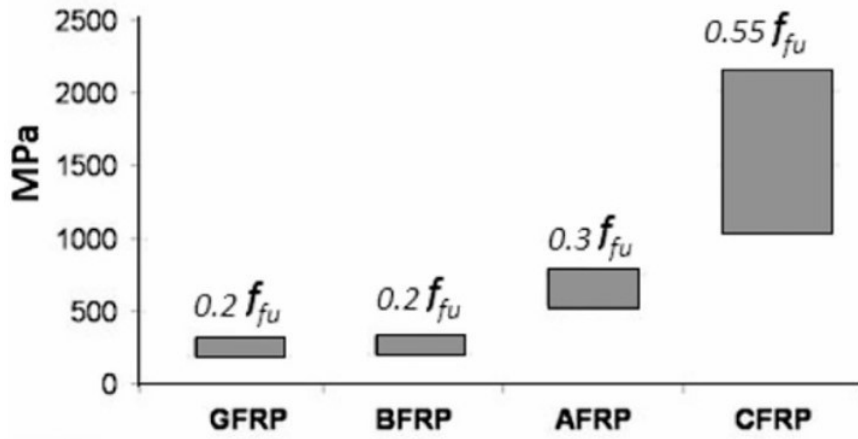
**Tablo 2.3** CFRP, GFRP, BFRP ve AFRP'nin Çekme Dayanım Verileri (ACI 440.1R-15; Landesmann, A., vd.; Adhikari, S.).

| <b>Dayanım Parametresi</b> | <b>CFRP</b> | <b>GFRP</b> | <b>BFRP</b> | <b>AFRP</b> |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Çekme Dayanımı (MPa)       | 600 – 3690  | 483 - 700   | 1000 - 1100 | 1720 - 2540 |

CFRP ve diğer FRP türlerinin karşılaştırılmasında dikkat edilmesi gereken konulardan biri de bu ürünlerin hangi bağlamda ele alındığıdır. Direkt olarak ürünlerin karşılaştırılmasının yapılmasında Tablo 2.3'teki ortalama değerler kullanılırken söz konusu FRP'lerin yapı ürünü olarak karşılaştırıldığı çalışmalarda bu değerler değişebilmektedir. Bu nedenle yapılarda kullanılmaları durumunda ürünün tek başına gösterdiği dayanım performansı verileri doğrudan kullanılmamaktadır.

FRP'lerin yapı elemanını oluşturan diğer malzemelerde birleşimi, birlikte çalışmaları sonucunda karşılıklı etkileşimleri sonucunda karşılaşılabilecek ek değer kayıplarının ve zaman içerisindeki dayanım düşüşlerinin tolere edilebilmesi için ürünlerin maksimum dayanım seviyeleri üzerinden bir miktar pay bırakılmakta ve güvenilir dayanım seviyeleri tespit edilmektedir. Söz konusu güvenli değer aralığının etkili biçimde ölçülebilmesi için belirli katsayılar kullanılmaktadır. FRP'ler özelinde bu katsayı  $F_{fu}$  sembolüyle ifade edilmektedir.

Her FRP için ayrıca belirlenen emniyet katsayısı söz konusu ürünün maksimum dayanım değerleri ile çarpılmakta ve ortaya çıkan sonuçlar emniyetli dayanım hesaplamaları yapılırken kullanılmaktadır. Şekil 2.15'te FRP türlerinin güvenlik katsayısı uygulanmış dayanım düzeyleri gösterilmektedir. CFRP'nin emniyet katsayısı olarak belirlenen  $0.55 F_{fu}$  değerinin diğer FRP türlerinden yüksek olması, CFRP'nin yapıda kullanımında karşılaşılabilecek risklerin diğer alternatiflere göre daha düşük olduğunu ifade etmektedir. Bu durum sonucunda ürünler arasındaki çekme dayanımı farkları daha da belirginleşmekte ve çekme dayanımı bağlamında CFRP'nin önemli avantajlara sahip olduğu anlaşılmaktadır.



**Şekil 2.15** CFRP, GFRP, BFRP ve AFRP için Emniyet Katsayısı ( $F_{fu}$ ) Uygulanmış Çekme Dayanımı Değerleri (Prince Engineering; Hensher, D.A.; Peter, D., vd.).

FRP'lerin basınç karşısında gösterdikleri dayanım, yapılarından dolayı çekme dayanımlarına göre düşük bulunmaktadır. Genel olarak çekme dayanımı beklenen alanlarda kullanılmaları da buradan kaynaklanmaktadır. Ancak FRP'lerin yapı taşıyıcı elemanlarında kullanımlarının yaygınlaşması için basınç dayanımlarındaki eksikliklerin giderilmesine yönelik de ek önlemler alınmakta ve uygun tasarım stratejileri geliştirilmektedir. Bu geliştirmelerde etkin sonuçların alınabilmesi adına FRP'ler arasında en yüksek basınç dayanımına sahip FRP'lerden olan CFRP'nin en uygun aday olduğu belirtilmektedir.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan ve bu çalışma kapsamında değerlendirilen diğer FRP türleri arasında basınç dayanımı bağlamında en zayıf alternatifin ise AFRP olduğu ifade edilmektedir (Sahu, N.P., vd.). Literatürde neredeyse her durumda FRP içerisindeki liflerin, FRP'de kullanılan reçineden daha dayanıklı olduğu görülmektedir. Ancak AFRP özelinde yapılan bazı testlerde, kullanılan liflerin direnç seviyesinin reçineden daha önce aşıldığı gözlemlenmektedir (De Merchant, C.). Bu durumdan dolayı yapılarda AFRP kullanımı tercih edilen bir strateji olarak görülmemektedir.

Tablo 2.4'te çeşitli kaynaklardan edinilerek karşılaştırılan veriler CFRP'ler ve diğer FRP türleri özelinde basınç dayanımı bağlamında elde edilen sonuçları göstermektedir. FRP'lere ait verilerin daha önce söz edildiği gibi üretim teknikleri, ürün kesitleri ve içerdikleri lif oranlarıyla bağlantılı olarak değişebileceği göz önünde bulundurulmakla birlikte bu tablo literatürde sıklıkla rastlanan değerlerin aralığını göstermek amacıyla sunulmaktadır.

**Tablo 2.4** CFRP, GFRP, BFRP ve AFRP'nin Basınç Dayanım Verileri

| Dayanım Parametresi   | CFRP | GFRP      | BFRP | AFRP      |
|-----------------------|------|-----------|------|-----------|
| Basınç Dayanımı (MPa) | 570  | 380 - 456 | 420  | 350 - 370 |

Yapısal nitelikleri ve mekanik performansları nedeniyle yapılarda daha sık kullanılan CFRP ve GFRP'nin katman sayılarının artırılması da basınç ve diğer kuvvetler altındaki değerlerin iyileştirilmesine katkı sağlayabilmektedir. Bu bağlamda yapılan bir çalışmada tek katmanlı GFRP güçlendirmesi yapılan bir kolonda basınç kuvvetlerine karşı 36% dayanım artışı görülürken üç katman GFRP uygulanmasıyla dayanımda 105% gelişme görülmektedir. Aynı uygulamanın CFRP ile yapılmasıyla sağlanan dayanım artışı ise 66% ve 123% olarak ölçülmektedir (Zarringol, M., Zarringol, M.A.).

FRP'lerin yapı ürünü olarak değerlendirilmesinde çekme ve basınca karşı gösterdikleri dayanımın yanında ne kadar elastik oldukları da önemli bulunmaktadır. Basınç dayanımlarından çok çekme dayanımları nedeniyle kullanılan FRP'lerin yapı hareketlerine uyum sağlayabilmeleri, bütünlüğünü koruyarak yapının yanal kuvvetlere dayanımına katkıda bulunabilmeleri adına istenen elastisiteye sahip olmaları ve gerekli durumlarda yapıda oluşacak salınımlara karşılık verebilmeleri beklenmektedir.

Eğilme dayanımı bağlamında belirleyici etkenlerin ürün içerisindeki liflerin uzunluğu, FRP üretiminde yapılan ısı uygulamaları, kullanılan bağlayıcı maddenin nitelikleri ve matris içerisinde aktivasyon için kullanılan yöntemler olduğu görülmektedir (Amran, Y.H.M., vd.). Bu değişkenler göz önünde bulundurularak yürütülen farklı çalışmalar sonucunda elde edilen verilerin aralıkları değerlendirildiğinde elastisite modülü özelinde de CFRP'nin diğer FRP'lerden olumlu anlamda ayrıştığı gözlemlenmektedir. Tablo 2.5'te GPa birimi üzerinden sunulan ve söz konusu parametre bağlamında elde edilen veriler bu durumu göstermektedir.

**Tablo 2.5** CFRP, GFRP, BFRP ve AFRP'nin Elastisite Modülü Değerleri  
(Landesmann, A., vd.; Adhikari, S; Hasan, A.M.; Sovjak, R., vd.; El-Tahan, M.,  
vd.; Yavuz, G.).

| <b>Dayanım Parametresi</b> | <b>CFRP</b> | <b>GFRP</b> | <b>BFRP</b> | <b>AFRP</b> |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Elastisite Modülü (GPa)    | 89 - 245    | 30 - 51     | 50 - 70     | 43 - 125    |

Deprem gibi doğa olayları sonucunda yapıların salınım yapması ve hareket etmesi sonucunda yapı taşıyıcı elemanları ve bu elemanlar içerisinde kullanılan ürünler de etkilenmekte ve yapının aldığı darbeleri sönümlemektedir. Bu davranış farklı yapı ürünleri tarafından farklı seviyelere kadar sergilenebilmekte ve söz konusu sınırların aşılması durumunda taşıyıcı eleman içerisindeki ürünler birbirinden ayrışabilmekte, dolayısıyla taşıyıcı sistemin mekanik niteliklerinde önemli düşüşler gözlemlenebilmektedir. Yapı ürünlerinin birbirleriyle temas ettikleri yüzeylerin yapısı, bu ürünlerin yüzeylerinin birbirlerine kimyasal ya da mekanik olarak hangi biçimlerde tutunduğu söz konusu ayrışma sınırının belirlenmesinde büyük öneme sahiptir.

Örnek olarak CFRP'lerin ve diğer kompozitlerin yapılarının homojen olmaması, birden çok içerikten oluşmaları beton ile aralarındaki temas yüzeyinin sürekliliğini bozmaktadır. Bu durumun oluşturduğu risklerin taşıma kapasitelerine etkisinin olabildiğince düşük düzeyde tutulabilmesi adına FRP ürünlere uygun taşıyıcı sistem tasarımlarının geliştirilmesi ve bu bağlamdaki standartların iyileştirilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Günümüzde sünme dayanımının aşılması adına bu çalışmada özellikle çekme dayanımı bağlamında açıklanan emniyet katsayıları uygulanmakta ve yapı taşıyıcı elemanlarının güvenli sınırlar içerisinde tasarlanabilmesi sağlanmaktadır.

Söz konusu önlemlerin alınması gerekliliğiyle birlikte CFRP'nin mekanik nitelikler bağlamında, yapı ürünü olarak kullanılan diğer FRP'lere göre daha ön planda olduğu görülmektedir. Ancak günümüzde yapıların dayanımlarını artırmak ve kullanım sürelerini uzatmak amacıyla geliştirilen CFRP gibi ürünlerin taşıyıcı sistemlerde kullanımının yapı sektörüne sağlayabileceği faydaların daha net ifade edilebilmesi adına daha somut karşılaştırmaların yapılması gerekmektedir. Bu

bağlamda CFRP'nin günümüzde kullanımı en çok yaygınlaşmış donatı olan çelik ile de karşılaştırılması gerekmektedir. Sağlıklı değerlendirmelerin yapılabilmesi adına yapı ürünü olarak çeliğin niteliklerinin incelenmesi ve yapı uygulamalarında karşılaşılan sorunlar bağlamında iki ürünün nasıl çözümler getirdiğinin değerlendirilmesi gerekmektedir.

### 2.3 Beton Kirişlerde Çubuk Donatı Olarak Kullanılan CFRP'nin Çelik Donatı ile Karşılaştırılması

İlerleyen teknolojiyle geliştirilen ve yüksek mekanik niteliklere sahip CFRP'nin yapı ürünü olarak potansiyellerinin gerçekçi biçimde değerlendirilebilmesi adına günümüzde belirli kusurlarına rağmen güvenli yapıların üretilmesini sağlayan çelik ile karşılaştırılması önemlidir. Çalışma kapsamında FRP'lerin karşılaştırılmasında kullanılan belirleyici mekanik kriterlerin çelik özelinde de incelenmesi çalışmanın tutarlılığı için uygun görülmektedir. Bu bağlamda FRP'ler ve çelik donatılar üzerine yürütülmüş çalışmalardan derlenen ve Tablo 2.6'da gösterilen değerler çelik ve CFRP'nin genel performanslarını ifade etmektedir.

**Tablo 2.6** CFRP ve Çelik Donatının Çekme Dayanımı, Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü Verileri (Orumu, S.T.; Achamyeh, T. vd.; Fayed, S., vd.; Landesmann, A., vd.; Adhikari, S; Hasan, A.M.; Sovjak, R., vd.; El-Tahan, M., vd.; Yavuz, G.).

| Dayanım Türü            | CFRP     | Çelik   |
|-------------------------|----------|---------|
| Çekme Dayanımı (MPa)    | 600-3690 | 420-701 |
| Basınç Dayanımı (MPa)   | 570      | 352-464 |
| Elastisite Modülü (MPa) | 80-245   | 200     |

Yapı taşıyıcı elemanlarında basınç dayanımlarından çok çekme dayanımları nedeniyle kullanılan çelik ve CFRP'nin bu anlamda önemli bir dayanım üst sınırı farkları bulunmaktadır. Bununla birlikte iki ürün arasındaki yoğunluk farkı da dikkat çekmektedir. Çelik yoğunluğu 7,70 - 7,85 gr/cm<sup>3</sup> olarak değerlendirilirken CFRP'nin yoğunluğu 1,75 – 1,93 gr/cm<sup>3</sup> aralığında değişmektedir. CFRP'nin söz

konusu mekanik dayanım seviyelerini çok daha düşük ağırlıkta malzeme kullanımı ile sağlayabiliyor olması da CFRP'yi yapı ürünü olarak geliştirmeye değer bir alternatif olarak ön plana çıkarmaktadır. Bu bağlamda konvansiyonel betonarme bir taşıyıcı eleman içerisinde donatı olarak CFRP ya da çelik kullanılması durumunda ürün kullanım düzeylerinde gerçekleşebilecek değişikliklerin bir örnek olay incelemesi kapsamında değerlendirilmesi, çalışmada somut verilerin elde edilmesi için faydalı bulunmaktadır.

Hem CFRP'lerin hem de çelik donatıların özellikle çekme dayanımı gerektiren alanlarda kullanılması nedeniyle ele alınan taşıyıcı elemanın kiriş olması uygun görülmektedir. Kirişin oluşturulmasında donatı olarak çelik ya da CFRP'nin kullanıldığı iki alternatif senaryonun tasarlanması ve bu iki senaryoda kullanılması gereken donatı ağırlığı farkının tespit edilmesi söz konusu karşılaştırmanın temel hedefini oluşturmaktadır. Bu kapsamda ele alınacak kirişin geçtiği açıklığın 600cm olması, kesit alanının ise 30cm x 50cm boyutlarında tutulması gerekli hesaplamaların yapılabilmesi için yeterli bulunmaktadır.

Belirtilen niteliklerdeki kiriş üzerinden yapılan hesaplamalarda kullanılan formüller ve katsayılar ACI 440.1R-15'te yer alan bilgilere ve standartlara dayanmaktadır. Kiriş donatısı olarak çeliğin kullanıldığı senaryoda çeliğin sınıfı S420 olarak kabul edilmekte ve dayanımı 420 MPa olarak alınmaktadır. CFRP için ise ACI-440 1R-15'te yer alan 4.2.1 numaralı tabloya göre 600-3690 MPa aralığında olan çekme dayanımı tez çalışması kapsamında bu aralığın alt sınırına yakın bir değer olan 1000MPa olarak ele alınmaktadır. Aynı rehberdeki 6.2 numaralı tabloda ise  $C_E$  sembolü ile gösterilen güvenlik katsayısının dış mekan koşullarına maruz kalmayan CFRP donatılarda 1 olarak, donatının açıkta kaldığı durumlarda 0,9 olarak alınması önerilmektedir. Tez çalışmasında bu güvenlik payı daha da artırılmakta ve ürün dayanımına 0,85 katsayısı uygulanmaktadır. Dolayısıyla 1000MPa olarak ele alınan CFRP çekme dayanımı 0,85 katsayısıyla çarpılmakta, yapılan statik hesaplamalarda kullanılabilecek dayanım CFRP için 850MPa olarak kabul edilmektedir.

Hesaplamalar, ölçüleri verilen kirişin iki senaryoda da C30 sınıfı beton ile üretildiği ve aynı hedef moment değerini sağlayabildiği durum üzerinden yapılmaktadır. Bu bağlamda iki kirişin de belirlenen hedef kapsamında 330 kN.m nominal moment değerini karşılaması beklenmektedir. Kirişin yüksekliğiyle ilişkili olan kaldıraç

boyu da kirişte beklenen moment değerinin karşılanması için gereksinim duyulan kuvvetin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Tez çalışmasında teorik olarak üretilen kiriş özelinde bu değer 0,395m olarak hesaplanmaktadır. 330kN.m moment değerinin 0,395m olan kaldıraç boyuna bölünmesi sonucunda ise kirişte yaklaşık 835.000N kuvvet gereksinimi olduğu görülmektedir.

Kullanılacak donatı miktarının hesaplanmasında belirleyici olan kuvvet değerinin tez çalışmasında CFRP'nin dayanım düzeyi olarak kabul edilen 850MPa değerine bölünmesi sonucunda ise kiriş içerisinde yaklaşık olarak 982mm<sup>2</sup> kesit alanına sahip donatıya gereksinim duyulduğu görülmektedir. Bu değer 6m uzunluğundaki kiriş için 0,0059m<sup>3</sup> hacminde ve 11,38kg ağırlığında CFRP kullanılması gerektiğini göstermektedir.

CFRP için yapılan bu yaklaşık hesaplamaların çelik donatı için de benzer biçimde yapılması ve tez kapsamında söz konusu ürünler arasındaki karşılaştırmalarda hesaplanan donatı miktarlarının kullanılması uygun görülmektedir. Söz konusu kiriş özelinde iki alternatif donatı üzerinden yapılan bu hesaplamaların aşamaları Tablo 2.7'de ayrıca gösterilmektedir.

**Tablo 2.7** Donatı Alternatifleri Olarak Çelik ve CFRP'nin 600cm x 30cm x 50cm Boyutlarındaki Örnek Betonarme Kiriş Üzerinden Karşılaştırılması

| Karşılaştırma Parametreleri           | Çelik                   | CFRP                    |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Kiriş Boyutları                       | 6m x 30cm x 50cm        | 6m x 30cm x 50cm        |
| Beton Sınıfı                          | C30 (30MPa)             | C30 (30MPa)             |
| Donatı Çekme Dayanımı (MPa)           | 420 MPa                 | 850 MPa                 |
| Donatı Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> ) | 1.987 mm <sup>2</sup>   | 982 mm <sup>2</sup>     |
| Donatı Hacmi (m <sup>3</sup> )        | 0,0119 m <sup>3</sup>   | 0,0059 m <sup>3</sup>   |
| Ürün Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )   | 7.850 kg/m <sup>3</sup> | 1.930 kg/m <sup>3</sup> |
| Gerekli Donatı Kütlesi (kg)           | 93,41 kg                | 11,38 kg                |

CFRP'nin yapı genelinde kullanımının yapı ağırlığına ve ürün tüketimine etkisinin tam olarak tespit edilebilmesi için ise bu ürünlerle üretilen taşıyıcı elemanların tekil olarak gösterdikleri performansın yanında yapılarla ilişkili olan çeşitli çevresel etkilerin de incelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla yapı ürünü olarak CFRP ve çelik donatıların çevresel şartlara ve zaman içerisindeki malzeme yorgunluğuna karşı gösterdikleri direnç üzerine yapılan araştırmalarda ürünlerin nem, kimyasal çözeltiler, UV ışınları etkisi altında ve ısı değişimine karşı gösterdiği gösterdikleri tepki incelenmektedir. Bu tür çalışmalar yapı ürününün gerçek performansının değerlendirilebilmesi için önemli görülmektedir.

Literatürde çevresel koşullar bağlamında CFRP ve çelikte oluşan değişimlerin gözlemlenmesi ve bu değişimlerin ürünlerin mekanik niteliklerine olan etkilerinin değerlendirilmesi için sıkça kullanılan çeşitli deneyler bulunmaktadır. Bu deneylerde ürünler doğal çevrede UV radyasyonuna maruz bırakılmakta, nemli ortamlarda bekletilmekte, tuzlu ve klorürlü çözeltilere daldırılmakta ve alkali çözeltiler içerisinde tutulmaktadır.

CFRP'nin güneş ışığına doğrudan maruz kalması durumunda yaşanabilecek değişikliklerden en önemli olanı kompozit içerisindeki reçinenin deforme olması ve CFRP'nin yapısal bütünlüğünün zarar görmesidir. Dayanım niteliklerinin düşmesine neden olabilecek bu durumun CFRP özelinde ne kadar etkili olduğunun anlaşılması adına yapılan ve ACI tarafından da yayınlanan bir çalışmada okyanus kenarında güneşe ve neme açık biçimde bekletilen CFRP barların çekme dayanımlarında ya da elastisite modülü değerlerinde kayda değer bir düşüşün gözlemlenmediği belirtilmektedir (Tomosawa, F., Nakatsuji, T.). Bununla birlikte söz konusu şartların sertleşmesiyle oluşabilecek riskler de üretici firmalar tarafından kontrol altına alınabilmektedir. CFRP'leri direkt güneş ışığından uzaklaştırmak için ürün yüzeyine koruyucu katmanlar uygulanabilmekte ve UV radyasyonunun söz konusu etkilerine karşı koruma sağlanabilmektedir (Zhao, J.).

Çelik özelinde ise UV radyasyonunun doğrudan bir etkisi bulunmamaktadır. Buna karşın çeliğin yapı ürünü olarak kullanılması durumunda üzerine uygulanan koruma boyasının uzun süre güneş ışınlarına maruz kalması, koruyucu boyanın deforme olması riskini barındırmaktadır. Boya katmanının aşınması, taşıyıcı eleman içerisindeki çeliğin korunma seviyesinin azalmasına ve nem gibi etkilere karşı koruma düzeyinin düşmesine neden olmaktadır.

Çelik donatıların yapı taşıyıcı elemanları içerisine etkiyen su ve oksijenle tepkimeye girdiği, sonuç olarak uzun vadede korozyona uğradığı bilinmektedir. Korozyona uğrayan çelik donatıların kesit alanı büyümekte, çeliğin etrafını saran beton kütlede de çeliğin artan hacmi dolayısıyla çatlaklar oluşmaktadır. Artan çatlaklar yapı taşıyıcı elemanlarının çevresel koşullardan etkilenme düzeyini artırmakta, çelik donatının çevresel şartlara karşı korumasız kalmasına neden olmaktadır. Zaman içerisinde ise çelik donatının korozyondan korunmuş olan bölümünün çapı küçülmektedir. Bu durum düşük miktarda korozyon görülen durumlarda dahi önemli taşıyıcı nitelik kayıplarına neden olabilmektedir.

CFRP'lerin içerisindeki karbon fiberlerin ve reçineyi oluşturan bileşenlerin ise korozyondan etkilenmemeleri nedeniyle nemli ortamlarda CFRP'lerin dayanım düzeylerinde anlamlı düşüşler gözlemlenmemektedir. Uzun süre nemli ortamlarda bırakılan CFRP'lerin yapılarında gözlemlenen en önemli değişimin kompozit içerisindeki reçinenin plastikleşmesi adı verilen olay olduğu belirtilmektedir. Söz konusu etkinin ortamdaki sıcaklık düzeyinin artmasıyla belirginleştiği, ancak ürünün mekanik niteliklerinde anlamlı değişikliklere neden olmadığı görülmektedir (Uthaman, A.).

Alkali çözeltiler ise sudan farklı olarak yüksek pH değerine sahiptirler ve çeşitli kimyasalların kullanılmasıyla oluşturulabilmektedirler. Yapı ürünlerinin uzun dönemde gösterecekleri dayanımın simüle edilmesi adına hazırlanan çözeltilere daldırılan deney nesnesinde gözlemlenen değişimler ve gerçekleştirilen testler önemli verilerin ortaya konmasını sağlamaktadır. Çelik ve CFRP'ler üzerine çeşitli çalışmalarda bu yöntemle veriler elde edilmekte ve karşılaştırmalar yapılmaktadır.

Su gibi sıvıların ve oksijenin bir arada bulunduğu ortamlarda uzun vadede önemli miktarda korozyona uğrayan çelik donatılar alkali çözeltilerden aynı oranda etkilenmemektedir. Yapılan çeşitli çalışmalar çeliğin yapısının nemli ortamlar gibi olumsuz koşullarda bozulduğunu ve ürünün mekanik niteliklerinin zayıfladığını, buna karşın özellikle yüksek pH seviyesine sahip ortamlarda çeliğin kimyasal yapısı dolayısıyla korozyon hızının düştüğünü göstermektedir (Permeah, S., Lau, K.; Liu, M., vd.).

Taşıyıcı elemanları etkileyebilecek zararlı koşullara karşı yapısal bütünlük ve mekanik niteliklerin korunması bağlamında yüksek dirence sahip CFRP'lerin de

alkali çözeltiler içerisinde dayanımlarını bir miktar kaybettikleri, ancak bu dayanım düşüşünün kritik seviyelerde olmadığı gözlemlenmektedir. CFRP özelinde yapılan araştırmalar, 11,5-13,0 aralığında pH değerine sahip çözeltiler içinde tutulan ve germe işlemi uygulanmamış CFRP'lerin dayanımında 0-20% arasında kayıp oluştuğunu göstermektedir (Takewaka, K., Khin, M.).

Yapıların taşıyıcılarında pek çok durumda güç kaybına neden olan tuzlu su da bu iki ürünün niteliklerinin sağlıklı biçimde karşılaştırılabilmesi adına önemli parametrelerden biri olarak değerlendirilmektedir. Çelik gibi detaylı optimizasyon süreçlerinden geçmiş ve yapı piyasasında yaygın kullanımda olan bir ürüne alternatif olarak geliştirilmekte olan CFRP'lerin bu bağlamda ciddi avantajları bulunmaktadır. Özellikle uzun süre kullanımı planlanan ancak deniz suyu gibi çevresel etkilere maruz kalabilecek yapılarda çeliğin çeşitli zorlukları beraberinde getirdiği bilinmektedir. Tuzlu çözeltiler içerisinde bulunan klorür iyonları çelik donatının yüzeyinde bulunan pasif tabakanın aşınmasına ve korozyon seviyesinin artmasına neden olmaktadır (Achinike, W., vd.; Prawoto, Y., vd.). Buna karşın CFRP'nin tuzlu suya karşı davranışlarında dikkate değer bir fark görülmemektedir. Yapılan çalışmalarda tuzlu çözeltilere daldırılan ve bekletilen CFRP'lerin mekanik niteliklerinin ve dayanım seviyelerinin önemli bir fark sergilemediği belirtilmektedir (Rahman, A.H., vd.). Dolayısıyla özellikle deniz suyu gibi tuzlu su kaynaklarına yakın konumlarda bulunan yapıların üretiminde CFRP'lerden donatı olarak faydalanabileceği söylenebilir.

Söz konusu alanların pek çoğunda avantajlı olmakla birlikte CFRP kullanımında özellikle dikkatli olunması gereken konular da bulunmaktadır. Diğer FRP'ler gibi içeriğinde birden fazla malzeme bulunduran CFRP'ler ile ilgili önemli çekince noktalarından birinin betonun CFRP'ye temas ettiği yüzey olduğu değerlendirilmektedir. CFRP'nin içerisindeki reçinenin ve liflerin farklı davranışlara sahip olmaları ve olası aşınmalar sonucunda birleşim yüzeyinde düzensizliklerin oluşabilmesi taşıyıcı elemanın toplam dayanımında düşüşe neden olabilmektedir. Bu durumun önlenmesi adına özellikle uygulama öncesi CFRP'nin reçine tabakasının aşınmalardan korunması ve beton uygulamasının dikkatli biçimde yapılması gerekmektedir. Reçine tabakası korunarak yürütülen çalışmalar sonrasında ise CFRP'nin çevresel şartların birçoğuna karşı yüksek direnç gösterdiği görülmektedir. Literatürde bir ve iki yıllık süreler içerisinde

tekrarlanan çalışmalar, doğal çevre koşulları içerisinde kalan CFRP takviyeli betonarme elemanlarda dikkate değer bir dayanım kaybı gerçekleşmediğini göstermektedir (Clarke, J., Sheard, P.; Sen, R., vd.).

Korozyona karşı dirençli olması ve içerisindeki reçinenin korunması durumunda yapının maruz kalabileceği yüklere uzun süre yüksek dayanım sağlaması nedeniyle donatı olarak çelik yerine CFRP'nin kullanıldığı yapıların sayısı artmaktadır. Piyasa koşullarında uygulanmış örneklerin fazlaşması, bu alandaki çalışmaların sıklığını da artırmaktadır. Bu bağlamda yapı genelinde donatı olarak çelik yerine CFRP kullanılması durumunda malzeme ve ürün gereksiniminde ne gibi değişikliklerin gerçekleştiği çeşitli çalışmalarda işlenmektedir. Daha önce Şekil 2.12'de gösterilen ve üzerinden araçların geçeceği 38 metre uzunluğunda bir köprü projesi özelinde yürütülen çalışmada donatı olarak çeliğin ve CFRP'nin kullanıldığı iki alternatif senaryo incelenmiş ve çeşitli veriler elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında yapı ürünü ihtiyaçları analiz edilmiş ve Tablo 2.8'de gösterilen veriler elde edilmiştir.

**Tablo 2.8** 38m Uzunluğunda Tek Şeritli Üst Geçit Projesinde Alternatif Senaryolarda Kullanılan Malzeme ve Yapı Ürünü Miktarı (Khorgade, P., vd.).

| Malzeme / Ürün        | Birim          | Çelik Donatı Kullanımı | CFRP Donatı Kullanımı |
|-----------------------|----------------|------------------------|-----------------------|
| Prekast Beton         | M <sup>3</sup> | 102.00                 | 57.00                 |
| Yerinde Dökülen Beton | M <sup>3</sup> | 56.10                  | 39.00                 |
| Pasif Çelik Donatı    | Ton            | 56.28                  | 2.10                  |
| Çelik Tendon          | Ton            | 10.40                  | -                     |
| Pasif CFRP Donatı     | Ton            | -                      | 1.52                  |
| CFRP Tendon           | Ton            | -                      | 0.83                  |

Örnek olarak kullanılan bu çalışmadan elde edilen veriler yapının CFRP donatılarla inşa edilmesi durumunda toplam ağırlığın önemli oranda azaltılabildiğini göstermektedir. Betonun yoğunluğu  $2.400\text{kg/m}^3$  olduğu için Tablo 2.8’de CFRP kullanımıyla sağlandığı görülen toplam  $62,10\text{ m}^3$  beton tasarrufu yapı genelinde 149 ton daha az beton kullanıldığını ifade etmektedir. Bu veri söz konusu yapıdaki beton kullanımında yaklaşık 40% oranında bir düşüş sağlandığını göstermektedir.

CFRP’nin donatı olarak seçilmesi ve çelik kullanımının yalnızca korozyon riskinin bulunmadığı alanlarla sınırlı tutulmasıyla toplam donatı ağırlığının 62,20 ton azaltıldığı görülmektedir. Örnek çalışmada sağlanan bu düşüş ise yapı genelindeki donatı ağırlığının 93% oranda azaltıldığı anlamına gelmektedir.

Söz konusu örnekte donatı olarak CFRP kullanılmasıyla ve yapı taşıyıcı sisteminin uygun biçimde tasarlanmasıyla edinilen bu kazanımlar yapının toplamda 45% oranda hafifletilebilmesini, yapı kütlesinin 466 ton ağırlıktan 235 ton ağırlığa düşürülmesini sağlamaktadır.

Taşıyıcı elemanlarda CFRP gibi ürünlerin kullanılmasıyla yapı üretim süreçlerinde sağlanan bu gibi tasarruflar yapı endüstrisinin doğal çevreye verdiği zararın azaltılması bağlamında da olumlu gelişmeler olarak değerlendirilmektedir. Yapıların daha hafif ve çevresel koşullara daha dayanıklı biçimde üretilibilmeleri yapı kullanım ömürlerini artırma ve uzun vadede yeni yapı üretim gereksinimini azaltma olanağı sağlamaktadır.

Üretim uygulamalarının yanı sıra bakım operasyonları da yapı yaşam döngüsü içerisinde hem ekonomik maliyet hem de çevre etkisi bağlamında masraflı süreçlerdir. Günümüzde özellikle Avrupa’da yapı sağlığı inceleme ve onarım süreçlerine yönelik harcamaların sürekli olarak arttığı gözlemlenmektedir (Goltermann, P.). Yapılan harcamaların ve onarım süreçlerinde oluşan doğal çevre etkisinin azaltılması adına yapı üretim süreçlerinin başlangıcında, yapı onarımını kolaylaştırıcı adımların atılması önemli bir çalışma alanı olarak değerlendirilmektedir.

CFRP’nin piezorezistif niteliği yardımıyla oluşturulan akıllı sensör sistemlerinin yapı üretim süreçlerinde taşıyıcı elemanlar içerisine entegre edilmesiyle birlikte yapı sağlığı sürekli ve hassas bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Böylece yapılacak

onarımının ve bakım çalışmalarının da daha etkili yönetilmesi sağlanmakta, ekonomik ve çevresel maliyetler düşürülebilmektedir.

CFRP'nin birçok farklı sektörde kullanılması da bu ürünle ilgili optimizasyonların artması ve gelişmelerin hızlanması bağlamında önemli bir durumdur. Yapı üretiminin farklı disiplinlerle sıkı ilişki içerisinde ilerleyen karmaşık bir süreç olması, diğer sektörlerdeki gelişmelerin yapı sektörüne hızlı şekilde entegre edilebilmesini sağlamaktadır. Çeşitli sektörlerde geliştirilen teknolojilerin kullanımı; yapı üretim, kullanım ve geri dönüşüm süreçlerinde giderek yaygınlaşmaktadır.

Disiplinler arasında belirtilen teknik bilgi paylaşımının yanında hammadde ve malzeme alışverişinin de artırılması, günümüzde karbon temelli çeşitli malzeme ve ürünlerin yaşam döngülerinin bitmesi ile oluşan atık miktarının kontrol altına alınmasını kolaylaştırma potansiyeli barındırmaktadır. Bu nedenle nüfusla birlikte artan çevre etkisinin azaltılması amacıyla özellikle geri dönüşüm süreçlerinin incelenmesi önemli görülmektedir. Karbon temelli malzemelerin ve CFRP'lerin üretiminde "geri dönüştürülmüş aktif karbonların" kullanıldığı, bu alandaki malzeme ve bilgi kaynaklarının gelişmeye başladığı gözlemlenmektedir. 2021 yılında bu alanda yapılan çalışmalar, çevresel iyileştirme çalışmalarında bu gibi stratejilerin uygulanmasının, atık yönetimi bağlamında umut verici sonuçlarının olabileceğini göstermektedir. (Jha, M.K.).

Yapı kullanım ömrünün uzatılması yoluyla doğal çevreye verilen zararın azaltılmasına katkı sağlayabilecek olan CFRP'nin kendi yaşam döngüsü süreçlerinin de detaylı biçimde incelenmesi, söz konusu katkılarının günümüzde hangi düzeyde olduğunun detaylı biçimde ortaya konması gerekmektedir. Bu süreçlerin günümüzde nasıl işlediği, çevre etkisi bağlamında CFRP özelinde nasıl verilerin elde edildiği ve CFRP yaşam döngüsünün hangi süreçlerinde geliştirmelerin yapılması gerektiği de belirtilen hedeflere ulaşma kapsamında oldukça önemli bulunmaktadır. Sözü edilen alanların verilere dayanarak incelenebilmesi için ise öncelikle bu kapsamda en yaygın metodolojiyi ifade eden YDD kavramının incelenmesi, daha sonra CFRP'nin yaşam döngüsü süreçlerinin bu metodoloji çevresinde ayrıca analiz edilmesi gerekmektedir.

### 3

## YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

---

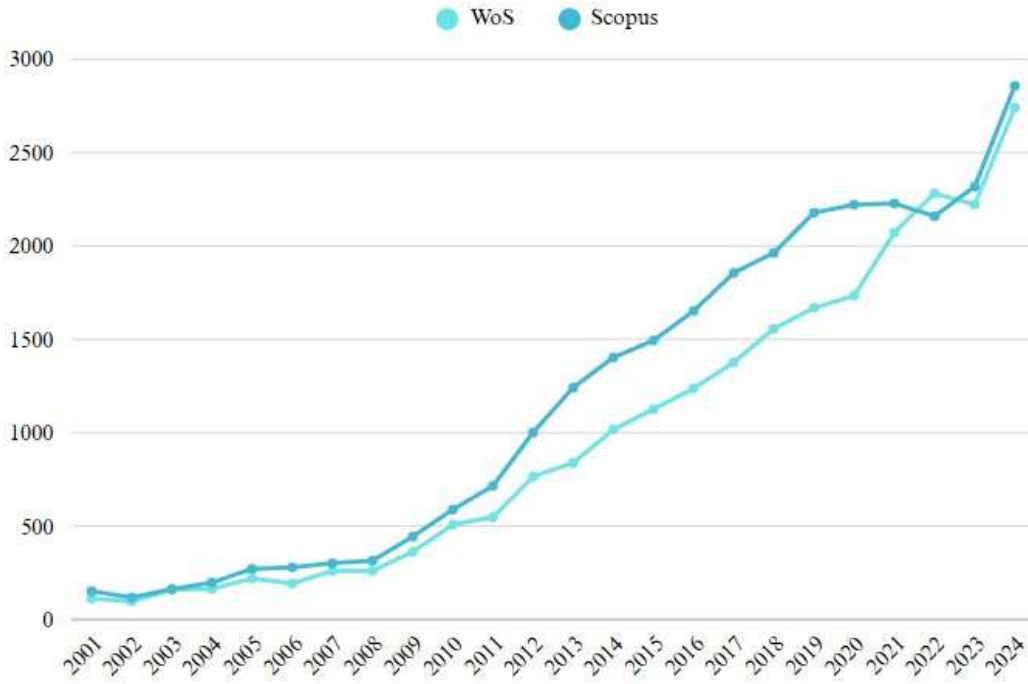
CFRP'ler gibi birçok ürün ve malzemenin bir araya gelmesiyle oluşan yapının, kendi içinde bulunan ya da etrafını saran doğal çevreyle yaşam döngüsü boyunca etkileşimde olduğu bilinmektedir. Bu etkileşim sonucunda doğal çevrenin çeşitli açılardan bozulduğu, iklim değişikliğinin hızlandığı ve yapıların kullanıcıları olan insanların sağlığını olumsuz etkileyen süreçlerin olduğu görülmektedir. Bu süreçlerin tanımlanması, ürün ve sistemlerin çevre etkisi bağlamında analitik olarak karşılaştırılabilmesi adına ortak kriterlerin oluşturulması önemli bulunmaktadır. Bu çalışmada CFRP'lerin ve CFRP kullanılan yapıların doğal çevreyle ilişkisinin incelenmesinde bir araç olarak ele alınan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD), sözü edilen süreçlerin evrensel parametreler çerçevesinde ifade edilmesine ve farklı disiplinlerin ortak bir çözüm için birlikte çalışabilmesine yardımcı olmaktadır. YDD çalışmalarında malzemelerin, ürünlerin ve sistemlerin yaşam döngüsü süreçleri belirli kriterler çerçevesinde incelenmekte, araştırmacılar tarafından ele alınan malzeme ya da ürünün yaşam döngüsünün bir bölümünü ya da tamamını değerlendirilebilmektedir.

YDD, ISO 14044'te bir ürün veya sistemin yaşam döngüsü boyunca girdi ve çıktılarının, potansiyel çevre etkisinin derlenmesi ve değerlendirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu süreç hammadde ediniminden ya da doğal kaynakların dönüştürülmesinden son imha sürecine kadar birbirini izleyen ve takip eden aşamalardan oluşmaktadır (ISO 14044:2006+A2:2020). Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği ise YDD'yi bir ürün, süreç ya da aktivitenin enerji ve materyal kullanımı, ortama bırakılan atık gibi yükler üzerinden incelendiği; çevreyi iyileştirebilecek uygulama olanaklarının değerlendirildiği nesnel bir süreç olarak tanımlamaktadır (Consoli, F.).

YDD'nin ortaya çıkışı ve metodolojisinin standart hale getirilmesi görece yeni gelişmeler olsa da bu kavramın içeriğinin köklerinin 1960'ların sonu ve 1970'lerin başına kadar uzandığı görülmektedir. Özellikle 1969 yılında Midwest Araştırma Enstitüsü (MRI) bünyesindeki araştırmacılar tarafından Coca Cola firması için yürütülen bir çalışma, YDD'nin güncel metotlarının temeli olarak görülmektedir. Bu çalışma sonrasında, ürünlerin yaşam döngülerindeki kaynak kullanımı ve çevre etkilerinin sayısallaştırılması süreçlerinin “Kaynak ve Çevresel Profil Analizi (REPA – Resource and Enironmental Profile Analysis)” adıyla anılmaya başlandığı belirtilmektedir (Curran, M.A.). Endüstriyel süreçlerin çevreye verdiği zararlar ilgili endişelerin artmasıyla birlikte yine 1969 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde hazırlanan Ulusal Çevre Politikası Yasası (NEPA – National Environmental Policy Act) bu alandaki metodolojik çalışmaların artırılmasında etkili olmuştur (Moutik, B., vd.). Zaman içinde ürünlerin çevresel etkilerinin halka açıklanmasıyla ilgili kamusal talebin artmasının ve özellikle 1973'te yaşanan petrol krizinin de etkisiyle 1970 ve 1975 yılları arasında yaklaşık 15 REPA çalışmasının yapıldığı raporlanmaktadır (Curran, M.A.).

1970 ve 1980'lerde de yapılan çalışmalarla birlikte alanla ilgili bilgi birikiminin arttığı ve ürünlerin yaşam süreçleri ve çevre etkisi ile ilgili toplumsal bilincin geliştiği gözlemlenmektedir. Ancak yaşam döngüsü ile ilgili yapılan çalışmaların çok niş alanlarla sınırlı kalması ve ürünlerin yaşam döngülerinin bütünsel bir yaklaşımla değerlendirilemiyor olması nedeniyle ilerleyen dönemlerde farklı yöntemlerin ve yaklaşımların geliştirildiği görülmektedir. 1990'ların başında Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği (SETAC – Society of Environmental Toxicology and Chemistry) tarafından düzenlenen çalıştay serileri bu arayışlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Bu çalıştaylar sonucunda uzmanlar arasında sağlanan bilgi alışverişi ve elde edilen birikim sonucunda 1993'te YDD kavramının ana çerçevesi oluşturulmuştur (Young, S.B.). Bu yıllarda geliştirilen yöntemler, oluşturulan kavramlar ve düzenlenen çalışmalar, ISO standartları olan 14040, 14041, 14042 ve 14043'ün geliştirilmesi için de temel oluşturmuştur. Sistemli bir metodoloji üzerinden yürütülen çalışmaların devamı sonucunda ise 2006 yılında ISO 14040 güncellenmiş, diğer üç standart ise ISO 14044 altında birleştirilerek yenilenmiştir. Geliştirilen bu standartlar ile YDD'nin ilkeleri ve metodolojisi belirlenmiştir.

Farklı endüstrilerdeki süreçlerin bu metotlarla incelenmesi ve belirlenen ilkeler çerçevesinde uygulama yöntemlerinin geliştirmesi ile alandaki bilgi birikiminin arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 3.1’de YDD üzerine yapılan çalışma sayısının 2001’den 2024 yılına kadar olan değişimi gösterilmektedir. Bu süreçte YDD metotlarının geliştirilmesi ve farklı sektörlerdeki yaşam döngülerinin incelenmesiyle ilgili çalışma sayılarının önemli düzeyde arttığı görülmektedir.

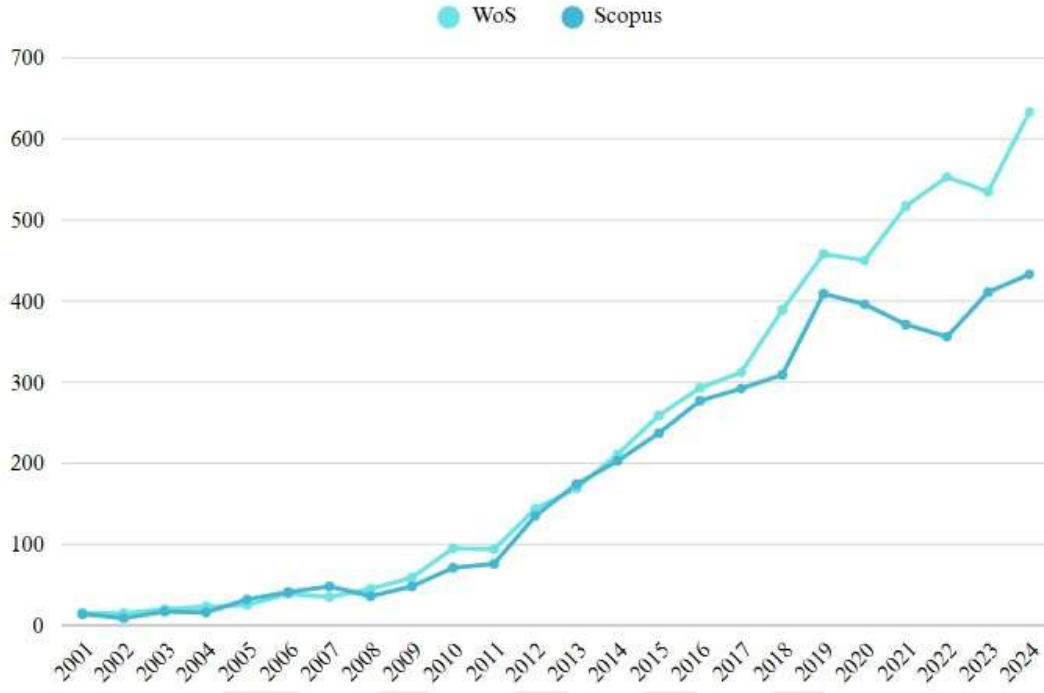


**Şekil 3.1** Web of Science (WoS) ve Scopus veri tabanlarından elde edilen bilgilere göre 2001-2024 arasında YDD ile ilgili yayınların sayısının yıllara göre değişimi.

YDD çalışmalarının artması yapıların yaşam döngülerinin de daha sistemli biçimde incelenmesine katkı sağlamaktadır. Pek çok disiplinle kesişen çalışma alanları bulunan yapı sektörü, bu alanlardaki gelişmelerle ilişkili olarak dönüşmektedir. Yeni ürünlerin geliştirilmesi ya da mevcut yapı ürünlerinin yaşam döngülerinin çevre etkisi bağlamında iyileştirilmesi amacıyla yürütülen çalışmalar da bu çerçevede giderek sıklaşmakta ve yapı sektörü özelinde YDD verileri derinleşmektedir. Şekil 3.2’de yer alan grafik, yapı yaşam döngüleri ile ilişkili bilimsel araştırma sayılarının yıllara göre değişimini göstermektedir. Şekil 3.1’dekine benzer bir artış bu grafikte de görülmektedir.

Günümüze yaklaştıkça YDD literatüründe yapılarla ilişkili çalışmaların oranı da artmaktadır. 2001 yılında yaklaşık toplam çalışmaların 10%’u yapı endüstrisiyle

bağılantılıyken bu oranın zamanla istikrarlı biçimde arttığı ve 2010 yılında 20% seviyesine ulaştığı görülmektedir.



**Şekil 3.2** Web of Science (WoS) ve Scopus veri tabanlarından elde edilen bilgilere göre 2001-2024 arasında yapıların YDD bağlamında incelendiği yayınların sayısının yıllara göre değişimi.

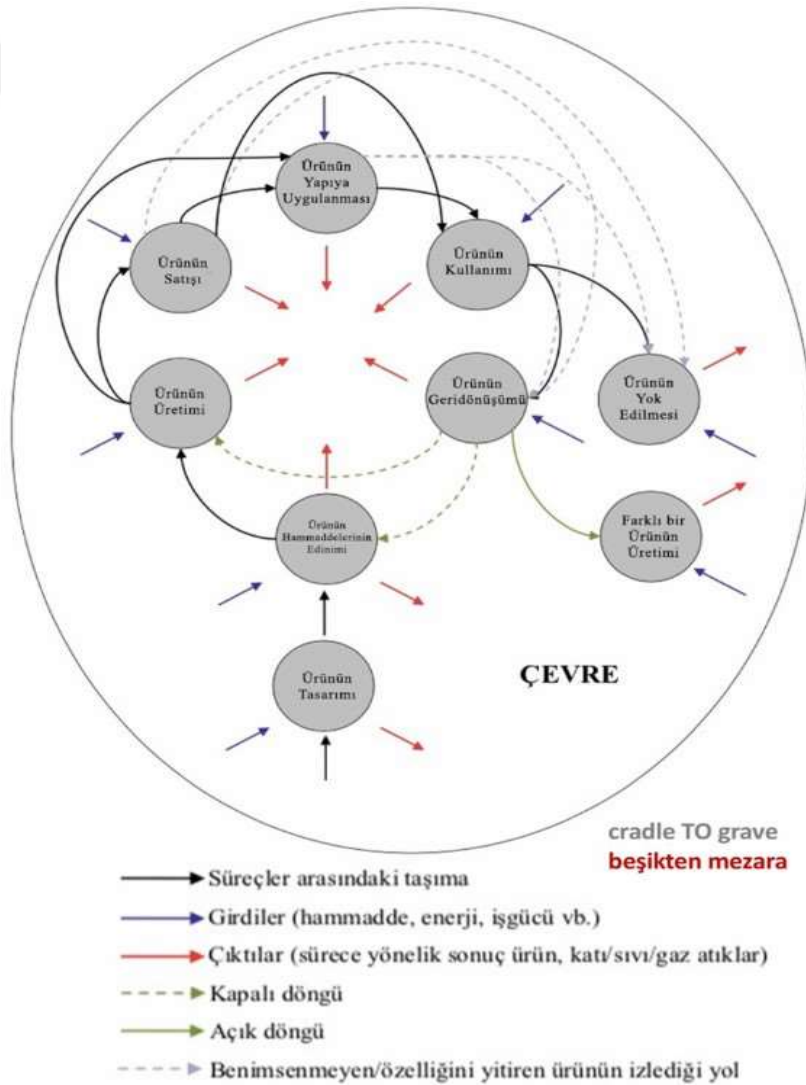
Gösterilen zaman aralığında ürün ve süreçlerin karmaşıklaşması, farklı disiplinlerin birbirleriyle sıkı iletişim içerisinde hareket etmesi gerekliliğini artırmıştır. Sosyal bilimler, ekonomi, çevre bilim, kimya, tıp, mühendislik, mimarlık vb. disiplinler arasındaki etkileşim bu ve başka çeşitli nedenlerden dolayı derinleşmiştir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'deki grafikler de bu birlikte çalışma pratiğinin gelişmesiyle yeni ihtiyaçların oluştuğu ve bu çerçevedeki bilgi birikiminin arttığı varsayımını desteklemektedir. YDD bağlamında üretilen bilgilerin kapsam ve çeşitliliğinin artmasıyla yaşam döngüsü süreçlerinde daha spesifik alanlar ve yeni kavramlar oluşmaktadır.

### 3.1 Yaşam Döngüsü Süreçleri

YDD'nin yürütülmesinde ele alınan problemin tanımlanmış parçalar halinde incelenmesi, sorunlarla ilgili daha yerinde tespitlerin yapılabilmesini ve etkisi çözümler üretilmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla hammadde edinimi, üretim, uygulama, kullanım, bertaraf ve geri dönüşüm gibi alt süreçler tek tek

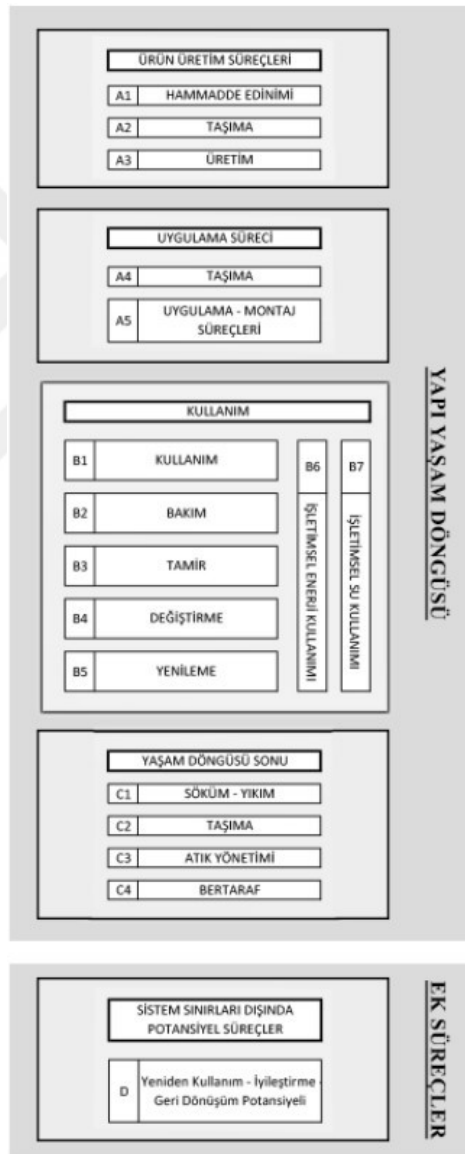
incelenmektedir. Değerlendirilen süreçlerin her birinin yürütülmesinde enerji, hammadde vb. girdiler kullanılmakta; katı, sıvı ve gaz atıklar gibi çıktılar oluşmaktadır. Yaşam döngüsü içerisinde incelenen her sürecin sonunda belirli taşıma işlemleri yapılmakta, bu işlemler de çevre etkisini artırmaktadır.

Şekil 3.3'te şematik olarak gösterilen bu süreçler geri dönüşüm yöntemlerinin kullanılmasıyla döngüsel duruma getirilebilmekte, ya da söz konusu ürünün yok edilmesiyle sonlandırılabilir. Döngüsel olarak tasarlanan yaşam döngülerinde geri dönüşüm sonrasında elde edilen malzemelerin aynı ürünün üretiminde kullanılmasıyla “kapalı döngü”, farklı üretimlerde kullanılmasıyla da “açık döngü” sistemleri oluşturulmaktadır.



**Şekil 3.3** Yapı ürününün yaşam döngüsü süreçleri ve birbirleri ile ilişkileri (Tuna Taygun, G.).

Akış şeması gösterilen bu süreçlerin çevre etkisi bağlamında değerlendirildiği çalışmalarda belirli standart sınıflamaların yapıldığı görülmektedir. Bu sınıflamaların belirlenmesinde en yaygın kullanılan kaynaklardan olan EN standartları (European Norms), yapı yaşam döngüsünü beş ana grup altındaki 15 ayrı başlık altında değerlendirmektedir. Yaşam döngüsü süreçlerinin detaylı olarak tanımlanması, YDD çalışmasına konu olan malzeme, ürün ya da sistemin hangi alanda geliştirilmesi gerektiğinin tespitine yardımcı olmaktadır. Şekil 3.4'te ifade edilen bu başlıklar üretim, uygulama, kullanım, yaşam döngüsü sonu süreçleri ve sistem sınırları dışındaki potansiyel süreçler olarak isimlendirilmektedir.



**Şekil 3.4** EN 15978 standartlarına göre yapı yaşam döngüsü süreçlerinin gruplandırılması (CEN 2011)

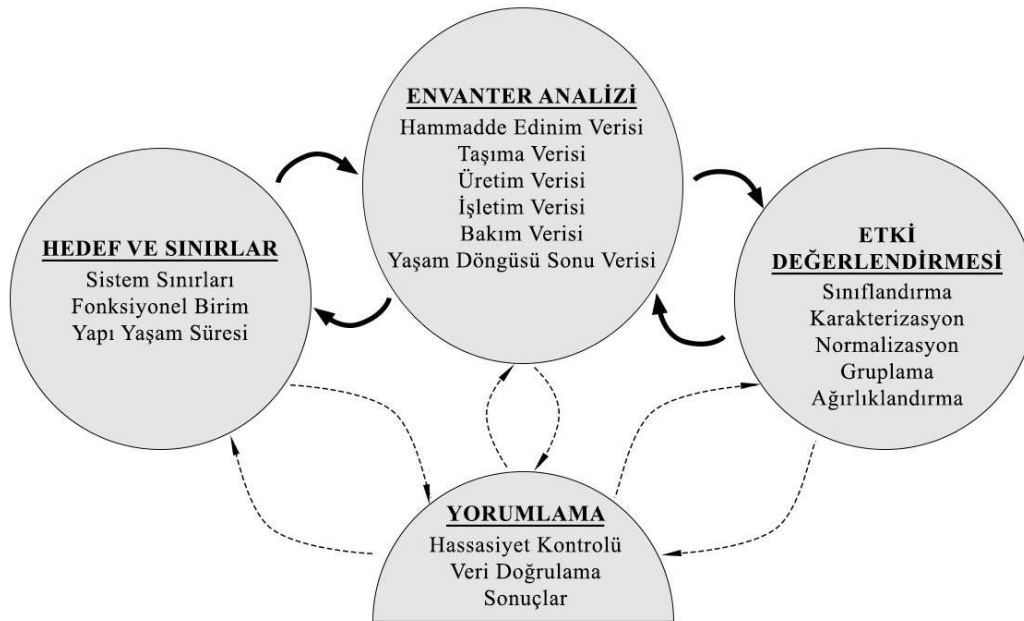
Şekil 3.4’te görüldüğü gibi yapının üretiminin başlaması için çeşitli hammaddeler gerekmektedir. Birçok durumda doğada bulundukları formda ve ölçülerde yapıda kullanılamayan bu hammaddeler, istenen nitelikleri sağlaması için farklı tekniklerle işlenmektedir. Kullanılacak malzemenin doğada bulunduğu yerden çıkarılması ve çeşitli tesislerde işlenmesi süreçleri hammadde edinimi başlığı altında incelenmektedir. Bu hammaddelerin ve malzemelerin birleştirilmesi, yapıda kullanıma hazır ürünler haline getirilmeleri ise üretim süreçleri olarak adlandırılmaktadır. Yapılan üretim boyunca farklı tesisler arasındaki taşıma süreçleri de toplam çevre etkisi kapsamında değerlendirmeye dahil edilmektedir. Yapıda kullanılacak ürünlerin şantiye alanına taşınmasıyla başlayan uygulama süreci ise yapı alanındaki montajları ve uygulamaları kapsamaktadır. Uygulama sürecinin tamamlanmasıyla yapı yaşam döngüsünün ana aşamalarının ilki tamamlanmaktadır.

Yapının kullanım, bakım, tamir, değiştirme ve yenileme süreçleri yapı yaşam döngüsünün en uzun süren bölümü olup, bu süreçlerin hepsinin farklı çevresel etkiler üretme potansiyeline sahip olduğu bilinmektedir. Yapının yararlı kullanımının devam ettirilebilmesi için gerekli olan işletimsel enerji ve su kullanımları da kullanım süreçleri içerisinde ayrı başlıklar altında incelenmektedir.

Günümüzde yapılar yaklaşık kullanım sürelerine göre üretilmekte ve dayanımları zaman içinde düşmektedir. Bununla birlikte farklı çevresel, sosyal, politik ya da ekonomik nedenlerle de yapı kullanımının sonlandırılabilceği bilinmektedir. Kullanım ömrü tamamlanan yapılar, üretim tekniklerine göre söküm ya da yıkım işlemleriyle ortadan kaldırılmakta, yapıyı oluşturan ürünler ve malzemeler bertaraf edilmekte ya da ayrıştırılarak geri dönüştürülmektedir. Bu süreçlerde atıklar oluşmakta ve çevre yine çeşitli biçimlerde kirletilmektedir. Literatürdeki YDD çalışmalarında yaygın olarak kullanılan EN-15978 standartlarına göre bu süreçler kendi aralarında C1, C2, C3 ve C4 olmak üzere dört başlık altında değerlendirilmektedir. Bu standart sınıflandırma sisteminde atık oluşumu ve bertaraf süreçleriyle yapı yaşam döngüsünün bittiği ifade edilmekte, yeniden kullanım ve geri dönüşüm süreçlerinin yaşam döngüsü sistemi dışında ayrı bir süreç olarak değerlendirildiği görülmektedir. Yaşam döngüsü sürecinin yeniden başlaması ve kapalı ya da açık bir döngünün oluşması ise “D” harfiyle temsil edilen başlıktaki çalışmalarla sağlanmaktadır.

### 3.2 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Metodolojisi

Kapsamı belirtilen YDD çalışmalarının yürütülmesiyle ilgili günümüzde kullanılan temel yöntemler bulunmaktadır. Her çalışmada özel değerlendirme koşulları bulunmakla birlikte literatürdeki çalışmalarda belirli standartların ortak olarak kabul edildiği gözlemlenmektedir. ISO tarafından belirlenen bu standartlara göre YDD, sırasıyla hedef ve sınır belirleme, yaşam döngüsü envanter analizi, etki değerlendirmesi ve sonuçların yorumlanması olarak adlandırılan dört aşamada yapılabilmektedir (ISO 14040: 2006; ISO 14044: 2006). Bu aşamaların her birinde elde edilen veriler kontrol edilmekte, doğrulanmakta ve yorumlanmaktadır. Verilerin ve kriterlerin uyumluluğunun kontrol edilmesiyle her adım için geri bildirim mekanizmaları oluşturulmakta ve sürecin sağlıklı biçimde işletilmesi sağlanmaktadır. Sözü edilen metot ve kavramların birbirleriyle ilişkisi Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



**Şekil 3.5** Yaşam döngüsü değerlendirme çalışmalarının yürütülmesinde gerçekleştirilen işlemlerin ve ele alınan kavramların birbiriyle ilişkisi (Rashid A., Yussof, S.; ISO 14040)

#### 3.2.1 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin Hedef ve Sınırlarının Belirlenmesi

Yürütülecek çalışmanın hedef ve sınırlarının belirlenmesi YDD pratiğinin ilk aşaması olarak konumlandırılmaktadır. Elde edilmek istenen bilginin niteliklerinin ve çalışma sonucunda ulaşılmak istenen kurum, şirket ya da kişilerin kimler olduğu

gibi kararlar, YDD hedeflerinin belirlenmesi kapsamında alınmaktadır. Bu hedef, benzer alanda kullanılan iki ya da daha fazla ürünün karşılaştırılması; bir tasarımın ya da ürünün geliştirilme potansiyellerinin tanımlanması ya da çeşitli sertifikalar için gerekli verilerin elde edilmesi olabilmektedir.

YDD kapsamının belirlenmesi ise değerlendirme süreci için ayrılacak zamanın ve bütçenin belirlenmesini sağlamaktadır. Burada öncelikle sistem sınırlarının belirlenmesi önemli bulunmaktadır. Birçok durumda ele alınan malzeme ya da ürünün bütün yaşam döngüsünün araştırılması verilerin karmaşıklaşmasına ve çalışma amacından uzaklaşmasına neden olmaktadır. Belirlenen amaç çerçevesinde yaşam döngüsünün hammadde edinimi, üretim, taşıma, atık yönetimi vb. süreçleri ayrı ayrı incelenebilmektedir. Araştırma sonucunu etkilemeyecek kadar düşük çevre etkisine sahip olan süreçler için harcanan zamanın bu şekilde azaltılmasıyla daha kısa sürede etkili değerlendirmeler yapılabilmektedir. Ele alınan yaşam döngüsü aşamalarına yönelik verilerle ilgili de sınırlamalar getirilebilir. Verilerin hangi kaynaklardan toplanacağını dikkatlice belirlenmesi YDD çalışmasının güvenilirliği ve şeffaflığı açısından kritiktir. Çalışmanın sonraki aşamasında elde edilecek verilerin doğru sınıflandırılabilmesi ve etkili biçimde karşılaştırılabilmesi için referans alınacak fonksiyonel birimin doğru seçilmesi gerekmektedir. Fonksiyonel birim, değerlendirilecek nesnelerin ağırlık, boyut, vb. çeşitli nitelikleri arasından seçilmekte ve o niteliğin sağlanması için gerekli miktardaki ürünün yaşam döngüsü incelenmektedir.

YDD'nin yürütülmesiyle ilgili kurulan bu sistemin verimliliğinin ve hedefe uygunluğunun kontrol edilmesi adına araştırmayı yapan kişiler dışındaki çeşitli uzmanların da görüşlerinin alınması önerilmektedir. Araştırma bir kurum tarafından yapılıyor ise kontrol için davet edilen uzmanlar kurum içinden ya da dışından seçilebilmektedir.

### **3.2.2 Envanter Analizi**

YDD'nin ana hatlarının belirlenmesi sonrasında süreçlerin araştırılması ve anlamlı bilgiler oluşturulması adına "envanter analizi" yapılmaktadır. Bu analiz içerisinde veri toplama, sistem sınırlarının pekiştirilmesi, verilerin doğrulanması, hesaplamaların yapılması, ele alınan yaşam döngüsü süreçlerinin veriyle

ilişkilendirilmesi ve çevresel etkilerin süreçler arasındaki dağılımının tespit edilmesi gibi çalışmalar bulunmaktadır (Jensen, A.A., vd.).

Envanter analizinde öncelikle çalışmalarda kullanılacak dijital envanterin oluşturulması gerekmektedir. Bu envanteri oluşturmak için bilgisayar modelinin yapısı belirlenmeli ve veri toplamaya başlanmalıdır. Üzerinde çalışılacak veriler, elektronik veri tabanlarından (devlet kurumlarına ya da endüstri paydaşlarına ait), devlet raporlarından, açık kaynak makale ya da kitaplar gibi literatür kaynaklarından, üretim tesisine özel hazırlanmış kamuya açık olan ya da olmayan endüstriyel kayıtlardan ve laboratuvar testleri gibi çeşitli özgün kaynaklardan toplanabilmektedir. Bu veriler, ele alınan yaşam döngüsü fazına göre malzeme edinimi, taşıma, üretim, kullanım, bakım, yaşam döngüsü sonu süreçlerinin her biriyle ilişkili olabilmektedir.

Verilerin tablolarla ifade edilebilmesi ve karşılaştırma yapılabilmesi adına verilerdeki değerler daha önce belirlenen fonksiyonel birim üzerinden ölçeklendirilmektedir. Değerlerin hangi koşullar göz önünde bulundurularak oluşturulduğu şeffaf biçimde ifade edilmeli, süreçler farklı araştırmacılar tarafından da tekrarlanabilecek ve kontrol edilebilecek şekilde yürütülmelidir. Envanter analizi boyunca kontrol işlemlerinin sürekli olarak tekrarlanması, çalışmanın sağlıklı ilerlemesi adına oldukça önemli bulunmaktadır.

Veri havuzunun genişlemesiyle YDD sınırlarının detaylandırıldığı (sistem sınırları, coğrafi sınırlar, veri nitelik kriterleri, vb.) ve çalışmanın olgunlaştığı görülmektedir. İncelenen yaşam döngüsü süreçleri ve elde edilen çevresel etki değerlerinin birbirleriyle ilişkilerinin doğru kurulması gerekmektedir. Veri kaynaklarındaki değerlerin toplam yaşam döngüsü için hazırlanmış olması ya da belirli bir yaşam döngüsü sürecinin (üretim, kullanım, geri dönüşüm, vb.) tamamı için oluşturulmuş olması sık karşılaşılan bir durum olarak görülmektedir. Bu nedenle çevresel etkinin hangi süreçlerde ne miktarda oluştuğunun belirlenmesi bazı durumlarda zorlayıcı olabilmektedir. Bu aşamada YDD konusundaki uzmanların hesaplamalarıyla çevre etkisi değerleri, üzerinde çalışılan yaşam döngüsü süreçleri arasında paylaştırılmaktadır. Çevre etkilerinin nedenleri detaylandırılmakta, karşılaştırma zemininin oluşturulmasıyla envanter analizi sonlandırılmaktadır.

### 3.2.3 Çevresel Etki Değerlendirmesi

Yaşam döngüsü üzerine yapılan çalışmanın başlangıcında belirlenen ilkeler ve sınırlar çerçevesinde düzenlenen veri envanterinin çeşitli çevresel etki kategorileri altında değerlendirildiği ve ele alınan yaşam döngüsü süreçleri ile ilgili çıkarımların yapıldığı adım “çevresel etki değerlendirme” olarak adlandırılmaktadır. Çevresel etki değerlendirme, çevresel etki kategorilerinin tanımlanması, sınıflandırma, karakterizasyon ve ağırlıklandırma gibi süreçler çerçevesinde yapılmaktadır.

Değerlendirmelerin yapılabilmesi için biyotik ya da abiyotik kaynak kullanım, sera gazı salınım, karbon ve su ayak izi, toksisite, ötrofikasyon, asidifikasyon vb. çevresel etki kategorileri arasından çalışma için uygun olanlar seçilmektedir. Değerlendirmenin etkili biçimde yapılabilmesi adına ele alınan yaşam döngüsü süreçleri ve çevresel etki kategorileri arasındaki ilişkinin iyi kurgulanması gerekmektedir. Çalışmada kullanılacak olan kategorilerin belirlenmesinde birkaç temel ilkenin takip edildiği görülmektedir. İncelenen her yaşam döngüsü sürecini kapsayıcı biçimde ifade edebilecek kategorilerin seçilmesi, çalışma kapsamındaki çevre etkisi sonuçlarını etkilemeyecek kadar düşük sonuçlar veren kategorilerin değerlendirmeye alınmaması, birbirine çok benzeyen etki alanlarını ifade eden kategorilerden uzak durulması bu seçimler yapılırken dikkate alınması gereken konular olarak sıralanmaktadır (Jensen, A.A. vd.). Kategori seçiminin nesnel temellere dayandırılmakla birlikte öznel kararlar sonucu yapılması, önemli çevresel sorunların gizlenme olasılığını da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle kategori seçimleri şeffaf olarak yapılmalı ve seçim nedenleri çalışma içerisinde açıklanmalıdır.

#### 3.2.3.1 Sınıflandırma

Sınıflandırma, etki değerlendirme kapsamında seçilen kategoriler ve envanter analizindeki verilerin birbiriyle ilişkilendirildiği süreçleri tanımlamaktadır. Doğal ve yapma çevre arasında sürekli olarak gerçekleşen madde ve enerji geçişlerinin doğru kategoriler altında sınıflandırılması, derlenen verilerin anlamlandırılabilmesini sağladığı için YDD’nin önemli süreçlerinden biri olarak görülmektedir.

Etki mekanizmasının sağlıklı biçimde oluşturulabilmesi adına yaşam döngüsündeki girdi ve çıktılar öncelikle detaylı kategoriler altında gruplandırılmaktadır. Etki

değerlendirmesinin başlangıcında seçilen bu kategoriler, süreçlerin toplam çevre etkisinin öngörülmesi için referans oluşturmaktadırlar. Ara değerlendirmelerin yapılmasını sağlayan referansların farklı bilimsel çalışmalar sonucunda çeşitlendirildiği görülmekte, ancak günümüzde sıklıkla “küresel ısınma potansiyeli”, “stratosferik ozon delinmesi”, “asidifikasyon”, “ötrofikasyon”, “fotokimyasal ozon delinmesi”, “ekotoksisite”, “insan toksisitesi”, “partiküllü madde oluşumu”, “iyonize radyasyon oluşumu”, “arazi kullanımı”, “su tüketimi”, “abiyotik kaynak kullanımı”, “biyotik kaynak kullanımı” vb. kategoriler kullanılmaktadır (EC-JRC). Ele alınan yaşam döngüsü süreçlerinde tespit edilen salınımların, tüketimlerin ve çevre etkilerinin hangi birim üzerinden değerlendirileceği ve bu birimlerin hangi etki kategorisine atanacağı ile ilgili YDD literatüründe bir uzlaşma bulunmaktadır. Veri tabanlarının ortak kullanılabilmesi ve karşılaştırmaların etkili biçimde yapılabilmesi için bu durum önemli bulunmaktadır. Belirtilen çevre etkisi kategorileri ve ilişkili oldukları ölçüm birimleri Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

Envanter analizinde elde edilen verilerin çevre etkisi kategorileri içerisinde sınıflandırılması süreçlerinde çift sayım durumunun oluşması engellenmelidir. Birbirini dolaylı olarak etkileyen neden-sonuç zincirlerinin sıklıkla oluştuğu yaşam döngüsü süreçlerinde doğru verilerin doğru kategori içerisinde tanımlanması karmaşık bir hal alabilmektedir. Konu ile ilgili uzmanlık gerektiren bu durum detaylı etki hesaplamalarıyla yönetilebilmektedir. Günümüzde bu işlemlerin etkili şekilde yürütülebilmesi için bilgisayar yazılımlarının kullanıldığı görülmektedir.

**Tablo 3.1** SimaPro ve ReCiPe’ye göre çevresel etki analizinde kullanılan çevre etkisi kategorileri ve ilgili oldukları ölçüm birimleri

| Çevre Etkisi                  | Kısaltma    | Ölçüm Birimi         |
|-------------------------------|-------------|----------------------|
| Küresel Isınma Potansiyeli    | GWP         | Kg CO <sub>2</sub>   |
| Stratosferik Ozon Tükenimi    | ODP         | Kg CFC-11            |
| İnsan Toksisitesi Potansiyeli | HTP         | Kg 1,4 DCB           |
| Partikül Madde Oluşumu        | PMFP        | Kg PM <sub>2,5</sub> |
| İyonize Edici Radyasyon       | IRP         | KBq Co-60            |
| Fotokimyasal Ozon Oluşumu     | EOFP – HOFP | Kg NO <sub>x</sub>   |
| Asidifikasyon Potansiyeli     | AP          | Kg SO <sub>2</sub>   |
| Ötrofikasyon Potansiyeli      | EP          | Kg P / kg N          |
| Ekotoksisite Potansiyeli      | ETP         | Kg 1,4 DCB           |
| Arazi Kullanımı               | LOP         | M <sup>2</sup> x yıl |
| Su Kullanımı                  | WCP         | M <sup>3</sup>       |
| Kaynak Kullanımı              | SOP - FFP   | Kg Cu / kg oil       |

### 3.2.3.2 Karakterizasyon

Karakterizasyon, süreçlerde oluşan farklı çevre etkilerinin, seçilen etki kategorisinde ortak olarak kullanılan etki birimiyle ifade edilebilmesini sağlamak için kullanılmaktadır (Hauschild, M. Z. vd.). Sınıflandırma çalışmasıyla hangi kategoriler altında değerlendirileceği belirlenen girdi ve çıktılar YDD çalışmasının bu aşamasında henüz karşılaştırılabilir durumda değildir. Bu durum, seçilen kategorideki verilerin bu kategorinin literatürde sabit olan ifade değeri cinsinde ifade edilmemiş olmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin sera gazı salınım düzeyinin karşılaştırılmasında kullanılan “küresel ısınma potansiyeli” kategorisi, karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) salınımı üzerinden ifade edilmektedir. Buna karşın, değerlendirilen yaşam döngüsü süreçlerinde birçok farklı sera gazı salınımı gözlemlenmektedir (su buharı, nitroz oksit, metan, ozon, vb.). Ele alınan malzeme,

ürün ya da süreçlerin küresel ısınmaya olan etkilerinin GWP (küresel ısınma potansiyeli) kategorisi içerisinde karşılaştırılabilmesi için bu farklı gazların salınım miktarının CO<sub>2</sub> eşdeğerleri üzerinden ifade edilmesi gerekmektedir.

Farklı süreçlerde oluşan çeşitli çıktıların CO<sub>2</sub> üzerinden karşılaştırılabilmesi adına her gaz için belirli katsayılar kullanılmaktadır ve bu katsayıların belirlenmesinde gazın doğada çözünme süresi gibi kriterler de dikkate alınmaktadır. CO<sub>2</sub>'ye göre küresel ısınmaya daha çok etki eden ancak atmosferde daha kısa sürede kaybolan metan (CH<sub>4</sub>), 20 yıllık çevresel etki karşılaştırmalarında 81-83 GWP katsayısına sahipken, 100 yıllık karşılaştırmalardaki GWP katsayısı 27-30 olarak değerlendirilmektedir (EPA). Bu katsayılar bir kilogram metan (CH<sub>4</sub>) salınımının çevre etkisinin kaç kilogram karbon-dioksit (CO<sub>2</sub>) salınımına eşdeğer olduğunun tespit edilmesinde kullanılmaktadır.

### **3.2.3.3 Normalizasyon**

Karakterizasyon sonrasında etki kategorilerine göre ortak birim üzerinden ifade edilebilir duruma getirilen veriler araştırmacı ve okuyucular için tek başına anlamlı değildir. Bu verilerin ne ifade ettiğinin daha anlaşılır olması adına söz konusu verilerin diğer süreçlere ya da alternatif ürünlerin yaşam döngülerine ait verilerle karşılaştırılması gerekmektedir. Örneğin ele alınan bir yapı ürününün üretim sürecinde gerçekleşen GWP etkisinin yapının toplam üretim süreciyle karşılaştırılması elde edilen verinin konumlandırılmasını sağlayabilmektedir. Normalizasyon aşamasında YDD çalışmasının hedef ve kapsamına uygun olarak birçok benzer referanslar kullanılabilmektedir. Bu referanslar coğrafi, ekonomik, politik, vb. çeşitli bağlamlarda olabilmektedir. Örnek olarak AB'de ortalama bir insanın yıllık CO<sub>2</sub> salınımına katkısı referans verilerek yapılan bir açıklama ile bir çalışmada elde edilen verilerin nasıl algılanması gerektiği ifade edilebilmektedir.

### **3.2.3.4 Gruplama**

Elde edilen verilerin yorumlanması sürecinde çevre etkisi kategorilerinin birbirleriyle ilişkileri de önemli bulunmaktadır. Bu ilişkilerin kurulabilmesi için ise YDD çalışmalarında söz konusu kategoriler çeşitli üst başlıklar altında gruplanmaktadır. Yürütülen çalışmaya uygun üst başlıkların seçilmesi, çevresel etkilerin etkin biçimde derlenmesine ve verilerin çalışmaya uygun bağlamda incelenebilmesine katkı sağlamaktadır. Gruplama aşamasında bu şekilde hangi

çevre etkisinin hangi tema içerisinde değerlendirilebileceği çalışmanın yürütücüleri tarafından belirtilmektedir. İnsan sağlığı, doğal çevre, doğal kaynaklar, vb. üst başlıkların gruplama aşamasında sıklıkla kullanıldığı görülmektedir (EC-JRC). Bir çevre etkisi kategorisi gruplama çalışmasında kullanılan başlıklardan birkaçıyla birden ilişkili olabilmektedir. Özel yargıları da barındırmakla birlikte sağlıklı değerlendirmelerin yapılabilmesi adına gruplama aşaması önemli bulunmaktadır. Bu bağlamda Tablo 3.2’de çeşitli örnek çevre etkisi kategorileri ve ilişkili olabilecekleri alanlar sunulmaktadır.

**Tablo 3.2** Çevresel etki analizinde kullanılan ara değerlendirme kategorilerinin ve toplam çevre etkisinin değerlendirilmesinde kullanılan üst kategorilerin ilişkilendirilmesi

| Çevre Etkisi                  | İnsan Sağlığı | Doğal Çevre | Doğal Kaynaklar |
|-------------------------------|---------------|-------------|-----------------|
| Küresel Isınma Potansiyeli    | ●             | ●           |                 |
| Stratosferik Ozon Tükenimi    | ●             | ●           |                 |
| İnsan Toksisitesi Potansiyeli | ●             |             |                 |
| Partikül Madde Oluşumu        | ●             |             |                 |
| İyonize Edici Radyasyon       | ●             | ●           |                 |
| Fotokimyasal Ozon Oluşumu     | ●             | ●           |                 |
| Asidifikasyon Potansiyeli     |               | ●           |                 |
| Ötrofikasyon Potansiyeli      |               | ●           |                 |
| Ekotoksisite Potansiyeli      |               | ●           |                 |
| Arazi Kullanımı               |               | ●           |                 |
| Su Kullanımı                  | ●             | ●           | ●               |
| Kaynak Kullanımı              | ●             | ●           | ●               |

### 3.2.3.5 Ağırlıklandırma

Toplam bir çevre etkisi puanı çıkarılması da çalışmanın amacına göre gerekli bulunabilmektedir. Bu durumda farklı çevre etkilerinin birbirleriyle toplanabilir duruma getirilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte YDD için seçilen ve üzerinde çalışılan çevre etkisi kategorileri, ele alınan yaşam döngüsü sürecinin toplam çevre etkisi bağlamında birbirleriyle aynı ağırlığa sahip olmayabilir. Dolayısıyla elde edilmek istenen bilgiye göre çalışmanın yürütücüleri tarafından her çevresel etkiye özgü katsayılar belirlenmektedir. Belirlenen katsayılar ilgili çevre etkisi kategorileriyle çarpılmakta ve incelenen sürecin toplam çevre etkisi puanı hesaplanmaktadır. Söz konusu etkilerin önem hiyerarşisinin ve ağırlık katsayılarının belirlenmesi konusunda evrensel standartların bulunmaması nedeniyle yürütülen çalışmanın özgün koşulları belirleyici olmaktadır. YDD'nin diğer adımlarına göre daha öznel olduğu için ağırlıklandırmanın nasıl yapıldığı, çalışmalarda şeffaf biçimde açıklanmalıdır. Kamuyla paylaşılan YDD çalışmalarında ise öznelliğinden dolayı yanıltıcı olma potansiyeli bulunan bu adımın kullanılması önerilmemektedir (Bengtsson, M., Steen, B.).

### 3.2.4 Verilerin Açıklanması ve Yorumlanması

YDD çalışmaları boyunca elde edilen verilerin yorumlanması, çalışmanın amacına uygun olarak elde edilen sonuçların okuyucuların anlayabileceği biçimde derlenmesi anlamına gelmektedir. Bu yorumların tamamlanabilmesi, literatürde ortak olarak kullanılan üç sürecin sonunda mümkün olabilmektedir. Bu süreçler “önemli çevresel sorunların belirlenmesi”, “değerlendirme” ve “çıkarımlar ve öneriler” olarak sıralanmaktadır (ISO, 1997; Jensen, A.A., vd.; Hauschild, M.Z., vd.)

Yorumlama sürecinde ilk olarak YDD çalışmasının önceki adımlarında yapılan değerlendirmeler gözden geçirilmektedir. Çalışmanın sonucunun belirlenmesinde en önemli rolü hangi sürecin ya da hangi değerlendirme adımının oynadığının belirlenmesi adına yorumlardan önce bu kontrolün yapılması önemlidir.

Belirlenen önemli girdiler, çıktılar, çevre etkisi kategorileri, öznel seçimler, vb. alanlar değerlendirme aşamasında yeniden incelenmekte bunların YDD'nin başlangıcında belirlenen hedef ve kapsam için uygunluğu kontrol edilmektedir. Çalışmaya konu olan önemli bir girdi ya da çıktıya ait süreçlerin, değerlendirme

çalışmalarında atlandığının tespit edilmesi durumunda bu süreçlerin de eklendiği yeni hesaplamalar yapılmakta ya da çalışmanın sınırları uygun biçimde yeniden tanımlanmaktadır. Yaşam döngüsü süreçlerinin çalışmaya uygun duruma getirilmesi sonrasında da çalışmada çeşitli belirsizlikler bulunabilmektedir. Karşılaşılan bu belirsizlikler verilerden ya da metodolojiden kaynaklanabilmektedir. Son değerlendirmelerin ve yorumların verilerle desteklenerek yapılmasını engelleyen bu durum literatürde “belirsizlik kontrolü” ve “hassasiyet kontrolü” olarak adlandırılan yöntemlerle yönetilmektedir. Bu bağlamda öncelikle çalışmada yeterinde işlenmediği ve belirsizlik barındırdığı tespit edilen alanlardan hangilerinin sonucu daha çok etkilediği incelenmektedir. Verilerden kaynaklanan belirsizliklerin etkisinin anlaşılabilmesi adına sadece bu bölüme ait veriler değiştirilerek tekrar hesaplamalar yapılmaktadır. Metodolojideki belirsizliklerin etki düzeyi de değerlendirmenin öznel seçimlerinin değiştirilmesiyle kontrol edilmektedir. Kontrol edilen belirsizliklerin toplam çevre etkisinde önemli değişikliklere neden olmadığı görülürse bu durum yalnızca raporlarda belirtilmektedir. Sonuçların çalışmadaki belirsizliklerden hassas biçimde etkilendiği durumlarda ise veri setleri detaylandırılmakta ya da çalışmanın amaç ve kapsamı yeniden tanımlanmaktadır.

Yaşam döngüsü süreçlerinin kontrol edilmesi ve varsa eksiklerinin giderilmesi sonucunda bilimsel verilere dayanan çıkarımların yapılması için uygun koşullar sağlanmaktadır. Bu çıkarımlar mevcut durumu açıklamakta ve ele alınan yaşam döngüsü süreçlerinin geliştirilebilmesi için çeşitli önerilerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Dolayısıyla yapılan çıkarımların da çalışmanın amacına uygun olması ve okuyucular tarafından kullanılabilir olması beklenmektedir. Eğer çıkarımlar YDD çalışmasının başlangıcında belirlenen sınırlara ve tanımlara uygunsa oldukları gibi yayınlanabilmektedir. Aksi durumda sonuçlar, belirlenen bağlam içerisinde kalacak şekilde yeniden yorumlanmaktadır.

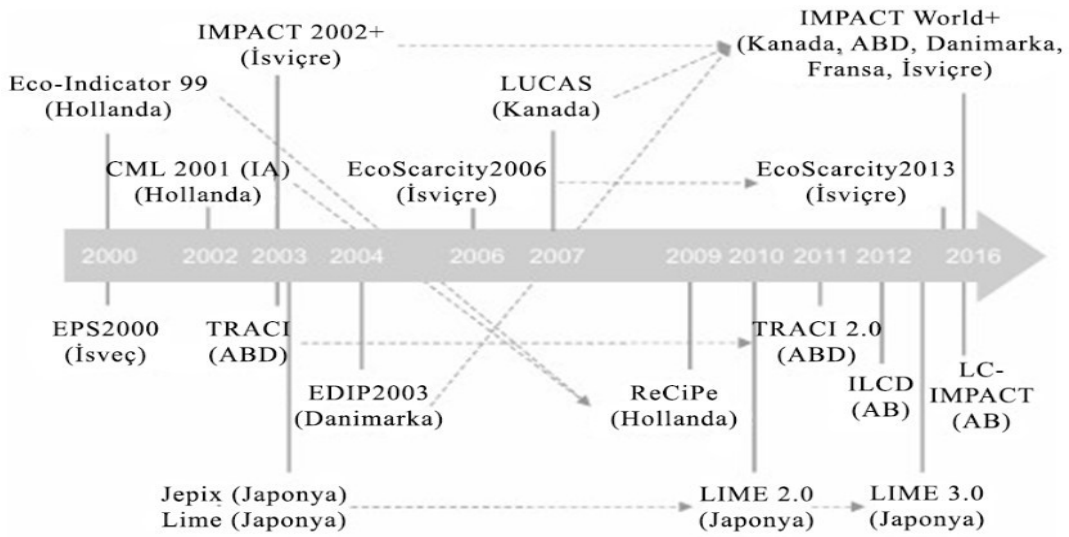
### **3.3 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde Kullanılan Alternatif Metotlar**

YDD’de kullanılmak üzere oluşturulmuş birçok şablon ve metot bulunmaktadır. Birçok ülke ve kurum tarafından geliştirilen bu metotlar çeşitli nitelikleri ile birbirlerinden ayrılmakta ve farklı alanlarda özelleşmektedir. YDD metotlarının

farklılaşmasındaki amaç, çalışmaların daha etkili ve amaca uygun olarak yürütülmesini sağlamaktadır. Uygunluğun sağlanması için her metot farklı veri kriterleri geliştirmekte ve farklı çevresel etki kategorilerini ön plana çıkarmaktadır.

Geliştirilen YDD metotların hangi kavramları ön plana çıkaracağı, metodu geliştiren kurum ya da ülkenin coğrafi konumuna ya da çevre politikalarına bağlı olabilmektedir. Özellikle karakterizasyon ve ağırlıklandırma gibi aşamalardaki katsayıların değişiminden kolaylıkla etkilenen YDD çalışmalarının sağlıklı biçimde sonuçlanabilmesi, uygun metodun seçilmesiyle doğrudan ilişkilidir. Metot seçiminde, değerlendirmeye konu olan yaşam döngüsü süreçlerinin gerçekleştiği coğrafi koşullar ve çalışmanın ilişkili olduğu sektör gibi etkenler göz önünde bulundurulmalıdır.

Günümüzde en çok kullanılan YDD metotları arasında “IMPACT World+”, “EcoScarcity 2013”, “ReCiPe”, “TRACI 2.0”, “ILCD”, “LC-IMPACT” ve “LIME 3.0” yer almaktadır. Örnek olarak verilen YDD metotlarının ortaya çıktıkları ve güncellendikleri yıllar Şekil 3.6’da gösterilmektedir. Bu metotlar, belirtilen çeşitli nitelikler özelinde ayrışsa da hepsi ISO tarafından belirlenen ilkelere uygun biçimde geliştirilmektedir (ISO 14040; ISO 14044).



**Şekil 3.6** 2000-2016 yılları arasında geliştirilmiş olan YDD metotları ve ortaya çıktıkları ülkeler (Rosenbaum, R.K.)

Hollanda, İsveç, İsviçre, ABD, Japonya ve Kanada tarafından gerçekleştirilen bu ilk örneklerin hepsinin zaman içinde güncellendiği, birçoğunun birleştiği ve yeni yaklaşımlarla tekrar ele alındığı gözlemlenmektedir. Japonya’da geliştirilmiş olan

LIME ve ABD’de geliştirilmiş olan TRACI metotları varlıklarını sürdürürken özellikle IMPACT 2002+, LUCAS ve EDIP2003 metotlarının daha uluslararası standartlara sahip olan IMPACT World+ metodu altında birleştiği görülmektedir. Bununla birlikte Şekil 4.6’daki zaman aralığının son yıllarında Avrupa Birliği ülkelerinin de birlikte hazırladıkları metotların oluşturulmuş olması, ulusal kriterlerin yerlerini uluslararası ortak önceliklere bıraktığının göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Benzer çevresel politikalara sahip olan ülkelerin ortak kriterler üzerinden metotlar oluşturmaları, belirledikleri çevresel politikaların uygulanmasına yönelik veri havuzunun geliştirilmesi adına faydalı görülmektedir. Diğer yandan YDD metotlarının evrenselleşmesi, özgün koşullara sahip yaşam döngüsü süreçlerinin incelenmesinde yetersiz değerlendirmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Özellikle yapı sektörü gibi coğrafyaya bağlı disiplinlerdeki çalışmalarda, evrensel yaşam döngüsü metotlarının yeterince sağlıklı sonuçlar veremediği çeşitli bilimsel çalışmalarda açıklanmaktadır (Darçın, P., vd.). Bununla birlikte karmaşık hammadde edinim, üretim, kullanım, atık oluşumu ve geri dönüşüm mekanizmalarına sahip olan yapı sektöründe özellikle akıllı malzemeler üzerine yapılan YDD çalışmalarının sayısının arttığı gözlemlenmektedir.

# 4

## CFRP'LERİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ VE YAPI İLİŞKİSİ

---

Günümüzde yapı sektörü ile ilişkili süreçlerin insan sağlığına ve doğal çevreye olan etkilerinin uluslararası kamuoyu ve kurumlar tarafından daha çok dikkate alınmasıyla birlikte, yapı malzemelerinin çevresel performansının değerlendirilmesi üzerine yürütülen çalışmalara verilen önem de artmaktadır. Bu bağlamda yapılarda kullanılan malzemelerin ya da ürünlerin yalnızca ekonomik ve mekanik performanslarının değil, aynı zamanda yaşam döngüsü süreçleri boyunca neden oldukları çevresel etkilerin de detaylı biçimde incelenmesi gerekliliği doğmaktadır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ve bu değerlendirme çalışmalarında kullanılan metotlar da söz konusu malzeme ve ürünlerin çevresel performanslarının belirlenmesinde etkili araçlar olarak öne çıkmaktadır.

Yapı ürünü olarak ikinci bölümde ifade edilen nitelikleri bulunan CFRP'lerin doğal çevre etkisi bağlamında güncel olarak nasıl performans gösterdiğinin ayrıntılı biçimde incelenmesi de kapsamlı bir ürün değerlendirmesinin yapılabilmesi adına önem taşımaktadır. Bu bağlamda CFRP'lerin üretiminde kullanılan hammaddelerin edinim süreçlerinin, üretim tekniklerinin, kullanım ve bakım süreçlerinin, geri dönüşüm ve bertaraf yöntemlerinin uluslararası standartlara uygun biçimde YDD metodolojisiyle incelenmesi gerekli görülmektedir.

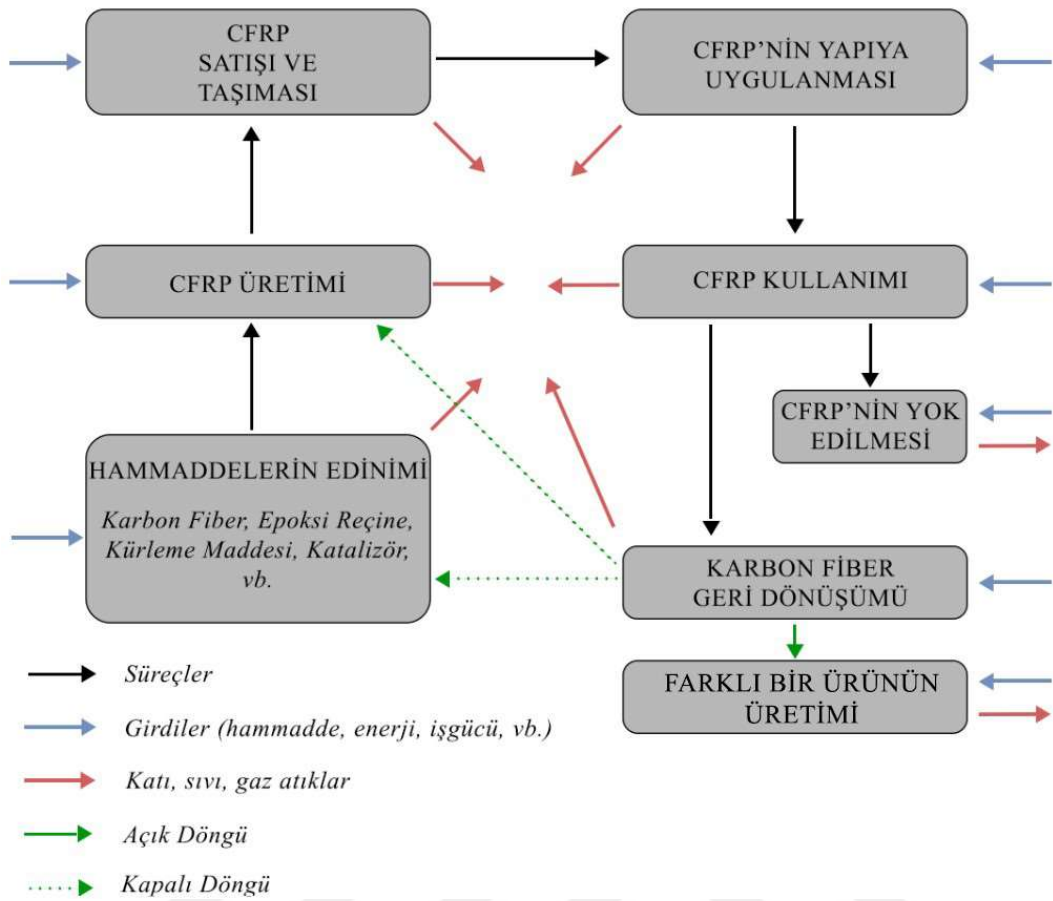
Çalışmanın bu bölümünde CFRP'lerin yaşam döngülerindeki temel süreçler ayrıntılı olarak incelenmekte, bu süreçlerin her birinde oluşan çevresel etkiler ortaya konmaktadır. Söz konusu etkilerin tespit edilmesinde hem literatürdeki çalışmalardan elde edilen bilgiler hem de uluslararası EPD verileri kullanılarak yürütülen özgün analiz çalışmasından elde edilen çevresel etki verileri kullanılmaktadır. CFRP'lerin yapı ürünü olarak yaygınlaşmasıyla yapı sektörünün toplam çevre etkisinde oluşabilecek değişikliklerin öngörülebilmesi için ise bir diğer donatı türü olan ve yapılarda yaygın olarak kullanılan çeliğin çevresel etki verileri üzerinden karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmaktadır.

#### 4.1 CFRP'lerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

CFRP'lerin çevre etkileri hammadde edinimi, üretim, satış ve taşıma, uygulama, kullanım, geri dönüşüm ve bertaraf süreçleri içerisinde incelenmektedir. Bu süreçler doğrusal, açık döngü ya da kapalı döngüler olarak yürütülebilmektedir. YDD metotları çerçevesinde öncelikle CFRP'lerin üretim süreci için gerekli olan hammadde edinimi incelenmektedir. Bu aşamada üretim için gereken malzemelerin temini sağlanmakta ve koşullar üretimin yapılabilmesi için uygun duruma getirilmektedir. CFRP özelinde gerekli olan bazı hammaddeler için yeni üretime ihtiyaç duyulurken ürünün temel malzemesi olan karbon fiberler geri dönüşüm işlemleriyle de elde edilebilmektedir.

Söz konusu hammaddelerin bir araya getirilmesinde ve CFRP'nin oluşturulmasında elektrik ve ısı enerjisi harcanmakta, doğal çevre ve insan sağlığına zararlı salınımlar gerçekleşmektedir. İstenen formda üretilmek üzere hazır hale getirilen CFRP'ler başta pultrüzyon olmak üzere çeşitli yöntemlerle şekillendirilmektedir. Bitmiş bir ürün olarak üretimi tamamlanan CFRP'ler ise kullanılacakları yapı alanına getirilmekte ve yapı taşıyıcı sistemlerinin içerisinde ya da yüzeylerinde kullanılmaktadır. Planlanan kullanımının ardından kullanım ömrünün tamamlanması, CFRP'lerin üretim şekillerine bağlı olarak geri dönüştürülmesi ya da bertaraf edilmesi gibi alternatif süreçleri tetiklemektedir.

Şekil 4.1'deki görselde ayrıca ifade edilen bu süreçlerin araştırılması ve doğal çevre etkilerinin analiz edilebilmesi adına süreçlerdeki girdilerin ve çıktılar incelenmesi, YDD kapsamında nesnel çıkarımlar yapılması önemli bulunmaktadır. Yaşam döngüsü süreçlerinin ayrı başlıklar altında incelendiği bu çalışmada ekonomik kriterler ise kapsam dışında tutulmaktadır.



**Şekil 4.1** Karbon Fiber Takviyeli Polimerler'in yaşam döngüsü süreçlerinde geçebileceği aşamaların alternatif senaryolar çerçevesinde gösterilmesi

#### 4.1.1 CFRP'lerin Hammadde Edinimi Süreçlerinin YDD Bağlamında İncelenmesi

CFRP'nin içerisinde hammadde olarak karbon fiber, epoksi reçine, kürleme maddesi ve katalizör kullanılmaktadır. CFRP'nin ana malzemesi olan karbon fiberler poliakrilonitril (PAN) ya da ligninin işlenmesiyle elde edilmektedir. Kullanılan alternatif karbon fiber kaynaklarının ikisinde de temel olarak benzer süreçler yürütülmektedir. Söz konusu süreçlerde karbon fiberin üretilmesi için gerekli olan saflaştırma ya da polimerizasyon işlemi yapılmakta, elde edilen lifler lif eğirme (liflerden iplik oluşturma) işleminden geçirilerek üretime hazır duruma getirilmektedir. Bu aşamaların her birinde iş gücü, enerji ve malzeme harcanmakta, işlem sonunda ise elde edilmek istenen ürünün yanında çeşitli atıklar ortaya çıkmaktadır.

Hammadde edinim süreçlerinin bu biçimde yürütülmesi için çeşitli monomerler, çözeltiler ve gazlar kullanılmakta; çıktı olarak ise uçucu moleküller, çeşitli sıvı atıklar, tozlar ve gazlar oluşmaktadır. Karbon fiber kaynağı olarak seçilen alternatif kaynaklardaki yapısal farklar bu girdilerin hangilerine ihtiyaç duyulacağını ve süreç sonunda hangi çıktıların nasıl bir formda oluşacağını belirlemektedir. Tablo 4.1’de gösterilen bu girdiler ve çıktılar CFRP’nin yaşam döngüsünün çevre etkisi bağlamında nasıl bir performans göstereceği konusunda önemli rol oynamaktadır.

**Tablo 4.1** PAN ve lignin işlenmesiyle CFRP hammadde edinimi süreçlerindeki girdi ve çıktılar

|                                     | <b>FOSİL YAKIT TEMELLİ<br/>(PAN)</b>                  |                                                                                                 | <b>BİYOMALZEME (LİGNİN)</b>                           |                                                                                                 |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>İŞLEM</b>                        | <b>GİRDİ</b>                                          | <b>ÇIKTI</b>                                                                                    | <b>GİRDİ</b>                                          | <b>ÇIKTI</b>                                                                                    |
| <b>Ön Hazırlık / Polimerizasyon</b> | Akrilonitril monomer, katalizör, H <sub>2</sub> O     | VOC                                                                                             | Odun yongası, buhar, su                               | Lignin sülfat atığı, lignin yoksun likör                                                        |
| <b>Lif Eğirme</b>                   | PAN çözelti                                           | Solvent buharı, atık su                                                                         | Lignin, azot gazı                                     | Eritme dumanı (CO <sub>2</sub> , su)                                                            |
| <b>Reçine Üretimi</b>               | Bisfenol-A, Epiklorohidrin, NaOH                      | NaCl, HCl, CO <sub>2</sub> , VOC ve katı atıklar                                                | Bisfenol-A, Epiklorohidrin, NaOH                      | NaCl, HCl, CO <sub>2</sub> , VOC ve katı atıklar                                                |
| <b>Kürleme Maddesi Üretimi</b>      | NaOH, 1,2-Dikloroetan, NH <sub>3</sub>                | NaCl, HCl, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , H <sub>2</sub> O, VOC                            | NaOH, 1,2-Dikloroetan, NH <sub>3</sub>                | NaCl, HCl, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , H <sub>2</sub> O, VOC                            |
| <b>Katalizör Üretimi</b>            | Kireçtaşı, Kok kömür, NaOH, Asetilaseton, Argon, Azot | Cüruf, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , N <sub>2</sub> O, VOC, partiküller | Kireçtaşı, Kok kömür, NaOH, Asetilaseton, Argon, Azot | Cüruf, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , N <sub>2</sub> O, VOC, partiküller |

Tabloda görüldüğü üzere karbon fiberlerin PAN ya da lignin kaynaklarından hangisiyle üretileceği, CFRP hammadde edinim süreçlerindeki girdi ve çıktılarının türlerini belirlemektedir. Çevre etkisinin değerlendirilmesinde incelenen söz konusu katı, sıvı ve gazlar, YDD çalışmalarındaki sonuçları da etkilemektedir. Bu sonuçların elde edilmesi için literatürde kullanılan çevre etkisi kriterleri her ürün ya da malzeme için uygun olacak biçimde belirlenmekte ve çalışmalar bu kriterler çerçevesinde bilgi oluşturmak için yürütülmektedir. CFRP'lerin yaşam döngülerinin işlendiği çalışmalarda ise hammadde edinim süreçleri genellikle “birincil enerji ihtiyacı”, “temel abiyotik kaynak tüketimi”, “fosil abiyotik kaynak tüketimi”, “arazi kullanımı”, “ötrofikasyon potansiyeli”, “ozon tüketme potansiyeli”, “fotokimyasal oksidasyon potansiyeli”, “küresel ısınma potansiyeli”, “asidifikasyon potansiyeli”, “karasal ekotoksosite”, “deniz ekotoksitesitesi”, “tatlı su ekotoksitesitesi”, “kanserojen toksisite”, “kanserojen olmayan toksisite”, “ince parçacıklı madde oluşumu” ve “iyonize edici radyasyon oluşumu” başlıkları altında incelenmektedir. Yaşam döngüsü envanterinin oluşturulmasında bu kriterler bağlamında incelemeler yapılmakta, böylece biyomalzeme ve fosil yakıt kaynaklarından elde edilen karbon fiberlerle üretilen CFRP'lerin hammadde edinim süreçlerinin çevre etkisi tespit edilmektedir.

CFRP üretiminde kullanılan hammaddelerin edinimi için yürütülen süreçlerin karşılaştırılması sonucunda çevre etkisi kriterlerinden olan “arazi kullanımı” konusunda biyomalzeme bazlı CFRP'lerin daha olumsuz değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bunun durum iki alternatifteki kürlleme süreci özelinde daha önce belirtilen farktan kaynaklanmaktadır. Ancak lignin temelli hammadde edinim yöntemi, diğer çevresel etki kriterlerinin birçoğunda petrol kaynaklı CFRP'lere göre olumlu sonuçlar göstermektedir. Özellikle “fosil kaynak kullanımı (ADPf)”, “küresel ısınma etkisi (GW)”, “su tüketimi (W)”, “deniz ekotoksitesitesi (MEX)”, “deniz ötrofikasyonu (ME)”, karasal ekotoksosite (TE)”, “karasal asidifikasyon (TA)”, “mineral kaynak azalması (MRS)”, kanserojen toksisite (HCT)”, “iyonize edici radyasyon oluşumu (IR)” ve “insan sağlığına zararlı ozon oluşumu (OHH)” gibi çevresel etki kriterleri fosil kaynaklı hammadde ediniminin olumsuz değerlere sahip olduğu alanlar olarak ön plana çıkmaktadır (Abbate, E., vd.).

PAN ve lignin kaynaklı karbon fiberlerin çevre etkilerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada enerji gereksinimi ve karbon-dioksit salınımı kriterleri çerçevesinde

ligninden üretilen karbon fiberlerin daha olumlu değerlere sahip olduğu ifade edilmektedir. Bu çalışmada elde edilen ve Tablo 4.2’de yer alan sonuçlar, birincil enerji ihtiyacı değerlerinin yakın olduğunu, ancak PAN temelli üretim yönteminin çok daha yüksek düzeyde CO<sub>2</sub> salınımına neden olduğunu göstermektedir.

**Tablo 4.2** 1kg PAN temelli karbon fiber ve 1kg lignin temelli karbon fiber üretimindeki birincil enerji ihtiyacı ve süreç sonucunda gözlemlenen CO<sub>2</sub> salınımı düzeyleri (Das, S.)

| CFRP Hammaddesi     | GWP [kgCO <sub>2</sub> eq] | Birincil Enerji İhtiyacı [MJ] |
|---------------------|----------------------------|-------------------------------|
| PAN Karbon Fiber    | 31                         | 704                           |
| Lignin Karbon Fiber | 24.2                       | 670                           |

Literatürde CFRP üretimi için gerekli olan hammaddelerin edinimine yönelik farklı birçok araştırma ve YDD çalışması bulunmaktadır. Bu kaynaklarda sunulan değerlendirmelerde benzer kriterlerin kullanılmasına rağmen çevresel etki bağlamında farklı sonuçlara ulaşılabildiği görülmektedir. Ancak CFRP hammadde edinim süreçlerinin çevre etkilerinin çeşitli bilimsel çalışmalarda farklı çıkmasının nedeni yalnız hammadde kaynaklarının farkı olması değildir. Aynı hammadde kaynağına sahip olan CFRP’lerin çevre etkisi sonuçlarının da çeşitli değişkenlere bağlı olarak değişebildiği görülmektedir.

CFRP üretiminin yapıldığı konum, üretimde kullanılan ekipmanların verimliliği, üretim bandının optimizasyon seviyesi gibi nitelikler, karbon fiberlerin ve matris içerisinde kullanılacak diğer bileşenlerin edinim süreçlerinin çevre etkisinde önemli rol almaktadır. Bu çerçevede konumun değerlendirme sonuçlarına etkisinin hammadde üretiminin yapıldığı bölgenin altyapı olanaklarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Örnek olarak karbon fiber üretimi için gerekli elektriğin hangi kaynaklardan karşılandığına göre CFRP’nin yaşam döngüsü değerleri farklılaşabilmektedir. Dünyadaki karbon fiber arzının önemli bölümünü karşılayan Japonya’daki karbon fiber üretim süreçlerinde şebeke elektriği kullanılması nedeniyle sera gazı salınım seviyelerinin yüksek olduğu, buna karşılık enerji

ihtiyacını önemli ölçüde yenilenebilir kaynaklardan sağlayan İsveç'te aynı çevresel etki değerlendirmelerinin daha olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir.

Konum seçiminin yanında üretici olanakları da bu değerlerin farklılaşmasında önemli bir etkindir. Büyük bir üretim kapasitesine sahip olan ve süreçlerini optimize edecek araştırmaları yapmış bir üretici, çevre etkisi açısından daha olumlu bir karbon fiber üretimi gerçekleştirebilmektedir. Sözü edilen değişkenler farklı çevre etkisi değerlerini farklı boyutlarda etkilemektedir. Bu nedenle CFRP yaşam döngülerinin incelenmesinde doğru senaryoların ve YDD yaklaşımlarının özenle belirlenmesi gerekmektedir.

Yapı sektörü üzerine yapılan araştırmalarda birbirinden farklı sonuçlar elde edilmesinin hammadde kaynakları ve çevresel şartlar dışında önemli bir nedeni daha bulunmaktadır. Değerlendirme çalışmalarında kullanılan veri tabanı farklılığı bu bağlamda büyük öneme sahiptir.

Yürütülen YDD çalışmalarında kullanılan veri tabanları çeşitli kurumlar, enstitüler, laboratuvarlar tarafından bağımsız araştırmalar tarafından oluşturulabilmekte ya da EPD belgelerinden derlenebilmektedir. Söz konusu alternatiflerin hepsinde EN standartlarına uygun olarak veri elde edilmekle birlikte yaşam döngüsü süreçlerinin hangi bölümünün verilere dahil edileceği çalışmaların yürütücüleri tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle ele alınan veri kaynağının incelenen yaşam döngüsü süreçlerini bütünsel olarak kapsayıp kapsamadığının ve verilerin hangi sınırlar içerisinde üretildiğinin dikkatlice incelenmesi gerekmektedir.

Tez çalışması kapsamında söz konusu kaynaklar üzerinden incelenen CFRP'lerin yoğun olarak kullanıldığı Avrupa ülkelerinde bu ürünün yaşam döngüsü süreçlerinde kullanılabilecek yöntemler günümüzde giderek daha çok regüle edilmekte ve süreçler yasalar tarafından sınırlandırılmaktadır. Dolayısıyla hem bilim insanları hem de üreticiler tarafından yapılan çalışmaların tutarlılığı artmaktadır. Özellikle yüksek endüstriyel üretim kapasitesine sahip olan ülkelerde YDD ilgili kurumların, sivil derneklerin ve bunlar tarafından oluşturulan veri tabanlarının sayısı artmaktadır.

Literatürde CFRP hammaddelerinin çevre etkisinin incelendiği birçok veri kaynağında karbon-dioksit salınımı, sülfür-dioksit salınımı ve fosil kaynak tüketimi seviyeleri bilimsel değerlendirmeler kapsamında öncelikli tutulmakta; söz konusu

etki seviyeleri ile ilgili veriler GWP, AP ve ADPf kategorileri altında ifade edilmektedir. Karbon-dioksit salınım miktarı, belirtilen yaşam döngüsü sürecinde küresel ısınmaya ne kadar katkı sağlandığını belirtmektedir. Sülfür-dioksit salınım miktarının ölçülmesi ise toprak ve su ortamlarının ne kadar asitlenme etkisine maruz kaldığını göstermektedir. İncelenen yaşam döngüsü sürecinde ne kadar fosil kaynak kullanıldığı da çevreyi çeşitli yollarla etkilediği için kontrol edilmesi gereken bir değer olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda CFRP hammadde edinim süreçleri ile ilgili güncel durumu analiz etme amacıyla yürütülen literatür araştırmaları sırasında bu kategoriler altında gözlemlenen verilerin aralıkları CFRP hammaddeleri özelinde Tablo 4.3'te sunulmaktadır.

**Tablo 4.3** 1kg karbon fiber ve reçine edinim süreçleri için literatürde “küresel ısınma etkisi (GWP)”, “asidifikasyon potansiyeli (AP)” ve “fosil kaynak tüketimi (ADPf)” kriterleri çerçevesinde tespit edilen minimum ve maksimum değerler (Hohmann, A.; Avrupa Komisyonu; Prenzel, T., vd.; Janssen M., vd.; Das, S.)

| ÜRÜN                               | GWP<br>[kg CO <sub>2</sub> eq] |       | AP<br>[kg SO <sub>2</sub> eq] |      | ADPf<br>[MJ eq] |     |
|------------------------------------|--------------------------------|-------|-------------------------------|------|-----------------|-----|
|                                    | min                            | max   | min                           | max  | min             | max |
| <b>PAN Temelli Karbon Fiber</b>    | 5,80                           | 38,90 | 0,03                          | 0,30 | 262             | 542 |
| <b>Lignin Temelli Karbon Fiber</b> | 1,50                           | 24,2  | 0,02                          | -    | 39              | -   |
| <b>Epoksi Reçine</b>               | 3,16                           | 3,80  | 0,009                         | 0,01 | 72              | 84  |

CFRP üretiminde yaygın olarak PAN'dan elde edilen karbon fiberler kullanılmakta, ancak günümüzde hammadde kaynağı olarak lignin kullanılan daha çevreci alternatifler de geliştirilmektedir. Tablo 4.3'te sunulduğu üzere lignin temelli karbon fiber üretiminde AP ve ADPf gibi çevresel etki kriterleri çerçevesinde daha düşük değerler gözlemlenmektedir. Buna karşın bu şekilde üretilen karbon fiberlerin çevre etkileri üzerine endüstriyel literatürde henüz tatmin edici çeşitlilikte

bilgi kaynağı bulunmamaktadır. Reçine türleri arasında ise CFRP üretimi için en uygun tür olması nedeniyle yalnızca epoksi reçine üzerinden edinilen veriler tez kapsamında tutulmaktadır.

Literatürdeki araştırmalardan elde edilerek Tablo 4.3'te sunulan en düşük ve en yüksek çevresel etki değerleri arasında büyük farklar olması nedeniyle tutarlı bir analizin yapılması için bu hammaddelerin edinim süreçleriyle ilgili belirli değişkenlerin sabitlenmesi ve sonuçların olabildiğince direkt biçimde ürün niteliklerine bağlı duruma getirilmesi gerekmektedir.

CFRP yaşam döngüsü üzerine yapılan araştırma sayısının ve veri erişilebilirliğinin yüksek olması nedeniyle Avrupa'daki hammadde edinim süreçleri üzerinden edinilen verilerin analiz kapsamında kullanılması tez çalışması için uygun bulunmaktadır. Enerji kaynakları ve üretim yöntemleri konusunda belirleyici olan bu seçimin, verilerin tutarlılığı adına CFRP yaşam döngüsünün diğer süreçleri bağlamında da korunması gerekli görülmektedir.

Yapı ürünlerinin değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan 1kg ölçüsü, bu çalışmada da fonksiyonel birim olarak kullanılmaktadır. 1kg karbon fiber ve 1kg epoksi reçine ediniminde gözlemlenen çevre etkileri “küresel ısınma potansiyeli”, “asidifikasyon potansiyeli” ve “fosil abiyotik kaynak tüketimi” kriterleri çerçevesinde değerlendirilmektedir. Tablo 4.1'de gösterilen girdi ve çıktılar bu çevresel etki kriterlerinde kullanılan birimler cinsinden hesaplanmakta ve süreçlere ait veriler bu şekilde derlenmektedir.

Karbon fiber edinim süreçlerinin günümüzde yaygın olarak PAN üzerinden yürütülmesi nedeniyle tez çalışması bu senaryo üzerinden ilerletilmektedir. CFRP hammadde edinim süreçlerinin çevre etkisi sonuçlarının hammadde ve üretim yeri arasındaki mesafe gibi hassas değişkenler tarafından etkilenmemesi adına çalışmada taşıma süreçleri kapsam dışında bırakılmakta, değerlendirmeler yaşam döngüsünün yalnızca ürünün hammadde edinimi için standart olan ve YDD metodolojisinde A1 başlığı altında ele alınan süreçler çerçevesinde yapılmaktadır. Yürütülen analiz çalışması, CFRP'nin hammadde edinimindeki güncel çevresel etki durumunun anlaşılabilmesi adına önemli veriler ortaya koymaktadır. Bu veriler Tablo 4.4'te sırasıyla karbon fiber ve epoksi reçine özelinde sunulmaktadır. Çalışma boyunca sunulacak olan verilerin tutarlılığının korunması amacıyla bu

tabloların oluşturulmasında daha önce belirtilen nedenlerle benzer teknoloji ve enerji kaynakları üzerinden yapılan çalışmalar kullanılmakta; söz konusu çalışmalardaki verilerin ortalaması hesaplanmaktadır.

**Tablo 4.4** 1kg PAN temelli karbon fiberin ve 1kg epoksi reçinenin üretim süreçlerinin incelenmesiyle elde edilen çevre etkisi değerleri (Backes, J.G., vd.; Avrupa Komisyonu; Plastics Europe; IBU)

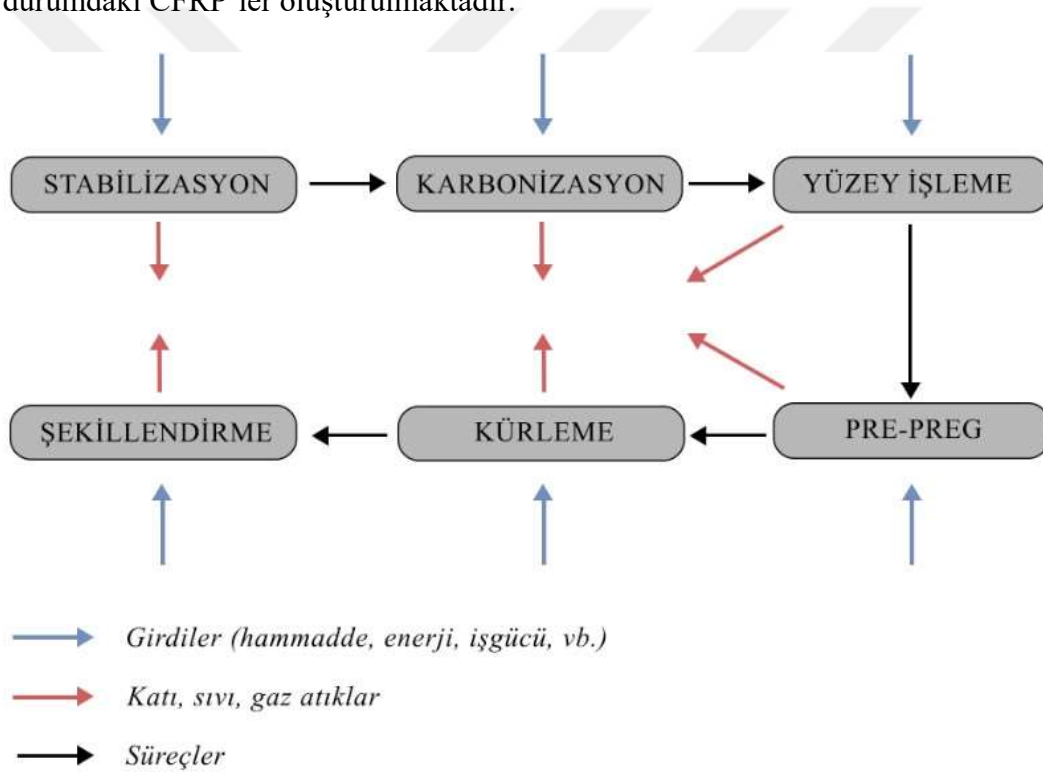
| ÜRÜN                     | ÇEVRE ETKİSİ | BİRİM                   | DEĞER |
|--------------------------|--------------|-------------------------|-------|
| PAN Temelli Karbon Fiber | GWP          | [kg CO <sub>2</sub> eq] | 18,70 |
|                          | AP           | [kg SO <sub>2</sub> eq] | 0,04  |
|                          | ADPf         | [MJ eq]                 | 332   |
| Epoksi Reçine            | GWP          | [kg CO <sub>2</sub> eq] | 7,20  |
|                          | AP           | [kg SO <sub>2</sub> eq] | 0,017 |
|                          | ADPf         | [MJ eq]                 | 124   |

Hammadde edinim süreçlerinin incelendiği YDD'nin A1 aşamasında CFRP özelinde belirleyici olan iki bileşen arasında GWP, AP ve ADPf kriterleri çerçevesinde karbon fiberin doğal çevre açısından daha zararlı olduğu; epoksi reçinelerin üretiminde de karbon fiberdeki seviyede olmamakla birlikte önemli düzeyde sera gazı salındığı ve fosil kaynak tüketildiği gözlemlenmektedir.

Yaşam döngüsü değerlendirme yöntemleri açıklanan ve çevresel etki değerleri tespit edilen CFRP hammadde edinim süreçlerinin doğal çevreye verilen zarar bağlamında iyileştirilmesi için yeni yaklaşımlar geliştirilmekte ve alandaki bilgi birikimi seviyesi yükselmektedir. Bilgi ve yöntem çeşitliliğinin artmasıyla günümüzde CFRP hammaddelerinin sıfırdan üretilmesinin yanında geri dönüştürülmüş karbon fiberlerin kullanılması da bir alternatif olarak değerlendirilmekte, bu sayede CFRP yaşam döngüsünün toplam çevre etkisinin düşürülmesi hedeflenmektedir. Bu bağlamda tez kapsamında ayrıca 4.1.4 başlığı altında değerlendirilen geri dönüşüm çalışmaları, yapı ve diğer sektörlerin toplam atık miktarının düşürülmesi için değerli görülmektedir.

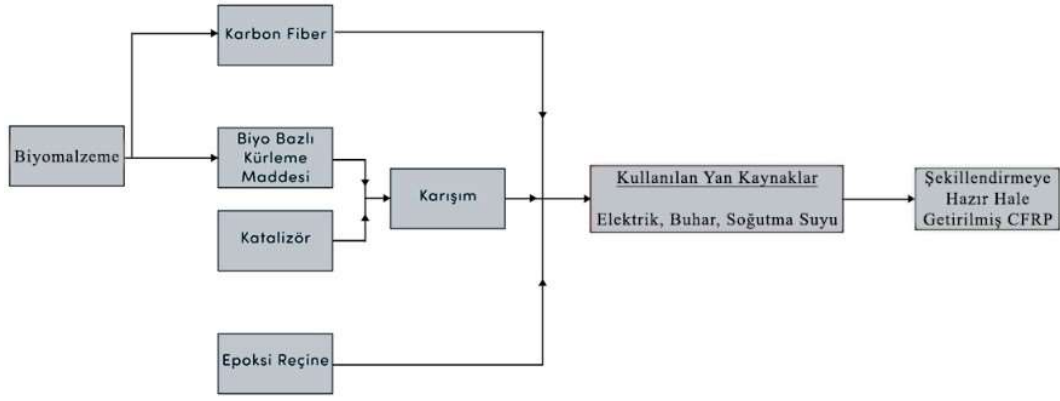
#### 4.1.2 CFRP Üretim Süreçlerinin YDD Bağlamında İncelenmesi

Hammadde edinim süreçlerinin tamamlanmasının ardından CFRP'lerin yapılarda kullanıma hazır duruma getirilmeleri için uygun işlemler yardımıyla biçimlendirilmeleri gerekmektedir. Yapı ürünü olarak CFRP'nin üretim süreçlerini tanımlayan bu aşama, CFRP'nin yaşam döngüsünün kavranabilmesi ve bu döngünün çevre etkilerinin tespit edilebilmesi adına önemli bulunmaktadır. PAN ya da ligninden elde edilen iplikler sırasıyla stabilizasyon, karbonizasyon, yüzey işleme, pre-preg, kurlama ve şekillendirme işlemlerinden geçirilmektedir. Şekil 4.2'de gösterilen söz konusu süreçlerin tamamlanmasıyla kullanıma hazır durumdaki CFRP'ler oluşturulmaktadır.

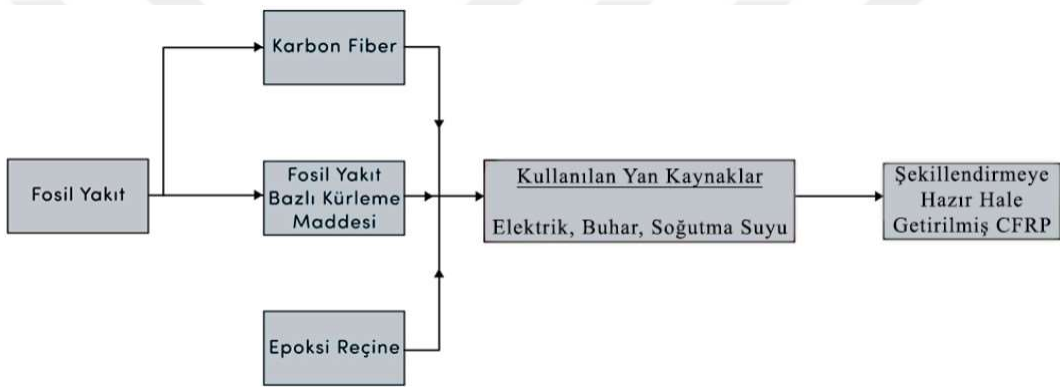


**Şekil 4.2** CFRP Üretiminde Hammaddelerin İşlenme Süreçleri

Hammadde kaynaklarının hammadde edinim süreçlerini değiştirmesine benzer şekilde farklı hammadde türleri de CFRP'nin üretim sürecini farklılaştırmaktadır. Temel olarak karbon fiberin ve reçinenin birleşmesinin hedeflendiği üretim sürecinde bu birleşmenin istenen biçimde gerçekleşmesi için çeşitli işlemlere gereksinim duyulmaktadır. Bu işlemlerin lignin ve PAN kaynaklarından elde edilen CFRP'ler özelinde nasıl farklılaştığı ise Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



**Şekil 4.3** Lignin kaynaklı karbon fiber kullanımı durumunda üretim için gerekli olan hammaddeler ve bu hammaddelerin birleşim süreçleri



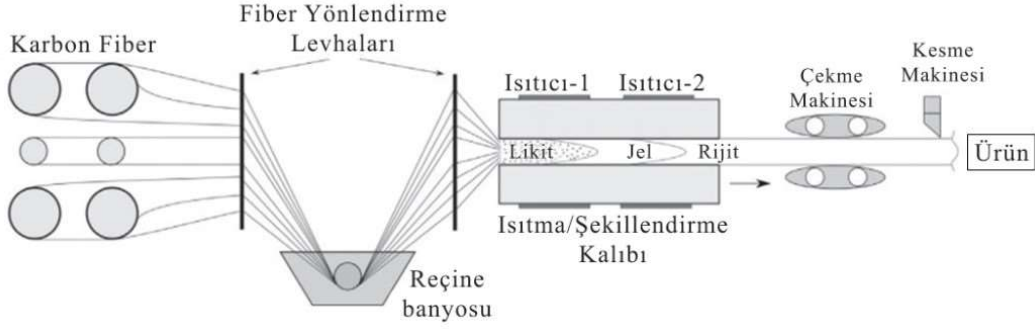
**Şekil 4.4** PAN kaynaklı karbon fiber kullanımı durumunda üretim için gerekli olan hammaddeler ve bu hammaddelerin birleşim süreçleri

Fosil yakıtlardan edinilen PAN ile üretilen karbon fiberlerin kullanılması durumunda kompozit ürünün elde edilmesi için fosil yakıt bazlı kürleme maddesine ihtiyaç duyulmaktadır. Epoksi reçine ile karıştırılan kürleme maddesi karbon fiberlerin bir arada durmasını sağlayan çözeltiyi oluşturmakta, karbon fiberler bu çözelti içerisine batırılmaktadır. Fosil kaynak tüketiminin azaltılması adına CFRP üretiminde biyomalzeme temelli karbon fiberlerin kullanılması durumunda ise diğer yöntemden farklı olarak karbon fiberler, biyomalzeme bazlı bir kürleme maddesi ile karıştırılmaktadır. Biyomalzeme bazlı bu kürleme maddesinin aktive olabilmesi için ise biyomalzemelere uygun bir katalizör ile önceden birleştirilmesi gerekmektedir.

Yapılacak üretime uygun olarak hazırlanan hammaddelerinin bu sırayla bir araya getirilmesinde en yaygın kullanılan yöntem ise pultrüzyon olarak isimlendirilmektedir. Bu yöntemde bir bant sistemi kullanılmakta ve karbon fiberler bu bant boyunca çektilererek çeşitli biçimlerde işlenmektedir. Başlangıçta henüz birleştirilmemiş ve şekillendirilmemiş olan hammaddeler bu üretim bandı boyunca ilerleyerek kullanıma hazır durumdaki CFRP'leri oluşturmaktadır.

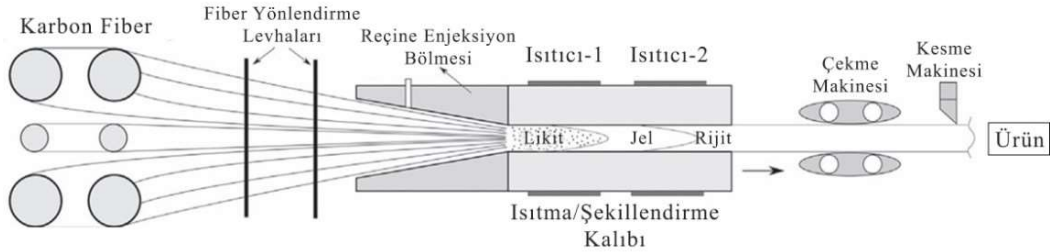
Pultrüzyon süreçlerinde geleneksel ve yenilikçi olarak tanımlanabilecek alternatif uygulamalar bulunmaktadır. Daha geleneksel yöntem pultrüzyon işleminde açık reçine banyosunun kullanılmasıyla, malzeme tasarrufu sağlamak adına geliştirilen enjeksiyon bölmeli pultrüzyon daha yenilikçi bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. İki alternatif süreçte de girdi ve çıktı türleri aynı kalmakta, ancak bazı emisyonların ve atıkların miktarı değişmektedir.

Şekil 4.5'teki şemada gösterilen açık reçine banyolu pultrüzyon uygulamasında karbon fiberler öncelikle istenen kalınlığa getirilmekte, bu amaçla bir fiber yönlendirme levhası kullanılmaktadır. Üzerinde istenen boyutlarda boşluklar bulunan bu levha yardımıyla gruplanan fiberler üretim alanında açık olarak bulunan reçine karışımına daldırılmaktadır. Bu şekilde kürlenmiş karbon fiberlerin yüzeyindeki fazla reçine de ikinci bir fiber yönlendirme levhası yardımıyla temizlenmektedir. Reçine ve karbon fiber birleşimine son formun kazandırılması ve malzemenin bütünlüğünün sağlanması adına içerisinde ısıtıcıların bulunduğu şekillendirme kalıpları kullanılmaktadır. Kalıpların içerisindeki sıcaklık uygun birleşim için gerekli olan 140°C'ye çıkarılmaktadır (Kang, B., vd.). Buradan çektilen kompozit malzeme son olarak kesme makineleri tarafından istenen ölçüde kesilmekte ve CFRP üretimi tamamlanmaktadır. Bu yöntemde reçinenin kullanım süreçlerinin yeterince verimli yönetilememekte, dolayısıyla ek kimyasal salınımlarının ve reçine atıklarının oluştuğu gözlemlenmektedir.



**Şekil 4.5** Açık reçine banyolu pultrüzyon süreçlerinin şematik gösterimi (Baran, I.)

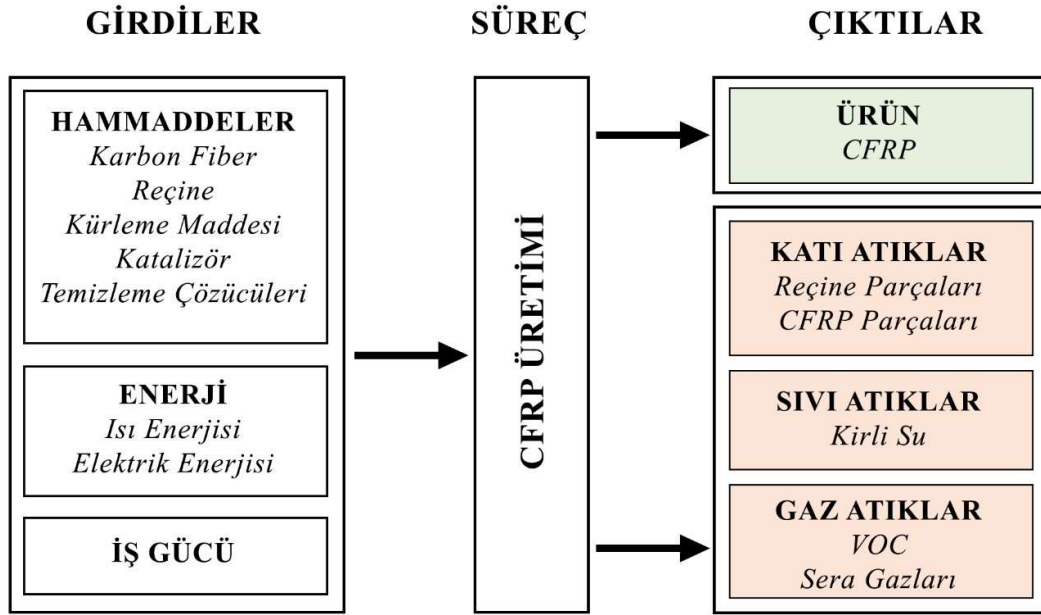
Malzeme kullanımının daha kontrollü yapılabilmesi adına geliştirilen ve işleyiş şeması Şekil 4.6’da gösterilen reçine enjeksiyon bölmeli pultrüzyon süreçlerinde ise reçineler açık havayla temas etmemektedir. Bu yöntemde karbon fiberler reçineyle karıştırılmadan önce iki adet yönlendirme levhasından geçirilmekte ve istenen ölçülere uygun biçimde bir araya getirilmektedir. Sisteme eklenen kapalı bir bölmeden geçirilen karbon fiberlere kontrollü olarak reçine enjekte edilmekte ve kompozit ürün kalıplanmaya hazır duruma getirilmektedir. Açık reçine kullanılan yöntemle benzer şekilde ısıtıcı ve kalıpların kullanılmasıyla süreç sonlandırılmaktadır.



**Şekil 4.6** Reçine enjeksiyon bölmeli pultrüzyon süreçlerinin şematik gösterimi (Baran, I.)

Pultrüzyon süreçlerinde girdi olarak hammaddeler, gerekli koşulların oluşturulması adına ısı enerjisi, süreçteki ekipmanların işleyebilmesi için ise elektrik enerjisi ve iş gücü kullanılmaktadır. Üretim araçlarındaki hammadde kalıntılarının belirli aralıklarla uzaklaştırılması için kullanılan temizleme çözücüleri de karbon fiber üretim süreçlerinin girdileri arasında bulunmaktadır. Üretim süreci sonucunda ise elde edilen CFRP’nin dışında kurlenmiş reçine parçaları, karbon fiber fireleri ve kirli su gibi atıklar oluşmakta; uçucu organik bileşiklerin, CO<sub>2</sub> ve diğer sera gazlarının atmosfere salındığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.7’deki görsel, bu süreç

bağlamında gözlemlenen girdi ve çıktıların hangi gruplar altında değerlendirildiğini göstermektedir.



**Şekil 4.7** Pultrüzyon süreçlerinin yürütülmesi için gerekli olan girdiler ve süreç sonucunda oluşan çıktılar

CFRP üretim süreçlerinde gereksinim duyulan iş gücü, enerji türü ya da düzeyi doğal çevre etkisini önemli ölçüde etkilemektedir. Süreç sonunda oluşacak olan çıktıların formu ve türü ise kullanılan hammaddeler tarafından belirlenmektedir. Karbon fiber, reçine, kürleme maddesi, katalizör ve temizleme çözücüler uygun bileşenlerle birlikte kullanılmakta, bu girdilerin süreç içerisindeki etkileşimleri de çıktıların nitelik ve niceliğini belirlemektedir. Günümüzde PAN ve lignin kaynakları kullanılarak üretilen CFRP'nin üretim süreçleri kapsamında yürütülmesi gereken süreçler, bu süreçlerde kullanılan girdiler ve süreç sonunda oluşan çıktılar Tablo 4.5'te ayrıca detaylı olarak gösterilmektedir.

İki farklı yöntemde de özellikle fiberlerin oksidasyona karşı dirençli hale getirilmesinde ve bu stabil liflerin karbonizasyon süreçlerinde yüksek sıcaklıkların oluşturulması gerekmektedir. Bu süreçlerde gerçekleşen kimyasal tepkimeler sonucunda ise çıktı olarak karbon dioksit (CO<sub>2</sub>), hidrojen siyanür (HCN), karbon monoksit (CO), nitröz oksit (N<sub>2</sub>O), hidrojen (H<sub>2</sub>), amonyak (NH<sub>3</sub>), nitrogen (N<sub>2</sub>), etan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), etilen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) ve metan (CH<sub>4</sub>) oluşmaktadır (Forcellese, A. et al).

**Tablo 4.5** PAN ve lignin temelli CFRP’lerin üretim süreçlerinin aşamalarıyla birlikte bu süreçteki katı, sıvı, gaz girdi ve çıktıların türleri

|                              | <b>FOSİL YAKIT TEMELLİ<br/>(PAN)</b>                 |                                         | <b>BİYOMALZEME<br/>(LİGNİN)</b>                         |                                         |
|------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>İŞLEM</b>                 | <b>GİRDİ</b>                                         | <b>ÇIKTI</b>                            | <b>GİRDİ</b>                                            | <b>ÇIKTI</b>                            |
| <b>Stabilizasyon</b>         | O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>                      | HCN, NH <sub>3</sub> ,<br>ısı           | O <sub>2</sub>                                          | CO, CO <sub>2</sub> ,<br>HCN            |
| <b>Karbonizasyon</b>         | N <sub>2</sub> /Ar                                   | CO, H <sub>2</sub> ,<br>VOC             | N <sub>2</sub>                                          | CO, CO <sub>2</sub>                     |
| <b>Yüzey İşleme</b>          | HNO <sub>3</sub> ,<br>elektronik<br>emülsiyon        | Asidik atık,<br>durulama<br>suyu        | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                           | Asidik atık,<br>durulama<br>suyu        |
| <b>Pre-preg</b>              | Epoksi<br>reçine,<br>sertleştirici,<br>ayırma kağıdı | Kesim<br>fireleri,<br>solvent<br>buharı | Epoksi<br>reçine,<br>sertleştirici,<br>ayırma<br>kağıdı | Kesim<br>fireleri,<br>solvent<br>buharı |
| <b>Kürleme</b>               | Pre-preg,<br>vakum<br>torbası                        | Kullanılmış<br>torba, reçine<br>artığı  | Pre-preg,<br>vakum<br>torbası                           | Kullanılmış<br>torba, reçine<br>artığı  |
| <b>Son<br/>Şekillendirme</b> | Su                                                   | Karbon<br>epoksi tozu,<br>su            | Su                                                      | Karbon<br>epoksi tozu,<br>su            |

Pultrüzyon yöntemiyle CFRP bar üretiminin çevre etkileri de çeşitli araştırmalarda değerlendirilmektedir. Söz konusu çalışmalarda görülen ortak sonuç, CFRP üretim süreçlerinin çevre etkisinin hammadde edinim süreçlerine göre daha düşük olduğu yönündedir (Stoiber, N., vd.). Tez çalışması içerisinde CFRP yaşam döngüsünün sağlıklı bir analizinin elde edilebilmesi ve sürece ilişkin verilerin anlamlandırılabilmesi adına hammadde edinim süreçleri için yürütülen çalışmanın üretim süreçleri için de tekrarlanması uygun görülmektedir. Ancak CFRP’nin yaşam döngüsü değerlendirme çalışmalarında hammadde edinimi ve üretim süreçleri süreklilik gösterdiği için YDD’nin A1 ve A3 aşamaları birlikte ifade edilmekte, yalnızca A3 aşamasını gösteren kaynaklara rastlanmamaktadır.

**Tablo 4.6** Küresel Isınma Etkisi, Asidifikasyon Potansiyeli ve Fosil Yakıt Kullanımı Kriterleri Çerçevesinde 1 Kg CFRP'nin Hammadde Edinim ve Üretim Süreçlerinin (A1-A3) Çevre Etkisi Değerleri (Stoiber, N., vd.; Kromoser, B., vd.; Solidian EPD)

| ÜRÜN | ÜRÜN TİPİ | MİKTAR | GWP<br>[kgCO <sub>2</sub> eq] | AP<br>[kgSO <sub>2</sub> eq] | ADPf<br>[MJ] |
|------|-----------|--------|-------------------------------|------------------------------|--------------|
| CFRP | Bar       | 1 Kg   | 18,20                         | 0,12                         | 173          |
|      | Kumaş     | 1 Kg   | 18.40                         | 0,19                         | 281          |

CFRP yaşam döngüsünün A1-A3 aşamaları bağlamında üretilen ve Tablo 4.6'da sunulan çevresel etki verileri incelendiğinde üretilen CFRP'nin formunun da söz konusu etkilerin farklılaşmasında belirleyici olduğu görülmektedir. Tez kapsamında yapı ürünü olarak taşıyıcı kiriş içerisinde donatı olarak bar formunda kullanılan CFRP'ye ait veriler bu bağlamda önemli bulunmaktadır.

PAN kaynağından edinilen karbon fiber ve reçinenin uygun biçimde birleştirilmesi, şekillendirilmesi ve kullanıma hazır duruma getirilmesi süreçlerinde oluşan çevre etkilerinin hala yüksek olduğu görülmektedir. Buna karşın CFRP'nin niteliklerinin yaşam döngüsünün kullanım ve sonraki aşamalarındaki çevresel etkileri azalttığı; hammadde edinimi ve üretim süreçlerindeki olumsuz değerleri dengeleyebildiği ve CFRP'yi kullanılabilir bir ürün haline getirebildiği bilinmektedir. Sözü edilen olumsuzlukların azaltılması ve dolayısıyla CFRP'lerin olumlu niteliklerinin ön plana çıkarılması hedefi, yapı ürünü olarak CFRP üzerine yürütülen çalışmaların artmasının başlıca nedenleri arasında görülmektedir. CFRP kullanım süreçlerinin yapı taşıyıcı sistemlerine sağlayabileceği faydaların ve söz konusu süreçlerde dikkat edilmesi gereken riskli durumların ayrı bir başlık altında incelenmesi de CFRP yaşam döngüsünün kavranması açısından önemli bulunmaktadır.

#### 4.1.3 CFRP'lerin Kullanım Süreçlerinin YDD Bağlamında İncelenmesi

CFRP kullanımı, üretimden geri dönüşüme ya da bertaraf işlemlerine kadar olan süreci kapsamaktadır. Tez çalışmasının bu bölümünde yapılarda kullanılan CFRP'lerin yararlı kullanım ömürleri süresince neden oldukları doğal çevre etkisi incelenmektedir. Çalışma kapsamında CFRP dışındaki malzemelerle karşılaştırılabilir bilgilerin üretilmesi adına bu etkiler doğrudan ve dolaylı etkiler olarak ayrıştırılmaktadır.

Yapı ürünlerinin kullanımının devam edebilmesi için olağan koşullarda gereksinim duyulan enerji tüketimi, gözlemlenen kaynak kullanımı, gaz ya da partikül salınımı, vb. durumlar doğrudan etkiler bağlamında incelenmektedir. Bu doğrudan etkilere operasyon süreçleri ya da bakım ve onarım gibi işlemler de neden olabilmektedir. Yapı taşıyıcılarında kullanılan CFRP'ler ise yapısal niteliklerini uzun süre ek bakıma ihtiyaç duymadan koruyabilmektedir. Bu durumun nedeni CFRP'nin kimyasal olarak aktif olmayan (inert) bir ürün olmasıdır. Yapılarda en çok karşılaşılan donatı hasarı olan korozyona karşı bu niteliği sayesinde korunmaktadır. Olağan durumda herhangi bir gaz ya da partikül salınımına da neden olmaması nedeniyle CFRP'lerin kullanım sürecindeki doğrudan etkileri göz ardı edilmektedir.

CFRP'lerin yapının hangi bölümünde ve hangi formda kullanıldığı da doğrudan çevresel etkilerini belirlemektedir. Taşıyıcı elemanların yüzeylerinde ve içerisinde kullanılan CFRP'lerin farklı ihtiyaçları da beraberinde getirdiği gözlemlenmektedir. Örnek olarak UV dayanımı düşük olduğu için yüzeyde kullanılan CFRP'ler güneş ışığına doğrudan maruz kalmamalıdır. Bu nedenle üzerlerinin kaplanması ya da UV dayanımlı boyaların da CFRP'lerle birlikte kullanılması gerekmektedir. Bu durum CFRP'ler açısından bir kusur olmakla birlikte günümüzde neredeyse bütün yapılarda cephedeki taşıyıcı eleman yüzeyleri çeşitli yönetmelikler uyarınca kaplandığı için yapı endüstrisinin işleyişi açısından önemli bir değişime neden olmamaktadır.

Yapı ürünleri ve malzemeleri, kullanım süreleri boyunca çevresel koşullarla ve birbirleriyle etkileşmekte, bu nedenle yapının toplam çevre etkisinde çeşitli değişimler oluşabilmektedir. Ürünlerin çevresel etkilerle hasar alması ya da zamanla eskimesi nedeniyle yenilenmeleri bu etkilerin düzeyini belirlemektedir.

Dolaylı çevresel etkiler bağlamında incelenen söz konusu durumlar yapı ürününün kullanım biçimine göre farklılaşmaktadır. Bu bağlamda CFRP'lerin ise hem faydalı hem de riskli niteliklere sahip olduğu gözlemlenmektedir. Faydalı niteliklerinin kaynağı büyük oranda mekanik performans ile ilişkiliyken karşılaşılabilecek riskler ürünü oluşturan malzemelerin kimyasal davranışlarından kaynaklanmaktadır.

CFRP'nin yapıdaki dolaylı çevre etkisinin azaltılmasına sağladığı katkılar yapı taşıyıcı sistemlerinde ihtiyaç duyulan beton miktarının azaltılması üzerinden değerlendirilebilmektedir. Korozyon direnci nedeniyle nem gibi yapıda sıklıkla karşılaşılan çevresel etkilere karşı beton ile ek olarak sarılmaları gerekmemektedir. Günümüzde özellikle yapı cephelerindeki taşıyıcı elemanlarda tercih edilen bu uygulamaya gereksinimin ortadan kalkması, CFRP'lerin yaşam döngüsü içerisinde doğrudan incelenmemesine rağmen farklı iklimlerdeki yapılarda farklı seviyelerde malzeme tasarrufuna neden olmaktadır (Venigalla, S.G., vd.; Kim, K.M., Cheon, J.H.; Portal, N.W.).

Hem kendi hafifliği hem de bu gibi malzeme tasarrufları sağlaması nedeniyle yapının toplam ağırlığını azaltan CFRP'ler, yapı temellerindeki beton kullanımının düşürülmesine de yardımcı olabilmektedir. CFRP kullanımıyla dolaylı olarak elde edilen bu kazanımların düzeyinin anlaşılabilmesi için beton üretiminin çevreye verdiği zararın da ifade edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda yapı ağırlığının büyük bir bölümünü oluşturan betonun üretiminde ortaya çıkan çevre etkisiyle ilgili veriler Tablo 4.7'de gösterilmektedir. Yapılarda yaygın olarak kullanılan C30 tipi betonun daha dayanıklı betonlara göre düşük olmakla birlikte önemli oranda çevresel etkiye neden olduğu görülmektedir. Betonun çevre etkisi yüksek bir malzeme olması nedeniyle CFRP'nin beton tüketimini azaltabilmesi önemli bulunmaktadır.

**Tablo 4.7** Küresel Isınma Etkisi, Asidifikasyon Potansiyeli ve Fosil Yakıt Kullanımı Kriterleri Çerçevesinde 1 Kg Beton Üretiminin Çevre Etkisi Değerleri (Becke, A., vd.)

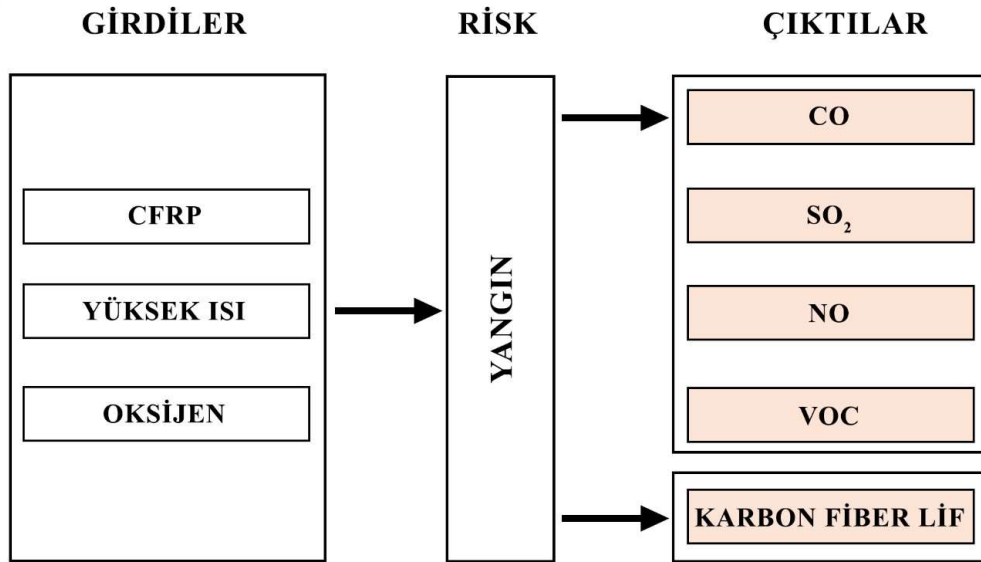
| <b>Beton Tipi</b> | <b>GWP</b><br>[kgCO <sub>2</sub> eq] | <b>AP</b><br>[kgSO <sub>2</sub> eq] | <b>ADPf</b><br>[MJ] |
|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| C30/37            | 232                                  | 3.2E-1                              | 845                 |
| C50/60            | 335                                  | 4.5E-1                              | 1230                |
| C70/85            | 431                                  | 5.7E-1                              | 1567                |

Yapı yaşam döngüsünün çevre etkisini dolaylı olarak etkileyen bir diğer durum ise CFRP'lerin piezorezistif nitelikte olmasıdır. Bu nitelik bir malzemenin maruz kaldığı mekanik gerilme kuvvetlerinin değişmesiyle elektrik alan üretebilmesi anlamına gelmektedir. CFRP'lerin yapılarda akıllı malzeme olarak kullanılmasını sağlayan bu nitelik yapı sağlığının kesintisiz olarak izlenebiliyor olmasını sağlamaktadır. Özellikle deprem gibi kuvvetler nedeniyle hareket eden yapının taşıyıcılarında oluşan mekanik gerilim değişimleri, taşıyıcı içerisindeki CFRP'lerin de manyetik alanlarını değiştirmekte ve bu durumun uygun sensörlerle algılanmasıyla yapı taşıyıcı sisteminin mevcut durumu simüle edilmektedir. Bu akıllı sistemler sayesinde yapıda oluşan hasarlar henüz büyümeden tespit edilmekte ve çevresel açıdan düşük maliyetle onarılabilmektedir. Onarım süreçlerini iyileştiren bu durum yapının daha uzun süre sağlıklı kalabilmesini sağlamaktadır.

Doğrudan ve dolaylı çevre etkileri çerçevesinde belirtilen faydaları bulunan CFRP'lerin kullanım süreçleri doğal çevre ve insan sağlığı bağlamında çeşitli dolaylı riskler de barındırmaktadır. Özellikle yangın durumunda bu risklerin oluştuğu gözlemlenmektedir. CFRP'nin yüksek ısıya karşı korunmadığı durumlarda ürünün yanması ile içeriğindeki malzemelerin birbirinden ayrışması ve yangın sırasında çeşitli zararlı salınımların gerçekleşmesi hem doğal çevreyi hem de insan sağlığını olumsuz etkilemektedir.

CFRP'nin bu biçimde hasar görmesi sonrası havaya karışan ve solunması durumunda sağlık riskleri oluşturabilen maddeler Şekil 4.8'de gösterilmektedir. Yanma süresince CFRP'den kaynaklanan karbonmonoksit (CO), sülfür dioksit (SO<sub>2</sub>), azot monoksit (NO) ve çeşitli uçucu gaz salınımları tespit edilmektedir (Laurenço, C. vd.). Bu gazlara maruz kalmanın hipoksi, solunum yollarında ve gözlerde tahriş oluşumu gibi kısa süreli; kronik bronşit ve akciğer hasarı gibi uzun süreli etkileri olabilmektedir.

CFRP'nin yanmasıyla birlikte kompoziti oluşturan karbon fiber lifleri de zaman içerisinde birbirinden ayrılmakta ve solunabilir büyüklüklerde salınmaktadır. Ancak bu liflerin solunmasıyla ilgili yapılan deneylerde bu liflerin yol açtığı herhangi bir sağlık sorunu gözlemlenmemiştir (Nasa, 2015; Holt, P.F., Horne, M.).



**Şekil 4.8** CFRP'lerin Yanması Sonucunda Salındığı Gözlemlenen Partikül ve Zararlı Gazlar

Kullanım süreçlerinde olağan durumda ek bir çevresel etkiye neden olmayan CFRP'lerin bu gibi risklere karşı korunmaları için yapı tasarım süreçlerinde doğru stratejilerin seçilmesinin gerektiği değerlendirilmektedir. İfade edilen etkilerden kaçınmak adına CFRP'lerin yüksek sıcaklıklardan korunması ve yangınla direkt temasının kesilmesi gerekmektedir. Böylece yangın durumunda CFRP'nin deforme olması ve zararlı gaz salınım gerçekleştirmesi önlenabilmektedir. Taşıyıcı eleman içerisinde kullanılmaları durumunda ek bir uygulamaya ihtiyaç duymayan CFRP'lerin taşıyıcı elemanlarının yüzeylerine yerleştirilmeleri durumunda ise düşük ısı iletkenliğine sahip kaplamalarla birlikte kullanılmaları gerekebilmektedir.

#### 4.1.4 CFRP'lerin Geri Dönüşüm ve Atık Oluşum Süreçlerinin YDD

##### Bağlamında İncelenmesi

Yararlı kullanım ömrünü tamamlayan CFRP'ler yeniden kullanılmak üzere geri dönüştürülmekte ya da yaşam döngülerini tamamlayarak atık haline gelmektedir. Günümüzde CFRP geri dönüşüm teknikleri henüz yaygın olarak kullanılmamaktadır. Dolayısıyla dünyada bu alandaki genel strateji CFRP'lerin enerji kazanımlı yakma işlemiyle bertaraf edilmesi ya da dolgu malzemesi olarak toprak altında depolanmasıdır. Ancak bu yöntemlerin yüksek düzeyde zararlı gaz salınımına, hava ve toprak kirliliğine neden olduğu bilinmektedir. Tablo 4.8'de gösterilen değerler, geri dönüştürülmek yerine depolanan ya da yakılan CFRP'lerin yararlı kullanım süreçleri sonrasında çevreye verdikleri zararı tüketilen enerji ve salınan sera gazları üzerinden ifade etmektedir.

**Tablo 4.8** Kullanım ömürleri tamamlanan CFRP'lerin dolgu malzemesi olarak depolanması ya da enerji kazanımlı yakılması sonucunda enerji tüketimi ve küresel ısınma potansiyeli kriterleri çerçevesinde oluşan çevre etkisi (Wei, Y., Hadigheh, S.A.)

| Atık Bertaraf Yöntemi  | GWP<br>(kgCO <sub>2</sub> eq) | Enerji Tüketimi<br>(MJ/kg) |
|------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Dolgu Olarak Depolama  | 2,4                           | 0,26                       |
| Enerji Kazanımlı Yakma | 2,6                           | 33,00                      |

Kullanım ömrü tamamlanan CFRP'lerin daha etkili değerlendirilebilmesi ve çevresel etkilerin azaltılması için birçok bilimsel araştırma yürütülmektedir. Bu araştırmalardan elde edilen veriler ışığında çeşitli ülkelerin CFRP geri dönüşümü ve bertaraf süreçleriyle ilgili net yasalar oluşturması üretim sektörlerindeki geri dönüşüm çalışmalarını da hızlandırmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda günümüzde birçok geri dönüşüm yönteminin oluşturulduğu gözlemlenmektedir.

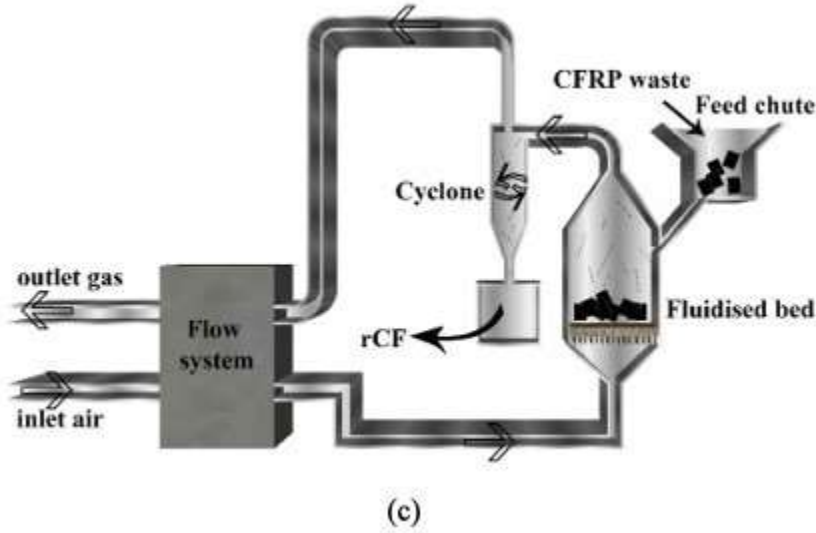
CFRP atıklarının geri dönüştürülmesi için geliştirilen teknikler mekanik, termal ve kimyasal geri dönüşüm yöntemleri olarak gruplandırılmaktadır (Backes, J.G.). Mekanik geri dönüşümde CFRP'ler çeşitli parçalayıcılardan geçirilmekte ve küçük

tanecikler haline getirilerek yeniden kullanıma hazırlanmaktadır. Bu süreç, ek bir girdi gerektirmemesi nedeniyle basit şekilde yürütülebilmekte, ancak işlem sonucunda karbon fiberlerin dayanımları büyük oranda düşmektedir. Bu nedenle mekanik geri dönüşümle elde edilen karbon fiberler yapılar yerine plastik ürünler gibi kritik olmayan alanlarda ikincil donatılar olarak kullanılmaktadır. Mekanik geri dönüşüm bazı durumlarda diğer geri dönüşüm yöntemlerini uygulamak için fazla büyük olan CFRP atık parçalarının geri dönüşüme hazırlanması için bir ön işlem olarak da değerlendirilebilmektedir (Nekouei, R., vd.).

Termal geri dönüşüm süreçleri, uygulanan tekniğe göre üç farklı şekilde isimlendirilmektedir. Bunlar piroliz, oksidasyon ve akışkan yatak yöntemleridir. Piroliz yönteminde CFRP'ler oksijensiz bir ortamda nitrojen gazı (N<sub>2</sub>) ve ısıtıcılarla ayrıştırılmakta ve karbon fiberlerin nitelikleri mekanik ayrıştırmaya göre daha iyi korunmaktadır. 6-60mm aralığındaki uzunluklarda karbon fiberlerin elde edildiği bu yöntemde uygun sıcaklık ve işlem süresinin dikkatle uygulanması gerekmektedir. Sıcaklıktaki artış ya da gereğinden uzun işlem süresinin karbon fiberlerin mekanik ve kimyasal niteliklerine zarar verdiği gözlemlenmektedir (Wei, Y., Hadigheh, S.A.).

Oksidasyon yönteminde de pirolize benzer bir teknik uygulanmakta, ancak bu yöntemde CFRP hava ile temas ettirilerek ısıtılmaktadır. CFRP kompozitin hava ile teması sonrasında reaktif hale gelmesi, oksidasyon tekniğinin daha düşük sıcaklıklarda da sonuç vermesini sağlamaktadır. Pirolizde yaklaşık 700°C'de gerçekleştirilen ayrıştırma işlemi, oksidasyon yöntemiyle 600°C'de yürütülebilmektedir (Meyer, L.O., vd.).

Bir diğer termal geri dönüşüm yöntemi ise akışkan yatak tekniği olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde silis kum yatağının üzerinde bulunan CFRP atıkları sıcak hava akımıyla ısıtılmaktadır. Hava akımıyla kum yatağından dışarı itilen karbon fiberler sistem içerisinde bulunan toplama bölümü içerisinde biriktirilmektedir. Bu yöntemin uygulanış şeması Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Akışkan yatak tekniği, tasarımı nedeniyle küçük ve büyük ölçekli birçok ayrıştırma tesisi için uygun bulunmakta, ancak geri dönüştürülmüş fiberlerin bu süreçte kabardığı ve işlem sonucunda sabit ölçülerde ürün elde edilemediği gözlemlenmektedir (Pickering, S.; Karupannan, S., Kärki, T.).



**Şekil 4.9** CFRP'lerin ayrıştırılması süreçlerinde akışkan yatak yönteminin kullanımı (Wei, Y., Hadigheh, S.A.).

Kimyasal geri dönüşüm süreçlerinde solvoliz ve elektrokimyasal geri dönüşüm teknikleri uygulanmaktadır. Solvoliz yönteminde asetik asit ve süperkritik akışkan yardımıyla CFRP matrisi ayrıştırılmaktadır. Bu süreçlerin belirli sıcaklığa ve basınca sahip bir ortamda yürütülmesi sağlanmaktadır (La Rosa, A.D., vd.). Bu yöntemdeki çevresel etkinin artmasındaki en önemli nedenin işlem sonrası oluşan sıvı atık olduğu belirtilmektedir. Bu durum da solvolizin endüstriyel ölçekte yaygınlaşması adına bir engel olarak görülmektedir (Wei, Y., Hadigheh, S.A.).

Elektrokimyasal geri dönüşüm yöntemiyle CFRP'nin ayrıştırılmasında elektroliz kullanılmaktadır. Atık CFRP, sodyum klorür (NaCl) gibi uygun bir bileşikle oluşturulmuş çözeltiye çelikle birlikte yerleştirilmektedir. Bu sistemde çelik katot, kompozit atık ise anot olarak yer almakta ve CFRP içerisindeki epoksi reçine elektrolizle ayrıştırılmaktadır. Tamamlanması bazı durumlarda 24 güne kadar uzayabilen bu işlemin en büyük dezavantajlarının uzun işlem süresi ve fiber yüzeylerindeki yetersiz ayrışma olduğu belirtilmektedir (Sun, H., vd.).

Sözü edilen mekanik, termal ve kimyasal geri dönüşüm yöntemlerinin her birinde çeşitli çevre etkileri oluşmaktadır. Farklı girdilere ve çıktılara sahip olan bu süreçlerin tutarlı biçimde karşılaştırılabilmesi için ise literatürdeki araştırmaların sıklıkla sera gazı salınımı ve enerji tüketimi çerçevesinde yürütüldüğü gözlemlenmektedir. Bu nedenle aşamaları açıklanan geri dönüşüm tekniklerinin çevre etkilerinin karşılaştırılmasında da GWP ve enerji tüketimi kriterlerinin

kullanılması uygun görülmektedir. Bu bağlamda Tablo 4.9’da sunulan değerler 1 kilogram CFRP’nin geri dönüşüm süreçlerinde oluşan çevre etkisini belirtilen geri dönüşüm senaryoları çerçevesinde ortaya koymaktadır.

**Tablo: 4.9** 1kg CFRP atığının işlenmesi için mekanik, termal ve kimyasal geri dönüşüm süreçlerindeki çevresel etki düzeyleri (Wei, Y., Hadigheh, S.A.)

| Geri Dönüşüm Türü | Geri Dönüşüm Yöntemi         | GWP<br>[kgCO <sub>2</sub> eq] | Enerji<br>Tüketimi<br>[MJ/kg] |
|-------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| <b>Mekanik</b>    | Mekanik Geri Dönüşüm         | -23,20                        | 25,66                         |
| <b>Termal</b>     | Piroliz                      | -9,60                         | 16,71                         |
|                   | Oksidasyon                   | -9,60                         | 22,58                         |
|                   | Piroliz + Oksidasyon         | -10,50                        | 22,97                         |
|                   | Akışkan Yatak                | 3,80                          | 19,02                         |
| <b>Kimyasal</b>   | Solviliz (asidik ortamda)    | -16,70                        | 20,47                         |
|                   | Solviliz (bazik ortamda)     | -16,70                        | 16,32                         |
|                   | Elektrokimyasal Geri Dönüşüm | -16,00                        | 84,23                         |

İncelenen geri dönüşüm teknikleri arasında mekanik geri dönüşüm tekniklerinin çevre etkisi anlamında iyi sonuçlar verdiği, ancak karbon fiber niteliklerini yeterli ölçüde koruyamadığı için uygun bulunmadığı görülmektedir. Termal geri dönüşüm tekniklerinin ise yüksek sıcaklıklar gerektirmesi nedeniyle karbon fiber özelliklerini bozabildiği, istenen sonuçların elde edilmesi için henüz geliştirilmesi gerektiği belirtilmektedir. Bu nedenlerle termal geri dönüşümün günümüz şartlarında yalnızca kullanılabilecek tek alternatif olduğu durumlarda tercih edilmesi önerilmektedir (Limburg, M. et al). Bununla karşın kimyasal bir geri dönüşüm tekniği olan solviliz yöntemi ise hem enerji tüketimi hem de küresel ısınma potansiyeli kriterlerinde oldukça iyi sonuçlar vermektedir. CFRP

niteliklerindeki bozulmalar için geliştirilebilecek çözümler sonrasında ise bu geri dönüşüm alternatifinin daha da yaygınlaşabileceği düşünülmektedir.

Alternatifleri ifade edilen CFRP ayrıştırma stratejilerinin çevresel etki sonuçlarını belirleyen en önemli bileşen, ürünün içerisinde bulunan emprenye malzemesidir. Bu bağlamda geri dönüşüm süreçlerinde ayrıştırmanın daha kolay olması açısından en uygun malzemenin epoksi reçine olduğu gözlemlenmektedir. Kauçuk türevi emprenye elemanlarının kullanıldığı durumlarda da ayrıştırmanın yapılabildiği, ancak hasır formundaki donatı elemanlarının bu yöntemde hasar almaya eğilimli olduğu ifade edilmektedir. CFRP üretiminde mineralli emprenye uygulanması ya da hiç emprenye yapılmaması durumunda ise donatıların geri dönüşüm işlemlerinde kırıldığı, deforme olduğu ve ciddi hasar aldığı görülmektedir (Kimm, M., vd.).

Yapılarda donatı elemanı olarak kullanıldıktan sonra geri dönüştürülen karbon fiberler, niteliklerini ne kadar koruduklarına bağlı olarak aynı ya da farklı bir amaçla tekrar kullanılabilir. Ayrıştırılmış karbon fiberlerin fiber betonlarda yeniden kullanımı buna örnek olarak verilebilir. Fiber betonlarda donatı olarak karbon fiberler, bar formundaki karbon fiber donatılardan farklı olarak beton karışımına ufak parçalar halinde direkt olarak eklenmekte ve herhangi bir lif yönlendirmesi yapılmamaktadır.

Geri dönüştürülmüş bir malzeme olmasına rağmen bu alanda özellikle en yaygın kullanılan alternatif olan çelik fiberlere göre mekanik niteliklerinin çok daha iyi olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda aynı miktarda beton içerisinde çelik fiberin dörtte biri kadar kullanıldığında bile mekanik nitelikler bağlamında 18% daha iyi sonuçlar alındığı aktarılmaktadır. Bu bağlamda değerlendirildiğinde özellikle farklı alanlarda oluşan atıkların da bu amaçla kullanılabileceği öngörülmektedir. Örneğin Almanya'nın yıllık fiber beton ihtiyacının 50 kiloton olduğu belirtilmektedir. Bir çalışmada yapılan hesaplamalar sonucunda bu ihtiyacın 10%'luk bölümünün karbon fiberlerle karşılanması durumunda dahi Avrupa'nın yıllık toplam karbon fiber atığının üçte ikisinin geri dönüştürülebileceği belirtilmektedir (Kimm, M., 2019).

Dokusuz karbon fiberler olarak adlandırılan ve yüzeyleri daha pürüzsüz olan karbon fiberler ise geri dönüştürüldükleri durumlarda yapılarda

kullanılmamaktadır. Bunun en önemli nedeni olarak ise pürüzsüz yüzey niteliklerinin beton malzemeye tutunmayı engellemesi olarak gösterilmektedir. Bu nedenle daha spesifik kompozitlerin üretilmesinde kullanımı uygun bulunmaktadır (Heilos, K.).

Yapı sektörü dışında geri dönüştürülmüş karbon fiber kullanımına örnek olarak ise otomotiv sektöründeki çalışmalar gösterilebilir. Özellikle iplik formundaki karbon fiberlerin kullanımı ile ilgili potansiyellerin bulunduğu değerlendirilmektedir. Karbon fiberlerin sahip olduğu ve yapılarda da yararlanılan niteliklerden biri olan iletkenlik, özellikle otomotiv sektöründe önemli kazanımların elde edilmesi için değerli görülmektedir (Hengstermann, M.). Çeşitli kimyasalların kullanıldığı plastik üretiminde de karbon fiber kullanımının olanakları araştırılmaktadır. Organik malzeme sentezinde ve nanoteknoloji çalışmalarında kullanılan kalsiyum karbür yerine geri dönüştürülmüş CFRP kullanımı önemli bir potansiyel barındırmaktadır (Schueppel, D., vd.; Konar, S.). Henüz araştırmaların geliştirilmesi gerekmesi birlikte bazı araştırmacılar çelik üretim süreçlerinde ihtiyaç duyulan karbon malzemenin de geri dönüştürülmüş CFRP'lerden elde edilebileceğiyle ilgili çıkarımlar yapmaktadır (Schueppel, D., vd.; Wexler, M., vd.).

Tez çalışması kapsamında incelenen CFRP'lerin hammadde edinim, üretim, kullanım, geri dönüşüm ve atık oluşumu süreçleri özellikle yapı sektörünün doğal çevre ile olan ilişkisinin iyileştirilmesi adına önemli bir potansiyel barındırmaktadır. Söz konusu potansiyellerin yapı sektörünün işleyişini nasıl değiştirebileceğinin ve endüstrideki güncel durumun daha bütüncül bir şekilde aktarılabilmesi için ise belirli referanslarla karşılaştırmaların yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda CFRP'nin yaşam döngüsü süreçlerinin yapılardaki en yaygın donatı türü olan çelik donatıların yaşam döngüsü süreçleriyle karşılaştırılması, CFRP'nin yapı ürünü olarak potansiyelinin kavranması için önemli bulunmaktadır.

## 4.2 Bulgular ve Bölüm Değerlendirmesi

Çalışma içerisinde hammadde edinimi, üretim, kullanım, atık bertarafı ve geri dönüşüm süreçleri incelenen CFRP'ler gibi diğer yapı ürünleri de çeşitli çevresel etkilere neden olmaktadır. Kullanılan her ürünün özgün yaşam döngüsü koşulları süreçleri ve dolayısıyla bu çevresel etkileri farklılaştırmaktadır. Bununla birlikte söz konusu farklı ürünlerin yaşam döngüsü süreçlerindeki çevre etkilerini belirli ortak parametreler altında gruplandırmak ve ürünlerin yaşam döngülerinin karşılaştırılmak için günümüzde YDD metodolojisi kullanılmaktadır. Derinleşen çevresel krizler dolayısıyla yapı tasarımında malzeme ve ürün seçiminin öneminin artmasıyla da YDD metodolojisinin yapılardaki kullanım alanının genişlediği görülmektedir.

Tez çalışması kapsamında yapı ürünü olarak ele alınan CFRP'nin yapı endüstrisine sağlayabileceği katkıların ve CFRP yaşam döngüsünde geliştirilmesi gereken alanların somutlaştırılabilmesi; çalışmanın hipotezinin sınanabilmesi adına YDD metodolojisi çerçevesinde güncel durum ile bir karşılaştırma yapılması uygun bulunmaktadır. Söz konusu gerekçelerle yapı endüstrisinde güncel olarak en sık kullanılan betonarme çelik donatılara ait literatürdeki YDD sonuçları incelenmekte ve yaşam döngüsünün çeşitli aşamalarındaki çevre etkileri CFRP ile aynı parametreler üzerinden karşılaştırılmaktadır.

Çelik yaşam döngüsü ile ilgili yapılan çalışmalarda da çevresel etki değerlerinin CFRP'lerdekine benzer nedenlerle birbirinden farklılaşabildiği gözlemlenmektedir. Değerler arasında oluşabilecek bu farklılığa örnek olarak çeşitli ülkelerdeki EPD verileri gösterilebilmektedir. Ülkelerin sahip olduğu altyapı olanaklarının, enerji edinim yöntemlerinin, uygulamakta oldukları yasaların birbirinden farklı olması farklı ülkelerdeki yaşam döngüsü süreçlerinin ayrışmasına neden olabilmektedir. Bu bağlamda günümüzde gözlemlenen farklılıklar EPD kaynaklarından alınan verilerle Tablo 4.10'da gösterilmektedir. Söz konusu tabloda çalışmanın genelinde kullanılan GWP, AP ve ADPf kriterleri çerçevesinde edinilen veriler sunulmakta ve veriler çelik üretim süreçlerini kapsamaktadır.

Tablo incelendiğinde üretimde basit oksijen fırınının kullanıldığı Ukrayna haricindeki ülkelere ait veriler bir kg çelik üretiminde oluşan CO<sub>2</sub> salınımının 1kg seviyesini aşmadığını, SO<sub>2</sub> salınımının 6,7E-4kg ile 4,4E-3kg arasında, fosil kaynak tüketiminin de 2MJ ile 11,8MJ arasında değiştiğini göstermektedir.

**Tablo 4.10** Küresel Isınma Etkisi, Asidifikasyon Potansiyeli ve Fosil Yakıt Kullanımı Kriterleri Çerçevesinde 1 Kg Çelik Üretimine Yönelik EPD verileri

| Ülke           | Veri Kaynağı                | Üretim Yöntemi     | GWP<br>[kgCO <sub>2</sub> eq] | AP<br>[kgSO <sub>2</sub> eq] | ADPf<br>[MJ] |
|----------------|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------|
| <b>Almanya</b> | Ift Rosenheim GmbH (2018)   | Elektrik Ark Ocağı | 0.2                           | 6.7E-4                       | 4.0          |
| <b>İsveç</b>   | EPD International AB (2015) | Elektrik Ark Ocağı | 0.4                           | 7.8E-4                       | 2.0          |
| <b>İspanya</b> | BRE Global (2019)           | Elektrik Ark Ocağı | 0.5                           | 1.5E-3                       | 5.8          |
| <b>Türkiye</b> | BRE Global (2018)           | Elektrik Ark Ocağı | 1                             | 4.4E-3                       | 11.8         |
| <b>Ukrayna</b> | BRE Global (2018)           | Oksijen Fırını     | 2.6                           | 2.9E-3                       | 24.9         |

Tabloda görülen veriler ışığında çelik ve CFRP'nin YDD bağlamında karşılaştırılması sırasında kullanılan çevresel etki analizlerinde enerji kaynakları gibi altyapı olanaklarının olabildiğince benzer tutulmasının, böylece literatürden elde edilen verilerdeki farkın direkt olarak ürünlerin yaşam döngüsü süreçleri arasındaki farklardan kaynaklandığından emin olunmasının önemi vurgulanmaktadır.

Çelik üretim süreçleriyle ilgili literatürdeki kaynaklardan elde edilen verilerin arasındaki yüksek sapma miktarının da CFRP yaşam döngülerindeki sapmaya benzer şekilde yüksek olduğu Tablo 4.11'de gösterilmekte, sunulan veriler karşılaştırmanın koşulları ile ilgili belirtilen faktörlerin etkisini doğrulamaktadır.

**Tablo 4.11** Küresel Isınma Etkisi, Asidifikasyon Potansiyeli ve Fosil Yakıt Kullanımı Kriterleri Çerçevesinde 1 Kg Çelik Üretiminin Minimum ve Maksimum Çevre Etkisi Değerleri (Dünya Çelik Birliği; Omar, S., Abdelhadi A.; Khorgade, P., vd.; Stoiber, N., vd;)

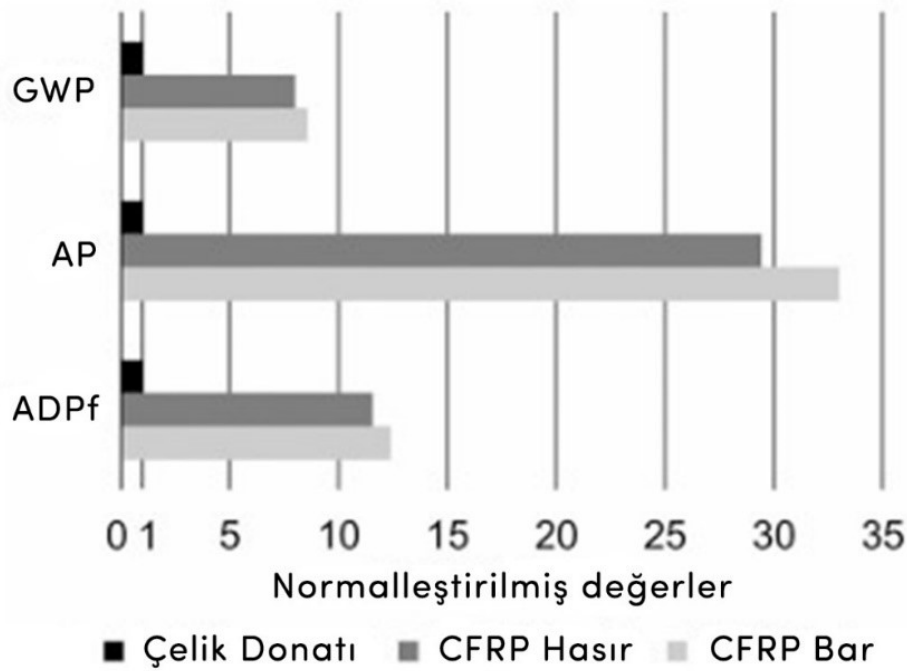
|                 | <b>GWP</b><br>[kgCO <sub>2</sub> eq] | <b>AP</b><br>[kgSO <sub>2</sub> eq] | <b>ADPf</b><br>[MJ] |
|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| <b>Minimum</b>  | 0,20                                 | 7,8E-4                              | 2,00                |
| <b>Maksimum</b> | 3,02                                 | 6,4E-3                              | 27,30               |

Yapı ürünü olarak CFRP'nin yaşam döngüsü süreçlerinin YDD bağlamında çelik donatılarla karşılaştırılmasında kullanılan fonksiyonel birim de en az veri kaynakları kadar önemli bulunmaktadır. Literatürdeki YDD çalışmalarının yaygın olarak ağırlık üzerinden yapıldığı görülmektedir. Bu perspektifle bakıldığında ulaşılan sonuçlar CFRP yaşam döngüsünün doğal çevre açısından çeliğe göre daha zararlı olduğu izlenimini uyandırabilmektedir. Ancak CFRP'lerin ve çelik donatıların mekanik niteliklerinin birbirinden çok farklı olduğu bilinmektedir. Yapı taşıyıcılarında kullanılacak ürünlerin karşılaştırılmasında bu nitelikler oldukça büyük öneme sahiptir. Bu durumun nedeni ise söz konusu ürünlerin yapıda hangi miktarda kullanılacağına ürünün mekanik niteliklerine sıkı biçimde bağlı olmasıdır.

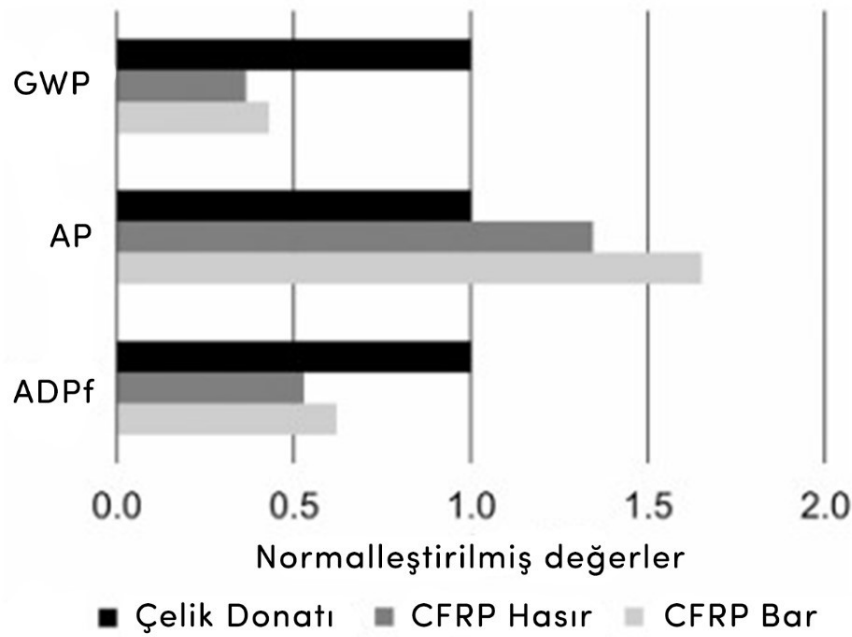
Örnek olarak 1 megapascal (Mpa) dayanım için üretilmesi gereken CFRP'nin ağırlığı çeliğe göre çok daha düşüktür. Bu nedenle CFRP ve çelik karşılaştırmasında fonksiyonel birim daha doğru seçilmelidir. Yapıda mekanik performansları ile ters orantılı miktarda kullanılan CFRP ve çelik donatıların çevre etkilerinin mekanik nitelikler üzerinden değerlendirilmesi gerekmektedir. Mekanik nitelikler üzerinden bir fonksiyonel birim seçilip, karşılaştırma bu bağlamda yapıldığında sonuçların önemli ölçüde değiştiği literatürdeki çalışmalarda görülmektedir. Yapılan karşılaştırmalarda fonksiyonel birim olarak ağırlığın ya da mekanik niteliğin seçilmesinin oluşturabileceği farklar Şekil 4.10'da ve Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Söz konusu şekillerdeki veriler sırasıyla küresel ısınma

potansiyeli, asidifikasyon potansiyeli ve fosil kaynak tüketimi kriterleri çerçevesinde çevresel etki değerleri sunmaktadır.

Şekil 4.10'daki grafikte 1kg üzerinden yapılan değerlendirmelerde çelik donatının küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon potansiyeli ve fosil kaynak tüketimi değerleri bir birim olarak alınmaktadır. Bu durumda 1kg CFRP'nin üretim süreçlerinin küresel ısınma potansiyelinin yaklaşık 10 kat, asidifikasyon potansiyelinin yaklaşık 30 kat, asidifikasyon potansiyelinin ise yaklaşık 12 kat fazla çıktığı görülmektedir. Şekil 4.11'deki grafikte ise 1 megapascal dayanıma sahip olacak miktarda çelik üretiminin neden olduğu çevresel kriterler bir birim olarak alınmaktadır. Değerler bu şekilde incelendiğinde 1Mpa kapasiteye sahip olacak miktarda üretilen CFRP'nin küresel ısınma potansiyelinin çeliğin yaklaşık 40%'ı kadar olduğu gözlemlenmektedir. Fosil yakıt tüketiminde de çeliğin çevre etkisinin yaklaşık 50%'sine ulaşıldığı, daha önce çeliğin 30 katı olarak ölçülen asidifikasyon potansiyelinin de çeliğin yaklaşık 1,5 katına kadar düştüğü görülmektedir.



**Şekil 4.10** Birer Kilogram Çelik Donatı, Hasır/Kumaş Formunda CFRP ve Bar Formunda CFRP Üretiminin Küresel Isınma Etkisi, Asidifikasyon Potansiyeli ve Fosil Kaynak Tüketimi Kriterleri Çerçevesinde Karşılaştırılması (Stoiber, N. Vd.)



**Şekil 4.11** Birer Megapascal (Mpa) Dayanıma Sahip Çelik Donatı, Hasır/Kumaş Formunda CFRP ve Bar Formunda CFRP Üretiminin Küresel Isınma Etkisi, Asidifikasyon Potansiyeli ve Fosil Kaynak Tüketimi Kriterleri Çerçevesinde Karşılaştırılması (Stoiber, N. Vd.)

Tez çalışmasında YDD bağlamında karşılaştırılan CFRP ve çelik donatıların bu detaylar göz önünde bulundurularak karşılaştırılmasında da tezin ikinci bölümünde teorik olarak üretilmiş olan 600cm x 30cm x 50cm ölçülerindeki kiriş elemanı kullanılmaktadır. İşlevsel eşdeğerliğin sağlanabilmesi adına söz konusu kirişin üretilmesi için gerekli olan miktarda CFRP ve çelik ele alınmakta ve çevresel performanslara ait bilgiler bu bağlamda sayısallaştırılmaktadır. Söz konusu kirişin üretilmesinde mekanik eşdeğerlik aynı çekme dayanımı değeri üzerinden değil, kirişin yapıda kullanıma uygunluğu üzerinden oluşturulmaktadır. Bu bağlamda CFRP'nin zayıf yönlerinin kompanse edilebilmesi ve yapı açısından uygun dayanımın sağlanabilmesi için emniyet katsayıları uygulanmaktadır.

Karşılaştırmada kullanılacak teorik kirişin oluşturulmasında çelik donatılarla 420 MPa çekme dayanımı sağlanacak miktarda; CFRP ile ise 850 MPa çekme dayanımı sağlanacak miktarda donatı kullanılması uygun görülmektedir. Tablo 2.7'de gösterilen veriler ışığında bu koşulların sağlanabilmesi için çelik kullanılan alternatifte 93,41 kg, CFRP kullanılan alternatifte ise 11,38 kg ürüne ihtiyaç olduğu tespit edilmektedir.

Ayrıca enerji kaynakları, yeniden kullanım varsayımları ve geri dönüşüm senaryoları gibi duyarlılığı yüksek değişimler aynı metodolojik çerçevede sabitlenmekte, böylece karşılaştırmanın tek değişiminin yapı ürünü olmasına özen gösterilmektedir. Hem CFRP hem de çelik yaşam döngüsü süreçleri ile ilgili çalışmalarda kullanılan küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon potansiyeli ve fosil kaynak tüketimi kriterleri bu karşılaştırmanın da temelini oluşturmakta ve ifade edilen çerçevede oluşturulan veriler tablolar halinde sunulmaktadır. Karşılaştırmanın sınırları yaşam döngüsünün hammadde edinimi, üretim, kullanım, bertaraf ve geri dönüşüm süreçlerini kapsayacak biçimde oluşturulmakta, bu süreçler uygun tablolar altında incelenmektedir.

#### **4.2.1 Hammadde Edinimi ve Üretim Süreçleri Bağlamında Çelik ve CFRP'nin Karşılaştırılması**

Çalışmanın bu alt bölümünde bar formunda çelik ve CFRP'nin yaşam döngüsünün başlangıç evresini oluşturan hammadde edinimi ve üretim süreçleri birlikte değerlendirilmektedir. YDD çalışmalarında A1 ve A3 kodlarıyla ifade edilen süreçler GWP, AP ve ADPf kriterleri çerçevesinde incelenmektedir. Çelik ve CFRP'nin ilgili süreçleri, gereksinim duydukları girdiler ve oluşturdukları çıktılar ile birbirlerinden ayrılmaktadır. Bu süreç ve akışlardaki ayrışma dolayısıyla söz konusu kategoriler çerçevesinde gözlemlenen çevresel etkiler de farklılaşmaktadır. Tablo 4.12'de gösterilen ilgili veriler bu farklılıkları nicel olarak ortaya koymakta ve iki yapı ürününün sistemli bir biçimde karşılaştırılabilmesini sağlamaktadır.

Yapı endüstrisinde yaygın olarak kullanılan çelik ile daha yeni bir alternatif olan CFRP'nin hammadde edinim ve üretim süreçlerinin karşılaştırılması, çelik donatıların çevresel yükünün yeni bir yapı ürününe göre ne düzeyde olduğunun anlaşılması açısından önemli bulunmaktadır. Karşılaştırılan ürünlerin bu bağlamda sahip olduğu olumlu ve olumsuz niteliklerin nesnel olarak ifade edilmesi, kullanım ve yaşam döngüsü sonu süreçlerinde gözlemlenen çevre etkilerinin de anlamlandırılabilmesi ve ürünlerin sunduğu olanakların kavranabilmesi açısından değerli görülmektedir.

**Tablo 4.12** 600cm x 30cm x 50cm Boyutlarındaki Betonarme Kiriş için Gerekli Olan Miktardaki Çelik ve CFRP'nin Hammadde Edinimi ve Üretim Süreçlerinde GWP, AP ve ADPf Çerçevesinde Gözlemlenen Çevresel Etki Düzeyleri (Stoiber, N., vd.; Kromoser, B., vd.; ATSM Chomarat)

| A1 - A3 ÜRETİM SÜREÇLERİ |                        |       |      |
|--------------------------|------------------------|-------|------|
| ÇEVRE ETKİSİ             | BİRİM                  | ÇELİK | CFRP |
| GWP                      | [kgCO <sub>2</sub> eq] | 214   | 207  |
| AP                       | [kgSO <sub>2</sub> eq] | 0,56  | 1,36 |
| ADPf                     | [MJ]                   | 2551  | 1968 |

#### 4.2.2 Kullanım Süreçleri Bağlamında Çelik ve CFRP'nin Karşılaştırılması

Ürünlerin kullanım süreçlerinde doğrudan ya da dolaylı olarak neden oldukları çevresel etkiler de üretim süreçlerinde gözlemlenen etkiler kadar önemlidir. Yapı ürünü olarak karşılaştırılan çelik ve CFRP'nin bu çerçevedeki farklılıkları ise genel olarak korozyon direnci, düşük bakım-onarım gereksinimleri ve dolayısıyla uzun kullanım ömrü bağlamında incelenmektedir. Söz konusu başlıklar daha önce CFRP ile ilgili bölümde anlatıldığı üzere oldukça karmaşık olduğu için kullanım süreçlerini belirleyen nitelikler aynı anda hem direkt hem de dolaylı çevresel etkilerin oluşmasına neden olabilmektedir.

CFRP'lerin kullanımları süresince korozyona uğramamaları ve bu nedenle yapıdaki bakım gereksinimini azaltmaları, yapıların kullanım süreçlerinin ekonomik ve çevresel olarak düşük maliyetli biçimde yürütülmesine katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte yapı kullanım sürelerinin yine bu nedenle uzamasıyla ise uzun vadede yeni yapı üretimi ihtiyacının azaltılması ve yapı sektörünün neden olduğu toplam çevre etkisini düşürülmesi gibi potansiyellerin oluştuğu görülmektedir.

Çelik özelinde ise bakım ve onarım işlemlerine daha sık ihtiyaç duyulduğu gözlemlenmektedir. Donatı olarak çeliğin CFRP ile ayrıştığı noktalardan biri olan korozyon direnci bu bağlamda en önemli belirleyici olarak öne çıkmaktadır. Ele alınan çevresel etki kriterlerinde birim ağırlık bazında CFRP'ye göre daha olumlu sonuçlar veren çelik donatıların hem yapıda yüksek miktarda kullanılmaları hem de

görece daha sık bakıma ihtiyaç duymaları nedeniyle yapı elemanlarına uygun parametrelerle yapılan değerlendirmelerde söz konusu avantajlarını sergileyemedikleri durumlar oluşabilmektedir. Özellikle nem açısından zorlu çevresel şartların bulunduğu ortamlarda üretilen yapılarda söz konusu bakım süreçlerinin dolaylı ve direkt etkilerinin yapı yaşam döngüsünün toplam çevre etkisi içerisindeki oranının artabileceği öngörülmektedir.

Kullanım ömrü bağlamında karşılaştırılan ürünlerin bertaraf edilmesi ya da geri dönüştürülüp yeniden kullanılmaları süreçlerindeki çevresel etkileri de yapılardaki ürün seçimini etkileyen bilgiler sunabilmektedir.

#### **4.2.3 Yaşam Döngüsü Sonu ve Geri Dönüşüm Bağlamında Çelik ve CFRP'nin Karşılaştırılması**

Çelik ve CFRP'lerin kullanım ömürlerinin tamamlanması sonucunda söz konusu ürünler yeniden kullanılamaz durumda ise atık olarak farklı yöntemlerle bertaraf edilmektedir. Yapı taşıyıcı içerisinden ayrıştırılarak yeniden kullanılmalarının planlanması durumunda ise geri dönüşüm süreçlerinde dayanım niteliklerinin korunma düzeyine bağlı olarak aynı ürünün yeniden üretilmesinde ya da farklı ürünlerin üretilmesinde değerlendirilmektedir. Bu yeniden değerlendirme alternatifleri sırasıyla kapalı döngülerin ve açık döngülerin oluşmasını sağlamaktadır.

Hem çelik hem de CFRP yaşam döngülerinde bertaraf etme süreçlerinin işletildiği görülmektedir. Yaşam döngüsünün diğer aşamalarında olduğu gibi bu süreçlerde de çelik ve CFRP'ler farklı düzeylerde enerji tüketmekte, farklı düzeylerde salınımlar yapmaktadır. Tablo 4.13 ve Tablo 4.14'te nicel veriler üzerinden karşılaştırılan bu süreçler çelik ve CFRP yaşam döngülerinin karşılaştırılmasının son bölümünü oluşturmakta ve çalışma içerisinde oluşturulan bilgilerin tamamlayıcısı konumunda bulunmaktadır.

**Tablo 4.13** 600cm x 30cm x 50cm Boyutlarındaki Betonarme Kiriş için Gerekli Olan Miktardaki Çelik ve CFRP'nin Bertaraf Süreçlerinde GWP, AP ve ADPf Çerçevesinde Gözlemlenen Çevresel Etki Düzeyleri (Arcelor EPD, Infrabuild EPD, Solidian EPD)

| C4 – ATIK OLUŞUMU |                        |       |       |
|-------------------|------------------------|-------|-------|
| ÇEVRE ETKİSİ      | BİRİM                  | ÇELİK | CFRP  |
| GWP               | [kgCO <sub>2</sub> eq] | 0,28  | 0,16  |
| AP                | [kgSO <sub>2</sub> eq] | 0,007 | 0,001 |
| ADPf              | [MJ]                   | 4,10  | 2,27  |

**Tablo 4.14** 600cm x 30cm x 50cm Boyutlarındaki Betonarme Kiriş için Gerekli Olan Miktardaki Çelik ve CFRP'nin Geri Dönüşüm Süreçlerinde GWP, AP ve ADPf Çerçevesinde Gözlemlenen Çevresel Etki Düzeyleri (Arcelor EPD, Infrabuild EPD, Solidian EPD)

| D – YENİDEN KULLANIM, ONARIM, GERİ DÖNÜŞÜM |                        |        |       |
|--------------------------------------------|------------------------|--------|-------|
| ÇEVRE ETKİSİ                               | BİRİM                  | ÇELİK  | CFRP  |
| GWP                                        | [kgCO <sub>2</sub> eq] | 15,42  | -0,05 |
| AP                                         | [kgSO <sub>2</sub> eq] | 0,027  | ~0,00 |
| ADPf                                       | [MJ]                   | 160,25 | -0,67 |

Tablo 4.13'te ve 4.14'te sunulan değerler karşılaştırmanın önceki aşamalarında kullanılan kaynaklardan farklı olarak tamamen EPD kaynaklarından elde edilen verilerden üretilmektedir. Bu durum, atık oluşumu ve geri dönüşüm süreçlerinin ortalaması ile ilgili verilerin üretilmesinde CFRP'ler özelinde açık kaynak sayısının yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır. Karşılaştırma verilerinin tutarlı olabilmesi adına çelik ile ilgili söz konusu süreçlerin verileri benzer kaynaklardan edinilerek tablolara işlenmektedir.

Yapı hammadde edinimi ve üretim süreçlerinde olduğu gibi atık oluşum süreçlerinde de kullanılan yüksek ağırlıktaki çeliğin YDD'nin C4 başlığı altında tespit edilen çevre etkilerini artırdığı görülmektedir. Buna karşın günümüzde Avrupa'da çeşitli ülkeler CFRP atıklarının artmasından dolayı atıkların yakma veya toprak dolgusu olarak kullanılmasıyla bertaraf edilmesini yasaklamakta ve geri dönüşüm işlemlerini teşvik etmektedir.

Tablo 4.16'daki geri dönüşüm süreçleri verilerinde ise CFRP'nin geri dönüşümünün günümüz şartlarında dahi çelik geri dönüşüm süreçlerine karşı çevre etkisi bağlamında avantaj sağlayabildiği görülmektedir. Bu tablodaki veriler literatürde özellikle CFRP bar donatı ve çelik donatı üzerine yapılmış olan EPD çalışmalarında sunulan değerlerin ortalamasını tespit etmekte, ancak bütün geri dönüşüm yöntemleri adına kesin yargı belirtmek için yeterli bulunmamaktadır. Tablo 4.11'de listelenen geri dönüşüm tekniklerinin CFRP özelinde ayrı ayrı çalışıldığı araştırmaların yürütülmesi ve günümüzde kullanılan çelik geri dönüşüm teknikleriyle detaylı olarak karşılaştırılmaları gerekmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde CFRP donatıların yaşam döngüsü süreçleri ile ilgili edinilen veriler çelik donatılarla aynı çevresel etki kriterleri çerçevesinde karşılaştırılmaktadır. Söz konusu karşılaştırmayı özetleyen ve tablolar halinde sunulan veriler, yapı özelinde yapılan çevre etkisi değerlendirmelerinde uygun kriterlerin seçiminin önemini göstermektedir. CFRP'lerin özellikle hammadde edinim ve üretim süreçlerinde birim ağırlık başına oldukça yüksek çevre etkisine neden olduğu görülmektedir. Buna karşın CFRP'lerin yapı kullanım süresi boyunca korozyona karşı direnç göstermesi ve düşük miktarda ürün kullanımıyla taşıyıcı sistemde ihtiyaç duyulan mekanik nitelikleri sağlayabilmesi, söz konusu değerleri kısa ve uzun vadeli yapı üretim stratejileri bağlamında değiştirmektedir.

Karşılaştırma çalışması ile edinilen sonuçlar, yapı ürünü seçiminde çevresel etki kriterlerinin değerlendirilmesinde yapı ve yapı ürünü arasındaki ilişki bağlamında hareket edilmesi gerektiğini göstermektedir. Bununla birlikte yapı ürünü seçiminde karşılaştırılan ürünlerin kendi YDD performansları da tek başına yeterli görülmemektedir. Ele alınan ürünlerin yapının toplam yaşam döngüsüne ve çevre etkisine yapabileceği etkiler de söz konusu tasarım kararlarının verilmesinde dikkat edilmesi gereken konular arasında bulunmaktadır.

## 5 SONUÇ

---

Günümüzde yapma çevrenin oluşturulması ve sürdürülmesi süreçleri, insan etkinliklerinin yoğunlaştığı alanlarda doğal çevreye verilen zararı giderek artırmakta; küresel ısınma, kaynak tükenmesi ve ekosistemin bozulması gibi krizleri derinleştirmektedir. Dünyada artan nüfus nedeniyle yapma çevrenin genişlediği, insanların ihtiyaçları doğrultusunda üretim miktarının da bununla birlikte arttığı görülmektedir. Doğal ortamdaki canlı ve cansız çevrenin korunmasının önemi ise bu durumdan dolayı giderek daha fazla dikkate alınmaktadır. Yapma çevre kaynaklı süreçlerden dolayı doğal çevrede zarar oluşmasında yapı endüstrisinin önemli bir payının olduğu da Birleşmiş Milletler ve Avrupa Birliği gibi uluslararası kurumlarca sürekli vurgulanmakta ve tasarım, malzeme/ürün seçimi, üretim vb. konularında alınacak her kararın iklim politikalarıyla doğrudan ilişkili olduğu kabul edilmektedir. Bu bağlamda disiplinler arası iş birliğinin geliştirilmesi ve bilgi alışverişinin artırılması gerektiği görülmektedir. Yapı endüstrisinde yürütülen çalışmalarda farklı alanlarda kullanılan ürünlerin yapılara da uygulandığı ve yeni yapı üretim yöntemlerinin geliştirildiği gözlemlenmektedir. Özellikle tez içerisinde donatı olarak incelenen CFRP'ler, yapı taşıyıcı sistemlerini iyileştirme, yapı kullanım sürelerini uzatma ve dolaylı çevresel etkilerin düzeyini azaltma potansiyelini barındırmaktadır.

Çalışmada çeşitli nitelikleri araştırılan CFRP'lerin mekanik dayanım, iletkenlik ve korozyon direnci nitelikleriyle öne çıktığı gözlemlenmiştir. Özellikle mekanik nitelikler bağlamında yapılan incelemelerde CFRP'ler diğer FRP'lerle ve çelikte karşılaştırılmış, CFRP'nin çekme dayanımı açısından daha iyi değerlere sahip olduğu görülmüştür.

Literatürdeki deneylerde ve incelemelerde CFRP'nin çekme dayanımının 600-3690 MPa aralığında değiştiği gözlemlenirken, çelikte bu değer 420-701 MPa aralığında kaldığı, aynı değerlendirmelerde diğer FRP'lerden olan GFRP, BFRP ve AFRP'nin ise 483-2540 MPa aralığında çekme dayanımına sahip oldukları gözlemlenmektedir. Diğer mekanik nitelikler bağlamında da alternatif FRP'lerden ayrılan CFRP'nin yapı taşıyıcı sistemlerinde çelik karşısında uygun bir alternatif olduğu değerlendirilmektedir.

Yapı taşıyıcı sistemleri bağlamında sözü edilen avantajlara sahip olan CFRP'lerin korozyona karşı dirençli olması da yapı kullanım süresince gerekli olan onarım ihtiyacını ve yapının çevresel şartlara karşı hassasiyetini azaltmaktadır. Özellikle yüksek nemli ortamlarda bulunan yapılar için büyük öneme sahip olan bu nitelik, birçok durumda yapı ürünü seçimi için belirleyici olabilmektedir.

ISO 14040 ve ISO 14044 ilkelerine uygun olarak yürütülen YDD sonuçları birim kütle bazında incelendiğinde CFRP'nin yaşam döngüsü süreçlerinin çevre etkilerinin çalışmada özellikle incelenen GWP, AP ve ADPf kategorileri altında çelikten daha yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Buna karşın incelemenin taşıma kapasitesi üzerinden yapılmasının, söz konusu etkilere ait karşılaştırma sonuçlarını tersine çevirdiği Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'deki grafiklerde görülmektedir. Tez kapsamında hem ağırlık hem de mekanik nitelikler üzerinden verilen değerler, özellikle yapı sektöründeki YDD çalışmalarında kullanılan fonksiyonel birimin değerlendirme sonuçlarına etkisinin önemli olduğunu göstermektedir.

Yaşam döngüsü süreçleri, YDD metodolojisinde kullanılan A1, A3, B, C ve D başlıkları altında ve belirtilen giriş örneği üzerinden incelendiğinde her aşama için farklı sonuçlara ulaşıldığı görülmektedir. Örneğin hammadde edinimi ve üretimi süreçlerini kapsayan A1 ve A3 aşamaları çerçevesinde mekanik dayanım temelinde yapılan karşılaştırmalardaki GWP ve ADPf kategorilerinde CFRP'nin çelik karşısında avantajlı duruma geçtiği görülmektedir. Tablo 4.12'de sunulan söz konusu sonuçlar, hesaplamaların CFRP hammaddesi olarak çevre etkisi bağlamında olumsuz performansa sahip olan ama sıkça kullanılan PAN'ın seçildiği senaryo üzerinden yapılmasına rağmen elde edilmektedir. Günümüzde ise YDD bağlamında gösterilen performansın daha da iyileştirilmesi; doğal çevreye verilen zararın ve fosil kaynak tüketiminin azaltılması adına ise biyobazlı karbon fiberlerin

ve reçinelerin üretilmesiyle ilgili çalışmaların yürütüldüğü bilinmektedir. Biyobazlı bir malzeme olarak lignin kullanımının yaygınlaşmasıyla CFRP'nin bu alanda daha da olumlu bir performans gösterebileceği Tablo 4.3'teki sunulan veriler yardımıyla öngörülmektedir. Özellikle YDD çalışmalarında sıkça ele alınan ve fosil kaynak tüketim düzeyini ifade eden ADPf kategorisinde önemli kazançların elde edilebileceği değerlendirilmektedir.

CFRP'lerin güncel olarak kazanım sağladığı en önemli alanlardan birinin ise yapı ve ürünün kullanım süreçleri olduğu çalışmadaki analizler sonucunda görülmektedir. Özellikle yapıların kullanımları boyunca sıkça karşılaştığı nem sorunu CFRP'nin taşıyıcı elemanlarda donatı olarak kullanılmasıyla etkisini büyük oranda kaybetmektedir. CFRP'nin daha önce ifade edilen korozyon direnci bu nedenle faydalı görülmekte, CFRP'nin nem açısından zorlu bölgelerdeki yapılarda kullanımında söz konusu faydanın daha da öne çıkabileceği görülmektedir.

Yaşam döngüsü tamamlanan CFRP'lerin atık yönetiminde ise dolgu olarak depolama, enerji geri kazanımlı yakma ve geri dönüşüm alternatiflerinin kullanıldığı gözlemlenmektedir. Ancak günümüzde CFRP atıklarının içerisindeki karbon fiberin ve reçinenin yakılarak yok edilmesi durumunda bu hammaddelerdeki kimyasalların atmosfere salındığı bilinmektedir. CFRP'lerin dolgu malzemesi olarak depolanması durumunda ise toprak ve sulardaki zararlı madde miktarı artmakta, ekosistem zarar görmektedir. Bu nedenle özellikle kimyasal salınımları azaltmak, toprak ve su kaynaklarının zarar görmesini engellemek amacıyla dolgu ve yakma işlemlerinin pek çok otorite tarafından yasaklandığı görülmektedir.

Avrupa Birliği ve Birleşmiş Milletler'in sürdürülebilir kalkınma hedefleri kapsamında atılan bu gibi adımlar, CFRP yaşam döngüsü için birçok potansiyel gelişmeyi de beraberinde getirmektedir. Özellikle Almanya'da CFRP atık yönetiminde sıkça kullanılan dolgu yönteminin yasaklanmasıyla literatürde bu alandaki geri dönüşüm teknikleri üzerine yapılan çalışmalar arttığı gözlemlenmektedir. Bu tekniklerin geliştirilmesiyle hem CFRP atık yönetiminin hem de yeni CFRP hammaddesi edinim süreçlerinin çevre etkisinin azaltılması hedeflenmektedir.

CFRP'nin içerisindeki karbon fiber ve reçinenin ayrıştırılmasında ise literatürde çeşitli mekanik, termal ve kimyasal tekniklerin kullanıldığı gözlemlenmektedir. Geri dönüşüm süreçleri üzerine yapılan incelemelerde söz konusu alternatiflerin çevre etkilerinin farklı fayda ve zararlarının olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin mekanik geri dönüşüm süreçleri düşük çevre etkisi oluştururken reçine ve karbon fiberin ayrıştırılması konusunda zayıf olması nedeniyle günümüzde genellikle ön hazırlık aşaması olarak değerlendirilmektedir. Termal dönüşüm süreçlerinde ise özellikle yüksek ısı gereksinimi nedeniyle yüksek kaynak kullanımı ve sera gazı salınımı gerçekleştiği gözlemlenmekte, bu nedenle termal yöntemler çevre etkisi bağlamında ilk tercih olarak değerlendirilmemektedir. Tez kapsamında yapılan araştırmalar sonucunda günümüzde hem çevre etkisi hem de karbon fiber yapısının korunması anlamında en uygun alternatiflerin solvoliz gibi kimyasal geri dönüşüm teknikleri olduğu Tablo 4.9'da görülmektedir.

Belirtilen sınırlar içerisinde edinilen ve Tablo 4.14'te sunulan sonuçlar, CFRP'nin geri dönüştürülmesiyle hammadde edinim süreçlerine oluşan çevre etkisinin önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir. Söz konusu tabloda belirtilen taşıyıcı kırışın üretiminde daha çok miktarda çelik kullanılmasına rağmen CFRP'nin GWP, AP ve ADPf alanlarında daha çok kazanım oluşturmaya da dikkat çekmektedir.

Çalışmanın genelinde üzerinde durulan küresel ısınma potansiyeli bağlamında düşük değerler gösteren geri dönüşüm tekniklerinin kullanılmasıyla CFRP atık oluşumunun azaltılabileceği ve günümüzdeki karbon fiber atık stoklarının eritilebileceği öngörülmektedir. Bu nedenle geri dönüştürülmüş karbon fiberlerden elde edilen CFRP'lerin yapılarda kullanımıyla toprakların ve suların asidifikasyona uğrama düzeylerinin de azaltılabileceği ve yapıların toplam yaşam döngüsünde olumlu değişimlerin sağlanabileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak, CFRP donatıların yüksek çekme dayanımı, düşük yoğunlukları ve korozyona karşı dirençleri, kullanım ve bakım evrelerinde kayda değer çevresel ve yapısal faydalar sunmaktadır. Üretim aşamasındaki enerji talebi ve geri dönüşüm sürecindeki teknolojik olgunlaşmamışlık ise CFRP'nin çevresel performansında kritik başlıklar olarak öne çıkmaktadır. Yapı ürünü olarak düşük miktarda kullanılmaları ile bu alanlardaki olumsuzluğu telafi ettikleri görülen CFRP'lerin üretiminde hammaddelerin ve enerjinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması, solvoliz gibi gelişmekte olan geri dönüşüm yöntemlerinin endüstriyel ölçekte

uygulanması hâlinde CFRP donatıların toplam yaşam döngüsü performansının mevcut çelik alternatiflerine kıyasla daha da avantajlı bir konuma gelebileceği öngörülmektedir. Bununla birlikte yürütülen analizlerin derinleşebilmesi ve etkili çözüm yöntemlerinin geliştirilebilmesi adına CFRP'ler üzerine yapılan YDD çalışmalarının sayısının artırılması ve çeşitlenmesi gerekmektedir. Tez çalışması boyunca yapılan detaylı incelemelerde CFRP'nin YDD'si ile ilgili güncel çalışmaların sürekli olarak GWP, AP ve ADPf kriterlerine odaklandığı gözlemlenmektedir. Ancak daha kapsamlı değerlendirmelerin yapılabilmesi ve CFRP'nin yapı sektörü bağlamında sahip olduğu potansiyelin sınanabilmesi için diğer YDD kategorileri üzerine yapılan araştırmaların da artırılması gerekli görülmektedir. Bu şekilde literatürün zenginleştirilebileceği ve yapı tasarım süreçlerinin daha iyi yönlendirilebileceği düşünülmektedir.

Henüz yeni bir yapı ürünü olması nedeniyle yapı kullanım süresince gereksinim duyulan bakım ve onarım işlemlerinin takip edildiği somut çalışmalar konusunda da eksikliklerin bulunduğu görülmekte, donatı olarak CFRP'nin kullanıldığı yapıların uzun dönemli incelenmesiyle söz konusu eksikliğin zaman içerisinde giderilebileceği öngörülmektedir.

Yaşam döngüsünün bu çalışma kapsamında incelenmeyen taşıma aşamasıyla ilgili de gelişmelerin yapılabileceği görülmektedir. Günümüzde görece kolay erişilebilen ve yakın mesafelerden tedarik edilebilen çelik karşısında kullanımının yaygınlaşabilmesi adına CFRP'nin de kolay ulaşılabilir duruma getirilmesi gerekmektedir. Bu yaygınlaşmanın ekonomik ulaşılabilirliği de beraberinde getirebileceği ve birbirini destekleyen süreçleri tetikleyebileceği düşünülmektedir.

Elde edilen bulgular, CFRP'lerin taşıyıcı sistemlerde sürdürülebilir bir alternatif olarak konumlandırılabilceğini göstermektedir. Ayrıca yapılardaki malzeme ve ürün seçimlerinde süreç odaklı bir yaklaşımın benimsenmesi gerektiği; her yapının kendi özgün koşullarının söz konusu yapı içerisindeki ürünlerin yaşam döngülerini önemli ölçüde etkilediği de çalışmadaki çıkarımlar arasında yer almaktadır.

## KAYNAKÇA

---

- Abbate, E.; Mirpourian, M.; Brondi, C.; Ballarino, A.; Copani, G. Environmental and Economic Assessment of Repairable Carbon-Fiber-Reinforced Polymers in Circular Economy Perspective. *Materials*, 15, 2986. <https://doi.org/10.3390/ma15092986>, 2022
- ACI 440.1R-15, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, ACI Committee 440, ISBN: 978-1-942727-10-1, 2015
- ACI 440.2R-17, 2017, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI Committee 440, ISBN: 978-1-945487-59-0, 2017
- Achamyeleh, T., Çamur, H., Savaş, M.A., Evcil, A., Mechanical Strength Variability of Deformed Reinforcing Steel Bars for Concrete Structures in Ethiopia, Nature, Scientific Reports, 2022*
- Achinike, W., Ekperi, N, Achinike, O.W., Model Comparison of Corrosion Rate on Saline and Fresh Water Environments, Discovery Scientific Society, Discovery Report 59, e6d10099, 2023*
- Adhikari, S., Mechanical properties and flexural applications of basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars. University of Akron; 2009.
- Amran, Y.H.M., Alyousef, R., Rashid, R.S.M., Alabduljabbar, H., Hung, C.C., Properties and Applications of FRP in Strengthening RC Structures: A Review, Elsevier, Structures 16, 208-238, 2018*
- Amran, Y.H.M., AmmarMA.Bonddurability of basalt fibre-reinforced polymers (BFRP) bars under freeze-and-thaw conditions Ph.D thesis Dept. of Civil Engineering, Université Laval; 2014. p. 125.*
- Arcelor EPD, Arcelormittal Long Products Canada, Steel Rebar, Merchant Bar Quality and Wire Rods, EPD Registration Number: 5021-0982, 2024
- ATSM Chomarat, C-GRID Carbon Fiber Reinforcement for Precast Concrete, Company and Facility Specific “Cradle to Gate” Type III Environmental Declaration (Modules A1 to A3); Reference Service Life N/A, Declaration Number: EPD 869, 2025

- Avrupa Komisyonu, (t.y.), Energy Performance of Building Directive (erişim tarihi 04.02.2025) [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en)
- Avrupa Komisyonu, European Reference Life Cycle Database (visited on 02/18/2020). <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/>, 2012
- Aydın, E., *Henn ve TU Dresden, Dünyanın İlk Karbon Beton Yapısını Tamamladı, Arkitera*, <https://www.arkitera.com/haber/henn-ve-tu-dresden-dunyanin-ilk-karbon-beton-yapisini-tamamladi/>, 2023 (erişim tarihi: 23 Nisan 2025)
- Backes, J.G.; Del Rosario, P.; Luthin, A.; Traverso, M. Comparative Life Cycle Assessment of End-of-Life Scenarios of Carbon-Reinforced Concrete: A Case Study. *Appl. Sci.*, 12, 9255. <https://doi.org/10.3390/app12189255>, 2022
- Bahadursingh, N., *The Cube by Henn Will Be the World's First Building Made of Carbon Fiber-Reinforced Concrete*, *Architect News*, <https://architect.com/news/article/150276090/the-cube-by-henn-will-be-the-world-s-first-building-made-of-carbon-fiber-reinforced-concrete#:~:text=According%20to%20the%20researchers%2C%20this,construction%20by%20up%20to%202050>, 2021 (erişim tarihi: 23 Nisan 2025)
- Baran, I., *Pultrusion Process for Composite Manufacture*, Elsevier, *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*, Pages 379-414, 2015
- Bastianini, F., Corradi, M., Borri, A., di Tommaso, A., *Retrofit and Monitoring of an Historical Building Using “Smart” CFRP with Embedded Fibre Optic Brillouin Sensors*, Elsevier, *Construction and Building Materials* 19, 525-535, 2005
- Bengtsson, M., Steen, B., *Weighting in LCA – Approaches and Applications*, Wiley Online Library, *Environmental Progress*, vol: 19, no: 2, 2000
- CEN - Avrupa Standartlar Komitesi, EN 15978:2011: Sustainability of Construction Works—Assessment of Environmental Performance of Buildings—Calculation Method. International Standard, 2011
- Chen, D., Sun, G., Meng, M., Jin, X., Li, Q., *Flexural Performance and Cost Efficiency of Carbon/Basalt/Glass Hybrid FRP Composite Laminates, The Wallet Structures, Volume 142, Sf. 516-531*, 2019
- Clarke, J., Sheard, P., *Proceedings of the First International Conference on Durability of Composites for Construction*, B. Benmokrane and H. Rahman, eds, Sherbrooke, QC. Canada, pp. 13-24, 1998
- Consoli F, Workshop S. SETAC. Guidelines for life-cycle assessment: a code of practice. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC); 1993
- Curran, M.A. Broad-based environmental life cycle assessment. *Environ. Sci. Technol.*, 27, 430–436, 1993
- Darçın, P., Tuna Taygun, G., Vural, S. M., 2016, “Evaluation of LEED ‘Water Efficiency’ Case Study: Diyarbakır, Turkey”, 11th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Lisbon, pp: 210-1 – 210-12 (digital proceedings, ISSN: 1847-7178), 4-9 Eylül 2016

- Das S. Life Cycle Assessment of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites, Springer, Int J Life Cycle Assess., 16:268–282 DOI 10.1007/s11367-011-0264-z, 2011
- Das S. The Cost of Automotive Polymer Composites: a Review and Assessment of DOE's Lightweight Materials Composite Research (ORNL/TM-2000/283) 2001
- Davies, P., Reaud Yvan, Dussud Loic, Woerther Patrice. Mechanical behaviour of HMPE and aramid fibre ropes for deep sea handling operations. Ocean Eng 2011;38(17):2208–14, 2011
- Deak, T., Czigany, T., *Chemical Composition and Mechanical Properties of Basalt and Glass Fibers: A Comparison*, Sage Journals, Textile Research Journal, Volume 79, Issue 7, 2009
- De Merchant, C., Comparison of Carbon Fiber, Kevlar (Aramid) and E Glass Used in Composites for Boatbuilding, <https://www.christinedemerchant.com/carbon-kevlar-glass-comparison.html>, (erişim tarihi: 26 Nisan 2025).
- De Vries, T., The Ocean Carbon Cycle, Annual Reviews, Annual Review of Environment and Resources, 47: 317-41, 2022
- Dhawan V, Singh S, Singh I. Effect of natural fillers on mechanical properties of GFRP composites. *Journal of Composites* 2013;1:8.
- Doney, S.C., Busch, D.S., Cooley, S.R., Kroeker, K.J., The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities, Annual Reviews, Annual Review of Environment and Resources, 45:83-112, 2020
- Duddy, L., Foster + Partners Sets World's Largest Carbon-Fiber Roof on Glass Cylinder for Apple's Theater, Designboom, <https://www.designboom.com/architecture/foster-partners-apple-park-steve-jobs-theater-10-02-2017/#:~:text=the%20service%20elements%20of%20the,to%20rotate%20the%20elevator%20171>, (erişim tarihi: 23 Nisan 2025).
- Dünya Çelik Birliği, Daxner & Merl GmbH, Worldsteel LCA eco-profile, REBAR, 2022
- EC-JRC—European Commission-Joint Research Centre—Institute for Environment and Sustainability: International Life Cycle Data System (ILCD) Handbook—Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators, 1st edn. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italy (2010b), 2010
- El-Tahan, M., Galal, K., Hoa, V.S., *New Thermoplastic CFRP Bendable Rebars for Reinforcing Structural Concrete Elements, Composites: Part B* 45, Sf. 1207-1215, 2012
- Fawzia S, Al-Mahaidi R, Zhao XL, Rizkalla S. Strengthening of circular hollow steel tubular sections using high modulus CFRP sheets. *Constr Build Mater* 2007;21(4):839–45.

- Fayed, S., Badawi, M., Ghalla, M., Mlybari, E.A., Iskander, Y., Yehia, S.A., *Experimental and Numerical Study of Tubular Steel Columns with/without Demountable Bolted Shear Connectors Embedded in the Concrete*, Nature, Scientific Reports, 2025
- Foster + Partners, Steve Jobs Theater, <https://www.fosterandpartners.com/projects/steve-jobs-theater>, (erişim tarihi: 23 Nisan 2025).
- Goltermann, P.; Jensen, F.; Andersen, M.E. Smart Structures: Possibilities, Experiences and Benefits from Permanent Monitoring. In Proceedings of the IABMAS, Barcelona, Spain, Volume 2., 14-17 Temmuz 2002
- Grace, N.F., vd., *Grace NF, Ragheb WF, Abdel-Sayed G. Flexural and shear strengthening of concrete beams using new triaxially braided ductile fabric. ACI Struct J* 2003;100(6):804–14.
- Hammerl, M., vd., Thin-Walled Slab Elements Made of FRP-Reinforced HPC and UHPC: Development, Experimental Investigation and LCA
- Hasan, A.M., Akiyama, M., Kashiwagi, K., Kojima, K., Peng, L., *Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Repaired Using a Hybrid Scheme with Stainless Steel Rebars and CFRP Sheets*, Construction and Building Materials 265, 120296, 2020
- Hauschild, M.Z., Rosenbaum R.K., Boulay, A.M., Fantke, P., Laurent, A., Núñez, M., Vieira, M., Life Cycle Assessment – Theory and Practice, Chapter 10, Life Cycle Impact Assessment Springer International Publishing AG 2018 M.Z. Hauschild et al. (eds.), Life Cycle Assessment, DOI 10.1007/978-3-319-56475-3\_10, 2018
- Heilos, K.; Fischer, H.; Hofmann, M.; Miene, A. Nonwovens Made of Recycled Carbon Fibres (rCF) Used for Production of Sophisticated Carbon Fibre-Reinforced Plastics. *Vlakna Text*, 27, 65–75., 2020
- Hempel, J., *Hempel, J., MC Bauchemie, Architecture Masterprize*, <https://architectureprize.com/winners/winner.php?id=1884&mode=hm&compID=12791> (erişim tarihi: 23 Nisan 2025).
- Hengstermann, M. Entwicklung von Hybridgarnen aus Recyclten Carbonfasern und Polyamid 6-Fasern für Thermoplastische Verbundbauteile Mit Hohem Leistungsvermögen. Ph.D. Thesis, Technische Universität Dresden, Dresden, Germany, 1986.
- HENN, *The Cube*, <https://www.henn.com/en/project/cube>, (erişim tarihi: 23 Nisan 2025).
- Hensher DA. *Fiber-reinforced-plastic (FRP) reinforcement for concrete structures: properties and applications*. Vol. 42. Elsevier; 2016.
- Hohmann, A., Life Cycle Assessment of Manufacturing Processes for CFRP Structures to Identify Optimization Potentials- Systematic Methodology for Estimating the Environmental Impact of Manufacturing Process Chains”. Technical University of Munich. <http://mediatum.ub.tum.de/1451614>., 2018

- Holt, P.F., Horne, M., *Dust from Carbon Fibre*, Elsevier, Environmental Research, Vol 17, Issue 2, pp 276-283, 1978
- Infrabuild EPD, Environmental Product Declaration, Reinforcing Bar and Mesh, ARC – The Australian Reinforcing Company, EPD registration number S-P-00858 Version 1.1., 2020
- Inpil K., et al., *Introduction to Carbon Nanotube and Nanofiber Smart Materials*, Elsevier, Composites: Part B Engineering, 37, 382-394, 2006
- Institut Bauen und Umwelt e.V., Environmental Product Declaration- Reactive Reins Based on Epoxy Resin, Unfilled/Solventfree with Low Content of Reactive Diluent (visited on 02/12/2020). <https://www.feica.eu/our-priorities/edps>, 2015
- International Organisation for Standardisation, ISO 14044:2006+A2:2020; Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines. BSI Standards Limited: Geneva, Switzerland, 2020
- International Organisation for Standardisation, ISO 14040: 2006— Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework, vol. 14040; Geneva, 2006
- International Organisation for Standardisation, ISO 14044: 2006—Environmental Management—Life Cycle Assessment— Requirements and Guidelines, vol. 14044; Geneva, 2006
- International Organisation for Standardisation, ISO (1997d). Environmental Management - Life Cycle Assessment - Life Cycle Interpretation. ISO/CD 14 043.1B, 17.06.1997
- Janssen M., Gustafsson, E., Echardt, L., Wallinder, J., Wolf, J., *Life Cycle Assessment of Lignin-Based Carbon Fibres*, İsveç
- Jasieñko, J., vd., *Strengthening of Masonry Rings with Composite Materials*, Heritage Science, Research Article, 9:11, 2021
- Jensen, A.A., Hoffman, L., Møller, B.T., Schmidt, A., Christiansen, K., Elkington, J., *Life Cycle Assessment (LCA) - A Guide to Approaches, Experiences and Information Sources*, ResearchGate, European Environment Agency, Environmental Issues Series, no:6, 1997
- Jha, M.K.; Joshi, S.; Sharma, R.K.; Kim, A.A.; Pant, B.; Park, M.; Pant, H.R. Surface Modified Activated Carbons: Sustainable Bio-Based Materials for Environmental Remediation. *Nanomaterials*, 11, 3140., 2021
- Kang, B.; Lee, C.; Kim, S.-M.; Yoo, H.-M. Processing and Evaluation of a Carbon Fiber Reinforced Composite Bar Using a Closed Impregnation Pultrusion System with Improved Production Speed. *Appl. Sci.*, 12, 4906., 2022
- Karuppannan Gopalraj, S.; Deviatkin, I.; Horttanainen, M.; Kärki, T. Life Cycle Assessment of a Thermal Recycling Process as an Alternative to Existing CFRP and GFRP Composite Wastes Management Options. *Polymers*, 13, 4430. <https://doi.org/10.3390/polym13244430>, 2021

- Karupannan Gopalraj, S., Kärki, T., A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis, *SN Appl. Sci.* 2 (3), 433., 2020
- Khorgade, P., Rettinger, M., Burghartz, A., Schlaich, M., A Comparative Cradle to Gate Life Cycle Assessment of Carbon Fiber-Reinforced Polymer and Steel-Reinforced Bridges, *Fib WILEY*, Article, *Structural Concrete*, 24:1737-1750, 2023
- Kim, K.M., Cheon, J.H., Flexural Behavior of One-Way Slab Reinforced with Grid-Type Carbon Fiber Reinforced Plastics of Various Geometric and Physical Properties, *MDPI*, *Applied Sciences*, 12, 12491, 2022
- Kimm, M.; Bhat, S.; Gries, T. Recycling of Textile Reinforced Concrete. *Miner. Nebenprodukte Abfälle*, 7, 357–373., 2020
- Kimm, M., Recycling von Carbonbeton: Wie kann eine hochwertige Wiederverwendung gelingen? *TUDALIT leichter Bau. Zukunft Formen*, 21, 35., 2019
- Kim, Y.J., vd., Kim, Y.J., Jung, W.T., Kang, J.Y., Park, J.S., *Testing Methods and Design Specifications for CFRP-Prestressed Concrete Members: A Review of Current Practices and Case Studies*, *Case Studies in Construction Materials* 16, e00842, 2022
- Konar, S.; Nylén, J.; Svensson, G.; Bernin, D.; Edén, M.; Ruschewitz, U.; Häussermann, U. The Many Phases of CaC<sub>2</sub>. *J. Solid State Chem.*, 239, 204–213, 2016
- Kromoser, B., vd., Article of RILEM TC 292-MCC: Life Cycle Assessment (LCA) of Non-Metallic Reinforcement for Reinforcing Concrete: Manufacturing, Durability, Dismantling, Recycling and Reuse: A Review, *RILEM TC REPORT*, *Materials and Structures*, 56:126, 2023
- Landesmann, A., Seruti CA, Batista EdM. Mechanical properties of glass fiber reinforced polymers members for structural applications. *Mater Res* 2015;18(6):1372–83, 2015
- La Rosa, A.D., vd., Recycling treatment of carbon fibre/epoxy composites: Materials recovery and characterization and environmental impacts through life cycle assessment, *Compos. B Eng.* 104 (2016) 17–25.
- Liu, M., Cheng, X., Li, X., Lu, T.J., *Corrosion Behavior of Low-Cr Steel Rebars in Alkaline Solutions with Different pH in the Presence of Chlorides*, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 803, Sf. 40-50, 2017
- Li X, et al. The influence of fiber content on properties of injection molded flax fiber-HDPE biocomposites. *Can Biosyst Eng* 2009;8(148):1–10.
- Maxineasa, S.G., vd., Environmental Impact of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Flexural Strengthening Solutions of Reinforced Concrete Beams, *CrossMark*, *Building Components and Buildings*, *Int J. Life Cycle Assess*, 20:1343-1358, 2015

- Melinda, A., vd., Improvement of Lateral Property of Unidirectional-Strengthened CFRP Laminates Using Recycled Carbon Fiber, *Nature Portfolio, Scientific Reports*, 13:13697, 2023
- Meyer, L.O., Schulte, K., Grove-Nielsen, E., CFRP-Recycling Following a Pyrolysis Route: Process Optimization and Potentials, *J. Compos. Mater.* 43 (9) 1121–1132., 2009
- Michels, J., Sena-Cruz, J., Czaderski, C., Motavalli, M., *Structural Strengthening with Prestressed CFRP Strips with Gradient Anchorage, ASCE Library, Journal of Composites for Construction, Vol. 17, Issue 5, 2013*
- Nasa, 2015, Carbon Structure Hazard Control, NASA Johnson Space Center White Sands Test Facility Materials and Components Laboratories Office, Document No: WSTF-RD-1219-001-15, 2015
- Nekouei, R., Pahlevani, F., Rajarao, R., Golmohammadzadeh, R., Sahajwalla, V., Two-Step Pre-Processing Enrichment of Waste Printed Circuit Boards: Mechanical Milling and Physical Separation, Elsevier, *Journal of Cleaner Production*, 184, 1113-1124, 2018
- Omar, S., Abdelhadi A., Comparative Life-Cycle Assessment of Steel and GFRP Rebars for Procurement Sustainability in the Construction Industry, *MDPI, Sustainability*, 16 3899, 2024
- Orcesi, A.D., vd., Fatigue Strengthening of Steel Structures Using High Modulus CFRP Plates: Development of a Life-Cycle Analysis Approach, Elsevier, *Construction and Building Materials* 227, 116628, CICE 2018 – FRP Composites in Construction: Advances in Material Research&Engineering, 2019
- Orumu, S.T., *Grading of Steel Rebar's Used in Cement Concrete Based on Compression Test, Researchgate, International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering,, Volume 7, Issue 5, Doi: 10.31695, 2021*
- Parnas R, Shaw MT, Liu Q. *Basalt fiber reinforced polymer composites. 2007.*
- Permeah, S., Lau, K., *Corrosion of Galvanized Steel in Alkaline Solution Associated with Sulfate and Chloride Ions, Construction and Building Materials* 392, 131889, 2023
- Peter, D., Yvan, R., Loic, D., Patrice, W., *Mechanical behaviour of HMPE and aramid fibre ropes for deep sea handling operations. Ocean Eng* 2011;38(17):2208–14.
- Pickering, S.J., Recycling technologies for thermoset composite materials—current status, *Compos. A Appl. Sci. Manuf.* 37 (8), 1206–1215., 2006
- PlasticsEurope, Eco-profiles (visited on 02/12/2020). <https://www.plasticseurope.org/de/resources/eco-profiles.>, 2005
- Portal, N.W., Usability of textile reinforced concrete: structural performance, durability and sustainability, *Doktorsavhandlingar vid Chalmers tekniska högskola*, 2015

- Prawoto, Y., Ibrahim, K., Wan Nik, W.B., *Effect of pH and Chloride Concentration on the Corrosion of Duplex Stainless Steel*, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume 34, Number 2C, 2009
- Prenzel, T., Hohmann, A., Prescher, T., Angerer, K., Wehner, D., Ilg, R., von Reden, T., Drechsler, K., Albrecht, S., *Bringing Light into the Dark-Overview of Environmental Impacts of Carbon Fiber Production and Potential Levers for Reduction*, MDPI, Polymers, 2024
- Prince Engineering, PLC. *Characteristics and behaviors of fiber reinforced polymers (FRPs) used for reinforcement and strengthening of structures*. 2011.
- Rahman, A.H., Kingsley, C.Y., Crimi, J., *Durability of FRP Grid Reinforcement, Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, M. M. El-Badry, ed., *Canadian Society for Civil Engineering*, Montreal, QC, Canada, pp. 681-690, 1996
- Rashid. A.F.A., Yusoff, S., *A Review of Life Cycle Assessment Method for Building Industry*, Elsevier, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 244-248, 2015
- Rosenbaum, R.K.: Selection of impact categories, category indicators and characterisation models in goal and scope definition. In: Curran, M.A. (ed.) *LCA Compendium—The Complete World of Life Cycle Assessment—Goal and scope definition in Life Cycle Assessment*, pp 63–122. Springer, Dordrecht. doi:10.1007/978-94-024-0855-3, 2017
- Sahu NP, et al. *Study on aramid fibre and comparison with other composite materials*. *Int J* 2014;1:303–6.
- Schueppel, D.; Stocksclaeder, J.; von Reden, T. End-of-life CFRP as a raw material in steel and of calcium carbide production. In *Proceedings of the 18th European Conference on Composite Materials*, Athens, Greece, 24–28 June 2018.
- Selzer R, Friedrich K. *Mechanical properties and failure behaviour of carbon fibre reinforced polymer composites under the influence of moisture*. *Compos A: Appl Sci Manuf* 1997;28(6):595–604.
- Sen, R., Shahawy, M., Sukumar, S., Rosas, J., *Effect of Tidal Exposure on Bond of CFRP Rods*, *Second International Conference on Composites in Infrastructure*, V. II. H. Saadatmanesh and M.R. Eshani, eds, *University of Arizona, Tucson, AZ*, pp. 512-523, 1998
- Solidian EPD, Reinforcing and Fastening Systems Solidian GRID and Solidian REBAR, Declaration Code: EPD-SGR-GB-65.0, 2022
- Sovjak, R., Havlasek, P., Vitek, J., *Long-term Behaviour of Concrete Slabs Prestressed with CFRP Rebars Subjected to Four-point Bending*, *Construction and Building Materials* 188, Sf. 781-792, 2018
- Stoddard, I., vd., *Three Decades of Climate Mitigation: Why Haven't We Bent the Global Emissions Curve?*, *Annual Reviews*, *Annual Review of Environment and Resources*, 46: 653-89, 2021

- Stoiber, N., Hammerl, M., Kromoser, B., Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of CFRP Reinforcement for Concrete Structures: Calculation Basis and Exemplary Application, Elsevier, Journal of Cleaner Production 280, 124300, 2021
- Sun, H., Guo, G., Memon, S.A., Xu, W., Zhang, Q., Zhu, J.-H., Xing, F., Recycling of Carbon Fibers from Carbon Fiber Reinforced Polymer Using Electrochemical Method, Compos. A Appl. Sci. Manuf. 78, 10–17., 2015
- Takewaka, K., Khin, M., Deterioration of Stress-Rupture of FRP Rods in Alkaline Solution Simulating as Concrete Environment, Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, M. M. El-Badry, ed., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, QC, Canada, pp. 649-664, 1996*
- Tomosawa, F., Nakatsuji, T., ‘‘Evaluation of the ACM Reinforcement Durability by Exposure Test ‘‘Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, M. M. El-Badry, ed., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, QC, Canada, pp 699-706, 1996
- Tomosawa, F., Nakatsuji, T., ‘‘Evaluation of the ACM Reinforcement Durability by Exposure Test ‘‘Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 139-146, 1997
- Triantafillou, T. C., Fardis, M. N., Strengthening of Historic Masonry Structures with Composite Materials, RILEM, Scientific Reports, Materials and Structures, Vol 30, pp 486-496, 1997
- Tuna Taygun, G. (2019). Yapıda Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Yapıda Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Doktora Dersi Basılmamış Ders Notu, 2019.
- Uthaman, A., Xian, G., Thomas, S., Wang, Y., Zheng, Q., Liu, X., Durability of an Epoxy Resin and Its Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composite Upon Immersion in Water, Acidic, and Alkaline Solutions, MDPI, Polymers, 12(3):614, doi:10.3390, 2020*
- Venigalla, S.G., Nabilah, A.B., Nasir, N. A. M., Safiee, N.A., Aziz, F. N. A. A., Textile Reinforced Concrete as a Structural Member: A Review, MDPI, Buildings, 12, 474, 2022
- Vijayan, D.S., vd., Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Composites in Civil Engineering Application – A Comprehensive Review, MDPI, Buildings, 13, 1509, 2023
- Von der Heid, A.C., Grebe, R, Perforierte und Vollflächige Fassadenplatten aus Carbonbewehrtem Beton, Bauingenieur BD. 95 Hauptaufsatz, 2020
- Wei, Y., Hadigheh, S.A., Cost Benefit and Life Cycle Analysis of CFRP and GFRP Waste Treatment Methods, Elsevier, Construction and Building Materials, 348, 128654, 2022
- Wexler, M.; Baumann, W.; Gehrmann, H. Optionen der Carbonfaserverwertung in industriellen Hochtemperaturprozessen. In Proceedings of the Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, Berlin, Germany, 10–11 June 2021

- Yavuz, G., *Lif Takviyeli Polimerlerin Betonarme Kirişlerde Donatı Olarak Kullanımı*, e-Journal of New World Sciences Academy, Volume: 6, Number: 4, Article Number: 1A0212, ISSN: 1306-3111, 2011
- Young, S.B.; Vanderburg, W.H. Applying environmental life-cycle analysis to materials. JOM, 46, 22–27., 1994
- Zaki, M., Tobaa, A., Shehata, A., Mohamed, F., Khalef, R., Hagrass, Y., Abou-Ali, R., Farag, M., Ghaly, A., Madi, M., Sayed-Ahmed, E., El-Maghraby, Y., Abou-Zeid, M., *Potential Advantages of Basalt FRP to Carbon FRP Bars & Conventional Steel*, Australian Journal of Civil Engineering, Volume 19, Issue 1, 2021
- Zarringol M, Zarringol M. *A comparative study on the efficiency of CFRP and GFRP in the improvement of compressive strength, acoustic impedance and bracing of filled and hollow concrete columns in different layers and ages*. Journal of Sustainable Development 2016;9(5):110.
- Zhao, J., Cai, G., Cui, L., Larbi, A.S., Tsavdaridis, K.D., *Deterioration of Basic Properties of the Materials in FRP-Strengthening RC Structures Under Ultraviolet Exposure*, MDPI, Polymers, 402, doi:10.3390, 2017
- Zhishen W, Xin W, Gang W. *Advancement of structural safety and sustainability with basalt fiber reinforced polymers*. CICE2012. Rome 2012;13:15–29. [168]  
 Ascione L, Berardi VP, D'Aponte A. *Creep phenomena in FRP materials*. Mech Res Commun 2012;43:15–21.

## TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

### Konferans Bildirileri

1. Yıldız, O., Tuna, G., Akıllı Yapı Malzemesi Olarak Karbon Fiber Takviyeli Polimerlerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Bağlamında İncelenmesi, 14. Uluslararası Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Kongresi Bildiri Kitabı, Sf 745-754 ve Sf 1100, Aralık 2024

