



**ÇELİK LİF KATKILI BETONLARDA LİF DAĞILIMINI ETKİLEYEN  
DEĞİŞKENLERİN ETKİ DÜZEYLERİNİN BELİRLENMESİ**

**BETÜL ATASEVER**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Timur CİHAN**

**2022**

T.C.  
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ÇELİK LİF KATKILI BETONLARDA LİF DAĞILIMINI ETKİLEYEN  
DEĞİŞKENLERİN ETKİ DÜZEYLERİNİN BELİRLENMESİ

BETÜL ATASEVER  
ORCID: 0000-0001-5013-1023

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Timur CİHAN

HAZİRAN-2022  
Her hakkı saklıdır.

## ÖZET

### ÇELİK LİF KATKILI BETONLARDA LİF DAĞILIMINI ETKİLEYEN DEĞİŞKENLERİN ETKİ DÜZEYLERİNİN BELİRLENMESİ

Betül ATASEVER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Timur CİHAN

Günlük ihtiyaçların değişimi ve sürdürülebilir üretim istenilen beton özelliklerini etkilemektedir. Beton endüstrisi bu amaçla kendini sürekli geliştirmektedir. Lifli beton son yıllarda inşaat sektöründe yoğun olarak kullanılan beton türüdür. Bu nedenle lifli beton özelliklerinin tahmin edilebilirliği oldukça önem kazanmaktadır. Bu çalışmada lifli betonlarda lif dağılımını etkileyen etki değişkenlerinin lif dağılımı üzerindeki etki düzeylerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında lif hacim oranı (%1, %2 ve %3), karıştırma süresi (5 dk., 8.5 dk. ve 12 dk.) ve lif uzunluğu (35 mm, 50 mm ve 60 mm) etki değişkeni, lif dağılımı ise tepki değişkeni olarak seçilmiştir. Lif dağılımının belirlenmesi için 15 deneme noktasında toplam 45 adet 150×150×600 mm boyutlarında kare prizma kiriş numuneleri üretilmiştir (beton sınıfı C30/37 seçilmiştir). Her bir numune üç ara kesite bölünmüştür. Kesitlerdeki lif dağılımları, göz ve dijital görüntü işleme yöntemi ile belirlenen lif adedinin numunedeki toplam lif adedine bölünmesiyle hesaplanmıştır. Seçilen etki değişkenlerinin lif dağılımı üzerindeki etki düzeyleri ANOVA ile belirlenmiştir. Ayrıca lif dağılımı ile ultrasonik atımlı dalga hızı ve eğilme dayanımı arasındaki etkileşim incelenmiştir. Bunlara ek olarak kalıplara beton döküm yönünün (mala yüzeyi alt bölgesi) kesitteki lif dağılımına etkisi de belirlenmiştir. En yüksek mala yüzeyi alt bölgesi lif dağılımı üçüncü ara kesitte %61.12, birinci ara kesitte ise 55.92'dir. Bu nedenle çalışma kapsamında üretilen beton için genel olarak beton döküm yönünün kesitteki lif dağılımının homojenliğini etkilemediği söylenebilir. Lif dağılımları üzerinde sadece lif uzunluğu değişkeni anlamlı etkiye ( $p$ -değeri  $< 0.0001$ ) sahiptir. Birinci ve üçüncü kesit yüzeyi lif dağılımı için elde edilen modellerin  $R^2$  değerleri sırasıyla 0.9055 ve 0.9604 olarak elde edilmiştir.  $R^2$ 'lerin yüksek olması modellerin tahmin doğruluğunun yüksek olduğunu göstermektedir. Göz ile sayım sonucu elde edilen lif dağılım oranları ile dijital görüntü işleme yöntemi ile belirlenen lif dağılım oranlarının farkı maksimum 0.58'dir.

**Anahtar Kelimeler:** Lifli Beton, Lif Dağılımı, Dijital Görüntü İşleme, Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı, Eğilme Dayanımı

## ABSTRACT

### DETERMINATION OF THE EFFECT LEVELS OF VARIABLES AFFECTING THE FIBER DISTRIBUTION IN STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE

Betül ATASEVER

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mehmet Timur CİHAN

The variation in daily needs and sustainable production affect the desired concrete properties. The concrete industry is constantly improving itself for this purpose. Fiber concrete is a type of concrete that has been used extensively in the construction industry in recent years. For this reason, the predictability of fibrous concrete properties becomes important. This study, it was aimed to determine the effect levels of the variables affecting the fiber distribution in fibrous concretes on the fiber distribution. In the study, fiber volume ratio (%1, %2 and %3), mixing time(5 dk., 8.5 dk., and 12 dk.), and fiber length(35 mm, 50 mm, and 60 mm) were selected as the effect variables, and then fiber distribution was determined as the response variable. In order to determine the fiber distribution, a total of 45 square prism beam samples of 150×150×600 mm dimensions were produced at 15 trial points (concrete class C30/37 was chosen). Each specimen was divided into three cross-sections. The fiber distributions in the sections were calculated by dividing the fiber number determined by the eye and digital image processing (DIP) method by the total fiber number in the sample. The effect levels of the selected variables on the fiber distribution were determined by ANOVA. Moreover, the variations of the ultrasonic pulse velocity and bending strength according to fiber distribution was investigated. In addition, the effect of the direction of concrete casting into the molds (bottom area of the troweled surface) on the fiber distribution in the cross-section was also determined. The highest fiber distribution of the troweled surface lower region is 61.12% in the third cross-section and 55.92 in the first cross-section. Therefore, it can be said that for the concretes produced within the scope of the study, the direction of concrete casting does not affect the homogeneity of the fiber distribution in the cross-section. Only the fiber length has a significant effect level (p-value < 0.0001) on the fiber distributions. The  $R^2$  values of the models for the first and third cross-sectional surface fiber distribution were obtained as 0.9055 and 0.9604, respectively. The high  $R^2$  values indicate that the prediction accuracy of the models is high. The difference between the fiber distribution ratios obtained by the visual counting and the DIP method is a maximum of 0.58.

**Keywords:** Fiber Concrete, Fiber Distribution, Digital Image Processing, Ultrasonic Pulse Velocity, Bending Strength

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER DİZİNİ.....	viii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
TEŞEKKÜR.....	x
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1 Literatür Özeti.....	5
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	14
<b>2. MATERYAL VE METOT</b> .....	15
2.1 Materyal .....	15
2.2 Metot .....	15
2.2.1 Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı (UPV) .....	17
2.2.2 Eğilme Dayanımı ( $f_{cf}$ ).....	18
2.2.3 Beton Kiriş Numunelerin Kesimi .....	19
2.2.4 Gözle Sayım İle Çelik Lif Dağılımının Belirlenmesi .....	20
2.2.5 Çelik Lif Dağılımının Dijital Görüntü İşleme (DGİ) İle Belirlenmesi .....	21
<b>3. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME</b> .....	23
3.1 Çelik Lif Dağılımı.....	23
3.1.1 Gözle Sayım İle Belirlenen Çelik Lif Dağılım Sonuçları .....	23
3.1.2 Dijital Görüntü İşleme (DGİ) İle Belirlenen Çelik Lif Dağılım Sonuçları .....	29
3.2 Mekanik Özellikler .....	32
3.2.1 Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı (UPV) Deney Sonuçları.....	32
3.2.2 Eğilme Dayanımı ( $f_{cf}$ ) Deney Sonuçları.....	33

<b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	36
<b>KAYNAKLAR</b> .....	38
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	44



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. C30/37 beton bileşen malzeme miktarları .....	15
Çizelge 2.2. Çelik lif özellikleri.....	15
Çizelge 2.3. Deneme noktaları ve etki değişkeni değişim aralıkları .....	16
Çizelge 3.1. Gözle sayım sonucu elde edilen lif dağılımları.....	23
Çizelge 3.2. Ara kesit yüzeyi lif dağılımları için ANOVA.....	26
Çizelge 3.3. DGI ile elde edilen lif dağılım sonuçları .....	31
Çizelge 3.4. Ultrasonik atımlı dalga hızı ve eğilme dayanımı deney sonuçları .....	32
Çizelge 3.5. Eğilme dayanımı için ANOVA ve uyum istatistiği sonuçları .....	34

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1. Çeşitli çelik lif tipleri [12] .....	2
Şekil 1. 2. Lif boyunun gerilme şekil değiştirme özelliklerine etkileri [14] .....	3
Şekil 2. 1. 150×150×600 mm çelik lifli beton kiriş numunesinin şematik görünüşü .....	17
Şekil 2. 2. Ultrasonik atımlı dalga hızı deney aleti.....	18
Şekil 2. 3. Eğilme dayanımı deney aleti.....	19
Şekil 2. 4. Taş kesme deney aleti.....	19
Şekil 2. 5. Lif sayımı yapılan yüzeyler ve kodlamaları .....	20
Şekil 2. 6. Genel amaçlı görüntü işleme sisteminin bileşenleri [74] .....	21
Şekil 2. 7. Genel amaçlı görüntü işleme sisteminin temel adımları [74] .....	22
Şekil 3. 1. Ara kesit yüzeyi lif dağılımlarının değişimi .....	24
Şekil 3. 2. Mala yüzeyi alt bölgesi lif dağılımlarının değişimi .....	24
Şekil 3. 3. Birinci ara kesit yüzeyi lif dağılımlarına ait kontur grafikleri; (a) 35 mm, (b) 50 mm ve (c) 60 mm.....	27
Şekil 3. 4. İkinci ara kesit yüzeyi lif dağılımlarına ait kontur grafikleri; (a) 35 mm, (b) 50 mm ve (c) 60 mm.....	27
Şekil 3. 5. Üçüncü ara kesit yüzeyi lif dağılımlarına ait kontur grafikleri; (a) 35 mm, (b) 50 mm ve (c) 60 mm.....	28
Şekil 3. 6. Ara kesit yüzeyi lif dağılımlarının tahmini ve gerçek değerleri; (a) 1. ara kesit, (b) 2. ara kesit ve (c) 3. ara kesit .....	28
Şekil 3. 7. 10 nolu deneme noktası birinci numune birinci ara kesit dijital görüntüleri; (a) 11 yüzeyi, (b) 21 yüzeyi.....	29
Şekil 3. 8. 10 nolu deneme noktası birinci numune üçüncü ara kesit dijital görüntüleri; (a) 33 yüzeyi, (b) 43 yüzeyi.....	30
Şekil 3. 9. Gözle sayım lif dağılımı ile DGİ yöntemiyle belirlenen lif dağılımı arasındaki fark .....	31
Şekil 3. 10. Ultrasonik atımlı dalga hızının ara kesit yüzeyi lif dağılımlarına göre değişimi..	33
Şekil 3. 11. Eğilme dayanımının lif dağılımına göre değişimi; (a) 2. ara kesit yüzeyi, (b) çatlak başlama bölgesi.....	33
Şekil 3. 12. Eğilme dayanımlarına ait kontur grafikleri; lif uzunluğu (a) 35 mm, (b) 50 mm ve (c) 60 mm .....	35



Şekil 3. 13. Eğilme dayanımının tahmini ve gerçek değerleri ..... 35



## SİMGELER DİZİNİ

$d_1, d_2$	Numunenin En Kesit Boyutları
$F$	En Büyük Yük
$f_{cf}$	Eğilme Dayanımı
$l$	Lif Uzunluğu
$L$	Ultrasonik Atımlı Dalganın Kat Ettiği Mesafe, Mesnet Silindirleri Arasındaki Açıklık
$R^2$	Korelasyon Katsayısı
$t$	Ultrasonik Atımlı Dalganın Mesafeyi Geçiş Süresi
$\sigma_u$	Çekme Dayanımı
$\phi$	Çap

## KISALTMALAR DİZİNİ

ANOVA	Varyans Analizi
DGİ	Dijital Görüntü İşleme
UPV	Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı



## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Eğitiminin başından beri büyük bir anlayış ve sabırla bana yardımcı olan, çalışmalarımı izleyen ve yönlendiren, bilgisi ve deneyimiyle bana ışık olan değerli danışmanım, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Timur CİHAN'a katkılarından dolayı teşekkür ederim. Deneysel çalışma kapsamında üretimler, Atılım Beton A.Ő. Çerkezköy Tesisinde yapılmış olup bana laboratuvar ve malzeme teminini sağlayan tesisin değerli çalışanlarına teşekkür ederim. Çalışmamın her aşamasında beni bir an bile yalnız bırakmayan, numune üretim ve deney sürecinde büyük emeği olan, desteğini her daim hissettiğim kardeŐim Tolgahan ATASEVER'e teşekkür ederim.

Betül ATASEVER  
İnşaat Mühendisi

## 1. GİRİŞ

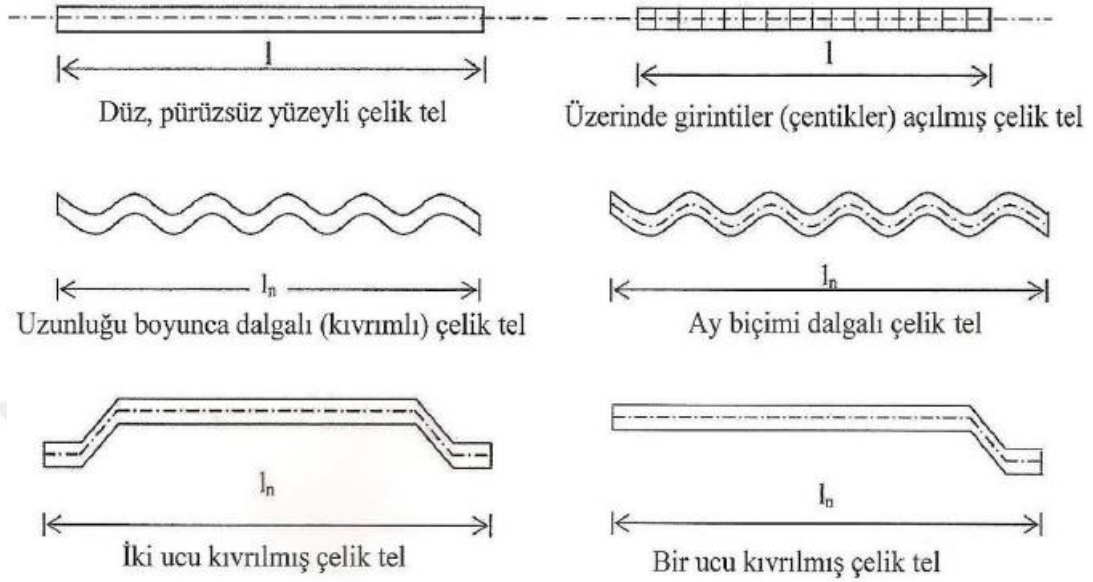
Beton uygun mekanik, fiziksel özellikleri yanında kolay uygulanabilir ve düşük maliyetli olduğu için günümüzde inşaat sektöründe en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Beton gevrek bir malzeme olduğu için çekme dayanımı, çatlak sonrası yük taşıma kapasitesi ve tokluk özellikleri istenilen düzeyde değildir. İnşaat sektöründeki gelişmeler yapı malzemesi olarak kullanılan betonun zayıf özelliklerinin de iyileştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle beton günümüzde çimento, agrega, su, mineral/kimyasal katkı maddeleri ve liflerin belirli oranlarda karıştırılmasıyla üretilen heterojen bir yapı malzemesi olarak tanımlanmaktadır.

Lif katkılı betonların gelişimindeki hedef esas olarak çimento esaslı kompozitlerin iki ana eksikliğini giderilmesini amaçlamaktadır: nispeten düşük çekme dayanımı ve oldukça düşük enerji yutma kapasitesi veya tokluğu [1]. Liflerin çimento esaslı kompozitlerdeki fonksiyonları iki kategoride sınıflandırılabilir: rötre çatlak kontrolü ve mekanik özellikleri geliştirme [1]. Rötre çatlak kontrolü için erken yaş rötreyi sınırlandırmak ve rötre çatlaklarını önlemek amacıyla genellikle düşük elastisite modülü ve düşük dayanımlı lifler düşük miktarlarda ilave edilerek kullanılır [2]. Mekanik özellik geliştirme için eğilmede çekme performansını iyileştirmek [3,4], darbe direncini arttırmak [5] ve göçme modunu değiştirmek[6] amacıyla farklı beton yapılarında lifle güçlendirme kullanılır. Beton içerisine lif ilavesi çimento agrega ara yüzeyinde mevcut ve oluşan çatlakların büyümesini engelleyerek betonun süneklik ve diğer mekanik özelliklerini iyileştirmektedir [7].

Lifli beton üretiminde genel olarak çelik, cam ve polipropilen lifler kullanılmaktadır [8, 9]. Genel olarak beton endüstrisinde sentetik lifler (polimer lifler, metalik lifler ve seramik lifler) kullanılmaktadır. Metaller yüksek plastik şekil değiştirme yeteneklerinden dolayı inşaat sektöründe çok fazla kullanılmaktadır. Metallerin lif formasyonu (çelik lif) da lifli betonların üretiminde kullanılmaktadır. Beton üretiminde kullanılacak çelik lifler ASTM A 820 [10] standardında aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır;

- Tip 1: Soğuk çekilmiş lifler,
- Tip 2: Plakadan kesilmiş çelik lifler,
- Tip 3: Haddelenip çekilmiş lifler,
- Tip 4: Diğer lifler.

ASTM A 820 standardında çelik lifler üretim tekniklerine göre sınıflandırılmıştır. Beton endüstrisinde kullanılan çelik lifler aynı zamanda TS EN 14889-1 standardına tabidirler [11]. Çeşitli çelik lif tipleri Şekil 1.1’de görülmektedir[12].



Şekil 1.1. Çeşitli çelik lif tipleri [12]

Lifli betonun özelliklerini etkileyen lif özellikleri; lif geometrisi, lif boyu, lif narınlığı ve lif oranı (kontrol edilebilen etki değişkeni) değişkenleridir. Ayrıca liflerin beton içerisindeki dağılımı ve yönelimi de (kontrol edilemeyen etki değişkeni) beton özelliklerini etkilemektedir. Bunlara ek olarak betonun içyapısını etkileyen değişkenler de lifli betonun özelliklerini etkilemektedir.

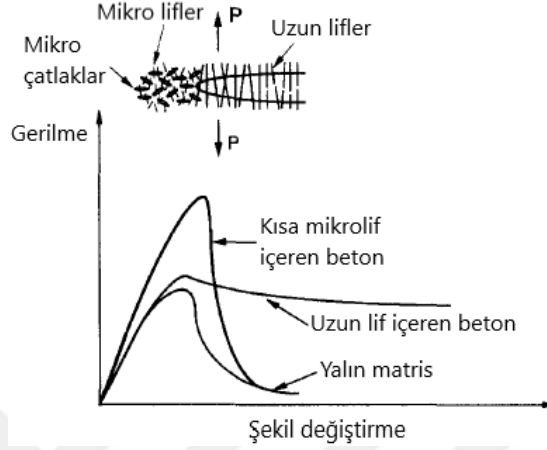
Lif geometrilerindeki farklılıklar lif ve matris arasındaki mekanik bağı doğrudan etkilemektedir. Özellikle çelik lifler çok farklı geometrilerde üretilmektedir. Farklı geometrilerde aynı narınlığa sahip lif kullanımı genel olarak betonun işlenebilirliğini düşürmektedir, ancak dalgalı liflerle, düz ve kancalı liflere göre daha yüksek çökme değerleri elde edilmektedir [13]. Ayrıca değişken narınlık ve lif oranlarında kancalı liflerin, düz ve dalgalı liflere göre basma gerilmeleri altında enerji yutma kapasiteleri daha yüksektir [13].

Lif boyunun çimento esaslı kompozit özellikleri üzerindeki etkileri kısa lif ve uzun lif kullanımına göre değişmektedir. Betondaki çatlakların mikro ölçekte başlaması nedeniyle;

- Kısa lif kullanılan kompozitler daha yüksek gerilme değerlerine ulaşmakta ancak şekil değiştirme yeteneklerinde çok az iyileşme gerçekleşmektedir [14].

• Uzun lif kullanılan kompozitlerde ise gerilme değerlerinde çok daha düşük artış oluşmakta fakat daha büyük şekil değiştirmeler yapmakta ve betonun tokluğu artmaktadır [14].

Lif boyunun gerilme şekil değiştirme özelliklerine etkileri Şekil 1.2’de görülmektedir.



Şekil 1.2. Lif boyunun gerilme şekil değiştirme özelliklerine etkileri [14]

Lif narinlik oranı lif uzunluğu/çap (yuvarlak olmayan lifler için lif uzunluğu/eşdeğer çap) olarak tanımlanmaktadır. Lif narinlik oranı ve harmanın lif hacim oranı betonun işlenebilirliğini dolayısıyla da mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Lif narinlik oranı genelde 300’den daha düşüktür [15] ve betonun işlenebilirliğindeki azalma nedeniyle lif narinlik oranının 100 değeri ile sınırlandırılması önerilmektedir [13].

Harmanın lif hacim oranının (lif içeriği) yüksek olması liflerin topaklanma ihtimalini artırdığı için karıştırma ve yerleştirme problemlerine neden olmaktadır. Bu topaklanmalar beton matrisi içerisinde zayıf bölgeler oluşturmaktadır. Özellikle liflerin beton içerisinde homojen olarak dağılması için karışım agrega en büyük tane büyüklüğünün küçük, lif narinlik oranının en uygun değerinde, liflerin karışıma kuru katılması ve hiper akışkanlaştırıcı kullanılması gerekmektedir. Uygulamalarda yerleştirme aşamalarında yaşanan problemlerden dolayı betona hacimce %3’ten fazla oranda lif katılmamasına özen gösterilmektedir [7]. Genel olarak lif hacim oranı %1 ile %2 arasında değişmektedir [8]. Lif hacim oranına göre Zollo[15] aşağıdaki gibi bir sınıflandırılma yapmaktadır:

- %0.1-%1: Düşük Lif Yüzdeli
- %1- %3: Normal Lif Yüzdeli

- %3-%12: Yüksek Lif Yüzdeli

Matrisin özellikleri (değişkenliği), lif aderansını ve lif katkılı kompozitlerin maksimum çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerini etkilemektedir. Lif katkılı kompozit matrisleri uçucu kül, cüruf, silis dumanı ve metakaolin gibi mineral katkıları kullanılarak değiştirilebilir. Matris kompozisyonunun değiştirilmesi, lif matris aderansını artırabilir, matris tokluğunu iyileştirebilir ve matris çekme dayanımını artırabilir [1].

İnşaat sektöründe en çok kullanılan lif türü çelik liflerdir. Çelik lif takviyeli betonlarda çatlak bölgesindeki gerilmelerin bir kısmını lifin kendisi taşır, bir kısmını ise köprü görevi görerek matrisin sağlam bölgelerine aktarır. Çelik lifli betonun mekanik özellikleri; lif geometrisi (boy, şekil), lif hacim yüzdesi, lif narinlik oranı, çimento cinsi ve miktarı, numunelerin boyutu ve şekli, hazırlanma metodları (liflerin karışıma ilave sıralaması, karıştırma süresi, yerleştirme yöntemi ve yerleştirme yönü), su/çimento oranı, kullanılan agreganın cinsi, tane dayanımı ve karışım agregası en büyük tane büyüklüğü etki değişkenleri ile ilişkilidir.

Lif dağılımının belirlenmesi amacıyla farklı yöntemler (dijital görüntü analizi [16-21], X-ray [22-26], alternatif akım empedans spektroskopisi, AC-IS [27, 28] teknikleri) kullanılmaktadır. Farklı teknikler içerisinde görüntü analizi lif dağılımı ve yönelimi hakkında doğrudan bilgi sağlamaktadır [29].

Çelik liflerin beton içerisinde homojen dağılımının ve uygun yönlendirmesinin sağlanamaması durumunda beton içerisine lif ilavesi matris fazda süreksizlikler oluşturacağı için beton performansını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle yukarıda belirtilen etki değişkenlerinin lif dağılımına ve yönelimine etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Etki değişken sayısı fazla olan (kontrol edilemeyen etki değişkenlerinin bulunması) lifli betonların tasarımında kullanılabilecek teorik modeller çok azdır [30]. Özellikle lif dağılımı ve yöneliminin belirsizliği lifli beton özelliklerinin tahmin doğruluğunu azaltmaktadır. Bu nedenle liflerin beton içerisinde homojen olarak dağılımının sağlanması istenilen özelliklerde lifli beton üretimi için gereklidir.

Liflerin beton içerisinde dağılımını etkileyen etki değişkenleri lif geometrisi, lif boyu, lif narinliği, lif oranı, karıştırma yöntemi, karıştırma süresi, karıştırma hızı, yerleştirme yöntemi, yerleştirme yönü, numune kesit boyutu olarak sıralanabilir. Lif dağılımını etkileyen



etki değişkenlerinin her birinin veya birkaçının aynı anda lif dağılımı üzerindeki etkileri ile ilgili araştırmalar bulunmaktadır [22, 31-40]. Araştırmalar sonucu genel olarak etki değişkenlerinin değişim aralıkları ortaya konmuştur. Ancak gerçek lif dağılımı tahminine dönük etki değişkenlerine bağlı en uygun modellerin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada değişim aralıklarına bağlı olarak çelik lif dağılımını etkileyen kontrol edilebilir etki değişkenlerinin (lif hacim oranı, lif uzunluğu ve karıştırma süresi) lif dağılımı ve mekanik özellikleri (ultrasonik atımlı dalga hızı, eğilme dayanımı) üzerindeki etki düzeyleri ANOVA kullanılarak belirlenmiştir. Lif dağılımları hem gözle sayım yapılarak hem de dijital görüntü işleme kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca etki değişkenlerine bağlı olarak tepki değişkenleri için modeller oluşturularak modellerin uygunluğu uyum istatistiği yardımı ile belirlenmiştir.

## 1.1 Literatür Özeti

Literatür çalışması iki aşamalı olarak gerçekteştirilmiştir: Çelik lif katkılı betonlar ve lif dağılımının lifli beton özelliklerine etkileri.

Çelik lif katkılı betonlarla ilgili literatür çalışması aşağıda verilmiştir.

Ünal ve ark. [41] çalışmalarında, farklı lif tipi ve miktarının çelik lifli betonların basınç ve eğilmede dayanımları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Beton üretimlerinde  $D_{en}$  büyük 22 mm olan dört farklı agrega kullanılmış olup çimento dozajı  $325 \text{ kg/m}^3$  ve su/çimento oranı 0.60 olarak sabit tutulmuştur. Üretimlerde narinlik oranı 60 ve 80 olan iki farklı lif tipi ve 0, 15, 30, 45 ve  $60 \text{ kg/m}^3$  lif içeriğine sahip 10 farklı seri kullanılmıştır. Basınç ve eğilme dayanımları için sırasıyla  $\phi 150 \times 300$  mm silindir ve  $100 \times 100 \times 350$  mm prizma numuneler kullanılmıştır. Sonuç olarak lif ilavesinin betonun basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme kabiliyetini ve eğilme dayanımını artırdığı tespit edilmiştir.

Kozak [42] çalışmasında, çelik lifli beton ve uygulama alanlarını incelemiştir. Betona lif ilavesi, betonun çatlak gelişimine karşı dayanıklılığı, çekme dayanımı ve enerji emme kapasitesini artırmanın etkili bir yoludur. Lif ilave oranı ve lif inceliği betonun eğilme mukavemeti, kırılma enerjisi ve sertliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Çelik lifli betonun depreme dayanıklı binaların yapımı, kolon ve kirişlerin birleşim yerleri, endüstriyel binalar, betonarme şevler, boru ve temellerin stabilizasyonu, fabrika ve hangar depolarının beton

zeminleri, havaalanı kaldırımları, karınca kaldırımları, kaldırımlar ve yol betonu gibi uygulama alanları bulunmaktadır.

Topçu ve Boğa [43] çalışmalarında, çelik lifli betonlara uçucu kül ilavesinin betonun mekanik özelliklerine etkisi ve çelik lifli beton boruların tepe basınç yükünün değişkenliğini araştırmışlardır. Numune üretimlerinde 300, 350 ve 400 dozajlı çelik lifli ve uçucu küllü silindirik ve prizmatik beton numuneleri ve üç adet 200 mm çaplı boru üretilmiştir. Üretimlerde ağırlıkça % 0.4 çelik lif ve çimento ağırlığınca % 15 uçucu kül kullanılmıştır. Sonuç olarak basınç, çekme, eğilme mukavemeti ve tepe basınç yükündeki değişiklik sırasıyla % 16, % 54, % 100 ve % 130 elde edilmiştir.

Sarı [7] çalışmasında, 4 farklı lifli 5 farklı karışım üreterek, basınç dayanımı, elastisite modülü, yarmada çekme dayanımı, kırılma enerjileri ve eğilme dayanımlarının değişkenliğini araştırmıştır. Sonuçlar Alman Beton Birliği'ne göre değerlendirilmiştir. Bazalt lifli ve yalın betonların öngörülen sehim değerlerine ulaşmadığı ve makro sentetik liflerde eğilme dayanımlarının taşıma gücü sınır durumundaki eş değer eğilme dayanımlarından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çelik lifli betonlarda ise eş değer eğilme dayanımlarına göre daha düşük değerler elde edilmiştir.

Yaprak ve ark. [44] çalışmalarında, uçucu kül ve çelik lif katkılı betonlara cam lifi ilavesinin basınç ve çekme dayanımlarına etkisi incelenmiştir. Beton üretiminde 0.5, 0.75, 1.0, 1.25 kg/m<sup>3</sup> cam lif ilavesi yapılmış olup, elde edilen sonuçlar cam lifi ilavesinin betonun basınç ve çekme dayanımına olumlu etkide bulunduğu göstermiştir.

Akyıldız [45] çalışmasında, bulanık mantık kullanılarak beton dayanımının önceden tahmin edilebilirliğini araştırmıştır. Kıvam, basınç dayanımı, maksimum agrega ve minimum agrega büyüklüğü, çelik lif hacim oranı, çelik lif uzunluğu ve çapı girdi değişkenleri, dozaj, su miktarı, iri ve ince agrega içeriği çıktı değişkenleri olarak seçilmiştir. Girdilerin çıktılar üzerindeki etkisi düzeyleri belirlenmiştir. Bulanık mantık ile tahmin edilen değerlerin gerçek değerlerle örtüştüğü ve bu nedenle bulanık mantığın basınç dayanımını tahmin etmede büyük bir potansiyele sahip olduğu saptanmıştır.

Öztürk [46] çalışmasında, çevre kirliliği ve ekonomik kayıplara neden olan aşınmış lastik ve Kandıra taş tozunun beton üretiminde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Atık lastiklerden piroliz yöntemiyle nano siyah karbon ve Kandıra taşı kesiminde oluşan atık

çamur, hacimce % 0, % 0.5, % 10 ve % 15 çelik lif katkılı beton üretiminde çimento yerine % 5, % 10 ve % 15 oranlarında kullanılmıştır. Çalışmada çökme deneyi ve birim hacim ağırlık deneyi, birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, su emme, kapiler su emme ve görünen deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda Kandıra taşı tozu ve nano karbon siyahı kullanımının hedef basınç dayanımını sağladığını göstermiştir.

Düğenci [47] çalışmasında, hacimce %0, %0.5, %1 ve %1.5 oranında Dramix RC-80/0.60-BN çelik lif ilave edilmiş 7, 28 ve 90 günlük çelik lifli beton numunelerin sıcaklık değişimine bağlı olarak basınç dayanımı, elastisite modülü ve rijitlik değerleri karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Sonuç olarak, yüksek sıcaklığın etkisi altında, çelik lifli betonun basınç dayanımı, elastisite modülü ve sertliği önemli ölçüde azalmıştır. Ancak yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin sonuçları kendi aralarında farklılık göstermiştir.

Zeynal [48] çalışmasında, su/çimento ve çelik lif kullanım oranının, lifli betonların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Su/çimento oranları 0.40, 0.50 ve 0.60 olan, hacimce %0,3 mikrolif ve hacimce %0.4, %0.8 ve %1.2 çelik lif ilave edilen toplam 24 adet farklı lifli ve lifsiz beton üretilmiştir (numunelere 28 gün standart kür uygulanmıştır). Araştırmanın sonuçlarına göre; kısa liflerin matrisi güçlendirdiği, mekanik özellikleri ve darbe direncini marjinal de olsa iyileştirdiği, uzun liflerin ise kısa liflere göre hem mekanik özellikleri hem de darbe direncini daha etkili bir şekilde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Su/çimento oranı azaldıkça liflerin olumlu etkilerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Mertol ve ark. [49] çalışmalarında, çelik liflerle takviye edilmiş ve çeşitli miktarlarda çekme donatısı kullanılan betonarme kirişlerin eğilmede çekme davranışı incelemiştir. Çalışmada, beton türü ve boyuna donatı miktarı ana değişkenler olmak üzere 180×250×3500 mm ölçülerinde toplam 20 adet kiriş numunesi üretilmiştir. Yük-sehim davranışları, nihai yük, nihai sehim, servis rijitliği, pik sonrası rijitlik ve eğilme tokluğu açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, çelik lifli beton kullanımının, geleneksel beton numunelerine kıyasla kirişlerin nihai yükünü ve servis sertliğini biraz arttırdığını göstermiştir. Çelik lifli beton numunelerinin eğilme tokluğu, aşırı donatılı kesitler için önemli ölçüde daha büyük olmakla birlikte, geleneksel beton numunelerine göre daha büyüktür.

Demiralp [50] çalışmasında, agrega tipinin çelik lifli betonun çökme, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, su emme, böhme aşınma özellikleri ve kırılma enerjisine etkilerini araştırmıştır. Çalışma kapsamında geri dönüşümlü agrega, kırma taş agrega ve doğal agrega tercih edilmiş ve C35 beton sınıfında çelik lifli beton üretilmiştir. Sonuç olarak, C25 ve üzeri beton sınıflarından dönüştürülerek üretilen agregalarla, normal betonlara benzer performans elde edilmiştir.

Song ve Hwang [51] çalışmalarında, yüksek dayanımlı çelik lif takviyeli betonun mekanik özelliklerini (basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, kopma modülü ve tokluk indeksi) araştırmıştır. Çelik lifler hacimce %0.5, %1.0, %1.5 ve %2.0 oranlarında ilave edilmiştir. Lif takviyeli betonun en yüksek basınç dayanımı %1.5 lif oranında elde edilmiştir ve basınç dayanımında %15.3 düzeyinde bir iyileşme sağlamıştır. Lif takviyeli betonun yarmada çekme dayanımında ve kopma modülünde %2.0 lif ilave oranına kadar sırasıyla %98.3 ve %126.6 düzeyinde iyileşme gerçekleşmiştir. Ayrıca lif ilave oranının artmasıyla tokluk indeksinde de iyileşme gerçekleşmiştir.

Nataraja ve ark. [52] çalışmalarında, çelik lif takviyeli betonların basınç altındaki gerilme birim şekil değiştirme eğrilerini araştırmıştır. Ayrıca gerilme birim şekil değiştirme eğrisinin hem artan hem de azalan kısımları için basit analitik modeller önerilmiştir. Çalışma kapsamında, 30 ila 50 MPa arasında değişen basınç dayanımına sahip betonlar ve 55, 82 görünüş (narınlık) oranına sahip hacimce %0.5, %0.75 ve %1.0 oranlarında çelik lif kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar ile analitik model sonuçları arasında yüksek korelasyon elde edilmiştir.

Kim ve ark. [53] çalışmalarında, açık deniz rüzgâr türbinlerinin öngermeli beton yapı uygulamaları için öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren çelik lif takviyeli harçların taze ve sertleştirilmiş harç özelliklerini araştırmıştır. Kısa düz çelik liflerin (6 mm uzunluk, 0.2 mm çap) eklenmesi genel olarak çelik lif takviyeli harçların akıcılığını, terleme ve priz süresini azaltırken, çimentonun çimento ağırlığına %40 oranında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile yer değiştirilmesi harçların akıcılığını ve priz süresini artırmıştır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ilavesinin kanama üzerine etkisi çimento tipine göre farklılık göstermiştir.

Abbass ve ark. [54] çalışmalarında, farklı üç beton dayanımı için farklı uzunluk ve çaplarda çelik lif ilavesinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır.

Çalışmada, üç farklı su/çimento oranına (0.25, 0.35 ve 0.45) sahip betonlarda üç farklı uzunluk (40, 50 ve 60 mm) ve iki farklı çapta (0.62 ve 0.75 mm) kanca uçlu çelik lifler kullanılmıştır. Çelik lifler, hacimce %0.5, %1.0 ve %1.5 oranında betona ilave edilmiştir. Sonuçlar, su/çimento oranı, lif ilave oranı ve lif uzunluklarının, betonun mekanik özelliklerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu, basınç dayanımında yaklaşık %10-25 ve çekme dayanımında yaklaşık %31-47 artışa oluşturduğunu göstermiştir.

Vairagade ve Kene [55] çalışmalarında, tesviye, püskürtme beton, mimari paneller, prekast ürünler, açık deniz yapıları, sismik bölgelerdeki yapılar, ince ve kalın onarımlar, çarpma bariyerleri, temeller, hidrolik yapılar ve diğer birçok uygulamada kullanılan lif takviyeli betonların kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu derleme çalışması, özellikle yeni beton türleri ile birlikte çelik liflerin kullanılabilirliği için bazı önemli noktaların verilmesine yöneliktir.

Lif dağılımının lifli beton özelliklerine etkileri ile ilgili literatür çalışması aşağıda verilmiştir.

Mehdipour ve ark. [56] çalışmalarında, yakın alan mikrodalga reflektometrisi kullanarak lif takviyeli çimentolu harçlarda çelik lif dağılımını araştırmıştır. 3 ve 10 GHz'de gerçekleştirilen mikrodalga yansımaya deneylerinin istatistiksel özellikleri, %0 ile %3 arasında değişen lif içerikli numunelerdeki lif içeriği ve dağılımı ile ilişkilendirilmiştir. Farklı kalınlıklarda kesilmiş yüzeylerde fiber dağılımını değerlendirmek için görüntü işleme teknikleri de kullanılmıştır. Mikrodalga yansımaya sonuçları ile sertleştirilmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen görüntü işleme sonucu elde edilen lif yoğunluğu arasında anlamlı düzeyde yüksek korelasyon elde edilmiştir.

Raun ve Poursae [57] çalışmalarında, %0, %0.5, %1, %1.5 ve %2 oranında lif ilave edilerek üretilen 0.5 ve 1.25 kum/çimento oranlarına sahip ultra yüksek performanslı beton numunelerdeki lif dağılımını geleneksel görüntüleme, X-ışını bilgisayarlı tomografi taraması ve elektriksel iletkenlik tekniklerini kullanılarak araştırmıştır. Araştırma sonucunda, karışımdaki kum/çimento oranının arttırılmasının akıcılığı azalttığı ve akıcılığı daha yüksek olan karışımlarda liflerin çökme eğiliminin arttığı bildirilmiştir.

Al-Mattarneh [58] çalışmasında, tahribatsız radyo dalgası deney sistemi olan yüzey elektromanyetik sensörler kullanarak betondaki çelik liflerin konsantrasyon, dağılım ve

yönelimini açıklamıştır. Çalışma sonucunda, liflerin elektrik alanı yönünde yönelmesi durumunda dielektrik özelliklerin maksimum olduğunu ve elektrik alanına dik yönde yönelmesi durumunda ise minimum olduğunu belirlemiştir. Ayrıca ölçülen elektromanyetik özelliklere bağlı olarak lif içeriğini ve eğilme dayanımının tahmini için basit bir doğrusal model önerilmiştir.

Kim ve ark. [59] çalışmalarında, hacimce %0.5, %1 ve %1.5 çelik lif içeren çelik lifli betonların lif dağılımının yüzey elektrik öz direnci üzerindeki etkisini dairesel ve dikdörtgen numuneler kullanarak araştırmıştır. Elde edilen sonuçlar dairesel numunelerden elde edilen yüzey elektriksel öz direncinin dikdörtgen numunelere göre daha tutarlı olduğunu ve lif dağılımının lif ilave oranına kıyasla yüzey elektriksel öz direnç üzerinde etkisinin anlamlı olmadığını göstermiştir.

Wang ve ark. [60] çalışmalarında, farklı reolojik çimento harcı ile hazırlanan ultra yüksek performanslı betonlardaki çelik lif dağılımını araştırmıştır. Çimento harcı karışımlarının (çelik lifler olmadan) reolojik özelliklerini ayarlamak için her su/bağlayıcı oranı (0.18, 0.20, 0.22, 0.24) için dört farklı süper akışkanlaştırıcı dozaj kullanılmıştır. Her çimento harcı karışımı için sırasıyla hacimce %1, %2 ve %3 oranında çelik lifler eklenmiştir. Üretilen küp numunelerdeki çelik lif dağılımı dijital görüntü işleme ile belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, daha yüksek su/bağlayıcı oranı ve süper akışkanlaştırıcı dozajı ile taze çimento harcının akışkanlığının arttığını ve akma gerilmesinin azaldığını ortaya koymuştur. Ultra yüksek performanslı betonlardaki çelik lif dağılımının homojenliği taze matrisin optimum akma gerilimi %1, %2 ve %3 lif hacim oranına sahip ultra yüksek performanslı beton karışımları için sırasıyla 900-1000 Pa, 700-900 Pa ve 400-800 Pa arasında değişmektedir.

Huang ve ark. [61] çalışmalarında, ultra yüksek performanslı betonun mekanik özelliklerini (basma dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, tokluk ve maksimum sehim) iyileştirmek için, yatay kanallı L-şekilli bir cihaz geliştirilerek taze betonun akıcılığı kontrol altına alınmış ve çelik liflerin yönelimi anlamlı ölçüde iyileştirilmiştir. 0.20, 0.22 ve 0.24 su/bağlayıcı oranlarına sahip karışımlara sırasıyla toplam hacimce %1, %2 ve %2,5 oranında çelik lifler eklenerek beton numuneleri hazırlanmıştır. Üç lif yönelim parametresi (lif yönelim açısı, lif yönelim sayısı ve lif yönelim katsayısı) görüntü analiz yöntemi ile nicel olarak değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, ultra yüksek performanslı betonun mekanik

özellikleri ve lif yönelim parametreleri için doğrusal model elde edilmiştir ve bu nedenle, çelik liflerin güçlendirme etkisini iyileştirmek için potansiyel bir yöntem geliştirilmiştir.

Han ve ark. [62] çalışmalarında, çelik lifli betonun, mekanik özelliklerine çelik lif uzunluğu ve iri agrega en büyük tane büyüklüğünün etkilerini araştırmıştır. Deneysel sonuçlar, çelik lif uzunluğu arttıkça çelik lifli betonun çökmesi, yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, başlangıç eğilmede çekme tokluğu oranı, eğilmede çekme tokluğu oranı, kırılma enerjisi ve kararsız kırılma tokluğunun arttığını göstermiştir. Basınç dayanımı ve ilk kırılma tokluğunun çelik lif uzunluğundan çok az etkilendiği görülmüştür. İri agrega en büyük tane büyüklüğünün artmasıyla çökme değeri artış ve basınç dayanımı ise hafif değişimler göstermiştir. Ayrıca, yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, kırılma enerjisi ve kararsız kırılma tokluğunun önce arttığı ve sonrasında azaldığı, başlangıç eğilmede çekme tokluk oranı, eğilmede çekme tokluk oranı ve ilk kırılma tokluğunda anlamlı bir değişim gerçekleşmediği gözlemlenmiştir.

Raju ve ark. [63] çalışmalarında, beton tipinin (çelik lifli beton ve çelik lifli kendiliğinden yerleşen beton), lif içeriğinin ve numune derinliğinin lif dağılımı ve yöneliminin üzerindeki etkilerini ve çelik lifli beton ile çelik lifli kendiliğinden yerleşen beton kırışların X-ışını görüntüleri kullanılarak belirlenen lif dağılımlarına bağlı olarak yapısal performanslarını araştırmıştır. X-ışını görüntülerinden yüksek akış özellikleri sayesinde çelik lifli kendiliğinden yerleşen beton kırışlarının, çelik lifli beton kırışlarından daha düşük lif ayrışması ve daha iyi lif yönelimi sergilediği elde edilmiştir.

Li ve ark. [64] çalışmalarında, fiber yöneliminin çelik fiberler etrafındaki çimento-su süspansiyon göçü üzerindeki etkisini araştırmak için akışkanlar mekaniğine dayalı teorik bir model önermiştir. Daha sonra çelik lif etrafındaki ara yüzey geçiş bölgesinin mikro yapısı, su/çimento oranına göre Powers modeline dayalı olarak tahmin edilmiştir. Son olarak, lif yönelimi, ara yüzey geçiş bölgesi gözenekliliği ve bağ dayanımı arasındaki ilişkiler eğri uydurma ile belirlenmiştir. Sonuçlar, küçük taneli serbest suyun dairesel (veya eliptik) silindirlerin yanından akarak çelik lifi geçtiğinden, çelik lifin üst ve alt yüzeylerinde ara yüzey geçiş bölgesi mikro yapılarında farklılık ortaya çıktığını göstermiştir. Liflerin eğim açısı arttıkça, üst yüzey gözenekliliği ve ara yüzey geçiş bölgesinin çelik lif etrafındaki ortalama gözenekliliğinin azaldığı, bunun da lif-matris bağ dayanımında bir artışa yol açtığı belirtilmiştir.

Gao ve ark. [65] çalışmalarında, lif kümelenmesinin (dağılımının) çelik liflerle güçlendirilmiş beton kirişlerin yorulma davranışı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Kiriş üretiminde çelik lif hacimce %0, %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında kullanılmış olup, bir kiriş statik yükleme altında ve sekiz kiriş farklı stres seviyelerinde yorulma yüklemesi altında test edilmiştir. Ayrıca, betonun enine kesitindeki lif dağılımı deneysel olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, kirişin yorulma ömrünün, lif hacim oranı %0'dan %1.0'e yükseldikçe arttığını, %1,5'lik lif hacim oranına sahip kirişlerde önemli miktarda lif kümeleri olduğu için lif hacim oranı %1,0'dan %1,5 yükseldiğinde düştüğünü göstermiştir. Beton kesitteki lif mesafe dağılımının istatistiksel sonuçlarına dayanarak, çelik liflerle güçlendirilmiş beton kirişlerinin çatlak modelleri ABAQUS'taki beton hasarlı plastisite modelleri ile simüle edilerek yapılan analizler deney sonuçları ile nümerik olarak da doğrulanmıştır.

Wang ve ark. [66] çalışmalarında, hizalı ve rastgele yönlü dağılıma sahip paslanmaz çelik liflerin (görünüş oranı 30 ve 150) hacimce %0.2 ve %1.2 oranında reaktif pudra betona (kür süreleri 7 gün ve 60 gün) ilavesinin betonun iletken performansları (elektriksel direnç ve AC empedans spektroskopisi), ultrasonik atımlı dalga hızı ve piezodirenç özelliklerine etkisini incelemiştir. Ayrıca 60 günlük numunelerin basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve tokluğu belirlenmiştir. Son olarak, numunelerdeki paslanmaz çelik liflerin dağılımı ve yönelimi yüksek çözünürlüklü görüntülerle elde edilmiştir. Sonuçlar, paslanmaz çelik lifli reaktif pudra betonun ultrasonik atımlı dalga hızı ve elektrik direnci ile kür süresine arasında ikinci dereceden bir fonksiyon olduğunu göstermiştir. Ayrıca, daha yüksek en boy oranı ve hizalanmış liflere sahip reaktif pudra betonu daha iyi iletkenlik, piezodirenç ve mekanik performans sergilemiştir.

Kheddache ve ark. [67] çalışmalarında, düşük ve yüksek dozajlı kancalı çelik liflerin dağılımlarının kendiliğinden yerleşen harçların eğilmede çekme dayanımı ve mekanik davranışı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Numuneler, farklı dozajlardaki (hacimce %0.25, %0.40 ve %0.50) kancalı çelik lifleri üç katmana dağıtacak şekilde üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar, güçlendirilmiş kendiliğinden yerleşen harçların eğilme yükü altındaki mekanik davranışının ve eğilme dayanımının, tabakalardaki lif dağılımına doğrudan bağlı olarak anlamlı ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Bu sonuç, uygulama sırasında çimento matrisindeki çelik lif dağılımının önemini açıkça göstermiştir. Çelik liflerin katmanlara göre dağılımı, düşük dozajda %71.83 ve yüksek dozajda %100'ün üzerinde bir dayanım artışını mümkün kılmıştır.



Yang ve ark. [68] çalışmalarında, çelik lif takviyeli betonda, lif dağılımının tek yönlülüğünü değerlendirmek için basit bir tahribatsız muayene yöntemi önermiştir. Çalışma sonucunda yapılan değerlendirmeler, Maxwell-Garnett karıştırma kuralına ve Clausius-Mossotti formülasyonuna dayalı olarak çıkarsanan, çelik lif takviyeli betonlarda birim hacim başına zayıflama sabiti ile çelik lif miktarı arasındaki ilişki aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemin doğrulanması için gerçek bir bina duvarını analiz etmek için bir iletim düzeninde ölçüm sistemi oluşturulmuştur. Ek olarak, deneyin geçerliliğini doğrulamak için kosinüs benzerlik indeksi önerilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sunulan yöntemin lif dağılımının tek biçimliliğini değerlendirmek için etkili ve basit olduğunu göstermiştir.

Kruschwitz ve ark. [69] çalışmalarında, yönlü veya rastgele lif yönelimli özel üretilmiş numuneler kullanılarak ultrasonik malzeme testi, elektrik empedans testi ve X-ışını bilgisayarlı tomografi sonuçları incelenmiştir. Lif yönelim ölçümleri için tahribatsız test tekniklerinin güvenilirliği araştırılmıştır. Elektriksel empedans testinde hem özdirenç hem de fazın lif yönelimi ve lif içeriğine duyarlı olduğu belirtilmiştir. Ultrasonik atımlı dalga hızı testi ile lif yönelimi ve lif içeriğinin belirlenmesi ile ilgili daha fazla sayıda çalışma yapılması gerektiği bildirilmiştir. X-ışını bilgisayarlı tomografi ile lif yönelimi ve lif içeriği ile ilgili matematiksel modeller oluşturulabilecek düzeyde anlamlı veri elde edilmiştir.

Lee ve ark.[70] çalışmalarında, yüksek performanslı lif takviyeli çimento esaslı kompozitlerde elektromanyetik dalga ile çelik lifler arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Çelik lif dağılım özellikleri ve lif içeriğinin bir fonksiyonu olarak yüksek performanslı lif takviyeli çimento esaslı kompozitin elektriksel iletkenliğinin değişimi, elektromanyetik seçiciliği ile korelasyonlarını belirlemek için mikro bilgisayarlı tomografi ve empedans ölçümlerine dayalı olarak incelenmiştir. Empedans sonuçları, kompozitte çelik liflerin elektrik ağı oluşturmadığını ve diğer karbon esaslı malzemeler olmadan tek başına çelik lif kullanılarak yüksek elektrik iletkenliğine sahip yüksek performanslı lif takviyeli çimento esaslı bir kompozitin üretilmesinin zor olduğunu göstermiştir.

Fladr ve ark. [71] çalışmalarında, bilgisayar destekli çelik lifli betonların dijital görüntü analizine dayanan yeni bir yaklaşım geliştirmiştir. Numune görüntülerdeki liflerin hızlı ve doğru tespiti için MATLAB ortamında “liflerin otomatik değerlendirmesi” programı hazırlanmıştır. Temel olarak, algılama algoritması çelik liflerin ve beton matrisin farklı yansımalarından yararlanmaktadır. Tüm süreç çok basittir ve hem laboratuvarında hem de

şantiyede başarıyla kullanılabilir. Bir metreküp betona 120 kg çelik lif ilavesi ile çeşitli yüksek performanslı beton karışımları üretilmiş ve lif dağılımının homojenliği karşılaştırılarak optimum karışım bileşimi seçilmiştir. Tünel kaplamaları için normal mukavemetli çelik lifli betonlardan yapılmış büyük ölçekli numuneler incelenmiş, analiz edilmiş ve karışımdaki liflerin yeterli homojen dağılımına ulaşıldığı sonucuna varılmıştır.

## 1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Lifli betonlarda lif dağılımı ve yöneliminin belirsizliği nedeniyle lifli beton özelliklerinin tahmin doğruluğu düşüktür. Bu nedenle lifli betonlarda homojen lif dağılımının belirlenmesi önemlidir. Lif dağılımını etkileyen etki değişkenleri oldukça fazladır ve mekanik özelliklerin tahmini için seçilebilecek eş zamanlı kontrol edilebilir değişken sayısı sınırlıdır. Çalışmanın amacı uygun değişim aralıkları dikkate alınarak eş zamanlı kontrol edilebilir etki değişkenlerinin lif dağılımı üzerindeki etki düzeylerini belirlemektir. Ayrıca elde edilen çelik lif dağılımına bağlı olarak ultrasonik atımlı dalga hızı ve eğilme dayanımının değişimi elde edilmiştir. Çalışmanın hedefi ise etki düzeyi düşük değişkenlerin elenerek gerçek lif dağılımı ile tahmini lif dağılımı arasında en küçük standart sapmayı verecek model oluşturmaktır.

Çelik lif dağılımı 150×150×600 mm kara prizma numunelerin üç parçaya bölünerek elde edilen ara kesit yüzeylerinde çelik lif adedinin göz ve dijital görüntü işleme yöntemiyle belirlenmiştir. Etki değişkeni olarak lif hacim oranı, lif uzunluğu ve karıştırma süresi seçilmiştir. Bu amaçla 15 deneme noktası belirlenmiş olup her bir deneme noktasında 3 adet olmak üzere 45 kare prizma numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Ara kesitte göz ve dijital görüntü işleme sonucu elde edilen lif adedi numune hacminde bulunan lif adedine bölünerek ara kesitteki lif dağılım oranı belirlenmiştir. Üç farklı kesitte elde edilen lif dağılım oranlarının değişkenliği lif dağılımının homojenliği ifade etmektedir. Ayrıca çalışma kapsamında kalıba beton döküm yönünün kesitteki lif homojenliğine etkisi de belirlenmiştir.

## MATERYAL VE METOT

### 1.3 Materyal

Çelik lif katkılı beton üretimi için 13-15 cm çökmeye sahip C30/37 beton sınıfı kullanılmıştır. C30/37 beton üretimi için kullanılan beton bileşen malzeme miktarları Çizelge 2.1’de görülmektedir. Çelik lif katkılı beton üretimi için kullanılan çelik liflere ait özellikler ise Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 0.1. C30/37 beton bileşen malzeme miktarları

Kum, doğal	Kırma taş tozu, kalker	Mıdır I, kalker	Çimento, CEM I 42.5	Su, çeşme	Su/Çimento	Kimyasal katkı, Hava polimer	
<b>kg/m<sup>3</sup>Beton</b>							
587	213	1062	325	146	0.45	3.25	0.013

Çizelge 0.2. Çelik lif özellikleri

Sıra no	Tip	Kenar türü	Açı °	Lif uzunluğu, l mm	Lif çapı, φ mm	Görünüş oranı, l/φ mm/mm	Çekme dayanımı, σ <sub>u</sub> MPa
1	Soğuk çekme	Kıvrımlı	45	35	0.7	50	1400
2	Soğuk çekme	Kıvrımlı	45	50	1	50	1200
3	Soğuk çekme	Kıvrımlı	45	60	0.9	66	1100

### 1.4 Metot

Çelik lif katkılı beton, çelik liflerin taze beton aşamasında harmana ilave edilmesi ile üretilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle çelik lif katkılı betonlarda lif dağılımını etkileyen etki değişkenlerinin etki düzeylerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca lif dağılımını etkileyen etki değişkenlerinin mekanik özelliklere etkisi de belirlenmiştir. Çelik lif katkılı betonlarda lif dağılımını ve mekanik özellikleri (ultrasonik atımlı dalga hızı, UPV, eğilme dayanımı,  $f_{ct}$ ) etkileyen etki değişkenleri olarak lif hacim oranı (harman hacmince), karıştırma süresi ve lif uzunluğu seçilmiştir. Bu amaçla deneysel tasarım için 15 deneme noktası belirlenmiştir. Deneme noktaları rastgele seçilmiş olup 3 adet merkez noktası için üretim yapılmıştır. Merkez noktası her bir deneme noktası için 150×150×600 mm boyutlarında 3 adet

beton prizma numunesi olmak üzere toplam 45 adet numune üretilmiştir. Deneme noktaları ve etki değişkenlerine ait değişim aralıkları Çizelge 2.3’de görülmektedir.

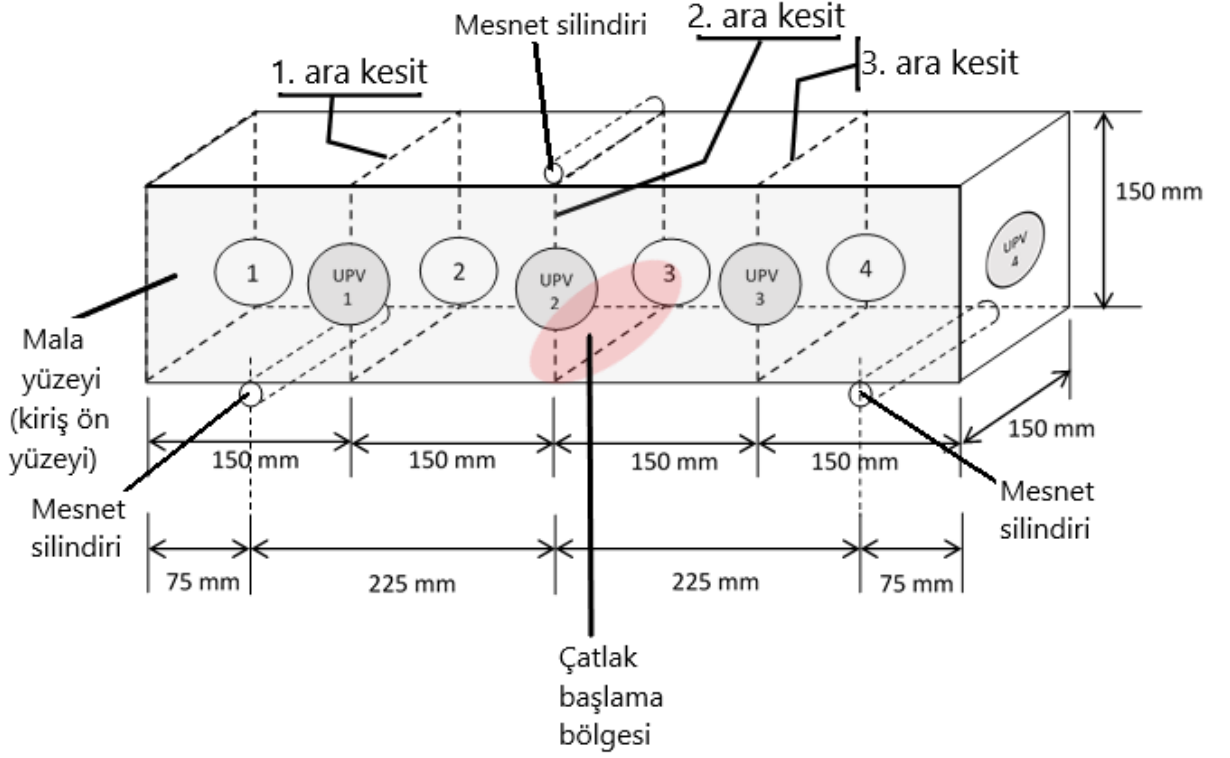
Çizelge 0.3. Deneme noktaları ve etki değişkeni değişim aralıkları

Deneme noktası	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3
	A: Lif hacim oranı	B: Karıştırma süresi	C: Lif uzunluğu
	%	dk.	mm
1	1	12	50
2	3	5	50
3	1	8,5	60
4	1	5	50
5	2	8,5	50
6	2	5	35
7	1	8,5	35
8	2	8,5	50
9	3	8,5	35
10	2	8,5	50
11	3	12	50
12	2	12	60
13	2	5	60
14	2	12	35
15	3	8,5	60

Her bir deneme noktası için üretilen 3 adet numune üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ait sıralama aşağıda verilmiştir.

- Ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi,
- Eğilme deneyi,
- Çelik lif dağılımının belirlenmesi için numunelerin kesimi,
- Ara kesitlerde gözle çelik lif sayısının belirlenmesi,
- Ara kesitlerin dijital görüntüsünün alınması ve dijital görüntü işleme ile çelik lif sayısının belirlenmesi,

150×150×600 mm boyutlarındaki çelik lifli beton kiriş numunesinin şematik görünüşü Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. 150×150×600 mm çelik lifli beton kiriş numunesinin şematik görünüşü

#### 1.4.1 Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı (UPV)

Kiriş numuneleri üzerinde ultrasonik atımlı dalga hızı (UPV) deneyi TS EN 12504-4[72] standardına göre gerçekleştirilmiştir. 150×150×600 mm boyutlarındaki beton kiriş numunesi üzerinde UPV için ölçüm alınan dört farklı nokta (UPV-1, UPV-2, UPV-3 ve UPV-4) Şekil 2.1’de görülmektedir. Ultrasonik atımlı dalga hızı deney aleti Şekil 2.2’de verilmiştir. UPV değeri deney ile ölçülen ultrasonik atımlı dalganın iki prob arasındaki mesafeyi geçiş süresinin dalganın geçtiği mesafeye bölünmesi ile (Eşitlik 2.1) hesaplanmaktadır. UPV-1, UPV-2 ve UPV-3 deneylerinde iki prob arasındaki mesafe 150 mm, UPV-4 deneyinde ise iki prob arasındaki mesafe 600 mm’dir.

$$UPV = \frac{L}{t} \quad (2.1)$$

UPV: Ultrasonik atımlı dalga hızını belirtir, (km/s),

L: Ultrasonik atımlı dalganın kat ettiği mesafeyi belirtir, (mm),

t: Ultrasonik atımlı dalğanın mesafeyi geçiş süresini belirtir, ( $\mu\text{s}$ ).



Şekil 2.2. Ultrasonik atımlı dalga hızı deney aleti

#### 1.4.2 Eğilme Dayanımı ( $f_{cf}$ )

Eğilme dayanımı ( $f_{cf}$ ) TS EN 12390-5 [73] standardına göre gerçekleştirilen eğilme deneyi ile belirlenmiştir.  $150 \times 150 \times 600$  mm boyutlarındaki beton kiriş numunesi üzerinde gerçekleştirilen eğilme deneyi orta noktadan (kiriş kırılma bölgesi ikinci ara kesit olarak adlandırılmıştır) yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir ve deney düzeneği şematik olarak Şekil 2.1’de görülmektedir. Eğilme deneyi deney aleti Şekil 2.3’de verilmiştir. Eğilme dayanımı Eşitlik 2.2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$f_{cf} = \frac{F \cdot L}{d_1 \cdot d_2^2} \quad (2.2)$$

$f_{cf}$ : Eğilme dayanımını belirtir, MPa (N/mm<sup>2</sup>),

F: En büyük yükü belirtir, (N),

L: Mesnet silindirleri arasındaki açıklığı belirtir, (mm),

$d_1, d_2$ : Numunenin en kesit boyutlarını belirtir, (mm).



Şekil 2.3. Eğilme dayanımı deney aleti

### 1.4.3 Beton Kiriş Numunelerin Kesimi

Çelik lif dağılımının belirlenmesi amacıyla eğilme deneyi sonucu ikiye ayrılan numune parçaları birinci ve üçüncü ara kesitlerden (Şekil 2.1) taş kesme aleti ile kesilerek iki adet 150×150×150 mm boyutlarında küp numunesi elde edilmiştir. Taş kesme deney aleti Şekil 2.4’de görülmektedir.

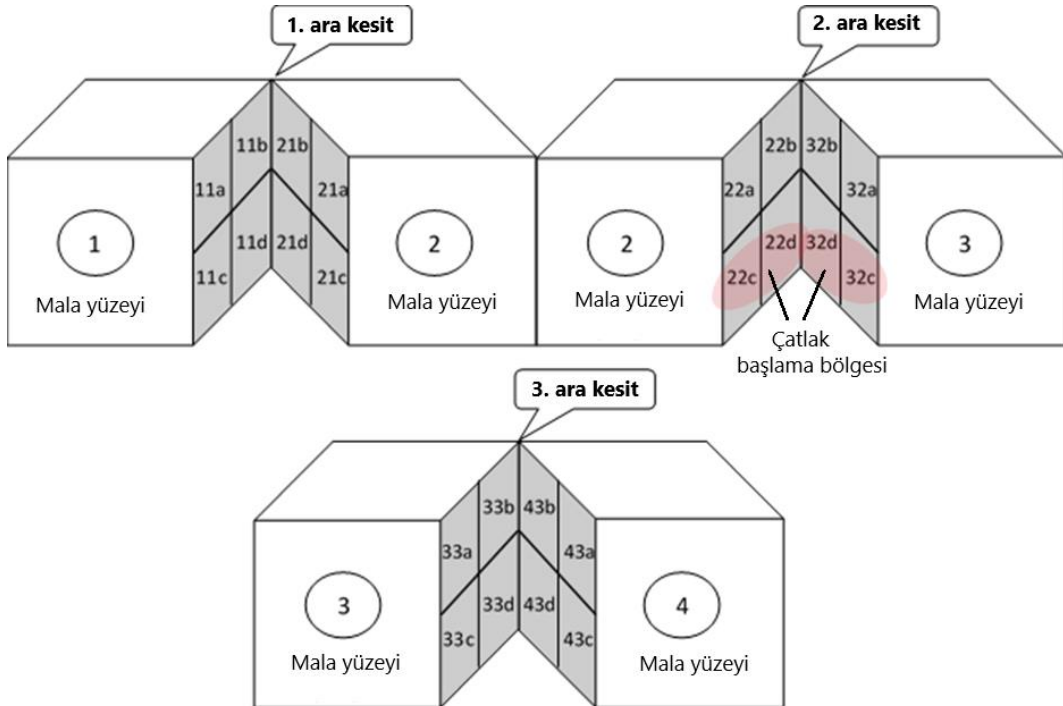


Şekil 2.4. Taş kesme deney aleti

### 1.4.4 Gözle Sayım İle Çelik Lif Dağılımının Belirlenmesi

Kesim ve eğilmede çekme deneyi sonucu kiriş numunesi 4 parçaya ayrılmıştır (Şekil 2.1). Lif sayımı dört parçanın birleştiği birinci, ikinci ve üçüncü ara kesitlerde ve her bir kesitteki iki yüzey üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sayım yapılacak yüzey dört eşit bölgeye bölünerek lif sayıları, mala yüzeyi alt bölgesi ve çatlak başlama bölgesinde (eğilmede çekme yükü uygulama yönüne bağlı olarak) de belirlenmiştir. Lif sayımının gerçekleştiği bölgelere ait kodlamalar: 11a, 11b, 11c, 11d, 21a, 21b, 21c, 21d, 22a, 22b, 22c, 22d, 32a, 32b, 32c, 32d, 33a, 33b, 33c, 33d, 43a, 43b, 43c ve 43d. Kodlamaların ifade ettiği bölümler Şekil

2.5’de görülmektedir. Kodlamalarda kullanılan ifadeler; ilk rakam numune parçası, ikinci rakam ara yüzeyi ve harfler ise yüzeyin 4 eşit bölümü. Birinci ve üçüncü kesitlerdeki iki yüzeyde bulunan bazı bölgelerdeki lif sayıları (1. ara kesit; 11a-21a, 11b-21b, 11c-21c ve 11d-21d, 3. ara kesit; 33a-43a, 33b-43b, 33c-43c ve 33d-43d) birbiri ile örtüştüğü için örtüşen bölgelerdeki lif miktarı iki bölgeden elde edilen sayım sonuçlarının ortalaması (örneğin; 1a bölgesi-birinci ara kesit yüzeyi a bölgesi- lif sayısı =  $(11a \text{ lif sayısı} + 21a \text{ lif sayısı})/2$ ) alınarak belirlenmiştir. Eğilmede çekme sonucu oluşan ikinci ara kesitteki toplam lif sayıları, liflerin sıyrılması sonucu kırılma gerçekleştiği için kesitte örtüşen iki yüzeyde sayılan lif miktarlarının toplanması ile hesaplanmıştır. Elde edilen lif sayılarının numunedeki toplam lif sayısına oranlanması ile ara yüzeylerdeki lif dağılımı % olarak hesaplanmıştır. Beton döküm yönüne bağlı olarak liflerin dağılımının değişimi, mala yüzeyinin alt bölgesindeki lif sayısının kesit yüzeyindeki toplam lif sayısına oranlanması ( $\text{ara yüzey} = (b+d)/(a+b+c+d)$ );  $b = (11b+21b)/2$ ,  $d = (11d+21d)/2$ ,  $a = (11a+21a)/2$  ve  $c = (11c+21c)/2$  ile belirlendi. Ayrıca eğilmede çekme deneyinde çatlak başlama bölgesindeki lif dağılımı, çatlak başlama bölgesindeki lif sayısının ara yüzeydeki toplam lif sayısına oranı ( $\text{ara yüzey} = (c+d)/(a+b+c+d)$ ) olarak hesaplandı. Bir deneme noktası için ara kesit, mala yüzeyi (beton döküm yönü) ve çatlak başlama bölgesindeki lif dağılımları bir deneme noktasında üretilen üç numunedeki lif dağılımlarının ortalaması alınarak elde edilmiştir.



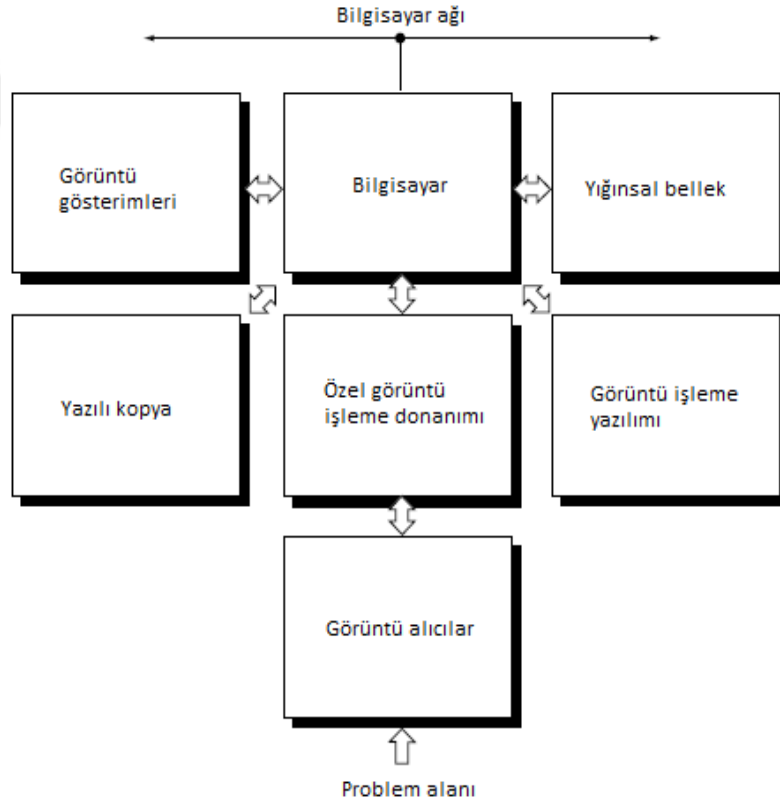
Şekil 2.5. Lif sayımı yapılan yüzeyler ve kodlamaları



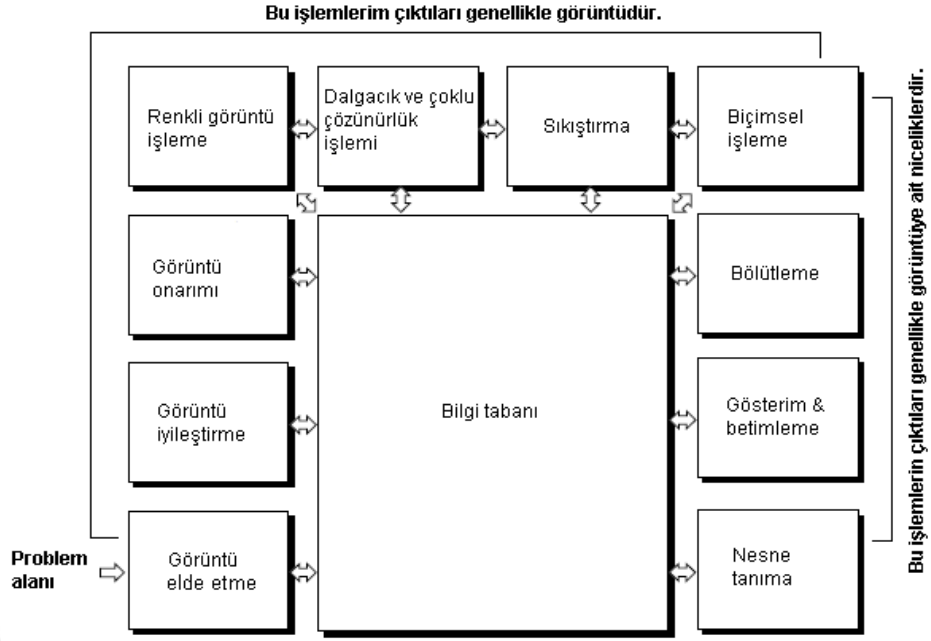
#### 1.4.5 Çelik Lif Dağılımının Dijital Görüntü İşleme (DGİ) İle Belirlenmesi

Lif dağılımının belirlenmesi amacıyla farklı yöntemler kullanılmaktadır. Farklı teknikler içerisinde görüntü analizi lif dağılımı ve yönelimi hakkında doğrudan bilgi sağlamaktadır [29]. Bu nedenle tez kapsamında lif dağılımının belirlenmesi amacıyla dijital görüntü işleme yöntemi de kullanılmıştır.

Dijital görüntü işleme (DGİ) yönteminde uygun çözünürlüğe sahip algılayıcılarla elde edilen görüntüler kullanılmalıdır. Bu görüntüler işlenerek numune kesitinin aslına en yakın şekilde sayısal ortama aktarılması hedeflenmektedir. Genel amaçlı görüntü işleme sisteminin bileşenleri Şekil 2.6'da, DGİ yönteminde kullanılan temel adımlar ise Şekil 2.7'de görülmektedir. DGİ temel adımları; görüntü edinimi, görüntü iyileştirmesi, görüntü onarımı, renkli görüntü işleme, dalgacık ve çoklu çözünürlük işleme, görüntü sıkıştırma, biçimsel işleme, bölütleme (bölme), gösterim (temsil) ve betimleme (tasvir), nesne tanıma şeklinde sıralanmaktadır [74].



Şekil 2.6. Genel amaçlı görüntü işleme sisteminin bileşenleri [74]



Şekil 2.7. Genel amaçlı görüntü işleme sisteminin temel adımları [74]

Dijital görüntü işleme ile lif dağılımının belirlenmesi amacıyla görüntü alınan yüzeyler Şekil 2.5’de (11, 21, 33 ve 43 yüzeyleri) görülmektedir. İkinci ara kesitte kesit geometrisi nedeniyle DGI uygulanamamıştır. DGI ImageJ programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

## 2. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

### 2.1 Çelik Lif Dağılımı

Çelik lif dağılımı gözle sayım ve dijital görüntü işleme ile belirlenmiştir.

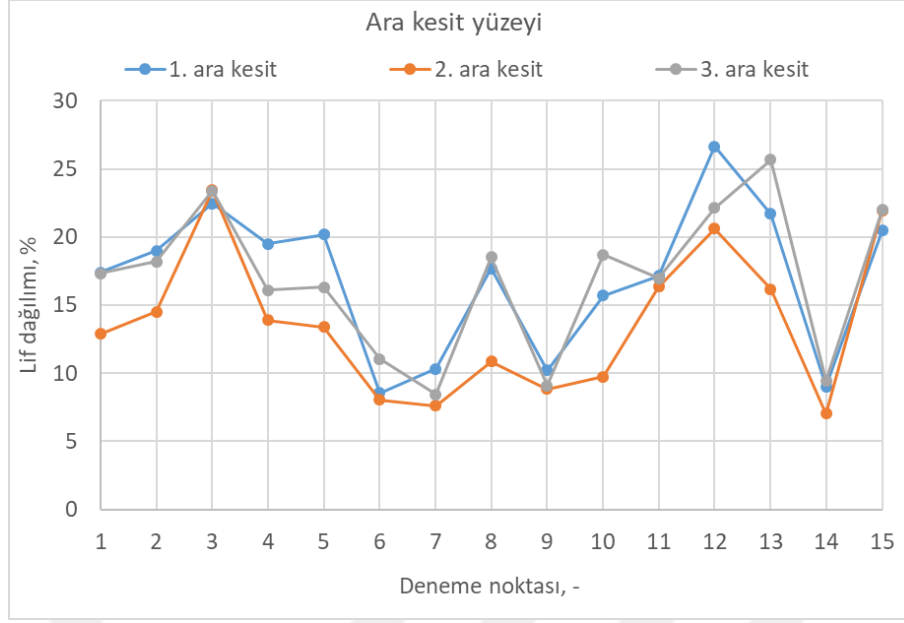
#### 2.1.1 Gözle Sayım İle Belirlenen Çelik Lif Dağılım Sonuçları

Gözle sayım sonucu belirlenen lif sayılarına bağlı olarak deneme noktaları için hesaplanan lif dağılımları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Ayrıca deneme noktasına bağlı olarak birinci, ikinci ve üçüncü ara kesitlere ait kesit ara yüzey ve mala yüzeyi alt bölgesi lif dağılımlarının değişimi sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de görülmektedir.

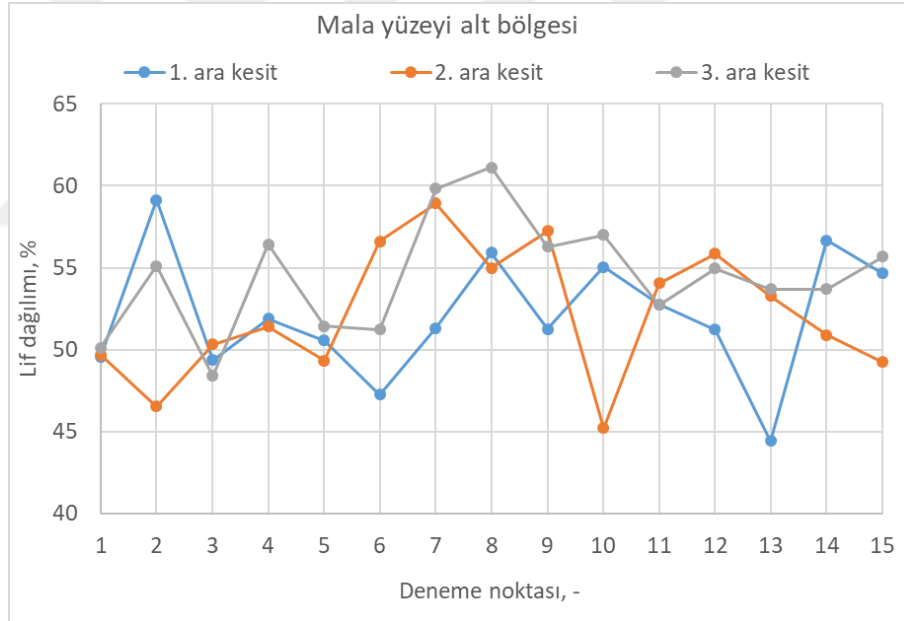
Çizelge 2.1. Gözle sayım sonucu elde edilen lif dağılımları

Deneme noktası	Lif dağılımı									
	1. ara kesit			2. ara kesit			3. ara kesit			
	A	B	C	Ara yüzey	Malayüzeyi alt bölgesi	Ara yüzey	Malayüzeyi alt bölgesi	Çatlak başlama bölgesi	Ara yüzey	Malayüzeyi alt bölgesi
	%	dk.	mm	%	%	%	%	%	%	%
1	1	12	50	17.41	49.55	12.88	49.70	46.99	17.34	50.11
2	3	5	50	19.00	59.15	14.51	46.52	48.48	18.22	55.11
3	1	8,5	60	22.45	49.37	23.45	50.32	44.86	23.41	48.39
4	1	5	50	19.51	51.89	13.89	51.40	48.04	16.12	56.44
5	2	8,5	50	20.19	50.58	13.40	49.35	50.94	16.31	51.43
6	2	5	35	8.57	47.26	8.04	56.62	48.76	11.05	51.22
7	1	8,5	35	10.33	51.32	7.61	58.92	48.78	8.45	59.84
8	2	8,5	50	17.69	55.92	10.86	55.00	53.57	18.53	61.12
9	3	8,5	35	10.22	51.26	8.86	57.26	52.95	9.10	56.28
10	2	8,5	50	15.71	55.06	9.74	45.22	49.60	18.69	57.00
11	3	12	50	17.16	52.75	16.35	54.07	41.82	16.97	52.74
12	2	12	60	26.64	51.22	20.62	55.85	44.70	22.14	54.96
13	2	5	60	21.71	44.44	16.17	53.26	46.62	25.66	53.69
14	2	12	35	9.02	56.67	7.04	50.90	51.09	9.46	53.71
15	3	8,5	60	20.46	54.67	21.94	49.26	46.22	21.98	55.67

Çizelge 3.1, Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 incelendiğinde birinci ara kesit ve üçüncü ara kesit yüzeyinde bulunan lif miktarları benzerlik göstermektedir. İkinci ara kesit yüzeyinde elde edilen lif dağılımları birinci ve üçüncü ara kesit yüzeylerindeki lif dağılımından azda olsa farklılık göstermektedir. Lif dağılımındaki bu farklılık ikinci ara kesit yüzeyinin eğilme deneyi esnasında liflerin sıyrılması ile elde edilmesi esnasında bazı liflerin kesit yüzeyinden ayrılmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.8. Ara kesit yüzeyi lif dağılımlarının değişimi



Şekil 3.2. Mala yüzeyi alt bölgesi lif dağılımlarının değişimi

Beton döküm yönüne bağlı olarak liflerin vibrasyon nedeniyle çelik liflerin kalıp veya kesit alt bölgesine yönelmesi ile kesitteki lif dağılımının homojenliğini etkileyeceği düşünülmektedir. Fakat Şekil 3.2 incelendiğinde en yüksek mala yüzeyi alt bölgesi lif dağılımı 8 nolu deneme noktasında üçüncü ara kesitte %61.12 olarak elde edilmiştir. 8 nolu deneme noktasında birinci ara kesit mala yüzeyi alt bölgesi lif dağılımı ise 55.92'dir. Bu

nedenle çalışma kapsamında üretilen betonda beton döküm yönüne bağlı olarak kesitteki lif dağılımı homojenliğinin etkilenmediği söylenebilir.

Seçilen etki değişkenlerinin(lif hacim oranı, karıştırma süresi ve lif uzunluğu) ana, etkileşim vb. terimlerinin tepki değişkeni(lif dağılımı) üzerindeki etki düzeyleri ANOVA[75] ile belirlenmiştir. Birinci, ikinci ve üçüncü ara kesit yüzey lif dağılımlarına ait ANOVA ve uyum istatistiği sonuçları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Model terimlerinin anlamlılık düzeyi p-değerine göre belirlenmektedir. 0.0500’den küçük p-değeri model teriminin anlamlı (anlamlı etki düzeyine sahip), 0.1000’den büyük p-değeri ise model terimlerinin anlamsız (anlamsız etki düzeyine sahip) olduğunu göstermektedir[75]. Tüm ara kesitlerin lif dağılımlarının tahmini için etki değişkenlerine bağlı olarak anlamlı lineer modeller (model p-değeri < 0.0001) elde edilmiştir. Lif dağılımları üzerinde sadece lif uzunluğu değişkeninin anlamlı etkiye (p –değeri < 0.0001) sahip olduğu Çizelge 3.2’de görülmektedir. Uyum yokluğu değerinin anlamsız elde edilmesi beklenen bir durumdur ve etki değişkenlerinin seçilen değişim aralığında tepki değişkeni üzerinde yeterli gürültü oluşturduğunu göstermektedir. Tüm kesitler için uyum yokluğu anlamsız elde edilmiştir. ANOVA sonucu birinci, ikinci ve üçüncü kesit yüzeyi lif dağılımları için gerçek değerlere göre elde edilen modeller sırasıyla Eşitlik 3.1, Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3’de verilmiştir. Elde edilen modellerin uyum istatistiği incelendiğinde (Çizelge 3.2) birinci ve üçüncü kesit yüzeyi lif dağılımı için  $R^2$  değerleri sırasıyla 0.9055 ve 0.9604 edildiği görülmektedir. İkinci ara kesit yüzeyi lif dağılımına ait  $R^2$  değeri ise 0.8757 olarak elde edilmiştir. Modele eklenen terim sayısı arttıkça  $R^2$  değeri yükselmektedir. Bu durum elde edilen modelin gerçek tepki değişkenlerini tahmin edilebilirliğini artırmamakla beraber her eklenen model terimi için gerekli deneme sayısını artırmaktadır. Bu nedenle ayarlı- $R^2$ - tahmini  $R^2$  değerlerinin 0.2’den düşük olması gerekmektedir [75]. Birinci, ikinci ve üçüncü ara kesit yüzey lif dağılımı için elde edilen modellerin ayarlı- $R^2$  - tahmini- $R^2$  değerleri sırasıyla 0.0517, 0.0474 ve 0.0243 olarak belirlenmiştir. Bu durum modellere eklenen terimlerin uygun olduğunu göstermektedir.

Çizelge 2.2. Ara kesit yüzeyi lif dağılımları için ANOVA

	1. ara kesit yüzeyi		2. ara kesit yüzeyi		3. ara kesit yüzeyi	
	p-değeri	Anlamlılık	p-değeri	Anlamlılık	p-değeri	Anlamlılık
Model	< 0.0001	Anlamlı	< 0.0001	Anlamlı	< 0.0001	Anlamlı
A-Lif hacim oranı	0.5976	Anlamsız	0.3788	Anlamsız	0.7813	Anlamsız
B-Karıştırma süresi	0.7906	Anlamsız	0.8818	Anlamsız	0.1604	Anlamsız
C-Lif uzunluğu	< 0.0001	Anlamlı	< 0.0001	Anlamlı	< 0.0001	Anlamlı
Uyum yokluğu	0.7474	Anlamsız	0.6692	Anlamsız	0.6777	Anlamsız

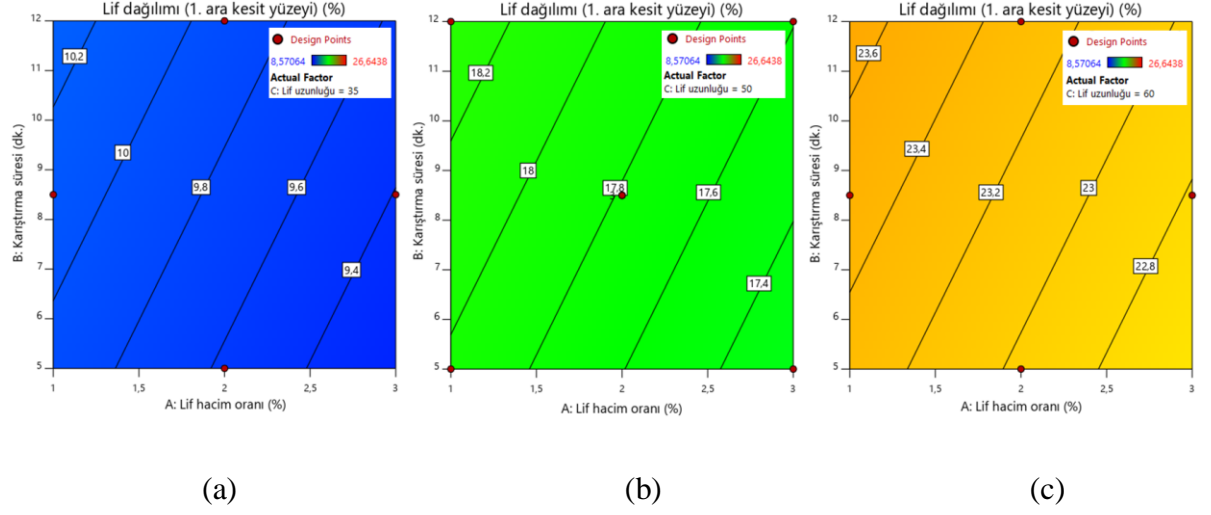
Uyum istatistiği			
R <sup>2</sup>	0.9055	0.8757	0.9604
Ayarlı R <sup>2</sup>	0.8797	0.8418	0.9496
Tahmini R <sup>2</sup>	0.8280	0.7944	0.9253

$$\text{Lif dağılımı (1. ara kesit)} = -8.7146 - 0.3585 \cdot A + 0.0513 \cdot B + 0.5356 \cdot C \quad (3.1)$$

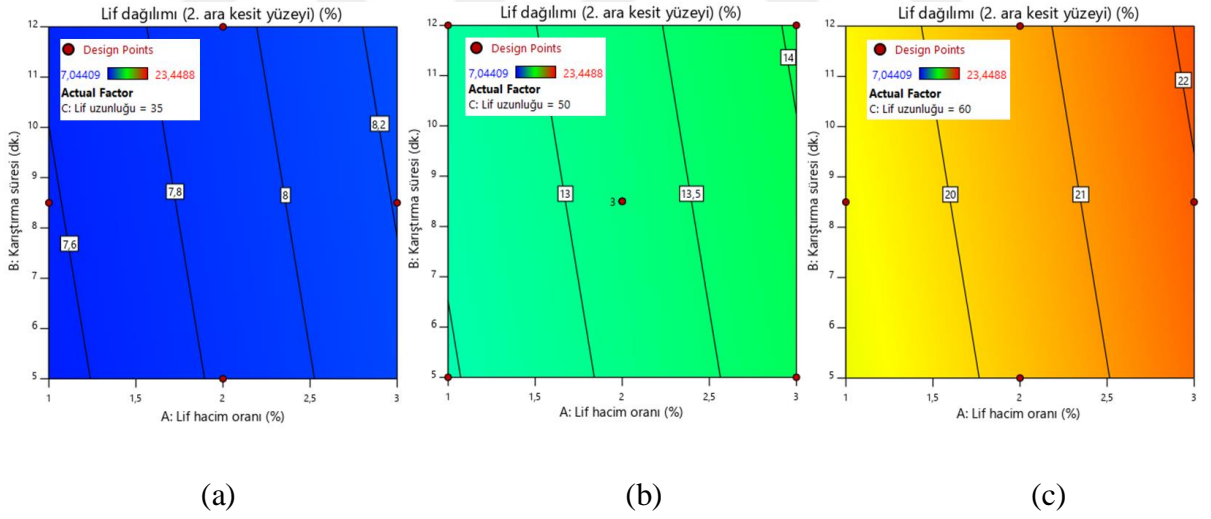
$$\frac{1}{\sqrt{\text{Lif dağılımı (2.ara kesit)}}} = 0.5631 - 0.0071 \cdot A - 0.0003 \cdot B - 0.0054 \cdot C \quad (3.2)$$

$$\text{Lif dağılımı (3. ara kesit)} = -8.5066 + 0.1211 \cdot A - 0.1831 \cdot B + 0.5490 \cdot C \quad (3.3)$$

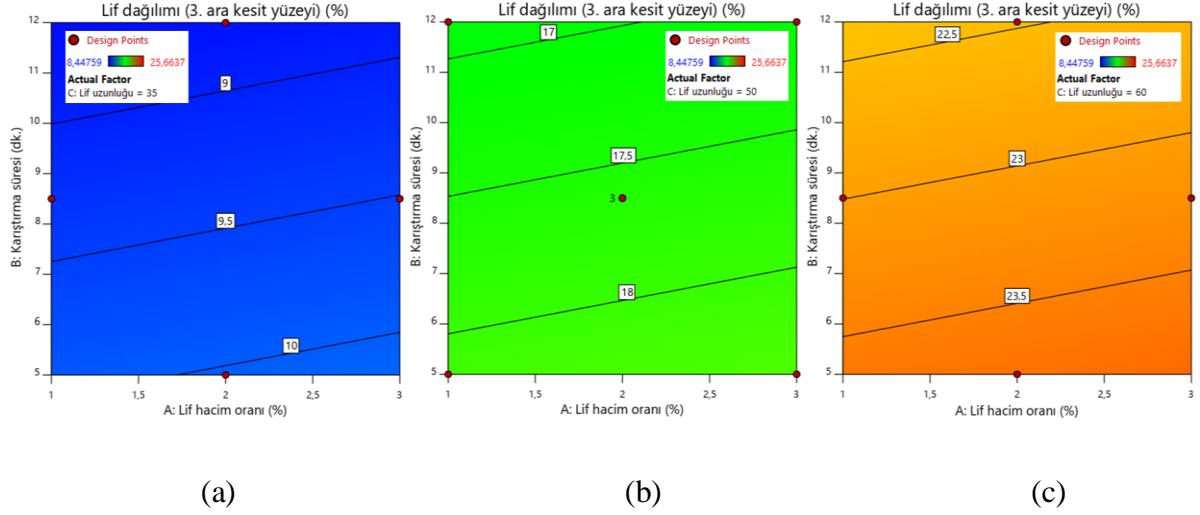
Tepki değişkeni üzerinde anlamlı etki düzeyine sahip C-Lif uzunlukları için birinci, ikinci ve üçüncü ara kesit yüzeyi lif dağılımlarına ait kontur grafikleri sırasıyla Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de görülmektedir. Tüm ara kesit yüzeyi lif dağılım miktarları lif uzunluğu arttıkça artmaktadır. Birinci, ikinci ve üçüncü ara kesit yüzey lif dağılımlarında lif uzunluğu 30 mm'den 60 mm arttırıldığında lif dağılımlarındaki artış miktarı yaklaşık sırasıyla %13.4, %14.4 ve %13.5 olmuştur. Birinci ara kesit yüzeyi maksimum lif dağılımı minimum lif hacim oranı ve maksimum karıştırma süresinde elde edilmiştir.



Şekil 3.3. Birinci ara kesit yüzeyi lif dağılımlarına ait kontur grafikleri; (a) 35 mm, (b) 50 mm ve (c) 60 mm

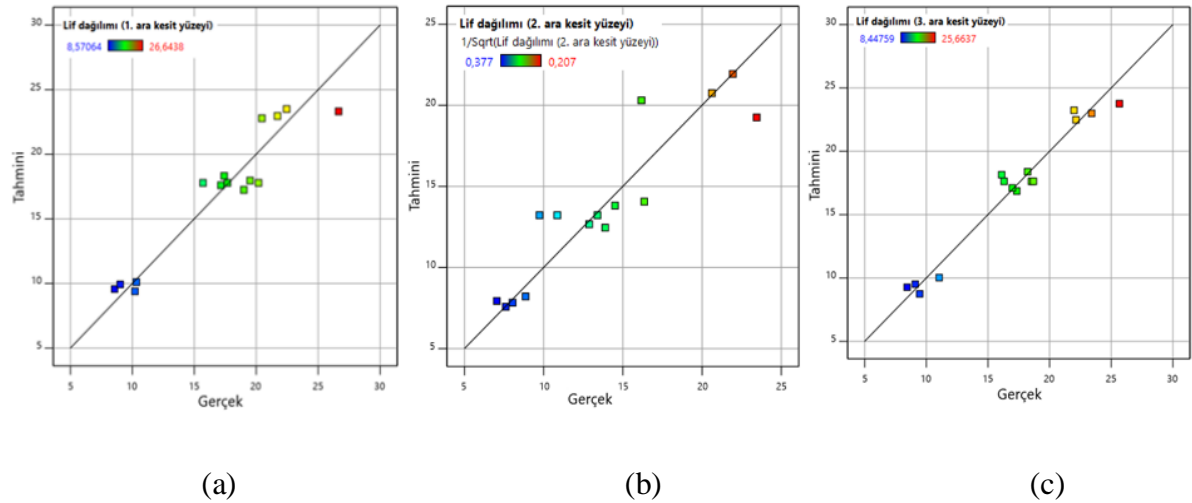


Şekil 3.4. İkinci ara kesit yüzeyi lif dağılımlarına ait kontur grafikleri; (a) 35 mm, (b) 50 mm ve (c) 60 mm



Şekil 3.5. Üçüncü ara kesit yüzeyi lif dağılımlarına ait kontur grafikleri; (a) 35 mm, (b) 50 mm ve (c) 60 mm

Ara kesit yüzeyi lif dağılım modellerinden elde edilen tahmini değerler ile deney sonucu elde edilen gerçek değerlere ait değişim Şekil 3.6’da görülmektedir. Birinci, ikinci ve üçüncü ara kesit yüzey lif dağılımlarındaki en büyük sapmalar (artık) sırasıyla 12 nolu deneme noktasında 3.22, 10 nolu deneme noktasında 0.04 ve 4 nolu deneme noktasında 2.03 olarak elde edilmiştir.

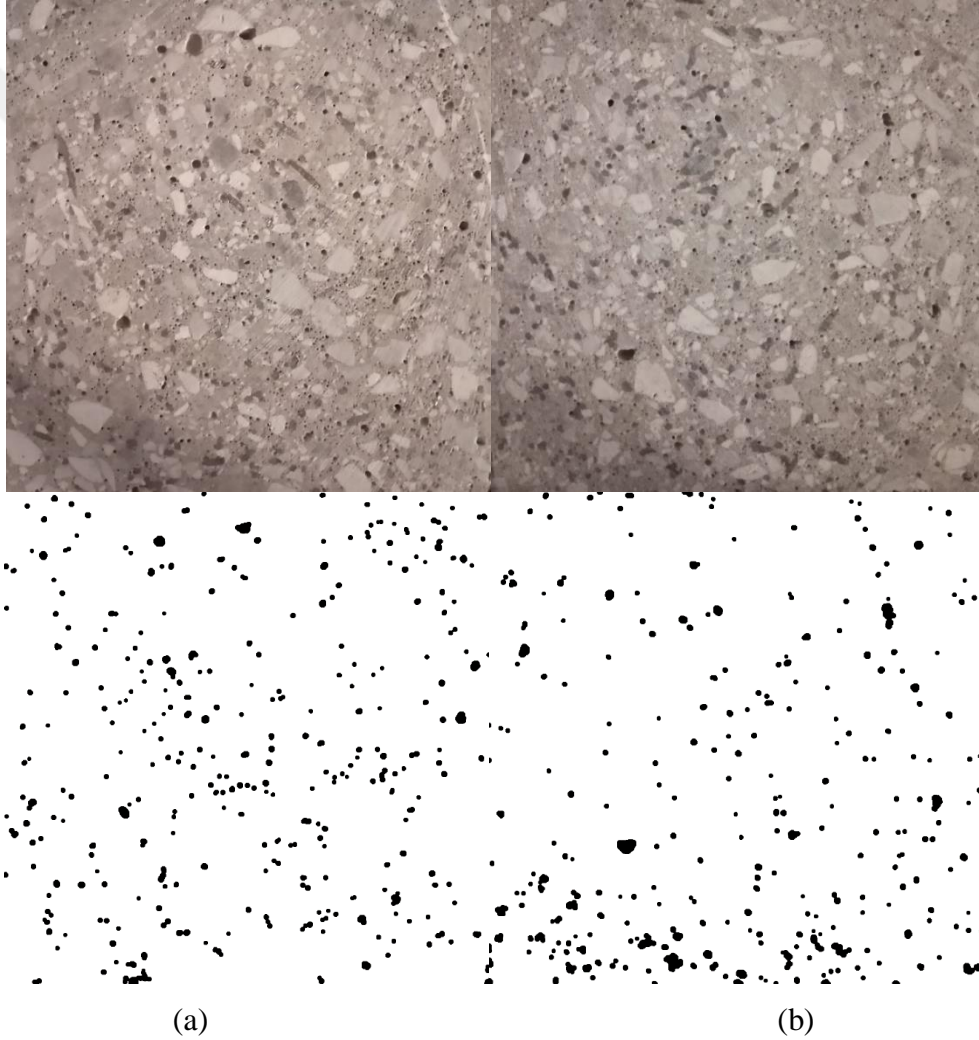


Şekil 3.6. Ara kesit yüzeyi lif dağılımlarının tahmini ve gerçek değerleri; (a) 1. ara kesit, (b) 2. ara kesit ve (c) 3. ara kesit

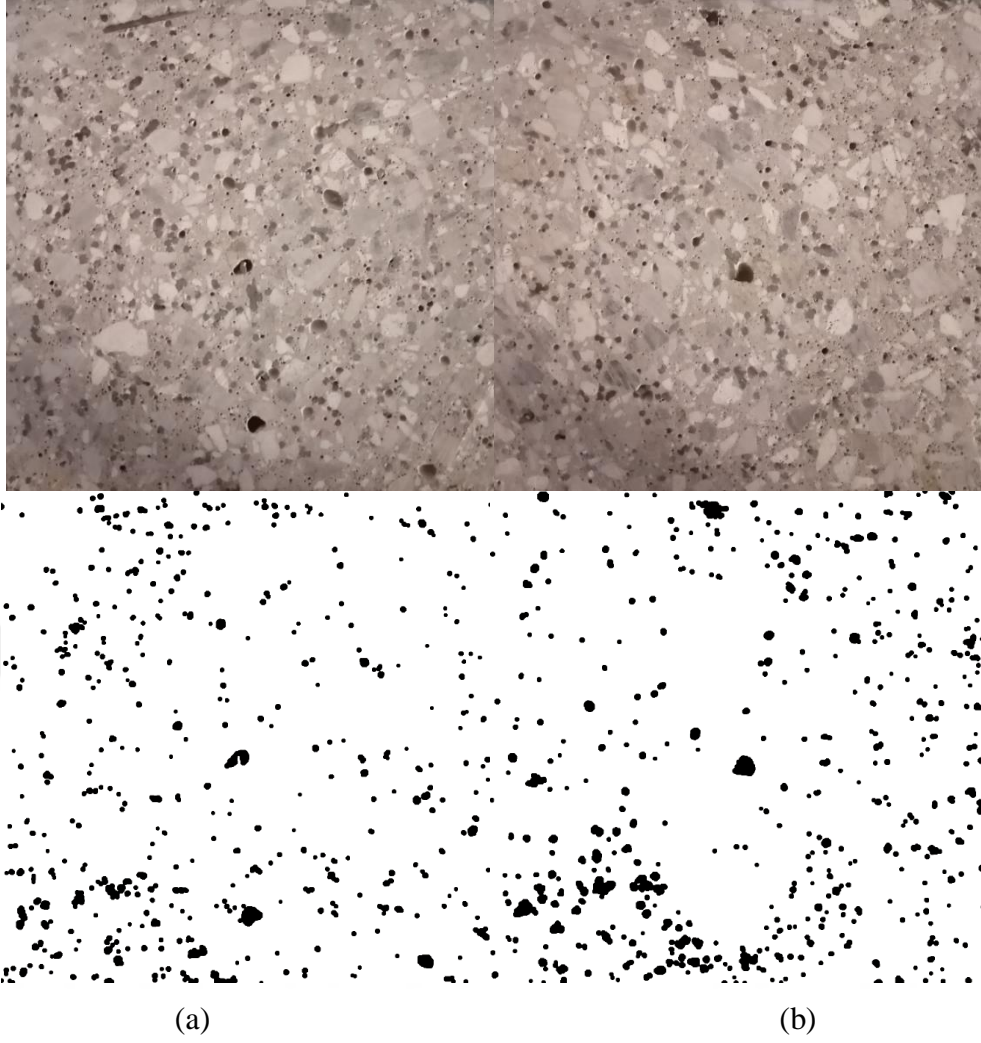


### 2.1.2 Dijital Görüntü İşleme (DGİ) İle Belirlenen Çelik Lif Dağılım Sonuçları

Örnek dijital görüntüler 10 nolu deneme noktasında ilk üretilen numunenin birinci ara kesit 11 ve 21 yüzeyi, üçüncü ara kesit 33 ve 43 yüzeyi için sırasıyla Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de görülmektedir. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7 incelendiğinde lif adedinin belirlenmesini etkileyecek gölgelenmeler ve beton içerisindeki boşlukların oluşturduğu karaltıların olduğu görülmektedir. Bu nedenle DGİ yöntemi ile lif adedinin belirlenme süreci çok fazla hassasiyet gerektirmektedir. Ayrıca lif dağılım oranının bilinmemesi DGİ ile belirlenecek lif adedinin sapmalar içerebileceğini göstermektedir. Bu nedenle DGİ ile lif adedi belirleme sürecinin başarısının esas olarak görüntü almadaki hassasiyet belirlemektedir.



Şekil 3.7. 10 nolu deneme noktası birinci numune birinci ara kesit dijital görüntüleri; (a) 11 yüzeyi, (b) 21 yüzeyi

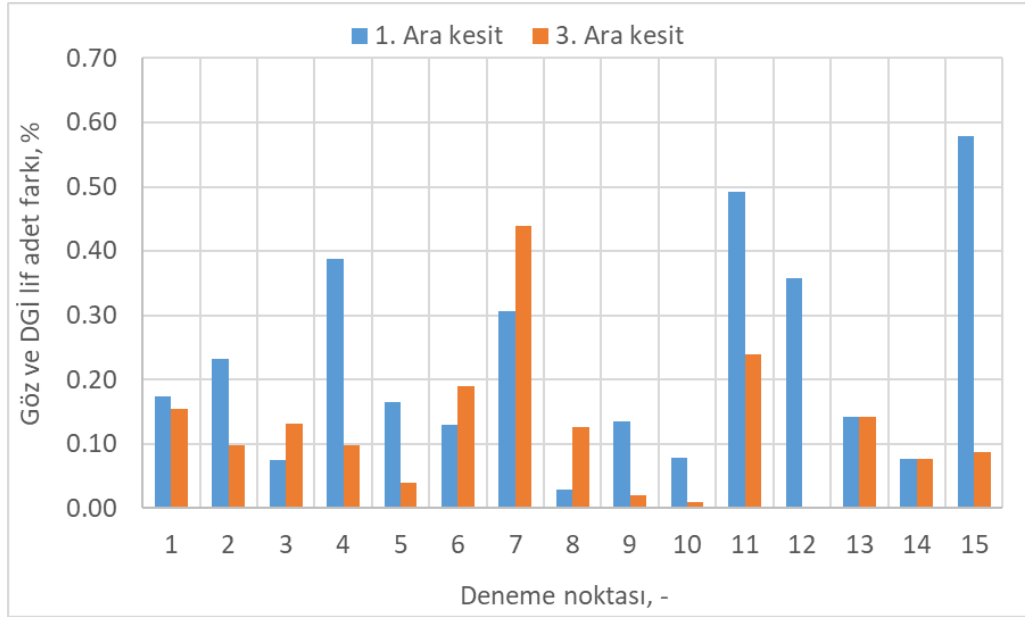


Şekil 3.8. 10 nolu deneme noktası birinci numune üçüncü ara kesit dijital görüntüleri; (a) 33 yüzeyi, (b) 43 yüzeyi

Deneme noktalarına ait DGİ ile belirlenen birinci ve ikinci ara kesit yüzeylerindeki lif dağılımları Çizelge 3.3’de verilmiştir. DGİ yöntemiyle belirlenen lif dağılım oranlarının gözle sayım arasındaki fark mutlak olarak belirlenmiştir. Birinci ve üçüncü arakesit için göz ile sayım yapılarak belirlenen (gerçek lif dağılımı) lif dağılımı ile DGİ yöntemiyle belirlenen lif dağılımları arasındaki fark Şekil 3.9’da görülmektedir.

Çizelge 2.3. DGİ ile elde edilen lif dağılım sonuçları

Deneme noktası	A: Lif hacim oranı	B: Karıştırma süresi	C: Lif uzunluğu	Lif dağılımı	
				1. ara kesit	3. ara kesit
				Ara yüzey	Ara yüzey
	%	dk.	mm	%	%
1	1	12	50	0.17	0.16
2	3	5	50	0.23	0.10
3	1	8,5	60	0.08	0.13
4	1	5	50	0.39	0.10
5	2	8,5	50	0.16	0.04
6	2	5	35	0.13	0.19
7	1	8,5	35	0.31	0.44
8	2	8,5	50	0.03	0.13
9	3	8,5	35	0.14	0.02
10	2	8,5	50	0.08	0.01
11	3	12	50	0.49	0.24
12	2	12	60	0.36	0.00
13	2	5	60	0.14	0.14
14	2	12	35	0.08	0.08
15	3	8,5	60	0.58	0.09



Şekil 3.9. Gözle sayım lif dağılımı ile DGİ yöntemiyle belirlenen lif dağılımı arasındaki fark

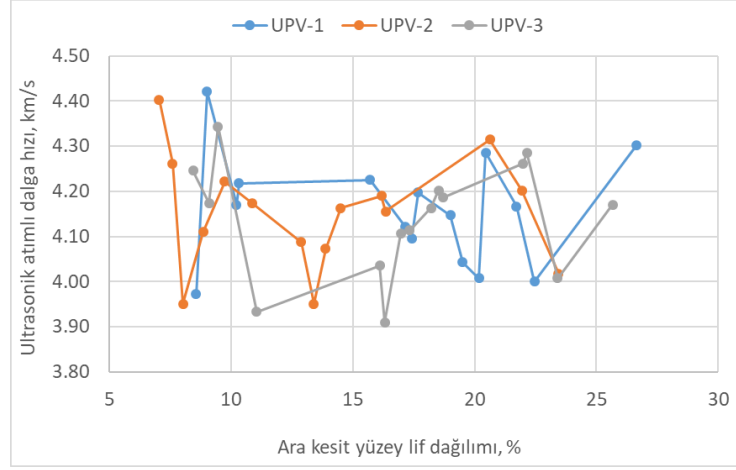
## 2.2 Mekanik Özellikler

### 2.2.1 Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı (UPV) Deney Sonuçları

Her bir deneme noktası için üretilen üç adet numune üzerinde birinci ara kesit (UPV-1), ikinci ara kesit (UPV-2), üçüncü ara kesit (UPV-3) ve numune boyunca (UPV-4) ultrasonik atımlı dalga hızı belirlenmiştir (Şekil 2.1). Bir deneme noktasına ait her bir UPV (1, 2, 3 ve 4) değeri için 3 adet numuneden elde edilen değerlerin ortalaması alınarak ortalama UPV değerlerine ulaşılmıştır. Deneme noktaları için belirlenen UPV-1, UPV-2, UPV-3 ve UPV-4 değerleri Çizelge 3.4’de verilmiştir. Ultrasonik atımlı dalga hızının ara kesit yüzeyi lif dağılımlarına göre değişimi Şekil 3.10’da görülmektedir. Şekil 3.10 incelendiğinde lif dağılımındaki değişimin UPV-1, UPV-2 ve UPV-3 değerlerini rastgele etkilediği yani aralarında bir korelasyon olmadığı görülmektedir.

Çizelge 2.4. Ultrasonik atımlı dalga hızı ve eğilme dayanımı deney sonuçları

Deneme noktası	A: Lif hacim oranı	B: Karıştırma süresi	C: Lif uzunluğu	UPV-1	UPV-2	UPV-3	UPV-4	$f_{cf}$
	%	dk.	mm	%	%	%	%	MPa
1	1	12	50	4.095	4.087	4.113	4.008	5.81
2	3	5	50	4.147	4.163	4.163	4.145	10.01
3	1	8,5	60	4.000	4.018	4.007	3.952	6.56
4	1	5	50	4.043	4.072	4.036	3.698	6.00
5	2	8,5	50	4.007	3.951	3.910	3.523	8.41
6	2	5	35	3.972	3.951	3.934	3.336	6.39
7	1	8,5	35	4.217	4.261	4.245	4.109	6.28
8	2	8,5	50	4.198	4.174	4.202	3.251	8.01
9	3	8,5	35	4.171	4.110	4.174	3.655	9.36
10	2	8,5	50	4.225	4.221	4.186	3.475	7.44
11	3	12	50	4.121	4.155	4.106	3.642	8.69
12	2	12	60	4.302	4.314	4.286	4.209	9.79
13	2	5	60	4.167	4.190	4.171	3.375	9.42
14	2	12	35	4.420	4.403	4.344	3.887	5.62
15	3	8,5	60	4.286	4.202	4.261	3.725	11.02

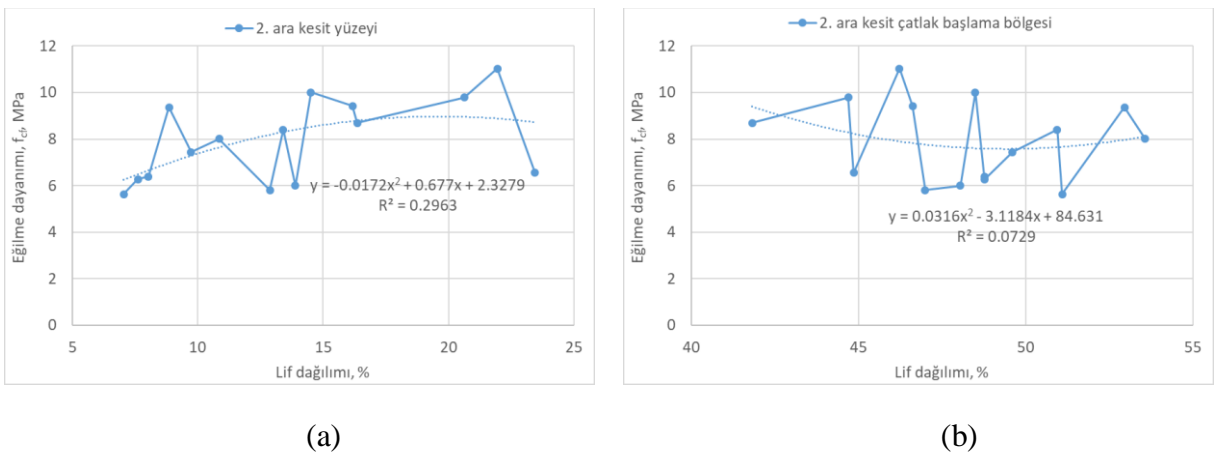


Şekil 3.10. Ultrasonik atımlı dalga hızının ara kesit yüzeyi lif dağılımlarına göre değişimi

Deneme noktalarında elde edilen UPV sonuçları (Çizelge 3.4) üzerinde gerçekleştirilen ANOVA sonuçlarına göre seçilen değişim aralığında etki değişkenlerinin UPV üzerinde anlamlı etkiye sahip terimlerinin (ana, etkileşim, ikinci derece vb.) olmadığı ve anlamlı bir model elde edilemediği tespit edilmiştir.

## 2.2.2 Eğilme Dayanımı ( $f_{cf}$ ) Deney Sonuçları

Deneme noktalarında elde edilen eğilme dayanımı sonuçları Çizelge 3.4’de verilmiştir. Eğilme dayanımının ikinci ara kesit yüzeyi (a) ve çatlak başlama bölgesi (b) lif dağılımlarına göre değişimi Şekil 3.11’de görülmektedir. Şekil 3.11 incelendiğinde lif dağılımları ile eğilme dayanımı arasında bir korelasyon olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.11. Eğilme dayanımının lif dağılımına göre değişimi; (a) 2. ara kesit yüzeyi, (b) çatlak başlama bölgesi

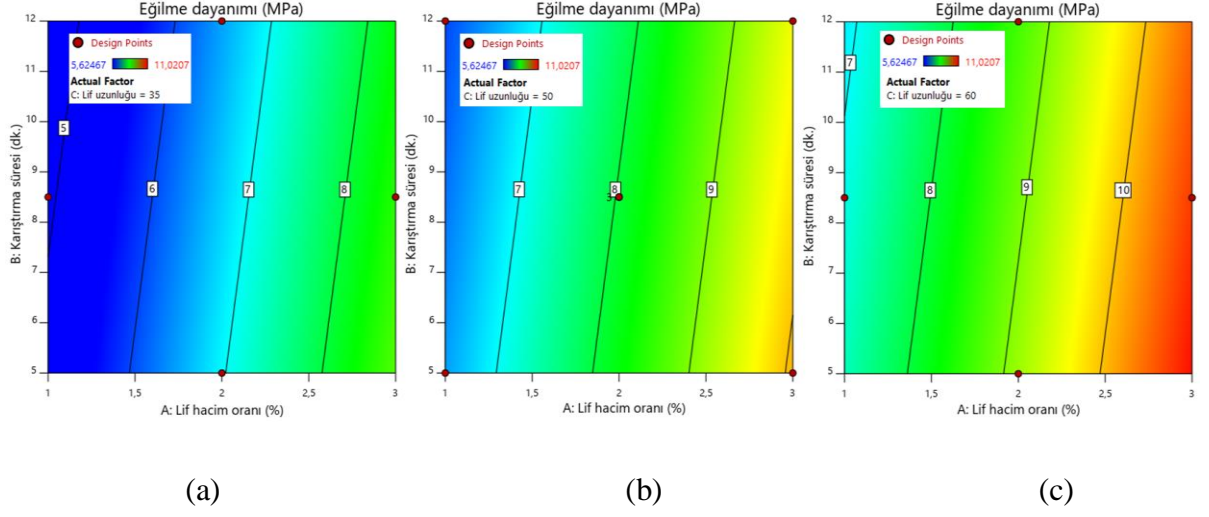
Deneme noktalarında elde edilen eğilme dayanımı sonuçları üzerinde gerçekleştirilen ANOVA ve uyum istatistiği sonuçları Çizelge 3.5’de görülmektedir. Etki değişkenlerine bağlı olarak eğilme dayanımı için lineer modelin anlamlı olduğu görülmektedir (Çizelge 3.5). Etki Bu nedenle modele etki değişkenlerinin sadece ana terimleri ilave edilmiştir. Lif hacim oranı ve lif uzunluğu eğilme dayanımı üzerinde anlamlı etki düzeyine sahipken (sırasıyla p-değeri < 0.0001 ve 0.0023) karıştırma süresi anlamlı etki düzeyine sahip değildir (p-değeri = 0.4151). Uyum yokluğu ise beklendiği gibi anlamsız olarak bulunmuştur. Elde edilen modele ait Eşitlik 3.4’de verilmiştir. Modelin R<sup>2</sup> değeri 0.8399 olarak elde edilmiştir. Ayarlı-R<sup>2</sup> - tahmini-R<sup>2</sup> arasındaki fark 0.1343 bulunmuştur ve bu değer 0.2’den yüksektir. Bu nedenle modele eklenen anlam düzeyi düşük terimlerin model uyumluluğunu etkilememiştir.

Çizelge 2.5. Eğilme dayanımı için ANOVA ve uyum istatistiği sonuçları

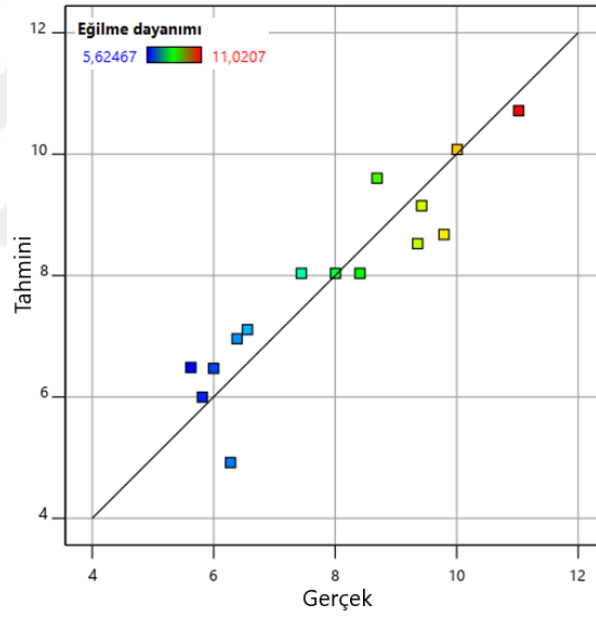
	Eğilme dayanımı		Uyum istatistiği		
	p-değeri	Anlamlılık	R <sup>2</sup>	Ayarlı R <sup>2</sup>	Tahmini R <sup>2</sup>
Model	0.0001	Anlamlı			
A-Lif hacim oranı	< 0.0001	Anlamlı			
B-Karıştırma süresi	0.4151	Anlamsız	0.8399	0.7963	0.6620
C-Lif uzunluğu	0.0023	Anlamlı			
Uyum yokluğu	0.2711	Anlamsız			

$$f_{cf} = 0.6236 + 1.8036 \cdot A - 0.0678 \cdot B + 0.0877 \cdot C \quad (3.4)$$

Eğilme dayanımına ait kontur grafikleri farklı lif uzunlukları için Şekil 3.12’de verilmiştir. Ayrıca gerçek ve tahmini eğilme dayanımlarının değişimi Şekil 3.13’de görülmektedir. Şekil 3.12 incelendiğinde lif hacim oranı ve lif uzunluğu arttıkça eğilme dayanımının arttığı, karıştırma süresindeki artışın ise eğilme dayanımında anlamlı bir değişim oluşturmadığı görülmektedir. Şekil 3.13 incelendiğinde beklendiği gibi modelden elde edilen tahmini değerler ile deney sonucu elde edilen değerlerin örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 3.12. Eğilme dayanımlarına ait kontur grafikleri; lif uzunluğu (a) 35 mm, (b) 50 mm ve (c) 60 mm



Şekil 3.13. Eğilme dayanımının tahmini ve gerçek değerleri

### 3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında lif hacim oranı, karıştırma süresi ve lif uzunluğunun lif dağılımının homojen dağılımı üzerindeki etki düzeyleri belirlenmiştir. Lif dağılımı göz ve dijital görüntü işleme yöntemi ile kiriş numunelerinin 150 mm aralıklarla üç ara kesit yüzeyindeki lif adetlerinin numune hacmindeki toplam lif adedine bölünmesiyle belirlenmiştir. Ayrıca beton döküm yönüne (mala yüzeyi) bağlı olarak betonun kalıba yerleştirilmesinden kaynaklı kesit lif dağılımındaki değişkenlik ve lif dağılımının ultrasonik atımlı dalga hızı ve eğilme dayanımlarına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Göz ve dijital görüntü işleme yöntemi ile belirlenen lif dağılım oranları benzerlik göstermektedir.
- Çalışma kapsamında üretilen betonda (C30/37, çökme = 13-15 cm) beton döküm yönüne bağlı olarak kesitteki lif dağılım homojenliği etkilenmemektedir.
- Genel olarak birinci ikinci ve üçüncü ara kesit yüzeylerinde bulunan lif miktarları benzerlik göstermektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında üretilen betonlarda seçilen etki değişkenlerine bağlı olarak lifler numune hacminde homojen dağılmaktadır.
- Ara kesit lif dağılımları için seçilen etki değişkenlerine bağlı olarak anlamlı lineer modeller ( $p$ -değeri  $< 0.001$ ) elde edilmiştir. Birinci, ikinci ve üçüncü ara kesit yüzey lif dağılımı için elde edilen modellerin ayarlı- $R^2$  - tahmini- $R^2$  değerleri sırasıyla 0.0517, 0.0474 ve 0.0243'dir ve bu durum modellere eklenen terimlerin etki düzeyinin yüksek olduğunu göstermektedir.
- Tüm ara kesit lif dağılımları üzerinde lif hacim oranı ve karıştırma süresi etki değişkeni anlamsız etki düzeyine sahiptir. Lif uzunluğu ise anlamlı etki düzeyine sahiptir.
- Ara kesit lif dağılımının ultrasonik atımlı dalga hızı değerlerini rastgele etkilemektedir ve aralarında bir korelasyon bulunmamaktadır.
- Lif hacim oranı, karıştırma süresi ve lif uzunluğu etki değişkenlerinin UPV üzerinde anlamlı etki düzeyine sahip değildir.



- Ara kesit lif dağılımının eğilme dayanımı değerlerini rastgele etkilemektedir ve aralarında bir korelasyon bulunmamaktadır.
- Etki değişkenlerine bağlı olarak eğilme dayanımı için anlamlı bir lineer model elde edilmiştir. Lif hacim oranı ve lif uzunluğu eğilme dayanımı üzerinde anlamlı etki düzeyine sahipken (sırasıyla p-değeri < 0.0001 ve 0.0023) karıştırma süresi anlamlı etki düzeyine sahip değildir (p-değeri = 0.4151). Modelin  $R^2$  değeri 0.8399 olarak elde edilmiştir ve bu değer gerçek değerlerle tahmini değerlerin iyi bir örtüşme sağladığını göstermektedir. Ayarlı- $R^2$  - tahmini- $R^2$  arasındaki fark 0.1343 olduğu için modele eklenen anlam düzeyi düşük terimler model uyumluluğunu etkilememektedir.

Çalışma kapsamında kullanılan 13-15 cm çökme değerine sahip C30/37 beton sınıfında kiriş numunesi hacminde lifler homojen dağılmakta ve sadece lif uzunluğu anlamlı etki düzeyine sahiptir. Göz ve dijital görüntü işleme ile belirlenen lif adetleri benzerdir ve bu nedenle lif dağılımının belirlenmesi için dijital görüntü işleme kullanılması uygundur.

## KAYNAKLAR

- [1] L. Zongjin, "Advanced concrete technology," *Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc*, 2011.
- [2] S. P. Shah, "Toughening of cement-based materials with fiber reinforcement," *MRS Online Proceedings Library Archive*, vol. 211, 1990.
- [3] G. Xu and D. Hannant, "Flexural behaviour of combined polypropylene network and glass fibre reinforced cement," *Cement and Concrete Composites*, vol. 14, pp. 51-61, 1992.
- [4] M. Maalej and V. C. Li, "Flexural/tensile-strength ratio in engineered cementitious composites," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 6, pp. 513-528, 1994.
- [5] S. Mindess, N. Banthia and C. Yan, "The fracture toughness of concrete under impact loading," *Cement and Concrete Research*, vol. 17, pp. 231-241, 1987.
- [6] V. C. Li and C. K. Leung, "Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 118, pp. 2246-2264, 1992.
- [7] M. Sarı, "Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi," Master's Thesis, Institute of Science and Technology, Istanbul Technical University, 2013.
- [8] F. Wawner and A. Bunsell, "Fibre Reinforcements for Composite Materials," *Composite materials series, (ed. by Bunsell, A. R.)*, vol. 2, 1988.
- [9] K. Chawla, *Fibrous materials*: Cambridge university press, 2016.
- [10] A. ASTM, "Standard specification for steel fibers for fiber-reinforced concrete," ed: American Society for Testing and Materials (ASTM) Committee, 2006.
- [11] T. S. Institute, "Lifler – Betonda kullanım için – Bölüm 1: Çelik lifler – Tarifler, özellikler ve uygunluk," in *TS EN 14889-1*, ed. Ankara: Turkish Standards Institute, 2006.
- [12] T. S. Institute, "Çelik teller - Beton takviyesinde kullanılan," in *TS 10513*, ed. Ankara: Turkish Standards Institute, 1992.
- [13] P. Soroushian and Z. Bayasi, "Fiber type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete," *Materials Journal*, vol. 88, pp. 129-134, 1991.
- [14] L. Betterman, C. Ouyang and S. P. Shah, "Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar," *Advanced Cement Based Materials*, vol. 2, pp. 53-61, 1995.
- [15] R. F. Zollo, "Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development," *Cement and Concrete Composites*, vol. 19, pp. 107-122, 1997.
- [16] M. Eik and H. Herrmann, "Raytraced images for testing the reconstruction of fibre orientation distributions," *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, vol. 61, 2012.

- [17] F. Guild and J. Summerscales, "Microstructural image analysis applied to fibre composite materials: a review," *Composites*, vol. 24, pp. 383-393, 1993.
- [18] J. Liu, W. Sun, C. Miao, J. Liu and C. Li, "Assessment of fiber distribution in steel fiber mortar using image analysis," *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, vol. 27, pp. 166-171, 2012.
- [19] B. Mlekusch, E. Lehner and W. Geymayer, "Fibre orientation in short-fibre-reinforced thermoplastics I. Contrast enhancement for image analysis," *Composites science and technology*, vol. 59, pp. 543-545, 1999.
- [20] B. Mlekusch, "Fibre orientation in short-fibre-reinforced thermoplastics II. Quantitative measurements by image analysis," *Composites Science and Technology*, vol. 59, pp. 547-560, 1999.
- [21] N. Sebaibi, M. Benzerzour and N. E. Abriak, "Influence of the distribution and orientation of fibres in a reinforced concrete with waste fibres and powders," *Construction and Building Materials*, vol. 65, pp. 254-263, 2014.
- [22] P. Stroeven, "Morphometry of fibre reinforced cementitious materials," *Matériaux et Construction*, vol. 12, pp. 9-20, 1979.
- [23] B. L. Karihaloo and S. Benson, "CARDIFRC—manufacture and constitutive behaviour," 2003.
- [24] A. C. Bordelon and J. R. Roesler, "Spatial distribution of synthetic fibers in concrete with X-ray computed tomography," *Cement and Concrete Composites*, vol. 53, pp. 35-43, 2014.
- [25] P. Pujadas, A. Blanco, S. Cavalaro, A. de la Fuente and A. Aguado, "Fibre distribution in macro-plastic fibre reinforced concrete slab-panels," *Construction and building materials*, vol. 64, pp. 496-503, 2014.
- [26] P. Stähli, R. Custer and J. G. van Mier, "On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC," *Materials and Structures*, vol. 41, pp. 189-196, 2008.
- [27] D. Chung, "Dispersion of short fibers in cement," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 17, pp. 379-383, 2005.
- [28] N. Özyurt, L. Y. Woo, T. O. Mason and S. P. Shah, "Monitoring fiber dispersion in fiber-reinforced cementitious materials: comparison of AC-impedance spectroscopy and image analysis," *ACI Materials Journal*, vol. 103, p. 340, 2006.
- [29] B. Lee, S.-T. Kang, H.-B. Yun and Y. Kim, "Improved sectional image analysis technique for evaluating fiber orientations in fiber-reinforced cement-based materials," *Materials*, vol. 9, p. 42, 2016.
- [30] P. N. Balaguru and S. P. Shah, *Fiber-reinforced cement composites*, 1992.

- [31] O. A. Ige, "Key Factors Affecting Distribution and Orientation of Fibres in Steel Fibre Reinforced Concrete and Subsequent Effects on Mechanical Properties," University of Portsmouth, 2017.
- [32] S.-C. Lee, J.-H. Oh and J.-Y. Cho, "Fiber orientation factor on rectangular cross-section in concrete members," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 7, p. 470, 2015.
- [33] P. Soroushian and C.-D. Lee, "Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete," *Materials Journal*, vol. 87, pp. 433-439, 1990.
- [34] R. Gettu, D. Gardner, H. Saldivar and B. Barragán, "Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens," *Materials and Structures*, vol. 38, pp. 31-37, 2005.
- [35] J. Edington and D. Hannant, "Steel fibre reinforced concrete. The effect on fibre orientation of compaction by vibration," *Mater Struct*, vol. 5, pp. 41-44, 1972.
- [36] P. Stroeven, "The analysis of fibre distributions in fibre reinforced materials," *Journal of Microscopy*, vol. 111, pp. 283-295, 1977.
- [37] Y. Akkaya, J. Picka and S. P. Shah, "Spatial distribution of aligned short fibers in cement composites," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 12, pp. 272-279, 2000.
- [38] H. Toutanji and Z. Bayasi, "Effects of manufacturing techniques on the flexural behavior of steel fiber-reinforced concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 28, pp. 115-124, 1998.
- [39] J. Zhou, S. Qian, G. Ye, O. Copuroglu, K. van Breugel and V. C. Li, "Improved fiber distribution and mechanical properties of engineered cementitious composites by adjusting the mixing sequence," *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, pp. 342-348, 2012.
- [40] S. T. Kang, B. Y. Lee, J.-K. Kim and Y. Y. Kim, "The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 2450-2457, 2011.
- [41] Ü. Osman, T. Uygunoğlu and O. Gençel, "Çelik Liflerin Beton Basınç Ve Eğilme Özelliklerine Etkisi," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 13, pp. 23-30, 2007.
- [42] M. Kozak, "Çelik lifli betonlar ve kullanım alanlarının araştırılması," *Teknik Bilimler Dergisi*, vol. 3, pp. 26-35, 2013.
- [43] İ. B. Topçu and A. R. Boğa, "Uçucu kül ve çelik liflerin beton ve beton borularda kullanımı," *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 18, pp. 1-14, 2005.
- [44] H. Yaprak, O. Şimşek and Ö. Aydın, "Cam ve çelik liflerin bazı beton özelliklerine etkisi," *Politeknik Dergisi*, vol. 7, pp. 353-358, 2004.

- [45] E. Ayyildiz, "Çelik lifli betonların malzeme karışım oranlarını ve beton basınç dayanımlarını bulanık mantık kullanarak modelleme," Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [46] İ. Ş. Öztürk, "Çelik lifli betonlarda geri dönüştürülmüş nano karbon siyahı ve kandıra taşı tozunun değerlendirilmesi," Sakarya Üniversitesi, 2020.
- [47] O. Düğenci, "Çelik Lifli Betonların Bazı Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklık Etkisinin Deneysel Araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2008.
- [48] E. Zeynal, "Çelik Tel ve S/Ç Oranlarının Çelik Lifli Betonların Darbe Mukavemetine ve Mekanik Özelliklerine Etkisi," Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2008.
- [49] H. C. Mertol, E. Baran and H. J. Bello, "Flexural behavior of lightly and heavily reinforced steel fiber concrete beams," *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 185-193, 2015.
- [50] M. Demiralp, "Çelik lifli betonlarda agrega tipinin kırılma enerjisine etkisi," Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [51] P. Song and S. Hwang, "Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 18, pp. 669-673, 2004.
- [52] M. Nataraja, N. Dhang and A. Gupta, "Stress–strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression," *Cement and concrete composites*, vol. 21, pp. 383-390, 1999.
- [53] D. J. Kim, G.-J. Park, H. V. Le and D. Moon, "Fresh and hardened properties of steel fiber-reinforced grouts containing ground granulated blast-furnace slag," *Construction and Building Materials*, vol. 122, pp. 332-342, 2016.
- [54] W. Abbass, M. I. Khan and S. Mourad, "Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete," *Construction and building materials*, vol. 168, pp. 556-569, 2018.
- [55] V. S. Vairagade and K. S. Kene, "Introduction to steel fiber reinforced concrete on engineering performance of concrete," *International journal of scientific & technology research*, vol. 1, p. 141, 2012.
- [56] I. Mehdipour, M. Horst, R. Zoughi and K. H. Khayat, "Use of near-field microwave reflectometry to evaluate steel fiber distribution in cement-based mortars," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, p. 04017029, 2017.
- [57] T. Ruan and A. Poursaee, "Fiber-distribution assessment in steel fiber–reinforced UHPC using conventional imaging, X-ray CT scan, and concrete electrical conductivity," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 31, p. 04019133, 2019.
- [58] H. Al-Mattarneh, "Electromagnetic quality control of steel fiber concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 73, pp. 350-356, 2014.

- [59] S. D. Kim and D. Y. Moon, "Effect of Steel Fiber Distribution in Steel Fiber-reinforced Concrete on Surface Electrical Resistivity," *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, vol. 17, pp. 106-113, 2013.
- [60] R. Wang, X. Gao, H. Huang and G. Han, "Influence of rheological properties of cement mortar on steel fiber distribution in UHPC," *Construction and Building Materials*, vol. 144, pp. 65-73, 2017.
- [61] H. Huang, X. Gao, L. Li and H. Wang, "Improvement effect of steel fiber orientation control on mechanical performance of UHPC," *Construction and Building Materials*, vol. 188, pp. 709-721, 2018.
- [62] J. Han, M. Zhao, J. Chen and X. Lan, "Effects of steel fiber length and coarse aggregate maximum size on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 209, pp. 577-591, 2019.
- [63] R. A. Raju, S. Lim, M. Akiyama and T. Kageyama, "Effects of concrete flow on the distribution and orientation of fibers and flexural behavior of steel fiber-reinforced self-compacting concrete beams," *Construction and Building Materials*, vol. 262, p. 119963, 2020.
- [64] H. Li, L. Li, L. Li, J. Zhou, R. Mu, and M. Xu, "Influence of fiber orientation on the microstructures of interfacial transition zones and pull-out behavior of steel fiber in cementitious composites," *Cement and Concrete Composites*, vol. 128, p. 104459, 2022.
- [65] D. Gao, Z. Gu, C. Wei, C. Wu and Y. Pang, "Effects of fiber clustering on fatigue behavior of steel fiber reinforced concrete beams," *Construction and Building Materials*, vol. 301, p. 124070, 2021.
- [66] H. Wang, F. Shi, J. Shen, A. Zhang, L. Zhang, H. Huang, *et al.*, "Research on the self-sensing and mechanical properties of aligned stainless steel fiber-reinforced reactive powder concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 119, p. 104001, 2021.
- [67] L. Kheddache, C. Aribi, K. Chahour and B. Safi, "Highlighting of the distribution effect of steel hook fibers at low and high dosage on the flexural strength of self-compacting mortars," *Materials Today: Proceedings*, vol. 52, pp. 1384-1390, 2022.
- [68] Z.-K. Yang, Z. Li, S. Zhao and X.-D. Huang, "A simple microwave method to assess the uniformity of steel fiber distribution in the SFRC," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 35, pp. 83-94, 2021.
- [69] S. Kruschwitz, T. Oesch, F. Mielentz, D. Meinel and P. Spyridis, "Non-Destructive Multi-Method Assessment of Steel Fiber Orientation in Concrete," *Applied Sciences*, vol. 12, p. 697, 2022.
- [70] N. Lee, G. Park, J. Pae, J. Moon and S. Kim, "Relationship between three-dimensional steel fiber statistics and electromagnetic shielding effectiveness of high-performance, fiber-reinforced cementitious composites," *Materials*, vol. 13, p. 5125, 2020.

- [71] J. Fladr, P. Bily and I. Broukalova, "Evaluation of steel fiber distribution in concrete by computer aided image analysis," *Compos. Mater. Eng*, vol. 1, pp. 49-70, 2019.
- [72] T. S. Enstitüsü, "TS EN 12504-4 Beton Deneyleri, Bölüm4: Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini.," ed. Ankara, Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü, 2012.
- [73] T. S. Institute, "Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini," in *TS EN 12390-5*, ed. Ankara: Turkish Standards Institute, 2010.
- [74] R. C. Gonzales and R. E. Woods, "Digital Image Processing. New Jersey: PrenticeHall," ed: Inc, 2002.
- [75] Stat-Ease, "Design-Expert software version 13 trial," ed: Stat-Ease Inc. Minneapolis, 2021.

