DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEKSTİL İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ PREFABRİK ELEMANLARIN ANALİZİ

Canozan MURSAL

Şubat, 2024

İZMİR

TEKSTİL İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ PREFABRİK ELEMANLARIN ANALİZİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı

Canozan MURSAL

Şubat, 2024

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

CANOZAN MURSAL tarafından **DOÇ.DR. EGEMEN TEOMETE** yönetiminde hazırlanan **"TEKSTİL İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ PREFABRİK ELEMANLARIN ANALİZİ"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç.Dr. Egemen TEOMETE

Danışman

Prof.Dr. Ninel ALVER

Jüri Üyesi

Doç.Dr. Gökhan ŞAKAR

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez sürecimde, kılavuzluğunu hissettiğim değerli danışmanım Doç. Dr. Egemen Teomete'ye içten teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Sayın Teomete bilgeliği, sabrı ve ilgisiyle beni teşvik ederek bu akademik yolculuğumda bir ışık gibi rehberlik etti. Kendisinin sağladığı önemli geri bildirimler ve yol gösterici öneriler, tezimin niteliğini artırmama yardımcı oldu. Bu süreçte gösterdiği sabır, destek, özveri ve profesyonellik için kendisine sonsuz teşekkür ederim.

Aileme ve sevgili arkadaşlarıma, bu tez sürecimde yanımda oldukları için içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Canozan MURSAL

TEKSTİL İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ PREFABRİK ELEMANLARIN ANALİZİ

ÖZ

Sunulan tez çalışması, gün geçtikçe daha fazla alanda kullanılmaya başlanan yüksek çekme ve korozyon dayanımına sahip tekstil donatıları ele almaktadır. Bu donatıların mekanik özellikleri ayrıntılı bir şekilde tanımlanmış, aynı zamanda tekstil donatı ile takviye edilmiş elemanlara yönelik hesap yöntemleri sunulmuştur. Geleneksel betonarme hesapları üzerinde yapılan değişikliklerle birlikte, hesaplar tekstil takviyelere uygulanmıştır.

Teorik hesap yöntemleri kullanılarak, tekstil ile takviye edilmiş prefabrik yapı elemanları tasarlanmıştır. Bu elemanların tasarımları aynı zamanda geleneksel çelik takviyeli elemanlarla karşılaştırılarak, ağırlık ve maliyet açısından değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, tekstil takviyeli yapı elemanlarının çelik elemanlara göre daha küçük kesit alanlarına ihtiyaç duyduğunu ve bu sayede toplam ağırlığın azaldığını göstermiştir. Bu durum, yapı elemanlarının ölü yükünün azaltılabileceği ve dolayısıyla yapıya daha az deprem kuvveti etkisi yapabileceği anlamında gelmektedir. Ancak, tekstil takviyeli prefabrik elemanların toplam maliyetinin çelik takviyeli elemanlara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Bu karşılaştırma sonuçlarına, tez kapsamında verilen daha önceden yapılmış tekstil beton örneklerine ve bu konuda yapılan çalışmalara dayanarak, tekstil donatıların prefabrik yapı elemanlarında çelik donatı yerine kullanılmasının, yapı sektöründe önemli potansiyellere sahip olduğu ve gelecekte bu alanda daha fazla kullanım bulabileceği öne sürülmektedir.

Anahtar kelimeler: Tekstil donatı, ince taneli beton, aderans, tekstil takviyeli beton

ANALYSIS OF TEXTILE REINFORCED PREFABRICATED ELEMENTS

ABSTRACT

The presented thesis focuses on the increasingly widespread use of high-tensile and corrosion-resistant textile reinforcements. The mechanical properties of these reinforcements are meticulously defined, and calculation methods for elements reinforced with textiles are provided. Modifications to traditional reinforced concrete calculations are applied to account for textile reinforcements.

Using theoretical calculation methods, prefabricated structural elements reinforced with textiles are designed. The designs of these elements are then compared with traditionally steel-reinforced elements, evaluating them in terms of weight and cost. The results indicate that textile-reinforced structural elements require smaller cross-sectional areas compared to steel elements, resulting in reduced overall weight. This suggests a potential reduction in dead loads on structural elements and, consequently, a diminished seismic impact on the structure. However, it is noted that the total cost of textile-reinforced prefabricated elements is higher than that of steel-reinforced elements.

Drawing upon previously conducted studies on textile-reinforced concrete examples provided within the scope of the thesis, these comparative results suggest that the use of textile reinforcements in prefabricated structural elements, instead of steel reinforcements, holds significant potential in the construction industry and may find increased utilization in the future.

Keywords: Textile reinforcement, fine grained concrete, adherence, textile reinforced concrete

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZ iv
ABSTRACT v
ŞEKİLLER LİSTESİ x
TABLOLAR LİSTESİ xiv

BÖLÜM BİR - GİRİŞ 1

1.1 Tekstil Donatı ile Güçlendirilmiş Beton 1
1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı 2
1.2.1 Amaç 2
1.2.2 Kapsam 2

BÖLÜM İKİ - LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3

2.1 Tekstil ile Güçlendirilmiş Beton (TTB) 3
2.1.1 Çimento Matrisi 3
2.1.1.1 İnce Taneli Beton 4
2.1.2 Tekstil Malzemeler 5
2.1.3 Tekstil Donatının Mekanik Özellikleri 7
2.1.4 Tekstil Donatının Korozyona Karşı Dayanıklılığı 12
2.1.5 Tekstil Donatının Geometrisi 12
2.1.6 Tekstil ile Güçlendirilmiş Betonun Davranışı 14
2.1.6.1 Tekstil takviyeli betonun çekme dayanımı 15
2.1.6.2 Tekstil Çekme Deneyi 16
2.1.6.3 Tekstil Takviyeli Betonun Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Davranışı 19
2.1.6.4 Çatlak Oluşumu 22

2.1.6.5 Tekstil Taviyeli Betonun Efektifliği ve Kenetlenmesi 23
2.2 Tekstil Takviyeli Beton Uygulamaları 24
2.2.1 Prefabrik Köprüler 25
2.2.2 Prefabrik Cephe Kaplama Panelleri 28
2.2.3 Kabuk Elemanlar 30
2.2.4 Mevcut Elemanların Güçlendirilmesi 31
2.3 Tekstil Takviyeli Betonun (TTB) Maliyeti 32

BÖLÜM ÜÇ - TEKSTİL TAKVİYELİ BETON TASARIM YÖNTEMLERİ 36

3.1 Tekstil Takviyeli Betonun (TTB) Eğilme Yükü Kapasitesi 36
3.1.1 Lineer Tasarım Yöntemi 36
3.1.1.1 Basitleştirilmiş Hesap İçin Yapılan Kabuller 36
3.1.1.2 Dengeli Donatı Oranı ve Çekme Kırılması 36
3.1.1.3 Tekstil Takviyeli Betonun Moment Taşıma Kapasitesi 38
3.1.1.4 Kenetlenme Faktörü 39
3.1.1.5 Malzeme Güvenlik Faktörü 40
3.1.2 Mobasher Basitleştirilmiş Gerinim Sertleşmesi Beton Modeli 41
3.1.2.1 Çekme ve Basınç Modelleri 41
3.1.2.2 Moment Kapasitesinin Türetilmesi 42
3.2 Tekstil Takviye İle Güçlendirilmiş Betonun Eğilme Yükü Kapasitesi 46
3.2.1 Basitleştirilmiş Tasarım Yöntemi 46
3.2.1.1 Model Kabulleri 46
3.2.1.2 Moment Kapasitesi Denklemlerinin Elde Edilmesi 47

BÖLÜM DÖRT - TEKSTİL TAKVİYELİ BETONARME ELEMANLARIN TASARIMLARI 50

4.1 Hesap Örnekleri 50
4.1.1 Çekme Deneyi Sonuçlarına Göre AR-cam Takviyeli Kiriş Tasarımı (Mobasher-Soranakom Gerinim Sertleşmesi Beton Modeli) 50
4.1.2 Karbon Takviye ile Mevcut Döşeme Güçlendirme Örneği (Basitleştirilmiş Tasarım Yöntemi) 53
4.2 Karşılaştırma Örnekleri 57
4.2.1 AR-cam Takviyeli / Çelik Takviyeli Cephe Paneli (Lineer Tasarım Yöntemi) 57
4.2.1.1 Çelik Takviye ile Cephe Paneli Hesabı 58
4.2.1.2 AR-cam Takviye ile Cephe Paneli Hesabı 60
4.2.1.3 AR-cam Sıva Filesi ile Cephe Paneli Hesabı 62
4.2.1.4 Cephe Paneli Donatı Yerleşimi 63
4.2.2 Karbon / Çelik Takviyeli Döşeme (Lineer Tasarım Yöntemi) 64
4.2.2.1 Çelik Takviye ile Döşeme Hesabı 65
4.2.2.2 Karbon Takviye ile Döşeme Hesabı (Aynı kesit) 67
4.2.2.3 Karbon Takviye ile Döşeme Hesabı (Azaltılmış Kesit Alanı) 69
4.2.2.4 Döşeme Donatı Yerleşimi 70
4.2.3 Karbon/Çelik Takviyeli Oluk Kirişi (Lineer Tasarım Yöntemi) 71
4.2.3.1 Çelik Takviye ile Oluk Kirişi Hesabı 72
4.2.3.2 Karbon Takviye ile Oluk Kirişi Hesabı (Azaltılmış Kesit Alanı) 74
4.2.3.3 Oluk Kirişi Donatı Yerleşimi 76
4.2.4 Karbon/Çelik Takviyeli Havuz (Lineer Tasarım Yöntemi) 77
4.2.4.1 Çelik Takviye ile Havuz Hesabı 80

4.2.4.2 Karbon Takviye ile Havuz Hesabı (Aynı Kesit) 82

4.2.4.3 Karbon Takviye ile Havuz Hesabı (Azaltılmış Kesit)..... 83

BÖLÜM BEŞ - SONUÇLAR VE YORUMLAR 85

5.1 Cephe Paneli 85

5.1.1 Tasarım Parametreleri 85

5.1.2 Ağırlık Karşılaştırması 85

5.1.3 Maliyet Karşılaştırması 87

5.2 Döşeme 88

5.2.1 Tasarım Parametreleri 88

5.2.2 Ağırlık Karşılaştırması 89

5.2.3 Maliyet Karşılaştırması 90

5.3 Oluk Kirişi 91

5.3.1 Tasarım Parametreleri 91

5.3.2 Ağırlık Karşılaştırması 92

5.3.3 Maliyet Karşılaştırması 93

5.4 Havuz 94

5.4.1 Tasarım Parametreleri 94

5.4.2 Ağırlık Karşılaştırması 95

5.4.3 Maliyet karşılaştırması 96

BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR VE ÖNERİLER 98

6.1 Tez Çalışmasından Elde Edilen Genel Sonuçlar 98

6.2 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler 99

KAYNAKLAR 100

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Farklı türdeki lifler (Hegger, 2001)..... 5

Şekil 2.2 Çok sayıda tek filamentin tekstil yapısını oluşturması (Adam, Bielak, Dommes,Will ve Hegger, 2020)..... 6

Şekil 2.3 Farklı tiplerdeki tekstil kumaşları a) çok eksenli karbon takviye b ve e)iki eksenli karbon takviye c) iki eksenli cam takviye d) cam- karbon kumaş (Alrshoudi, 2015)..... 7

Şekil 2.4 Farklı tekstil malzemelerin mekanik özellikleri (Hegger, 2001) 8

Şekil 2.5 İki katmanlı karbon ve cam takviyeli betonun eğilme deneyi altında yük-birim şekil değiştirme grafiği (Hegger ve diğer., 2006). 9

Şekil 2.6 Farklı tekstil geometrileri: a) atkı ekleme örgü kuımaş, b) kısa ekleme örgü kumaş, c) dokuma kumaş (Peled ve Bentur, 2000). 13

Şekil 2.7 Farklı geometrilerdeki eğilme davranışı (Peled ve Bentur, 2003). 14

Şekil 2.8 Çekme yükü altında çelik ve karbon takviyenin idealize edilmiş gerilme-birim şekil değiştirime grafiği (Schladitz ve diğer., 2012). 15

Şekil 2.9 Farklı formdaki tekstillerin yük taşıma kapasitesi (Hegger ve diğer., 2006c). 16

Şekil 2.10 Tek eksenli çekme deneyi numunesi (Banholzer, 2006). 17

Şekil 2.11 Numunelerin çekme testi altında yük deplasman davranışı (Banholzer, 2006). 17

Şekil 2.12 Numunelerin aktif filament sayısı deplasman diyagramı ve çekme yükü deplasman grafiği (Banholzer, 2006)..... 18

Şekil 2.13 Çimento matrisi içerisine gömülü demetin kopma mekanizması (Banholzer, 2006). 18

Şekil 2.14 Bağ katmanı modeli (Hegger, Bruckermann ve Chudoba, 2006). 19

Şekil 2.15 Tekstil takviyeli betonun tek eksenli yükleme altındaki gerilme birim şekil değiştirme davranışı (Hegger ve diğer., 2006). 20

Şekil 2.16 Tekstil takviyeli betonun gerilme-birim şekil değiştirme davranışı (Hegger ve Will, 2004). 21

Şekil 2.17 İç ve dış bağlanma (Reinhardt ve diğer., 2006b). 23

Şekil 2.18 Temsili demet yapısı ve aşılanma durumuna göre oluşan gerilme dağılımı (Hartig ve diğer., 2008). 24

Şekil 2.19 İlk segmental tekstil takviyeli köprü Oschatz, Almanya (Ehlig, Schladitz, Frenzel ve Curbach, 2012). 25

Şekil 2.20 Yaya köprüsü Kempten (Michler, 2013) 26

Şekil 2.21 Tekstil beton köprü Albstadt Lautlingen (Solidian GmbH)..... 26

Şekil 2.22 Tekstil takviyeli beton kullanılarak yapılmış son derece hafif ve ince yaya köprüsü (Solidian GmbH) 27

Şekil 2.23 Karbon ve çelik ile dizayn edilmiş köprü kesitinin farkı (Solidian GmbH) 27

Şekil 2.24 AR-cam tekstil takviyeli cephe panelleri RWTH Aachen Üniversitesi (Hegger, Zell ve Horstmann, 2008) 28

Şekil 2.25 Küçük formatlı cephe panelleri (Kulas, 2015)..... 29

Şekil 2.26 Karbon takviyeli cephe panelleri (Kulas, 2015) 29

Şekil 2.27 Tekstil takviyeli kabuk elemanlar (Scheerer, Chudoba, Garibaldi ve Curbach, 2017)..... 30

Şekil 2.28 Tekstil takviyeli hipar kabuklar RWTH Aachen (Scheerer, Chudoba, Garibaldi ve Curbach, 2017). 30

Şekil 2.29 Lamine tekstil takviyeli tonoz kabuklarından yapılmış bisiklet standı çatısı RWTH Aachen (Scheerer, Chudoba, Garibaldi ve Curbach, 2017) 31

Şekil 2.30 Farklı türdeki tekstil takviye fiyatları (Kruger, 2004)..... 32

Şekil 2.31 Farklı türdeki tekstil takviye fiyatları (Solidian GmbH, 2023)..... 33

Şekil 3.1 Dengeli durumda gerilme,birim şekil değiştirme ve iç kuvvetler (Bank, 2006) 38

Şekil 3.2 Kesit alanının kopma gerilmesine olan etkisi a) AR-cam b) karbon (Rempel, Ricker ve Hegger, 2019) 40

Şekil 3.3(a) Gerinim sertleşmesi ve yumuşaması çekme modeli ve (b) basınç modeli (Soranakom ve Mobasher, 2009)..... 42

Şekil 3.4 Çatlama sonrası birim şekil değiştirme grafiği, gerilme dağılımı grafiği ve terminoloji (a) birim şekil değiştirme dağılımı (b) gerilme dağılımı (Soranakom ve Mobasher, 2009)..... 43

Şekil 3.5 Terminoloji ve birim şekil değiştirme dağılımı (Schladitz, Frenzel, Ehlig ve Curbach, 2012)..... 47

Şekil 4.1 Mevcut döşeme elemanının donatı açılımı (Schladitz, Frenzel, Ehlig Curbach, 2012)..... 53

Şekil 4.2 Cephe paneli boyutları 57

Şekil 4.3 Rüzgar yükü sebebiyle cephe paneli üzerinde oluşan eğilme momentleri 58

Şekil 4.4 Cephe paneli kesiti donatı yerleşimi (mm) 64

Şekil 4.5 Döşeme boyutları 64

Şekil 4.6 Ölü ve hareketli yükler sebebiyle döşeme üzerinde oluşan eğilme momenti 65

Şekil 4.7 Döşeme donatı yerleşimi..... 71

Şekil 4.8 Oluk kirişi boyutu 71

Şekil 4.9 Oluk kirişi üzerinde oluşan eğilme momenti 72

Şekil 4.10 Çelik ile tasarımı yapılacak oluk kirişi kesit boyutları..... 73

Şekil 4.11 Tekstil ile tasarımı yapılacak oluk kirişi kesit boyutları 75

Şekil 4.12 Oluk kirişi donatı yerleşimi..... 77

Şekil 4.13 Havuz boyutları..... 78

Şekil 4.14 Havuz yan duvarlarına etkiyen kuvvetler 79

Şekil 4.15 Havuza ait sonlu elemanlar modeli ve havuz orta kısmında oluşan eğilme momenti 80

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 İnce taneli beton matrisinin karışım bileşeni (Portal, 2003) 4

Tablo 2.2 Farklı Tekstillerin Kalite Değerlendirmesi (Portal, 2003) 10

Tablo 2.3 Farklı türdeki liflerin mekanik özellikleri (Peled, Bentur ve Mobasher, 2017) 11

Tablo 2.4 Çift T prefabrik kiriş için karbon ve çelik beton maliyet karşılaştırması (Otto ve Adam 2019) 34

Tablo 4.1 Hesaplanan moment taşıma kapasiteleri (Schladitz, Frenzel, Ehlig Curbach, 2012) 55

Tablo 4.2 Deneysel moment taşıma kapasiteleri ve yük artışı (Schladitz, Frenzel, Ehlig Curbach, 2012) 56

Tablo 4.3 AR-cam tekstil donatıya ait özellikler 60

Tablo 4.4 AR-cam sıva filesine ait özellikler 62

Tablo 4.5 GRID Q95/95-CCE-38 Tekstil donatının özellikleri 67

Tablo 5.1 Cephe paneline ait tasarım parametreleri 85

Tablo 5.2 Cephe paneli için, çelik takviyeli betonarme eleman referans alınarak normalize edilmiş ağırlık karşılaştırması 86

Tablo 5.3 Cephe paneli için, çelik takviyeli betonarme eleman referans alınarak normalize edilmiş maliyet karşılaştırması 88

Tablo 5.4 Döşemeye ait tasarım parametreleri 89

Tablo 5.5 Döşeme için, çelik takviyeli betonarme eleman referans alınarak normalize edilmiş ağırlık karşılaştırması 90

Tablo 5.6 Döşeme için, çelik takviyeli betonarme eleman referans alınarak normalize edilmiş maliyet karşılaştırması 91

Tablo 5.7 Oluk kirişine ait tasarım parametreleri..... 92

Tablo 5.8 Oluk kirişi için, çelik takviyeli betonarme eleman referans alınarak normalize edilmiş ağırlık karşılaştırması 93

Tablo 5.9 Oluk kirişi için, çelik takviyeli betonarme eleman referans alınarak normalize edilmiş maliyet karşılaştırması..... 94

Tablo 5.10 Havuza ait tasarım parametreleri 95

Tablo 5.11 Havuz için, çelik takviyeli betonarme eleman referans alınarak normalize edilmiş ağırlık karşılaştırması 96

Tablo 5.12 Havuz için, çelik takviyeli betonarme eleman referans alınarak normalize edilmiş maliyet karşılaştırması..... 97

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

1.1 Tekstil Donatı ile Güçlendirilmiş Beton

Betonarme 19.yüzyılın ortalarında yapısal inşaat uygulamalarında görülmeye başlandı (Shaeffer, 1992). Günümüzde betonarme çok yaygın bir şekilde kullanılmakta ve gelişimine devam etmektedir. Beton tek başına yüksek basınç dayanımına sahip olsa da çekme dayanımı çok düşüktür. Bu nedenle beton, çelik ile takviye edilerek çekmeye karşı dayanımı arttırılır. Çelikle güçlendirilmiş beton yapılar, betonun koruyucu ortamının yetersiz olması durumunda korozyona karşı hassasiyet gösterir ve yapısal bütünlük kaybına uğrar (Domone ve Illston, 2010). Bu sebeple, korozyondan korunmak için 25-75 mm aralığında koruyucu bir tasarım örtüsü zorunlu kılınmıştır. Ancak artan kesit kalınlıkları yapıların da öz ağırlığının artmasına sebep olur. Çelikle güçlendirilmiş beton yapıların dayanıklılığını arttırmak için yapılan diğer çalışmalar arasında paslanmaz çelik çubuklar, epoksi ile kaplanmış çelik çubuklar, lifli polimer donatılar ve liflerin kullanımı bulunmaktadır (Nmai ve diğer., 2006). Bu takviye yöntemlerinin özellikle dayanıklılık, tasarım kontrolü ve örtü kalınlığı gibi zayıf yönleri, son zamanlarda tekstil ile takviye edilmiş beton (TTB) adlı yenilikçi kompozit malzemeler ile aşılmıştır.

Günümüzde, özellikle inşaat endüstrisinde, kaynakların kısıtlı olması, enerji tüketimi ve atıkların azaltılması ihtiyacına dair bir farkındalık gelişmektedir. Çok eksenli paslanmaz tekstil kumaşlar tarafından güçlendirilen ince taneli bir beton matrisi içeren tekstil takviyeli beton, sürdürülebilir bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Tasarımı sadece dayanıklılığı arttırmakla kalmayıp, aynı zamanda beton kullanımının azaltılmasına yardımcı olur. Bu yeni kompozit malzemeler günümüzde üniversiteler tarafından kapsamlı şekilde araştırılmaktadır. Bu araştırmalar sonucunda, TTB'nin ince, hafif modüler ve serbest formdaki yapıları üretebilecek aynı zamanda korozyon riskini ortadan kaldırabilecek bir potansiyele sahip olduğu bulunmuştur (Brameshuber, 2006).

Tamamen TTB'den üretilmiş bir yaya köprüsünün tamamlanması (Hegger ve diğer., 2011) ve ince cidarlı kendi kendini destekleyebilen TTB sandviç panellerin geliştirilmesi endüstriyel uygulamaların bazı örnekleridir. Ayrıca çeşitli uygulamalarda mevcut çelikle takviye edilmiş beton yapılar için uygun bir güçlendirme malzemesi olduğu da kanıtlanmıştır (Ortlepp ve Curbach, 2009).

Sonuç olarak, tekstil takviyeli beton, inşaat endüstrisinde büyük bir yenilik olarak kabul edilebilir. Hafifliği, dayanıklılığı ve mekanik özellikleri ile gelecekte daha sık tercih edilecek bir yapı malzemesi olmaya adaydır. Ancak şu ana kadar, TTB için oluşturulmuş tasarım standartları bulunmadığı için bireysel uygulamalar yapabilmek için gerekli onayların alınması ve kapsamlı deneysel programlara hala ihtiyaç vardır.

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

1.2.1 Amaç

Bu tezin amacı, gelecekteki binalar için TTB'nin olası kullanımını keşfetmektir. Tezin genel amacını karşılamak için eğilme davranışı ile ilgili olarak aşağıdaki hedefler belirlenmiştir.

-Geleneksel çelikle güçlendirilmiş betona kıyasla TTB'nin potansiyelini araştırmak

-Teorik çalışmalar aracılığıyla farklı tekstil malzemeleri kullanarak TTB'nin yapısal davranışını genel anlamda incelemek ve mekanik özelliklerini tanımlamak.

-TTB'nin tasarımının nasıl modelleneceğini daha önceden ortaya konmuş yöntemler üzerinden yapmak.

-TTB için yaygın analitik modellerin uygulanabilirliğini değerlendirmek

1.2.2 Kapsam

Yukarıda verilen amaçların yerine getirilmesi için, hayata geçirilmiş TTB örnekleri ve teorik örnekler incelenecektir. Bu örnekler üzerinden yorumlamalar yapılıp, geleneksel beton ile TTB arasında farklı parametreler üzerinden karşılaştırmalar yapılacaktır.

BÖLÜM İKİ
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Tekstil ile Güçlendirilmiş Beton (TTB)

Tekstil donatılı betonun tarihçesi oldukça yeni olmasına rağmen inşaat endüstrisinde önemli gelişmeler gösteren yenilikçi bir malzemedir. İlk olarak 1990'ların ortalarında Almanya'da geliştirilmeye başlanmıştır. Geleneksel çelik donatılı sistemlerinin yerine yüksek dayanımlı tekstil malzemelerinin kullanılmasıyla oluşturulan bu malzeme, betonarme yapılarda çatlama ve korozyon gibi sorunlara karşı etkili bir çözüm sunar.

Tekstil ile güçlendirilmiş betonun avantajları oldukça etkileyicidir. İlk olarak, geleneksel çelik donatıya kıyasla daha hafif bir malzemedir. Bu nedenle taşıma ve kurulum süreçlerini kolaylaştırırken inşaat maliyetlerini azaltır. Ayrıca tekstil donatılı betonun korozyona dayanıklılığı yapıların ömrünü uzatarak bakım maliyetlerini düşürür. Bu sayede inşaat projelerinde yaratıcı ve verimli tasarımlar mümkün olur. Ayrıca tekstil takviye sürdürülebilir inşaat uygulamalarını destekleyen çevre dostu bir seçenek sunar. Çünkü üretimi daha az enerji ve karbon salınımı gerektirebilir. Bu nedenle, tekstil ile güçlendirilmiş beton inşaat sektöründe gelecekte daha fazla kabul görmesi beklenen yenilikçi bir malzeme olarak öne çıkmaktadır.

2.1.1 Çimento Matrisi

TTB'yi tekstil takviye ve çimento matrisi oluşturmaktadır. Tekstil donatı ve çimento matrisi kendi özelliklerini korurken, bu özellikler nihai kompozit özelliklerini etkiler (Schwartz, 1997). Son yıllarda çimento matrisi, inşaat sektörününü ucuzluğu ve basınç altında yüksek dayanımı gibi mekanik özellikleri sebebiyle domine etmektedir. TTB davranışında ise çimento matrisinin etkisi büyüktür çünkü tekstil takviye çimento matrisi ile çevrelenmiştir. Bu nedenle çimento matrisinin ve tekstil takviyenin uyumlu çalışabilmesi ve aralarında yeterli aderansın sağlanabilmesi davranış için büyük öneme sahiptir. Matris ile tekstil takviyenin arasında yeterli aderansın sağlanamaması durumunda verimlilik düşer ve istenilen davranış elde

edilemez. Kompozit malzemenin davranışı matris kalitesinin arttırılmasıyla iyileştirilebilir (Peled, Bentur ve Yankelevsky, 1999).

2.1.1.1 İnce Taneli Beton

Geleneksel betonarmede kullanılan çimento matrisi, tekstil takviye için kullanılan çimento matrisinden ayrılır. Tekstil donatıyı oluşturan filamentlerin boyutları çok küçük olduğundan dolayı, matris ile takviye arasındaki aderansın sağlanabilmesi için ince taneli beton kullanılır. İnce taneli beton, filamentlerinin arasına nüfuz etme olasılığını arttırır ve aralarındaki bağı geliştirir. Çimento matrisinin nüfuzu çeşitli faktörlerden etkilenir; ipliğin geometrisi, çimentonun tanecik boyutu ve kapiler kuvvet (Dolatabadi ve diğer., 2006). İnce taneli betonda kullanılan agregaların maksimum çapı 2 mm olmaktadır. Yüksek akışkan beton, yeterli bağ ve yük transferini sağlamak için tekstil takviye örgü yapısına uygun şekilde nüfuz etmesi gerekmektedir. İnce taneli betonun birim hacim ağırlığı yaklaşık olarak 2000-2200 kg/m3 arasında bir değer almaktadır. Tablo 2.1'de ince taneli betona ait örnek bir matris karışım bileşimi verilmiştir.

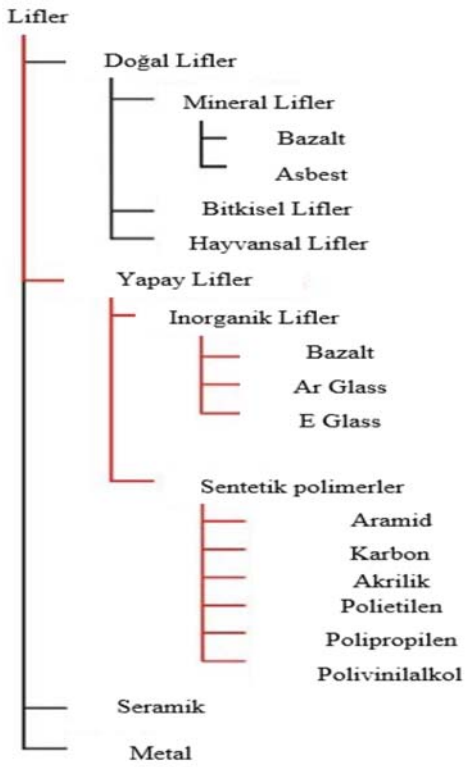
Tablo 2.1 İnce taneli beton matrisinin karışım bileşeni (Portal, 2003)

Malzeme	Ağırlık (kg/m3)	Yoğunluk (kg/m3)	m3/m3
Düşük Alkali Çimento	406	3200	0,127
Uçucu Kül	121	2300	0,053
Mikro silika	22	2200	0,010
0/4 Kum	1400	2640	0,530
Glenium SKY 532-SU	7,6	1100	0,007
Amex SB 22	3	1010	0,003
Su	170,56	1000	0,171
Hava	-	-	0,100
Toplam	2130,16	-	1,000

Çimento matrisi, seçilen tekstil takviye ile kimyasal olarak uyumlu olmalı, aynı zamanda istenen yük taşıma kapasitesini, mekanik davranışı ve numune geometrisi ile üretim yöntemi içini uygun özellikleri sağlamalıdır (Brameshuber, 2006).

2.1.2 Tekstil Malzemeler

Tekstil yapımında kullanılan liflerin özellikleri, miktarı ve geometrisi tekstil donatılı kompozitlerin özelliklerini belirlemektedir. Tekstil malzemeleri oluşturan liflerin sınıflandırması Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Farklı türdeki lifler (Hegger, 2001)

Tekstil donatı ile ilgili detaylı konulara geçilmeden önce yaygın olarak yayınlarda ve bu tez kapsamında kullanılan terimleri açıklamak gerekmektedir.

Tekstil malzemeler: Doğal veya doğal olmayan liften yapılmış ipliklerden örme veya dokuma yoluyla elde edilen son ürün veya malzemedir

Textile Fabric (Tekstil kumaş): Doğal veya yapay liflerin çeşitli geometriler kullanılarak bir araya getirilmesiyle elde edilen malzemedir.

Filament (Filament): Tek bir ince elyafı ifade eder.

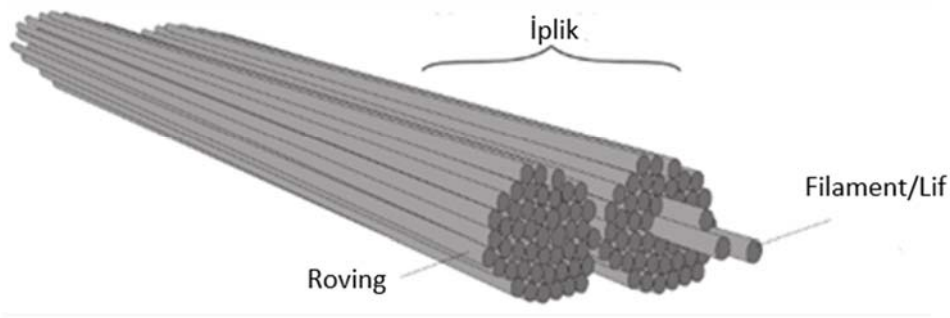
Strand: Rovinglerden oluşan demetleri ifade eder.

Tow (İplik): Birçok sürekli filamentin belirli bir bükülme olmadan bir araya getirilmesiyle oluşturulan daha büyük bir elyaf ipliğini ifade eder.

Yarn (İplik): Elyafın iplik haline getirilmiş hali olarak tanımlanır. Tekstil takviyeli betonun üretiminde, elyaf ipliklerinin kullanılması yaygın bir uygulamadır.

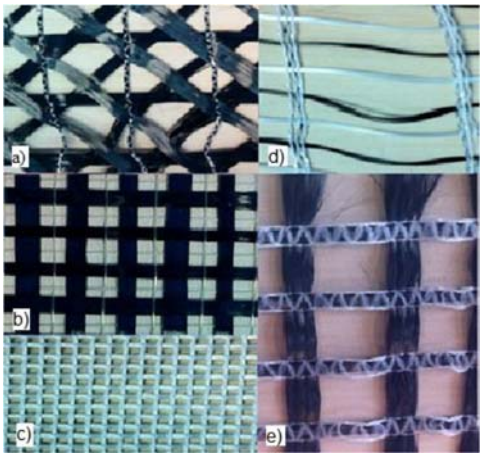
Roving: Elyaf takviyelerinin daha kalın bir formudur. Uzun elyaf demetlerini ifade eder. Roving, elyaf takviyelerini daha büyük bir şekilde temsil eder.

Matris: Maksimum dane boyutu genellikle 2mm ve daha küçük olan mineral esaslı taşıyıcı özelliği olan harç veya ince taneli beton malzemelerdir (Roye, Stuve ve Gries, 2005).



Şekil 2.2 Çok sayıda tek filamentin tekstil yapısını oluşturması (Adam, Bielak, Dommes,Will ve Hegger, 2020)

Tekstil malzemesi genellikle iki boyutlu çift eksenli tekstil kumaştan oluşur. Yüke paralel yönde ve dik yönde iplikler bulunur. Bu iplikler çoklu filamentlerden oluşan lif demetleridir. Tek bir roving yüzlerce hatta binlerce filamentten oluşmaktadır. Tekstil elyafı dokuma, şerit şeklinde kumaş, örgü veya dikme gibi birçok formda bulunabilir (Mobasher, 2011). Şekil 2.3'de farklı geometrilere sahip tekstil kumaşlar verilmiştir.

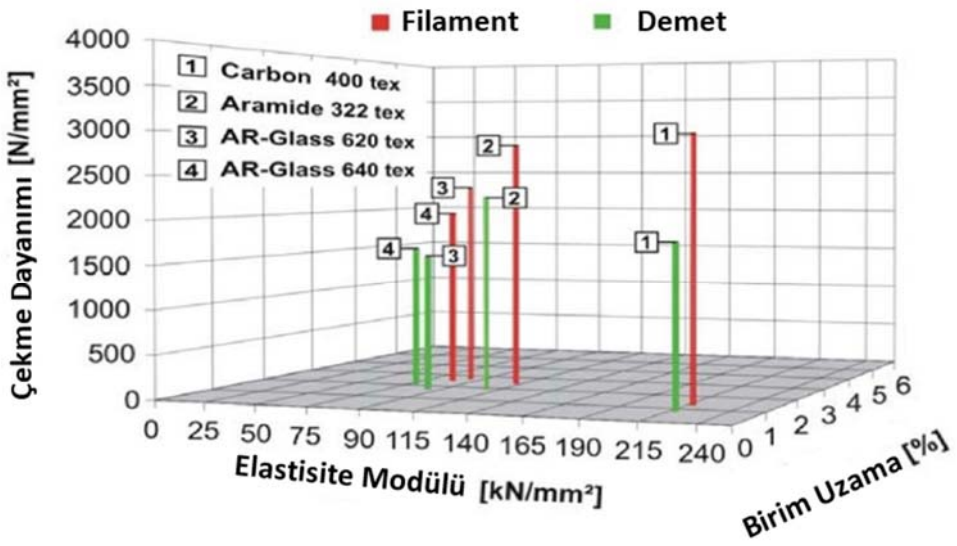


Şekil 2.3 Farklı tiplerdeki tekstil kumaşları a) çok eksenli karbon takviye b ve e)iki eksenli karbon takviye c) iki eksenli cam takviye d) cam- karbon kumaş (Alrshoudi, 2015)

Tekstil takviyesi üç farklı seviyede dikkate alınmalıdır. Birincisi, rovingleri oluşturan tekli filamentlerin mekanik özellikleri ile ilgilidir. İkincisi, bu filamentlerin roving geometrisini nasıl oluşturduğuyla ilgilidir. Üçüncüsü de rovinglerin farklı şekillerde birleştirilmesiyle elde edilen kumaşın özellikleridir. Bu üç farklı seviyede farklı davranışlar ve özellikler elde edilmektedir. Tek bir filamentin ya da rovingin davranışını baz alarak kompozit için hesaplamalar yapmak yanılgıya yol açmaktadır.

2.1.3 Tekstil Donatının Mekanik Özellikleri

Tekstil donatılar çok çeşitli malzemelerden üretilmektedir. Bu da donatıların mekanik özelliklerini ve kullanım alanlarını çeşitlendirmektedir. Şekil 2.4'de aramid, carbon ve cam tekstil takviyelere ait elastisite modülü, kopma birim uzaması ve çekme dayanımı özellikleri verilmiştir.

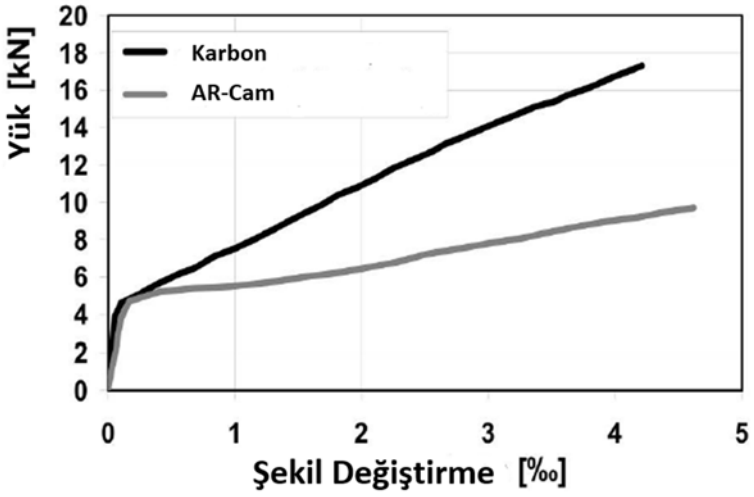


Şekil 2.4 Farklı tekstil malzemelerin mekanik özellikleri (Hegger, 2001)

Grafiğe bakıldığında karbon takviyenin çekme dayanımının çok yüksek değerlere ulaşabildiği görülmektedir. Cam takviye ile karşılaştırıldığında ise çekme dayanımının ve elastisite modülünün neredeyse iki katı olduğu da görülebilir. Bu takviyelerin çelik donatının çekme dayanımı düşünüldüğünde ulaştıkları maksimum gerilme değerleri etkileyicidir.

Ayrıca daha önce de bahsedildiği gibi filamentlerin, demetlerin ve tekstil kumaşın davranışı birbirinden farklıdır. Örneğin karbon takviye için bir adet filamentin çekme dayanımı 3000 MPa iken demet için bu değer 1500 MPa değerlerine kadar inmektedir. Benzer bir yorumlama cam takviye ve aramid takviye için de rahatlıkla yapılabilmektedir. Filamentlerin mekanik özelliklerinin ipliklere göre daha iyi olduğu söylenebilmektedir.

Şekil 2.5'de ise Hegger ve diğerleri tarafından yapılan deneyin grafiği verilmiştir. Şekil iki katmanlı karbon ve cam ile takviye edilmiş betonun yük-birim şekil değiştirme grafiğini göstermektedir.



Şekil 2.5 İki katmanlı karbon ve cam takviyeli betonun eğilme deneyi altında yük-birim şekil değiştirme grafiği (Hegger ve diğer., 2006).

Karbon takviyeli beton ile cam takviyeli betonun davranışı beton çatladıktan sonra gözle görülür bir şekilde ayrılmaktadır. Çatlama meydana geldikten sonra karbon takviyeli kompozitin rijitliği cam takviyeli kompozitin üç katıdır. Bunun sebebi karbon donatının yüksek elastisite modülüne sahip olmasıdır (Hegger ve diğer., 2006b). Hem cam hem de karbon tekstilin davranışı nihai yüke ulaşılana kadar lineerdir (Yin, Xu ve Wang, 2015).

Durabilite de mekanik özellikler arasında belirleyici bir yere sahiptir. Çelik donatının korozyona uğraması ve çevre şartlarından büyük oranda etkilenebilmesi en büyük dezavantajlarından birini oluşturmaktadır. Tekstil malzemeler ise korozyona karşı avantajlar sağlayan özelliklere sahiptir. Cam veya karbon gibi tekstil malzemeler betonun alkali ortamına karşı iyi bir dirence sahiptir (Hartig ve diğer., 2008).

Tablo 2.2'de Portal (2003) tarafından tekstil donatıların özellikleri değerlendirilmiştir. Tabloya bakıldığında tekstil takviyelerin alkali çözeltilerine karşı yüksek dirence sahip olduğu görülmektedir. AR-cam tekstilin bağlanma davranışı karbona göre daha iyi olduğu belirtilmiştir. Talep/fiyat kısmında ise karbon takviyelere olan talebin düşük buna karşın fiyatın yüksek olduğu görülmektedir. Karbon ve bazalt tekstiller sıcaklığa karşı yüksek dirence sahipken, AR-cam tekstillerin sıcağa karşı direnci düşüktür.

Tablo 2.2 Farklı Tekstillerin Kalite Değerlendirmesi (Portal, 2003)

Donatı Malzemesi	Korozyona Karşı Dayanıklılık	Sıcaklığa Karşı Dayanıklılık	Bağlanma Kalitesi	Talep/Fiyat
Çelik Donatı	-Yüksek alkaline çözeltilerine karşı **yüksek** direnç -Düşük alkaline, nötr ya da asidik dış koşullara karşı **düşük** direnç	-Sıcaklığa karşı **ortalama** direnç -**Yüksek** termal genleşme ve iletkenlik	-Mekanik deformasyonlara karşı bağlı olarak **düşük-yüksek** bağlanma kalitesi	-**Yüksek/ Ortalama** - Yaygın kullanım
AR-cam	-Yüksek alkaline çözeltilerine karşı **ortalama-yüksek** direnç -Düşük alkaline, nötr ya da asidik dış koşullara karşı **yüksek** direnç	-Sıcaklığa karşı **düşük** direnç -**Ortalama** termal genleşme -**Düşük** iletkenlik	-Demetlerin yoğunluğuna bağlı olarak **ortalama** -Kılıflama ile arttırılabilir	-**Ortalama/ortalama** -Özellikle alkaline ortamlarına karşı kullanılır
Karbon	-Asidik, alkaline ve organik çözeltilere karşı **yüksek** direnç	-Sıcaklığa karşı **yüksek** direnç -**Düşük** termal genleşme -**Ortalama** termal iletkenlik	-**Düşük-ortalama** bağlanma -Daha küçük filamentler demet içerisinde düşük adezyona sebep olur. -Kılıflama ile arttırılabilir	-**Düşük/yüksek**

Bazalt	-Asidik, alkaline ve organik çözeltilere karşı **yüksek** direnç	-Sıcaklığa karşı **yüksek** direnç -**Düşük** termal genleşme ve geometrik olarak stabil -**Düşük** termal iletkenlik	-**Ortalama** bağlanma -Düşük sürtünme katsayısı -Kılıflama ile arttırılabilir	-**Düşük/ortalama** -Kolay çıkarılabilir doğal kaynak

Peled, Bentur ve Mobasher (2017), tarafından verilen farklı tekstil takviyelerin mekanik özellikleri Tablo 2.3'de görülmektedir. Çekme dayanımı değerlerine bakıldığında karbon takviyeleri 6000 MPa değerlerine kadar çekme dayanımına sahip olabildiği görülmektedir. Bu değer AR-cam için 2500 MPa olarak verilmiştir. Nihai uzama değerleri ise karbon için %1,5-2,0 arasında bir değer alırken, AR-cam için bu değer %3,6 olarak verilmiştir. Karbon tekstillerin yoğunluğu 1,60-1,95 gr/cm3 değerleri arasındadır. Karbon takviyeler yüksek mekanik özelliklere paralel olarak birim fiyatları çok yüksektir. Bu nedenle bazı projelerde AR-cam ön plana çıkarken, yüksek dayanımların gerektiği durumlarda karbon takviyeler etkili bir seçenek olabilmektedir.

Tablo 2.3 Farklı türdeki liflerin mekanik özellikleri (Peled, Bentur ve Mobasher, 2017)

Lif Türü	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Nihai Uzama (%)	Yoğunluk (g/cm3)
AR-cam	2500	70	3,6	2,78
Karbon	3500-6000	230-600	1,5-2,0	1,60-1,95
Aramid	3000	60-130	2,1-4,0	1,40
Bazalt	3000-4800	79,3-93,1	3,1	2,70

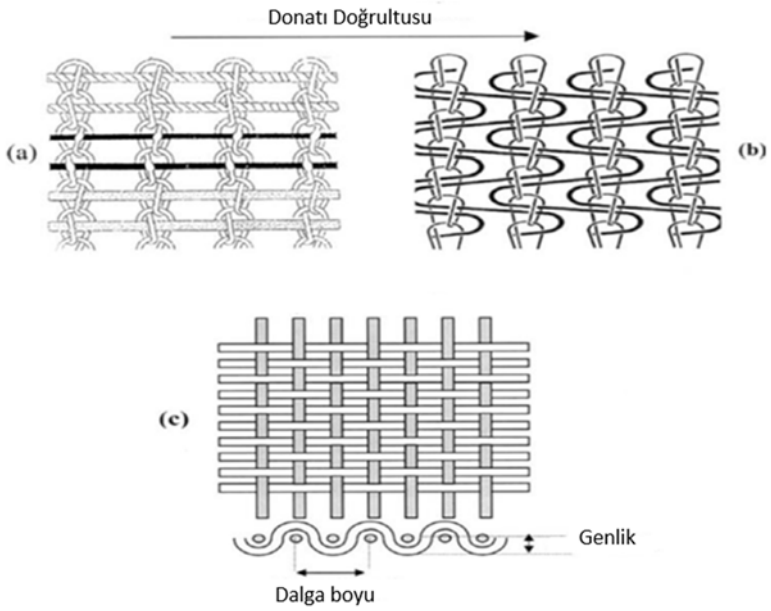
2.1.4 Tekstil Donatının Korozyona Karşı Dayanıklılığı

Tekstil donatı, inşaat sektöründe önemli bir yenilik olarak kabul edilen ve özellikle korozyona karşı dayanıklılığıyla öne çıkan bir yapı malzemesidir. Korozyon, geleneksel çelik donatının en büyük düşmanlarından biridir. Çelik donatı, zaman içinde su, tuzlar ve kimyasal maddelerin etkisi altında oksitlenir ve bu durum beton yapının dayanıklılığını ciddi şekilde tehlikeye atar. Ancak tekstil donatı, bu sorunu çözmek amacıyla tasarlanmış bir malzemedir ve korozyona karşı son derece dayanıklıdır.

Tekstil donatının korozyona karşı dayanıklılığının temel nedeni, kimyasal etkilere karşı direnç göstermesidir. Su, tuzlar ve diğer kimyasalların neden olduğu korozyon, tekstil donatının yapısını olumsuz etkilemez. Bu malzeme, kimyasal maddelere karşı koruyucu bir bariyer sağlar, böylece tekstil donatının korozyona uğramasını engeller. Bu da malzemenin daha uzun ömürlü olmasını sağlar. Bu, inşaat projelerinin daha dayanıklı ve sürdürülebilir hale gelmesine yardımcı olur. Korozyona karşı dayanıklılığı ve bunun yanında yüksek mekanik özellikleri sebebiyle tekstil donatı inşaat sektöründe geleceğin malzemesi olarak kabul edilmektedir. Tekstil takviyeli beton uzun vadeli maliyetleri azaltırken çevresel sürdürülebilirliği artırır ve birçok inşaat projesi için ideal bir seçenek haline gelir.

2.1.5 Tekstil Donatının Geometrisi

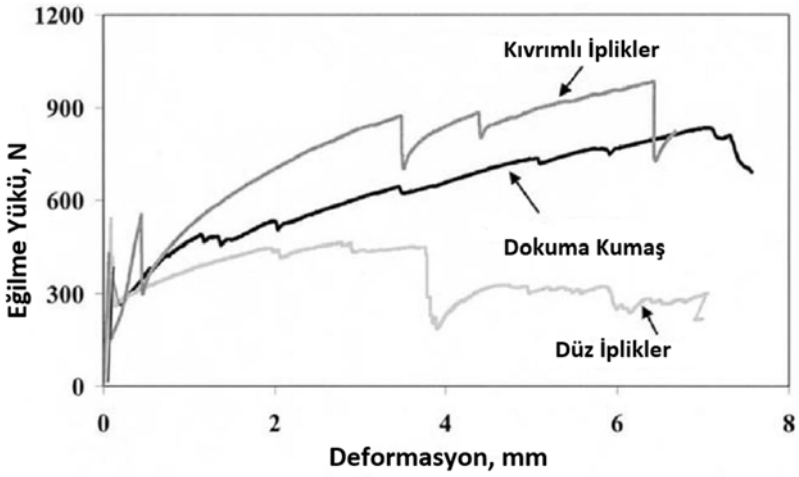
Lif-matris etkileşimi tekstil malzemenin geometrisinden doğrudan etkilenir. Farklı geometrilerde üretilen tekstil takviyelerin aderansı farklı olmaktadır. Bu geometri kenetlenme davranışı üzerinde olumlu bir etki oluşturabileceği gibi olumsuz da etkileyebilir. Kumaş geometrisi sadece rovinglerin bir arada tutunmasına indirgenmemelidir çünkü geometri aderansı arttırabileceği gibi gerilme sertleşmesinin elde edilmesine de yardımcı olabilir (Peled ve Bentur, 2000). Peled ve Bentur (2000) tarafından yapılan deneylerde 3 farklı tekstil kumaş geometrisi incelenmiş ve dokuma kumaşın verimlilik faktörünü arttırabileceği bulunmuştur. Kıvrımlı geometri liflerin betona daha iyi tutunabilmesini sağlar ve etkileşimi arttırır. Bu da davranışın iyileşmesini sağlar (Peled, Bentur ve Yankelevsky, 1999).



Şekil 2.6 Farklı tekstil geometrileri: a) atkı ekleme örgü kuımaş, b) kısa ekleme örgü kumaş, c) dokuma kumaş (Peled ve Bentur, 2000).

Şekil 2.7'de grafiği verilen Peled ve Bentur (2003), tarafından yapılan deneylerde aynı hacim oranına sahip olmasına rağmen kıvrımlı geometriye sahip tekstil donatıların örme ve düz donatılara göre daha iyi eğilme davranışı sergilediği görülmüştür. Kıvrımlı ipliğin betona daha iyi bir ankraj sağladığı düşünülebilir. Ayrıca yine aynı deney sonucunda örgü kumaşın düz demetlerden oluşan tekstil donatının iki katı eğilme dayanımı gösterdiği görülmüştür.

Özetle tekstil geometrisinin davranışa katkısı tartışılmaz bir gerçektir. Bu nedenle davranışı iyileştirebilecek geometriler ile donatı oranını arttırmadan daha iyi eğilme davranışı elde edilebilmektedir. Bu nedenle farklı tekstil geometrilerinin etkisi araştırılmalıdır.

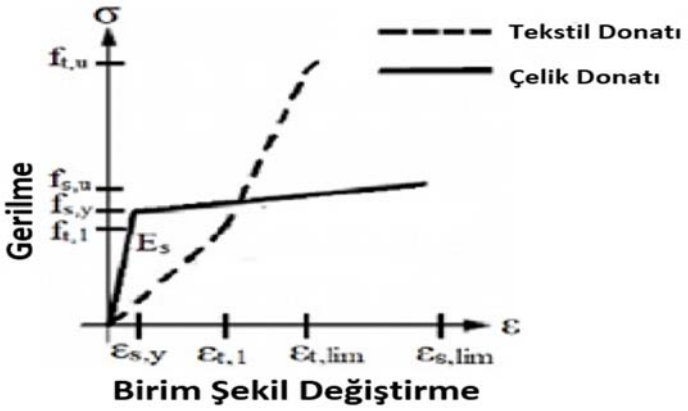


Şekil 2.7 Farklı geometrilerdeki eğilme davranışı (Peled ve Bentur, 2003).

2.1.6 Tekstil ile Güçlendirilmiş Betonun Davranışı

Bu bölümde farklı başlıklar altında tekstil takviyeli betonun davranışı incelenecektir. Genel olarak tekstil ile güçlendirilmiş betonun birim şekil değiştirme davranışı çelikle güçlendirilmiş betona benzese de tekstil donatının çeliğe nazaran bir akma davranışı yoktur. Akma davranışının olmaması malzemenin göçmeye giderken açık belirtiler vermemesine sebep olur (Häußler-Combe ve Hartig, 2007).

Şekil 2.8'de çelik ile tekstil donatının gerilme altındaki davranışı görülmektedir. Çelik takviye akma limitine ulaştıktan sonra göçmeye kadar sünek bir davranış gösterirken tekstil takviyede böyle bir davranış görülmez. Tekstil donatı limit birim şekil değiştirme değerine ulaşınca gevrek bir şekilde kopar. TTB'nin yük taşıma davranışı kenetlenme mekanizmasından, tekstil malzemesinin mekanik özelliklerinden, türünden, miktarından ve beton içindeki yerleşiminden önemli ölçüde etkilenmektedir (Voss, 2006).



Şekil 2.8 Çekme yükü altında çelik ve karbon takviyenin idealize edilmiş gerilme-birim şekil değiştirime grafiği (Schladitz ve diğer., 2012).

2.1.6.1 Tekstil takviyeli betonun çekme dayanımı

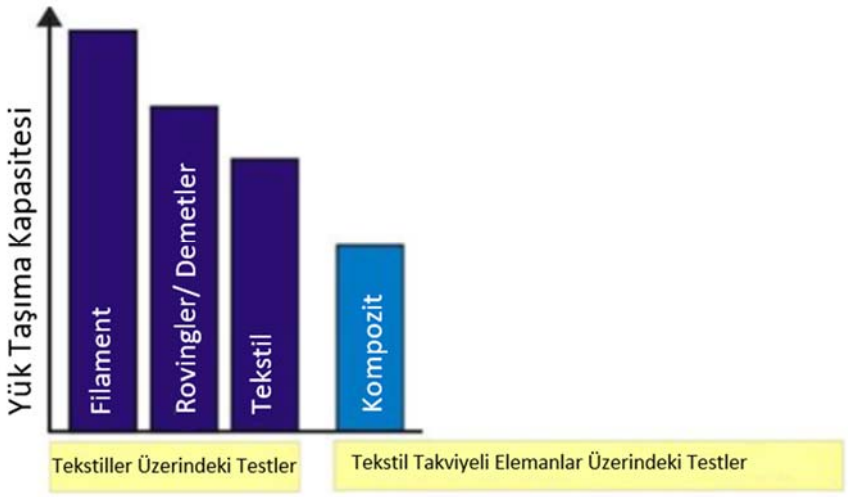
Matris ile donatı etkileşimi kuvvetlerin aktarımı için çok önemlidir. Eğer matris gelen kuvveti takviyeye aktaramazsa tekstil donatı ondan beklenen performansa erişemez ve kapasitesini kullanamamış olur. Tekstil donatı nihai çekme dayanımına matris ile tekstil malzeme arasındaki bağ mekanizması sebebiyle tam anlamıyla erişemez (Banholzer, 2006). Bu nedenle sadece rovingler üzerinden yapılan deneylerden elde edilen dayanım değerlerini tasarım parametresi olarak alıp kullanmak yanlış olacaktır. Rovingler üzerinden elde edilen mekanik özellikler matris donatı arasındaki aderansı göz önünde bulundurmadığı için bu veriler yardımıyla yük taşıma kapasitesi öngörülemez. Kompozitin çekme dayanımının, filamentin çekme dayanımından %50 daha az olduğu söylenebilir (Jesse ve Curbach, 2003). Aşağıdaki şekilde filament, roving ve tekstil formlarında bulunan tekstil takviyenin yük taşıma kapasitesini ve kompozitin yük taşıma kapasitesini göstermektedir. Bu farklılığın sebebi birden çok faktöre bağlıdır ve bu nedenle birden çok filamentten oluşan malzemenin kopma mekanizmasının karışık olması sebebiyle çok açık değildir. Farklı formlar arasında oluşan bu dayanım farklılığına sebep olabilecek etkenler aşağıda sıralanmıştır (Hegger ve diğer., 2006b):

-Filament malzemesi ile ilgili belirsizlikler

-Üretim sırasında bazı filamentlerde oluşabilecek kusurlar

-Filamentlerin kendi içindeki ve filament demetlerinin matris ile olan kenetlenme özellikleri

-Liflerin geometrisi ve yerleşimi

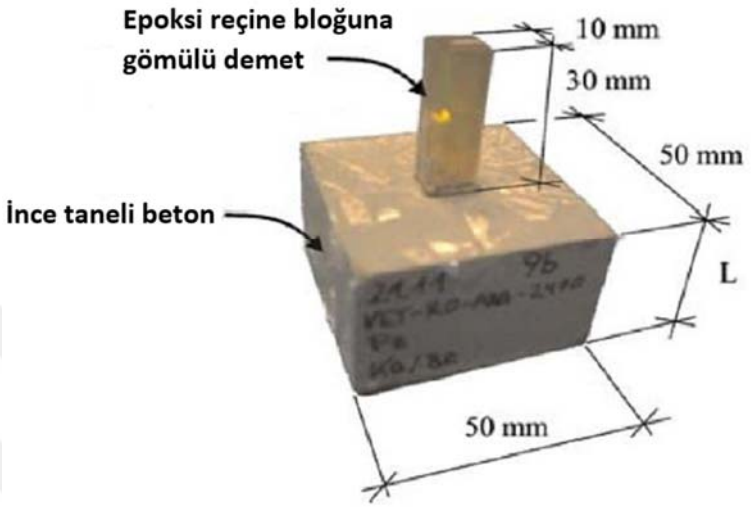


Şekil 2.9 Farklı formdaki tekstillerin yük taşıma kapasitesi (Hegger ve diğer., 2006c).

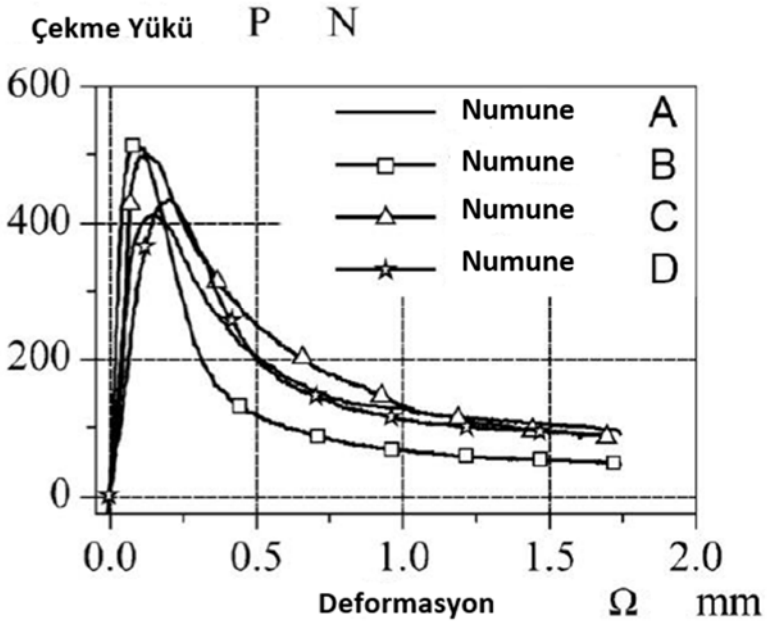
2.1.6.2 Tekstil Çekme Deneyi

Çekme deneyi matris ile takviye arasındaki etkileşimin anlaşılması için önemli bir rol oynayabilir. Dış filamentler çimento matrisi ile iyi bağlanmıştır ancak iç lifler çimento matrisi ile doğrudan bir temasa sahip olmadığından çekme kuvvetleri altında dış liflerden sıyrılırlar ve beraber hareket etmezler (Bentur ve Mindness, 2006). Bu nedenle dış filamentlerin kaymaya karşı gösterdiği direnç iç filamentlere kıyasla fazladır (Zhu ve Bartos, 1997). Banholzer (2006) tarafından hazırlanan dört AR-cam örneği, Şekil 2.10'da gösterilen deney düzeneği kullanılarak test edilmiştir. Şekil 2.11 bu dört numunenin çekme davranışını göstermektedir. Ayrıca Banholzer (2006), bu deney sırasında aktif olarak çalışan filament sayısını da araştırmıştır. Şekil 2.12'de test sırasında aktif olarak çalışan filament sayısını göstermektedir. Şekil 2.12'de görüleceği üzere maksimum yüke ulaşıldığında filamentlerin tamamının kopmadığı gözlemlenmektedir. Deplasman arttıkça aktif filament sayısı büyük ölçüde azalır ancak yüklemenin sonunda sayısı başlangıçtaki filament sayısına oranla az da olsa hala kopmayan filamentler bulunmaktadır. Maksimum yük durumunda aktif filamentlerin sayısının tüm filamentlere oranlanması ile elde edilen katsayılar tasarımlarda teorik

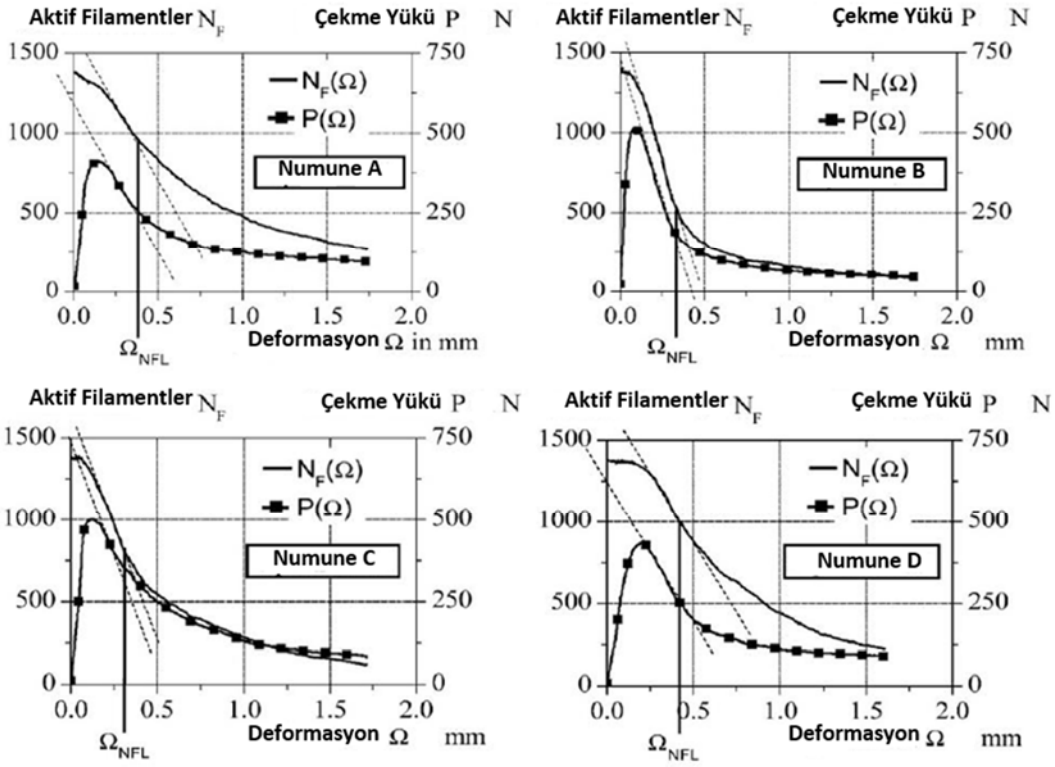
hesaplamalarda kullanılmaktadır. Taşıma kapasitesi hesaplanırken, kesit alanının tamamında liflerin eşit bir şekilde gerilmez bu nedenle kesit alanında bir azaltma yapılarak hesaplamalar yapılır. Bu sayede gerçeğe yakın teorik hesaplamalar yapmak mümkündür.



Şekil 2.10 Tek eksenli çekme deneyi numunesi (Banholzer, 2006).

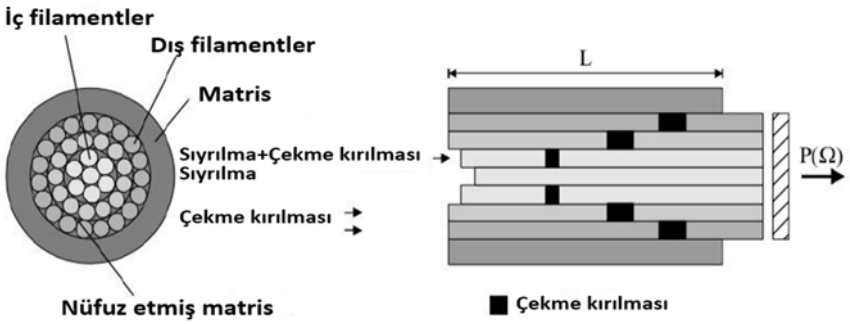


Şekil 2.11 Numunelerin çekme testi altında yük deplasman davranışı (Banholzer, 2006).



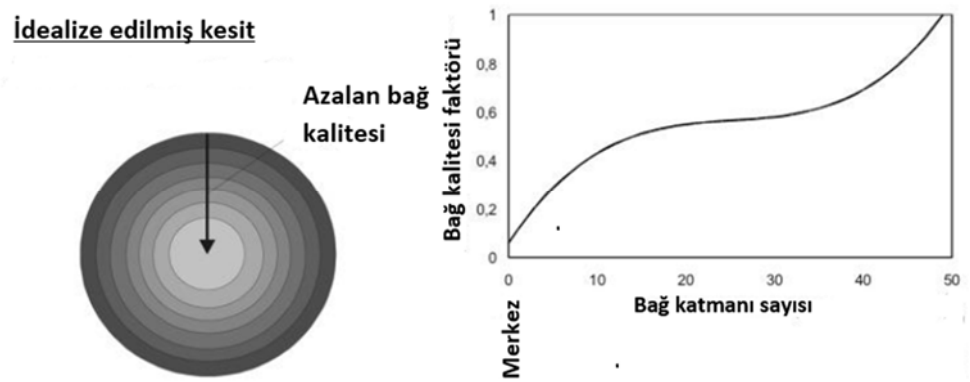
Şekil 2.12 Numunelerin aktif filament sayısı deplasman diyagramı ve çekme yükü deplasman grafiği (Banholzer, 2006).

Demet içerisindeki dış liflerin matrisle bağlı olması ve iç liflerin doğrudan bir bağının bulunmaması bu lifler arasında bir hareket farkı oluşturur. Bu sebeple bütün lifler aynı anda aktifleşemez. Buradan kesitteki tüm liflerin pik yük anında çalışamayacağı çıkarılabilir. Bu nedenle tek bir demetin çekme dayanımı ile beton içerisindeki bir demetin çekme dayanımı arasında fark oluşur. Bu mekanizma aşağıda Şekil 2.13'de temsili bir şekilde gösterilmiştir. Burada oluşan hareket ve liflerin durumu görülmektedir.



Şekil 2.13 Çimento matrisi içerisine gömülü demetin kopma mekanizması (Banholzer, 2006).

Bu konsepte dayalı olarak, Heger Bruckermann ve Chudoba (2004), dışarıdan içeriye doğru değişen bağlanma oranını analiz etmek için Şekil 2.14'de görülen bağ katmanı modelini geliştirdi. Şekilden de görüleceği gibi bu model bağlanmanın dışardan içeriye doğru azaldığını varsayar ve rovingleri katmanlar halinde idealleştirir. Deney esnasında maksimum yüke ulaşıldığında filamentlerin yaklaşık %65'i aktif olur ve geri kalanı pik sonrası bölgede aktifleşir (Hegger, Bruckermann ve Chudoba, 2004).



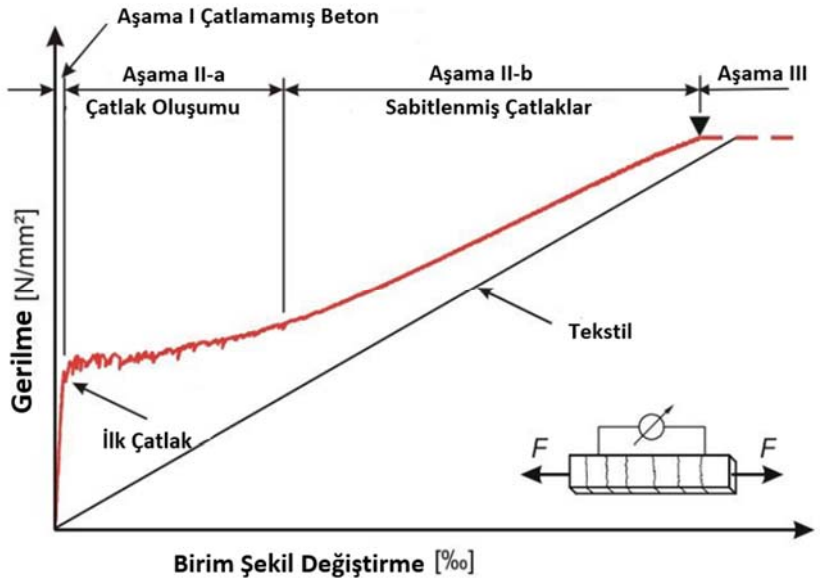
Şekil 2.14 Bağ katmanı modeli (Hegger, Bruckermann ve Chudoba, 2006).

Bu nedenle bu davranış dış filamentlerin matrisle olan bağı ve iç filamentlerin kaymaya davranışının kontrolündedir (Banholzer, 2006). Ayrıca bu kayma davranışı sonucunda liflerde düzensiz gerilim dağılımı oluşur.

2.1.6.3 Tekstil Takviyeli Betonun Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Davranışı

Tek bir filamentin davranışı kopmaya kadar elastiktir çünkü çelik bir akma bölgesi bulunmaz. Ancak bir demet ya da bir tekstil kumaş için gerilme-birim şekil değiştirme davranışı karmaşıktır ve birçok faktörden etkilenir.

Tekstil takviyeli betonun tek eksenli yük altındaki gerilme-birim şekil değiştirme davranışı Şekil 2.15'de verilmiştir. Davranış üç farklı aşamada incelenebilir.



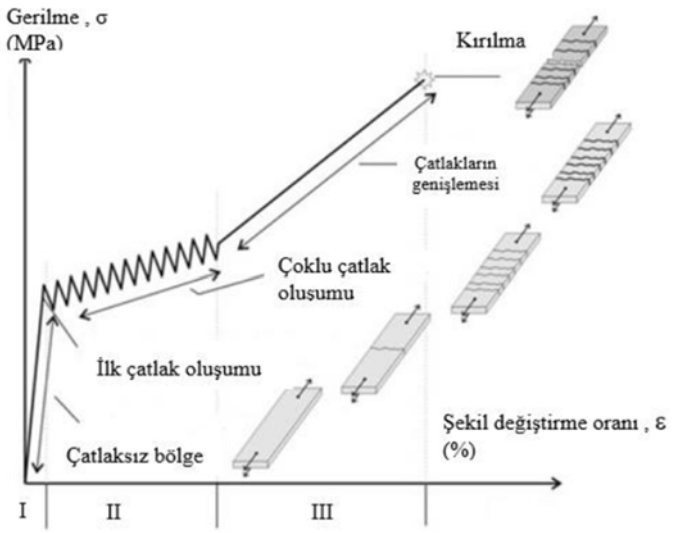
Şekil 2.15 Tekstil takviyeli betonun tek eksenli yükleme altındaki gerilme birim şekil değiştirme davranışı (Hegger ve diğer., 2006).

İlk aşamada henüz betonda çatlak oluşmamıştır bu nedenle kompozitin rijitliğini ince taneli betonun rijitliği ve tekstil malzemesinin rijitliği oluşturur.

İkinci aşamada ise ilk çatlak oluştuktan sonra rijitlik azalır. Matris-takviye etkileşimi arasındaki aderans yardımı ile çekme kuvvetleri tekstil donatıya aktarılır. İlave çatlaklar oluşur. Bütün çatlaklar oluşana kadar bu evre devam eder. Çatlakların genişliği ve kendi aralarındaki mesafe matris-takviye etkileşimine bağlıdır.

Üçüncü ve son aşamada artık ilave çatlaklar oluşmaz. Yük tekstil takviyeler tarafından taşınır ve bu nedenle teorik olarak bu aşamadaki rijitlik tekstil takviyenin rijitliğine eşittir. Tekstil takviyelerin plastik şekil değiştirme kapasitesi olmadığından nihai birim uzamaya erişilince tekstil malzemesi gevrek bir şekilde kırılır.

Şekil 2.16'da çatlakların oluşumuyla ilgili çizimler ve davranış grafiği görülmektedir.



Şekil 2.16 Tekstil takviyeli betonun gerilme-birim şekil değiştirme davranışı (Hegger ve Will, 2004).

Davranış matrisin çatlamasından önce ve sonra olmak üzere iki aşamada incelenirse, gerilme değerleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir.

Matris çatlamadan önce:

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f \eta V_f \tag{2.1}$$

$$\sigma_c = \sigma_m (1 - V_f) + \sigma_f \eta V_f \tag{2.2}$$

σ_m, σ_f : Sırasıyla liflerde ve matriste oluşan gerilme

V_m, V_f: Sırasıyla matris ve lif hacim oranları

η: Efektiflik faktörü

Matris çatladıktan sonra:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} \eta V_f \tag{2.3}$$

σ_{cu}: Kompozitin nihai dayanımı

σ_{fu}: Liflerin nihai dayanımı

Olarak ifade edilebilir. Buradaki efektiflik faktörü aktif olan filamentlerinin yüzdesi olarak düşünülebilir. Bütün tekstil kesitindeki filamentlerin aynı anda aktif olamaması sebebiyle bu faktör değeri kullanılır.

2.1.6.4 Çatlak Oluşumu

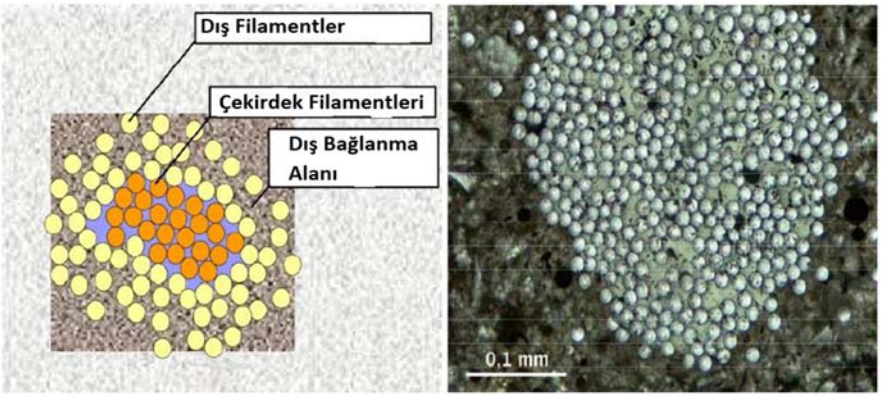
Kompozit malzeme beton çekme dayanımına ulaşana kadar çatlamaz ve bu noktaya kadar olan kısımda kompozitin elastisite modülünü büyük oranda betonun elastisite modülü oluşturur. Artan yük sırasında betonun çekme bölgesinde kalan beton çekme dayanımının düşük olması nedeniyle çatlar. Çatlaklar oluşmaya devam ettikçe beton daha fazla çekme yükü taşıyamaz hale gelir. Çoklu çatlaklar elyaf ile matris arasında yeterli bağlantı olduğunda oluşmaya başlar. Stresin tekstil malzemeden betona aktarılmasıyla daha fazla çatlak oluşur. Oluşabilecek bütün çatlakların oluşması durumunda çekme yükü artık sadece tekstil takviyeler tarafından karşılanır. Sabitlenmiş çatlak aşaması tekstil malzeme nihai dayanımına ulaşıp kopana kadar devam eder.

Hacimsel takviye oranının artması ile çatlak açıklıkları arasında ters orantı vardır (Colombo ve diğer., 2013).Benzer şekilde ilk çatlak dayanımı hacimsel takviye oranının arttırılması ile artabilir (Bentur ve Mindess, 2006). Cam ile güçlendirilmiş betonda oluşan çatlakların ortalama açıklığı karbon ile takviye edilmiş beton ile karşılaştırıldığında neredeyse iki katıdır (Hegger ve diğer., 2006b). Ayrıca geometrinin de çatlak oluşumu üzerinde önemli bir etkisi vardır. Kıvrılmış geometrilere sahip tekstil takviyeler ve kullanılan tekstil oranı çatlak genişliğini azaltır. Ayrıca oluşan çatlak sayısındaki artış matris ile takviye arasındaki bağlantının iyileştiğini gösterir (Peled, Bentur ve Yankelevsky, 1999).

Çatlakların sayısı genişliği ve oluşma yerlerini etkileyen çeşitli faktörler vardır. Tekstil takviyeli betonun çatlama davranışı yükleme hızına bağlı olarak değişebilir. Ayrıca numunelerin nem oranı da çatlakların oluşumu üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Daha kuru numuneler yaş olan numunelere göre genellikle daha çabuk çatlar.

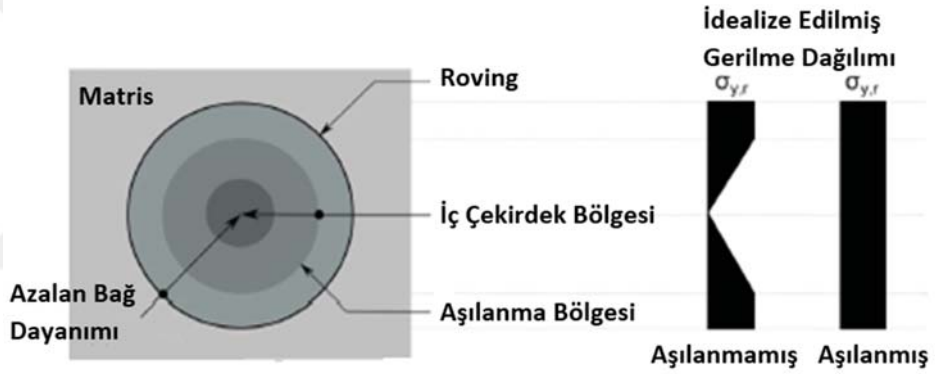
2.1.6.5 Tekstil Taviyeli Betonun Efektifliği ve Kenetlenmesi

Tekstil takviyenin çekme dayanımı tekstil takviyeli beton davranışında tam olarak kullanılamaz. Bağlanma oranı dış filamentlerden içeriye doğru giderken azalır (Voss, 2006, 2006b). Bunun sebebi dış filamentlerin matrisle sıkı bir bağ yaparken, iç filamentlerin matrisle doğrudan bir bağının olmamasıdır. Şekilde iç ve dış bağlanma mekanizmasının temsili bir çizimi ve beton içerisinden bir görüntüsü verilmiştir. Bu da filamentlerin birlikte hareket edememelerine sebep olur ve filamentler içerisindeki gerilmeler dengeli olarak dağılamaz. Filamentler aynı anda aktif olarak çalışamazlar. Bu durum tekstil takviyenin maksimum çekme dayanımına ulaşamamasına neden olur. Çelik takviyelerde bu davranış görülmez bu nedenle tekstil takviyeli betonun bağlanma davranışı ile çelik takviyeli betonun bağlanma davranışı tamamen farklıdır. Kenetlenmenin tekstil takviyeli betonun performansını etkileyen en önemli faktörlerden birisi olduğu rahatlıkla söylenebilir (Williams, Portal, Lundgren ve Malaga, 2014). Bağlanma verimliliğini ve sonucunda tekstil takviyenin verimliliğini arttırmak için verimlilik üzerinde belirgin bir etkisi olduğu bilinen iplik çapı ve ipliklerin döngü boyutunda değişiklikler yapılabilir. İnce taneli betonla daha iyi bir aderans sağlayacak küçük çaplı ipliklerden oluşan kumaşlar kullanılır. İnce taneli betonun agrega çapının küçük olması da betonun filamentlere daha iyi nüfuz edebilmesine olanak sağlar. Ancak artan sayıda filament kullanmak kumaş bağlanmasında azalmaya sebep olabilir (Bentur ve Mindess, 2006). Ayrıca tek bir demetin bağlanma davranışını bilmekle tekstil takviyenin bağlanma davranışı anlaşılamaz. Çünkü kumaş geometrisinin de bağlanma üzerinde önemli bir etkisi vardır.



Şekil 2.17 İç ve dış bağlanma (Reinhardt ve diğer., 2006b).

Efektifliği arttırmak için başka yollar da vardır. Filamentlerin çapları sadece birkaç mikrometre olduğundan, beton matrisinde ince taneler kullanılsa bile filamentler arasındaki dar boşluklar sebebiyle demet içerisine tam anlamıyla nüfuz edemez. Çimento matrisinin yeterince nüfuz edememesinin bir sonucu olarak, iç kısımda kalan filamentler çekme yükleri altında aktifleşemez. Örneğin, epoksi reçineler tekstil demetlerinin içerisine emdirilir. Bu reçine demetlerin içine derinlemesine nüfuz edebilir ve filamentleri birbirine bağlayabilir. Bu sayede neredeyse tüm filamentler yük transferi için aktive olur ve verimlilik çok büyük ölçüde artar. Gerilme dağılımı homojenleşir. Şekil 2.18'de bu iyileştirme öncesinde ve sonucunda oluşan temsili gerilme dağılımı verilmiştir. Epoksi emdirilmiş liflerin çekme dayanımı, emprenye edilmemiş tekstil takviyelere göre daha fazla olmaktadır.



Şekil 2.18 Temsili demet yapısı ve aşılanma durumuna göre oluşan gerilme dağılımı (Hartig ve diğer., 2008).

Bu tarz reçineler sayesinde filamentlerin birlikte çalışabildiği tekstil takviyeler prefabrik betonla üretilecek yapısal elemanlar için önemlidir. Tekstil malzemeden daha yüksek bir verim alınır. Bu sayede, daha ekonomik ve güvenli tasarımlar elde edilebilir.

2.2 Tekstil Takviyeli Beton Uygulamaları

Tekstil takviyeli kompozitler, inşaat mühendisliği uygulamalarında birçok avantaj sunmaktadır. Bu avantajlar arasında yüksek mukavemet-ağırlık oranı, karmaşık şekillerde üretim yapabilme yeteneği, mekanik özelliklerin belirli ihtiyaçlara göre

uyarlayabilme yeteneği, korozyona karşı dayanıklılığı ve düşük termal iletkenliği bulunmaktadır. Cam ve karbon takviyeler son yıllarda inşaat sektöründe birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Genel olarak mümkün olan uygulama alanları şunlar olabilir:

2.2.1 Prefabrik Köprüler

Şekil 2.19'da verilen, 8,6 metre açıklığa ve 2,5 genişliğe sahip ilk TTB köprü, Almanya'nın Oschatz bölgesinde inşa edilmiştir. Köprü yayalar ve bisikletliler için bir yol olarak dizayn edilmiş olup, 4 katmalı AR-cam tekstil takviye kullanılarak imal edilmiştir. Köprünün mümkün olduğunca hafif ve malzeme açısından etkili bir şekilde tasarlanması hedeflenmiştir. Bu nedenle, köprü segmenti, 3 mm kalınlığa sahip kabuk eleman ve elemanın rijitliği arttıracak bir kaburga sayesinde imal edilmiştir.



Şekil 2.19 İlk segmental tekstil takviyeli köprü Oschatz, Almanya (Ehlig, Schladitz, Frenzel ve Curbach, 2012).

Birkaç yılın ardından, 16 metre uzunluğa sahip ve üzerinden 3,5 tona kadar araçların geçişine izin veren benzer bir başka TTB köprü (Şekil 2.20), Almanya Kempten'de inşa edilmiştir. Düşük ağırlığı sayesinde, tamamen prefabrik olarak üretilmiştir ve taşınmıştır. Montajı ise birkaç saatte tamamlanmıştır.



Şekil 2.20 Yaya köprüsü Kempten (Michler, 2013)

Şekil 2.21'de görülen, 2010 yılında Almanya'nın Albstadt kentinde toplamda 97 metre uzunluğa sahip en dünyanın en uzun TTB köprüsü, AR-cam takviye ile inşa edilmiştir. Bu köprü, 6 adet prefabrik segmentten imal edilmiştir. En uzun segmentin uzunluğu 17,2 metre olup net açıklık 15 metredir.



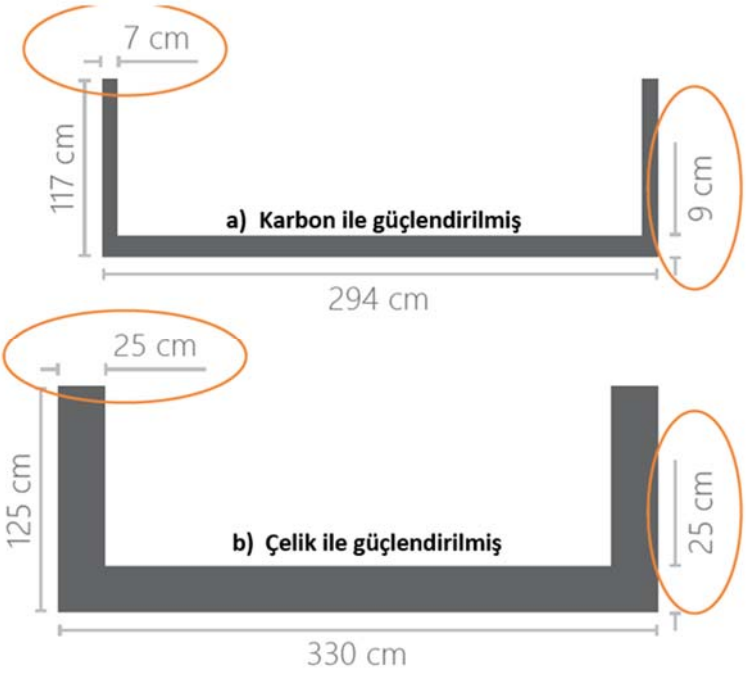
Şekil 2.21 Tekstil beton köprü Albstadt Lautlingen (Solidian GmbH)

Yine aynı kentte, 2015 yılında 15 metre açıklığında bir yaya köprüsü karbon takviye kullanılarak inşa edilmiştir (Şekil 2.22). Köprü üzerinden 10 ton ağırlığa kadar olan araçların geçişine izin verilmektedir. Köprünün imalatında, epoksi emdirilmiş karbon tekstil takviye kullanılmıştır.



Şekil 2.22 Tekstil takviyeli beton kullanılarak yapılmış son derece hafif ve ince yaya köprüsü (Solidian GmbH)

Kullanılan tekstil takviyenin korozyona karşı dayanıklılığı ve yüksek çekme dayanımı sayesinde, kesit tabanı 9 santimetre kalınlığında, köprü yan cidarları ise sadece 7 santimetre kalınlığında imal edilmiştir. Tekstil takviyenin üreticisi olan Solidian GmbH, köprünün çelik ile tasarlanması durumunda oluşacak kesit boyutlarını aşağıdaki şekildeki gibi paylaşmıştır.



Şekil 2.23 Karbon ve çelik ile dizayn edilmiş köprü kesitinin farkı (Solidian GmbH)

Yapılan uygulamalardan da görüldüğü üzere, tekstil takviyeli beton prefabrik köprülerin üretiminde kullanılabilecek yüksek bir potansiyele sahiptir.

2.2.2 Prefabrik Cephe Kaplama Panelleri

Tekstil malzemeler, cephe panellerinin üretiminde de kullanılmaktadır. Düşük beton örtüsü gereksinimi ve yüksek dayanımı sayesinde, cephe panellerinin kalınlıkları azaltılmaktadır.

Hegger, Will ve Voss (2004) tarafından Aachen Üniversitesi'nin cephe panelleri tekstil kompozit ile tasarlanmıştır. 2,68 metre boyunda ve 32,5 santimetre enindeki panelin kesit kalınlığı sadece 25 milimetre olarak imal edilmiştir. Kesitin dizaynında AR-cam takviye kullanılmıştır.



Şekil 2.24 AR-cam tekstil takviyeli cephe panelleri RWTH Aachen Üniversitesi (Hegger, Zell ve Horstmann, 2008)

Başka bir cephe paneli örneği de, Albstadt'taki Groz-Beckert şirketinin binası üzerindeki küçük formatlı cephe panelleridir. Panel boyutları 600 milimetre x 1200 milimetrelere varan ölçülerde üretilmiştir. Solidian GmbH tarafından üretilmiş epoksi emdirilmiş AR-cam malzeme ile takviye edilen panel sadece 20 milimetre kalınlığa sahiptir.



Şekil 2.25 Küçük formatlı cephe panelleri (Kulas, 2015)

Almanya Dormettingen'de 2014 yılında açılan bir restaurantın cephe kaplamaları epoksi emdirilmiş karbon takviye tarafından üretilmiştir. Panel boyutları 1,5 metre x 4,1 metreye kadar ulaşırken, panel kalınlığı 50 milimetredir.



Şekil 2.26 Karbon takviyeli cephe panelleri (Kulas, 2015)

Cephe panelleri tekstil malzemelerin kullanılabileceği önemli bir alan olup, bu panellerin ağırlığının azaltılmasına imkan vermektedir. Cephe panelleri ile ilgili birçok mevcut uygulama bulmak mümkündür. Panel elemanlardaki beton örtüsü azaltılır ve bu sayede beton kullanımında önemli azaltmalar yapılabilir.

2.2.3 Kabuk Elemanlar

Diğer kullanım alanlarının yanında, tekstil takviyeli beton serbest biçimli yapısal elemanların üretiminde de önemli bir trend haline gelmektedir çünkü korozyon dayanıklılığı ve yüksek işlenebilirliği sayesinde estetik elemanların üretilmesini olası kılmaktadır. Bu sayede, işlevsel, estetik ve çok hafif elemanlar üretilmektedir. Aşağıda tekstil takviye kullanılarak üretilmiş kabuk eleman örnekleri verilmiştir.



Şekil 2.27 Tekstil takviyeli kabuk elemanlar (Scheerer, Chudoba, Garibaldi ve Curbach, 2017).



Şekil 2.28 Tekstil takviyeli hipar kabuklar RWTH Aachen (Scheerer, Chudoba, Garibaldi ve Curbach, 2017).



Şekil 2.29 Lamine tekstil takviyeli tonoz kabuklarından yapılmış bisiklet standı çatısı RWTH Aachen (Scheerer, Chudoba, Garibaldi ve Curbach, 2017)

2.2.4 Mevcut Elemanların Güçlendirilmesi

Tekstil takviyelerin kullanımı mevcut betonarme yapıların güçlendirmesinde çok etkili bir yöntemdir (Schladitz ve diğer., 2012). Tekstil takviyeler yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahiptir, bu nedenle mevcut geleneksel betonarme elemanların taşıma kapasitesini artırmak veya deprem dayanıklılığını güçlendirmek için kullanılır.

Son zamanlarda tekstil takviyeli betonun yapısal güçlendirme uygulamalarında kullanımı yaygınlaşmaktadır (Gopinath, Iyer ve Gettu 2021). Tekstil takviyeli beton döşeme ve kiriş elemanların eğilme davranışını iyileştirmek için kullanılır. Kolonlarda tekstil donatılar ile yapılan güçlendirmeler ise sargı donatısı görevi görmektedir. Bu sayede kolonların taşıma kapasitesi arttırılabilir ve daha sünek bir davranış elde edilebilir.

Tekstil takviyeli beton ile güçlendirme katmanlar halinde uygulanır. Bu katmanlar uygulanmadan önce eski beton kumlama yöntemi ile hazırlanır. Bu sayede eski beton ile güçlendirme tabakası arasındaki bağ oluşturulur. Tekstil takviye yük kapasitesini arttırmanın yanı sıra hizmet yükü altındaki deplasmanları da azaltır (Brückner, Ortlepp ve Curbach 2006).

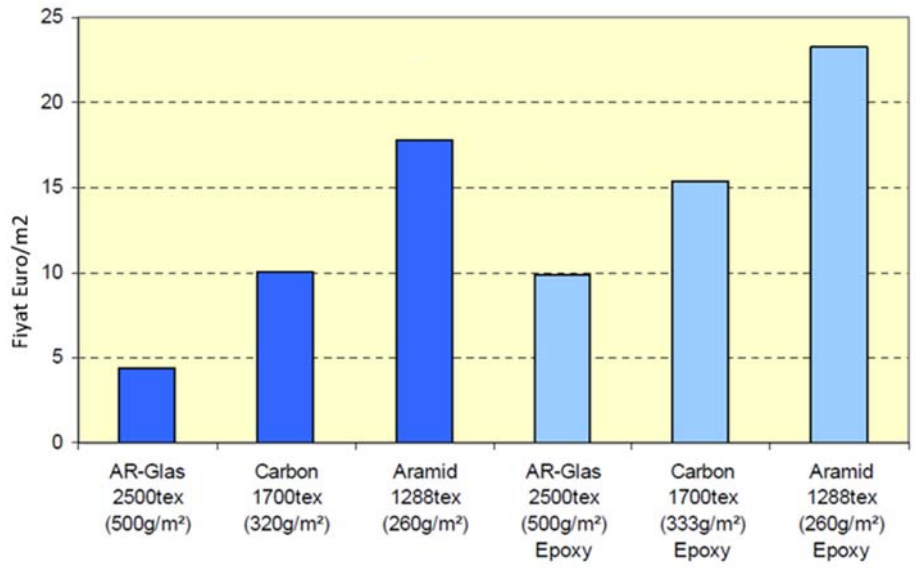
Sonuç olarak, tekstil takviyesi yapısal güçlendirme projelerinde kullanıldığında sağladığı mukavemet-ağırlık oranı, korozyon direnci, kurulum kolaylığı ve

özelleştirilebilir mekanik özellikleri ile mevcut yapı elemanlarını etkili bir şekilde güçlendirir.

2.3 Tekstil Takviyeli Betonun (TTB) Maliyeti

Tekstil donatılar günümüzde çok farklı alanlara, geometrilere, kalınlıklara ve işlevlere sahip olacak şekilde üretilmektedir. Tekstil donatılarla ilgili herhangi bir standart olmaması sebebiyle, farklı çeşitlerde bulunabilmektedir. Dolayısıyla fiyat aralığı da geniş bir aralıkta olmaktadır. Tekstil takviyelerin az miktarlarda alınmasıyla birim fiyatlar daha da yüksek seviyelere çıkmaktadır. Ayrıca farklı şirketlerin fiyat aralıkları da her zaman tutarlı olmamaktadır.

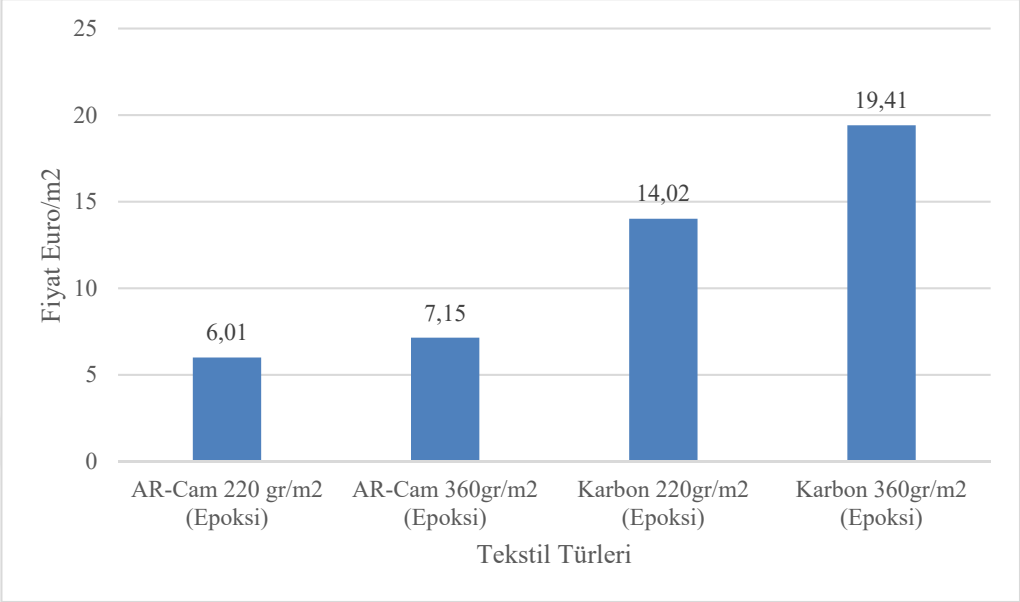
Kruger (2004) tarafından yapılan çalışmada, 2003 yılında Almanya'da farklı tipteki tekstil takviyelerin fiyatları Şekil 2.30'da verilmiştir.



Şekil 2.30 Farklı türdeki tekstil takviye fiyatları (Kruger, 2004)

AR-cam takviye için m2 fiyatı yaklaşık 5 Euro iken bu fiyat karbon takviye için 10 Euro'ya çıkmaktadır. Ayrıca epoksi emdirilmiş tekstil takviyelerin fiyatları da önemli ölçüde artmaktadır.

Solidian tarafından sağlanan fiyat bilgisine göre, güncel fiyat aralığı Şekil 2.31'deki gibi dikkate alınacaktır. Fiyatların, Kruger (2004) tarafından verilen değerlerle yaklaşık olarak benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 2.31 Farklı türdeki tekstil takviye fiyatları (Solidian GmbH, 2023)

AR-cam takviyeler fiyat olarak karbon takviyelere göre avantajlı olsa da, karbon donatıların yüksek mekanik özellikleri unutulmamalıdır. Karbon malzemenin yüksek dayanımı ve düşük birim hacım ağırlığı sayesinde metrekare başına kullanılan birim donatı miktarı da AR-cam donatıya göre azalmaktadır.

Otto ve Adam (2019), 700 mm yüksekliğe ve 600mm genişliğe sahip çift T prefabrik kirişi, hem karbon hem de çelik ile tasarlamış ardından detaylı bir maliyet analizi yapmıştır. Kirişlerin boy ve genişlikleri aynı kalırken, karbon kiriş için kiriş kolları ve gövde kalınlıkları azaltılmıştır. Tablo 2.4'de Otto ve Adam (2019) tarafından yapılan maliyet analizi görülmektedir.

Tablo 2.4 Çift T prefabrik kiriş için karbon ve çelik beton maliyet karşılaştırması (Otto ve Adam 2019)

	Çelik Beton	Karbon Beton	Karbon Beton/ Çelik Beton
Üretim	**988,00 €**	**2289,00 €**	**2,3**
Toplam Malzeme Fiyatı	**448,00 €**	**1546,00 €**	**3,4**
Beton	104,00 €	59,00 €	0,7
Donatı	94,00 €	1214,00 €	13,0
Kalıp	239,00 €	253,00 €	1,0
Yardımcı Elemanlar	10,00 €	10,00 €	1,0
Toplam İşçilik Maliyeti	**541,00 €**	**743,00 €**	**1,4**
Kalıp	237,00 €	237,00 €	1,0
Donatı	120,00 €	360,00 €	3,0
Beton Üretimi	15,00 €	15,00 €	1,0
Betonlama	95,00 €	57,00 €	0,6
Kalıp Sökümü	59,00 €	59,00 €	1,0
Bakım	15,00 €	15,00 €	1,0
Taşıma Maliyetleri	**210,00 €**	**105,00 €**	**0,5**
Taşıma maliyeti	203,00 €	102,00 €	0,5
Geçiş Ücretleri	6,00 €	3,00 €	0,5
Montaj Maliyetleri	**160,00 €**	**125,00 €**	**0,8**
İşçilik	60,00 €	60,00 €	1,0

Ekipman Maliyeti	90,00 €	55,00 €	0,6
Malzeme gideri	10,00 €	10,00 €	1,0
Toplam Maliyet	**1359,00 €**	**2519,00 €**	**1,9**

Adam ve Otto (2019) tarafından elde edilen sonuçlara göre, karbon ile takviye edilmiş beton elemanın, çelik ile takviye edilmiş beton elemana göre üretimi 1,9 kat daha maliyetlidir. Bunun sebebi, karbon donatı malzemesinin çelik donatıya göre 13 kat daha yüksek maliyete ve işçilik açısından ise 1,4 kat fazla maliyete sahip olmasıdır. Ancak karbon ile takviye edilmiş betonun maliyeti, geleneksel betona göre 0,7 kat düşük olmaktadır. Ayrıca karbon ile takviye edilmiş elemanların taşıma maliyeti 0,5 kat ve montaj maliyeti de çelik betona göre 0,8 kat düşüktür.

Bu çalışmada donatı malzeme maliyetleri dışında üretim, nakliye ve montaj maliyetlerinin her iki tasarım türü için de hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Karbon takviyeli betonun maliyeti büyük ölçüde karbon takviyenin yüksek maliyetinden kaynaklanmaktadır (Otto ve Adam, 2019).

Bu nedenle maliyet karşılaştırması yapılırken üretim, nakliye ve montaj maliyetlerinin iki tasarım için dengeli olduğu düşünülecektir. Tez kapsamında yapılacak olan karşılaştırmada sadece malzeme maliyetleri dikkate alınacaktır. Ancak daha önce de bahsedildiği üzere tekstil donatılar için ince taneli beton kullanılmaktadır. Bu ince taneli betonun karışımı yapılan tasarıma ve çalışmaya göre değişmektedir. Bu nedenle standart bir maliyet vermek pek mümkün olmamaktadır. Yapılan tasarıma göre ince taneli betonun da geliştirilmesi mümkündür. Tekstil donatıların potansiyelinin tam anlamıyla kullanılabilmesi için aderans çok önemlidir. Matris ile takviye arasındaki aderansın iyileştirilmesi için yapılan farklı ince taneli beton karışımlarının maliyetleri birbirinden farklı olmaktadır.

BÖLÜM ÜÇ
TEKSTİL TAKVİYELİ BETON TASARIM YÖNTEMLERİ

3.1 Tekstil Takviyeli Betonun (TTB) Eğilme Yükü Kapasitesi

3.1.1 Lineer Tasarım Yöntemi

3.1.1.1 Basitleştirilmiş Hesap İçin Yapılan Kabuller

Tekstil takviyeli betonun (TTB) tasarımı yapılırken konvansiyonel betonarme yapıların tasarımı yapılırken kullanılan kabuller dikkate alınmıştır. Nilson ve diğer., (2009) ve Wight Macgregor (2009) aşağıdaki tasarımların betonarme elemanların analizlerini ve tasarımlarını basitleştirmek için uygulanması gerektiğin belirtmiştir. Bu varsayımlar betonarme bir kirişin gerçek davranışının basitleştirilmesi için yapılan kabullerdir.

- Şekil değişiminden önce eleman eksenine dik olan düzlem kesitler, şekil değişiminden sonra çubuk eksenine dik ve düzlem kalır.
- Betonun çekme dayanımına katkısı ihmal edilir.
- Donatı çubuğundaki birim boy değişimi çubuğu saran beton liflerindeki birim boy değişimi ile özdeştir.
- Beton ve donatının gerilme birim şekil değiştirme eğrileri gerilmeleri birim şekil değiştirmelerden belirlemek için kullanılabilir.
- Taşıma gücüne erişildiğinde, beton basınç bölgesinin en çok zorlanan lifindeki beton birim kısalması 0,003 tür.

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi tekstil malzeme ile beton arasındaki aderans karmaşık bir konudur. Bu kenetlenme mekanizması hesap yöntemine efektiflik katsayısı eklenerek modellenecektir.

3.1.1.2 Dengeli Donatı Oranı ve Çekme Kırılması

Çekme kırılmasının oluşabilmesi için tekstil donatı oranının dengeli donatı oranından küçük olması gerekmektedir. Dengeli donatı durumu betonun birim şekil değiştirmesi nihai durumdayken (ε_{cu}) aynı zamanda tekstil donatının da nihai birim şekil değiştirmesine ulaşması (ε_{fu}) anlamına gelir. Bu durumu oluşturabilecek donatı

oranı da dengeli donatı oranını ifade eder. Bu durumun denklem olarak ifade edilmesi için çekme ve basınç kuvvetinin eşit olduğu bir eşitlik yazılır:

$$\rho_{fb}\, b\, d\, f_{fd} \;=\; 0{,}85\, f_{cd}\, k_1\, c\, b \tag{3.1}$$

ρ_{fb}: Dengeli donatı oranı

b: Kiriş genişliği

d: Kiriş efektif yüksekliği

c: Denge durumunda en yüksek basınç lifinden tarafsız eksene olan mesafe

f_{cd}: Betonun tasarım basınç dayanımı

f_{fd} : Tekstil donatının tasarım çekme dayanımı

k_1: Eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu derinlik katsayısı

Tarafsız eksen derinliği (c) gerilme diyagramı üzerindeki benzer üçgenler kullanılarak ifade edilebilir.

$$c = \frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon_{cd} + \varepsilon_{fd}} \tag{3.2}$$

ε_{cd}: Betonun en çok zorlanan lifinde oluşan birim şekil değiştirme (0,003)

ε_{fd}: Tekstil donatının en çok zorlanan lifinde oluşan birim şekil değiştirme

Denklem (3.1) ve (3.2)'nin düzenlenmesiyle dengeli donatı oranı nihai basınç dayanımlarına ve birim şekil değiştirmelere bağlı olarak Denklem (3.3)'deki gibi ifade edilir.

$$\rho_{fb} = 0.85\, k_1\, \frac{f_{cd}}{f_{fd}}\, \frac{\varepsilon_{\mathrm{cd}}}{\varepsilon_{\mathrm{cd}} + \varepsilon_{\mathrm{fd}}} \tag{3.3}$$

Kesit donatı oranı (ρ_b) aşağıdaki gibi yazılır;

$$\rho_b = \frac{A_f}{\mathrm{b\,d}} \tag{3.4}$$

A_f: Tekstil donatı kesit alanı

Aşağıda verilen (3.5) ve (3.6) denklemleri yardımıyla, k_1 katsayısı hesaplanır. Ancak unutulmamalıdır ki, $k_1$değeri 0,65'den küçük olamaz.

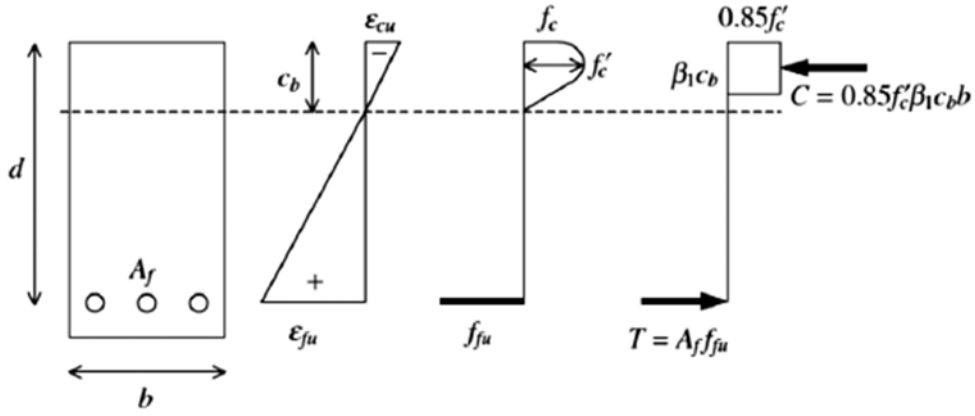
$$k_1 = 0{,}85 \qquad f'c \leq 27.5\ MPa \tag{3.5}$$

$$k_1 = 0{,}85 - 0{,}05\left(\frac{f'c - 27.5}{7}\right) \qquad f'c > 27.5\ MPa \tag{3.6}$$

3.1.1.3 Tekstil Takviyeli Betonun Moment Taşıma Kapasitesi

Moment taşıma kapasitesinin elde edilmesi için konvansiyonel hesap tekniklerindeki gibi gerilme birim şekil değiştirme grafiği kullanılır.

Aşağıdaki tekstil takviyeli betonun şekilde gerilme ve birim şekil dağılımları görülmektedir. Buradan kuvvet dengesi yazılabilir ve birim şekil değiştirme değerleri benzerlikten elde edilebilir.



Şekil 3.1 Dengeli durumda gerilme,birim şekil değiştirme ve iç kuvvetler (Bank, 2006)

Tarafsız eksen derinliği basınç kuvveti (C) ile çekme kuvveti (T) dengesi yazılarak elde edilebilir.

$$T = C \tag{3.7}$$

$$A'_f \, f_{fd} \, = 0{,}85 \, f_{cd} \, k_1 \, c \, b \tag{3.8}$$

Ancak buradaki denklemde matris-takviye arasındaki kenetlenmenin etkisi dikkate alınmalıdır. Daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere, kesitteki filamentlerin belirli bir kısmı aktif olarak çalışamaz. Bu nedenle kesit alanını belirli bir kısmının çalıştığını kabul edebiliriz. Bunu yapabilmek için kesit alanını 1'den küçük bir sayıyla çarpabiliriz. Bu katsayı literatürdeki kaynaklardan alınabileceği gibi deneyler yapılarak da belirlenebilir. Bu katsayıyı da denkleme eklersek:

$$A_f \, = \, \rho \, b \, d \tag{3.9}$$

$$A'_f \, = \, \eta_\tau \, A_f \tag{3.10}$$

η_τ: Kenetlenme faktörü

Denklem (3.1) kenetlenme efektifliği (η_τ) dikkate alınarak tekrar düzenlenir ve tarafsız eksen derinliği çekilirse;

$$c = \frac{\eta_\tau \, \rho \, f_{fd} \, \mathrm{d}}{0{,}85 \, f_{cd} \, k_1} \tag{3.11}$$

Tarafsız eksen derinliği Denklem (3.11)'deki gibi yazılmış olur. Eğer basınç bloğunun ağırlık merkezi üzerine bir moment alınırsa, kirişin moment taşıma kapasitesi (M_n) Denklem (3.12)'de verildiği gibi elde edilir.

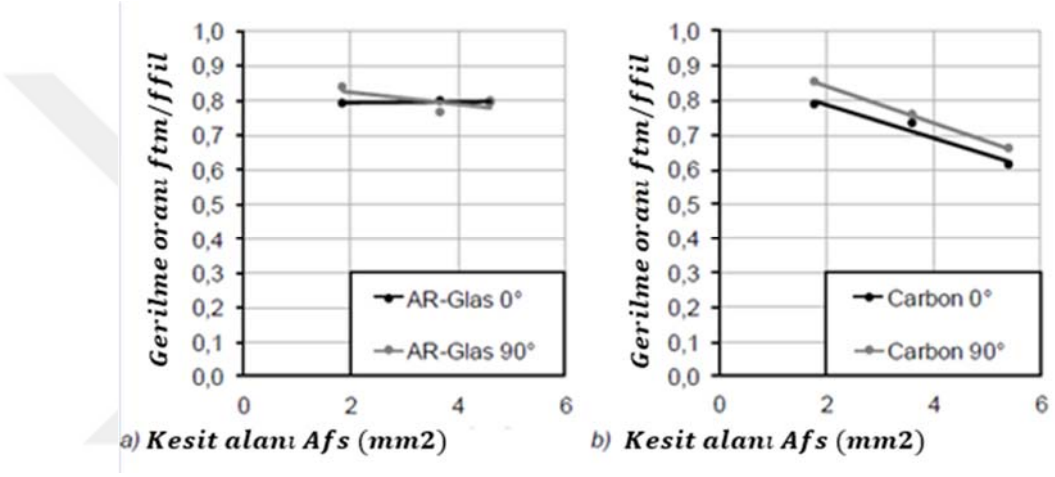
$$M_n = \, \eta_\tau \, A_f \, f_{fd} \, (d \, - \frac{k_1 c}{2}) \tag{3.12}$$

3.1.1.4 Kenetlenme Faktörü

Daha önce de açıklandığı üzere, kenetlenme faktörü (η_τ), moment taşıma kapasitesi hesaplanırken, kesitte aktif olarak çalışan filamentlerin oranını belirtmektedir. Bu

değer epoksili tekstil takviyeler için yüksek değerlerde olmaktadır. Kenetlenme faktörü (η_τ) deneysel verilerden elde edilebilir. Kenetlenme birçok faktörden etkilendiği için, tek ve geçerli bir değere indirmek mümkün değildir. Literatürde bu konu üzerinde farklı çalışmalar bulmak mümkündür.

Aşağıdaki grafikte Rempel, Ricker ve Hegger (2019) tarafından farklı kesit alanlara sahip epoksi emdirilmiş tekstiller için elde edilen katsayı değerleri verilmiştir. Bu katsayı değerleri, deneylerden elde edilen ortalama kopma gerilmesinin (f_{tm}), filamentin kopma gerilmesine (f_{fil}) oranlanmasıyla elde edilmiş.



Şekil 3.2 Kesit alanının kopma gerilmesine olan etkisi a) AR-cam b) karbon (Rempel, Ricker ve Hegger, 2019)

Tekstil elyafın kesit alanı ne kadar büyük olursa, o elyafın kenetlenme faktörü kadar düşük olur (Rempel, Ricker ve Hegger, 2019). Bir cam filamentin çapı, karbon filamentin yaklaşık iki katı kadardır (Kulas, 2013). Bu sebeple elyaflardan oluşan demetlerde daha büyük boşluklar bulunur. Bu boşlukların büyük olması, bağlayıcı malzemenin nüfuzunu kolaylaştırır. Bu sayede emprenye sonrası kesit içindeki boşlukların sayısı azalır ve oluşan daha az boşluklar sayesinde yük aktarımı iyileştirilebilir.

3.1.1.5 Malzeme Güvenlik Faktörü

Bilindiği üzere teorik hesaplamalar yapılırken, malzemelerin dayanımları belirli bir güvenlik faktörü ile azaltılmaktadır. Bu değer malzeme türüne göre değişirken, beton

için 1,5 ve çelik için 1,15 olarak alınmaktadır. Çelik malzemenin güvenilirliğinin fazla olması sebebiyle bu katsayı düşüktür.

Olasılık hesaplamaları, güvenlik seviyesinin önemli ölçüde takviye oranına ve etkin derinliğe bağlı olduğunu göstermektedir (Rempel, Ricker ve Hegger, 2020). Tekstil takviyelerin güvenlik faktörü, Rempel, Ricker ve Hegger (2020) tarafından, epoksi resin emdirilmiş tekstil donatılar için 1,3 olarak önerilmiştir. Ayrıca tekstil takviyeli ince elemanlar için azaltılmış efektif derinlik uygulanması önerilmiştir.

Aşağıda Rempel, Ricker ve Hegger (2020) tarafından önerilen denklemler görülmektedir.

$$d \leq 60mm \qquad d_{eff} = \frac{d-4}{0{,}95} \tag{3.13}$$

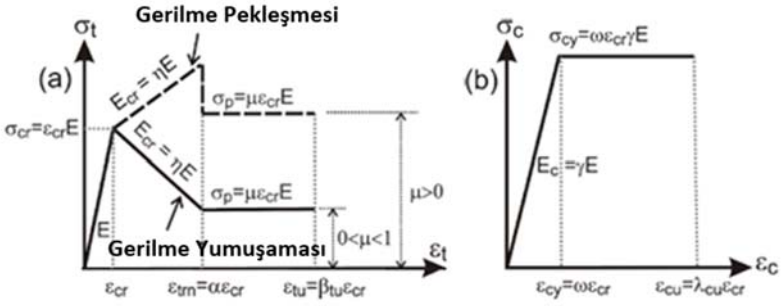
$$d > 60mm \quad d_{eff} = d \tag{3.14}$$

Denklem (3.12) ve (3.13) kullanılarak 60 mm'den ince elemanlar için faydalı yükseklik (d) değeri düzeltilir.

3.1.2 Mobasher Basitleştirilmiş Gerinim Sertleşmesi Beton Modeli

3.1.2.1 Çekme ve Basınç Modelleri

Bu yöntemde Soranakom ve Mobasher (2009), tarafından çekme için gerinim sertleşmesi ve basınç için elastik-mükemmel plastik model kullanılmaktadır. Çekme davranışı ilk rijitlik (E), ilk çatlak oluştuğundaki birim şekil değiştirme (ε_{cr}), çatlama anındaki gerilme ($\sigma_{cr} = \mathrm{E}\,\varepsilon_{cr}$), çatlama sonrası modülü (E_{cr}) ve nihai çekme birim şekil değiştirmesi (ε_{tm}), kullanılarak tanımlanır. Pik sonrası çekme kapasitesi sabit stress seviyesi olarak gösterilir ($\mu\mathrm{E}\,\varepsilon_{cr}$). Basınç davranışı ise beton basınç dayanımı (σ_{cy}) kullanılarak ($\omega\gamma\mathrm{E}\,\varepsilon_{cr}$) olarak yazılır. Aşağıdaki şekilde kullanılan malzeme modelleri görülmektedir.



Şekil 3.3(a) Gerinim sertleşmesi ve yumuşaması çekme modeli ve (b) basınç modeli (Soranakom ve Mobasher, 2009)

Yukarıda tanımlanan basınç ve çekme modellerini basitleştirmek ve kapalı form tasarım denklemlerini elde edebilmek için Soranakom ve Mobasher (2009), tarafından birkaç varsayım yapılmıştır. Bu modellerde zirve sonrası davranış göz ardı edilmiş ve sonuç olarak iki eğrili bir çekme modeli ve lineer elastik basınç modeli kullanılmıştır. Denklemlerin basitleştirilmesi adına bazı katsayılar tanımlanmış ve bu tanımlamalar yardımıyla minimum değişken sayısına sahip kapalı form türevleri elde edilmiştir. Tekstil üzerinde oluşan maksimum çekme birim şekil değiştirmesi (ε_t), betonun basınç birim şekil değiştirmesi (ε_c) ve çatlama birim şekil değiştirmesi (ε_{cr}) kullanılarak β ve λ aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

$$ß = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{cr}} \quad , \quad \lambda = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cr}} \tag{3.15}$$

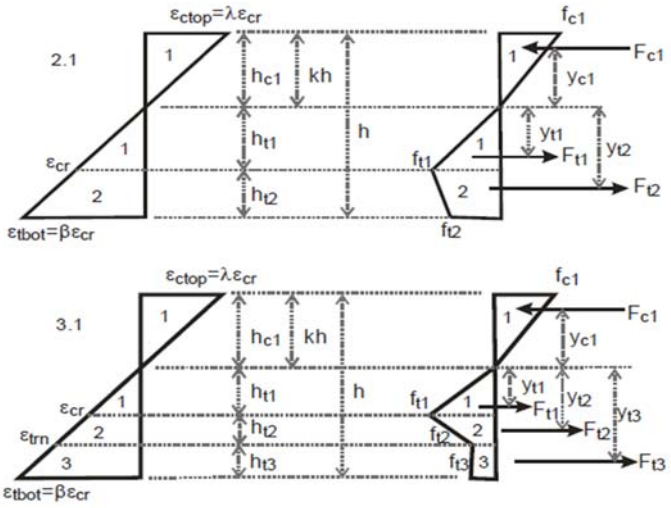
Basitleştirilmiş modelde kullanılacak olan malzeme parametreleri birim şekil değiştirme değerleri, elastisite modülleri ve gerilme değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

$$a = \frac{\varepsilon_{tm}}{\varepsilon_{cr}} \quad , \qquad \eta = \frac{E_c}{E} \quad , \qquad \omega = \frac{\sigma_{cy}}{\sigma_{cr}} = \frac{\sigma_{cy}}{E\,\varepsilon_{cr}} \tag{3.16}$$

3.1.2.2 Moment Kapasitesinin Türetilmesi

Moment taşıma kapasitesinin türetilmesi için birim deformasyon grafiği üzerinde en alt lifte oluşan çekme birim şekil değiştirmesine bağlı olarak benzerlik yapılır. Şekil

3.4'de tanımlanan malzeme modelleri üzerinden kurulan gerilme birim şekil değiştirme diyagramı görülmektedir.



Şekil 3.4 Çatlama sonrası birim şekil değiştirme grafiği, gerilme dağılımı grafiği ve terminoloji (a) birim şekil değiştirme dağılımı (b) gerilme dağılımı (Soranakom ve Mobasher, 2009)

Moment taşıma kapasitesi denklemlerinin elde edilebilmesi için önce (h_{c1}) , (h_{t1}) ve (h_{t2}) değerleri toplam yükseklik ve daha önce hesaplanan katsayılar cinsinden yazılır. İlk olarak basınç bloğunun yüksekliği olan (h_{c1}) değerinin (kh) değerine eşit olduğu görülmektedir. Çekme bölgesindeki (h_{t1}) için benzerlik yapılır;

$$\frac{h_{t1}}{h\,(1-k)} = \frac{\varepsilon_{cr}}{ß\,\varepsilon_{cr}} \tag{3.17}$$

Denklem düzenlenir;

$$h_{t1} = \frac{h\,(1-k)}{ß} \tag{3.18}$$

Olarak elde edilir. Benzer işlemler (h_{t2}) için yapıldığında düzenlenmiş denklem aşağıda verilmiştir.

$$h_{t2} = \frac{h\,(1-k)(ß-1)}{ß} \tag{3.19}$$

Yükseklik değerleri sade bir şekilde yazıldıktan sonra bu denklemler kullanılarak kuvvetler için benzerlik yazılır.

Basınç kuvveti (F_{c1}) gerilme (f_{c1}) değeri kullanılarak yazılır;

$$F_{c1} = \frac{f_{c1}\,k\,h\,b}{2} \tag{3.20}$$

Basınç bölgesinde oluşan en yüksek gerilme (f_{c1}) çatlama gerilmesi (σ_{cr}) üzerinden düzenlenir;

$$\frac{f_{c1}}{\sigma_{cr}} = \frac{kh}{h_{t1}} = kh \Big/ \frac{h\,(1-k)}{ß} \tag{3.21}$$

Buradan çekilen (f_{c1}) değeri (1) denkleminde yerine yazılır ve düzenlenir;

$$\frac{F_{C1}}{b\,h\,\sigma_{cr}} = \frac{ß\,\gamma\,k^2}{2\,(1-k)} \qquad \frac{y_{C1}}{h} = \frac{2}{3}k \tag{3.22}$$

Denklem (3.22) nihai olarak elde edilir. Benzer işlemler diğer kuvvetler için yapılır ve düzenlenirse sonuç olarak aşağıdaki denklemler elde edilmiş olur.

$$\frac{F_{t1}}{b\,h\,\sigma_{cr}} = \frac{(1-k)}{2\,ß}\ , \frac{y_{t1}}{h} = \frac{2}{3}\frac{(1-k)}{ß} \tag{3.23}$$

$$\frac{F_{t2}}{b\,h\,\sigma_{cr}} = \frac{(1-k)(ß-1)(\eta ß-\eta+2)}{2\,ß}, \frac{y_{t2}}{h} = \frac{2\eta ß^2-\eta ß-\eta+3ß+3}{3ß(\eta ß-\eta+2)(1-k)} \tag{3.24}$$

Yük dengesi yazılır ve buradan tarafsız eksen parametresi olan (k) çekilir;

$$F_{c1} + F_{t1} + F_{t2} = 0 \tag{3.25}$$

$$\mathrm{D}k = \frac{C_1 - \sqrt{ß^2 C_1}}{C_1 - ß^2} \;; \qquad C_1 = \eta(ß^2 - 2ß + 1) + 2ß - 1 \tag{3.26}$$

Moment kapasitesi ise kuvvetlerin tarafsız eksen üzerine momentinin alınmasıyla bulunabilir;

$$F_{c1}\, y_{c1} \; + F_{t1}\, y_{c1} \; + \; F_{t2}\, y_{c2} \; = \; 0 \tag{3.27}$$

Moment kapasitesi de nominalize edilmiş moment (m_n) ve çatlama momenti (M_{cr}) kullanılarak ifade edilmiştir.

$$M_n = \; m_n M_{cr} \tag{3.28}$$

$$M_{cr} \; = \frac{\sigma_{cr}\; bh^2}{6} \tag{3.29}$$

$$m_n = C_2 \frac{k^2 - 2k + 1}{ß^2} + \frac{2ßk^3}{1 - k} \quad C2 \; = \; C1 \; + \; 2C1\beta - \; ß^2 \tag{3.30}$$

Bilindiği üzere moment taşıma kapasitesi maksimum değerine, en alt lifteki çekme deformasyonu nihai birim şekil değiştirme değerine ulaştığında elde edilir.

Basınç denklemlerinde pik sonrası davranışın dikkate alınmadığı göz önünde bulundurulduğunda denklemler sadece elastik bölgedeki basınç gerilmeleri için uygundur. Bu elastik durumun aşılıp aşılmadığının kontrol edilmesi için üst lifte oluşan deformasyonun hesaplanması ve bu değerin akma basınç deformasyonu ile karşılaştırılması gerekmektedir. Yine şekildeki birim şekil değiştirme diyagramı kullanılarak alt ve üst lifteki birim şekil değiştirmeler arasındaki ilişki yazılır;

$$\frac{\varepsilon_c}{kh} = \frac{\varepsilon_t}{(1 - k)h} \tag{3.31}$$

($\varepsilon_c = \lambda\, \varepsilon_{cr}\,,\;\; \varepsilon_t = ß\, \varepsilon_{cr}$) yerine yazılır ve maksimum basınç birim şekil değiştirme değeri betonun akma birim şekil değiştirmesi ile sınırlandırılırsa ($\varepsilon_t =$

$\omega\ \varepsilon_{cr}$), sonuç olarak aşağıdaki Denklem (3.31) verilen normalize edilmiş form elde edilir.

$$\lambda = \frac{k}{(1-k)}\ \text{ß}\ \ \leq\ \omega \tag{3.32}$$

Bu kontrol yapılıp sağlandıktan sonra betonun elastik limitleri içerisinde çalıştığından emin olunur ve tasarıma geçilir.

Sonuç olarak, deney sonuçları kullanılarak hesaplanan basit katsayılar yardımıyla moment taşıma kapasitesi denklemleri hesaplanmış ve bu denklemler basitleştirilmiştir. Bu denklemler kullanılarak hesapların yapılabileceği gibi bununla ilgili abaklar da Soranakom ve Mobasher (2009), tarafından yapılan çalışmada verilmiştir. Bu denklemlerin kullanılabilmesi için çekme deneyi veri sonuçlarına ihtiyaç vardır. Deney sonuçlarından alınan veriler, matris ile takviye arasında oluşan bağ davranışını da yansıtacağı için hesaplanan moment kapasiteleri de ona göre tutarlı olacaktır.

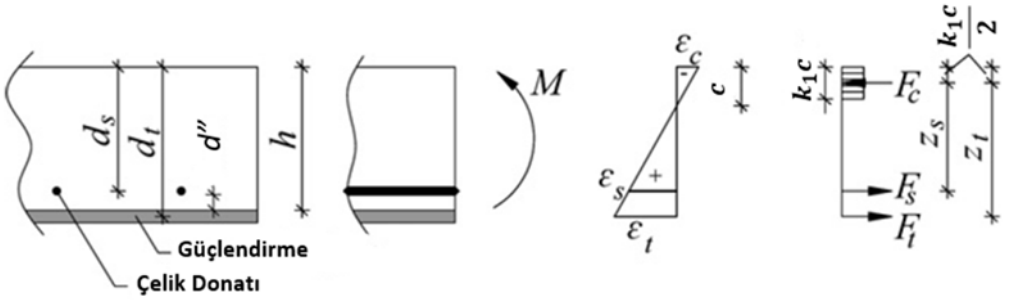
3.2 Tekstil Takviye İle Güçlendirilmiş Betonun Eğilme Yükü Kapasitesi

3.2.1 Basitleştirilmiş Tasarım Yöntemi

3.2.1.1 Model Kabulleri

Bu yöntemde tekstil takviyeler ile güçlendirilmiş betonun moment taşıma kapasitesi ele alınmıştır. Burada yapılan hesaplar için klasik betonarme hesaplarda kullanılan dikdörtgen gerilme davranışı dikkate alınır. Dolayısıyla taşıma yükü kapasitesinin nihai durumunda çelik donatının akma limiti dikkate alınarak yaklaşık bir çözüm yapılır. Aşağıdaki şekilde güçlendirilmiş elemanın temsili bir çizimi görülmektedir. Burada verilen terimler kullanılarak moment taşıma kapasitesi yazılır.

3.2.1.2 Moment Kapasitesi Denklemlerinin Elde Edilmesi



Şekil 3.5 Terminoloji ve birim şekil değiştirme dağılımı (Schladitz, Frenzel, Ehlig ve Curbach, 2012)

Moment taşıma kapasitesinin elde edilmesi için kullanılacak bazı terimler hesaplanmalıdır. Şekil 3.5'de verilen terminolojiye göre denklemler oluşturulur.

Çelik donatının faydalı yüksekliği aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$d_s = h - d'' - \frac{\emptyset_s}{2} \tag{3.33}$$

h: Kesit yükseliği

d': Çelik donatı beton örtüsü

$\emptyset_s$: Çelik donatı çapı

Benzer şekilde tekstil takviye için tarafsız yükseklik yazılırsa aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$d_t = h + \frac{s\,t + d''}{2} \tag{3.34}$$

s: Tekstil donatı katman sayısı

t: Tekstil donatı katmanlarının kalınlığı

d'': Tekstil donatı beton örtüsü

Gerilme dağılımı üzerinden çelik donatı birim şekil değiştirmesi (ε_s) yazılırsa;

$$\varepsilon_s = \frac{-\varepsilon_c + \varepsilon_t}{d_t} d_s + \varepsilon_c \tag{3.35}$$

ε_c: En üstteki beton lifinde oluşan maksimum birim şekil değiştirme

ε_t: Tekstil donatı üzerinde oluşan maksimum birim şekil değiştirme

Moment taşıma kapasitesinin elde edilebilmesi için basınç bölgesinin yüksekliği (c) de benzerlik denklemleri ile elde edilirse;

$$c = \frac{d_t}{\varepsilon_c + \varepsilon_t} \varepsilon_c \tag{3.36}$$

Dikdörtgen gerilme dağılımı kabulü sebebiyle, basınç bölgesinin yüksekliği düzeltme katsayısı (k_1) ile düzeltilmelidir. Bu katsayı beton sınıfına göre 0,65-0,85 arasında bir değer olarak alınabilir.

$$x = \frac{d_t}{\varepsilon_c + \varepsilon_t} \varepsilon_c \tag{3.37}$$

Tekstil takviye ve çelik takviye üzerinde oluşan iç kuvvetler için moment kolu uzunluğu yazılırsa;

$$z_s = d_s - \frac{k_1 c}{2} \tag{3.38}$$

$$z_t = d_t - \frac{k_1 c}{2} \tag{3.39}$$

z_s: Çelik donatı için moment kolu

z_s: Tekstil donatı için moment kolu

Takviyeler üzerinde oluşan iç kuvvet değerleri de gerilme ile alanın çarpımı ile yazılırsa;

$$F_s = f_y\, A_s \tag{3.40}$$

$$F_t = f_t\, A_t \tag{3.41}$$

f_y: Çelik akma gerilmesi

f_t : Tekstil takviyede oluşan ortalama gerilme

A_s: Çelik takviye kesit alanı

A_t: Tekstil takviye kesit alanı

Sonuç olarak kesitin taşıma kapasitesi çekme bölgesinde oluşan iç kuvvetlerin basınç bölgesindeki kuvvetin üzerine moment alınmasıyla elde edilirse;

$$M_u = M_s + M_t = F_s\, z_s + F_t\, z_t \tag{3.42}$$

Bu hesaplama yapıldıktan sonra betonda oluşan gerilme değeri kontrol edilmelidir. Kuvvet dengesi kullanılarak basınç bölgesinde oluşan kuvvetin alana bölünmesiyle basınç bölgesinde oluşan gerilme elde edilir. Bu değerin beton basınç dayanımını aşmadığı irdelenmelidir.

Bu basitleştirilmiş yöntemle tekstil takviye ile güçlendirilmiş kiriş ve döşeme gibi baskın olarak eğilme momenti altında çalışan elemanların moment taşıma kapasitesi belirlenebilir.

BÖLÜM DÖRT
TEKSTİL TAKVİYELİ BETONARME ELEMANLARIN TASARIMLARI

4.1 Hesap Örnekleri

4.1.1 Çekme Deneyi Sonuçlarına Göre AR-cam Takviyeli Kiriş Tasarımı (Mobasher-Soranakom Gerinim Sertleşmesi Beton Modeli)

Örnek bir çekme deneyi sonuçları alınarak, Soranakom ve Mobasher (2009), tarafından önerilen yönteme göre, bir kirişin moment taşıma kapasitesi hesaplanmıştır. Kiriş ile bilgiler ve ilgili malzeme özellikleri aşağıda verilmiştir.

Beton basınç dayanımı (f'_c) = 60 MPa.

Hareketli yük (q) =300 kN/m^2

Çatlama öncesi elastisite Modülü (E) = 15 GPa

Çatlama çekme dayanımı (σ_{cr})= 5,55 MPa

Nihai çekme dayanımı (σ_{cy})= 9 MPa

Nihai birim şekil değiştirme (ε_{tm})= 0,009

Tekstil takviyeli beton birim hacim ağırlığı= 20,4 kN/m^3

Kiriş açıklığı (L) = 300 mm

Kiriş genişliği 15 mm kabul edilerek kiriş ölü ağırlığı hesaplanır;

$$G = 0{,}15 * 20{,}4 = 3{,}06 \text{ kN}/m^2$$

Dizayn yükü aşağıdaki yük kombinasyonuna göre yazılır;

$$p_d = 1{,}4G + 1{,}6Q = 1{,}4\ (3{,}06) + 1{,}6\ (300) = 484 \text{ kN}/m^2$$

Açıklık ortasındaki moment dizayn yüküne göre hesaplanır;

$$M_u = \frac{\text{p}_d\ L^2}{8} = \frac{484\text{x}\ 0{,}3^2}{8} = 5{,}44\ kN - \frac{m}{m}$$

Moment taşıma kapasitesi denklemlerinde kullanılacak katsayılar hesaplanır;

$$ß = \frac{\varepsilon_{tm}}{\varepsilon_{cr}} \qquad \lambda = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cr}} \qquad \eta = \frac{\mathrm{E}_c}{\mathrm{E}} \quad \omega = \frac{\sigma_{cy}}{\sigma_{cr}}$$

Çatlama birim şekil değiştirmesi;

$$\varepsilon_{cr} = \frac{\sigma_{cr}}{\mathrm{E}} = \frac{5{,}55}{15000} = 3{,}7\mathrm{x}10^{-4}$$

Normalize edilmiş nihai dayanımda çekme gerilimi;

$$\mathrm{a} = \frac{\varepsilon_{tm}}{\varepsilon_{cr}} = \frac{0.{,}009}{3{,}7\mathrm{x}10^{-4}} = 24{,}3$$

Normalize edilmiş çatlama sonrası elastisite modülü;

$$\eta = \frac{\mathrm{E}_c}{\mathrm{E}} = \frac{9 - 5.55}{(0{,}009 - 0{,}00037) * 15000} = 0{,}0266$$

Normalize edilmiş basınç deformasyonu;

$$\omega = \frac{\sigma cy}{\sigma cr} = \frac{0.85 x f c'}{\sigma cr} = \frac{0.85 x 60}{5{,}55} = 9{,}2$$

Tarafsız eksen derinliği ve normalize edilmiş moment kapasitesi daha öncesinde verilen denklemler yardımıyla hesaplanır;

$$C_1\eta(ß^2 - 2ß + 1) + 2ß - 1 = 0{,}0266(24{,}3^2 - 2\mathrm{x}24{,}3 + 1) + 2\mathrm{x}24{,}3 - 1$$

$$= 62{,}04$$

$$k = \frac{C_1 - \sqrt{ß^2 C_1}}{C_1 - ß^2} = \frac{62{,}04 - \sqrt{24{,}3^2 \mathrm{x} 62{,}04}}{62{,}04 - 24{,}3^2} = 0{,}245$$

$$C2 = C1 + 2C1ß - ß^2 = 62{,}04 + 2 * 62{,}04 * 24{,}3 - 24{,}3^2 = 2486$$

$$m_n = C_2 \frac{k^2 - 2k + 1}{ß^2} + \frac{2ßk^3}{1 - \mathrm{k}} = 2486 \frac{0{,}245^2 - 2x0{,}245 + 1}{24{,}3^2} + \frac{2\mathrm{x}24{,}3x0{,}245^3}{1 - 0{,}245}$$

$$= 3.34$$

En üst lifte nihai birim şekil değiştirmeye ulaşıldığı kontrolü yapılır;

$$\lambda = \frac{\mathrm{k}}{(1 - \mathrm{k})} ß \leq \omega \quad \lambda = \frac{0{,}245}{(1 - 0{,}245)} 24{,}3 = 7{,}89 < \omega = 9{,}2$$

Oluşan basınç gerinimi değerinin elastik sınır içerisinde kaldığı doğrulanmış olur. Bu nedenle yukarıdaki hesaplanan normalize edilmiş moment değeri kullanılabilir. Güvenlik faktörü (φ_r) de konservatif olarak 0,65 alınırsa;

$$M_n = \varphi_r \, m_n \, M_{cr} \qquad M_{cr} = \frac{M_u}{\varphi_r \, m_n} = \frac{5{,}44}{0{,}65 * 3{,}34} = 2{,}50 \; kN - m/m$$

Çatlama momenti hesaplanır. Çatlama momenti yardımıyla kesit kalınlığı belirlenir;

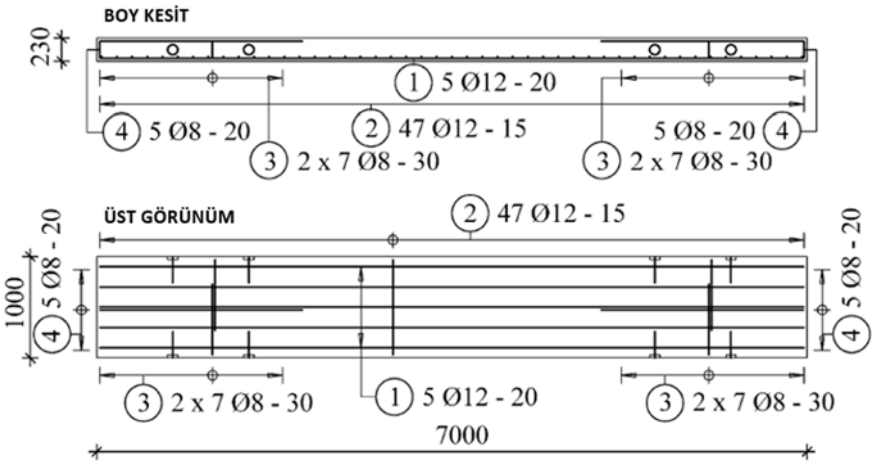
$$M_{cr} = \frac{\sigma_{cr} \, I}{\mathrm{y}} = \frac{\sigma_{cr} \, b \, h^2}{6}$$

Kesit yüksekliği çatlama momentinden çekilir;

$$h = \sqrt{\frac{6 \, M_{cr}}{\sigma_{cr} \, b}} = \sqrt{\frac{6 * 2{,}5}{5{,}5 * 0{,}15}} = 0.05m$$

4.1.2 Karbon Takviye ile Mevcut Döşeme Güçlendirme Örneği (Basitleştirilmiş Tasarım Yöntemi)

Schladitz, Frenzel Ehlig ve Curbach (2012), mevcut betonarme bir döşemeyi tekstil donatı kullanarak güçlendirmiştir. Bu döşeme kullanılarak teorik hesaplama yapılmış ve Schladitz, Frenzel ve Curbach tarafından verilen deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1'de döşemeye ait donatı açılımı verilmiştir.



Şekil 4.1 Mevcut döşeme elemanının donatı açılımı (Schladitz, Frenzel, Ehlig Curbach, 2012)

Döşeme betonunun basınç dayanımı 45,5 MPa, çelik takviyenin akma dayanımı ise 574 MPa olarak verilmiş. 23 santimetre kalınlığa sahip döşemenin açıklık ortasındaki boyuna donatıları dikkate alınarak, kesit içerisindeki iç kuvvet dengesi yazılır;

$$T = C$$

$$A_s\, f_s\ = 0{,}85\, f_c\, k_1\, c\, b$$

$$565 * \frac{574}{1{,}15} = \ 0{,}85 * \frac{45{,}5}{1{,}5} * \ k_1 c * 1000$$

C45 için $k_1 = 0{,}73$ olarak alınır ve tarafsız eksen derinliği çekilir;

$$c = 12{,}73\ mm$$

Tarafsız eksen derinliği hesaplanır. Bu tarafsız eksen derinliği kullanılarak kesitin moment taşıma kapasitesi hesaplanır;

$$M_n = \ A_f \, f_{fu} \, (d \ - \frac{k_1 c}{2})$$

$$M_n = \ 565 * \frac{574}{1{,}15} \left(205 \ - \frac{0{,}73 * 9{,}76}{2}\right) = 56{,}80 * 10^6 \, Nmm = 56{,}80 \, kNm$$

Moment taşıma kapasitesi güçlendirilmemiş mevcut döşeme elemanı için elde edilir.

1 Katmanlı olarak güçlendirilmiş döşemenin moment taşıma kapasitesini bulmak için, öncelikle tekstil takviye için ve çelik için faydalı yükseklikler belirlenir.

$$d_s \ = h - d' = \ 230 - 25 = 205 \, mm$$

$$d_t \ = 230 + \frac{1 * 3 + 3}{2} = 233 \, mm$$

Betonun ezildiği ve çeliğin aktığı durumda tekstil takviyede oluşan birim şekil değiştirme değeri hesaplanır.

$$\varepsilon_s = \frac{-\varepsilon_c + \varepsilon_t}{d_t} d_s + \varepsilon_c$$

$$\varepsilon_s = \frac{0{,}0035 + 0{,}012}{233} 205 + 0{,}0035 = 0{,}017 > 0{,}003$$

Tarafsız eksen derinliği yazılacak olursa;

$$c = \frac{d_t}{-\varepsilon_c + \varepsilon_t} (-\varepsilon_c) = \frac{233}{0{,}0035 + 0{,}012} 0{,}0035 = 52 \, mm$$

Moment taşıma kapasitesinin elde edilebilmesi için donatılar için moment kolu elde edilir;

$$z_s = d_s - \frac{k_1 c}{2} = 205 - \frac{0{,}73 * 52}{2} = 186{,}02 \, mm$$

$$z_t = d_t - \frac{k_1 c}{2} = 233 - \frac{0{,}73 * 52}{2} = 214{,}02\ mm$$

Çelik takviye akma gerilmesine ulaştığı için oluşan kuvvet aşağıdaki gibi yazılır;

$$F_s = f_y\ A_s = \frac{574}{1{,}15} * 565 = 2{,}82 * 10^5 N$$

Tekstil takviye maksimum gerilme değerine ulaşmamıştır. Maksimum birim şekil değiştirme limiti 0,012 olduğu düşünülür;

$$F_t = f_t\ A_t = 1200 * 177 = 2{,}12 * 10^5 N$$

Hesaplanan kuvvet değerleri ve moment kolu değerleri çarpılarak moment taşıma kapasitesi elde edilir;

$$M_u = M_s + M_t = F_s\ z_s + F_t\ z_t = 2{,}82 * 10^5 * 186{,}02 + 2{,}12 * 10^5 * 214{,}02$$

$$= 97{,}83 * 10^6 Nm = 97{,}83\ kNm$$

Tablo 4.1'de Schladitz, Frenzel, Ehlig ve Curbach (2012) tarafından hesaplanan göçme momenti değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1 Hesaplanan moment taşıma kapasiteleri (Schladitz, Frenzel, Ehlig Curbach, 2012)

Test Örneği	Hesaplanan Göçme Momenti (kNm)
Güçlendirilmemiş Döşeme	62
1 Katmanlı Tekstil ile Güçlendirilmiş Döşeme	101
2 Katmanlı Tekstil ile Güçlendirilmiş Döşeme	144
3 Katmanlı Tekstil ile Güçlendirilmiş Döşeme	188
4 Katmanlı Tekstil ile Güçlendirilmiş Döşeme	232

Tablo 4.2'de ise Schladitz, Frenzel, Ehlig ve Curbach (2012) tarafından elde edilen deneysel göçme momenti değerleri ve açıklık ortasındaki deformasyon değerleri verilmiştir. Ayrıca eklenen tekstil güçlendirme katmanları sayesinde yük taşıma kapasitesinin artışı hesaplanmıştır. Yük taşıma kapasitesi karşılaştırması yapılırken güçlendirilmemiş döşeme referans olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre sadece bir katman ile güçlendirilmiş döşemenin moment taşıma kapasitesi %67 artmıştır. Bu değer iki katman için %142, üç katman için %189 ve dört katman tekstil ile güçlendirilmiş döşeme için %245 olmaktadır.

Bu sonuçlar, tekstil takviyelerin mevcut elemanların güçlendirilmesindeki potansiyelini göstermektedir. İnce taneli beton ile örtülmüş tekstil donatılar döşemenin taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırmaktadır.

Tablo 4.2 Deneysel moment taşıma kapasiteleri ve yük artışı (Schladitz, Frenzel, Ehlig Curbach, 2012)

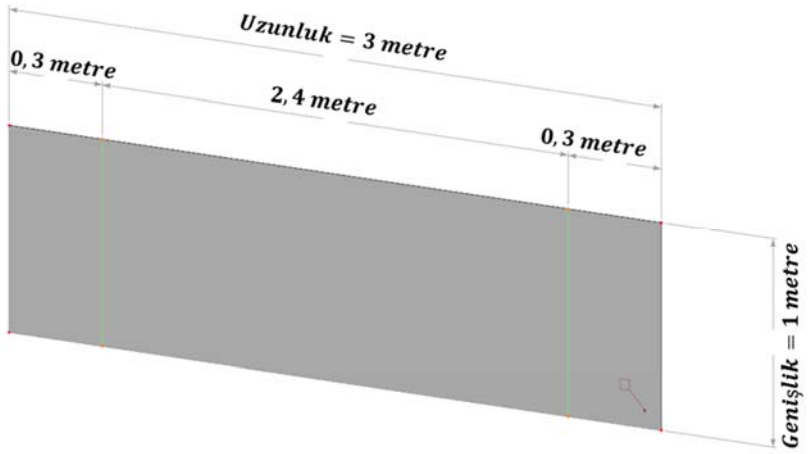
Test Örneği	Göçme Momenti (kN)	Deformasyon (mm)	Yük Taşıma Kapasitesi (%)
Güçlendirilmemiş Döşeme	66	94	100 (Referans)
1 Katmanlı Tekstil ile Güçlendirilmiş Döşeme	110	223	167
2 Katmanlı Tekstil ile Güçlendirilmiş Döşeme	160	229	242
3 Katmanlı Tekstil ile Güçlendirilmiş Döşeme	191	240	289
4 Katmanlı Tekstil ile Güçlendirilmiş Döşeme	228	244	345

4.2 Karşılaştırma Örnekleri

Karşılaştırma örnekleri kapsamında cephe paneli, döşeme, oluk kirişi ve havuz elemanlar çelik ve tekstil donatılar ile ayrı ayrı tasarlanıp, ağırlık ve maliyet karşılaştırması yapılmıştır.

4.2.1 AR-cam Takviyeli / Çelik Takviyeli Cephe Paneli (Lineer Tasarım Yöntemi)

Bu örnek kapsamında, AR-cam, AR-cam sıva filesi ve çelik donatı ile tasarlanan cephe panelleri ele alınmıştır. Tekstil donatılar ile panel tasarlanırken beton olarak maksimum tanecik boyutu 1,0 - 2,0 mm olan ince taneli beton kullanılmıştır. Şekil 4.2'de panelin boyutları verilmiştir. Panel kenarlardan 0,3 metre içeriden mesnetlenmiştir. Mesnetlenme türü itibariyle sıcaklık değişimleri panel üzerinde ekstra kuvvet oluşturmayacağı varsayılmıştır. Şekil 4.2'de panele ait boyular verilmiştir.



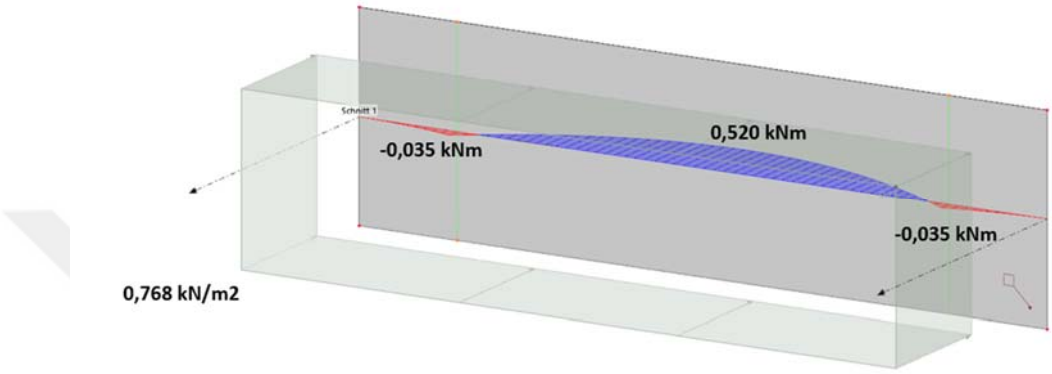
Şekil 4.2 Cephe paneli boyutları

Panellerin rüzgar yükü hesaplanırken, zeminden yükseklik 9-20 metre aralığı dikkate alınarak, emme yükü q=0,8 kN/m2 (TS498) alınmıştır. Rüzgar yükünün hesaplanması için kullanılan, C katsayısı 0,96 seçilmiştir. Yapı yan yüzeyine gelen rüzgar basıncı aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$w = q * C = 0{,}8 * 0{,}96 = 0{,}768\ kN/m2$$

Panel üzerindeki momentler aşağıdaki şekildeki gibi hesaplanmıştır. Modelden elde edilen en yüksek moment değeri, hareketli yük güvenlik katsayısı olan 1,6 ile çarpılır ve açıklıktaki moment alınarak dizayn momenti hesaplanır. Şekil 4.3 'de cephe paneli üzerinde oluşan eğilme momentleri görülmektedir.

$$M_d = 1{,}6 * 0{,}520 = 0{,}829\ kNm$$



Şekil 4.3 Rüzgar yükü sebebiyle cephe paneli üzerinde oluşan eğilme momentleri

4.2.1.1 Çelik Takviye ile Cephe Paneli Hesabı

B420C çelik ile tasarlanan panel için panel kalınlığı 80 milimetre ve beton sınıfı C30 olarak dikkate alınarak eğilme hesabı yapılır;

$$A_s\ f_{yd}\ = 0{,}85\ f_{cd}\ k_1\ c\ b$$

$$A_s * \frac{420}{1{,}15} = \ 0{,}85 * \frac{30}{1{,}5} * 0{,}85 * \ c * 1000$$

$$A_t = 39{,}56c$$

$$M_n = 0{,}801 * 10^6\ \mathrm{Nm} = \ \ 39{,}56c * \ 365 * \left(55 - \frac{0{,}85c}{2}\right)$$

$$c = 1{,}05\ mm$$

$$A_s = 39{,}56c = 39{,}56 * 1{,}05 = 41{,}54\ mm2$$

$$A_{seçilen} = \emptyset 4/200\ (Çelik\ Hasır\ Donatı)\ \ = 62{,}83\ mm2 > \ A_{gerekli}$$

$$= 41{,}54\ mm2$$

Dengeli donatı oranı kontrolü yapılır;

$$\frac{c_b}{d} = \frac{600}{600 + f_{yd}}$$

$$c_b = 0{,}621 * 55 = 34{,}19\ mm$$

$$A_s\ f_{yd}\ = 0{,}85\ f_{cd}\ k_1\ c_b\ b$$

$$A_s * 365\ = 0{,}85 * \frac{30}{1{,}5} * 0{,}85 * \ 34{,}19 * 1000$$

$$A_s = 1352{,}71\ mm2$$

$$\rho_b = \frac{A_f}{\mathrm{b\ d}} = \frac{1352{,}71}{1000 * \ 55} = 0{,}02459$$

$$\rho = \frac{A_f}{\mathrm{b\ d}} = \frac{62{,}83}{1000 * 55} = 0{,}00114 \geq \rho_{min} = 0{,}00100$$

$$\rho_b = 0{,}02459 > \ \rho = 0{,}00114$$

Dengeli donatı oranı koşulu sağlanır. Seçilen donatıya göre moment taşıma kapasitesi hesaplanır;

$$c = 1{,}58\ mm$$

$$M_{seçilen} = \ \ 62{,}83 * \ 365 * \left(55 - \frac{0{,}85 * 1{,}58}{2}\right) = 1{,}252 * 10^6 Nm = 1{,}252\ kNm$$

$$M_{seçilen} = 1{,}252\ kNm > \ M_d = 0{,}806\ kNm$$

4.2.1.2 AR-cam Takviye ile Cephe Paneli Hesabı

AR-cam takviye ile tasarım yapılırken ince taneli beton kullanılır. Bu sebeple beton sınıfı C60 olarak dikkate alınmıştır. Tablo 4.3'de ise AR-cam donatıya ait malzeme özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.3 AR-cam tekstil donatıya ait özellikler

Özellikler	Birimler	Değerler	
		Yük Doğrultusuna Paralel/Dik	
Aşılama	-	Epoksi resin	
Kumaş Kesit Alanı	mm2/m	65,3/65,3	
Ortalama Çekme Dayanımı (Demetlerin Çekme Dayanımına Göre)	MPa	1350	1350
Elastisite Modülü	GPa	70	70

AR-cam tekstilin çekme dayanımları, demetlerin çekme dayanımına göre verilmiştir. Tekstil takviyelerin güvenlik faktörü, Rempel, Ricker ve Hegger (2020) tarafından için 1,3 olarak önerilmiştir Ayrıca maksimum yük taşıma kapasitesinin hesaplanması için, %70'lik bir kesit alanının aktif şekilde çalışacağı varsayımı yapılmıştır. Tekstil malzemelerin korozyona karşı dayanıklılığı sayesinde beton örtüsü 5 mm olarak alınmıştır. Panel kalınlığı ise 25 mm seçilmiştir;

$$A_t\, f_t\ = 0{,}85\, f_{cd}\, k_1\, c\, b$$

$$A_t * \frac{1350}{1{,}3} * 0{,}70 = \ 0{,}85 * \frac{60}{1{,}5} * 0{,}65 * \ c * 1000$$

$$A_t = 30{,}40c$$

Tarafsız eksen derinliği ve gerekli donatı alanı hesaplanır;

$$M_n = 0{,}806 * 10^6 Nm = \ 30{,}40c * \frac{1350}{1{,}3} * 0{,}70 * \left(20 - \frac{0{,}65c}{2}\right)$$

$$c = 1{,}89\ mm$$

$$A_t = 30{,}40c = 30{,}40 * 1{,}89 = 57{,}46\ mm2$$

$$A_{seçilen} = 1 * 65{,}3 = 65{,}3\ mm2 > \ A_{gerekli} = 57{,}46\ mm2$$

Dengeli donatı oranı kontrolü yapılır;

$$\varepsilon_{fd} = \frac{\sigma_{fd}}{E_{fd}} = \frac{726{,}92}{70 * 10^3} = 0{,}0104$$

$$\rho_{fb} = 0.85\ k_1\ \frac{f_{cd}}{f_{fd}}\left(\frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon_{cd} + \varepsilon_{fd}}\right) = 0{,}85 * 0{,}65 * \ \frac{40}{726{,}92}\left(\frac{0{,}003}{0{,}003 + 0{,}0104}\right)$$

$$= 0{,}00681$$

$$\rho = \frac{\eta_\tau\ A_f}{\mathrm{b\ d}} = \left(\frac{0{,}70 * 65{,}3}{1000 * 20}\right) = 0{,}00229$$

$$\rho_b = 0{,}00681 > \ \rho = 0{,}00229$$

Dengeli donatı oranı koşulu sağlanır. Seçilen donatı alanına göre moment kapasitesi hesaplanır;

$$c = 2{,}14\ mm$$

$$M_{seçilen} = \ 65{,}3 * \frac{1350}{1{,}3} * 0{,}70 * \left(20 - \frac{0{,}65 * 2{,}14}{2}\right) = 0{,}916 * 10^6 Nm$$

$$= 0{,}916\ kNm$$

$$M_{seçilen} = 0{,}916\ kNm > \ M_d = 0{,}806\ kNm$$

4.2.1.3 AR-cam Sıva Filesi ile Cephe Paneli Hesabı

AR-cam sıva filesi ile tasarım yapılırken de ince taneli beton kullanılır. Bu sebeple beton sınıfı C60 olarak dikkate alınmıştır. Tablo 4.4'de ise AR-cam sıva filesine ait malzeme özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.4 AR-cam sıva filesine ait özellikler

Özellikler	Birimler	Değerler	
		Yük Doğrultusuna Paralel/Dik	
Aşılama	-	-	
Kumaş Kesit Alanı	mm2/m	30/30	
Çekme Mukavementi	N/mm	40	40
Şartlandırma Sonrası Alkali Dayanımı (TS EN 13496)	N/mm	28	28

AR-cam tekstilin çekme dayanımları, demetlerin çekme dayanımına göre verilmiştir. Tekstil takviyelerin güvenlik faktörü, Rempel, Ricker ve Hegger (2020) tarafından için 1,3 olarak önerilmiştir Ayrıca maksimum yük taşıma kapasitesinin hesaplanması için, %40'lik bir kesit alanının aktif şekilde çalışacağı varsayımı yapılmıştır. Bu değer kullanılan tekstil malzemesinin aşılama olmaması sebebiyle, sadece %40'lık bir kesitin maksimum yük anında çalışacağı anlamında gelmektedir. Tekstil malzemelerin korozyona karşı dayanıklılığı sayesinde beton örtüsü 5 mm olarak alınmıştır. Panel kalınlığı ise 40 mm seçilmiştir;

Sıva filesinin alkaliye maruz kaldıktan sonra elde edilen dayanım değeri 28 N/mm (TS EN 13496) olarak verilmiştir. Başlangıç varsayımı olarak 3 adet sıva filesi kullanılır. 1 metre genişlik için sıva filesinin taşıyacağı yük aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$A_t\, f_t = \frac{3 * 1000 * 28}{1{,}3} * 0{,}4 = 25846{,}15\ N$$

$$25846{,}15 = 0{,}85 * \frac{60}{1{,}5} * 0{,}65 * c * 1000$$

$$c = 1{,}17$$

Buna göre moment taşıma kapasitesi hesaplanır. Sıva filelerinin ortalama faydalı yüksekliği d=32,5 mm olarak alınır;

$$M_n = 25846{,}15 * \left(32{,}5 - \frac{0{,}65 * 1{,}17}{2}\right) = 0{,}830 * 10^6 Nmm = 0{,}830\ kNm$$

$$M_{seçilen} = 0{,}830\ kNm > M_d = 0{,}829\ kNm$$

Dengeli donatı oranı kontrolü yapılır;

$$\varepsilon_{fd} = \frac{\sigma_{fd}}{E_{fd}} = \frac{287}{70 * 10^3} = 0{,}0041$$

$$\rho_{fb} = 0.85\ k_1\ \frac{f_{cd}}{f_{fd}}\left(\frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon_{cd} + \varepsilon_{fd}}\right) = 0{,}85 * 0{,}65 * \frac{40}{287}\left(\frac{0{,}003}{0{,}003 + 0{,}0041}\right) = 0{,}0032$$

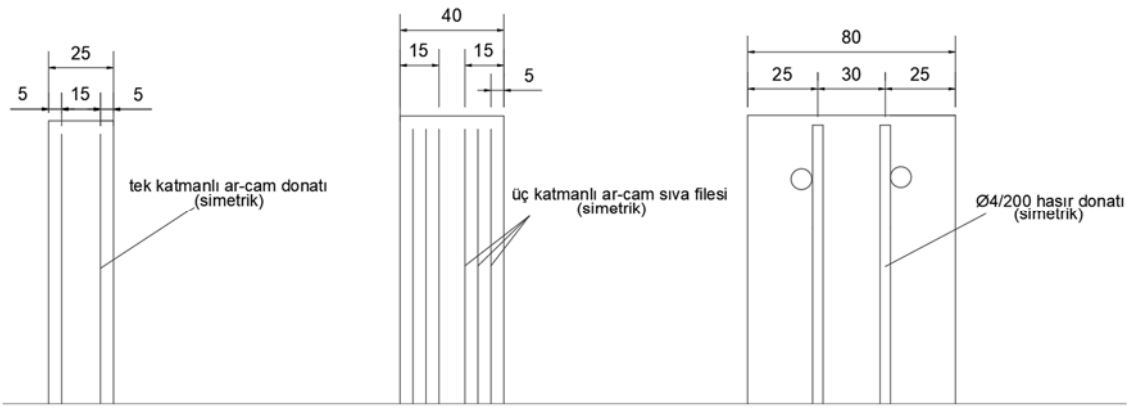
$$\rho = \frac{\eta_\tau\ A_f}{\mathrm{b\ d}} = \left(\frac{0{,}40 * 30 * 30}{1000 * 40}\right) = 0{,}0009$$

$$\rho_b = 0{,}0032 > \rho = 0{,}0009$$

Dengeli donatı oranı koşulu sağlanır.

4.2.1.4 Cephe Paneli Donatı Yerleşimi

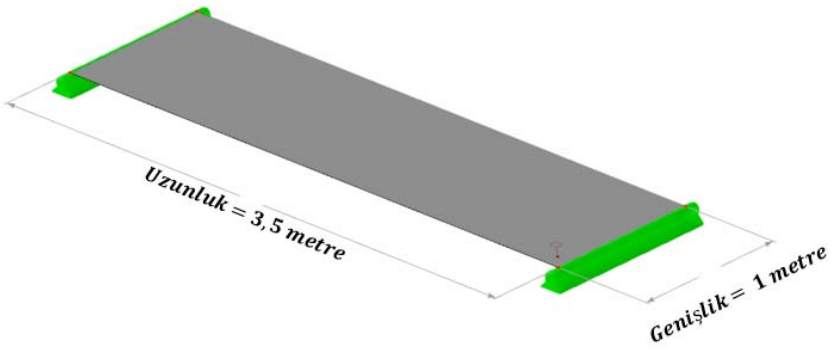
Cephe paneline ait donatı yerleşim planı Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4 Cephe paneli kesiti donatı yerleşimi

4.2.2 Karbon / Çelik Takviyeli Döşeme (Lineer Tasarım Yöntemi)

Bu örnek kapsamında aşağıda özellikleri verilen prefabrik döşeme elemanı karbon ve çelik takviye kullanılarak tasarlanmıştır. Döşemenin önce çelik ile tasarımı yapılmıştır. Karbon takviye ile tasarım yapılırken, beton kalınlığının olabildiğince azaltıldığı ve kesitin çelik ile tasarlanan boyutla aynı kaldığı durum incelenmiştir. Şekil 4.5'de döşemeye ait boyutlar verilmiştir.



Şekil 4.5 Döşeme boyutları

İnce Taneli Beton Basınç dayanımı (f_c) = 60 MPa

Normal Beton Basınç Dayanımı (f_c) =30 MPa

Döşeme Genişliği (b) = 1 metre

Döşeme açıklığı (L) = 3,5 metre

Dizayn yükü, yük analizi yapılarak elde edilir. Sabit ve hareketli yüklerin bulunmasının ardından, tasarım momenti elde edilir;

Betonarme plak ağırlığı = $h_f * \gamma_{beton} = 0{,}12 * 25 = 3\ kN/m2$

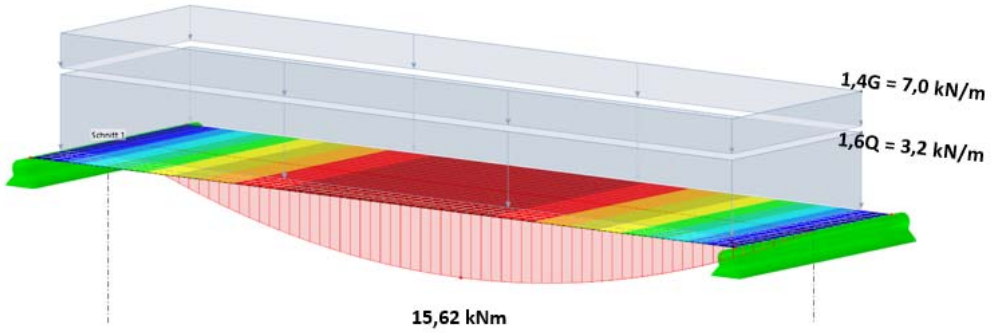
Kaplama ağırlığı = $h_{kaplama} * \gamma_{kaplama} = 0{,}03 * 20 = 0{,}6\ kN/m2$

Sıva ağırlığı = $h_{sıva} * \gamma_{sıva} = 0{,}015 * 20 = 0{,}3\ kN/m2$

Tesviye betonu ağırlığı = $h_{tesviye} * \gamma_{tesviye} = 0{,}05 * 22 = 1{,}1\ kN/m2$

Sabit yükler	$G = 5kN/m2$
Hareketli yükler	$Q = 2kN/m2\ (TS\ 498)$

$$p_d = 1{,}4G + 1{,}6Q = 1{,}4 * 5 + 1{,}6 * 2 = 10{,}2\ kN/m2$$



Şekil 4.6 Ölü ve hareketli yükler sebebiyle döşeme üzerinde oluşan eğilme momenti

Şekil 4.6'da döşeme üzerinde oluşan eğilme momenti gösterilmiştir. Buna göre hesaplamalarda kullanılacak dizayn yükü hesaplanmış olur.

4.2.2.1 Çelik Takviye ile Döşeme Hesabı

Döşeme kalınlığı h_f=120 mm alınarak, betonarme dizaynı yapılır;

$$A_s\ f_{yd} = 0{,}85\ f_{cd}\ k_1\ c\ b$$

$$A_s * \frac{420}{1{,}15} = 0{,}85 * \frac{30}{1{,}5} * 0{,}85 * c * 1000$$

$$A_t = 39{,}56c$$

$$M_n = 15{,}62 * 10^6\ N - \frac{m}{m} = 39{,}56c * 365 * \left(95 - \frac{0{,}65c}{2}\right)$$

$$c = 12{,}1\ mm$$

$$A_s = 39{,}56c = 39{,}56 * 12{,}10 = 478{,}74\ mm2$$

$$A_{seçilen} = \emptyset 10/16 = 490{,}87\ mm2 > A_{gerekli} = 478{,}74\ mm2$$

Dengeli donatı oranı kontrolü yapılır;

$$\frac{c_b}{d} = \frac{600}{600 + f_{yd}}$$

$$c_b = 0{,}621 * 95 = 59{,}05\ mm$$

$$A_s\ f_{yd} = 0{,}85\ f_{cd}\ k_1\ c_b\ b$$

$$A_s * 365 = 0{,}85 * \frac{30}{1{,}5} * 0{,}85 * 59{,}05 * 1000$$

$$A_s = 2336{,}5\ mm2$$

$$\rho_b = \frac{A_f}{\mathrm{b\ d}} = \frac{2336{,}5}{1000 * 90} = 0{,}02459$$

$$\rho = \frac{A_f}{\mathrm{b\ d}} = \frac{490{,}87}{1000 * 90} = 0{,}00517$$

$$\rho_b = 0{,}02459 > \rho = 0{,}00517$$

Dengeli donatı oranı koşulu sağlanır. Seçilen donatıya göre moment taşıma kapasitesi hesaplanır;

$$c = 12{,}1\ mm$$

$$M_{seçilen} = \ 490{,}87 * \ 365 * \left(95 - \frac{0{,}85 * 12{,}1}{2}\right) = 16{,}11 * 10^6 Nm = 16{,}11\ kNm$$

$$M_{seçilen} = 16{,}11\ kNm > \ M_d = 15{,}62\ kNm$$

4.2.2.2 Karbon Takviye ile Döşeme Hesabı (Aynı kesit)

Kullanılan karbon tekstil özellikleri aşağıdaki Tablo 4.5'de verilmiştir. Karbon ile yapılan diğer örneklerde de aynı tekstil karbon malzeme kullanılacaktır.

Tablo 4.5 GRID Q95/95-CCE-38 Tekstil donatının özellikleri

Özellikler	Birimler	Değerler	
		Yük Doğrultusuna Paralel/Dik	
Üretici	-	Solidian	
Aşılama	-	Epoksi resin	
Roving Mesafesi	mm	38/38	
Kumaş Kesit Alanı	mm2/m	85/85	
Ortalama Çekme Dayanımı (Demetlerin Çekme Dayanımına Göre)	MPa	3300	3300
Elastisite Modülü	GPa	240	240

Karbon takviyenin çekme dayanımları demetlerin çekme dayanımına göre verilmiştir. Burada karbon tekstil donatı için güvenlik faktörü 1,3 alınmıştır. Ayrıca maksimum yük taşıma kapasitesinin hesaplanması için, %70'lik bir kesit alanının aktif şekilde çalışacağı varsayımı yapılmıştır. Karbon takviye için beton örtüsü 5-10 mm

olarak dikkate alınabilir. Örnek kapsamında 8mm beton örtüsü dikkate alınmıştır. Döşeme kalınlığı, betonarme ile aynı olarak, h_f=120 mm alınarak tasarım yapılır;

$$A_t\, f_t\ = 0{,}85\, f_{cd}\, k_1\, c\, b$$

$$A_t * \frac{3300}{1{,}3} * 0{,}70 = \ 0{,}85 * \frac{60}{1{,}5} * 0{,}65 * \ c * 1000$$

$$A_t = 12{,}43c$$

Tarafsız eksen derinliği ve gerekli donatı alanı hesaplanır;

$$M_n = 15{,}62 * 10^6 Nm - \frac{m}{m} = \ 12{,}43c * \frac{3300}{1{,}3} * 0{,}70 * \left(112 - \frac{0{,}65c}{2}\right)$$

$$c = 6{,}5\ mm$$

$$A_t = 12{,}43c = 12{,}43 * 6{,}5 = 80{,}84\ mm2$$

$$A_{seçilen} = 1 * 85 = 85\ mm2 > \ A_{gerekli} = 80{,}85\ mm2$$

Dengeli donatı oranı kontrolü yapılır;

$$\varepsilon_{fd} = \frac{\sigma_{fd}}{E_{fd}} = \frac{1776{,}9}{240 * 10^3} = 0{,}0074$$

$$\rho_{fb} = 0.85\ k_1\ \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \left(\frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon_{cd} + \varepsilon_{fd}}\right) = 0{,}85 * 0{,}65 * \frac{40}{1776} \left(\frac{0{,}003}{0{,}003 + 0{,}0074}\right)$$

$$= 0{,}00359$$

$$\rho = \frac{\eta_\tau\, A_f}{\mathrm{b\ d}} = \left(\frac{0{,}70 * 85}{1000 * 110}\right) = 0{,}0005$$

$$\rho_b = 0{,}00359 > \ \rho = 0{,}0005$$

Dengeli donatı oranı koşulu sağlanır. Seçilen donatı alanına göre moment kapasitesi hesaplanır;

$$c = 6{,}83\ mm$$

$$M_{seçilen} = \ 85 * \frac{3300}{1{,}3} * 0{,}70 * \left(112 - \frac{0{,}65 * 6{,}83}{2}\right) = 16{,}58 * 10^6 Nm$$

$$= 16{,}58\ kNm$$

$$M_{seçilen} = 16{,}58\ kNm > \ M_d = 15{,}62\ kNm$$

Kesitin aynı kaldığı durumda tek katmanlı karbon takviye kullanımı yeterli olmaktadır.

4.2.2.3 Karbon Takviye ile Döşeme Hesabı (Azaltılmış Kesit Alanı)

Döşeme kalınlığı olarak, h_f=60 mm için ilk tasarım yapılır.

$$A_t\ f_t\ = 0{,}85\ f_{cd}\ k_1\ c\ b$$

$$A_t * \frac{3300}{1{,}3} * 0{,}70 = \ 0{,}85 * \frac{60}{1{,}5} * 0{,}65 * \ c * 1000$$

$$A_t = 12{,}43c$$

Rempel, Ricker ve Hegger tarafından önerilen, tekstil takviyeli ince elemanlar için azaltılmış efektif derinlik kullanılır;

$$d = 52mm$$

$$d \leq 60mm \qquad d_{eff} = \frac{d-4}{0{,}95} = \frac{52-4}{0{,}95} = 50{,}52\ mm$$

Tarafsız eksen derinliği ve gerekli donatı alanı hesaplanır;

$$M_n = 15{,}62 * 10^6 Nm - \frac{m}{m} = \ 12{,}43c * \frac{3300}{1{,}3} * 0{,}70 * \left(50{,}52 - \frac{0{,}65c}{2}\right)$$

$$c = 15{,}6\ mm$$

$$A_t = 12{,}43c = 12{,}43 * 15{,}6 = 194{,}02\ mm2$$

$$A_{seçilen} = 3 * 85 = 255\ mm2 > A_{gerekli} = 194{,}02\ mm2$$

Dengeli donatı oranı kontrolü yapılır;

$$\varepsilon_{fu} = \frac{\sigma_{fu}}{E_{fu}} = \frac{1779{,}9}{240 * 10^3} = 0{,}0074$$

$$\rho_{fb} = 0.85\ k_1\ \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}}\right) = 0{,}85 * 0{,}65 * \frac{40}{1776} \left(\frac{0{,}003}{0{,}003 + 0{,}0074}\right)$$

$$= 0{,}00359$$

$$\rho = \frac{\eta_\tau\ A_f}{\mathrm{b\ d}} = \left(\frac{0{,}70 * 255}{1000 * 50{,}52}\right) = 0{,}00353$$

$$\rho_b = 0{,}00359 > \rho = 0{,}00353$$

Dengeli donatı oranı koşulu sağlanır. Ancak kesitin daha da azaltılması durumunda dengeli donatı oranı aşılacaktır. Bu nedenle kesit daha fazla inceltilmeyecektir.

$$c = 20{,}50\ mm$$

$$M_{seçilen} = \ 255 * \frac{3300}{1{,}3} * 0{,}70 * \left(50{,}52 - \frac{0{,}65 * 20{,}5}{2}\right) = 19{,}87 * 10^6 Nm$$

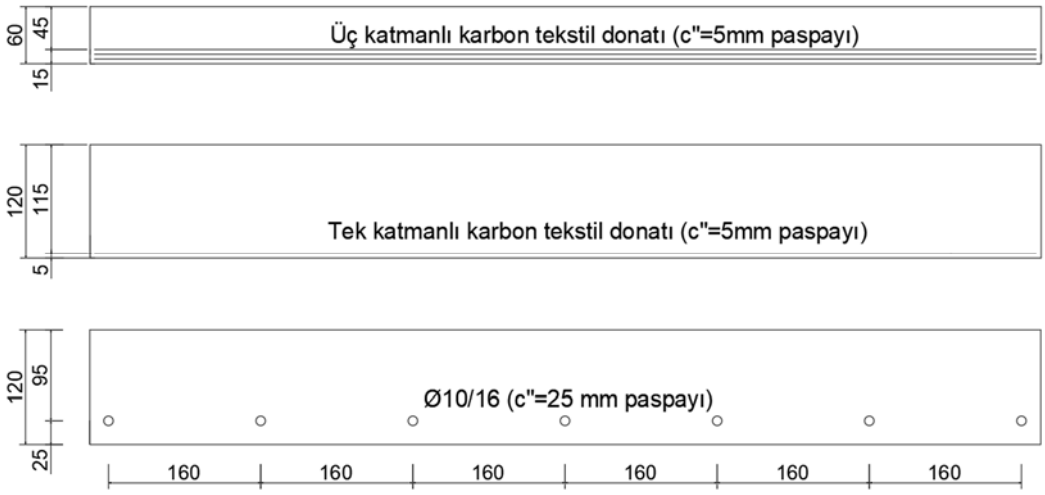
$$= 15{,}62\ kNm$$

$$M_{seçilen} = 19{,}88\ kNm > M_d = 15{,}62\ kNm$$

Üç katmanlı karbon takviye ile kesit 60 mm olarak dizayn edilebilir.

4.2.2.4 Döşeme Donatı Yerleşimi

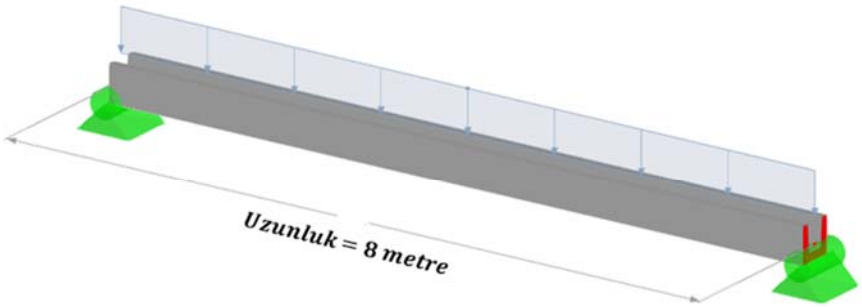
Üç farklı tasarım ile dizayn edilen döşemelere ait donatı yerleşimi Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Döşeme donatı yerleşimi

4.2.3 Karbon/Çelik Takviyeli Oluk Kirişi (Lineer Tasarım Yöntemi)

Karşılaştırma örneği için prefabrik oluk kirişi ele alınmıştır. Kiriş önce çelik takviye ile tasarlanmıştır. Ardından ise karbon ile tasarlanan oluk kirişi kesit alanının azaltılması hedeflenmiştir. Oluk kirişi ile ilgili bilgiler aşağıdaki gibidir. Şekil 4.8'de oluk kirişine ait yükleme ve açıklık durumu verilmiştir.



Şekil 4.8 Oluk kirişi boyutu

Kiriş boyu $(L) = 8\ m$

Oluk zati yükü $(g_o) = (0{,}09 * 0{,}30 * 2 + 0{,}4 * 0{,}1) * 25 = 2{,}35\ kN/m$

Kaplama yükü $(g_k) = 0{,}20\ kN/m2$

Kar yükü $(q_k) = 0{,}75\ kN/m2\ (TS\ 498)$

Aşık aralığı $(a) = 1{,}46\ m$

Oluğun 1m'sine gelen yük analizi yapılır;

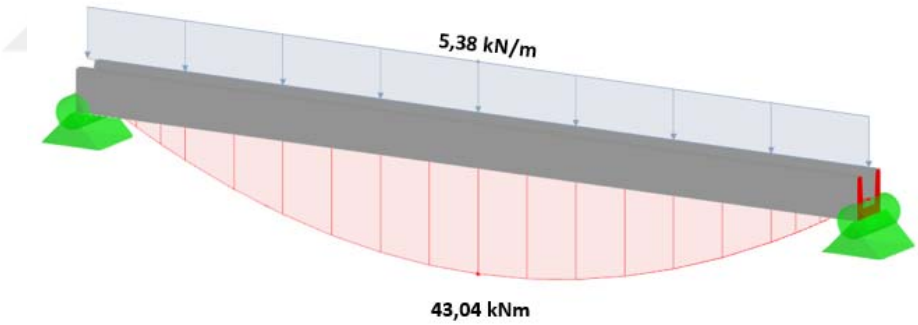
Oluk zati ağırlığı $= g_o = 2{,}35\ kN/m$

Kaplama ağırlığı $= g_k = 0{,}2 * 1{,}46 = 0{,}292\ kN/m$

Kar yükü $= q_k = 0{,}75 * 1{,}46 = 1{,}095\ kN/m$

Sabit yükler	$G = 2{,}592\ kN/m$
Hareketli yükler	$Q = 1{,}095 kN/m$

$$p_d = 1{,}4G + 1{,}6Q = 1{,}4 * 2{,}592 + 1{,}6 * 1{,}095 = 5{,}38\ kN/m$$

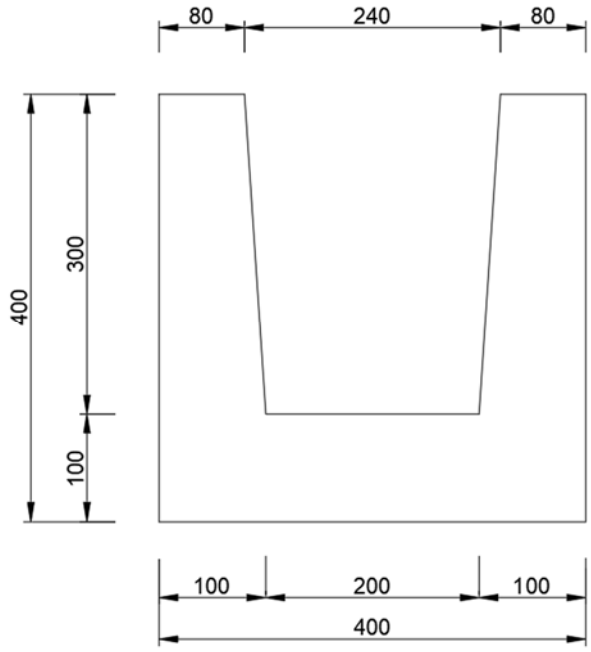


Şekil 4.9 Oluk kirişi üzerinde oluşan eğilme momenti

Şekil 4.9'da oluk kirişi dizaynında kullanılacak moment verilmiştir.

4.2.3.1 Çelik Takviye ile Oluk Kirişi Hesabı

Çelik donatı ile oluk kirişi tasarımı yapılırken, bu ölçülerde kullanılan standart bir oluk kirişi kesiti ele alınır. Şekil 4.10'da verilen oluk kirişi kesitine göre eğilme hesabı yapılır;



Şekil 4.10 Çelik ile tasarımı yapılacak oluk kirişi kesit boyutları

Buna göre eğilme hesabı yapılır;

$$A_s\, f_{yd} = 0{,}85\, f_{cd}\, k_1\, c\, b$$

$$A_s * \frac{420}{1{,}15} = 0{,}85 * \frac{30}{1{,}5} * 0{,}85 * c * 160$$

$$A_s = 6{,}33c$$

$$M_n = 43{,}04 * 10^6\, Nm = 1{,}99c * 365 * \left(375 - \frac{0{,}85c}{2}\right)$$

$$c = 52{,}7\, mm$$

$$A_s = 6{,}33c = 6{,}33 * 52{,}7 = 333{,}61\, mm2$$

$$A_{seçilen} = 3\emptyset 12 = 339{,}29\, mm2 > A_{gerekli} = 333{,}61\, mm2$$

Dengeli donatı oranı kontrolü yapılır;

$$\frac{c_b}{d} = \frac{600}{600 + f_{yd}}$$

$$c_b = 0{,}621 * 375 = 233{,}11\ mm$$

$$A_s\ f_{yd}\ = 0{,}85\ f_{cd}\ k_1\ c_b\ b$$

$$A_s * 365\ = 0{,}85 * \frac{30}{1{,}5} * 0{,}85 *\ 233{,}11 * 160$$

$$A_s = 1475{,}68\ mm2$$

$$\rho_b = \frac{A_f}{\mathrm{b\ d}} = \frac{1475{,}68}{160 * 375} = 0{,}0245$$

$$\rho = \frac{A_f}{\mathrm{b\ d}} = \frac{339{,}29}{160 * 375} = 0{,}0056$$

$$\rho_b = 0{,}0245 >\ \rho = 0{,}0056$$

Dengeli donatı oranı koşulu sağlanır. Seçilen donatı alanına göre moment kapasitesi hesaplanır;

$$c = 53{,}59\ mm$$

$$M_{seçilen} =\ \ 339{,}29 *\ 365 * \left(375 - \frac{0{,}85 * 53{,}59}{2}\right) = 43{,}69 * 10^6 Nm$$

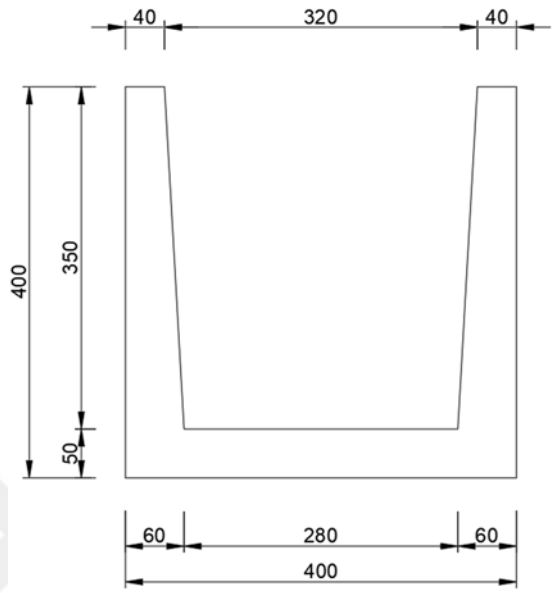
$$= 43{,}69\ kNm$$

$$M_{seçilen} = 43{,}69\ kNm >\ M_d = 43{,}04\ kNm$$

4.2.3.2 Karbon Takviye ile Oluk Kirişi Hesabı (Azaltılmış Kesit Alanı)

Oluk kirişi kesiti azaltılırken faydalı yüksekliği düşürmek yerine cidarlarda inceltmeye gidilir. Kiriş boyu ve eninin azaltılması makas üzerindeki yerleşimi de bozacağı ve faydalı yüksekliğin azalması durumunda karbon takviyeye ihtiyaç

artacağından dolayı bu şekilde bir kesit tasarımı yapılmıştır. Maliyeti optimum yapacak tasarımda karbon takviyenin kullanımı minimum olmalıdır. Şekil 4.11'de seçilen oluk kesiti görülmektedir.



Şekil 4.11 Tekstil ile tasarımı yapılacak oluk kirişi kesit boyutları

Buna göre eğilme hesabı yapılır;

$$A_t\, f_t\ = 0{,}85\, f_{cd}\, k_1\, c\, b$$

$$A_t * \frac{3300}{1{,}3} * 0{,}70 = \ 0{,}85 * \frac{60}{1{,}5} * 0{,}65 * \ c * 80$$

$$A_t = 0{,}99c$$

Tarafsız eksen derinliği ve gerekli donatı alanı hesaplanır;

$$M_n = 43{,}04\ * 10^6 Nm = \ \ 0{,}99c * \frac{3300}{1{,}3} * 0{,}70 * \left(395 - \frac{0{,}65c}{2}\right)$$

$$c = 65{,}2\ mm$$

$$A_t = 0{,}99c = 0{,}99 * 65{,}2 = 64{,}87\ mm2$$

Karbon tekstil iki katmanlı olarak yerleştirilir;

$$A_{seçilen} = 2 * 0{,}39 * 85 = 66{,}3\ mm2 > A_{gerekli} = 64{,}87\ mm2$$

Dengeli donatı oranı kontrolü yapılır;

$$\varepsilon_{fu} = \frac{\sigma_{fu}}{E_{fu}} = \frac{1779{,}9}{220 * 10^3} = 0{,}0074$$

$$\rho_{fb} = 0.85\ k_1\ \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}}\right) = 0{,}85 * 0{,}65 * \frac{40}{1776} \left(\frac{0{,}003}{0{,}003 + 0{,}0074}\right)$$

$$= 0{,}00359$$

$$\rho = \frac{\eta_\tau\ A_f}{\mathrm{b\ d}} = \left(\frac{0{,}70 * 66{,}3}{160 * 195}\right) = 0{,}00147$$

$$\rho_b = 0{,}00359 > \rho = 0{,}00147$$

Dengeli donatı oranı koşulu sağlanır. Kesitin daha da inceltilmesi durumunda, dengeli donatı oranı aşılır bu nedenle seçilen boyutlar ile devam edilir. Seçilen donatı miktarına göre moment taşıma kapasitesi hesaplanır;

$$c = 66{,}63\ mm$$

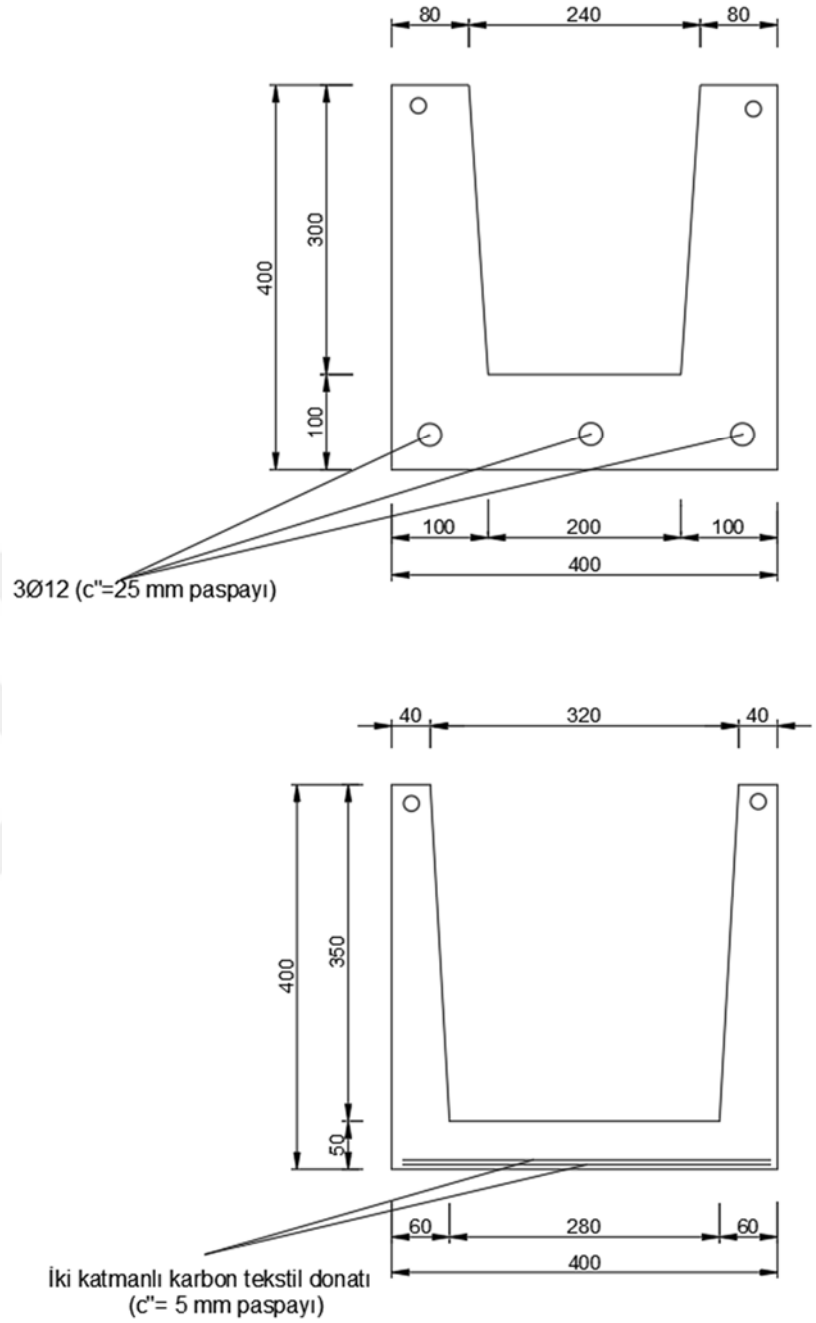
$$M_{seçilen} = \ 66{,}3 * \frac{3300}{1{,}3} * 0{,}70 * \left(395 - \frac{0{,}65 * 66{,}63}{2}\right) = 43{,}98 * 10^6 Nm$$

$$= 43{,}98\ kNm$$

$$M_{seçilen} = 43{,}98\ kNm > M_d = 43{,}04\ kNm$$

4.2.3.3 Oluk Kirişi Donatı Yerleşimi

Oluk kirişlerine ait donatı yerleşimi Şekil 4.12'de görülmektedir.

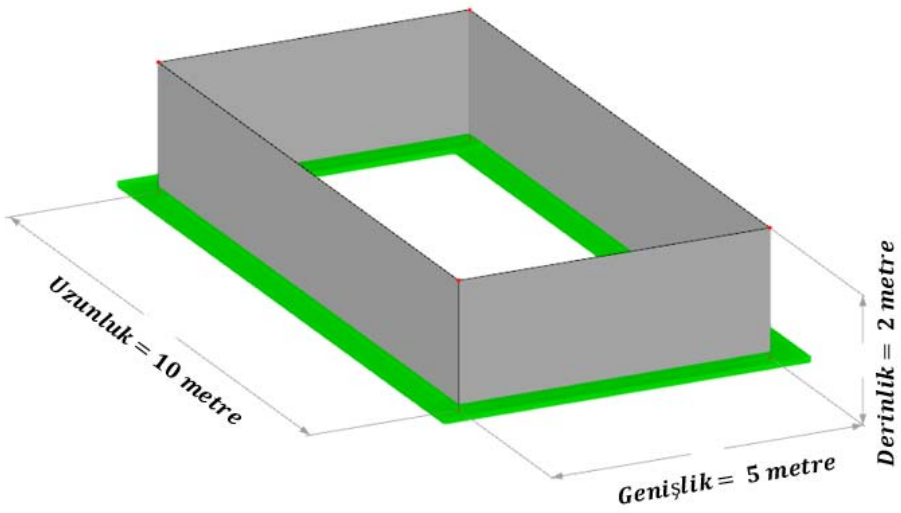


Şekil 4.12 Oluk kirişi donatı yerleşimi

4.2.4 Karbon/Çelik Takviyeli Havuz (Lineer Tasarım Yöntemi)

Karşılaştırma örneği için 2 metre derinliğe sahip yüzme havuzu ele alınmıştır. Havuz toprağa gömülü olup en olumsuz yükleme durumuna göre donatılandırılmıştır. Şekil 4.13'de havuza ait boyutlar verilmiştir. Havuz kesiti önce çelik takviyeli dizayn

edilmiştir. Ardından aynı kesit karbon donatı ile tasarlanmıştır. Son durumda ise karbon ile tasarlanan havuz kesitinin olabildiğince azaltılması hedeflenmiştir. Havuz ile ilgili bilgiler aşağıdaki gibidir. Şekil 4.13'de havuza ait boyutlandırma görülmektedir.



Şekil 4.13 Havuz boyutları

Suyun birim hacim ağırlığı $(\gamma_y) = 10\ kN/m3$

Zeminin birim hacim ağırlığı $(\gamma_w) = 18\ kN/m3$

Sürşarj yükü $(q_a) = 12\ kN/m2$

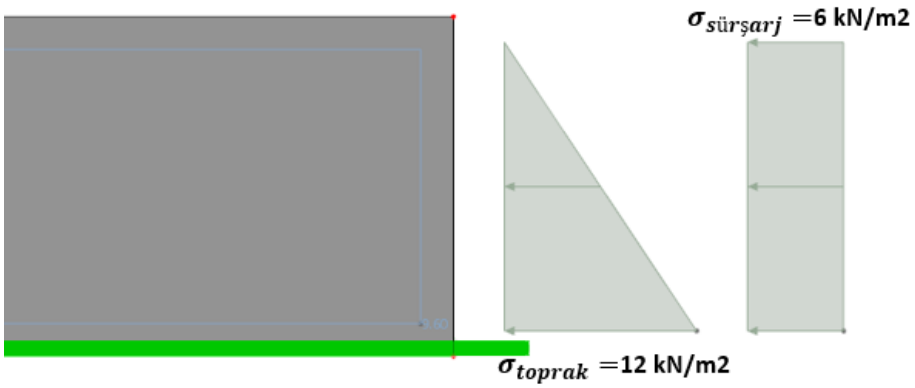
Aktif zemin için Rankine katsayısı $(K_a) = 0{,}333$

Sürşarj yükü için Rankine katsayısı $(K_0) = 0{,}5$

Zemin yatak katsayısı (K_s) = 24000 $kN/m3$

Havuz için iki yükleme durumu vardır. Birinci durum, havuzun boş olduğu ve toprak itkisinin ve sürşarj yükünün birlikte etkidiği durumdur. İkinci durumda ise, suyun ve toprak etkisinin birlikte olduğu durumu ifade eder. Bu durumda momentler birbirini dengelediği için olumsuz bir yükleme oluşturmamaktadır. Bu nedenle, havuzun boş olduğu durum tasarım yüklemesi olarak seçilir.

Havuzun tasarım momenti, Şekil 4.14'de verilen yayılı yükler yardımı ile hesaplanır;



Şekil 4.14 Havuz yan duvarlarına etkiyen kuvvetler

Sürşarj etkisi düzgün yayılı yük olarak temsil edilirken, yatak toprak itkisi yatay üçgen yayılı yük olarak ifade edilir.

Öncelikle yatay toprak itkisi hesaplanır;

$$\sigma_{toprak} = K_a * h * \gamma_w = 0{,}333 * 2 * 18 = 12\ kN/m2$$

$$P_{toprak} = \frac{\sigma_{toprak} * h * b}{2} = \frac{12 * 2 * 1}{2} = 12\ kN$$

Sürşarj yükü de benzer şekilde hesaplanır;

$$\sigma_{sürşarj} = K_a * h * \gamma_w = 0{,}5 * 12 = 6\ kN/m2$$

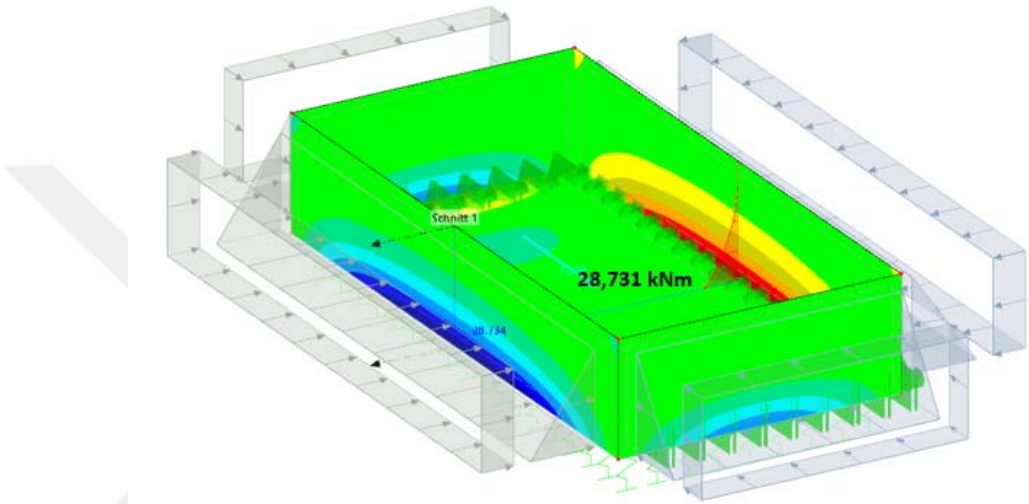
$$P_{sürşarj} = \sigma_{sürşarj} * h * b = 6 * 2 * 1 = 12\ kN$$

Dizayn momenti 1,6 yük katsayısı kullanılarak hesaplanır. Yukarıda elde edilen kuvvet değerleri moment koluyla çarpılır;

$$M_d = 1{,}6 * (P_{toprak} * h_{toprak} + P_{sürşarj} * h_{sürşarj)} = 1{,}6 * \left(12 * \frac{2}{3} + 12 * 1\right)$$
$$= 32\ kNm$$

Havuz için sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Havuz tabanına yay tanımı yapılmıştır. Zemin, havuzun dönmesine bir miktar izin verdiği için, dizayn momenti el ile hesaplanan dizayn momentinden küçük elde edilir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan model Şekil 4.15'de verilmiştir. Buna göre dizayn momenti aşağıdaki gibi elde edilir;

$$M_{d,sonlu_eleman} = 28{,}74\ kNm$$



Şekil 4.15 Havuza ait sonlu elemanlar modeli ve havuz orta kısmında oluşan eğilme momenti

İki moment değeri arasındaki farkın çok olmaması ve zemin parametresinin değişken olabilmesi sebebiyle daha genel bir sonuç elde etmek için, dizayn momenti olarak, zemin parametresinin hesaba katılmadığı durumdaki moment değeri alınır.

4.2.4.1 Çelik Takviye ile Havuz Hesabı

Toprak altına gömülü yapılarda paspayı minimum 50 mm alınmaktadır. Bu sebeple kesit kalınlığı 300 mm olarak çelik takviyeli beton için hesap yapılır.

$$A_s\, f_{yd} = 0{,}85\, f_{cd}\, k_1\, c\, b$$

$$A_s * \frac{420}{1{,}15} = 0{,}85 * \frac{30}{1{,}5} * 0{,}85 * c * 1000$$

$$A_s = 38{,}17c$$

$$M_n = 32 * 10^6\ Nm = \ 38{,}17c * \ 365 * \left(250\ - \frac{0{,}85c}{2}\right)$$

$$c = 9{,}0\ mm$$

$$A_s = 38{,}12c = 38{,}12 * 9{,}0 = 356{,}08\ mm2$$

$$A_{seçilen} = \emptyset 10/20 = 392{,}70\ mm2 > \ A_{gerekli} = 356{,}08\ mm2$$

Dengeli donatı oranı kontrolü yapılır;

$$\frac{c_b}{d} = \frac{600}{600 + f_{yd}}$$

$$c_b = 0{,}621 * 250 = 155{,}45\ mm$$

$$A_s\ f_{yd}\ = 0{,}85\ f_{cd}\ k_1\ c_b\ b$$

$$A_s * 365\ = 0{,}85 * \frac{30}{1{,}5} * 0{,}85 * \ 155{,}45 * 1000$$

$$A_s = 6154{,}11\ mm2$$

$$\rho_b = \frac{A_f}{\mathrm{b\ d}} = \frac{6154{,}11}{1000 * \ 250} = 0{,}0246$$

$$\rho = \frac{A_f}{\mathrm{b\ d}} = \frac{390{,}70}{1000 * 250} = 0{,}0015$$

$$\rho_b = 0{,}02461 > \ \rho = 0{,}00156$$

Dengeli donatı oranı koşulu sağlanır. Seçilen donatı alanına göre moment kapasitesi hesaplanır;

$$c = 9{,}93\ mm$$

$$M_{seçilen} = \ 392{,}7 * \ 365 * \left(250 - \frac{0{,}85 * 9{,}93}{2}\right) = 35{,}30 * 10^6 Nm = 35{,}30\ kNm$$

$$M_{seçilen} = 35{,}30\ kNm > \ M_d = 32{,}0\ kNm$$

4.2.4.2 Karbon Takviye ile Havuz Hesabı (Aynı Kesit)

Karbon takviyenin çekme dayanımları demetlerin çekme dayanımına göre verilmiştir. Burada karbon tekstil donatı için güvenlik faktörü 1,3 alınmıştır. Ayrıca maksimum yük taşıma kapasitesinin hesaplanması için, %70'lik bir kesit alanının aktif şekilde çalışacağı varsayımı yapılmıştır.

Havuz kalınlığı 280mm olarak alınır. Karbonun tekstilin korozyona karşı dayanıklılığı sayesinde, beton örtüsü olarak sadece 10 mm beton örtüsü kullanılacaktır.

$$A_t\ f_t\ = 0{,}85\ f_{cd}\ k_1\ c\ b$$

$$A_t * \frac{3300}{1{,}3} * 0{,}70 = \ 0{,}85 * \frac{60}{1{,}5} * 0{,}65 * \ c * 1000$$

$$A_t = 13{,}47c$$

Tarafsız eksen derinliği ve gerekli donatı alanı hesaplanır;

$$M_n = 32\ * 10^6 Nm = \ 13{,}47c * \frac{3300}{1{,}3} * 0{,}70 * \left(290 - \frac{0{,}65c}{2}\right)$$

$$c = 4{,}7\ mm$$

$$A_t = 13{,}47c = 13{,}47 * 4{,}7 = 63{,}32\ mm2$$

Karbon tekstil tek katmanlı olarak yerleştirilir;

$$A_{seçilen} = 1 * 85 = 85\ mm2 > \ A_{gerekli} = 63{,}32\ mm2$$

Dengeli donatı oranı kontrolü yapılır;

$$\varepsilon_{fu} = \frac{\sigma_{fu}}{E_{fu}} = \frac{1779{,}9}{240 * 10^3} = 0{,}0074$$

$$\rho_{fb} = 0.85\, k_1\, \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) = 0{,}85 * 0{,}65 * \frac{40}{1776} \left(\frac{0{,}003}{0{,}003 + 0{,}0074} \right)$$

$$= 0{,}00359$$

$$\rho = \frac{\eta_\tau\, A_f}{\mathrm{b\ d}} = \left(\frac{0{,}70 * 85}{1000 * 280} \right) = 0{,}0002$$

$$\rho_b = 0{,}00359 > \ \rho = 0{,}0002$$

Dengeli donatı oranı koşulu sağlanır. Seçilen donatı miktarına göre moment taşıma kapasitesi hesaplanır;

$$c = 6{,}30\ mm$$

$$M_{seçilen} = \ 85 * \frac{3300}{1{,}3} * 0{,}70 * \left(290 - \frac{0{,}65 * 6{,}30}{2} \right) = 43{,}57 * 10^6 Nm$$

$$= 43{,}57\ kNm$$

$$M_{seçilen} = 43{,}57\ kNm > \ M_d = 32{,}0\ kNm$$

4.2.4.3 Karbon Takviye ile Havuz Hesabı (Azaltılmış Kesit)

Havuz kalınlığı, ilk yaklaşım için 80mm olarak alınır.

$$A_t\, f_t\ = 0{,}85\, f_{cd}\, k_1\, c\, b$$

$$A_t * \frac{3300}{1{,}3} * 0{,}70 = \ 0{,}85 * \frac{60}{1{,}5} * 0{,}65 * \ c * 1000$$

$$A_t = 13{,}47c$$

Tarafsız eksen derinliği ve gerekli donatı alanı hesaplanır;

$$M_n = 32 * 10^6 Nm = 13{,}47c * \frac{3300}{1{,}3} * 0{,}70 * \left(70 - \frac{0{,}65c}{2}\right)$$

$$c = 21{,}2\ mm$$

$$A_t = 13{,}47c = 13{,}47 * 21{,}2 = 285{,}64\ mm2$$

Karbon tekstil dört katmanlı olarak yerleştirilir;

$$A_{seçilen} = 4 * 85 = 340\ mm2 > A_{gerekli} = 285{,}64\ mm2$$

Dengeli donatı oranı kontrolü yapılır;

$$\varepsilon_{fu} = \frac{\sigma_{fu}}{E_{fu}} = \frac{1776{,}9}{240 * 10^3} = 0{,}0074$$

$$\rho_{fb} = 0.85\ k_1\ \frac{f_{cd}}{f_{fd}}\left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}}\right) = 0{,}85 * 0{,}65 * \frac{40}{1776}\left(\frac{0{,}003}{0{,}003 + 0{,}0074}\right)$$

$$= 0{,}00359$$

$$\rho = \frac{\eta_\tau\ A_f}{\mathrm{b\ d}} = \left(\frac{0{,}70 * 340}{1000 * 70}\right) = 0{,}00340$$

$$\rho_b = 0{,}00359 > \rho = 0{,}00340$$

Dengeli donatı oranı koşulu sağlanır. Kesitin daha da inceltilmesi durumunda, dengeli donatı oranı aşılır bu nedenle seçilen kalınlık ile devam edilir. Seçilen donatı miktarına göre moment taşıma kapasitesi hesaplanır;

$$c = 25{,}23\ mm$$

$$M_{seçilen} = 340 * \frac{3300}{1{,}3} * 0{,}70 * \left(70 - \frac{0{,}65 * 25{,}23}{2}\right) = 38{,}12 * 10^6 Nm$$

$$= 38{,}12\ kNm$$

$$M_{seçilen} = 38{,}12\ kNm > M_d = 32{,}0\ kNm$$

BÖLÜM BEŞ
SONUÇLAR VE YORUMLAR

5.1 Cephe Paneli

Cephe panelleri, tekstil takviyelerin en önemli kullanım alanlarından biridir. Tekstil donatılar sayesinde cephe panellerinin kalınlıkları önemli ölçüde azaltılabilir.

5.1.1 Tasarım Parametreleri

Prefabrik cephe paneli, AR-cam donatı, AR-cam sıva filesi ve çelik donatı kullanılarak tasarlanmıştır. Tablo 5.1'de panellere ait tasarım bilgileri yer almaktadır. Panellere ait isimlendirme TTB-Donatı, TTB-File ve SRC olarak yapılmıştır.

Tablo 5.1 Cephe paneline ait tasarım parametreleri

Tasarım Parametreleri	TTB-Donatı (AR-cam donatı)	TTB-File (AR-cam sıva filesi)	SRC (Çelik)
Panel Boyu (m)	3	3	3
Panel Genişliği (m)	1	1	1
Panel Kalınlığı (mm)	25	40	80
Tasarım Momenti (kNm)	0,829	0,829	0,829
Güvenlik Katsayısı	1,05	1,01	1,01
Güvenlik Durumu	Güvenli	Güvenli	Güvenli

5.1.2 Ağırlık Karşılaştırması

Ağırlık hesaplamalarında, ince taneli betonun birim hacim ağırlığı 21 kN/m3, normal betonun birim hacim ağırlığı 24 kN/m3, çeliğin birim hacim ağırlığı 78,5 kN/m3 ve AR-cam tekstil donatının birim hacim ağırlığı ise 27 kN/m3 olarak dikkate

alınmıştır. SRC panelin verileri referans olarak seçilip, diğer panellere ait veriler SRC panele ait verilere oranlanarak Tablo 5.2'de verilmiştir.

AR-cam donatı ile tasarlanan panelin (TTB-Donatı) kalınlığı tekstil takviyesinin yüksek çekme dayanımı ve alkali ortamdaki yüksek direnci sayesinde donatı üzerindeki beton örtüsünün inceltilmesi ile birlikte büyük ölçüde azaltılmıştır. TTB-Donatı panelin beton ağırlığı, SRC panelin beton ağırlığının %27'sine eşittir. AR-cam donatının birim hacim ağırlığının çeliğe göre az olması ve yüksek dayanımı sayesinde miktar olarak daha az kullanılması sebebiyle TTB-Donatı panelde kullanın donatı ağırlığı da, SRC panele göre %64 azalmıştır. Donatı ağırlığının toplam ağırlık üzerindeki etkisi ihmal edilebilecek değerlerde olduğundan dolayı, TTB-Donatı panelin toplam ağırlığındaki azalma, beton ağırlığındaki azalmaya eşit olarak kabul edilebilir ve bu değer yaklaşık olarak %27 olarak hesaplanmıştır.

AR-cam sıva filesi ile tasarlanan cephe panelinde (TTB-File) kesit kalınlığı SRC panelin yarısıdır. Bu sayede TTB-Sıva panelin beton ağırlığı, SRC panelin beton ağırlığının %44'üne düşürülebilmiştir. AR-cam sıva filesinin çekme dayanımı göreceli olarak AR-cam donatıdan daha düşük olduğundan dolayı birden fazla katman olarak kullanılmış ve neticede TTB-Donatı panelde olduğu kadar kesit azaltılamamıştır. TTB-File panelin donatı ağırlığı SRC panelin %49'una eşittir. TTB-Donatı panelin toplam ağırlığı SRC panelin %44'üne eşittir.

Tablo 5.2 Cephe paneli için, çelik takviyeli betonarme eleman referans alınarak normalize edilmiş ağırlık karşılaştırması

Nominal Ağırlık	TTB-Donatı (AR-cam donatı)	TTB-File (AR-cam sıva filesi)	SRC (Çelik)
Beton Ağırlığı	0,27	0,44	1,00
Donatı Ağırlığı	0,36	0,49	1,00
Toplam Ağırlık	0,27	0,44	1,00

5.1.3 Maliyet Karşılaştırması

Tekstil donatıların yaygın olmaması ve herhangi bir standarta sahip olmaması sebebiyle fiyatları da geniş bir yelpazede değişmektedir. Ancak bu çalışmada kullanılan tekstil donatılar, önceki çalışmalarda kendini kanıtlamış malzeme özellikleri güvenilir olan tekstil donatılardır. Bununla ilgili fiyat bilgisi de ilgili firmalardan alınmıştır.

Tekstil takviyeli elemanların imalatında ince taneli beton kullanılmaktadır. Tekstil takviyeler ile beton etkileşiminin iyileştirilmesi için agrega tanelerinin boyutlarının kısıtlanmasıyla yapılan bir karışımdır. Çelik ile tasarlanan elemanların tasarımında bu ince taneli betona ihtiyaç yoktur. Bu betonun ekstra bir maliyeti olmayacağından, farklı türdeki betonlar kullanılsa da, beton fiyatı tüm elemanlar için aynı alınmıştır.

Maliyet hesaplanırken, AR-cam donatı (360 gr/m2) için fiyat 7,15 Euro/m2 olarak, AR-cam sıva filesi (160 gr/m2) için 0,60 Euro/m2 olarak alınmıştır. Bu değerler 2023 Aralık ayına ait güncel kurdan Türk Lirası'na çevrilmiştir. Normal betonun m3 fiyatı 2500 TL ve hasır donatı m2 fiyatı 40 TL olarak alınmıştır. İnce taneli betonun fiyatı ise normal betonun 1,1 katı olarak dikkate alınmıştır. SRC panelin verileri referans olarak seçilip, diğer panellere ait veriler SRC panele ait verilere oranlanarak Tablo 5.3'de verilmiştir.

TTB-Donatı panelin beton maliyeti SRC panele göre %66 azalsa da, donatı maliyeti SRC panelin 5,36 katına eşittir. TTB-Donatı panelin toplam eleman maliyeti SRC panelin 1,78 katına çıkmaktadır. Üretici firmaların yurtdışı tabanlı olması ve çok kullanılan yaygın bir malzeme olmaması sebebiyle donatı maliyeti çeliğin maliyetinin üzerine çıkmaktadır.

AR-cam sıva filesi ile tasarlanan cephe panelinde (TTB-File) beton maliyeti %45 azalmıştır. TTB-File panelin donatı maliyeti, SRC panele göre 1,5 katına çıkmış olsa da, toplam eleman maliyeti SRC panelin %18 aşağısında kalmaktadır. Burada kullanılan sıva filesinin üretimi yerli bir firmada yapılıyor olup, fiyat ve özellik açısından tasarıma büyük avantaj getirmiştir. Kullanılan AR-cam tekstil donatının alkali dayanımı sayesinde kesit kalınlığı azaltılmış ve bu sayede donatı maliyeti artsa bile, panel maliyetinin tamamı düşünüldüğünde, betondan tasarruf edilerek toplam

maliyet azaltılabilmiştir. Bu da cam elyaftan elde edilen sıva filelerinin, cephe panellerinin tasarımında çelik için bir alternatif olabileceği değerlendirilmiştir.

Tablo 5.3 Cephe paneli için, çelik takviyeli betonarme eleman referans alınarak normalize edilmiş maliyet karşılaştırması

Nominal Maliyet	TTB-Donatı (AR-cam donatı)	TTB-File (AR-cam sıva filesi)	SRC (Çelik)
Beton Maliyeti	0,34	0,55	1,00
Donatı Maliyeti	5,36	1,50	1,00
Toplam Maliyet	1,78	0,82	1,00

5.2 Döşeme

5.2.1 Tasarım Parametreleri

Döşeme tasarımı yapılırken karbon tekstil donatılar kullanılmıştır. Döşeme öncelikle çelik ile tasarlanmıştır. Karbon tekstil takviyelerin yüksek fiyatı sebebiyle öncelikle kesitin aynı kalması durumu ardından kesitin olabildiği en ince durumu incelenmiştir. Tablo 5.4'de döşeme elemanına ait tasarım parametreleri yer almaktadır. Döşemelere ait isimlendirme TTB-Az, TTB-Aynı ve SRC olarak yapılmıştır.

Tablo 5.4 Döşemeye ait tasarım parametreleri

Tasarım Parametreleri	TTB-Az (Karbon-Azaltılmış Kesit)	TTB-Aynı (Karbon-Aynı Kesit)	SRC (Çelik)
Döşeme Açıklığı (m)	3,5	3,5	3,5
Döşeme Kalınlığı (mm)	60	120	120
Döşeme Genişliği (m)	1,0	1,0	1,0
Tasarım Momenti (kNm)	15,62	15,62	15,62
Güvenlik Katsayısı	1,27	1,04	1,03
Güvenlik Durumu	Güvenli	Güvenli	Güvenli

5.2.2 Ağırlık Karşılaştırması

Ağırlık hesaplamaları yapılırken, ince taneli betonun birim hacim ağırlığı 21 kN/m3, normal betonun birim hacim ağırlığı 24 kN/m3, çeliğin birim hacim ağırlığı 78,5 kN/m3 ve karbon tekstil donatının birim hacim ağırlığı ise 17,5 kN/m3 olarak dikkate alınmıştır. Çelik ile tasarlanan döşeme (SRC) referans değer olarak seçilip, diğer döşemelere ait veriler SRC'ye ait verilere oranlanarak Tablo 5.5'de verilmiştir.

Kesitin karbon tekstil donatı kullanılarak olabildiğince inceltildiği döşeme elemanı olan TTB-Az'da, kesit kalınlığı yarıya düşürülebilmiş ve sonucunda beton ağırlığı da SRC döşemeye göre %56 azalmıştır. Ayrıca karbonun birim hacim ağırlığının çeliğe oranla çok düşük olması ve yüksek çekme dayanımı sayesinde donatı ağırlığı, SRC döşemenin %27'si kadar olmaktadır. Donatı ağırlığının toplam ağırlık üzerindeki düşük olması sebebiyle toplam ağırlık beton ağırlığındaki azalmaya eşit olacak şekilde yaklaşık %56 azalmıştır.

Karbon fiyatının yüksek olması sebebiyle, kesit kalınlığı çelik ile tasarlanmış eleman ile aynı olacak şekilde de değerlendirilmiştir. Kesit kalınlığı aynı olsa da beton

ağırlığı ince taneli betonun birim hacim ağırlığındaki farklılık sebebiyle, SRC döşemeye göre %12 azalmıştır. TTB-Aynı döşemeye ait donatı ağırlığı, SRC döşemenin sadece %9'una eşittir. Toplam ağırlık ise SRC döşemeye göre %14 azalmıştır.

Tablo 5.5 Döşeme için, çelik takviyeli betonarme eleman referans alınarak normalize edilmiş ağırlık karşılaştırması

Nominal Ağırlık	TTB-Az (Karbon-Azaltılmış Kesit)	TTB-Aynı (Karbon-Aynı Kesit)	SRC (Çelik)
Beton Ağırlığı	0,44	0,88	1,00
Donatı Ağırlığı	0,27	0,09	1,00
Toplam Ağırlık	0,44	0,86	1,00

5.2.3 Maliyet Karşılaştırması

Maliyet karşılaştırması yapılırken, karbon donatı (360gr/m2) için birim fiyat 19,61 Euro/m2 olarak dikkate alınmıştır. Bu değerler 2023 Aralık ayına ait güncel kurdan Türk Lirası'na çevrilmiştir. Beton m3 fiyatı 2500 TL ve çelik ton fiyatı 20500 TL olarak dikkate alınmıştır. İnce taneli betonun fiyatı ise normal betonun 1,1 katı olarak alınmıştır. SRC panelin verileri referans olarak seçilip, diğer panellere ait veriler SRC panele ait verilere oranlanarak Tablo 5.3'de verilmiştir.

Kesitin yarıya düşürüldüğü durumda, TTB-Az döşemenin beton maliyeti %45 düşmüştür ancak karbon takviyelerin yüksek birim fiyatları sebebiyle donatı maliyeti, SRC döşemenin donatı maliyetinin 22,76 katına çıkmıştır. Toplam maliyet üzerinde bu donatı miktarı bir miktar da olsa beton maliyeti ile dengelenmiştir ancak yine de TTB-Az döşemenin birim eleman maliyeti, SRC döşemenin 5,11 katına çıkmıştır.

Kesitin aynı kaldığı durumda ise beton maliyeti %10 artmıştır ve donatı maliyeti 7,59 katına çıkmıştır. Kesitin azaltılmaması sayesinde, tek katmanlı karbon takviye yeterli olmuş ve TTB-Az döşemeye göre %66 daha az karbon takviye kullanılmıştır.

Ancak toplam maliyete bakıldığında yine de birim eleman maliyeti SRC baz alındığında 2,43 katına çıkmıştır.

Göreceli olarak yüksek eğilme momentlerinin olduğu döşeme elemanında, karbon takviye ile elde edilen sonuçlar, ekonomik olarak çelik donatının alternatifi olarak değerlendirilememiştir. Bu sebeple karbon takviyelerin döşeme elemanlarında çelik donatılara alternatif olması, güncel şartlar düşünüldüğünde, özel projeler dışında pek mümkün görünmemektedir.

Tablo 5.6 Döşeme için, çelik takviyeli betonarme eleman referans alınarak normalize edilmiş maliyet karşılaştırması

Nominal Maliyet	TTB-Az (Karbon-Azaltılmış Kesit)	TTB-Aynı (Karbon-Aynı Kesit)	SRC (Çelik)
Beton Maliyeti	0,55	1,10	1,00
Donatı Maliyeti	22,76	7,59	1,00
Toplam Maliyet	5,11	2,43	1,00

5.3 Oluk Kirişi

Oluk kirişleri prefabrik yapıların çatılarında kullanılmaktadır. Tekstil takviyelerin oluk kirişinde kullanımı irdelenmiştir.

5.3.1 Tasarım Parametreleri

Oluk kirişi tasarımı yapılırken karbon tekstil donatılar kullanılmıştır. Oluk kirişi öncelikle çelik donatı ile tasarlanmıştır. Oluk kirişi tasarımı önce çelik takviye kullanılarak yapılmış ardından kesit alanı azaltılarak karbon takviye ile hesaplanmıştır. Diğer elemanlardan farklı olarak oluk kirişinde faydalı yüksekliği azaltmadan kiriş cidarları inceltilerek kesit alanı azaltılmıştır. Tablo 5.7'de oluk kirişine ait tasarım parametreleri yer almaktadır. Oluk kirişine ait isimlendirme TTB ve SRC olarak yapılmıştır.

Tablo 5.7 Oluk kirişine ait tasarım parametreleri

Tasarım Parametreleri	TTB-Az (Karbon-Azaltılmış Kesit)	SRC (Çelik)
Kiriş Açıklığı (m)	8	8
Oluk Genişliği (mm)	400	400
Oluk Yüksekliği (m)	400	400
Yan Cidar Kalınlığı (mm)	50	90
Alt Cidar Kalınlığı (mm)	50	100
Tasarım Momenti (kNm)	43,04	43,04
Güvenlik Katsayısı	1,02	1,02
Güvenlik Durumu	Güvenli	Güvenli

5.3.2 Ağırlık Karşılaştırması

Ağırlık hesaplanırken, ince taneli betonun birim hacim ağırlığı 21 kN/m3, normal betonun birim hacim ağırlığı 24 kN/m3, çeliğin birim hacim ağırlığı 78,5 kN/m3 ve karbon tekstil donatının birim hacim ağırlığı ise 17,5 kN/m3 olarak alınmıştır. Çelik ile tasarlanan oluk kirişi (SRC) referans değer olarak seçilip, diğer kirişe ait veriler SRC'ye ait verilere oranlanarak Tablo 5.8'de verilmiştir.

TTB oluk kirişinin cidarlarının inceltilmesiyle birlikte beton ağırlığı karbon donatı sayesinde SRC'ye göre %49 oranında azaltılabilmiştir. TTB oluk kirişinin donatı ağırlığı, SRC oluk kirişinin %10'una eşittir ve toplam eleman ağırlığı da %51'ine eşittir olmaktadır.

Tablo 5.8 Oluk kirişi için, çelik takviyeli betonarme eleman referans alınarak normalize edilmiş ağırlık karşılaştırması

Nominal Ağırlık	TTB-Az (Karbon-Azaltılmış Kesit)	SRC (Çelik)
Beton Ağırlığı	0,51	1,00
Donatı Ağırlığı	0,10	1,00
Toplam Ağırlık	0,51	1,00

5.3.3 Maliyet Karşılaştırması

Maliyet karşılaştırması yapılırken, karbon donatı (360gr/m2) için birim fiyat 19,61 Euro/m2 olarak dikkate alınmıştır. Bu değerler 2023 Aralık ayına ait güncel kurdan Türk Lirası'na çevrilmiştir. Beton m3 fiyatı 2500 TL ve çelik ton fiyatı 20500 TL olarak dikkate alınmıştır. İnce taneli betonun fiyatı ise normal betonun 1,1 katı olarak alınmıştır. SRC oluk kirişi verileri referans olarak seçilip, TTB oluk kirişine ait veriler SRC kiriş verilerine oranlanarak Tablo 5.9'de verilmiştir.

Kesitin yüksekliğinin ve eninin değişmediği ancak cidar kalınlıklarının önemli ölçüde azaltıldığı durumda, beton maliyeti %36 azalmıştır ancak donatı maliyeti 8,56 katına çıkmıştır. Burada karbon takviyelerin yüksek birim fiyatları belirleyici olmaktadır. Yüksek dayanımları sayesinde daha az donatı kesit alanı kullanılsa da, maliyet açısından bir avantaj oluşturmamaktadır. Toplam maliyet karşılaştırıldığında ise birim eleman maliyetinin 2,11 katına çıktığı görülmektedir.

Tablo 5.9 Oluk kirişi için, çelik takviyeli betonarme eleman referans alınarak normalize edilmiş maliyet karşılaştırması

Nominal Maliyet	TTB-Az (Karbon-Azaltılmış Kesit)	SRC (Çelik)
Beton Maliyeti	0,64	1,00
Donatı Maliyeti	8,56	1,00
Toplam Maliyet	2,11	1,00

5.4 Havuz

Toprağa gömülü havuzlarda paspayı minimum 50 mm olarak alınmaktadır. Bu sebeple paspayını minimuma indirilerek, tasarımı ağırlık ve maliyet açısından irdelemek havuz örneğinin başlıca hedefidir. Öncelikle havuz çelik donatılar ile tasarlanmış, ardından aynı kesit karbon takviye ile hesaplanmıştır. Son olarak da havuz tasarımında karbon tekstiller ile kesit olabildiğince inceltilerek tasarım yapılmıştır.

5.4.1 Tasarım Parametreleri

Havuza ait tasarım parametreleri Tablo 5.10'da görülmektedir. Havuzlara ait isimlendirme TTB-Az, TTB-Aynı ve SRC olarak yapılmıştır.

Tablo 5.10 Havuza ait tasarım parametreleri

Tasarım Parametreleri	TTB-Az (Karbon-Azaltılmış Kesit)	TTB-Aynı (Karbon-Aynı Kesit)	SRC (Çelik)
Havuz Derinliği (m)	2	2	2
Havuz Kesit Kalınlığı (mm)	80	300	300
Tasarım Momenti (kNm)	32	32	32
Güvenlik Katsayısı	1,19	1,36	1,10
Güvenlik Durumu	Güvenli	Güvenli	Güvenli

5.4.2 Ağırlık Karşılaştırması

Ağırlık hesaplanırken, ince taneli betonun birim hacim ağırlığı 21 kN/m3, normal betonun birim hacim ağırlığı 24 kN/m3, çeliğin birim hacim ağırlığı 78,5 kN/m3 ve karbon tekstil donatının birim hacim ağırlığı ise 17,5 kN/m3 olarak alınmıştır. Çelik ile tasarlanan havuz (SRC) referans değer olarak seçilip, TTB havuza ait veriler SRC'ye ait verilere oranlanarak Tablo 5.11'de verilmiştir.

SRC havuz cidarı 300mm iken, TTB-Az havuz cidarı sadece 80mm olarak tasarlanmıştır. Bu sayede TTB-Az havuzun beton ağırlığı ince taneli betonun da düşük birim hacim ağırlığı sayesinde, SRC havuzun %23'ü kadardır. Donatı ağırlığı ise SRC havuzun %34'üne eşittir. Toplam ağırlık da beton ağırlığındaki ağırlığa yaklaşık olarak eşittir.

Kesitin aynı tutulup karbon ile tasarlandığı havuzda (TTB-Aynı), beton ağırlığı SRC'ye göre %12 azalmıştır. Kesitin aynı kalması sayesinde donatı ağırlığı %89 azalsa da, toplam ağırlık SRC havuzun ağırlığının %87'sine eşittir.

Tablo 5.11 Havuz için, çelik takviyeli betonarme eleman referans alınarak normalize edilmiş ağırlık karşılaştırması

Nominal Ağırlık	TTB-Az (Karbon-Azaltılmış Kesit)	TTB-Aynı (Karbon-Aynı Kesit)	SRC (Çelik)
Beton Ağırlığı	0,23	0,88	1,00
Donatı Ağırlığı	0,34	0,11	1,00
Toplam Ağırlık	0,23	0,87	1,00

5.4.3 Maliyet karşılaştırması

Maliyet karşılaştırması yapılırken, karbon donatı (360gr/m2) için birim fiyat 19,61 Euro/m2 olarak dikkate alınmıştır. Bu değerler 2023 Aralık ayına ait güncel kurdan Türk Lirası'na çevrilmiştir. Beton m3 fiyatı 2500 TL ve çelik ton fiyatı 20500 TL olarak dikkate alınmıştır. İnce taneli betonun fiyatı ise normal betonun 1,1 katı olarak alınmıştır. SRC havuz verileri referans olarak seçilip, TTB havuza ait veriler SRC havuz verilerine oranlanarak Tablo 5.12'de verilmiştir.

Kesitin azaltıldığı durumda (TTB-Az), beton maliyeti SRC havuza göre %71 azalmıştır ancak donatı maliyeti 37,98 katına çıkmıştır. Burada karbon takviyelerin yüksek birim fiyatları belirleyici olmaktadır. Ancak beton hacmindeki önemli azaltma sayesinde, toplam maliyet karşılaştırıldığında ise maliyetin 3,17 katına çıktığı görülmektedir.

Havuz kesitinin değişmediği durumda toplam beton maliyeti 1,1 katına ve toplam donatı maliyeti 9,5 katına çıkmaktadır. TTB-Aynı havuz için toplam eleman maliyeti, SRC havuzun 1,74 katıdır.

Tablo 5.12 Havuz için, çelik takviyeli betonarme eleman referans alınarak normalize edilmiş maliyet karşılaştırması

Nominal Maliyet	TTB-Az (Karbon-Azaltılmış Kesit)	TTB-Aynı (Karbon-Aynı Kesit)	SRC (Çelik)
Beton Maliyeti	0,29	1,10	1,00
Donatı Maliyeti	37,98	9,50	1,00
Toplam Maliyet	3,17	1,74	1,00

BÖLÜM ALTI
SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Tez Çalışmasından Elde Edilen Genel Sonuçlar

Bu çalışmanın temel bulguları şu şekilde özetlenebilir:

- Tekstil takviyelerin matris ile olan bağ davranışı çelikten farklı olduğundan, çelik takviyeli beton elemanlar için kullanılan tasarım metodolojisi aktif filamentların etkili alanı, bağ verimlilik faktörüne dayalı olarak belirlenir.
- Bir tekstil kumaşın ya da tekstil demetinin deneysel çekme dayanımı, tek bir filamentin çekme dayanımından önemli ölçüde daha düşüktür. Çünkü demeti oluşturan filamentlerin hepsi aynı seviyede gerilmez. Bu nedenle tüm filamentler aynı anda etkin hale gelemez. Bu yüzden tek bir filamentin çekme dayanımı kompozit malzemede tekstil dayanımını temsil etmek için kullanılmamalıdır.
- Tekstil takviyelerin kullanılması ile toplam betonarme eleman ağırlığı cephe paneli için %73, döşeme için %56, oluk kirişi için %49 ve havuz için %77 azaltılabilmektedir.
- Tekstil takviyelerin kullanımı ile betonarme elemanların ölü ağırlıkları önemli ölçüde azalmaktadır. Bu sayede yapıya gelen deprem kuvveti de önemli ölçüde azalır. Deprem kuvvetinin azalmasıyla birlikte, yapıdaki diğer elemanların kesit alanları da azalabilir. Bu da tekstil malzemelerinin kullanılmasının bir sonucu olarak, dolaylı olarak ekonomik faydalar sağlayabilir.
- Tekstil takviyeler korozyona karşı dayanıklılığı ve yüksek mekanik özellikleri sayesinde, mevcut yapı elemanlarının güçlendirme projelerinde ya da yoğun alkali ortamlarda tasarlanacak olan yapı elemanlarının projelerinde önemli sonuçlar verebilir.
- Yapılan maliyet karşılaştırmasına göre, tekstil ile takviye edilmiş elemanın toplam maliyeti çelik ile takviye edilmiş elemanın cephe paneli için 0,82 ile 1,78, döşeme için 2,43 ile 5,11, oluk kirişi için 2,11 ve havuz için 1,74-3,17 katı olarak belirlenmiştir. Kesitin en ince olarak tasarlandığı durumda maliyetler en yüksek değeri almaktadır.

- Yapılan tasarımlardan elde edilen sonuçlara göre karbon donatının toplam maliyeti çelik donatı maliyetinin 7,5-9,5 katı kadar olurken, AR-cam donatı için bu değer yaklaşık 5,4 olmaktadır. AR-cam elyaftan üretilmiş sıva filesin maliyeti ise çelik donatının 1,5 katıdır.
- Prefabrik cephe panellerinin tasarımında AR-cam elyaftan yapılmış sıva filesinin kullanılması ile tekstil ile takviye edilmiş cephe panelleri çelik donatı ile tasarlanmış panellere göre yaklaşık %18 daha ucuza üretilebilmektedir. Bu maliyet avantajı ile birlikte AR-cam sıva filesi cephe panellerinde çelik donatılar için bir alternatif olarak kullanılabilir. Bu sayede kendi kendini taşıyabilen cephe panelleri tasarlanabilir. Panellerin yükünün kolonlara aktarıldığı tasarımlarda ise, kolonlara gelen panel yükleri azaltılabilir.

6.2 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

- Tekstil geometrisi demet içerisinde daha fazla filamenti etkinleştirmek için kullanılmalıdır. Daha fazla filamentin aktifleşebildiği optimal tekstil geometrisini ve düzenini belirlemek için araştırma yapılması gerekmektedir.
- Beton ile tekstil arasındaki ara yüzey yapısının tam olarak anlaşılması gerekmektedir. Bu ara yüzey yapısının daha iyi anlaşılması ile birlikte gerçeğe daha yakın teorik hesaplamalar yapılabilir. Bu sayede TTB elemanlar ile güvenli tasarımlar yapılabilir.
- Tekstil takviyelerin ağırlığının azaltılmasıyla birlikte diğer elemanlarda oluşabilecek olası ekonomik sonuçlar da irdelenmelidir. Bu sayede tekstil takviyelerin kullanımının ekonomik sonuçları hakkında daha genel bilgilere erişilebilir.
- TTB kirişlerin uzun vadeli davranışının belirlenmesi göçme mekanizmalarını ve filamentler üzerindeki etkileri tespit etmek için gereklidir.
- Tasarım azaltma faktörleri daha fazla optimize edilebilir. Bu sayede tekstil takviyelerin potansiyeli tam olarak kullanılabilir.
- Tekstil takviyeli betonun kesme davranışı da araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

Adam, V., Bielak, J., Dommes, C., Will, N., & Hegger, J. (2020). Flexural and shear tests on reinforced concrete bridge deck slab segments with a textile-reinforced concrete strengthening layer. Materials, 13(18), 4210.

Al-Jamous, A., Ortlepp, R., Ortlepp, S., & Curbach, M. (2006). Experimental investigations about construction members strengthened with textile reinforcement. In 1st International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTTB), Aachen. Institute of Structural Concrete, RWTH Aachen University (pp. 161-170).

Alrshoudi, F. A. S. (2015). Textile Reinforced Concrete: Design Methodology and Novel Reinforcement (Doctoral dissertation, University of Leeds).

Banholzer, B. (2006). Bond of a strand in a cementitious matrix. Materials and structures, 39, 1015-1028.

Bank, L. C. (2006). Composites for construction: structural design with FRP materials. John Wiley & Sons.

Bentur, A., & Mindess, S. (2006). Fibre reinforced cementitious composites. Crc Press.

Bentur, A., & Mindess, S. (2006). Fibre reinforced cementitious composites. Crc Press.

Brameshuber, W. (Ed.). (2006). Report 36: textile reinforced concrete-state-of-the-art report of RILEM TC 201-TTB (Vol. 36). RILEM publications.

Brückner, A., Ortlepp, R., & Curbach, M. (2006). Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear. Materials and structures, 39, 741-748.

Butler, M., Lieboldt, M., & Mechtcherine, V. (2009). Application of textile-reinforced concrete (TTB) for structural strengthening and in prefabrication. Advances in cement-based materials, 127-136.

Colombo, I. G., Magri, A., Zani, G., Colombo, M., & Di Prisco, M. (2013). Erratum to: Textile Reinforced Concrete: experimental investigation on design parameters. Materials and structures, 46, 1953-1971.

de Andrade Silva, F., Butler, M., Mechtcherine, V., Zhu, D., & Mobasher, B. (2011). Strain rate effect on the tensile behaviour of textile-reinforced concrete under static and dynamic loading. Materials Science and Engineering: A, 528(3), 1727-1734.

Dlubal RFEM (6.03) available at: https://www.dlubal.com/en/products/rfem-fea-software/what-is-rfem (2023).

Dolatabadi, M. K., Janetzko, S., Gries, T., Kang, B. G., & Sander, A. (2010). An Analytical Investigation of Cement Penetration within Bundle of Fibers. In International RILEM Conference on Material Science (pp. 69-78). RILEM Publications SARL.

Domone, P., & Illston, J. (Eds.). (2010). Construction materials: their nature and behaviour. CRC press

Ehlig, D., Schladitz, F., Frenzel, M., & Curbach, M. (2012). Textilbeton–Ausgeführte Projekte im Überblick. Beton-und Stahlbetonbau, 107(11), 777-785

Freitag, S., Beer, M., Jesse, F., & Weiland, S. (2006). Experimental investigation and prediction of long-term behavior of textile. In ICTTB'2006-1st International RILEM Conference on Textile Reinforced Concrete (pp. 121-130). RILEM Publications SARL.

Häußler-Combe, U., & Hartig, J. (2006). Uniaxial structural behavior of TTB–A one-dimensional approach considering the transverse direction by segmentation. In ICTTB'2006-1st International RILEM Conference on Textile Reinforced Concrete (pp. 203-212). RILEM Publications SARL.

Hegger, J. (2001). SFB 532, SFB 528: Textilbeton, TU Dresden, Aachen.

Hegger, J., & Voss, S. (2004). Textile Reinforced Concrete Façades. In Concrete Structures: the Challenge of Creativity: Proceedings of the fib symposium (pp. 168-169).

Hegger, J., & Voss, S. (2005). Textile reinforced concrete–Bearing behavior, design, applications, Composite in Construction. In Third International Conference Composites in Construction (CCC 2005), France, Lyon (pp. 1139-1146).

Hegger, J., & Voss, S. (2008). Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. Engineering structures, 30(7), 2050-2056.

Hegger, J., & Will, N. (2004). Tragverhalten von Textilbewehrtem Beton (Load-Bearing behaviour of TTB) Beton-und Stahlbetonbau 99.

Hegger, J., Bruckermann, O., & Chudoba, R. (2004). 134. A smeared bond-slip relation for multi-filament yarns embedded in fine concrete. In 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes (pp. 1453-1462). RILEM Publications SARL.

Hegger, J., Voss, S., Di Prisco, M., Felicetti, R., & Plizzari, G. A. (2004). 135. Textile reinforced concrete under biaxial loading. In 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes (pp. 1463-1472). RILEM Publications SARL.

Hegger, J., Will, N., Aldea, C., Brameshuber, W., Brockmann, T., Curbach, M., & Jesse, J. (2006). Applications of textile reinforced concrete. Brameshuber, W.(edited) State-of-the-Art Report of Rilem Technical Committee, 237-266.

Hegger, J., Will, N., Bentur, A., Curbach, M., Jesse, F., Mobasher, B., ... & Wastiels, J. (2006). Composite materials-6.2 Mechanical behaviour of textile reinforced concrete. Textile Reinforced Concrete-State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TTB, 133-186.

Hegger, J., Will, N., Bruckermann, O., & Voss, S. (2006). Load–bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete. Materials and structures, 39, 765-776.

Hegger, J., Zell, M., & Horstmann, M. (2008, May). Textile reinforced concrete–realization in applications. In Proceedings: international fib symposium tailor made concrete structures: new solutions for our society (pp. 357-362).

Hegger, J., Zell, M., & Horstmann, M. (2008, May). Textile reinforced concrete–realization in applications. In Proceedings: international fib symposium tailor made concrete structures: new solutions for our society (pp. 357-362).

Gopinath, S., Iyer, N. R., & Gettu, R. (2021). Non-Iterative Model for Analysis of RC Beams Strengthened with Textile Reinforced Concrete. Australian Journal of Structural Engineering, 22(4), 277-288.

Jesse, F., & Curbach, M. (2003). 24 Strength Of Contınuous Ar-Glass Fıbre Reınforcement Of Cementıtıous Composıtes. In Pro 30: 4th international RILEM workshop on high performance fiber reinforced cement composites (HPFRCC 4) (Vol. 1, p. 337). RILEM Publications.

Jesse, F., Will, N., Curbach, M., & Hegger, J. (2008). Load-bearing behavior of textile-reinforced concrete. Special Publication, 250, 59-68.

Karaduman, N. S., Karaduman, Y., Ozdemir, H., & Ozdemir, G. (2017). Textile reinforced structural composites for advanced applications. Textiles for advanced applications, 87.

Krüger, M. (2004). Vorgespannter textilbewehrter beton.

Kulas, C. (2013). Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile. Eigenverlag.

Kulas, C. (2015). Actual applications and potential of textile-reinforced concrete. GRC, 2015, 1-11.

Michler, H. (2013). Innovativ! Leicht! Formbar! Bewährt!-Textilbetonbrücke Rottachsteg Kempten im Allgäu. Proceedings of the 23. Dresdner Brückenbausymposium, Technische Universität Dresden, Dresden, 239-252.

Michler, H. (2013). Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton–Rottachsteg Kempten im Allgäu. Beton-und Stahlbetonbau, 108(5), 325-334.

Nmai, C. K., Suchorski, D. M., Bell, L., Khan, T., Rear, K., & Bohan, R. (2006). Reinforcement for Concrete—Materials and Applications. ACI Education Bulletin E2–00, Committee E-701, Materials for Concrete Construction, Reapproved.

Ortlepp, R., & Curbach, M. (2009). Strengthening of Columns using Textile Reinforced Concrete (TTB). Beton-Und Stahlbetonbau, 104(10), 681-689.

Ortlepp, R., Schladitz, F., & Curbach, M. (2011). Textilbetonverstärkte Stahlbetonstützen. Beton-und Stahlbetonbau, 106(9), 640-648..

Peled, A., Bentur, A., & Mobasher, B. (2017). Textile reinforced concrete (Vol. 19). CRC Press.

Peled, A., Bentur, A., & Yankelevsky, D. (1998). Effects of woven fabric geometry on the bonding performance of cementitious composites: mechanical performance. Advanced Cement Based Materials, 7(1), 20-27.

Peled, A., Bentur, A., & Yankelevsky, D. (1999). Flexural performance of cementitious composites reinforced with woven fabrics. Journal of materials in civil engineering, 11(4), 325-330.

Portal, N. W. (2013). Sustainability and flexural behaviour of textile reinforced concrete. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).

Rempel, S., Kulas, C., Will, N., & Bielak, J. (2017). Extremely light and slender precast-bridge made out of textile-reinforced-concrete. High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet; Hordijk, D., Luković, M., Eds.

Rempel, S., Ricker, M., & Hegger, J. (2019). Zur Zuverlässigkeit der Bemessung von biegebeanspruchten Betonbauteilen mit textiler Bewehrung (No. RWTH-2019-01098). Lehrstuhl und Institut für Massivbau.

Rempel, S., Ricker, M., & Hegger, J. (2020). Safety concept for textile-reinforced concrete structures with bending load. Applied Sciences, 10(20), 7328.

Roye, A., Stuve, J., & Gries, T. (2005). Definition for the differentiation of 2-D- und 3-D textiles. Band Und Flechtındustrıe, 42(2), 46.

Scheerer, S., Chudoba, R., Garibaldi, M. P., & Curbach, M. (2017). Shells made of textile reinforced concrete–applications in Germany. Journal of the international association for shell and spatial structures, 58(1), 79-93.

Schladitz, F., Frenzel, M., Ehlig, D., & Curbach, M. (2012). Bending load capacity of reinforced concrete slabs strengthened with textile reinforced concrete. Engineering structures, 40, 317-326.

Schwartz, M. M. (1997). Composite materials: properties, nondestructive testing, and repair (Vol. 1). Prentice Hall.

Shaeffer R. (1992): Reinforced Concrete: Preliminary Design For Architects And Builders Author: RE Shaeffer, Publisher: Mcgraw-Hill Colleg.

Soranakom, C., & Mobasher, B. (2009). Flexural analysis and design of textile reinforced concrete.

Voss, S. (2006, August). Design methods for textile reinforced concrete. In 6th international PhD symposium in civil engineering (pp. 1-8).

Voss, S., Hegger, J., Hegger, J., Brameshuber, W., & Will, N. (2006, September). Dimensioning of textile reinforced concrete structures. In Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on textile reinforced concrete, RILEM Publication SARL, France (pp. 151-160).

Williams Portal, N., Lundgren, K., & Malaga, K. (2014). Evaluation of pull-out behaviour in textile reinforced concrete. In 10th International Federation for

Structural Concrete (fib) International PhD Symposium in Civil Engineering 2014, 21 July 2014 through 23 July 2014 (pp. 97-102). Universite Laval.

Yin, S. P., Xu, S. L., & Wang, F. (2015). Investigation on the flexural behavior of concrete members reinforced with epoxy resin-impregnated textiles. Materials and Structures, 48, 153-166.

Zhu, W., & Bartos, P. J. M. (1997). Assessment of interfacial microstructure and bond properties in aged GRC using a novel microindentation method. Cement and Concrete Research, 27(11), 1701-1711.