

T.C.
ADYAMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ATIK PET VE LİF KATKILARIN BETONUN
MEKANİK ÖZELLİKLERİ İLE ÇATLAK OLUŞUMU
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa TOPALOĞLU

DANIŞMAN
Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN

ADYAMAN, 2022

T.C.
ADİYAMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ATIK PET VE LİF KATKILARIN BETONUN
MEKANİK ÖZELLİKLERİ İLE ÇATLAK OLUŞUMU
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa TOPALOĞLU

DANIŞMAN
Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN

ADİYAMAN, 2022

Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen MÜFYL/2021-002 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

ÖZET

ATIK PET VE LİF KATKILARIN BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİ İLE ÇATLAK OLUŞUMU ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mustafa TOPALOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Adıyaman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos/2022

Danışman: Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN

Bu tez çalışmasında atık PET, polyester lif ve kopolimer fiber lif katkılı betonların mekanik özellikleri belirlenmiş ve yapılan aletli ağırlık düşürme deneyi sonrası betonun içyapısı görüntü işleme yöntemi ile değerlendirilmiştir. Bu amaçla şahit beton ve çimento hacmine oranla %0.5, %1.0 ve %1.5 oranında öğütülmüş PET şişe, Polyester (PLY) ve Kopolimer fiber lif (KPF) katkılı, 100x100x100 mm boyutlarında küp numuneler ile 100x100x150 mm boyutlarında prizmatik kiriş beton numune karışımları hazırlanmıştır. Beton numunelerden ilk olarak ultrases geçiş hızı deneyi ve Schmidt çekici deneyi yapıldıktan sonra prizmatik kiriş numunelerden üç nokta yükleme deneyi, küp numunelerden ise basınç deneyi ile aletli ağırlık düşürme deneyi yapılmıştır. Farklı oranlarda katkı maddesi içeren betonların deney sonrası deformasyonlarını (çatlak gelişimini) değerlendirmek amacıyla ince kesitler yapılarak bu kesitler görüntü işleme yöntemiyle incelenmiştir. Beton basınç dayanımında katkı oranının artışına paralel bir şekilde dayanımda düşüşler tespit edilirken, üç nokta yükleme deneyi ile %1.0 ile %1.5 KPF katkılı numuneler (sırasıyla 6.65-6.78 MPa) şahit numuneden (6.56 MPa) daha yüksek eğilme dayanımları elde edilmiştir. Aletli ağırlık düşürme deneyine tabi tutulan numunelerin yapılan makro yapı incelemesinden PET katkılı numunelerin dinamik yüklere maruz beton numunelerin parçalanmasını önleyemediği buna karşın PLY ve KPF katkılı betonların dinamik yükler karşında betonun kırılmasını önlediği belirlenmiştir. Ayrıca yapılan ince kesit incelemesinden katkılı betonların şahit örnekten çatlak alanı, çapı, uzunluğu ve genişliğini yönünden daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Lif Katkılı Beton; Basınç-Eğilme Dayanımı; Aletli Ağırlık Düşürme Deneyi; Görüntü İşleme Analizi

ABSTRACT

EXAMINATION OF THE EFFECT OF WASTE PET AND FIBER ADDITIVES ON MECHANICAL PROPERTIES AND CRACK FORMATION OF CONCRETE

Mustafa TOPALOĞLU

Department of Civil Engineering

Adıyaman University, Graduate Education School, August/2022

Supervisor: Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN

In this thesis, the mechanical properties of waste PET, polyester fiber and copolymer fiber reinforced concretes were determined and the internal structure of the concrete was evaluated by image processing method after the instrumented weight reduction test. For this purpose, 100x100x100 mm cube samples and 100x100x150 mm prismatic beam concrete sample mixtures were prepared, with 0.5%, 1.0% and 1.5% ground PET bottles, Polyester (PLY) and Copolymer fiber (KPF) additives in proportion to the volume of witness concrete and cement. After the ultrasound transmission velocity test and Schmidt hammer test were performed on the concrete samples, three-point loading test was performed on the prismatic beam samples, and the pressure test and instrumented weight reduction test were performed on the cube samples. In order to evaluate the post-experimental deformations (crack development) of concretes containing additives in different ratios, thin sections were made and these sections were examined by image processing method. While decreases in strength were detected in parallel with the increase in the concrete compressive strength, with the three-point loading test, the samples with 1.0% and 1.5% KPF additives (6.65-6.78 MPa, respectively) were obtained with higher flexural strengths than the witness sample (6.56 MPa). From the macrostructural analysis of the specimens subjected to the instrumented weight reduction test, it was determined that the PET-added specimens could not prevent the concrete specimens subjected to dynamic loads from breaking apart, whereas the PLY and KPF-added concretes prevented the concrete from breaking under dynamic loads. In addition, from the thin section examination, it was seen that the concrete with additives gave better results than the witness sample in terms of crack area, diameter, length and width.

Keywords: Fiber Reinforced Concrete; Compressive-Bending Strength; Instrumented Weight Drop Test; Image Processing Analysis

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bilgi ve birikimini benden esirgemeyen ve gelişmemde çok büyük katkıları olan kıymetli danışman hocam sayın Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN'a, aletli ağırlık düşürme deneylerinin yapılmasında bilgi birikim ve tecrübesinden yararlandığım kıymetli hocam sayın Doç. Dr. Mehmet Fatih ŞAHAN'a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

İnce kesitlerin değerlendirilmesinde yardımlarını esirgemeyen kıymetli hocalarım Doç. Dr. Kadir GÜÇLÜER ve Doç. Dr. Serdar SÖNMEZ'e, deneylerin yapılması sırasındaki fotoğraf çekimlerinde yardımcı olan Talat DOĞAN'a ve ayrıca çalışmalarım boyunca beni destekleyen sevgili eşime, anneme, babama ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

31/08/2022

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Adıyaman Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....

(İmza)

Mustafa TOPALOĞLU

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
GÖRSELLER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Beton	2
1.2. Betonun Bileşenleri.....	2
1.2.1. Agregası	2
1.2.2. Su.....	3
1.2.3. Çimento	3
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. BETON KATKI MADDELERİ	12
3.1. Mineral Katkıları.....	12
3.2. Kimyasal Katkıları	13
3.3. Lif Katkıları	13
3.3.1. Çelik lifler.....	14
3.3.2. Cam lifler	16
3.3.3. Naylon lifler.....	16

3.3.4. Polipropilen lifler	17
3.3.5. Polyester lifler	18
4. ESNEK BETON	19
4.1. Esnek Betonun Avantajları	20
4.2. Esnek Betonun Basınç Dayanımı	20
4.3. Esnek Betonun Çekme Dayanımı.....	21
4.4. Esnek Betonun Yorulma Dayanımı	22
4.5. Esnek Betonun Darbe Dayanımı.....	22
4.6. Esnek Betonun Dayanıklılığı	23
5. DARBE TEST METOTLARI	24
5.1. Ağırlık Düşürme Testi.....	24
6. GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMLERİ	26
7. MATERYAL ve METOT	28
7.1. Materyal.....	28
7.1.1. Çimento	28
7.1.2. Karışım suyu	28
7.1.3. Agrega	28
7.1.3.1. İnce agregası (0-4 mm)	28
7.1.3.2. İri agregası (4-12 mm)	29
7.1.3.3. Elek analizi	29
7.1.4. Öğütülmüş pet şişe kırıkları	29
7.1.5. Polyester lif.....	30
7.1.6. Kopolimer fiber lif	30
7.1.7. Ultrases geçiş hızı deney cihazı.....	31
7.1.8. Schmidt çekici deney cihazı	32
7.1.9. Basınç deney cihazı	32
7.1.10. Eğilmede çekme deney cihazı (Üç nokta yükleme deneyi cihazı).....	33

7.1.11. Aletli ağırlık düşürme deneyi cihazı.....	34
7.1.12 Görüntü işleme analizi.....	34
7.2. Metot.....	35
7.2.1. Beton karışımının hazırlanması	35
7.2.2. Ultrases geçiş hızı deneyi	37
7.2.3. Schmidt çekici deneyi	38
7.2.4. Basınç deneyi.....	39
7.2.5. Eğilmede çekme deneyi (Üç nokta yükleme deneyi).....	40
7.2.6. Aletli ağırlık düşürme deneyi	41
7.2.7. İnce kesitler için numunelerin hazırlanması.....	42
8. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	44
8.1. Agrega Deney Bulguları	44
8.2. Ultrases Deneyi Bulguları.....	45
8.3. Schmidt Çekici Deney Bulguları	47
8.4. Basınç Deneyi Bulguları	48
8.5. Eğilmede Çekme Deney Bulguları	49
8.6. İkili Karşılaştırmalar.....	52
8.7. Ağırlık Düşürme Deney Bulguları	55
8.8. Makroyapı Bulguları	61
8.8.1. Şahit numune makroyapı bulguları	61
8.8.2. PET katkılı numune makroyapı bulguları.....	62
8.8.3. PLY katkılı numuneler makroyapısı	63
8.8.4. KPF katkılı numuneler makroyapısı	64
8.9. Beton Numunelerin İnce Kesit Bulguları	65
8.9.1. Şahit beton numunesi	66
8.9.2. %0.5 PET katkılı beton numune.....	67
8.9.3. % 1.0 PET katkılı beton numunesi	69

8.9.4. % 1.5 PET katkılı beton numune.....	70
8.9.5. %0.5 PLY katkılı beton numune.....	71
8.9.6. %1.0 PLY katkılı beton numune.....	73
8.9.7. %1.5 PLY katkılı beton numune.....	74
8.9.8. %0.5 KPF katkılı beton numune.....	76
8.9.9. %1.0 KPF katkılı beton numune.....	77
8.9.10. %1.5 KPF katkılı beton numune.....	78
9. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	94

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Farklı türdeki liflerin mekanik özellikleri	14
Çizelge 3.2 Farklı tipteki cam liflerin mekanik özellikleri	16
Çizelge 7.1 Kopolimer fiber liflerin mekanik özellikleri	31
Çizelge 7.2 Beton karışımında 1 m ³ beton için kullanılan malzeme miktarları	36
Çizelge 7.3 Beton karışımında 1 m ³ beton için kullanılan katkı miktarı	36
Çizelge 7.4 Beton kalitesinin ultrases geçiş hızına göre sınıflandırılması.....	38
Çizelge 8.1 İnce agrega özgül ağırlık deney bulguları	44
Çizelge 8.2 İnce agrega su emme deney bulguları	44
Çizelge 8.3 İnce agrega özgül ağırlık deney bulguları	44
Çizelge 8.4 İri agrega su emme deney bulguları	45
Çizelge 8.5 Beton numunelerin ultrases geçiş hızı test bulguları.....	46
Çizelge 8.6 Beton numunelerin Schmidt çekici geri sıçrama değerleri.....	47
Çizelge 8.7 Beton numunelerin basınç dayanım testi bulguları	48
Çizelge 8.8 Kiriş numunelerin eğilmede çekme deney bulguları.....	50
Çizelge 8.9 Şahit numune ince kesit görüntü işleme ölçüm sonuçları	66
Çizelge 8.10 %0.5PET katkılı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları.....	68
Çizelge 8.11 %1.0 PET katkılı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları.....	69
Çizelge 8.12 %1.5 PET katkılı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları.....	70
Çizelge 8.13 %0.5 PLY katkılı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları	72
Çizelge 8.14 %1.0 PLY katkılı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları	73
Çizelge 8.15 %1.5 PLY katkılı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları	75
Çizelge 8.16 %0.5 KPF katkılı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları	76
Çizelge 8.17 %1.0 KPF katkılı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları	77
Çizelge 8.18 %1.5 KPF katkılı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları	79

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 Çelik lif şekilleri.	15
Şekil 4.1 Çeşitli liflerin betonun çekme dayanımına etkisi	22
Şekil 8.1 Elek analizi grafiği	45
Şekil 8.2 Beton numunelerin ultrases geçiş hızları.....	46
Şekil 8.3 Beton numunelerin Schmidt çekici grafik bulguları	47
Şekil 8.4 Basınç dayanım deneyi bulguları.....	49
Şekil 8.5 Kiriş numunelerin eğilmede çekme deneyi grafik bulguları	51
Şekil 8.6 Kiriş numunelerin eğilme deney bulguları	52
Şekil 8.7 Beton numunelerin eğilme - basınç dayanım grafiği	52
Şekil 8.8 Beton numunelerin eğilme – ultrases hızı grafiği	53
Şekil 8.9 Beton numunelerin eğilme-Schmidt çekici grafiği	54
Şekil 8.10 Beton numunelerin basınç-ultrases hızı grafiği	54
Şekil 8.11 PET katkılı küp numunelerin ortalama kuvvet-zaman grafiği	55
Şekil 8.12 PET katkılı beton numunelerin ortalama enerji-zaman grafiği	56
Şekil 8.13 PET katkılı beton numunelerin ortalama çöküntü miktarı-zaman grafiği.....	57
Şekil 8.14 PLY katkılı beton numunelerin ortalama kuvvet-zaman grafiği	57
Şekil 8.15 PLY katkılı beton numunelerin ortalama enerji-zaman grafiği	58
Şekil 8.16 PLY katkılı beton numunelerin ortalama çöküntü miktarı-zaman grafiği	59
Şekil 8.17 KPF katkılı beton numunelerin ortalama kuvvet- zaman grafiği	59
Şekil 8.18 KPF katkılı beton numunelerin ortalama enerji-zaman grafiği	60
Şekil 8.19 KPF katkılı beton numunelerin ortalama çöküntü miktarı-zaman grafiği	61
Şekil 8.20 Katkılı beton numunelerin ortalama çatlak genişliği grafiği	80
Şekil 8.21 Katkılı beton numunelerin ortalama çatlak uzunluğu grafiği	81

GÖRSELLER DİZİNİ

	Sayfa
Görsel 4.1 Çatlak oluşumunda liflerin oluşturduğu köprüleme etkisi	20
Görsel 7.1 Çeyreklemeye yöntemi ile alınan ince agregası	29
Görsel 7.2 Öğütülmüş PET şişe kırıkları.....	30
Görsel 7.3 Beton karışımına ilave edilen polyester lifler	30
Görsel 7.4 Beton karışımında kullanılan kopolimer fiber lif	31
Görsel 7.5 Deneysel çalışmada kullanılan ultrases test cihazı.....	31
Görsel 7.6 Deneysel çalışmada kullanılan Schmidt çekici test cihazı	32
Görsel 7.7 Deneysel çalışmada kullanılan basınç test cihazı.....	33
Görsel 7.8 Deneysel çalışmada kullanılan üç noktalı yükleme test cihazı	33
Görsel 7.9 Deneysel çalışmada kullanılan ağırlık düşürme test cihazı	34
Görsel 7.10 Deneysel çalışmada kullanılan görüntü işleme cihazı.....	35
Görsel 7.11 Beton üretim aşamaları.....	37
Görsel 7.12 Ultrases hızı deneyi	38
Görsel 7.13 Schmidt çekici deneyinin yapılışı	39
Görsel 7.14 Basınç deneyi	40
Görsel 7.15 Eğilmede çekme deney aleti ile yapılan deney	40
Görsel 7.16 Ağırlık düşürme deney aletiyle numuneye darbe testi uygulaması	41
Görsel 7.17 Ağırlık düşürme deneyi sonunda numunelerin görünümü	41
Görsel 7.18 Epoksi uygulama aşamaları	43
Görsel 8.1 Şahit numune makroyapısı	62
Görsel 8.2 PET katkılı numunelerin makroyapısı.....	63
Görsel 8.3 PLY katkılı numuneler makro yapısı	64
Görsel 8.4 KPF katkılı numuneler makroyapısı	65
Görsel 8.5 İnce kesit serileri	65
Görsel 8.6 Görüntü işleme prosesi	66

Görsel 8.7	Şahit numuneye ait görüntü işleme analizleri.....	67
Görsel 8.8	%0.5 PET katkılı numuneye ait görüntü işleme analizleri	68
Görsel 8.9	%1.0 PET katkılı numuneye ait görüntü işleme analizleri	69
Görsel 8.10	%1.5 PET katkılı numuneye ait görüntü işleme analizleri	71
Görsel 8.11	%0.5 PLY katkılı numuneye ait görüntü işleme analizleri.....	72
Görsel 8.12	%1.0 PLY katkılı numuneye ait görüntü işleme analizleri.....	74
Görsel 8.13	%1.5 PLY katkılı numuneye ait görüntü işleme analizleri.....	75
Görsel 8.14	%0.5 KPF katkılı numuneye ait görüntü işleme analizleri	77
Görsel 8.15	%1.0 KPF katkılı numuneye ait görüntü işleme analizleri	78
Görsel 8.16	%1.5 KPF katkılı numuneye ait görüntü işleme analizleri	79

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

cm	: Santimetre
°C	: santigrat derece
g	: Gram
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
kgf	: Kilogramkuvvet
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
N	: Newton
s	: Saniye
ASTM	: American Society for Testing and Materials
ACI	: American Concrete Institute
KPF	: Kopolimer fiber lif
EBR	: Fiber takviyeli polimer
DIC	: Dijital görüntü işleme korelasyonu
ECC	: Engineered Cementations Composites

C-S-H	: Kalsiyum silika hidrat
CH	: Kalsiyum hidroksit
PET	: Öğütölmüş pet şişe kırıkları
PLY	: Polyester lif
PPTL	: Düzlem polarize iletilen ışık yöntemi
PVA	: Polivinil Alkol
S/Ç	: Su / Çimento oranı
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TS	: Türk Standartları

1. GİRİŞ

Barınma insanoğlunun en temel ihtiyaçlarından biridir. İnsanoğlu bu ihtiyacını karşılanmak için geçmişten günümüze kadar gelen süreçte çeşitli maddelerden ve çeşitli şekillerde barınaklar inşa etmiştir. Örneğin kilin bitkisel lifler ve samanla karıştırılmasıyla üretilen kerpiç malzeme çok eski devirlerden yakın zamana kadar bir yapı malzemesi olarak kullanılmıştır. Ayrıca bağlayıcı malzeme olarak kirecin kullanılması da çok eski devirlere kadar uzanmaktadır. Konya'daki Çatalhöyük kalıntıları incelendiğinde kireç – doğal puzolonik malzeme karışımlarının binlerce yıl öncesinde bilindiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca Bizans, Selçuklu ve Osmanlı yapıları incelendiğinde Horasan harcı denilen karışımın kullanıldığı görülmektedir. Horasan harcında kuvars kumu, pişmiş toprak, kireç, kül kullanıldığı ayrıca keçi kılı, palmiye lifi ve saman benzeri liflerin harca % 3 oranında katıldığı da söylenmektedir [1].

1824 yılında Joseph Aspdin adındaki bir duvar ustası tarafından kil ve kalker karışımının pişirilmesi ve sonrasında çok ince öğütülmesiyle bir hidrolik bağlayıcı keşfedilmiş ve bu bağlayıcı maddeye su ilave edilmesiyle zamanla sertleşme olduğu görülmüştür. Bu malzeme İngiltere'nin Portland adasındaki taşlara benzetildiği için "Portland Çimentosu" diye adlandırılmıştır [1]. Aspdin'in keşfinden sonra çeşitli katkı maddeleri kullanılarak değişik tipte çimentolar üretilmesine karşın Portland çimentosu ismi halen kullanılmaktadır.

Portland çimentosunun keşfinden sonra gelişen beton ve akabinde betona çelik donatı yerleştirilmesiyle üretilen betonarme günümüzde en fazla kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Betonun yangına karşı dayanımının ahşap malzemeye göre yüksek oluşu, çelik malzeme gibi korozyona uğramaması, istenilen şekillerde üretilmeye olanak sağlaması ve dünyanın hemen hemen her yerinde üretilmeye ve kullanılmaya uygun olması onu günümüzün vazgeçilmez yapı malzemesi olarak öne çıkarmaktadır.

Betonun korozyona çelik kadar uğramaması ve basınç dayanımının iyi olmasına karşın çekme dayanımı, statik ve dinamik yükler altında şekil değiştirme kapasitesi gibi mekanik özellikleri ise zayıftır. Bu nedenle beton teknolojisinde çeşitli mineral, kimyasal ve lif katkıları kullanılarak betonun mekanik özelliklerinde istenilen seviyede performansın artırılması için çalışmalar artarak devam etmektedir.

Dünyada bir deprem gerçeği vardır ve insanoğlu bu gerçeklikle beraber yaşamak zorundadır. Depremlerin çok ciddi can ve mal kayıplarına neden olduğu düşünüldüğünde depreme dayanıklı yapıların inşa edilmesinin önemi ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle de geçmişten günümüze kadar sağlam yapılar inşa edebilmek için yukarıda bazı örneklerini verdiğimiz çeşitli yapı malzemeleri kullanılmıştır. Günümüzde ise portland çimentosunun keşfinden sonra büyük gelişme kaydeden beton ve betonarme inşaat sektöründe en çok kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Bugün artık çeşitli katkı maddeleri kullanılarak betonun dayanım, dayanıklılık, işlenebilirlik, priz süresi, gibi çeşitli özelliklerinde istenilen seviyede değişiklikler yapılabilmektedir. Böylece betonun kalitesi artmakta ve depreme daha dayanıklı yapılar inşa edilebilmektedir.

1.1. Beton

Beton agrega, su, çimento ve gerektiğinde bazen çeşitli mineral veya kimyasal katkı maddelerinin kullanılmasıyla üretilen ve önceleri plastik kıvamda olan ve istenilen şekil verilebilen, priz alarak sertleşebilen günümüzün önemli bir yapı malzemesidir. Betona katılan çimento agrega taneleri arasında bulunan boşlukları doldurarak onları birbirine bağlar, agrega yüzeyini kaplar ve agregaları bir arada tutan hidrolik bağlayıcı bir maddedir. Suyun işlevi ise hidratasyon adı verilen kimyasal reaksiyonu başlatmaktır [2].

1.2. Betonun Bileşenleri

1.2.1. Agregası

Amerikan standartları agregayı; “Beton oluşturmak için çimento gibi bir bağlayıcı malzeme ile kullanılan mineral kökenli taneli malzeme olarak tanımlarken”[3]. TSE’ye göre ise “Agrega yapılarda kullanılan doğal minerallerde ve değişik boyutlarda olabilen taneli malzemeye” verilen isimdir. Agregalar doğal, yapay veya geri kazanılmış olarak sınıflandırılmaktadır. “Doğal Agregası; mekanik işlem dışında herhangi bir işleme tabi tutulmamış ve mineral kökenli agrega olarak tanımlanırken, yapay agrega ise çeşitli endüstriyel işlem sonucu elde edilmiş mineral kökenli agrega” olarak tanımlanır. Yine TSE sınıflandırmasına göre 0,4 mm göz açıklıklı elekten geçen agrega ince agrega ve 0,4 mm elekten geçemeyen agrega ise iri agrega olarak tanımlanmaktadır [4]. Betonun bileşiminde bulunan agregalar dere yatağı gibi doğal kaynaklardan elde edilebileceği gibi taş

ocaklarından kırma taş şeklinde de temin edilip kullanılabilir. Beton bileşiminin hacimce yaklaşık % 60-80'ni oluşturan agregalar çimentonun zamanla gösterebileceği genleşme ve büzölmeleri ve bu hacimsel değışiklikler sonucu oluşacak çatlakları engeller. Agregalar çok yüksek dayanımlarıyla betonun basınç dayanımının oluşmasında önemli bir role sahip olmasının yanı sıra betonun aşınmaya karşı dirençli olmasında da önemli bir role sahiptir [1].

1.2.2. Su

Su beton üretiminde karışım suyu, yıkama suyu ve bakım (kür) suyu gibi çeşitli amaçlarla kullanılabilir. Karışım suyu olarak kullanılmasındaki temel amaç, çimento ile hidratasyon reaksiyonlarını gerçekleştirmek ve taze betonun işlenebilirliğini sağlamaktır. Karışım suyu olarak kullanılacak suyun her türlü zararlı kimyasallardan arındırılmış olması çok önemlidir. Bu amaçla içme suyu kullanılabilir. Yıkama suyu olarak; beton içine katılacak agregaların temizlenmesi amacıyla kullanılır. Bakım (kür) suyu olarak da yerine yerleştirilen betonun yeterince kür edilmesi amacıyla kullanılır.

1.2.3. Çimento

Çimento kalker ve kil karışımının yüksek derecelerde ısıtılması ve sonrasında çok ince öğütölmesiyle elde edilen hidrolik bağlayıcılığı bulunan en önemli beton bileşenidir. Portland çimentosunun ana maddeleri kalker ve kildir. Ayrıca alçı taşı da çimento içine katılır. Çimentonun ana bileşenleri CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ gibi bileşiklerdir. Bunlardan CaO kalkerden, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ bileşikleri de kilden elde edilir. Çimento üretimi sırasında kalker ve kil karışımı çok yüksek sıcaklıklarda (1500 °C) pişirilmesi sonucu klinker adı verilen yapı oluşur. Daha sonra klinker soğutulur ve içine priz süresini düzenlemek amacıyla bir miktar alçı taşı katılır ve çok ince bir şekilde öğütölür. Başlangıçta iri taneli olan ve herhangi bir bağlayıcılığı bulunmayan klinker çok ince öğütölmesi sonucu bağlayıcılık özelliği kazanır ve çimento üretimi tamamlanmış olur. Günümüzde içine farklı katkı maddeleri katılarak elde edilen ve farklı inşaat yapılarında kullanılan yaklaşık 27 tip portland çimentosu vardır [1, 5, 6].

Bu çalışmada öğütölmüş pet şişe atıkları, polyester lif ve kopolimer fiber lif gibi katkı maddeleri %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında kullanılarak polimer katkılı beton

Üretilmiş ve betonların eğilmede çekme deneyi ile eğilme dayanımı, basınç deneyi ile basınç dayanımı, ağırlık düşürme deneyi ile enerji yutma kapasitesi değerleri ile ağırlık düşürme deneyi sonrası beton örneklerinden ince kesitler yardımıyla imaj analizi yapılarak çatlak yapısı değerlendirilmiştir.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Günümüzün en popüler yapı malzemeleri arasında bulunan beton çok iyi basınç dayanımına sahip olmakla beraber, çekme gerilmeleri altında eğilme dayanımı çok düşük olan gevrek bir malzemedir. Betonun bu gevrek özelliği betona ilave edilen çelik donatılarla kısmen sünek hale getirilmişse de bu yeterli bir süneklik değildir. Çünkü betondaki çelik donatılar makro çatlaklar üzerinde etkili olabilse de mikro çatlaklar önlemede yeterli olamamaktadır. Geçmişte de Roma, Selçuklu ve Osmanlı yapılarının incelemesiyle yapı malzemesinin gevrekliğini gidermek için yapı malzemesine keçi kılı, at kılı, palmye lifi gibi çeşitli liflerin katıldığı görülmüştür. Günümüzde ise bu amaçla gelişen teknoloji ile beraber üretilen çelik lifler, polipropilen lifler, polyester lifler, polimer fiber lifler, bazalt lifler, cam lifler gibi çeşitli tipteki lifler kullanılmaktadır. Böylece beton hem daha sünek hale getirilip enerji yutma kapasitesi artırılmakta hem de çeşitli gerilmeler altında oluşabilen mikro çatlakların gelişimi sınırlandırılabilmekte ve betonun mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir [7].

Akçaözoğlu [8] pet şişe atıklarının agrega olarak kullanılmasıyla üretilen betonlar üzerinde yaptığı çalışmada pet / bağlayıcı oranının 0.5 ten 0.6 ya çıkmasının betonun basınç dayanımını düşürmediği ancak buna karşın eğilme dayanımını düşürdüğünü ve rötreyi azalttığını gözlemlemiştir.

Günaydın ve Güçlüer [9] betona çimento hacminin % 1 i oranında bazalt lif ikame ederek ürettikleri beton numuneleri kullanarak yaptıkları yarmada çekme deneyleri sonucunda kullanılan bazalt lif ikamesinin beton numunelerin yarmada çekme dayanımını % 16 oranında iyileştirdiğini belirlemişlerdir.

Muktadir ve ark. [10] yaptıkları çalışmada Polivinil Alkol (PVA) lif kullanılarak üretilen bir beton üzerinde yapılan deneylerde PVA lifinin % 0,5 i için basınç dayanımın geleneksel betonun neredeyse %10'u ile % 60 oranında arttığı, PVA lifinin % 1 i için ise geleneksel betonun % 30 u ile % 115 i arasında arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca lif içeriği %1.0 olduğunda betonun basınç dayanımının maksimum olduğu bulunmuştur. Aynı araştırmada betonun eğilme kapasitesi de analiz edilmiş ve PVA liflerinin % 0,5 i için geleneksel normal betonun eğilme dayanımının neredeyse % 32 ile % 132 si kadar arttığı, PVA lifinin %1,5 i için numunelerin kür süresi boyunca geleneksel normal betonun

neredeyse % 54 ile % 167 si oranında arttığı ve lif içeriği % 1,5 olduğunda betonun eğilme dayanımının maksimum olduğu belirtilmiştir.

Sandeep ve Ambika [11] yaptıkları çalışmada hindistan cevizi lifleri ikame ederek ürettikleri beton numunelerinin eğilme dayanımlarını geleneksel normal beton numunelerinin eğilme dayanımlarını karşılaştırmışlardır. Sonuçta % 1,5 hindistan cevizi lifi ikame edilen beton numunelerin geleneksel olarak üretilen beton numunelerden daha fazla eğilme dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bükülebilir betonun esnek doğası nedeniyle çatlak oluşumuna karşı daha dayanıklı olduğu ve deprem hareketlerine karşı daha verimli çalışacağı belirtilmiştir.

Ünal, Uygunoğlu ve Gençel [12] 60 ve 80 narinlik oranlarına sahip iki farklı tipte çelik lif kullanılarak ürettikleri beton numuneler ile yaptıkları araştırmada betonun çökmesinin ve işlenebilirliğinin azaldığı ancak boyutu büyük olan liflerde daha fazla azaldığı tespit edilmiştir. Çelik lif kullanılarak üretilen betonun tokluğu ve gerilme birim deformasyonunun lif kullanılmadan üretilen kontrol betonundan daha iyi olduğu görülmüş. Hatta 1 m³ betonda 60 kg çelik lif kullanılarak üretilen numunelerin lifsiz kontrol beton numunelerinden 5 kat daha fazla tokluk ve gerilme birim deformasyon yeteneğinde artış olduğu görülmüştür. Ayrıca betona çelik lif ilavesinin betonun eğilme dayanımını önemli derece arttırdığı ve betonda görülen ilk çatlak genişliğinin lif eklenmesiyle azaldığı tespit edilmiştir. Ancak çelik lif eklenmesinin betonun basınç dayanımında liflerin yönelim ve dağılımları nedeniyle hem olumlu hem de olumsuz etkilendiği belirtilmiştir.

Çivici ve Güngör [13] yaptıkları çalışmada, çelik lif ve polipropilen lif kullanılarak üretilen karma lifli beton örnekler basınç ve eğilme deneylerine tabi tutmuşlardır. Yapılan incelemelerde örneklerin enerji yutma kapasitelerinin (tokluk) lif miktarının artmasıyla birlikte arttığı belirtilmiştir. Ayrıca en iyi performansında karma lifli numunelerde elde edildiği ve liflerin kullanılmasının örneklerin enerji yutma kapasitelerini artırarak daha sünek bir davranış elde edilmesini sağladığı belirtilmiştir.

Erdoğan [14] yaptığı çalışmada bazalt lif ve cam lif ikame ederek ürettiği numuneleri lif ikame edilmeden üretilen beton numuneleriyle karşılaştırmış ve bazalt lifli beton numunelerin betonun basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemediğini buna karşın çekme dayanımı, tokluk ve kırılma enerjisini de lif katkısız numuneye göre önemli ölçüde artırdığını belirlemiştir. Cam lifli beton numuneler ile bazalt lifli numunelerin betonun belirtilen özelliklerini geliştirmede paralel bir etki oluşturdıkları tespit edilmiştir.

Arslan ve Sarıkaya [15] yaptıkları araştırmada beton numunelerinde % 0.5, 1, 1.5 oranlarında ikame edilen poliester, poliamid ve jüt lifli beton numunelerinin, betonun mekanik etkisi incelemişlerdir. Numunelere uygulanan basınç deneyi sonuçlarında betona belirtilen lif katkılarının ikame edilmesinin betonun basınç dayanımında kayba neden olduğu ancak bu kaybın standartların içerisinde kaldığını belirlemişlerdir. Numunelerin eğilme deneyi sonuçlarında ise artan oranlarda lif katkısının betonun eğilme dayanımında artışa neden olduğu, tüm liflerin olumlu sonuç verdiği ve lifler arasında eğilme dayanımına katkı açısından belirgin bir farkın olmadığı sonucuna varmışlardır.

Aslan [16] farklı oranlarda cam lifleri ikame edilmiş ve sabit S/Ç oranı kullanılarak üretilen beton numuneleri ve şahit numuneleri basınç ve yarmada çekme deneyine tabi tutulmuştur. Sonuçta cam lif ikamesinin belirli lif oranlarında basınç dayanımını %2 ile %6 oranlarında artırdığını ve bazı lif oranlarında %14,82 oranında ise basınç dayanımını düşürdüğünü belirlemişlerdir. Cam lif ikamesinin numunelerin yarmada çekme dayanımlarını tüm lif oranlarında %8 ile %22 gibi değişen oranlarda artırdığını belirlemişlerdir. Ancak buna karşın Cam lif ikamesinin betonun kalıba alınmasını ve işlenebilirliğinde sorunlar meydana getirdiğini belirtmişlerdir.

Öncel [17] yaptığı çalışmada beton hacminin %0.25, %0.50 ve %0.75'i oranında çelik lif ve polipropilen lif ikameli beton numuneleri basınç, eğilme ve aletli ağırlık deneylerine tabi tutmuş ve çelik lif ve polipropilen lif ikameli betonların lifsiz betonlara göre basınç dayanımını artırdığını belirlenmiştir. Ayrıca belirtilen lif ilavesinin betonların eğilme dayanımlarını artırdığını ve lif ilavesinin çatlak genişliğini önemli ölçüde azalttığını tespit edilmiştir. Yapılan ağırlık düşürme deneyi sonucunda ise çelik lif ve polipropilen lif ikame edilerek üretilen beton numunelerin lif ikame edilmeden üretilen şahit numunelere oranla ani kırılmaya karşı daha dirençli olduğu tespit edilmiştir.

Atahan ve Yücel [18] yaptıkları çalışmada kaba ve ince kırıntı kauçuk kullanılarak ürettikleri beton numuneler üzerinde yaptıkları basınç deneyi ve ağırlık düşürme deneyine tabi tutmuşlar ve sonuçta kauçuk katkısının betonun basınç dayanımı ve elastik modülünü azalttığını ancak darbe süresini ve enerji yutma kapasitesini önemli oranda artırdığını belirlemişlerdir.

Mohammadi ve ark. [19] karışık en boy oranına sahip çelik liflerin %1.0, %1.5 ve %2.0 gibi üç farklı hacimlerde ve her bir hacimde de $0,6 \text{ mm} \times 2,0 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ ve $0,6 \text{ mm} \times 2,0 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ boyutlarında karışık çelik lifler ilave edilerek üretilen $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ boyutlarında kiriş numuneler üzerine ağırlık düşürme darbe testleri

uygulanmış ve numunenin ilk görünür çatlağını ve nihai deformasyonu oluşturmak için gereken çekicinin darbe sayısı kaydedilmiştir. Sonuçta liflerin betona dahil edilmesi, düz betona kıyasla darbe direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Darbe yükü altında en iyi performansın, hacimce %2,0 lif oranı içeren beton tarafından, ardından hacimce %1,5 oranında ve hacimce %1,0 oranında lif içeren betonlarda görüldüğü tespit edilmiş ve nispeten daha uzun liflerin kullanılmasının, nispeten daha kısa liflerden daha iyi performans verdiği sonucuna varmışlardır.

Marar ve ark. [20] çengel uçlu çelik liflerin üç farklı en boy oranı (l / d) ile ikame edilmiş beton numuneler üzerinde yaptıkları basınç ve darbe deneylerinde şu sonuçlara ulaşmışlardır. Beton numunelerde çelik liflerin hacminin artırılması, darbe dayanımının artmasına neden olduğu ve %2.0 hacim yüzdesine ve 83 en boy oranına sahip numunelerin darbe dayanımı, şahit betona kıyasla yaklaşık 74 kat arttığını belirtilmiştir. Ayrıca şahit numunelere kıyasla betona çelik liflerin eklenmesi nedeniyle sıkıştırma tokluğu önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir. 60, 75 ve 83 çelik lif en boy oranı için lifli beton numunelerinin sıkıştırma tokluğu enerjisi ve darbe enerjisi arasındaki ilişkinin logaritmik bir fonksiyon olduğu belirlenmiştir. Darbe test makinesinden (düşük ağırlık testi) lifli beton numunelerin sıkıştırma tokluk enerjisinin elde edilebileceği belirtilmiştir.

Al-Tayeb ve ark. [21] yaptıkları çalışmada beton karışımları, kumun kısmi ikamesi (hacimce %10 ve %20 ikame) ile 0,16–2,36 mm partikül boyutunda geri dönüştürülmüş ince parça kauçuk kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlana şahit beton ve kauçuk ikameli beton numuneler bir düşük ağırlıklı darbe makinesinde, 300 mm yükseklikten basit mesnetli bir betonun ortasına 20 N'luk bir ağırlık düşürülerek, kırılmaya kadar yüklenmiştir. Statik yük testi için kiriş ve benzeri numuneler kullanılmıştır. Şahit ve kauçuk ikameli beton kirişler için statik ve darbe yükleri altında eğilme yükü-yer değiştirme davranışı analiz edilmiştir. Dinamik kiriş davranışı, LUSAS V.14 yazılımına dayalı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal olarak da analiz edilmiştir. Genel olarak, sonuçların, kauçuk ikameli kirişin dayanabileceği darbe nihai eğilme yükünün, geri dönüştürülmüş ince kırıntı kauçuğu ile kum değiştirme yüzdesinin artmasıyla arttığını, statik tepe eğilme yükünün ise her zaman azaldığını belirlemişlerdir. Kauçuk ikameli beton kirişin kullanımı, statik yüklemeye kıyasla dinamik yükleme sırasında kirişin eğilme darbe performansını iyileştirdiği. Ayrıca, kauçuk ilavesi, normal betonun tokluğunu ve deformasyon kabiliyetini iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Aliabdo ve ark. [22] yaptıkları çalışmada betonun darbe ve penetrasyon direncini araştırmışlardır. Bu amaçla farklı tipte çelik lifler ve polipropilen lifler kullanmışlardır. Numuneler üzerinde standart darbe testi ve betonun darbe ve penetrasyon direncini ölçmek için önerilen simülasyonlu penetrasyon testini uygulamışlardır. Şahit ve lifli betonun test sonuçları, farklı konfigürasyonlarda çelik liflerin betonun darbe dayanımı üzerinde büyük bir olumlu etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, simüle edilmiş penetrasyon testi, çelik liflerin propilen liflerden daha etkili olduğunu göstermiştir. %0,1 ve %0,2 polipropilen liflerin kullanımı, iç lifleri olmayan beton test paneline kıyasla penetrasyon derinliği, giriş krater alanı ve çatlak genişliği üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Çelik liflerin varlığı penetrasyon derinliği, giriş krater alanı ve çatlak genişliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Örnek olarak, düz betona kıyasla %1.0 ve %2.0 düz çelik fiber kullanılması sonucunda penetrasyon derinliği azalması yaklaşık %16, %22 civarında olduğu belirlenmiştir. Çelik lif içeriğinin %1,0'dan %2,0'a yükseltilmesi, penetrasyon derinliği ve giriş krater alanı üzerinde hafif bir etkiye sahip olduğu, ancak ortaya çıkan çatlak genişliği üzerinde açık bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Akçaözoğlu [23] yaptığı çalışmada, yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış beton numunelerin basınç dayanımı ve ultrasonik dalga hızı üzerindeki etkisi ve ayrıca yüksek sıcaklığın beton numunelerin agrega-çimento ara yüzü ve agrega mikro yapısı üzerindeki etkisi de düzlem polarize iletilen ışık (PPTL) yöntemi ile incelenmiştir. Bu amaçla normal Portland çimentosu, kuvarsitik doğal kum ve bazaltik iri agrega kullanılarak üretilen beton numuneler 200, 400, 600, 800 ve 1000 0C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yapılan basınç testi ve ultarsonik test sonuçlarının artan sıcaklık değerlerinin basınç dayanımı ve ultrasonik dalga hızı değerlerini azalttığını belirlemiştir. Ayrıca yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış beton numunelerin agrega-çimento hamuru aderansı ve yüksek sıcaklığın agrega yapısı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla beton numunelerden ince kesitler hazırlanmış ve hazırlanan bu ince kesitler düzlem polarize iletilen ışık (PPTL) yöntemi ile incelenmiştir. PPTL inceleme sonuçlarına göre bazalt agrega-çimento aderansı kuvars agrega-çimento hamuruna göre daha iyi olduğunu belirlemiştir.

Akçaözoğlu ve ark. [24] yaptıkları çalışmada yüksek sıcaklığı maruz bırakılmış klinoptilolit içeren betonun özelliklerini mikroskopik analizlerle incelemişlerdir. Bu amaçla şahit beton ve ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 klinoptilolit olmak üzere altı karışım hazırlanmıştır. Karışımların kuru birim ağırlıkları, su emme oranları, gözeneklik oranları, basınç dayanımları ve ısı iletkenlik katsayıları ölçülmüş, ayrıca

numuneler 250, 500, 750 ve 1000 °C'lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmış ve daha sonra hızlı ve yavaş soğutma kullanılarak numuneler soğutulmuştur. Daha sonra beton numunelerden ince kesitler hazırlanmış ve hazırlanan ince kesitler mikroskobik analiz ile analiz edilmiştir. Mikroskobik analiz sonuçları karışımlarda klinoptilolit miktarının artışıyla paralel biçimde, agregaların yüksek sıcaklıklardan daha az etkilendiği gözlenmiştir.

Mahal ve ark. [25] yaptıkları çalışmada karbon fiber takviyeli plakalar ve yüzeye yakın çubuklarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yorulma dayanımı, dijital görüntü korelasyonu (DIC) tekniğini kullanarak incelemiştir. Yapılan yorulma testlerinde tekrarlı yükler altında elde edilen dijital görüntülerden elde edilen çatlak genişliği, kiriş eğriligi, yer değiştirme alanları ve çatlak algılamasını sağlamak için analiz edilmiş ve dışarıdan bağlanmış karbon fiber takviyeli polimer (EBR) plakalar ve yüzeye yakın (NSM) çubuklarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yorulma davranışı, dijital görüntü korelasyonu (DIC) tekniği kullanılarak araştırılmıştır. Yorulma testlerinde belirli yük döngüleri sırasında kaydedilen dijital görüntülerden elde edilen yer değiştirme alanları, çatlak genişliği, kiriş sehim ve eğriligi ve çatlak tespiti sağlamak için ana gerilmeler hakkında bilgi sağlamak için analiz edilmesiyle elde edilen sonuçlar, geleneksel yöntemler kullanılarak toplanan verilerle karşılaştırılmış ve geleneksel teknikler kullanılarak ayrıntılı bilgi elde edilmesinin mümkün olmadığı durumlarda DIC tekniğinin kullanılmasının çok doğru ve ayrıntılı bilgi sağladığını ortaya koymuş olduğunu tespit etmişlerdir. Dijital görüntü korelasyonu (DIC) tekniği, doğrudan çatlak tespiti sağlayacağı ve monoton ve yorulma yükü altında tam ölçekli bir betonarme kirişin gerçek mekanik davranışını ölçmek için kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Mahfuz ve ark. [26] beton numunelerinde farklı gerilme-şekil değiştirme bölgelerinde meydana gelen deformasyonları bir görüntü analiz tekniği kullanarak incelemiştir. Bu amaçla hazırlanan numuneler elastik, plastik ve kırılma noktalarındaki deformasyonları net bir şekilde izlemek için iki saat boyunca elastik limit yüklemesine maruz bırakıldıktan sonra numuneler epoksi emdirilerek kurumaya bırakılmış ve daha sonra bu numunelerin her bir serisinden ince kesitler alınarak görüntü analiz yöntemiyle mikroskop altında mikro yapısı incelenmiş ve fotoğraflanmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre çatlak oluşumu ve türlerinin değiştiğini ve artan gerilme ve deformasyonlar nedeniyle farklılaştığını gözlemlemiştir.

Balav [27] yaptığı çalışmada silindirle sıkıştırılmış betonların boşluk yapısının kullanılan çimento ve su miktarları ile beton karışımındaki agrega boyutu ve farklı sıkıştırma yöntemleriyle ilişkisini tespit etmek amacıyla yüksek çözünürlüklü mikroskop kullanılarak görüntü analiz yöntemi kullanarak analiz etmiştir. Bu amaçla hazırlanan ve modifiye proktor, vibrasyon çekici, vibrasyon masası ve yoğurmalı sıkıştırıcı olmak üzere dört farklı laboratuvar sıkıştırma yöntemi ile sıkıştırılmıştır. Bu dört farklı metotla sıkıştırılmış olan beton numunelerden 50x60 mm ebatlarında ince kesitler elde edilmiş ve bu ince kesitler yüksek çözünürlüklü mikroskopla incelenmiş fotoğraflanmış ve elde edilen veriler görüntü analiz yazılımıyla analiz edilmiş ve petrografi boşluk oranları hesaplanmıştır. İnce kesitlerden elde edilen analiz sonuçları sonucunda hesaplanan boşluk oranları farklı parametreler kullanılarak değerlendirildiğinde en uygun sıkıştırma yönteminin yoğurmalı sıkıştırma yöntemi olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca hazırlanan bütün beton karışımlarında da su oranının artmasının kullanılan dört sıkıştırma yönteminde de boşluk oranının azalttığı ve basınç dayanımını arttırdığını tespit etmiştir. Ancak kullanılan agrega boyutuyla boşluk oranları için istikrarlı bir davranış tespit edilememiştir. Buna karşın agrega boyutunun artmasının genel olarak basınç dayanımını artırdığını gözlemlemiştir.

3. BETON KATKI MADDELERİ

Betonun olumsuz özelliklerini istenilen yönde geliştirmek için beton üretimi sırasında betona eklenen maddeler beton katkı maddesi olarak tanımlanır. Beton katkı maddeleri genellikle betonun bir ya da birkaç özelliğini istenilen yönde değiştirmek amacıyla kullanılırlar. Bunlar; işlenebilirliği artırmak, priz süresini geciktirmek veya kısaltmak, donma çözünme dayanımı artırmak, sülfat, klor dayanıklılığını artırmak, geçirimsizlik sağlamak, dayanım artışı sağlamak, donatı ile betonun aderansını artırmak, donatının korozyonunu önlemek, hidrasyon ısını değiştirmek alkali- agrega reaksiyonun zararlı etkilerini önlemek, su miktarını azaltıcı vb. olabilir [28].

Beton katkı maddeleri mineral kökenli veya kimyasal kökenli olabilir. Hangi türden katkı kullanılırsa kullanılsın şunlar asla unutulmamalıdır, katkı maddeleri bir ilaç değildir ve kötü hazırlanmış kalitesiz bir betonun özelliklerini iyileştiremezler. Birden fazla katkı maddesi kullanılacaksa bunların etkileşimler mutlaka dikkate alınmalıdır. Ayrıca katkı maddeleri standartlara uygun olmalı ve kullanım sırasında üreticinin verdiği kullanma kılavuzuna uyulmalıdır.

Beton katkı maddeleri mineral katkılar, kimyasal katkılar ve lif katkılar olarak gruplara ayrılarak incelenebilir.

3.1. Mineral Katkılar

Mineral katkı maddeleri volkanik tüf, volkanik kil, diatomlu toprak gibi doğal puzolonik malzemelerden elde edilebileceği gibi, silis dumanı, uçucu kül gibi endüstriyel tesislerden elde edilen yapay puzolonik malzemeler de olabilir. Bu malzemelerin kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri olmamakla beraber silisli ve alimünlü içeriklerinden dolayı ince öğütüldüklerinde sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştiğinde bağlayıcılık özelliği kazanırlar. Bu tür maddeler ilk olarak İtalya'nın pozzuoli kasabasında keşfedildiklerinden "puzolan" maddeler olarak da adlandırılırlar [29].

Çimentonun hidrasyonu sonucu dayanım artışı sağlayan C-S-H jelleri oluşur. Ancak bu sırada portlandit te (CH) denilen ve betonda istenmeyen bir hidrasyon ürünü olan sönmüş kireç (Ca(OH)_2) oluşur. Bu kalsiyum hidroksit ilerleyen zamanlarda karbonatlaşma denilen durumun ortaya çıkmasına neden olur. Bu karbonatlaşma betonun

içindeki donatının korozyonuna neden olur ki bu betonarme için istenmeyen bir durumdur. İşte mineral katkı maddeleri esas olarak çimentonun suyla hidratasyonu sonucu açığa çıkan istenmeyen bu kalsiyum hidroksit (CH) ile reaksiyona girerek kalsiyum hidroksiti ilave C-S-H jellerine dönüştürüp dayanım artışı sağladığı gibi Oluşan bu ilave C-S-H jelleri sayesinde de betonun içindeki boşlukları doldurarak daha geçirimsiz bir beton üretilmesini sağlar ve böylece betonun servis ömrü boyunca durabilitesini de artırmış olur. Ayrıca çimentodan tasarruf sağladığı için ekonomide sağlanmış olur [30].

3.2. Kimyasal Katkılar

Betonun performansını istenilen yönde artırmak için kullanılan katkı maddelerinden bir türü de kimyasal katkılardır. Kimyasal katkılar betonun özelliklerini iyileştiren ve suda çözünebilen maddelerdir. Bu gün çeşitli firmalar tarafından üretilen çok sayıda kimyasal katkı maddesi bulunmaktadır. Bu kimyasal katkılar betonun dayanımını artırma, işlenebilirliğini artırma, prizi hızlandırma veya geciktirme, geçirimsizlik sağlama, hava sürükleyerek donma çözünme dayanıklılığını artırma, oluşacak rötne miktarını azaltma, su miktarını azaltma, vb. beton özelliklerinde iyileştirmeler sağlayabilmektedirler [31].

3.3. Lif Katkılar

Yüz yılımızın en önemli yapı malzemesi olan beton yüksek basınç gerilmelerini taşımakta oldukça başarılı bir yapı malzemesi olmasına karşın, çekme gerilmelerini taşımakta o kadar başarılı değildir. Betonarme bir yapı elemanında betonun çekme dayanımı basınç dayanımına göre çok düşük olduğundan betonun basınca çalıştığı kabul edilir. Donatının ise çekme gerilmelerini karşıladığı kabul edilir. Betonun çekme dayanımının çok düşük olması, onu çekme gerilmelerine karşı oldukça dayanıksız yapar. Bu durumda betonda gevrek kırılmalara yol açar. Ülkemizin büyük bir kısmının deprem kuşağında olması ve dünyada bir deprem gerçeğinin var olduğu göz önüne alındığında betonun büyük deformasyonlar yapıp yatay deprem yüklerini sönmülemeyerek ani göçmelerin önüne geçmesi gerekmektedir. Süneklik olarak adlandırılan bu enerji sönmüleme kapasitesinin artırılması için çok çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan biri de içerisine çeşitli lifler katılarak üretilen lifli betonlardır [1].

Aslında çekme gerilmeleri sonucu oluşan çatlakları önlemek için yapı malzemesinin içine lif konulması çok eski devirlere kadar gitmektedir. Buna eski yapıların inşasında kullanılan kerpiçlerde bulunan saman lifleri örnek verilebilir. M.Ö 1500 yıllarında Irak ta “aqar quf” adı verilen bir kulenin inşasında kullanılan pişmiş tuğla yapımında saman kullanıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca Osmanlı Devleti döneminde inşa edilen yapılarda kullanılan “horasan” harcı denilen yapı malzemesinin içine de saman benzeri lifler katıldığı bilinmektedir [32].

Betonun çekme gerilmelerini artırmak ve gevrek olan betonu daha sünek hale getirip dinamik yükler altında daha fazla deformasyon yapabilme yeteneğinin artırılması için lif katkıları kullanılır. Ancak lif katkıları kullanılırken betonun bünyesindeki stabiliteyi, homojenliği bozmadan betonla birlikte çalışması önemsendiği için çimento hamuruyla birlikte kohezif etki oluşturmaları, yine çimento hamurunun agrega aderansına negatif etkisinin olmamasına dikkat edilmelidir. Ayrıca liflerin mümkün olduğunca çimento hamuruyla özdeşleşip betonun tokluk indeksini artırması gerekmektedir.

Bu amaçlarla günümüzde, çelik lifler, cam lifler, aramid lifler, karbon lifler, polipropilen lifler, polietilen lifler, naylon lifler ve organik lif katkıları gibi çeşitleri kullanılabilmektedir [2]. Çizelge 3.1’de çeşitli türde liflerin mekanik özellikleri verilmiştir.

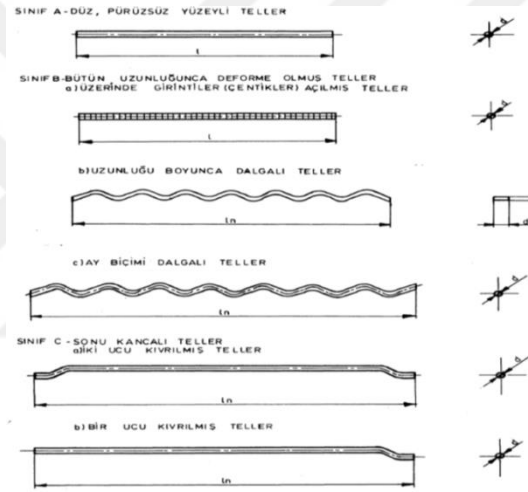
Çizelge 3.1 Farklı türdeki liflerin mekanik özellikleri [33]

Lifin Cinsi	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (10^3 MPa)	Maksimum Uzama (%)	Özgül Ağırlık (g/cm^3)
Çelik lif	276 - 2760	200	0,50-3,50	7,80
Cam lifi	1035 -3795	69	1,50-3,50	2,50
Akrilik lif	207 - 414	2,10	25-45	1,10
Naylon lif	759-828	4,10	16-20	1,10
Polyester	724-863	8,30	11-13	1,40
Polietilen lif	690	0,14-0,4	10	0,95
Polipropilenler	552-759	3,50	25	0,90
Asbest lifler	552-966	83-138	0,60	3,20

3.3.1. Çelik lifler

Betonun çekme dayanımını artırmak ve çatlak oluşumunu azaltmak için kullanılan yöntemlerden biri beton içine çelik lif konulmasıdır. Bu yöntem ile ilgili çalışmalar 1910 yılından beridir devam etmektedir. Betonun çekme dayanımını artırarak çatlak oluşumunu azaltmak için kullanılan çelik lifler düşük karbonlu C1008 çeliğinden soğuk çekme işlemi

ile üretilirler. Yüksek ve üniform çekme gerilmeleri ve düşük uzama özellikleri önemli özellikleri arasındadır. Bu çelik lifler çekme gerilmelerini çatlak boyunca iletebilme özelliğine sahiptirler. Ortala çekme gerilmeleri 1200 MPa dan fazladır. Ayrıca % 2 nin altında elastik limit özelliklerine sahiptirler. Beton içerisine hacimsel olarak %1-2 oranında katılması durumunda optimum faydanın sağlandığı yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir [34]. Ancak çelik liflerden istenilen performansın elde edilebilmesi için liflerin homojen dağılması oldukça önemlidir. TS 10513 çelik lifleri, Düz, pürüzsüz yüzeyli teller, bütün uzunluğunda deforme olmuş teller ve sonu kancalı teller olmak üzere üç şekilde sınıflandırılmıştır. Şekil 3.1’de bu sınıflandırmaya ait şekiller görülmektedir [35].



Şekil 3.1 Çelik lif şekilleri [35].

Yapılan çalışmalarda karışım oranlarının düzgün tasarlanması ve çelik liflerin beton matrisi içerisine homojen dağılımı sağlandığı takdirde betonun enerji sönümleme kapasitesinin ve dolayısıyla sünekliğinin artırdığını, çekme dayanımının normal betonlara göre önemli artışlar gözlendiği, ayrıca çatlakların çelik liflerin köprüleme etkisi nedeniyle ilerlemesinin durdurulduğu ve liflerin betondan sıyrılması fazla miktarda enerji gerektirdiğinden betonun tokluğunda da artışa neden olduğu ortaya konmuştur. Çelik lifli beton zemin ankrajlarında, kanal uygulamalarında ve şev uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [33].

3.3.2. Cam lifler

Betonun çekme mukavemetini artırmak ve çatlak kontrolü sağlamak için kullanılan katkı maddelerinden biri de cam liflerdir. Cam lifler hem 1035-3795 MPa arasında değişen yüksek çekme dayanımlarına sahiptir hem de ekonomiktirler. Genel olarak A ve E olmak üzere farklı iki tipte cam lifi vardır. A cam lifi alkali cam olarak bilinir. E camı ise borosilikat camıdır ve elektriksel ve mekanik özellikleri oldukça iyidir. Uygulamalarda yaygın olarak kullanılan E camıdır. Ancak bu malzemeler beton içindeki yüksek alkali ortamdan etkilenip yapıları bozulur hızlı bir şekilde dayanım kaybına neden olduklarından bu lifler (A ve E lifleri) uzun vadeli kullanımlar için çok uygun malzemeler değildir. Ancak yapılan araştırmalar neticesinde uzun süreli kullanımlar için AR camı denilen alkali dirençli cam lifleri geliştirilmiştir [34]. Çizelge 3.2’de çeşitli cam liflerin mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.2 Farklı tipteki cam liflerin mekanik özellikleri [34]

Lifin cinsi	Çekme gerilmesi (MPa)	Elastisite modülü (10 ³ MPa)	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Kırılma şekil değiştirme (%)
A Camı	3105	64,90	2,46	4,70
E camı	3450	71,80	2,54	4,80
NEGAR camı	2450	78,70	2,74	2,50
CEM FİL AR Camı	2484	80	2,70	3,60

3.3.3. Naylon lifler

Beton, genellikle plastik ve sertleştirilmiş durumlara, kurutma büzülmesine ve benzer nedenlere bağlı olarak ortaya çıkan çatlaklarla, çekme gerilmesi zayıf bir yapı malzemesidir. Çatlaklar genellikle betona nüfuz ederek zaman içinde gelişim gösterirler bu şekilde oluşan ve zaman içinde gelişen çatlaklar betonun su geçirimsizlik yapısında bozulmaya sebep olarak beton özelliklerini bozar ve betonun iç kısmının sızıntılara açık hale getirerek içeriye nem, klor, asit sülfat vb. içeren zararlı maddelerin girmesine neden olur, bu şekilde zararlı kimyasallara maruz kalma, betonarmedeki çelik donatının korozyonuna neden olur ve çelik donatıda korozyon sonucu meydana gelen kesit azalması sonucu betonarme kendisinden beklenen performansı gösteremez. Bu çatlaklarla

mücadele etmenin bir yolu da betona naylon (poliamid plastik) karıştırmaktır. Yapılan araştırmalarda beton üretimi sırasında beton içerisine beton boyunca her yöne eşit olarak karıştırılan liflerin plastik büzülme çatlaklarının oluşumunu engellediği ortaya konmuştur. Sertleştirilmiş betonda, düzgün dağıtılmış lifler mikro çatlakların makro çatlaklara ve potansiyel sıkıntılara dönüşmesine izin vermez. Buna ek olarak, bu elyaflar köprü kurar ve bu nedenle mevcut mikro çatlakları bir araya getirir, böylece betonu parçalanmaya karşı daha da dayanıklı hale getirir [36].

Petrol hammaddesinden elde edilen poliamid tipi plastik olan naylon lifler beton üretiminde kullanılan ilk maddelerdendir. Bu malzeme Amerika da patlamaya dayanıklı yapı üretim araştırmalarında kullanılmıştır. Naylon lifler yüksek çekme dayanımına, kimyasal maddelere dirençli (asitler hariç), alkalilere karşı dayanım gibi özelliklere sahiptirler. Naylon malzemenin betonda hacimce % 0,5 – 3 oranında kullanılması betonun sünekliğini, tokluk indeksini ve çatlak kontrolü gibi özelliklerinde olumlu artışlara neden olmaktadır [34, 37].

3.3.4. Polipropilen lifler

Petrol hammaddesinden sentetik olarak üretilen organik bir lif türü olan polipropilen lifler yüksek çekme dayanımları, ekonomik olmaları ve alkali ortamlarda gösterdikleri direnç ile beton teknolojisinde lifli beton üretiminde kullanılan önemli bir sentetik lif türüdür [32]. Polipropilen lifler, çatlak açılmasına ve kaymaya maruz kalan beton performansına katkıda bulunan önemli liflerdendir [38]. Polipropilen lifler genellikle hem plastik büzülme hem de kurutma büzülme nedeniyle çatlamayı kontrol etmek için betonda kullanılır. Betona karıştırılan polipropilen liflerin işlevi, çeliğin yerini almak değil, betonda mikro çatlakların oluşmasını önlemektir. Bu, yapının ömrünü yani durabilitesini artırır. Betondaki polipropilen lifler, suyun normal giriş modları, örneğin kılcal damarlar, gözenek yapısı, kapak betonu vb. yoluyla iletilmesini önleyerek beton matrisi boyunca su akışını azaltır [39].

Betonda oluşacak çatlakların kontrol altına alınması, betonun yaşı boyunca betondan beklenen performansını yani durabilitesinde önemli bir rol üstlenmektedir. Bunun nedeni, çökme ve plastik büzülme nedeniyle oluşan çatlakların taze beton boyunca yayılmasıdır, böylece beton boyunca oluşan çatlakların neden olduğu zayıflama ve beton matrisinin bütünlüğünde zayıflamaya neden olur. İşte beton üretiminde kullanılan

polipropilen lifler, betonun çekme mukavemetini artırarak ve çatlakları köprüler plastik ve kuruma büzülmesinin olumsuz etkilerini en aza indirirler. Polipropilen lif düşük Young modülüne sahiptir, bu nedenle yüksek gerilme seviyesinde çatlakların oluşumunu ve yayılmasını önleyemezler, fakat büyük çatlakları köprüleyebilir ve böylece çatlak gelişimi engellenmiş olur. Büzülme, özellikle kuruma büzülmesi, çatlamaya neden olabilir. Oluşacak çatlaklardan betona sızan su ve benzeri maddeler betondaki donatılarda korozyona neden olarak betonarmenin durabilitesinde azalmaya yol açabilir. Betonun gevrekliğini en aza indirmek ve böylece betonda oluşacak çatlakları en aza indirmek veya engellemek için karışıma polipropilen lif eklenmesi bir çözüm olabilir. Çünkü Polipropilen liflerin, kuruma büzülmesinin neden olduğu çatlakların gelişimini engellemekte etkili olduğu bilinmektedir. Ayrıca polipropilen liflerin betonun donma-çözülme etkilerine maruz kaldığında mükemmel dayanıklılık gösterdiği bilinmektedir [40].

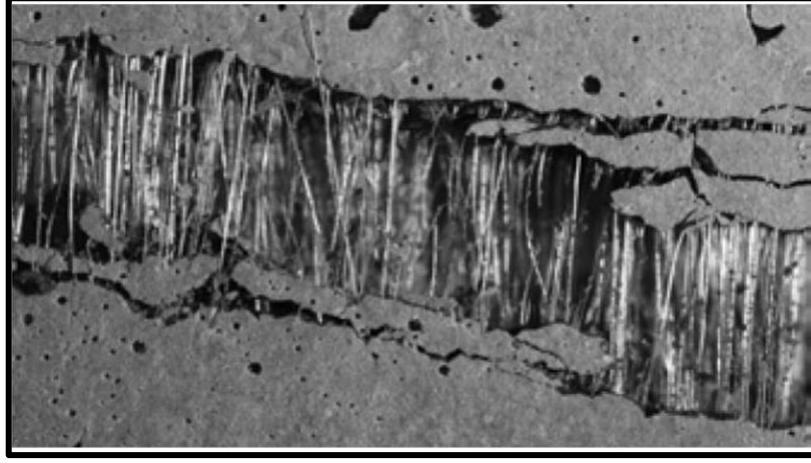
3.3.5. Polyester lifler

Polyester lifler petrol sanayi, kimyasal sanayi ile tekstil sanayisindeki araştırma geliştirme çalışmaları sonucunda insan tarafından yapay olarak üretilen sentetik liflerden biridir. Diğer insan yapımı sentetik lifler gibi polyester lifler de betonun alkali ortamlardaki dayanıklılığını önemli oranda artırmaktadır. Polyester lifler oldukça yüksek çekme dayanımına sahip olmalarına karşın elastisite modülleri düşüktür. Polyester liflerin kalitesini etkileyen önemli bir parametre lifin narinliğidir. Lifin çapı da mikron değerindedir. Diğer sentetik liflerde olduğu gibi polyester lifler de çoğunlukla hacimce %0,1 ile %0,3 gibi düşük oranlarda ve hacimce %0,4 ile %0,8 gibi yüksek oranlarda beton karışımlarına ikame edilirler. Ancak uygulamada beton karışımında en çok kullanılan oran hacimce %0,1'lik orandır. Bu oranda lif kullanılmasıyla betondaki kırılmalar kontrollü bir şekilde gerçekleştiği ayrıca plastik büzülmeyi engellediği gözlenmiştir. Polyester liflerin yüksek sıcaklıklara dayanımı düşük olduğunda yüksek sıcaklık polyester lifler üzerinde olumsuz etkilere neden olurlar. Bu nedenle yüksek sıcaklığa maruz ortamlarda kullanımlarına dikkat edilmelidir [37].

4. ESNEK BETON

Normal beton, çok farklı özellikleri, özellikle dayanıklılığı ve kullanım kolaylığı nedeniyle yaygın bir yapı malzemesidir. Sıradan Portland çimento karışımlarıyla hazırlanan normal betonlar, sınırlı çekme gerilmesi kapasitesine sahip olduğundan büküleme yani esneklik özelliklerinden yoksundurlar, bu da normal betonları son derece kırılgan yani gevrek bir özellik kazandırır. Ancak bu gevreklik betonarme sistemler için istenmeyen bir özelliktir. Bu nedenle betonun çekme dayanımı yok kabul edilerek çekme gerilmelerini çelik donatının karşıladığı kabul edilir. Normal betonlarda bükülebilme (esneklik) özelliğinin olmaması çekme gerilmeleri karşısındaki başarısızlığın temel nedenlerindendir. Bu nedenle betonun çekme dayanımını artırarak betonun bükülebilme yani esnek beton üretimi için çalışmalar birçok araştırmacı tarafından devam edilmektedir [41].

Engineered Cementations Composites (ECC) olarak bilinen esnek beton yüksek süneklik ve çatlakların genişliğini kontrol altında tutmak için çeşitli liflerle (elyaflarla) güçlendirilmiş bir tür ultra sünek çimentolu kompozittir [42]. Esnek beton normal betondaki gibi çimento, agrega ve su gibi temel bileşenlerden oluşur. Ancak normal betondan farklı olarak yeterli esnekliği elde etmek için beton matriksine düzensiz dağılmış elyaf lifler ilave edilir. Yeterli işlenebilirliği sağlayabilmek için de artan miktarda ince agrega süper akışkanlaştırıcılar ve yüksek miktarda su azaltıcı katkıları kullanılır. Bükülebilir betonlar için iri agregalar kullanılmaz, bu da ortaya çıkan malzemeyi betondan çok harç haline getirir. Esnek beton üretiminde, tipik olarak hacimce % 2 olan kısa, süreksiz lifler kullanılır [41]. Çok ince agreganın çok ince liflerle birleştirilmesi, liflerin yüklendiğinde kaymasına izin veren ve kırılmayı önleyen kaygan bir yüzey kaplaması oluşturur. Böylece, lifin ayrılmasını önlenmiş ve çatlak oluşumu azaltılmış olur. Esnek olma özelliğinin elde edilmesi temel olarak beton bileşenleri arasındaki etkileşime, esas olarak da beton matrisi ve lifler arasındaki etkileşime bağlıdır; bu temel faktör, beton davranışını yönetir ve tercih edilen özellikleri sağlamak ve beton matrisinden lifin kopmasını önlemek için uygun mineral katkıların kullanılması gerekebilir. Beton hacminin % 2'si kadar lif katılarak üretilen esnek beton % 3 ila %7 arasında çekme gerilmesi altında kapasitede bir iyileşmeye yol açar [41]. Görsel 4.1'de çatlak oluşumunda liflerin meydana getirdiği köprüleme etkisi gösterilmektedir.



Görsel 4.1 Çatlak oluşumunda liflerin oluşturduğu köprüleme etkisi [43]

4.1. Esnek Betonun Avantajları

Normal betondan daha güçlü, daha dayanıklı ve daha uzun ömürlüdür. Çatlamaya karşı daha fazla dirençli bir yapıya sahiptir. Üretimi için atmosfere yaydığı zararlı gaz miktarı normal betona göre daha azdır. Çelik donatı kullanımı azalır. Gerilmeler sonucu oluşacak çatlak genişliğini azaltır. Normal betona göre bükülebilir betonun eğilme mukavemeti fazladır. Durabilitesi daha iyidir. Esnek beton metal döküm proseslerinden kaynaklanan uçucu kül, kum ve atıklar, çimento üretiminden kaynaklanan atık çimento fırını tozu gibi yüksek hacimli endüstriyel atıkları içerir. Depreme dayanıklı yapılarda kullanılabilir [11].

4.2. Esnek Betonun Basınç Dayanımı

Bir betonun basınç dayanımı, onu ezme eğiliminde olan statik yüke direnme kabiliyetinin değerlendirilmesidir. Sertleştirilmiş beton üzerinde en sık yapılan test basınç dayanımı testidir. Çünkü testin yapılması kolaydır. Ek olarak, betonun arzu edilen birçok özelliği, mukavemeti ve yapısal tasarımda betonun basınç dayanımının sonucu ile niteliksel olarak ilişkilidir [11].

Lif takviyesinin betonun basınç dayanımına etkisi çelik, naylon, polipropilen vb. çeşitli liflerin kullanılmasıyla üretilmiş betonlar üzerinde araştırılmıştır. Bu araştırmalarda çelik lif kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımının ortalama % 25 civarında arttığı ancak bazen de bu oranda azalttığı belirtilmiştir [1].

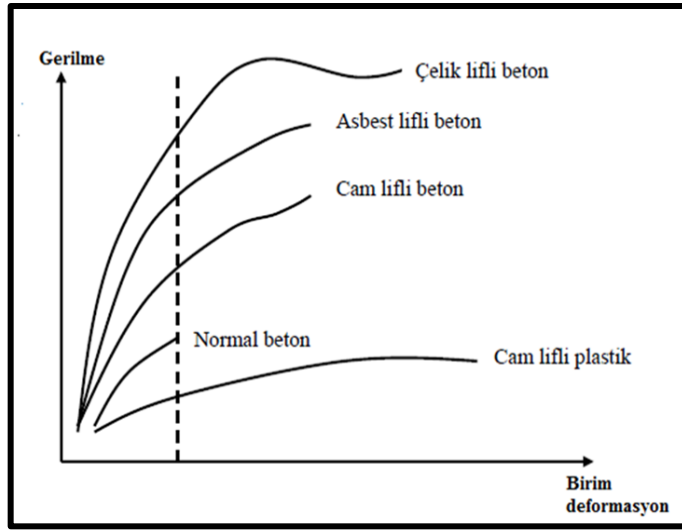
Naylon lifler kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımı normal betonların basınç dayanımına göre önemli bir artışa neden olmamasına rağmen naylon lif katkılı betonların basınç dayanımlarının polipropilen lif katkılı betonlara kıyasla basınç dayanımında % 6,3 oranında artış belirlenmiştir. Bunun sebebi naylon liflerin çekme mukavemetlerinin daha fazla olması ve bu mukavemetlerinin betona aktarmaları ve betonda daha düzenli dağılımları olduğu belirtilmiştir [36].

4.3. Esnek Betonun Çekme Dayanımı

Çekme dayanımı; çekme gerilmelerinin neden olduğu deformasyonlara karşı betonun gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Günümüzde çok yüksek basınç dayanımına sahip betonlar üretilmektedir. Ancak betonun çekme dayanımı basınç dayanımı kadar yüksek değerlere ulaşamamaktadır. Betonun çekme dayanımı basınç dayanımının 1/ 10 kadar bir dayanıma sahip olduğu belirtilmiştir. Betonun çekme dayanımının zayıf olması çekme gerilmelerine karşı betonu gevrek hale getirmektedir. Bu da betonun ani göçmelerle kırılmasına neden olabilmektedir. Betonun bu olumsuz özelliği betona çeşitli elyaf katkıları kullanılarak belirgin bir şekilde geliştirilmektedir ve bu konudaki araştırmalar halen devam etmektedir [1].

Çelik lif kullanılarak üretilen betonlarla yapılan araştırmalardan çelik lifli betonun eğilmede çekme dayanımının lifsiz olarak üretilen normal betonlardan %50'den fazla oranında artış olduğu belirtilmiştir. Bu artışın sebebi çelik liflerin oldukça yüksek çekme dayanımına sahip olmalarıdır [44].

Çelik lif, naylon lif, Polipropilen lif vb. liflerin kullanılmasıyla üretilen betonlarda çeşitli nedenlerle meydana gelen gerilmeler sonucu oluşan çatlakların beton matrisi içinde dağılmış olan liflerin yol açtığı köprüleme sayesinde gerilmelerin çatlakların gelişmesi önlenir ve bu gerilme uyumu sayesinde yük betonun sağlam kısımlarına iletilir. Böylece betonun daha fazla birim deformasyon yapması sağlanmış ve betonun daha sünek bir davranış kazanması sağlanmış olur [45]. Şekil 4.1'de çeşitli liflerin beton çekme dayanımına etkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Çeşitli liflerin betonun çekme dayanımına etkisi [46]

4.4. Esnek Betonun Yorulma Dayanımı

Betonun ya da genel olarak bir yapı malzemesinin tekrarlı yükler altında oluşan gerilmelere çok defa maruz kalması durumunda betonun ani ve gevrek olarak kırılması yorulma olarak adlandırılır. Çeşitli lifler kullanılarak yapılan araştırmalarda özellikle çelik lif kullanılarak üretilen betonların tekrarlı yükler altındaki yorulma dayanımının normal lifsiz betonlara kıyasla %50 - %100 arasında arttığı belirtilmiştir. Yorulma dayanımının betonda kullanılan lif miktarının artmasıyla orantılı olarak arttığı belirtilmektedir. Normal beton kullanılarak ve normal bir şekilde donatılandırılarak üretilen kirişlerin lif katkı kullanılarak üretilmesi durumunda yorulma dayanımının arttığı tespit edilmiştir [1].

4.5. Esnek Betonun Darbe Dayanımı

Betonun ani bir şekilde dinamik bir yüke maruz kalması durumundaki dayanımına darbe dayanımı denilmektedir. Lif katkıları kullanılarak üretilen (özellikle çelik lifli) betonların darbe dayanımlarının normal yani lifsiz betonların darbe dayanımlarından yaklaşık olarak %100 – 1200 oranında bir artış gösterdiği tespit edilmiştir. Lif kullanılarak üretilen betonların içerisindeki liflerin beton matrisine gelen dinamik kuvvetleri üzerlerine alarak betonun darbe dayanımından daha yüksek bir darbe dayanımı sağladıkları görülmüştür [1].

4.6. Esnek Betonun Dayanıklılığı

Betonun servis ömrü boyunca fonksiyonlarını bozulmadan devam ettirmelerine dayanıklılık ya da durabilite denir. Dayanıklılık kapsamlı bir kavramdır; Geçirimsizlik, don direnci, karbonizasyon direnci, erozyon direnci ve benzeri gibi birçok şey içerir. Bu özellikler betonun dayanıklılık derecesini belirler ve servis ömrünü etkiler. Betonun durabilitesini etkileyen en önemli faktörler arasında çatlak oluşumu gelir. Lif kullanılarak beton üretilmesi betona zarar verecek çatlak oluşumunu belirli bir dereceye kadar azaltabilir. Çatlak oluşumu ve gelişiminin azalmasıyla beton içerisine sızıp betona zarar verecek su ve kimyasal maddelerin miktarında ciddi bir azalma olur ve böylece betonun durabilitesinde de artış meydana gelir. Ancak bunun sağlanabilmesi için lifli beton üretimi sırasında karıştırma, yerleştirme ve kür koşullarının çok iyi ayarlanması ve liflerin homojen dağılımının sağlanması gerekir [47].

Polipropilen lifler kullanılarak üretilen betonlar üzerine yapılan bir araştırmada; kullanılan polipropilen lif hacmi aynı kalmak şartıyla lif boyutunun küçültülmesiyle betonların permeabilitesinin azaldığı yani daha geçirimsiz bir beton üretildiği görülmüştür [1].

5. DARBE TEST METOTLARI

Beton gibi kompozit malzemelerin dinamik yükler altındaki performanslarının ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi mühendislik tasarım açısından önemlidir. Bu amaçla kullanılan yöntemlerden biri kompozit malzemeyi darbe testine tabi tutarak dinamik yükler altındaki performanslarının analiz edilmesidir [48]. Darbe; Belirli bir ağırlığın malzeme üzerine düşürülmesi veya çarpması sonucu malzemeye dıştan ve anlık olarak uyguladığı kuvvet olarak tanımlanabilir [49]. Literatür incelendiğinde malzemelerin dinamik yükler altındaki enerji yutma, tokluk, çatlak gelişimi gibi mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla başlıca düşük hızlı (1-10m/s arasında) ve yüksek hızlı darbe test metotları (74.1 m/s kadar) olmak üzere iki tip test metodunun bulunduğu görülür. Düşük hızlı darbe test metotlarına örnek olarak Izod-Charpy darbe, Pendulum darbe test metodu, Ankastre edilmiş kiriş darbe test metodu ve Ağırlık düşürme darbe metodu verilebilir. Yüksek hızlı darbe test metotlarına örnek olarak da basınçlı hava ile darbe test metodu ve Split-Hopkinson basınçlı çubuk test metodu verilebilir. Bu deneysel çalışmada düşük hızlı darbe test metodu olan ağırlık düşürme test metodu kullanıldığından aşağıda sadece ağırlık düşürme test metodu açıklanmıştır [49].

5.1. Ağırlık Düşürme Testi

Kompozit malzemelerin dinamik yükler altındaki performanslarının belirlenmesinde kullanılan darbe test yöntemlerinin en basiti aletli ağırlık düşürme test yöntemidir. Bu yöntemde önceden belirlenen bir ağırlığın belirli bir yükseklikten örnekler üzerine düşürülmesi ile gerçekleştirilir. Aletli darbe testleri, darbe olayı sırasında tek bir darbe kırılması ile kendini gösteren yük, çökme, gerilme ve enerji geçmişlerinin izlenmesine izin verir. Bu, farklı gerilme yükleme hızlarında kırılma tokluğu, enerji dağılımı, nihai mukavemet ve buna karşılık gelen gerilme veya deformasyon gibi temel malzeme özelliklerinin hesaplanmasını sağlar [50].

Aletli ağırlık düşürme testlerinde kullanılan test cihazları Birinci kısım belirli bir ağırlığın istenilen hızda ve istenilen yükseklikten numuneye düşürülmesini ve böylece numuneye darbe sağlayan kısımdır. İkinci kısım ise numuneye uygulanan darbe sonucu elde edilen verilerin yani oluşturulan darbe sonucu elde edilen yük sinyallerinin yük

verileri olarak aktarıldığı ve bu yük verilerinin hassas hesaplamalarının yapıldığı yazılımların yüklü olduğu bilgisayardan oluşur [49].

Ağırlık düşürme test yönteminde hesaplanan darbe enerjisi için belirli bir yükseklikten belirli bir ağırlıktaki tokmak belirlenen hızda numunenin üzerine düşürülür. Darbe sonucu sistemin tokmak ucundaki yük hücresi ile alınan yük sinyalleri yazılımın yüklü olduğu bilgisayara aktarılır. Bilgisayarda yazılım yardımıyla uygulanan darbe ve darbe uygulanan numunede darbe enerjisine karşı oluşturulan tepkiler elde edilir. Elde edilen verilerden uygun yazılımlarla grafikler elde edilir ve grafikler yorumlanarak numunenin dinamik yükler altındaki performansı hakkında gerekli bilgiler elde edilmiş olur [49].



6. GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMLERİ

Görüntü işleme teknikleri, betonun mikro çatlaklarına ve boşluklarına odaklanarak betonun otomatik nicel mikro yapısının araştırılmasında kullanılmak üzere geliştirilen yöntemlerdir. Görüntü işleme yöntemleri basınç, çekme, darbe gibi etkilere maruz kalan betonun yapısında meydana gelen çatlakların yeri, dağılımı ve yayılmasının ayrıntılı incelemesine imkân sağladığından geleneksel yöntemlere göre daha iyi sonuç veren yöntemlerdir. Mikro çatlaklar ve hava boşlukları, ancak mikroskop ile çözülebilen betonun temel mikroyapısal özellikleridir. Mikro çatlakların ve hava boşluklarının mühendislik özellikleri üzerinde farklı etkileri vardır; Bu nedenle, bu iki özelliği ölçme çabaları, mikro çatlakların boşluklardan ayrılmasıyla başlamalıdır; temel nitelikleri daha sonra ayrı ayrı ölçülebilir [38].

Görüntü işleme teknikleri, çatlak tespiti sağlar ve monotonik ve yorulma yükü altında tam ölçekli numunenin gerçek mekanik davranışını ölçmek için kullanılabilir. Görüntü işleme tekniklerinin avantajı, numune yüzeyinin incelenen alanı içindeki her noktada çatlak açıklığını ve yer değiştirmesini aynı anda ölçebilmesidir. Geleneksel deneysel sensörler kullanıldığında bu mümkün değildir, çünkü çatlakların tam olarak nasıl dağıtılacağını önceden tahmin etmek imkânsızdır [25].

Görüntü işleme teknikleri ile genel olarak numunelerden fotoğraf makinesi veya çeşitli mikroskoplar kullanılarak görüntüler elde edilir. Elde edilen bu görüntüler bilgisayara aktarılır ve çeşitli yazılımlar kullanılarak görüntü sayısallaştırılır. Bu sayede insan gözünün makro inceleme ile fark edemediği mikro çatlaklar tespit edilebilmektedir. Böylece betonun mikro yapısı hakkında daha hassas ve daha doğru veriler elde edilir. Görsel inceleme ile böyle bir verinin elde edilmesi imkânsızdır [51].

Numunelerin fotoğraflarının çekilip analiz edilmesinde kullanılan popüler ölçüm tekniklerinden biri de Dijital Görüntü Korelasyonudur (DIC). Dijital görüntü korelasyonu, ya referans olarak kabul edilen bir ilk görüntü (tipik olarak yüklenmemiş aşama) ve her bir sonraki görüntü ya da (yer değiştirme genlikleri çok büyükse) ardışık görüntü çiftleri ile eşleşecek şekilde yer değiştirme alanlarının ölçüldüğü bir dizi görüntünün analiz edilmesinden oluşur. Dijital görüntü korelasyonu, aynı numunenin iki dijital görüntüsünü farklı yükleme aşamalarında ayıran yer değiştirme alanlarının alınmasına izin veren bir ölçüm tekniğidir. Fevkalade hassasiyeti nedeniyle, sadece görünmeyecek olan mikro

açıklığı olan çatlakları tespit etmek değil, aynı zamanda gerilme yoğunluğu faktörlerinin doğru tahminlerini sağlamak da mümkündür [52].

Dijital Görüntü Korelasyonu yönteminde görüntü alımı temassız bir tekniktir ve büyük bir büyütme ile bile örnekten kameraya kadar büyük bir mesafeyi tolere eder. Mikroskoplar, numune yüzeyinden 15 ila 35 cm uzağa yerleştirilir ve fiziksel piksel boyutunda olan mikrometre aralığında olan görüntüler sağlanır. Hızlı dijital kameralar ayrıca çok yüksek frekansta yani saniyede yaklaşık 104'ten 106 kareye kadar, tam çözünürlükte olan görüntüler sağlar ve böylece dinamik testlerin ayrıntılı analizlerini mümkün kılar [52].

Dijital görüntü korelasyon yöntemi numunenin tüm yüzeyinden görüntü almaya olanak sağladığı için avantajlıdır. DIC yöntemi çeşitli yükleme durumlarında betonarme elemanlarda oluşabilecek çatlakların hassas bir şekilde izlenebilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca Dijital görüntü korelasyon yöntemi deneyin durdurulmasına gerek kalmaksızın betonarme elemanda meydana gelen ve gözle görülmesinin mümkün olmadığı mikron seviyesindeki ilk çatlaklar, çatlak henüz ilerlemeden DIC yöntemindeki ileri düzey yazılımlar sayesinde hassas bir şekilde tespit edilip analizi yapılabilmektedir [53].

7. MATERYAL ve METOT

Bu deneysel çalışmada beton karışımı için çimento, karışım suyu, ince ve orta agrega olmak üzere iki agrega ve katkı maddesi olarak da öğütülmüş atık pet şişe kırıkları (PET), polyester lifler (PLY) ve kopolimer fiber lifler (KPF) kullanılmıştır.

7.1. Materyal

7.1.1. Çimento

Beton karışımını hazırlamak için gerekli olan bağlayıcı madde olan çimento CEM II / A - M (P-LL) 42,5 R tipinde TS EN 197-1 standardıyla uyumlu olan Portland kompoze çimento bağlayıcı madde olarak kullanılmıştır.

7.1.2. Karışım suyu

Beton karışımının hazırlanmasında karışım suyu olarak kullanılan su standartlara uygun ve içilebilir özellikte olan Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi yapı malzemeleri laboratuvarında bulunan Adıyaman şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

7.1.3. Agrega

Beton karışımları hazırlanırken ince (0-4 mm) ve iri agrega (4-12 mm) olmak üzere iki tip agrega kullanılmıştır.

7.1.3.1. İnce agrega (0-4 mm)

Beton karışımında ince agrega olarak Adıyaman ilinde faaliyet gösteren özel bir firmanın Göksu çayından temin ettiği ve özgül ağırlığı 2.73 gr/cm^3 ince agrega (0-4 mm) kullanılmıştır.

7.1.3.2. İri agregâ (4-12 mm)

Beton karışımında iri agregâ olarak Adıyaman ilinde faaliyet gösteren özel bir firmaya ait taş ocağından temin edilen özgül ağırlığı 2.65 gr/cm^3 olan agregalar (4-12 mm) kullanılmıştır.

7.1.3.3. Elek analizi

Beton karışımı hazırlanmadan önce karışım için uygun agregâ granülometrisinin elde edilmesi amacıyla ince ve iri agregâ yığınlarının orta bölgesi tespit edilerek orta bölgenin değişik yerlerinden uygun miktarda agregâ alınmıştır. Bu agregalar çeyreklemeye yöntemiyle (Görsel 7.1) istenilen miktarlara getirilerek elek analizleri yapılmış ve elde edilen verilerden granülometri grafiğı çizilmiştir. Çizilen bu grafikler standartlarda yer alan grafikler ile karşılaştırılmıştır.



Görsel 7.1 Çeyreklemeye yöntemi ile alınan ince agregâ

7.1.4. Öğütölmüş pet şişe kırıkları

Deneyisel çalışmada su ve benzeri sıvı maddelerin ambalaj malzemesi olarak kullanılan ve kullanıldıktan sonra atılan pet şişelerin geri dönüşümünü yapan özel bir firmadan temin edilen atık pet şişelerin öğütölmesiyle elde edilmiş olan pet şişe kırıkları (Görsel 7.2) beton katkı maddesi olarak kullanılmıştır.



Görsel 7.2 Öğütülmüş PET şişe kırıkları

7.1.5. Polyester lif

Deneysel çalışmada hazırlanan beton karışımına ikame edilmek amacıyla özel bir firmadan temin edilen ve beton katkı maddesi olarak sentetik bir lif çeşidi olan polyester lifler (Görsel 7.3) kullanılmıştır. Deneyde kullanılan polyester liflerin mekanik özellikleri Çizelge 3.1 de verilmiştir.



Görsel 7.3 Beton karışımına ilave edilen polyester lifler

7.1.6. Kopolimer fiber lif

Deneysel çalışmada beton karışımlarının hazırlanmasında beton karışımına ikame edilmek amacıyla özel bir firmadan temin edilen ve sentetik liflerin bir çeşidi olan

kopolimer fiber lifler (Görsel 7.4) beton katkı lifi olarak kullanılmıştır. Çizelge 7.1’de deneyde kullanılan kopolimer fiber liflerin mekanik özellikleri verilmiştir.



Görsel 7.4 Beton karışımında kullanılan kopolimer fiber lif (KPF)

Çizelge 7.1 Kopolimer fiber liflerin mekanik özellikleri [54]

Lif Çeşiti	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü ³ (10 MPa)	Uzunluk (mm)	Özgül Ağırlık ³ (g/cm)
Kopolimer fiber	640	10	48	0,90-0,92

7.1.7. Ultrases geçiş hızı deney cihazı

Ultrases geçiş hızının tespit edilmesi amacıyla laboratuvarında bulunan Görsel 7.5’te verilen ultrases geçiş hızı cihazı kullanılmıştır



Görsel 7.5 Deneysel çalışmada kullanılan ultrases test cihazı

7.1.8. Schmidt çekici deney cihazı

Scmidt çekici deneyi için laboratuvarında bulunan Görsel 7.6’da verilen test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Görsel 7.6 *Deneyisel çalışmada kullanılan Schmidt çekici test cihazı*

7.1.9. Basınç deney cihazı

Basınç testi Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri laboratuvarında bulunan ve istenilen değerde kgf/cm^2 .sn olarak ayarlanabilen sabit bir yükleme hızı ile yük uygulayan ELE firmasından temin edilen basınç deney aleti kullanılarak basınç dayanımları MPa olarak belirlenmiştir. Görsel 7.7’de deneysel çalışmada kullanılan basınç test cihazı görülmektedir.



Görsel 7.7 *Deneysel çalışmada kullanılan basınç test cihazı*

7.1.10. Eğilmede çekme deney cihazı (Üç nokta yükleme deneyi cihazı)

Eğilmede çekme deneyi laboratuvarında bulunan ELE firmasından temin edilen üç nokta yükleme test aleti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eğilmede çekme deneyi ile kiriş numunelerin eğilmede çekme dayanımları MPa olarak ölçülmüştür. Görsel 7.8’de deneysel çalışmada kullanılan üç noktalı yükleme test cihazı gösterilmektedir.



Görsel 7.8 *Deneysel çalışmada kullanılan üç noktalı yükleme test cihazı*

7.1.11. Aletli ağırlık düşürme deneyi cihazı

Aletli ağırlık düşürme deneyi laboratuvarında bulunan ve İnstron firması tarafından üretilen Ceast 9350 modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Görsel 7.9’da deneysel çalışmada kullanılan aletli ağırlık düşürme test cihazı gösterilmektedir.



Görsel 7.9 Deneysel çalışmada kullanılan ağırlık düşürme test cihazı

7.1.12. Görüntü işleme analizi

Hazırlanmış olan ince kesitlerin Görüntü işleme analizi Görsel 7.10’da verilen mikroskop ve bilgisayar ve bu bilgisayarda yüklü Image-Pro Plus bilgisayar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Görsel 7.10 *Deneysel çalışmada kullanılan görüntü işleme cihazı*

7.2. Metot

7.2.1. Beton karışımının hazırlanması

Beton karışımın hazırlanması TS 802 [55] standardına göre yapılmıştır. Bu işlem için karışım hesabı sonucunda bulunan ve Çizelge 7.1’de verilen miktarlarda ince agrega, iri agrega ve çimento mikserle konulup kuru bir şekilde karıştırılmıştır. Daha sonra kuru karışıma su ilave edilerek karıştırılmıştır. Ardından beton karışımına çimento hacmine oranla %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında öğütülmüş Pet şişe kırıkları (PET), Polyester lifler (PLY) ve kopolimer lifler (KPF) ilave edilmiştir. Şahit numune (ŞH), öğütülmüş pet şişe kırıkları (PET), Polyester lif (PLY), Kopolimer fiber lif (KPF) içeren beton karışım numuneler temizlenip yağlanan 100x100x100 mm ebatlarındaki küp numune kalıpları ve 100x100x150 mm ebatlarındaki kiriş kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıp içindeki betonun iyice yerleşmesi için beton karışımı şişlenmiş ve daha sonra numuneler sarsma tablasına alınarak havasının dışarı çıkartılarak sıkılaşmasının sağlanması amacıyla vibrasyon uygulanmıştır. Sarsma tablasından alınan küp ve kiriş beton numuneler laboratuvarında 24 saat süreyle oda koşullarında bekletilmiştir. 24 saatlik sürenin sonunda kalıplardan çıkarılan beton numuneleri laboratuvardaki kür havuzuna konularak 28 gün süreyle standart küre tabii tutulmuştur. 28 günlük kür süresinin sonunda kür havuzundan çıkarılan küp numunelere ultra ses hızı, Schmidt çekici, basınç, eğilmede çekme ve aletli ağırlık

düşürme deneyleri uygulanmıştır. Schmidt çekici deneyi sadece kür havuzundan çıkarılan kırıış numunelerde uygulanmıştır. Çizelge 7.2 ve Çizelge 7.3’de 1m³ beton karışımı için kullanılan malzeme miktarları verilmiştir. Görsel 7.11’de beton üretim aşamaları gösterilmektedir.

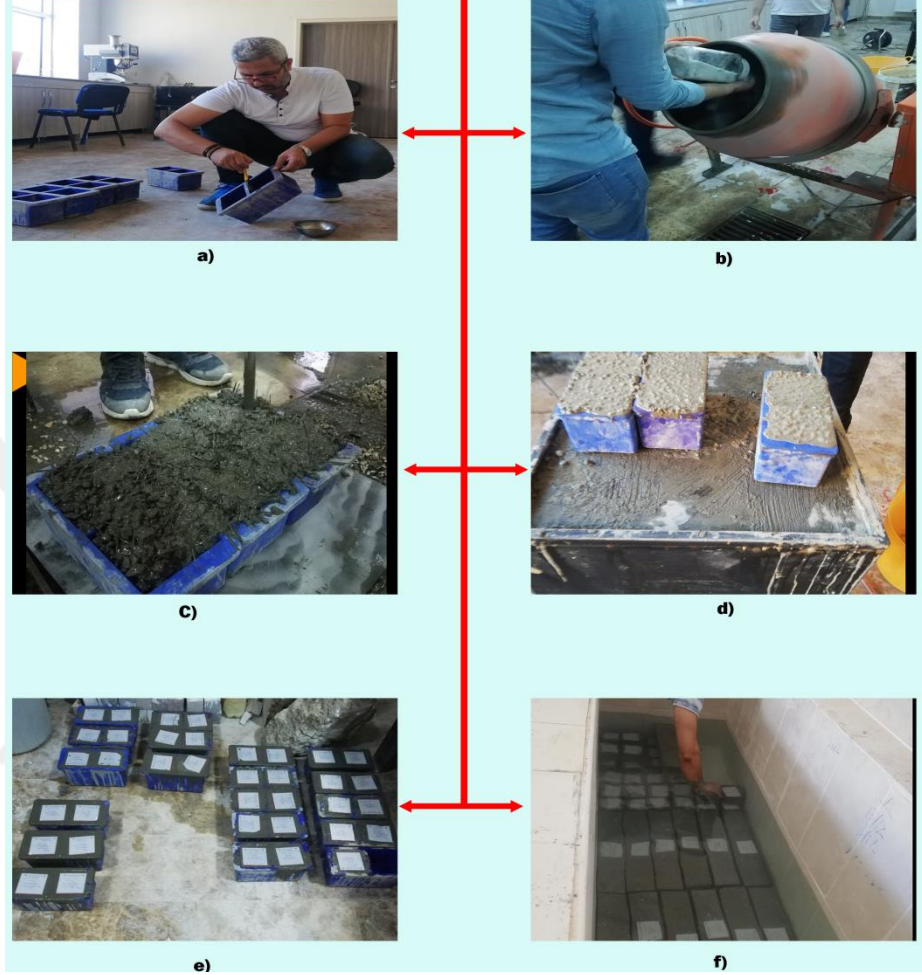
Çizelge 7.2 Beton karışımında 1m³ beton için kullanılan malzeme miktarları

Kullanılan Malzeme Cinsi	Miktar (kg)
Doğal Dere Agregası (0-5mm ince)	639.8
İri Kırmataş Agregası (5-12mm orta)	1150.7
Çimento	400.5
Su	218.9

Çizelge 7.3 Beton karışımında 1 m³ beton için kullanılan katkı miktarı

Örnekler	Oranlar	Kullanılan Katkı Miktarı (kg)
Şahit	% 0	0
PET	% 0.5	0.80
	% 1.0	1.61
	% 1.5	2.41
KPF	%0.5	0.58
	%1.0	1.17
	%1.5	1.75
PLY	%0.5	0.90
	%1.0	1.80
	%1.5	2.70

BETON ÜRETİM AŞAMALARI



Görsel 7.11 Beton üretim aşamaları a) kalıpların temizlenmesi b) beton karışımına katkı ikamesi c) karışımın kalıplara yerleştirilmesi ve sıkıştırılması d) beton kalıplarına sarsma tablasında vibrasyon uygulanması e) beton kalıpların 24 saat süreyle kurumaya bırakılması f) kuruyan kalıpların 28 günlük kür havuzuna alınması

7.2.2. Ultrases geçiş hızı deneyi

Beton dayanımının belirlenmesinde kullanılan hasarsız deney yöntemlerinden biri olan ultra ses hızı deneyi alıcı ve verici probler arasında oluşturulan ses dalgalarının geçiş süreleri tespit edilir. Bu geçiş süresi ve kat edilen mesafe aşağıda 7.1’de verilen formül kullanılarak ultra ses geçiş hızı km/s olarak tespit edilir. Tespit edilen bu ultra ses geçiş hızından betonun dayanımı belirlenir. Ultra ses hızı testi sonucuna göre beton kalitesi değerleri Çizelge 7.4’de verilmiştir.

Çizelge 7.4 Beton kalitesinin ultrases geçiş hızına göre sınıflandırılması [56]

Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Beton Kaitesi
>4.5	Çok iyi
3.5-4.5	İyi
3.0-3.5	Orta
<3.0	Kötü

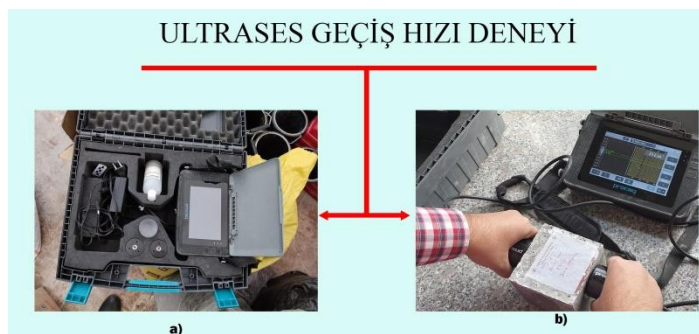
Ultra ses geçiş hızı formülasyonu (7.1) de verilmiştir

$$V=L/T \quad (7.1)$$

Bu formülasyonda ;

- V : Ultrases hızı (km/s)
L : Kat edilen mesafe (km)
T : Saniye cinsinden geçen süre (s)

Bu deneysel çalışmada 100x100x100mm küp numuneler üzerinde laboratuvarında bulunan Görsel 7.5’ deki ultrases hızı cihazı kullanılarak ultrases geçiş hızları km/s olarak tespit edilmiş ve bulunan değerler standart değerlerle karşılaştırılmıştır. Görsel 7.12’de deneyin yapılışı gösterilmektedir.



Görsel 7.12 Ultra ses hızı deneyi a) Deneyde kullanılan ultrases cihazı b) Ultrases deneyinin yapılışı

7.2.3. Schmidt çekici deneyi

Schmidt çekici deneyi beton dayanımının belirlenmesinde yaklaşık sonuç veren hasarsız deney yöntemlerinden biridir. Bu deney cihazda bulunan yay mekanizması

tarafından yüzeye fırlatılan çelik bir çubuğun beton yüzeyin sertliği nedeniyle yüzeye çarpıp belirli bir yüksekliğe geri sıçrar. Çelik çubuğun geri sıçrama yüksekliği ne kadar fazlaysa betonun yüzey sertliğinin o kadar fazla olduğunu gösterir. Bu ilişkiden yararlanılarak betonun basınç dayanımı hakkında yaklaşık olarak bir sonuç çıkarılır. Schmidt deneyi beton basınç dayanımı hakkında kesin sonuç vermemesine rağmen betonun tahrip etmeden betonun basınç dayanımı hakkında fikir verdiği için tahribatlı yöntemlerin kullanılmasının sakıncalı olduğu durumlarda yaygın olarak kullanılır. Bu işlem için betonun yüzeyinden yüzeye dik olarak tutulan Schmidt çekici ile 10 okuma alınır. En yüksek ve en düşük iki okuma sonucu atılarak geri kalan okumaların ortalaması alınarak basınç dayanımı yaklaşık olarak tespit edilir [1]. Görsel 7.13'te deneysel çalışmada kullanılan Schmidt çekici test cihazı görülmektedir.

Bu deneysel çalışmada 100x100x150 mm ebatlarındaki kiriş numuneler üzerinde laboratuvarında bulunan Görsel 7.13'te verilen Schmidt çekici cihazı kullanılarak 10 okuma yapılmış ve en yüksek ile en düşük okuma sonucu atılarak kalan değerlerin ortalaması alınmış ve dayanım belirlenmiştir. Görsel 7.13'te deneyin yapılışı gösterilmektedir.



Görsel 7.13 Schmidt çekici deneyinin yapılışı

7.2.4. Basınç deneyi

Basınç deneyi için kür havuzundan çıkarılan 100x100x100mm ebatlarındaki küp numuneler TS EN 12390-3 [57] standardına göre yapılmıştır. Basınç testi Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri laboratuvarında

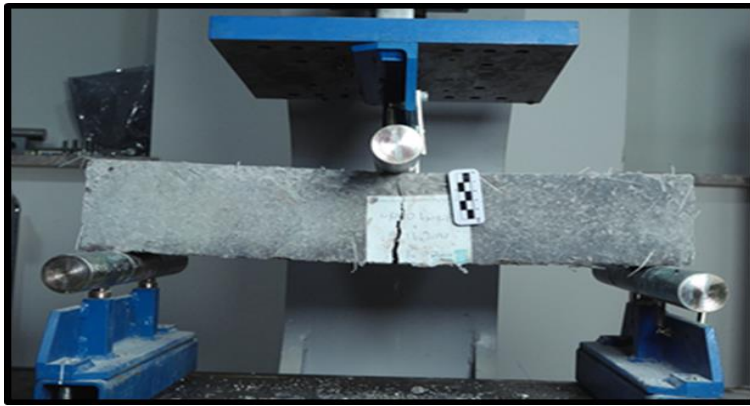
bulunan ve 6 kgf/cm².sn'lik sabit bir yükleme hızı ile yük uygulayan ELE firmasından temin edilen basınç deney aleti kullanılarak basınç dayanımları MPa olarak belirlenmiştir. Görsel 7.14'de basınç deneyi aşamaları gösterilmektedir.



Görsel 7.14 Basınç deneyi a) Deneyde kullanılan basınç test aleti b) Küp numunenin basınç testi

7.2.5. Eğilmede çekme deneyi (Üç nokta yükleme deneyi)

Eğilmede çekme deneyleri için 100x100x150mm ebatlarındaki kiriş numuneler kullanılmıştır. Kiriş numunelerin eğilmede çekme deneyleri TS EN 12390-5 [58] standardına göre yapılmıştır. Eğilmede çekme deneyi ile kiriş numunelerin eğilmede çekme dayanımları MPa olarak ölçülmüştür. Görsel 7.15'de eğilmede çekme deneyi gösterilmektedir.



Görsel 7.15 Eğilmede çekme deney aleti ile yapılan deney

7.2.6. Aletli ağırlık düşürme deneyi

Aletli ağırlık düşürme deneyi için 100x100x100mm ebatlarındaki küp numuneler kullanılmıştır. Deney için 500 mm darbe yükseklikten, 25 kg ağırlığındaki darbe ucu numunelerin üzerine 3.131 m/s hızla düşürülerek, 124.990 joul değerinde bir enerji ile yük uygulanarak numunelerde hasar oluşturulmaya çalışılmıştır. Görsel 7.16'de ağırlık düşürme test cihazıyla yapılan deney ve Görsel 7.17'de ağırlık düşürme testi sonrası küp numunelerin görünümü gösterilmektedir.



Görsel 7.16 Ağırlık düşürme deney aletiyle numuneye darbe testi uygulaması

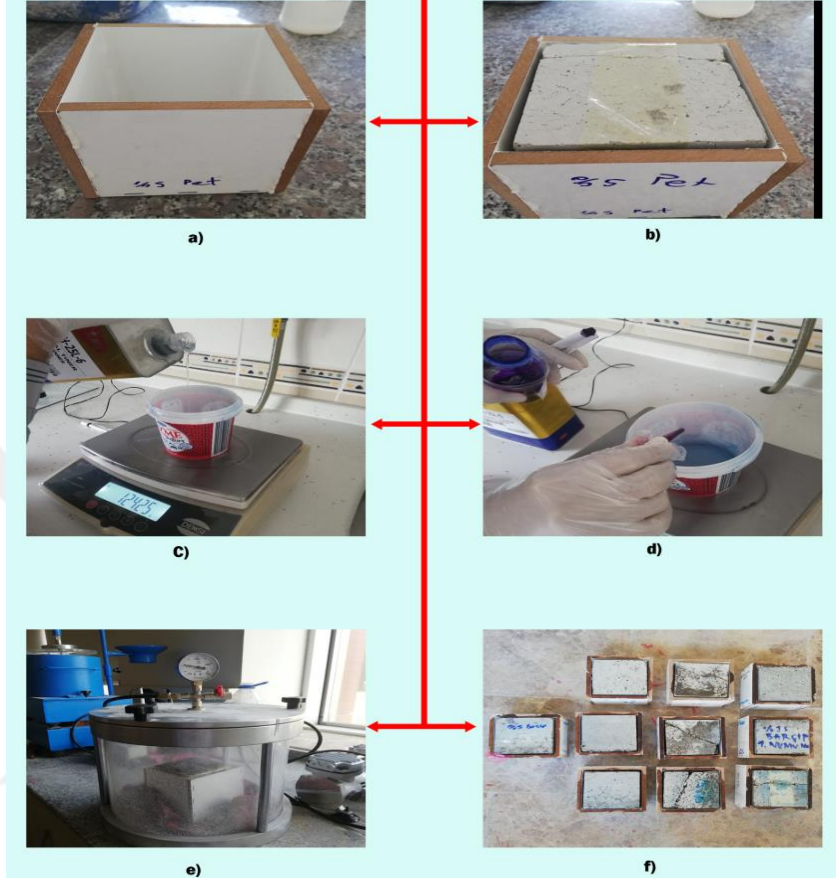


Görsel 7.17 Ağırlık düşürme deneyi sonunda numunelerin görünümü a) şahit-polyester b) şahit-pet c) Şahit- KPF

7.2.7. İnce kesitler için numunelerin hazırlanması

100x100x100 mm küp numunelere aletli ağırlık düşürme deneyi sonrası numuneler görüntü işleme yönteminde incelenmeleri için ince kesit yapımı aşamasına geçilmiştir. İnce kesit yapımında hasarlı beton örneklerinin dağılmalarını engellemek için epoksi işlemine tabi tutulmuştur. Bu amaçla beton numuneler için 10 tane ahşap küp kalıp hazırlanmıştır (Görsel 7.18a). Ahşap kalıplara konulan beton numunelerin üzerine konulmak üzere epoksi hazırlanmıştır. Her bir küp numune için 245 gram epoksi (Görsel 7.18c) hassas terazide tartılmış ve epoksinin yaklaşık bir saatte donmasını sağlamak amacıyla belirli oranda hızlandırıcı ve dondurucu (Görsel 7.18d) ilave edilmiştir. Epoksi karışımına çatlakların daha iyi görüntülenmesi için renklendirici pigment ilave edilmiştir. Hazırlanan epoksi karışımı ahşap kalıp içindeki beton numunenin üzerine boşaltılmış ve kalıp laboratuvarında bulunan cam vanüsün (Görsel 7.18e) içine yerleştirilmiştir. Daha sonra beton numunenin epoksiyi yeterince emebilmesi maksadıyla cam vanüse vakum pompası bağlanmış ve pompa 2 saat süreyle çalıştırılarak epoksinin beton numunenin bütün çatlaklarına nüfuz etmesi sağlanmıştır. Daha sonra cam vanüsten çıkarılan numuneler (Görsel 7.18f) iyice kuruması maksadıyla laboratuvarında birkaç gün süreyle bekletilmiştir. İyice kuruyan numuneler Adıyaman organize sanayi bölgesinde bulunan özel bir mermer atölyesinde 2 cm kalınlığında kesim yapılarak buradan ışık mikroskobu altında beton mikro yapısı incelemelerinin yapılabilmesi amacıyla 65x65x65 mm ebatlarında ince kesitler hazırlanmıştır. Kalan kısımdan makro ölçümlerin yapılabilmesi için yüzeyi parlatılmış ve fotoğraf makinesi kullanılarak fotoğraflanmıştır. Hazırlanan ince kesitlerin mikroskobik görüntüsü bilgisayara aktarılmış ve betonun mikro yapısı detaylı bir şekilde incelenmiş ve açıklanmıştır.

EPOKSİ UYGULAMA AŞAMALARI



Görsel 7.18 Epoksi uygulama aşamaları a) küp numuneler için hazırlanan ahşap kalıp b) küp numunenin ahşap kalıba yerleştirilmesi c) ince kesitler için epoksi hazırlanması d) epoksi içine reaksiyon hızlandırıcı ve dondurucu ikame edilmesi f) epoksi ikame edilmiş numunenin cam vanüs içine konularak vacum pompası ile vacum edilmesi f) epoksi uygulaması sonrası numunelerin genel görünümü

8. BULGULAR ve TARTIŞMA

Hazırlanan beton numunelerin 28 günlük kür süresi sonunda küp numunelerle öncelikle ultrases geçiş hızı ve Schmidt çekici deneyleri sonrasında basınç deneyi ve aletli ağırlık düşürme deneyleri yapılmış, prizmatik kiriş numunelerden ise eğilmede çekme deneyi yapılmış, ağırlık düşürme sonrası beton numunelerden yapılan ince kesitlerden elde edilen veriler bu bölümde değerlendirilmiştir.

İnce agregaların (0-4 mm) fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla özgül ağırlık ve su emme deneyleri yapılmış ve elde edilen bulgular Çizelge 8.1 ve Çizelge 8.2’de verilmiştir.

8.1. Agrega Deney Bulguları

Çizelge 8.1 *İnce agreganın özgül ağırlık deney bulguları*

Malzeme	Numune (gr)	Piknometre + su (gr)	Piknometre +su+numune (gr)	Özgül ağırlık (g/cm ³)
İnce	51.40	698.10	730.70	2.73

Çizelge 8.2 *İnce agreganın su emme deney bulguları*

İnce Agrega		
Su Emme Kapasitesi Karışım		Su Emme Miktarı (%)
DKY Ağırlığı (gr)	Kuru Ağırlığı (gr)	
126.90	125.20	1.35

İri agregaların (4-12 mm) fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla özgül ağırlık ve su emme kapasitesi deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen bulgular Çizelge 8.3 ve Çizelge 8.4’te verilmiştir.

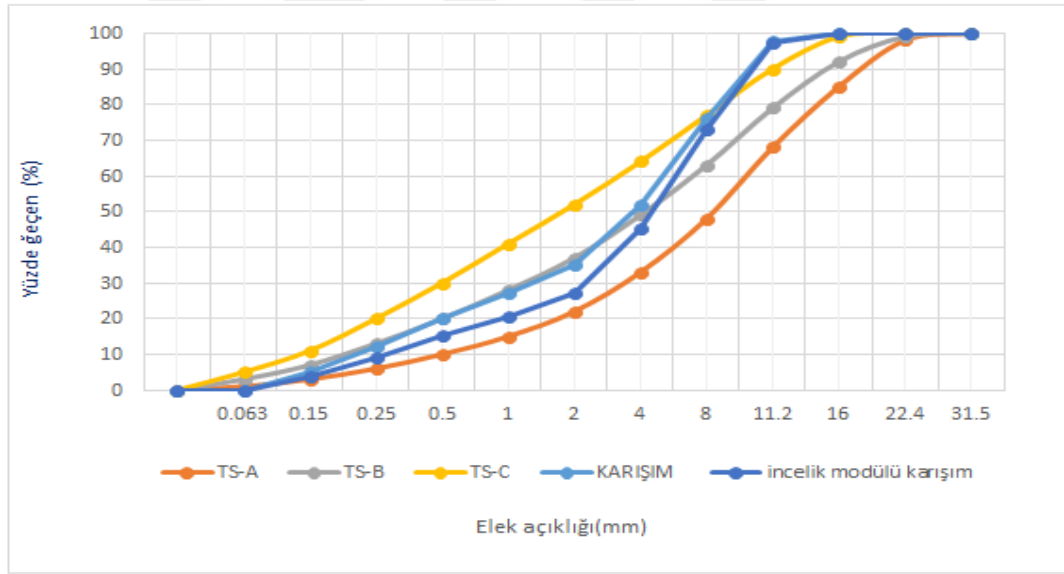
Çizelge 8.3 *İnce agreganın özgül ağırlık deney bulguları*

Malzeme	Numune (gr)	Piknometre+ su (gr)	Piknometre +su+numune (gr)	Özgül ağırlık (gr/cm ³)
İri	103	1456	1520.10	2.64

Çizelge 8.4 İri agregası emme deney bulguları

İnce Agregası		
Su Emme Kapasitesi Karışım		Su Emme Miktarı (%)
DKY Ağırlığı (gr)	Kuru Ağırlığı (gr)	
126.90	125.20	1.35

Çeyreklemeye yöntemiyle alınan ince ve iri agregalar ile elek analizi yapılmış ve elde edilen bulgular ile çizilen grafik standart grafiklerle karşılaştırılmış. Şekil 8.1’de verilen elek analizi sonuçları incelendiğinde agrega karışımının granülometri eğrisinin standartlara uygun olduğu görülmüştür. Elek analizi sonuçlarına göre beton karışımı için % 65 oranında ince agrega, %35 oranında ise orta agrega alınarak agrega karışım oranı hesaplanmış ve bu hesaplama sonucunda incelik modülü 4.74 olarak bulunmuştur.



Şekil 8.1 Elek analizi grafiği

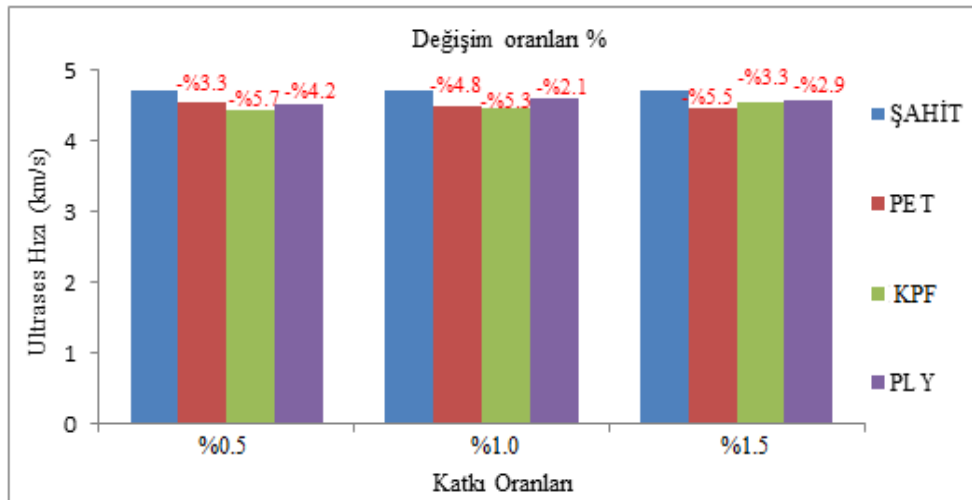
8.2. Ultrases Deneyi Bulguları

Ultrases hızlarının tespit edilmesi amacıyla her bir karışım oranından 3 küp beton örneği alınarak ultra ses cihazı kullanılarak küp numunelerin yüzeyleri doğru okuma yapabilmek için temizlenmiş ve ultrases cihazının problarına özel jel sürülmüştür. Ultrases cihazının probları küp numunelerin karşılıklı yüzlerine Görsel 7.12 b’de görüldüğü gibi tutularak doğrudan ölçüm yapılmış ve küp numunenin diğer yüzü içinde aynı işlem uygulanarak iki ölçüm yapılmış ve ölçüm sürelerinin ortalamaları alınmıştır. Ortalamaları

alınan geçiş süresi mikrosaniye olarak belirlenmiştir. Bu ortalama mikrosaniye değerleri denklem (7.1) kullanılarak km/s olarak hız değerleri elde edilmiştir. Hesaplanan bu ultrases geçiş hızları sonuçları Çizelge 8.5'te grafik sonuçları Şekil 8.2 de verilmiştir. Şekil 8.2 incelendiğinde En yüksek ultrases geçiş hızı 4.72 km/s ile şahit numunede ölçülmüştür. Katkılı betonlarda en yüksek ultrases geçiş hızı değeri ise ortalama 4.62 km/s ile %1.0 PLY katkılı numunede ölçülmüştür. %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında PET katkısının ultrases geçiş hızını -%3.3, -%4.8, -%5.5 oranlarında düşürdüğü görülmektedir. %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında KPF katkısının -%5.7, -%5.3, -%3.3 oranlarında düşürdüğü görülmektedir. %0.5, %1.0 ve %1.5 PLY katkısının -%4.2, -%2.1, -%2.9 oranlarında düşürdüğü görülmektedir. Katkılı beton numunelerinde görülen ultrases geçiş hızlarındaki bu düşüşlerin katkı ilavesinin betonun boşluk oranını artırmış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 8.5 Beton numunelerin ultrases geçiş hızı test bulguları

Örnekler	Oranlar	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)
Şahit	%0	4.72
PET	%0.5	4.56
	%1.0	4.49
	%1.5	4.46
KPF	%0.5	4.45
	%1.0	4.47
	%1.5	4.56
PLY	%0.5	4.52
	%1.0	4.62
	%1.5	4.58



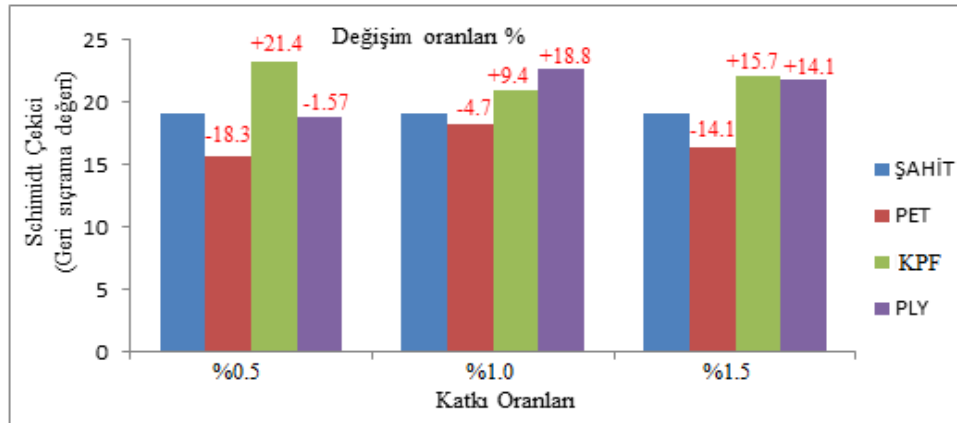
Şekil 8.2 Beton numunelerin ultrases geçiş hızları

8.3. Schmidt Çekici Deney Bulguları

Görsel 7.13'te verilen Schmidt çekici kullanılarak 100x100x150 mm prizmatik kiriş numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Bu sonuçlara bakıldığında en yüksek geri sıçrama değeri değeri (R değeri) 23.20 ile %0.5 KPF katkılı betonda ölçülmüştür. Bu değer şahit numunede 19.10 geri sıçrama değeri olarak ölçülürken en düşük geri sıçrama değeri ise 15.60 ile %0.5 PET katkılı numunede ölçülmüştür. Ayrıca Şekil 8.3 incelendiğinde %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında PET katkısının -%18.3, -%4.7 ve -%14.1 oranlarında geri sıçrama değerinde azalmaya yol açtığı, %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında KPF katkısının +%21.4, +%9.4 ve +%15.7 oranlarında geri sıçrama değerinde artış sağladığı görülmüştür. %0.5 PLY katkısının dayanımında -%1.57 gibi çok az oranda azalmaya neden olduğu ancak %1.0 ve %1.5 oranlarında PLY katkısının +%18.8 ve +%14.1 oranlarında artışa yol açtığı görülmektedir. Tüm deneysel sonuçlar Çizelge 8.6'te ve Şekil 8.3'te verilmiştir.

Çizelge 8.6 Beton numunelerin Schmidt çekici geri sıçrama değerleri

Örnekler	Oranlar	Schmidt Çekici Geri sıçrama değeri
Şahit	%0	19.10
PET	%0.5	15.60
	%1.0	18.20
	%1.5	16.40
KPF	%0.5	23.20
	%1.0	20.90
	%1.5	22.10
PLY	%0.5	18.80
	%1.0	22.70
	%1.5	21.80



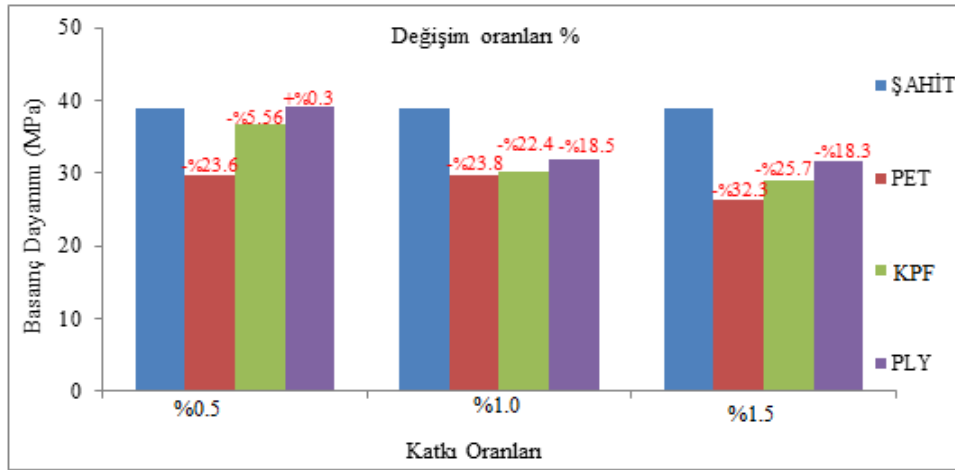
Şekil 8.3 Beton numunelerin Schmidt çekici grafik bulguları

8.4. Basınç Deneyi Bulguları

Basınç dayanımının belirlenmesi amacıyla 28 günlük kür süresi sonucunda havuzdan çıkarılan küp numunelerden şahit, PET, KPF ve PLY nin herbir %0.5, %1.0 ve % 1.5 oranları için 3 küp örnek alınarak basınç deney cihazında dayanımları test edilmiştir. Basınç deneyi sonuçları Çizelge 8.7’de verilmiştir. Buna göre şahit numunelerde ortalama 38.97 MPa dayanım elde edilirken, katkılı betonlardan en yüksek dayanım değerini 39.10 MPa ile %0.5 PLY katkılı numunelerde elde edilmiştir. Katkılı numunelerde en düşük dayanım değeri 26.37 MPa ile %1.5 PET katkılı beton numunede ölçülmüştür. Bu sonuçlar bilgisayar programı kullanılarak grafiğe dönüştürülmüş ve grafik Şekil 8.4’de verilmiştir.

Çizelge 8.7 Beton numunelerin basınç dayanım testi bulguları

Örnekler	Değerler (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
Şahit %0	39.4	38.97
	39.5	
	38	
PET %0.5	30.4	29.77
	30	
	28.9	
PET %1.0	30.4	29.70
	31.1	
	27.6	
PET %1.5	29	26.37
	24	
	26.1	
KPF %0.5	37	36.8
	37.7	
	35.7	
KPF %1.0	28.5	30.23
	29.8	
	32.4	
KPF %1.5	31.4	28.97
	31.1	
	24.4	
PLY %0.5	40.8	39.10
	37.2	
	39.3	
PLY %1.0	30.3	31.77
	31.8	
	33.2	
PLY %1.5	32.8	31.63
	31	
	31.1	



Şekil 8.4 Basınç dayanım deneyi bulguları

Şekil 8.4 incelendiğinde şahit numune ile katkılı beton numuneleri karşılaştırıldığında şahit numuneye göre %0.5 PET katkılı numunede -%23.6 oranında ve %0.5 KPF katkılı numunelerde basınç dayanımını -%5.56 oranında düşürdüğü ancak %0.5 PLY ilavesinin basınç dayanımını +%0.3 oranında artırdığı görülmektedir. Buna karşın şahit numuneye göre %1.0 ve %1.5 oranlarında PET katkılı numunelerde -%23.8 ve -%32.3 oranında azalttığı, %1.0 ve %1.5 KPF katkısının -%22.4, -%25.7 oranlarında, %1.0 ve %1.5 PLY ilave edilmesinin betonun basınç dayanımını -%18.5 ve -%18.3 oranlarında azalttığı görülmektedir. Kullanılan PET oranlarının artışına bağlı olarak basınç dayanımındaki azalma Gül [59] tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca artan lif katkısının beton basınç dayanımında kayba neden olması Arslan ve Sarıkaya [15] tarafından yapılan çalışmayla da uyumludur. Bu durum betona katılan liflerin ve pet kırıklarının basınç dayanımının düşük olmasından ayrıca artan lif katkısının betonun boşluk oranını artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

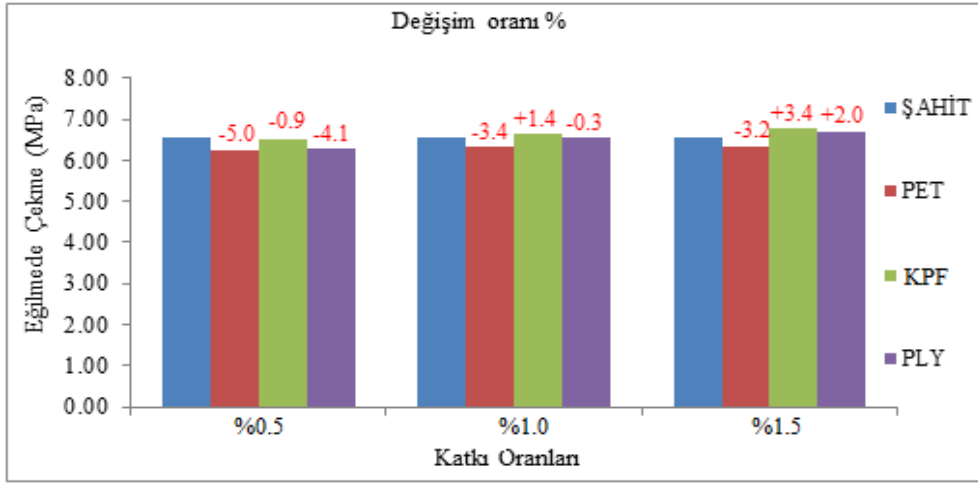
8.5. Eğilmede Çekme Deneyi Bulguları

28 günlük kür süresinin sonunda kür havuzundan çıkarılan 100x100x150 mm prizmatik kiriş numunelerin şahit, PET, KPF ve PLY ilaveli örneklerin her bir %0.5-1.0-1.5 oranındaki numunelerden 3'er adet kullanılarak eğilmede çekme deneyi (üç noktalı yükleme deneyi) gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde ortalama en yüksek eğilme dayanımı 6.78 MPa ile %1.5 KPF katkılı numunelerde belirlenirken en düşük eğilme dayanımı ise 6.23 MPa ile %0.5 PET katkılı numunelerde belirlenmiştir. Şahit numunelerde ise ortalama

6.56 MPa eğilme dayanımı belirlenmiştir. Eğilmede çekme deneysel bulguları Çizelge 8.8’de, bu sonuçlar kullanılarak bilgisayar programı ile elde edilen grafikler ise Şekil 8.5 ve Şekil 8.6’da verilmiştir.

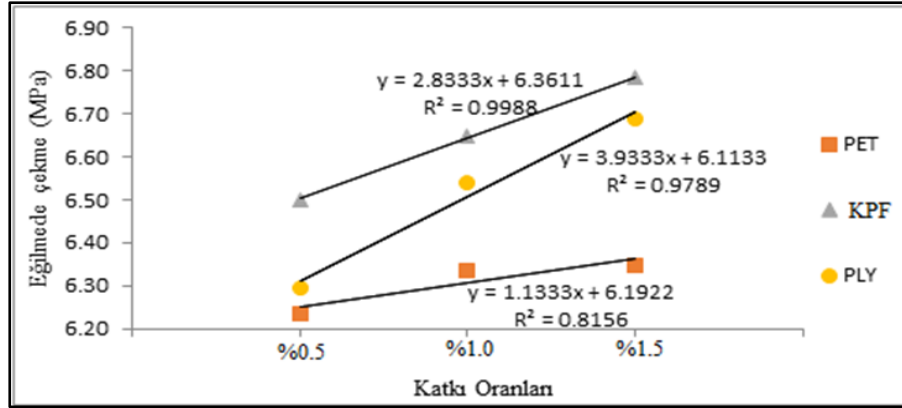
Çizelge 8.8 *Kiriş numunelerin eğilmede çekme deney bulguları*

Örnekler	Değerler (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)
Şahit %0	6.35	6.56
	6.72	
	6.62	
PET %0.5	6.40	6.23
	6.20	
	6.10	
PET %1.0	6.35	6.34
	6.23	
	6.43	
PET %1.5	6.60	6.35
	6.24	
	6.20	
KPF %0.5	6.35	6.50
	6.40	
	6.75	
KPF %1.0	6.65	6.65
	6.60	
	6.70	
KPF %1.5	6.55	6.78
	6.95	
	6.85	
PLY %0.5	6.43	6.29
	5.97	
	6.48	
PLY %1.0	6.21	6.54
	6.83	
	6.58	
PLY %1.5	6.19	6.69
	6.96	
	6.91	



Şekil 8.5 Kiriş numunelerin eğilmede çekme deneyi grafik bulguları

Şekil 8.5 incelendiğinde %0.5 PET katkısının betonun eğilme dayanımını -%5.0 oranında düşürdüğü, %0.5 KPF katkısının dayanımda anlamlı bir değişikliğe sebep olmadığı (düşüş oranı -%0.9), %0.5 PLY katkısının ise dayanımda -%4.1 gibi çok az oranda düşüşe sebep olduğu görülmektedir. %1.0 PET katkısının eğilme dayanımını -%3.4 gibi çok az oranda düşürdüğü, %1.5 PET katkısının eğilme dayanımını -%3.2 oranında düşürdüğü görülmektedir. %1.0-1.5 oranlarında KPF katkısının ise lif katkısının artışına paralel bir şekilde dayanımda %1.4 ve %3.4 oranında bir artışa yol açtığı görülmektedir. %1.0 PLY katkısının betonun eğilme dayanımında anlamlı bir değişikliğe sebep olmadığı (değişim oranı -%0.3) buna karşın %1.5 PLY katkısının ise eğilme dayanımında %2.0'lık bir artış sağladığı görülmektedir. Betona PLY ve KPF liflerinin ilave edilmesi numunelerin ilk çatlak oluşumundan sonra dağılmasını önlediği belirlenmiştir. Arslan [60] yaptığı çalışmada bazalt lif katkılı betonların çekme deneyinde ilk çatlak oluşumundan sonra numunelerin dağılmadığını tespit etmiştir. Elde edilen bu sonuç bu tez çalışmasında elde edilen sonuçları destekler niteliktedir. Betona PET katkısının ilave edilmesinin çekme dayanımını olumsuz etkilemesi Akgül, Doğan ve Etli [61] tarafından yapılan çalışma ile uyumludur. Ayrıca %1.0-%1.5 oranlarında KPF ve %1.5 oranında PLY lif ilavesinin betonun eğilme dayanımında bir miktar artışa yol açması Arslan ve Sarıkaya [15] tarafından yapılan çalışmayla da uyumludur.

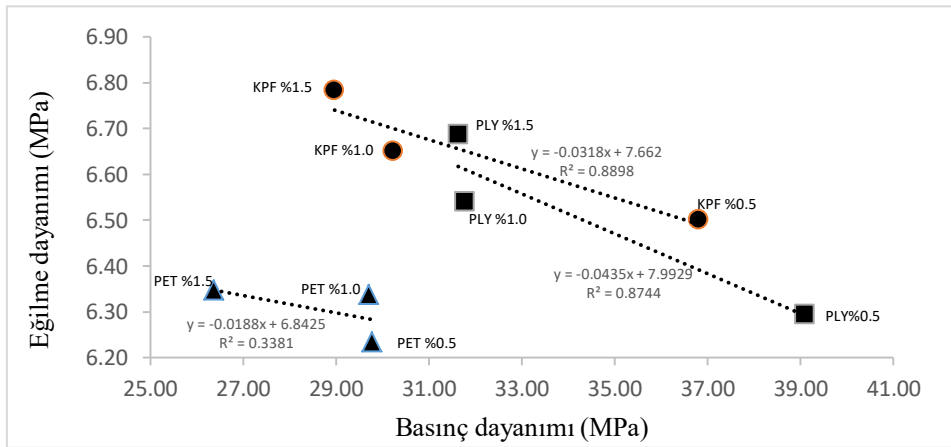


Şekil 8.6 Kiriş numunelerinin eğilme deney bulguları

Şekil 8.6 incelendiğinde Beton karışımına PET ve KPF ile PLY ilave edilmesinin katkı maddesinin oranının artışına bağlı olarak eğilme dayanımının arttığını göstermektedir. Eğilme dayanımı ile katkı miktarları arasındaki korelasyon değerleri KPF’de R^2 0.99, PLY’de R^2 0.97 ve PET’te R^2 0.81 gibi oldukça yüksek değerler olduğu görülmektedir. Ayrıca artan oranda katkı maddesi ilavesinin ile betonun sünekliği arasında önemli bir doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir.

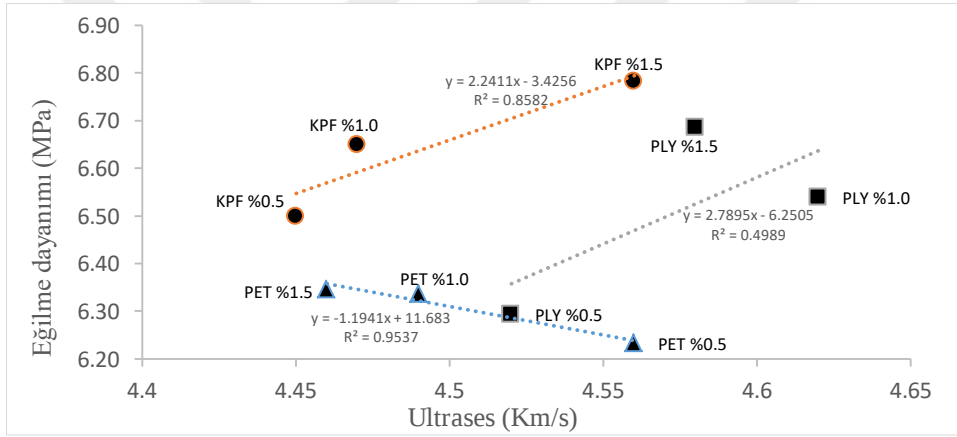
8.6. İkili Karşılaştırmalar

Bu bölümde eğilme dayanımı, basınç dayanımı, ultrases hızı ve Schmidt çekici deneylerinin sonuçları ikili olarak karşılaştırılmıştır.



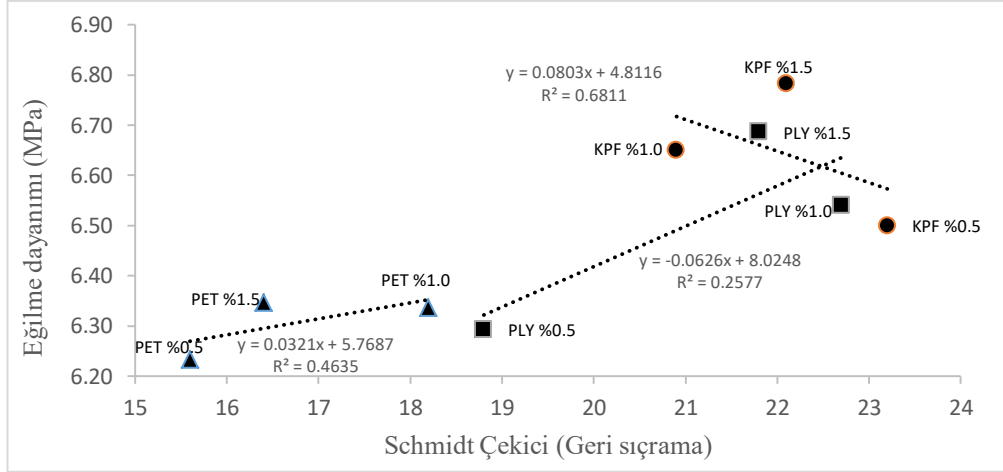
Şekil 8.7 Beton numunelerinin eğilme - basınç dayanım grafiği

Şekil 8.7' de verilen grafik incelendiğinde betona artan oranda KPF ilave edilmesi betonun eğilme dayanımını artırırken basınç dayanımında düşüşe neden olmaktadır. Benzer şekilde betona artan oranda PLY ilave edilmesi betonun eğilme dayanımını artırırken basınç dayanımında düşüşe neden olmaktadır. Betona artan oranda PET ilave edilmesi de eğilme dayanımında artışa yol açmasına rağmen basınç dayanımında düşüşe yol açmakta ancak basınç dayanımındaki düşüş %0.5 ve %1.0 değerinde birbirine yakın olduğu görülmektedir. Grafikteki R^2 değerleri incelendiğinde KPF de R^2 değeri 0.88, PLY de R^2 değeri 0.87 olduğu görülmektedir. R^2 değerinin 1'e yakın olması eğilmedeki artış ile basınç dayanımındaki düşüş arsında doğrusal yüksek bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Ancak PET ilavesinde R^2 değerinin 0.33 olması eğilmedeki artış ile basınç dayanımındaki düşüş arasında iyi doğrusal bir korelasyon kurulamadığını göstermektedir.



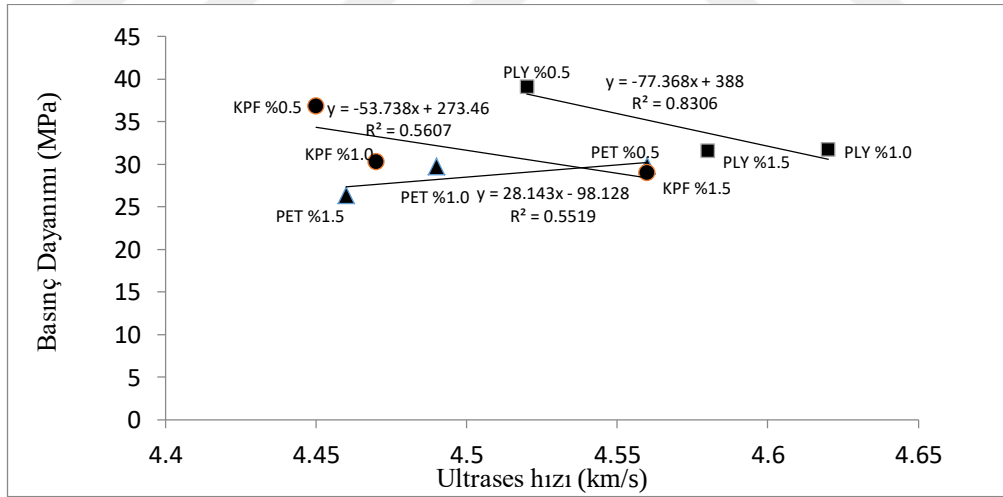
Şekil 8.8 Beton numunelerin eğilme – ultrases hızı grafiği

Şekil 8.8'de verilen grafikteki değerler incelendiğinde beton karışımına artan oranda KPF ilavesinin eğilme dayanımını artırırken ultrases hızında da artışa neden olduğu görülmektedir. Ayrıca KPF R^2 değerinin 0.85 olması eğilme dayanımı ile ultrases hızı arasında pozitif yönde doğrusal bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Beton karışımına artan oranda PET ilavesinin ise eğilme dayanımında artışa yol açmasına rağmen ultrases hızında düşmeye yol açtığı görülmektedir. PET R^2 değerinin 0.95 olması eğilme dayanımı ile ultrases hızı arasında negatif yönde doğrusal korelasyon olduğunu göstermektedir. Beton karışımına artan oranda PLY ilave edilen numunelerin R^2 değerinin 0.49 olması PLY'nin eğilme dayanımı ile ultrases hızı arasında iyi bir doğrusal korelasyon olmadığı şeklinde değerlendirilmektedir.



Şekil 8.9 Beton numunelerin eğilme-Schmidt çekici grafiği

Şekil 8.9'daki grafik verilerindeki R^2 değerleri incelendiğinde KPF ilave edilen numunelerin R^2 değeri 0.68, PET ilave edilen numunelerin R^2 değeri 0.4 ve PLY ilave edilen numunelerin R^2 değeri ise 0.25 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu R^2 değerlerine göre numunelerin eğilme dayanımı sonuçları ile Schmidt çekici deney sonuçları arasında doğrusal bir korelasyon olduğu şeklinde değerlendirilmiştir.



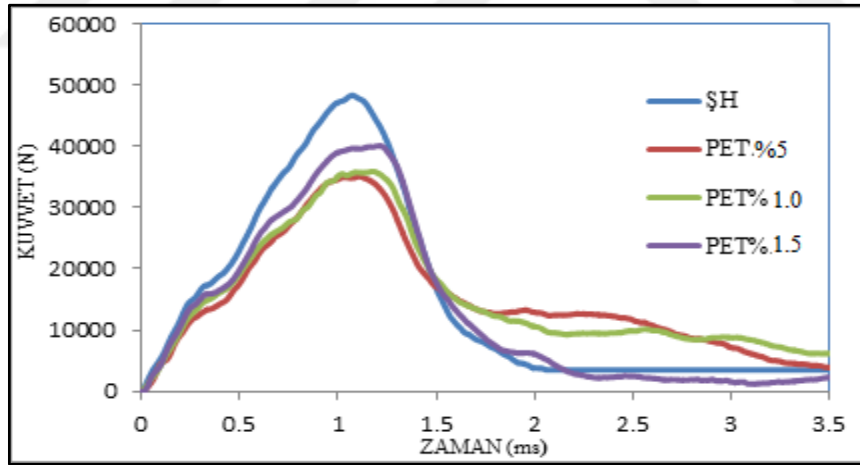
Şekil 8.10 Beton numunelerin basınç-ultrases hızı grafiği

Şekil 8.10'da verilen grafik incelendiğinde artan oranda KPF ilavesi beton basınç dayanımını düşürürken ultra ses hızının artmasına neden olmuştur. Ancak KPF R^2 değerinin 0.56 olması doğrusal korelasyonun zayıf olduğunu göstermektedir. Artan oranda PET ilave edilen beton numunelerin basınç dayanımı ve ultra ses hızının düştüğü görülmektedir. Ancak R^2 değerinin 0.55 olarak çıkması PET ilavesinin de basınç ve ultrases hızı arasındaki doğrusal korelasyonun zayıf olduğunu göstermektedir. Artan

oranda PLY ilave edilen beton numunelerin verileri incelendiğinde artan oranda PLY ilavesinin basınç dayanımını düşürürken ultrases hızını artırdığını göstermektedir. R^2 değerinin de 0.83 olarak belirlenmesi basınç ile ultrases hızı arasında doğrusal bir korelasyon olduğunu göstermektedir.

8.7. Ağırlık Düşürme Deney Bulguları

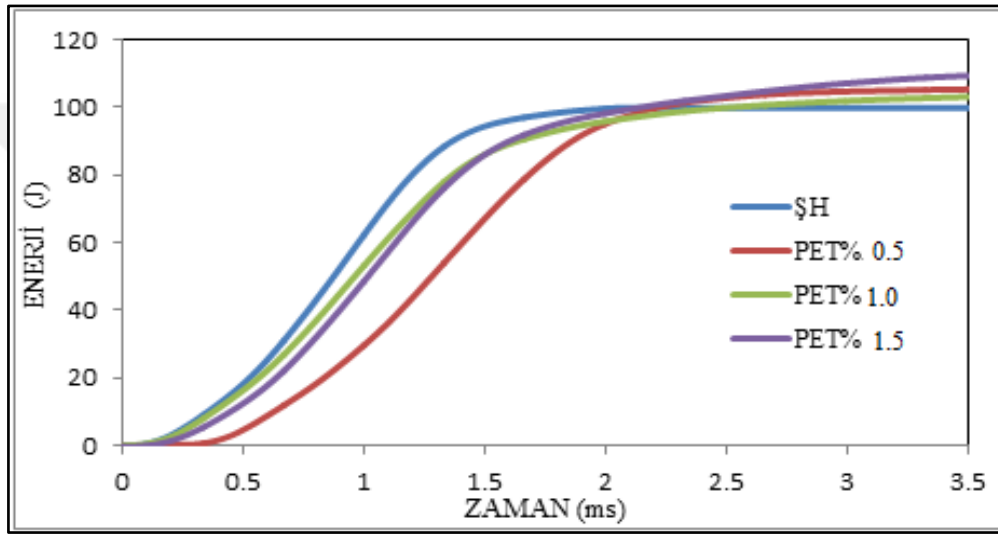
100x100x100 mm küp numuneler kullanılmış 500 mm darbe yüksekliğinden 25 kg'lık ağırlığındaki darbe ucu 3.131 m/s hızla ve 124.990 joul değerinde enerji ile küp numunelere darbe uygulanmış ve betonlarda hasar oluşturulmuştur. Oluşturulan hasar sonuçları bilgisayar yazılımıyla grafiklere dönüştürülmüş ve kuvvet-zaman, enerji-zaman ve Çöküntü Mikarı-zaman grafik sonuçları aşağıda Şekil 8.11 ile 8.19 arasında verilmiştir. Grafiklerde şahit beton numunesi SH, öğütülmüş pet şişe kırıkları içere beton numuneler PET, kopolimer fiber lifler içeren beton numuneler KPF ve polyester lifler içeren beton numuneler PLY olarak kısaltılmıştır.



Şekil 8.11 PET katkılı küp numunelerin ortalama kuvvet-zaman grafiği

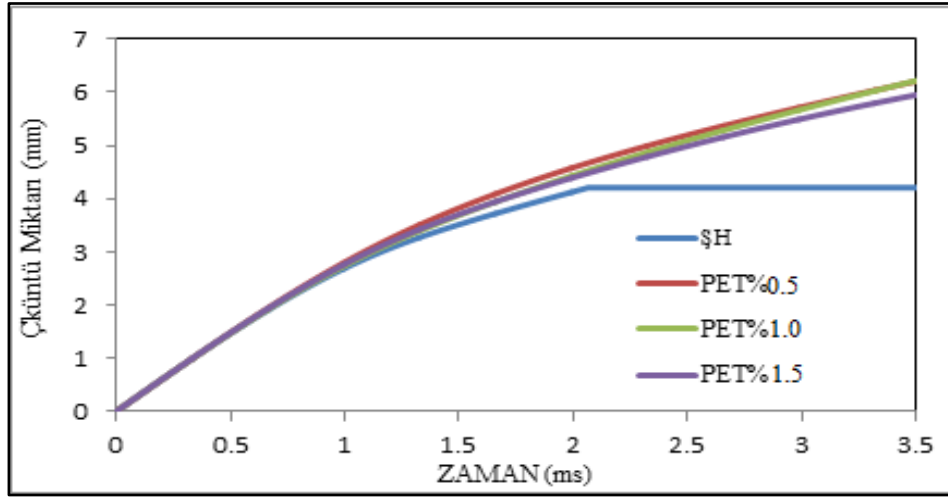
Şekil 8.11 incelendiğinde Şahit beton numunesinin 48.396 kN değerinde maximum kuvvet alırken, %0.5 PET katkılı beton numune maksimum 35.014 kN'luk, %1.0 PET ilameli beton numune maksimum 35.534 kN'luk kuvvet ve %1.5 PET katkılı beton örneği ise maksimum 40.156 kN'luk kuvvet almıştır. Şahit numunenin aldığı maximum kuvvetin PET katkılı beton numunelere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Öğütülmüş PET kırıkları ilave miktarı artırıldıkça maximum kuvvet değerinin de arttığı görülmektedir. Ayrıca grafikteki eğriler incelendiğinde şahit numunenin aldığı kuvvet

değerinin maksimum kuvvet değerinden sonra daha hızlı sıfıra yaklaştığı buna karşın %0.5 ve %1.0 PET katkılı beton numunelerin şahit numunenin aldığı kuvvet sıfır olduktan sonra biraz daha kuvvet alarak aşamalı olarak sıfıra yaklaştığı görülmektedir. %1.5 PET ilavesinin eğrisinin ise şahit numune eğrisine benzerlik gösterdiği görülmektedir. PET ilavesinin daha az şiddetli etki nedeniyle oluşabilecek hasar miktarını azaltacağı düşünülmektedir. Yapılan deneysel çalışma Atahan ve Yücel [18] yaptıkları çalışmada benzer sonuçlar elde etmişlerdir.



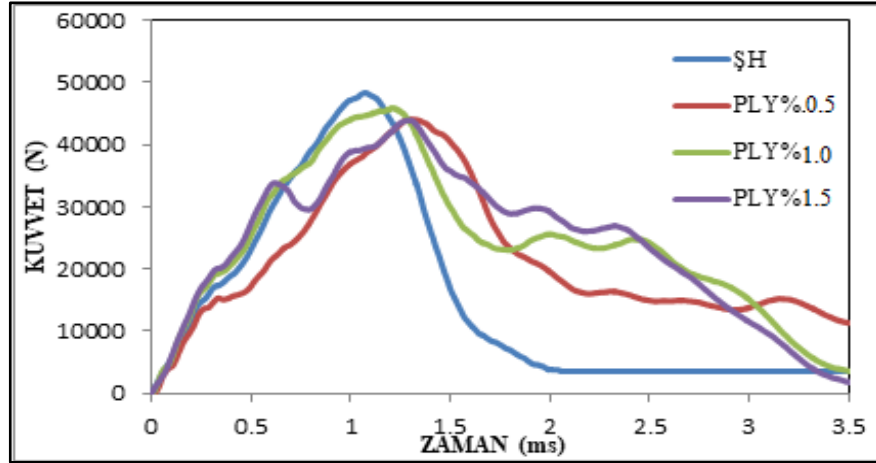
Şekil 8.12 PET katkılı beton numunelerin ortalama enerji-zaman grafiği

Şekil 8.12'deki enerji-zaman grafiğinin eğrileri incelendiğinde %0.5, %1.0 ve %1.5 PET ilave edilen beton numunelerin enerji eğrilerinin şahit beton numunesinin eğrisine göre daha yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Buna göre PET ilave edilen beton numunelerin enerjiyi daha fazla yuttuğunu göstermektedir.



Şekil 8.13 PET katkılı beton numunelerin ortalama çöküntü miktarı-zaman grafiği

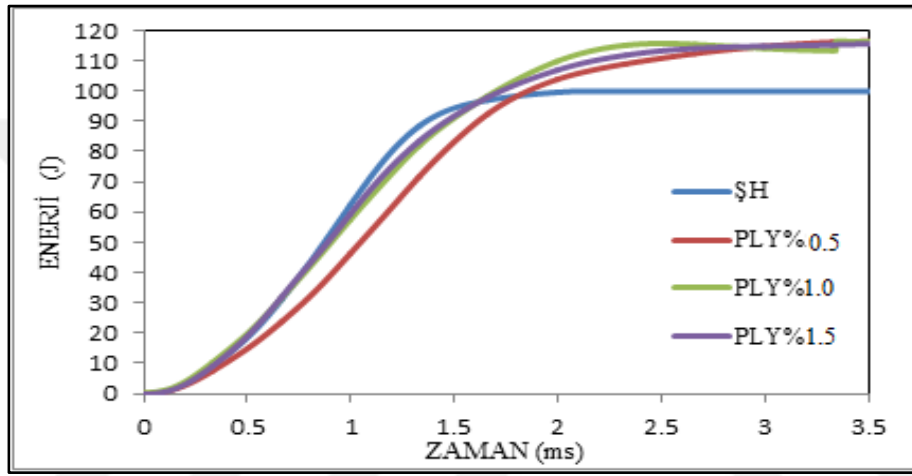
Şekil 8.13'teki çöküntü miktarı-zaman grafiğindeki eğriler incelendiğinde %0.5-%1.0-%1.5 PET katkılı beton numunelerinin eğrilerinin şahit beton numunesinin eğrisinden daha yüksek değerlere ulaştığı yani PET ilaveli beton numunelerinin yaptığı çöküntü miktarlarının şahit numunenin yaptığı çöküntü miktarına göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durumda PET ilavesinin betonu daha sünek hale getirdiği düşünülmektedir.



Şekil 8.14 PLY katkılı beton numunelerin ortalama kuvvet-zaman grafiği

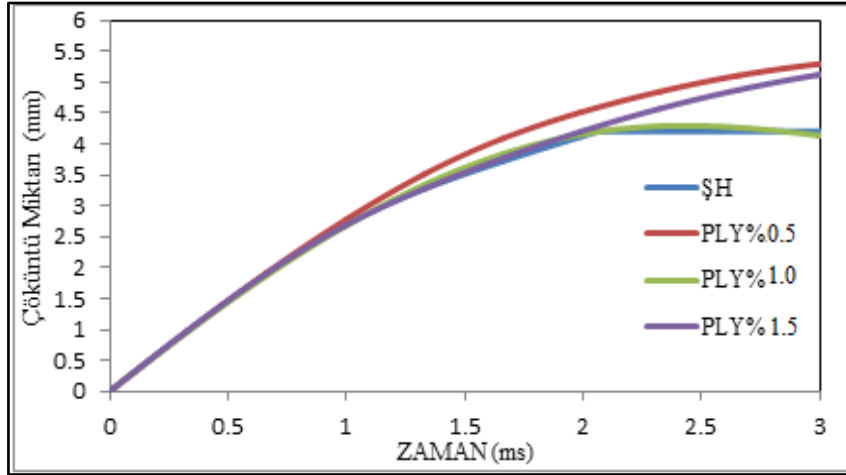
Şekil 8.14'teki kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde şahit beton numunesinin 48.396 kN değerinde maksimum kuvvet aldığı, %0.5 PLY ilaveli beton örneği maksimum 44.143 kN değerinde, %1.0 PLY ilaveli beton numune maksimum 45.888 kN değerinde ve %1.5 PLY ilaveli beton numune maksimum 43.958 kN değerinde kuvvet almıştır. Şahit

numunenin aldığı maksimum kuvvet PLY ilaveli numunelere göre biraz fazla olmasına rağmen şahit numunedeki kuvvet ani olarak azalıp sıfıra yaklaşmaktadır. PLY ilaveli beton numunelerde darbe yükünün aşamalı bir şekilde azalttığı görülmektedir. Bu durumun beton matrisindeki liflerin köprüleme etkisi nedeniyle olduğu şeklinde değerlendirilmektedir. Ayrıca PLY ilaveli beton numunelerin darbe yükü altında parçalanmaya karşı daha dirençli oldukları görülmektedir. Bu durum Şahan, Öncel ve Ünsal [62] tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir.



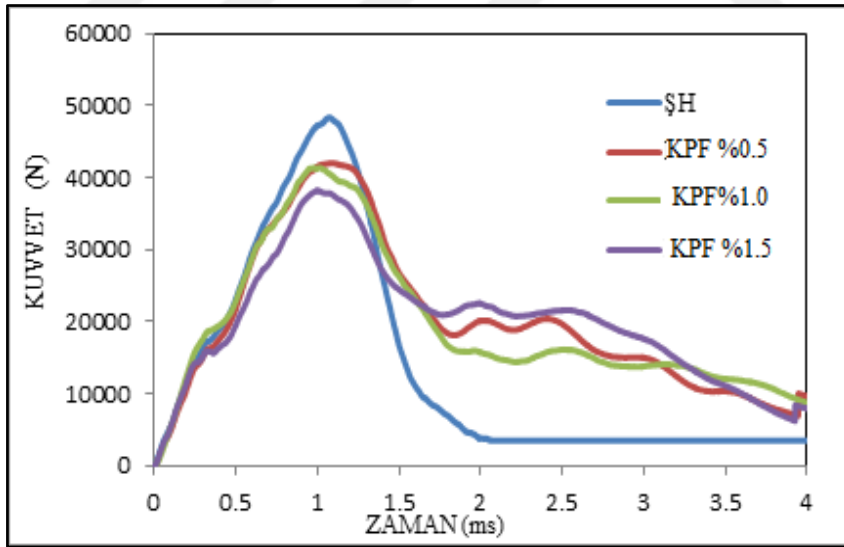
Şekil 8.15 PLY katkılı beton numunelerin ortalama enerji-zaman grafiği

Şekil 8.15'te verilen grafik incelendiğinde %0.5, %1.0, %1.5 PLY katkılı beton numunelerin enerji eğrilerinin tepe değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve şahit numunenin enerji eğrisinden daha yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Bu durum PLY katkısının darbe enerjisini daha fazla tükettiğini göstermektedir. Xu, Hao ve Li [63] yaptıkları çalışmada lif içeren betonun enerji emme kapasitesini artırdığını belirtmişlerdir. Bu açıdan yaptığımız bu tez çalışmasında elde edilen bulgu ile benzer bir sonuç elde etmişleridir.



Şekil 8.16 PLY katkılı beton numunelerin ortalama çöküntü miktarı-zaman grafiği

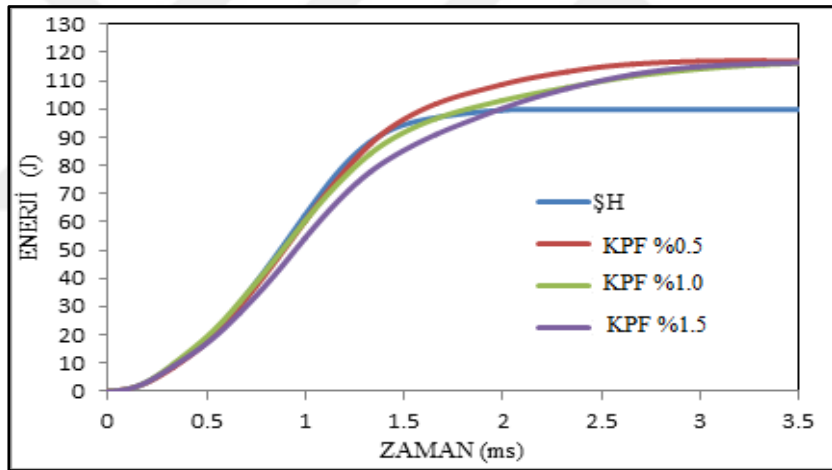
Şekil 8.16'da verilen grafik incelendiğinde %0.5 ve %1.5 PLY katkılı beton numunelerin ortalama çöküntü miktarı eğrilerinin şahit numunenin deplasman eğrisinden yüksek olduğu ancak %1.0 PLY katkılı beton numunenin ortalama deplasman eğrisi şahit numunenin deplasman eğrisine yakın olduğu görülmektedir. Bu verilere göre Betona PLY katkısının betonu daha sünek hale getirdiği şeklinde değerlendirilmektedir.



Şekil 8.17 KPF katkılı beton numunelerin ortalama kuvvet- zaman grafiği

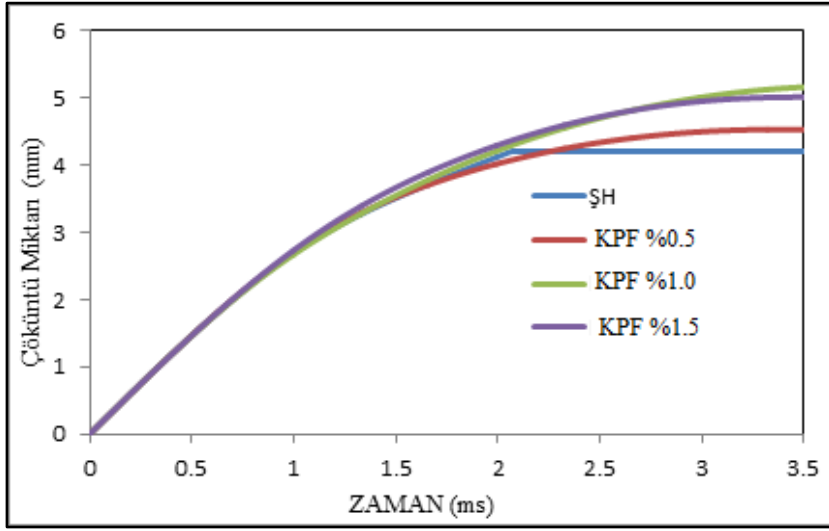
Şekil 8.17'da verilen grafik incelendiğinde şahit numunenin maksimum 48.396 kN değerinde kuvvet aldığı, %0.5 KPF katkılı beton örneği maksimum 42.028 kN değerinde, %1.0 KPF katkılı beton numune maksimum 41.377 kN değerinde ve %1.5 KPF katkılı beton numune maksimum 38.223 kN değerinde kuvvet almıştır. Şahit numunenin aldığı

maksimum kuvvet KPF ilaveli numunelere göre fazla olmasına rağmen şahit numunedeki kuvvet ani olarak azalıp sıfıra yaklaşırken artan oranda KPF katkılı beton numunelerde darbe yükü aşamalı olarak azalarak sıfıra yaklaşmaktadır. Ayrıca KPF katkılı beton numunelerin darbe yükü altında parçalanmaya karşı daha dirençli oldukları görülmektedir. Artan oranda KPF katkısının düşük darbe yükü alması nedeniyle hasar oluşumuna daha fazla katkı vereceği değerlendirilmektedir. KPF katkılı beton numunelerdeki maksimum darbe yükü noktasından sonraki aşamalı azalmanın nedeninin beton matriksinde bulunan KPF liflerinin köprüleme etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Koç ve Birinci [64] yaptıkları çalışmada lif içeren betonların lif içermeyen betonların gevrek bir şekilde ani olarak kırıldığını buna karşın lif içeren beton numunelerin ise daha fazla enerji yutarak uzun sürede ve kontrollü olarak kırıldıklarını tespit etmişleridir. Bu açıdan elde edilen sonuçlar bu tez çalışmasında elde edilen sonuçları destekler niteliktedir.



Şekil 8.18 KPF katkılı beton numunelerin ortalama enerji-zaman grafiği

Şekil 8.18’de verilen grafik incelendiğinde KPF katkılı beton numunelerin enerji eğrilerinin şahit numunenin enerji eğrisinden daha yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Bu durum liflerin KPF katkısının beton numunelerin enerji tüketme değerini arttırdığını göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar Öncel [17] tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir.



Şekil 8.19 KPF katkılı beton numunelerin ortalama çöküntü miktarı-zaman grafiği

Şekil 8.19’da verilen grafik incelendiğinde KPF katkılı beton numunelerin çöküntü miktarı eğrilerinin şahit numunenin çöküntü miktarı eğrisinden daha yüksek değere ulaştığını göstermektedir. Ayrıca %1.0-1.5 KPF ilave edilen numunelerin çöküntü miktarı eğrilerinin, %0.5 KPF ilave edilen numunelerin çöküntü miktarı eğrisine göre daha yüksek değere ulaştığı ancak %1.0 ve %1.5 KPF katkısının çöküntü miktarı eğrilerinin birbirlerine yakın değerler olduğu görülmektedir. Ayrıca KPF ilavesinin betonu daha sünek hale getirdiği düşünülmektedir. Bu durum Yoo vd. [65] tarafından yapılan çalışmayla uyumludur.

8.8. Makroyapı Bulguları

Ağırlık düşürme deneyi uygulanan ve sonrasında epoksi emdirilen şahit numune, PET katkılı beton numune, PLY katkılı beton numune ve KPF katkılı beton numune örneklerinin fotoğraf çekimleri yapılarak makro değerlendirilmesi yapılmıştır. Yapılan incelemelerde ağırlık düşürme deneyine tabi tutulan tüm numunelerde belirgin olarak makro çatlaklar tespit edilmiştir.

8.8.1. Şahit numune makroyapı bulguları

Şahit numunenin yapılan incelemesinde numunenin ağırlık düşürme enerjisine dayanamayıp parçalandığı tespit edilmiştir. Beton gibi kompozit malzemenin yük altında kırılmasına neden olabilen çeşitli kusurlar bulunur. Bu kusurlara örnek olarak beton matrisi

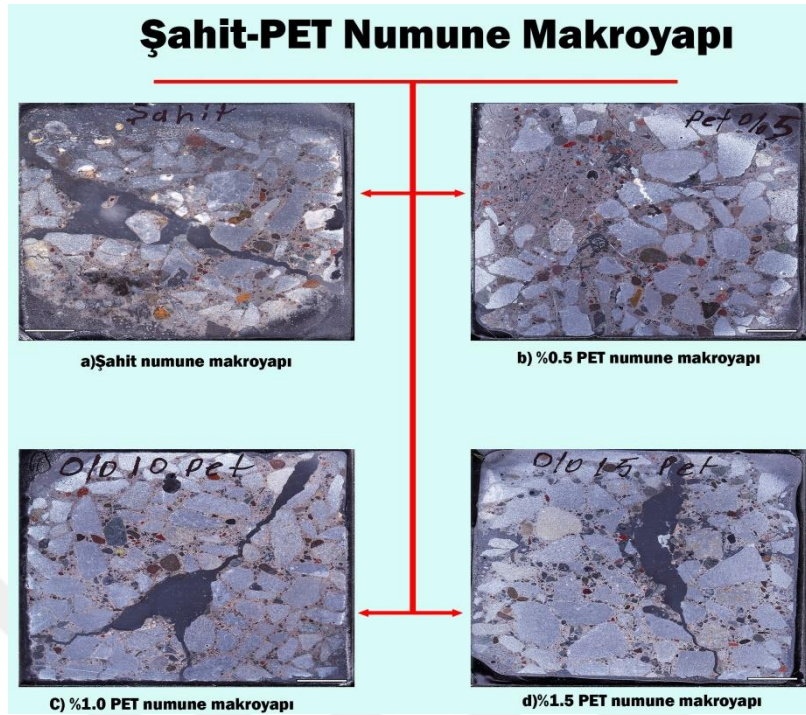
içerinde hacim değişimlerinden kaynaklanan mikro çatlaklardır. Bu gibi kusurlar beton matrisi içinde zayıf bölgeler oluşmasına neden olur. Literatürde betondaki kırılmanın genellikle betonun içresindeki bu en zayıf noktalardan ilerlediği ve bu en zayıf noktaların genellikle agrega ve çimento hamurunun temas yüzeyi olduğu belirtilmiştir [66]. Görsel 8.1 verilen numunenin makro yapı incelemesinde kırılmanın literatürdeki verileri destekler nitelikte genellikle agrega temas yüzeyinden olduğu görülmektedir. Ayrıca az miktarda kırılmış agreganın varlığı da göze çarpmaktadır. Bu bulguların çimento – agrega ara yüzünde meydana gelen bağdaki zayıflığın sonucunda meydana geldiği düşünülmektedir.



Görsel 8.1 *Şahit numune makroyapısı*

8.8.2. PET katkılı numune makroyapı bulguları

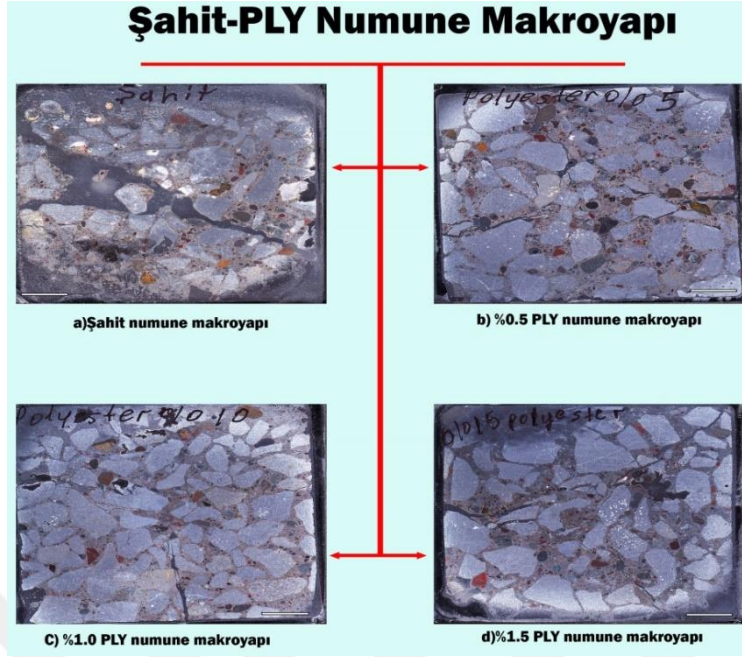
% 0.5, % 1.0 ve % 1.5 PET katkılı numunelerin yapılan makro yapı incelemesinde bu numunelerin uygulanan darbe yüküne dayanamayıp parçalandıkları görülmüştür. PET parçaları lifsi yapı göstermediğinden betonun gevrek yapısını çok fazla etkilemediği görülmektedir. Ayrıca Görsel 8.2’de verilen makro yapı incelendiğinde kırılmanın çoğunlukla agrega ara yüzünde olduğu ancak az miktarda ise agrega kırılmış agreganın varlığı da gözlenmiştir. Literatürdeki bulgular elde edilen bulguları destekler niteliktedir. [66]



Görsel 8.2 PET katkılı numunelerin makroyapısı

8.8.3. PLY katkılı numuneler makroyapısı

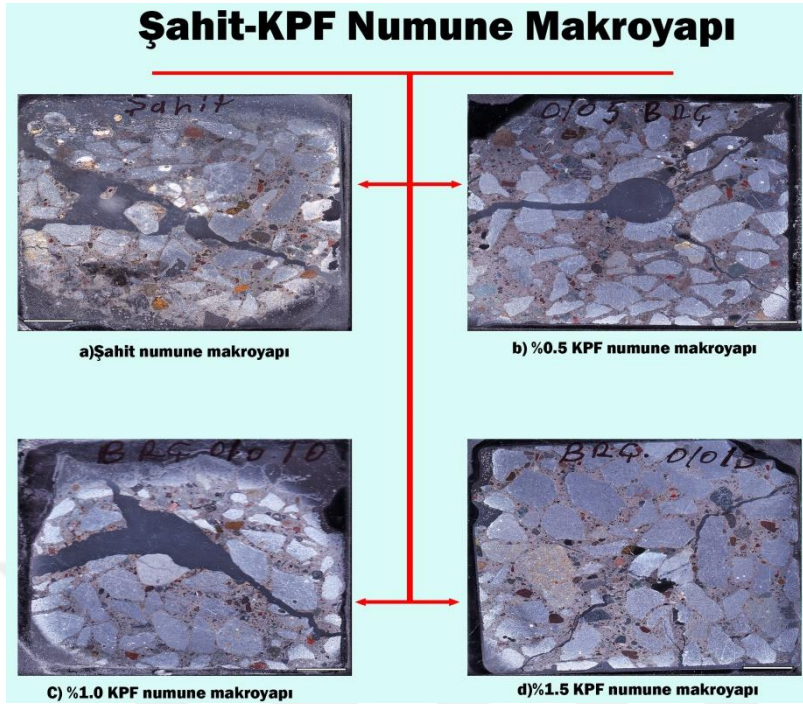
% 0.5, % 1.0 ve % 1.5 PLY katkılı beton numunelerin yapılan makro incelemesinde (Görsel 8.3) Betona PLY lif katılmasının darbe yükü uygulanması sonucunda numunelerin parçalanmasını önlediği gözlenmiştir. Ayrıca gözle görülebilen makro çatlakların beton matrisinde düzensiz bir şekilde dağıldığı ve çatlakların çoğunlukla agrega ara yüzünde ilerlediği yer yer ise çatlakların agrega içerinden oluştuğu gözlenmektedir. Aliabdo ve ark. [22] yaptıkları çalışmada lif katkılı beton numunelerin şahit numuneye oranla çöküntü derinliğini ve çatlak genişliğini azalttığını belirtmişlerdir. Johnston [67] yaptığı çalışmada yük uygulanan beton içindeki çatlakların düzensiz bir şekilde dağıldığını belirtmiştir. Literatürdeki bulgular PLY katkılı numunelerden elde edilen verileri destekler niteliktedir.



Görsel 8.3 PLY katkıli numuneler makro yapısı

8.8.4. KPF katkıli numuneler makroyapısı

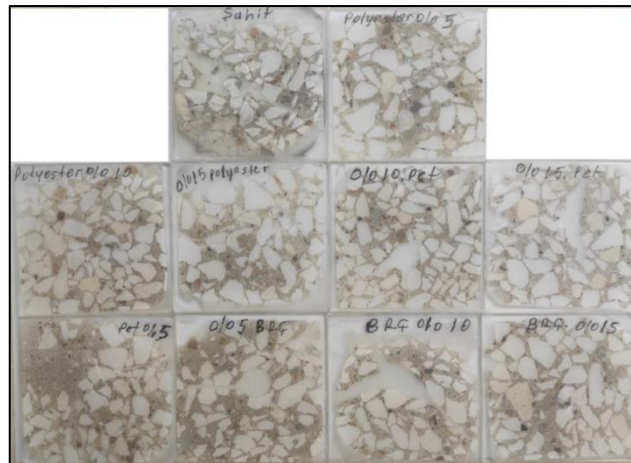
% 0.5, % 1.0 ve % 1.5 KPF katkıli beton numunelerin yapılan makro incelemesinde (Görsel 8.4) KPF lif katkısının numunelerin parçalanmasını önlediği, lif katkısının darbe krateri (çöküntü miktarı) ve çatlak genişliğini şahit numuneye oranla azalttığı gözlenmiştir. Ayrıca gözle görülebilen makro çatlakların betonun içerisinde düzensiz dağıldığı ve çatlakların çoğunlukla agregara ara yüzünde ilerlediği ve az miktarda agreganın kırıldığı tespit edilmiştir.



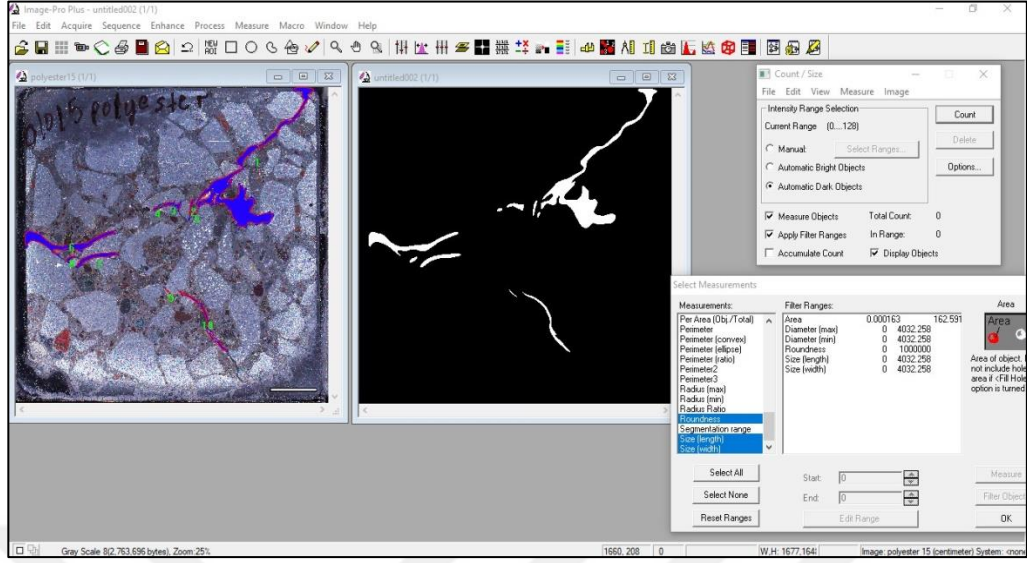
Görsel 8.4 KPF katkılı numuneler makroyapısı

8.9. Beton Numunelerin İnce Kesit Bulguları

Beton numunelerden elde edilen ince kesitler mikroskopta görüntüleri alındıktan sonra görüntüler bilgisayara aktarılmış ve ölçeklendirildikten sonra bilgisayar yazılımı kullanılarak çatlakların genişlikleri, çapları, uzunlukları ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular aşağıda değerlendirilmiştir. Görsel 8.5'te İnce kesit serileri ve Görsel 8.6'da görüntü işleme prosesi verilmiştir.



Görsel 8.5 İnce kesit serileri



Görsel 8.6 Görüntü işleme prosesi

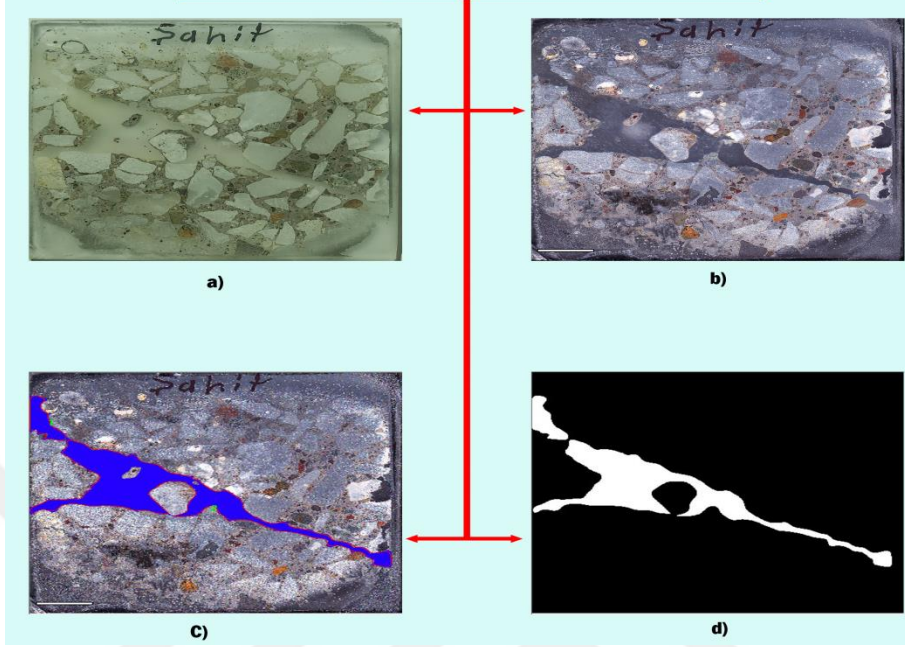
8.9.1. Şahit beton numunesi

Görsel 8.7 ve Çizelge 8.9’da verilen ince kesit ölçümleri incelendiğinde ağırlık düşürme deneyinden sonra iki alanda ortalama 1.92 cm^2 değerinde belirgin çatlak alanı olduğu ve bu belirgin çatlakların numune boyunca ilerlediği görülmektedir. Çatlakların boyuna olarak çoğunlukla çimento hamuru içerisinde ilerlediği görülmektedir. Ölçümlerde elde edilen maksimum ortalama çap 3.89 cm , minimum ortalama çap 0.49 cm , ortalama çatlak uzunluğu 3.95 cm , ortalama çatlak genişliği 1.35 cm ve küresellik 1.73 cm olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 8.9 Şahit numune ince kesit görüntü işleme ölçüm sonuçları

	Alan (cm^2)	Çap(maks) (cm)	Çap (min.) (cm)	Küresellik	Uzunluk (cm)	Genişlik (cm)
1	0.374984	1.230772	0.335989	2.422247	1.305603	0.534393
2	3.468002	6.526444	0.635275	1.042902	6.596039	2.160828
Ortalama	1.921493	3.878608	0.485632	1.732575	3.950821	1.347611

Şahit Numune Görüntü işleme analizleri



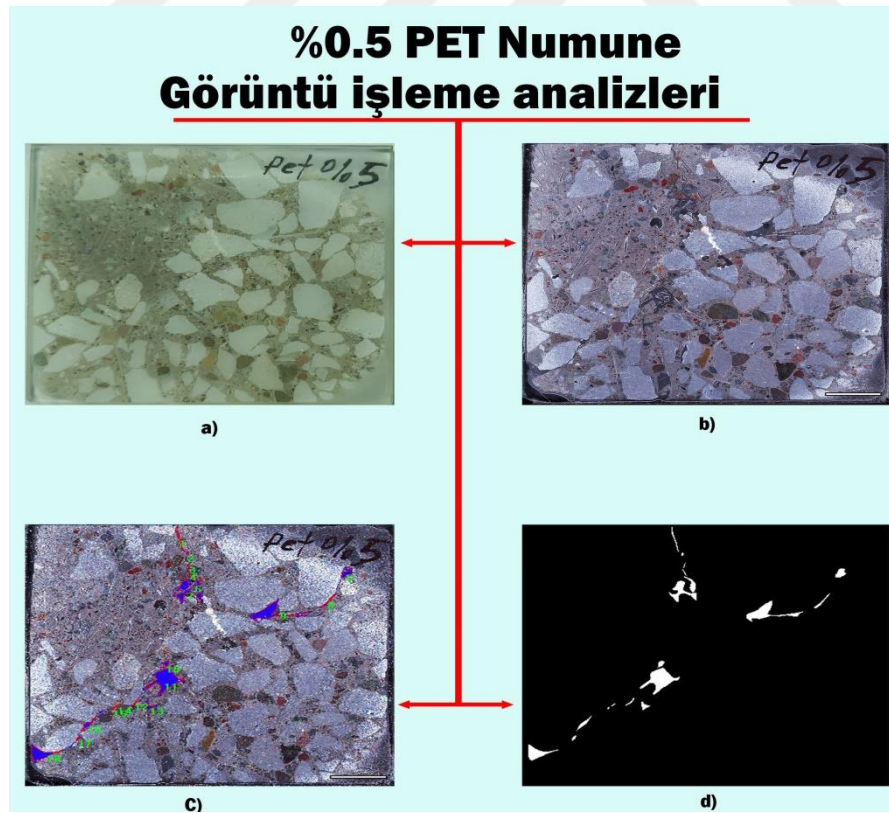
Görsel 8.7 Şahit numuneye ait görüntü işleme analizleri a) ince kesit, b) taranmış kesit, c) işlenmiş kesit, d) maskelenmiş kesit.

8.9.2. %0.5 PET katkılı beton numune

Görsel 8.8 ve Çizelge 8.10 da verilen ölçümler incelendiğinde toplam 18 alanda ortalama 0.03cm^2 'lik çatlak alanı olduğu görülmektedir. Bu alan şahit numunede 2 alanda ortalama 1.92 cm^2 değerinde olduğu göz önüne alınırsa betona PET katkısının ortalama çatlak alanını azalttığı gözlenmektedir. %0.5 PET katkılı betonda ortalama maksimum çatlak çapı 0.35 cm, ortalama minimum çap 0.09 cm, ortalama çatlak uzunluğu 0.36 cm ve ortalama çatlak genişliği 0.15 cm değerinde ölçülürken bu değerler şahit betonda ortalama maksimum çap 3.88 cm, ortalama minimum çap 0.49 cm, ortalama çatlak uzunluğu 3.95 cm, ortalama çatlak genişliği 1.35 cm olarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarından Betona %0.5 oranında PET ilave edilmesinin ortalama çatlak alanı, ortalama maksimum çap, ortalama minimum çap, ortalama çatlak uzunluğu ve ortalama çatlak genişliğinin belirgin bir biçimde azalttığı görülmektedir. Bu durumun ikame edilen PET kırıklarının darbe yükünü absorbe etmesi sonucu olduğu şeklinde değerlendirilmektedir.

Çizelge 8.10 %0.5PET katkılı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları

	Alan (cm ²)	Çap (maks.) (cm)	Çap (min.) (cm)	Küresellik (cm)	Uzunluk (cm)	Genişlik (cm)
1	0.012677	0.625398	0.037026	11.32878	0.625122	0.044067
2	0.002516	0.077978	0.036367	1.235461	0.078369	0.040344
3	0.00129	0.126999	0.01448	4.798642	0.126892	0.013184
4	0.002871	0.215712	0.012048	6.399131	0.220947	0.018982
5	0.0295	0.265941	0.143008	1.421489	0.260498	0.161743
6	0.028564	0.368626	0.096469	3.053725	0.419632	0.154053
7	0.090273	0.510609	0.122342	4.864785	0.574543	0.421509
8	0.014242	0.452391	0.052209	5.98049	0.474426	0.059998
9	0.13553	0.968546	0.196089	5.520067	1.035675	0.497101
10	0.012209	0.183337	0.088079	1.436849	0.187866	0.098434
11	0.18082	0.675869	0.362537	3.015043	0.70398	0.485153
12	0.005742	0.217016	0.054624	4.428447	0.25354	0.043715
13	0.015822	0.194313	0.099433	2.01325	0.214966	0.164673
14	0.002145	0.10239	0.040956	1.984968	0.105042	0.023346
15	0.001564	0.079107	0.030585	1.651703	0.080688	0.024841
16	0.019177	0.452391	0.065868	4.05181	0.451294	0.074051
17	0.004871	0.146021	0.041348	1.790262	0.145752	0.045136
18	0.080321	0.554537	0.23307	2.721315	0.550335	0.387896
Ortalama	0.035563	0.345399	0.095919	3.760901	0.361643	0.153235



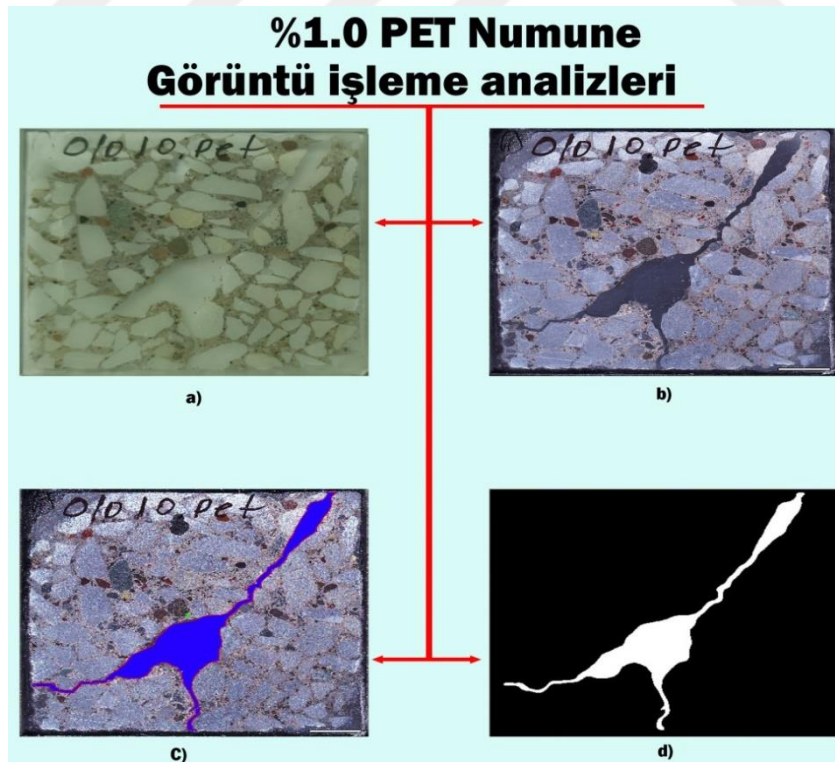
Görsel 8.8 %0.5 PET katkılı numuneye ait görüntü işleme analizleri a) ince kesit, b) taranmış kesit, c) işlenmiş kesit, d) maskelenmiş kesit.

8.9.3. % 1.0 PET katkıli beton numunesi

Görsel 8.9 ve Çizelge 8.11 de verilen ölçümler incelendiğinde toplam 1 alanda ortalama 3.02 cm²'lik çatlak alanı, ortalama maksimum çatlak çapı 5,93 cm, ortalama minimum çatlak çapı 0,63 cm, ortalama çatlak uzunluğu 7,55 cm, ortalama çatlak genişliği 3,15 cm olarak ölçülmüştür. Bu değerler şahit betonda ortalama maksimum çap 3.88 cm, ortalama minimum çap 0.49 cm, ortalama çatlak uzunluğu 3.95 cm, ortalama çatlak genişliği 1.35 cm olarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları şahit numune ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırıldığında betona %1.0 PET katkısının çatlak alanını, maksimum çatlak genişliğini, minimum çatlak genişliğini, çatlak uzunlunu ve çatlak genişliğini artırdığı gözlenmektedir.

Çizelge 8.11 %1.0 PET katkıli beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları

	Alan (cm ²)	Çap(maks.) (cm)	Çap(min.) (cm)	Küresellik (cm)	Uzunluk (cm)	Genişlik (cm)
1	3,024512	5,929088	0,626355	13,27309	7,550781	3,147125



Görsel 8.9 %1.0 PET katkıli numuneye ait görüntü işleme analizleri a) ince kesit, b) taranmış kesit, c) işlenmiş kesit, d) maskelenmiş kesit.

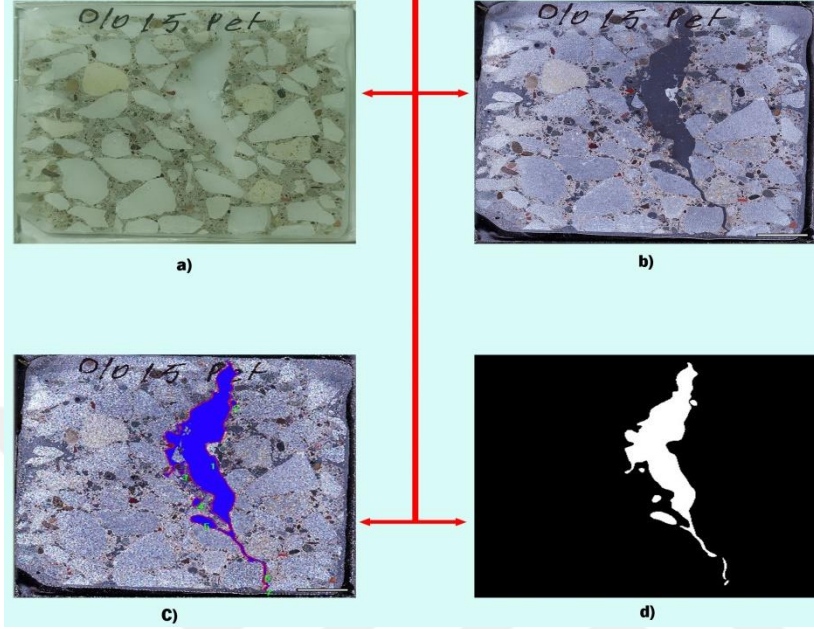
8.9.4. % 1.5 PET katkılı beton numune

Görsel 8.10 ve Çizelge 8.12’de verilen veriler incelendiğinde betona %1.5 oranında PET ilave edilmesi sonucu toplam 7 alanda ortalama çatlak alanı 0.43 cm^2 , ortalama maksimum çatlak çapı 0.90 cm, ortalama minimum çatlak çapı 0.12 cm, ortalama çatlak uzunluğu 1.07 cm, ortalama çatlak genişliği 0.36 cm olarak elde edilmiştir. Bu değerler şahit betonda ortalama maksimum çap 3.88 cm, ortalama minimum çap 0.49 cm, ortalama çatlak uzunluğu 3.95 cm, ortalama çatlak genişliği 1.35 cm olarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları şahit numune ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırıldığında betona %1.5 PET ilavesinin çatlak alanını, maksimum çatlak genişliğini, minimum çatlak genişliğini, çatlak uzunlunu ve çatlak genişliğini belirgin bir şekilde azalttığı da gözlenmektedir. Ayrıca % 0.5 PET katkılı beton ile %1.5 PET katkılı beton sonuçları ile karşılaştırıldığında %0.5 PET katkısının çatlak alanı, maksimum çatlak çapı, minimum çatlak çapı, çatlak uzunluğu ve çatlak genişliğini azaltmada daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.

Çizelge 8.12 %1.5 PET katkılı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları

	Alan (cm^2)	Çap (maks) (cm)	Çap (min) (cm)	Küresellik (cm)	Uzunluk (cm)	Genişlik (cm)
1	2.686334	4.401604	0.154071	7.438738	5.547333	1.712524
2	0.017803	0.183411	0.119411	1.142748	0.185944	0.121704
3	0.010422	0.128842	0.094907	1.134566	0.130234	0.106201
4	0.029038	0.229872	0.149682	1.161246	0.230835	0.158722
5	0.114836	0.573796	0.227419	1.497536	0.583160	0.252869
6	0.025250	0.627539	0.048554	5.871693	0.624268	0.087006
7	0.006617	0.157721	0.045619	1.636869	0.157593	0.050720
Ortalama	0.412900	0.900398	0.119952	2.840485	1.065624	0.355678

%1.5 PET Numune Görüntü işleme analizleri



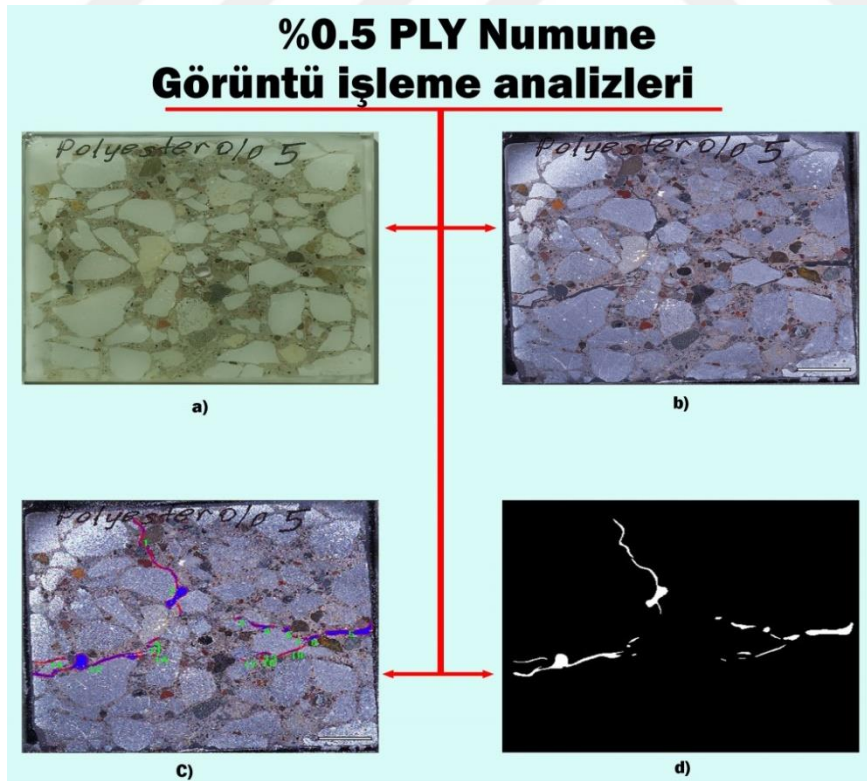
Görsel 8.10 %1.5 PET katkılı numuneye ait görüntü işleme analizleri a) ince kesit, b) taranmış kesit, c) işlenmiş kesit, d) maskelenmiş kesit.

8.9.5. %0.5 PLY katkılı beton numune

Görüntü işleme analizi sonucunda elde edilen Görsel 8.11 ve Çizelge 8.13'te verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde betona %5 oranında PLY katkısının ağırlık düşürme deneyi sonucunda toplam 17 alanda ortalama 0.04 cm^2 çatlak alanı, ortalama maksimum çatlak çapının 0.51 cm , ortalama minimum çatlak çapının 0.09 cm , ortalama çatlak uzunluğunun 0.53 cm , ortalama çatlak genişliğinin 0.13 cm olduğu gözlenmektedir. Elde edilen bu bulgular şahit beton numunesi bulguları ile karşılaştırıldığında betona %0.5 PLY ilavesinin ortalama çatlak alanı, ortalama maksimum çatlak çapı, ortalama minimum çatlak çapı, ortalama çatlak uzunluğu ve ortalama çatlak genişliğini belirgin bir biçimde azalttığı gözlenmiştir. Bu durum PLY liflerinin çatlak ilerlemesini köprüleme etkisi nedeniyle azalttığı olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 8.13 %0.5 PLY katlı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları

	Alan (cm ²)	Çap(maks) (cm)	Çap(min) (cm)	Küresellik	Uzunluk (cm)	Genişlik (cm)
1	0.045792	1.071549	0.215727	10.735180	1.065155	0.184692
2	0.137615	1.214195	0.320733	9.829752	1.525318	0.478027
3	0.006524	0.120973	0.064241	1.193949	0.121552	0.068405
4	0.032221	0.415888	0.100552	2.962273	0.470367	0.137833
5	0.122091	0.864232	0.107864	3.291394	0.903412	0.305298
6	0.012762	0.146924	0.103355	1.131318	0.149536	0.110535
7	0.006539	0.223248	0.032120	2.999166	0.226532	0.040527
8	0.025856	0.303964	0.110193	1.803949	0.314148	0.123566
9	0.008682	0.238676	0.048631	2.509486	0.238281	0.049484
10	0.021126	0.645462	0.051792	7.543357	0.648804	0.050262
11	0.003667	0.073462	0.055776	1.037168	0.074341	0.058029
12	0.213612	2.125566	0.079381	11.826630	2.125427	0.415665
13	0.011714	0.239042	0.051945	2.197887	0.255253	0.059872
14	0.002349	0.083189	0.033806	1.378162	0.084412	0.034027
15	0.018285	0.636660	0.030341	8.533685	0.633377	0.083269
16	0.002428	0.112191	0.023904	2.046543	0.111847	0.024570
17	0.001762	0.101807	0.017817	2.338475	0.101715	0.021790
Ortalama	0.039590	0.506884	0.085187	4.315198	0.532322	0.132109



Görsel 8.11 %0.5 PLY katlı numuneye ait görüntü işleme analizleri a) ince kesit, b) taranmış kesit, c) işlenmiş kesit, d) maskelenmiş kesit.

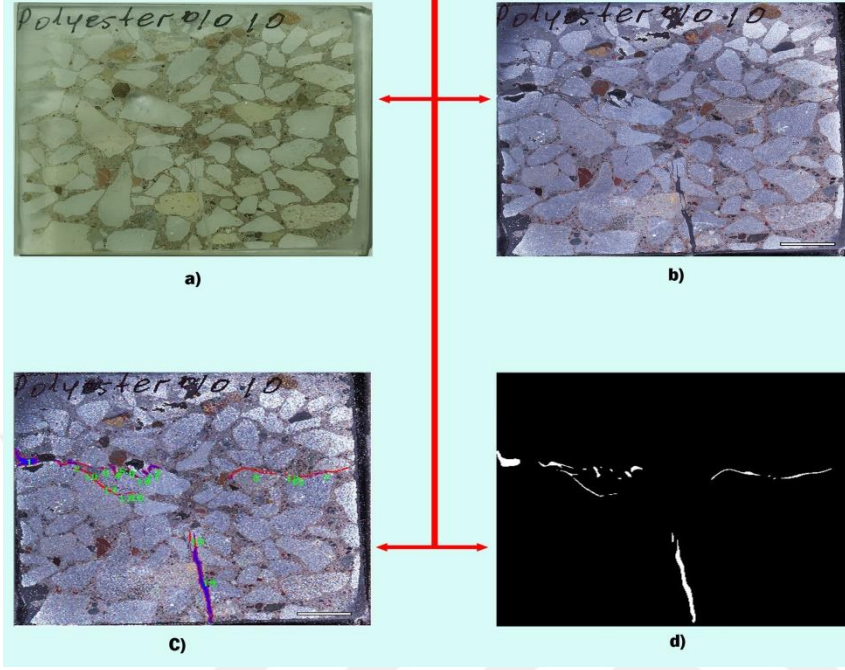
8.9.6. %1.0 PLY katkılı beton numune

Görüntü işleme analizi sonucunda elde edilen Görsel 8.12 ve Çizelge 8.14'te verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde betona %10 oranında PLY katkısının ağırlık düşürme deneyi sonucunda toplam 19 alanda ortalama 0.02 cm^2 çatlak alanı, ortalama maksimum çatlak çapı 0.39 cm, ortalama minimum çatlak çapı 0.07 cm, ortalama çatlak uzunluğu 0.41 cm, ortalama çatlak genişliği 0.08 cm olarak gözlenmiştir. Elde edilen bu bulgular şahit numune bulguları ile karşılaştırıldığında betona %1.0 oranında PLY katkısının ortalama çatlak alanı, ortalama maksimum çatlak çapı, ortalama minimum çatlak çapı, ortalama çatlak uzunluğu ve ortalama çatlak genişliğini belirgin bir biçimde azalttığı gözlenmiştir. Bu durum PLY liflerinin çatlak ilerlemesini köprüleme etkisi nedeniyle azalttığı olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca %0.5 ve %1.0 PLY ilavesinde elde edilen bulgular karşılaştırıldığında %1.0 PLY ilavesinin %0.5 PLY ilavesine göre ortalama çatlak alanı, çapı, uzunluğu ve genişliğini azaltmada daha başarılı sonuç verdiği gözlenmektedir.

Çizelge 8.14 %1.0 PLY katkılı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları

	Alan (cm^2)	Çap (maks) (cm)	Çap (min) (cm)	Küresellik	Uzunluk (cm)	Genişlik (cm)
1	0.079019	0.491224	0.181452	2.232872	0.524475	0.317535
2	0.030974	0.640571	0.080038	6.901825	0.642284	0.138153
3	0.017202	0.210645	0.087044	1.847148	0.225967	0.133575
4	0.013105	0.276379	0.037176	2.969933	0.296814	0.076172
5	0.000699	0.034215	0.020161	1.005876	0.038025	0.020081
6	0.002406	0.075329	0.036290	1.156856	0.075035	0.038612
7	0.028063	0.921651	0.042098	12.340720	0.971161	0.061798
8	0.001740	0.062986	0.037176	1.129483	0.063721	0.033630
9	0.030356	0.749111	0.381171	12.373840	0.898308	0.252956
10	0.008292	0.330965	0.025502	8.385608	0.395981	0.094467
11	0.009186	0.175670	0.059536	1.529990	0.176727	0.063354
12	0.001122	0.058711	0.025819	1.371541	0.058304	0.021179
13	0.016227	0.664344	0.022810	9.822860	0.675751	0.049774
14	0.001902	0.068667	0.037176	1.241732	0.069016	0.029747
15	0.000585	0.037176	0.024194	1.176585	0.038239	0.016632
16	0.001854	0.155124	0.014539	4.805440	0.159103	0.014496
17	0.001593	0.069608	0.024527	1.363038	0.070419	0.026566
18	0.004910	0.241969	0.056163	4.326798	0.246185	0.023315
19	0.151291	2.211421	0.082242	11.652910	2.209717	0.129517
Ortalama	0.021080	0.393461	0.067111	4.612371	0.412381	0.081135

%1.0 PLY Numune Görüntü işleme analizleri



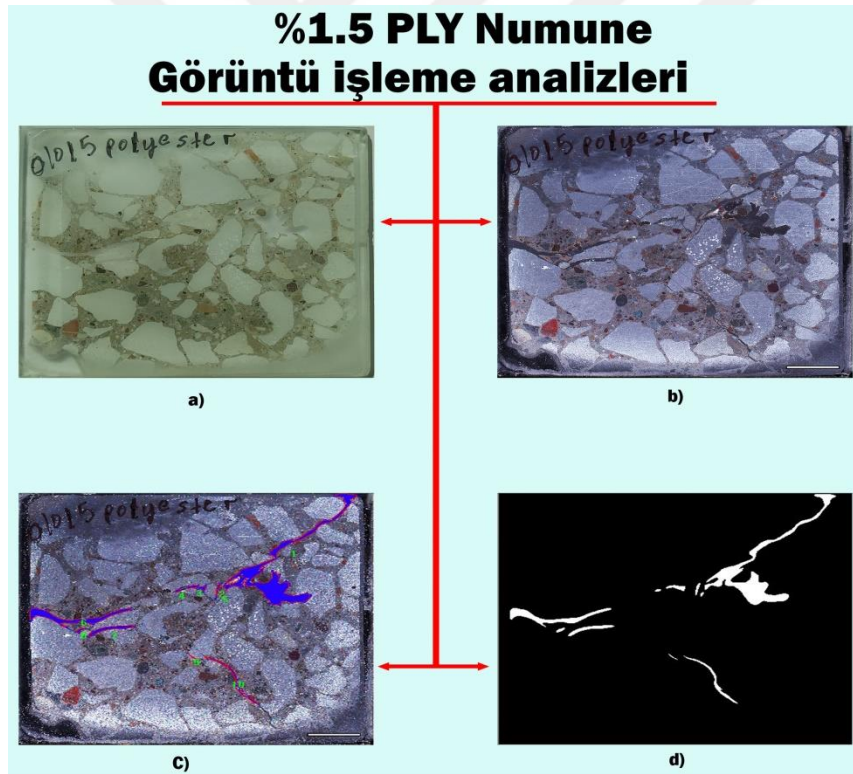
Görsel 8.12 %1.0 PLY katkılı numuneye ait görüntü işleme analizleri a) ince kesit, b) taranmış kesit, c) işlenmiş kesit, d) maskelenmiş kesit

8.9.7. %1.5 PLY katkılı beton numune

Görüntü işleme analizi sonucunda elde edilen Görsel 8.13 ve Çizelge 8.15’de verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde betona %1.5 oranında PLY katkısının ağırlık düşürme deneyi sonucunda toplam 10 alanda ortalama 0.13 cm^2 çatlak alanı, ortalama maksimum çatlak çapı 0.87 cm, ortalama minimum çatlak çapı 0.16 cm, ortalama çatlak uzunluğu 0.93 cm, ortalama çatlak genişliği 0.29 cm olarak gözlenmiştir. Elde edilen bu bulgular şahit numune bulguları ile karşılaştırıldığında betona %1.5 oranında PLY katkısının ortalama çatlak alanı, ortalama maksimum çatlak çapı, ortalama minimum çatlak çapı, ortalama çatlak uzunluğu ve ortalama çatlak genişliğini belirgin bir biçimde azalttığı gözlenmiştir. Ancak %1.5 PLY katkısı %0.5 ve %1.0 PLY katkı sonuçları karşılaştırıldığında çatlak alanı, çatlak çapı, çatlak uzunluğu ve çatlak genişliği gibi özellikleri azaltmada performansının %0.5 ve %1.0 PLY katkısına göre daha az olduğu ve en iyi performansı %1.0 PLY katkılı beton numunelerde elde edildiği gözlenmiştir.

Çizelge 8.15 %1.5 PLY katkılı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları

	Alan (cm ²)	Çap (maks) (cm)	Çap (min) (cm)	Küresellik	Uzunluk (cm)	Genişlik (cm)
1	0.839718	3.114796	0.627492	16.469490	3.441589	1.561401
2	0.013202	0.328969	0.044355	3.174648	0.330566	0.053711
3	0.030567	0.380766	0.083127	2.470343	0.373917	0.136749
4	0.006439	0.128147	0.056163	1.239173	0.127808	0.061661
5	0.005024	0.135546	0.043616	1.564461	0.137085	0.046478
6	0.239074	1.889817	0.578878	8.323236	1.933890	0.519234
7	0.068711	0.826377	0.074351	4.824918	0.914551	0.167130
8	0.010796	0.200886	0.067110	1.665400	0.202515	0.070380
9	0.003853	0.228740	0.024194	5.365355	0.239716	0.023254
10	0.082190	1.467177	0.040524	13.386230	1.608826	0.284424
Ortalama	0.129957	0.870122	0.163981	5.848325	0.931046	0.292442



Görsel 8.13 %1.5 PLY katkılı numuneye ait görüntü işleme analizleri a) ince kesit, b) taranmış kesit, c) işlenmiş kesit, d) maskelenmiş kesit.

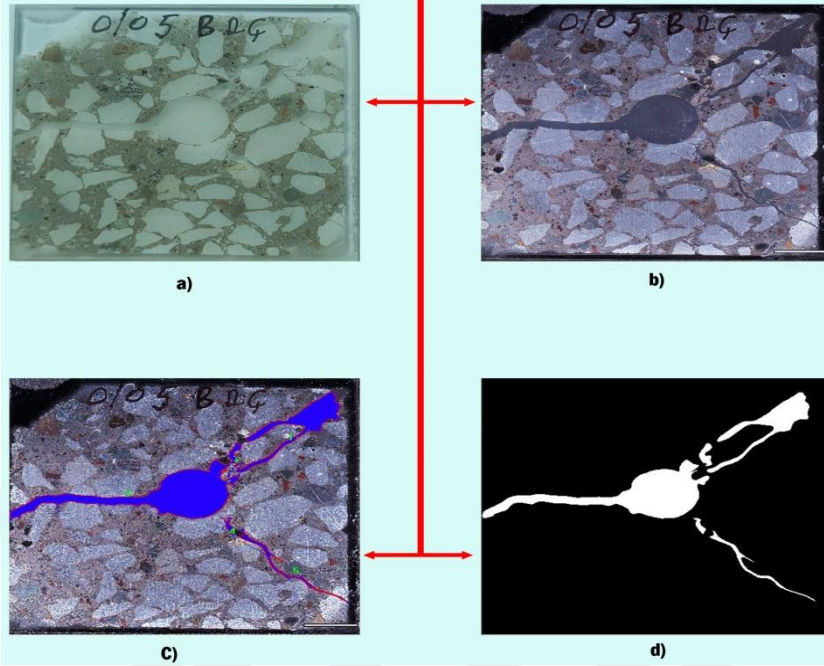
8.9.8. %0.5 KPF katkılı beton numune

Görüntü işleme analizi sonucunda elde edilen Görsel 8.14 ve Çizelge 8.16’da verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde betona %0.5 oranında KPF katkısının ağırlık düşürme deneyi sonucunda toplam 5 alanda ortalama 0.64 cm² çatlak alanı, ortalama maksimum çatlak çapı 2.04 cm, ortalama minimum çatlak çapı 0.28 cm, ortalama çatlak uzunluğu 2.15 cm, ortalama çatlak genişliği 0.61 cm olarak gözlenmiştir. Elde edilen bu bulgular şahit numune bulguları ile karşılaştırıldığında betona %0.5 oranında KPF katkısının ortalama çatlak alanı, ortalama maksimum çatlak çapı, ortalama minimum çatlak çapı, ortalama çatlak uzunluğu ve ortalama çatlak genişliğini belirgin bir biçimde azalttığı gözlenmiştir. Bu durum KPF’nin lifli yapıda olması ve liflerin köprüleme etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 8.16 %0.5 KPF katkılı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları

	Alan (cm ²)	Çap (maks) (cm)	Çap (cm)	Küresellik	Uzunluk (cm)	Genişlik (cm)
1	0.796547	2.708247	0.335091	7.893534	2.708130	0.797058
2	0.084591	0.596049	0.062225	2.720748	0.608398	0.245972
3	2.116046	4.264874	0.706581	5.433052	4.345520	1.468315
4	0.040223	0.428818	0.095414	2.595499	0.445129	0.149292
5	0.169389	2.182946	0.183868	20.884140	2.652283	0.381592
Ortalama	0.641359	2.036187	0.276636	7.905395	2.151892	0.608446

%0.5 KPF Numune Görüntü İşleme analizleri



Görsel 8.14 %0.5 KPF katkılı numuneye ait görüntü işleme analizleri a) ince kesit, b) taranmış kesit, c) işlenmiş kesit, d) maskelenmiş kesit.

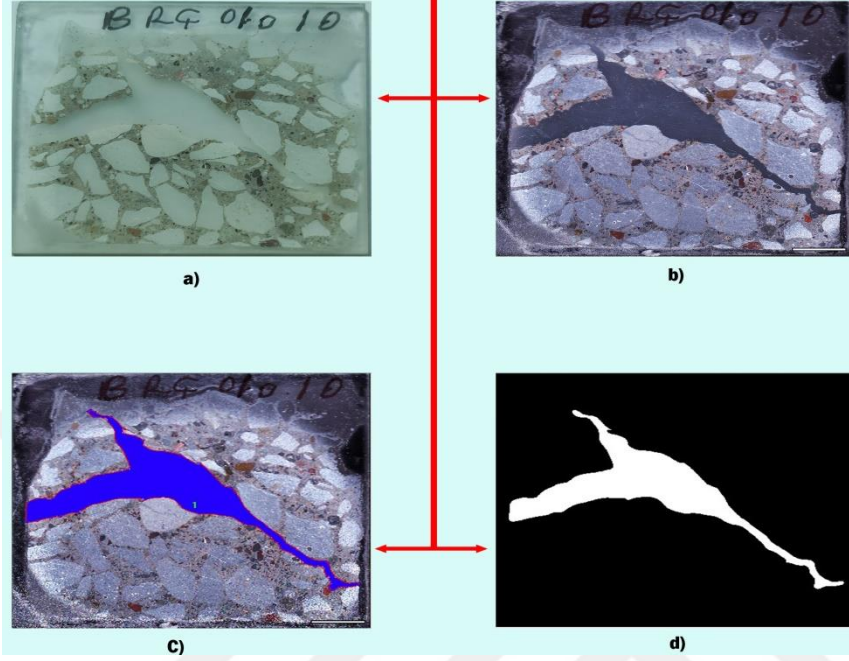
8.9.9. %1.0 KPF katkılı beton numune

Görüntü işleme analizi sonucunda elde edilen Görsel 8.15 ve Çizelge 8.17 de verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde betona %1.0 oranında KPF katkısının ağırlık düşürme deneyi sonucunda toplam 1 alanda ortalama 4.36 cm^2 çatlak alanı, ortalama maksimum çatlak çapı 5.29 cm, ortalama minimum çatlak çapı 1.07 cm, ortalama çatlak uzunluğu 6.42 cm, ortalama çatlak genişliği 3.07 cm olarak gözlenmiştir. Elde edilen bu bulgular şahit numune bulguları ile karşılaştırıldığında betona %1.0 oranında KPF katkısının ortalama çatlak alanı, ortalama maksimum çatlak çapı, ortalama minimum çatlak çapı, ortalama çatlak uzunluğu ve ortalama çatlak genişliğini belirgin bir biçimde artırdığı gözlenmiştir.

Çizelge 8.17 %1.0 KPF katkılı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları

	Alan (cm^2)	Çap(maks.) (cm)	çap (min.) (cm)	Küresellik	Uzunluk (cm)	Genişlik (cm)
1	4.368774	5.293333	1.071876	7.430635	6.421188	3.074310

%1.0 KPF Numune Görüntü işleme analizleri



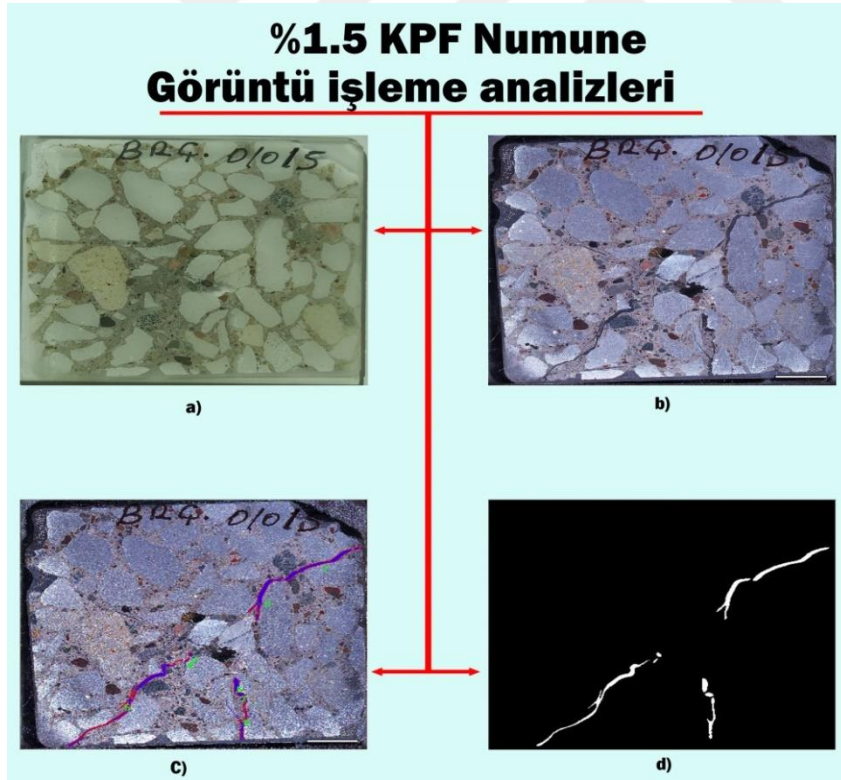
Görsel 8.15 %1.0 KPF katkılı numuneye ait görüntü işleme analizleri a) ince kesit, b) taranmış kesit, c) işlenmiş kesit, d) maskelenmiş kesit.

8.9.10. %1.5 KPF katkılı beton numune

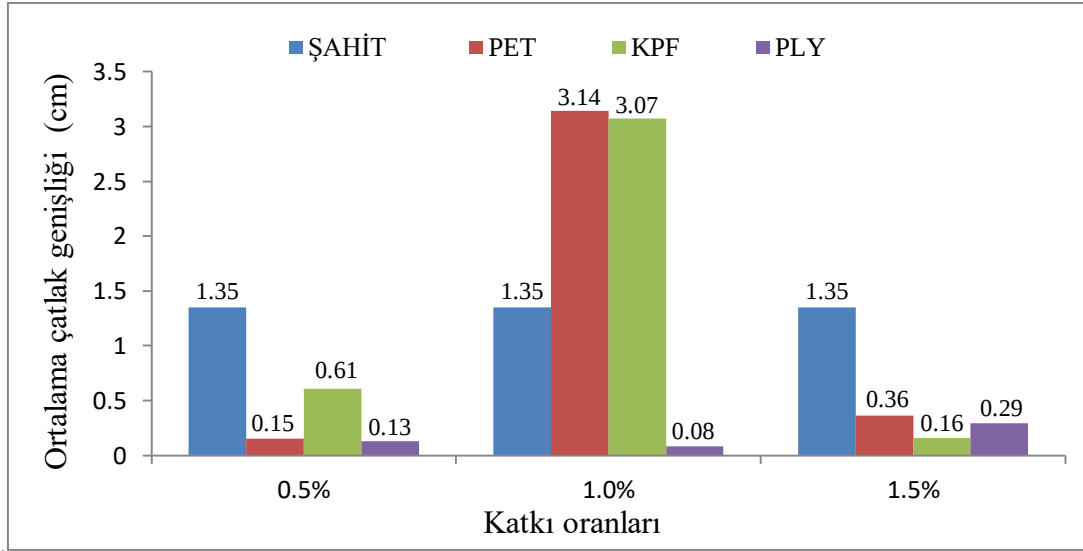
Görüntü işleme analizi sonucunda elde edilen Görsel 8.16 ve Çizelge 8.18’de verilen ölçüm sonuçları incelendiğinde betona %1.5 oranında KPF katkısının ağırlık düşürme deneyi sonucunda toplam 8 alanda ortalama 0.07 cm^2 çatlak alanı, ortalama maksimum çatlak çapı 0.98 cm, ortalama minimum çatlak çapı 0.08 cm, ortalama çatlak uzunluğu 0.99cm, ortalama çatlak genişliği 0.16 cm olarak gözlenmiştir. Elde edilen bu bulgular şahit numune bulguları ile karşılaştırıldığında betona %1.5 oranında KPF katkısının ortalama çatlak alanı, ortalama maksimum çatlak çapı, ortalama minimum çatlak çapı, ortalama çatlak uzunluğu ve ortalama çatlak genişliğini belirgin bir biçimde azalttığı gözlenmiştir. Ayrıca %1.5 KPF katkılı numune bulguları %0.5 ve %1.0 KPF katkılı numune bulguları ile karşılaştırıldığında da %1.5 oranında KPF katkısının ortalama çatlak alanı, ortalama maksimum çatlak çapı, ortalama minimum çatlak çapı, ortalama çatlak uzunluğu ve ortalama çatlak genişliğini azaltmada %0.5 ve %1.0 BRÇ katkısına göre daha iyi performans sergilediği gözlenmektedir.

Çizelge 8.18 %1.5 KPF katkılı beton numune görüntü işleme ölçüm sonuçları

	Alan (cm ²)	Çap (maks.) (cm)	Çap (min.) (cm)	Küresellik	Uzunluk (cm)	Genişlik (cm)
1	0.135390	1.679013	0.073027	8.470230	1.709686	0.170349
2	0.107164	1.077006	0.101129	8.205446	1.194824	0.291687
3	0.008097	0.132083	0.072693	1.138983	0.131989	0.077271
4	0.004992	0.146776	0.038040	1.767180	0.146729	0.041733
5	0.192524	3.162702	0.050524	27.202350	3.156128	0.320831
6	0.032730	0.358871	0.104839	1.747095	0.363403	0.111328
7	0.012796	0.167278	0.094908	1.206970	0.166931	0.099670
8	0.059183	1.094645	0.091240	8.791768	1.094482	0.156006
Ortalama	0.069109	0.977297	0.078300	7.316253	0.995521	0.158609



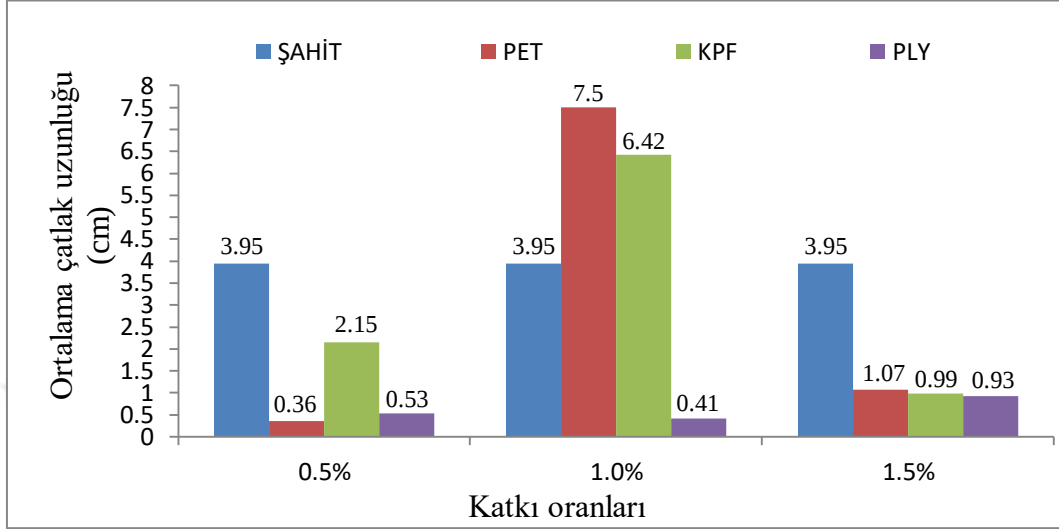
Görsel 8.16 %1.5 KPF katkılı numuneye ait görüntü işleme analizleri a) ince kesit, b) taranmış kesit, c) işlenmiş kesit, d) maskelenmiş kesit



Şekil 8.20 Katkılı beton numunelerin ortalama çatlak genişliği grafiği

Şekil 8.20 de verilen grafik incelendiğinde %0.5 katkı ilave edilen numunelerde ortalama çatlak genişliği PET ilavesinde 0.15cm, PLY ilavesinde 0.13 cm ve KPF ilavesinde 0.61 cm ölçülmüştür. Buna göre en iyi performansı %0.5 PLY ilave edilen numunelerde olduğu görülmektedir. %1.0 katkılı numunelerin grafik bulgularına bakıldığında ise ortalama çatlak genişliğinin PET ilavesinde 3.14 cm, PLY ilavesinde 0.08 cm, KPF ilavesinde ise 3.07 cm olarak ölçülmüştür. %1.0 katkılı numune bulguları karşılaştırıldığında ortalama çatlak genişliğini azaltmada en iyi performansın %1.0 PLY katkılı numunede ortaya çıktığı görülmektedir. Grafikte %1.5 katkılı numunelerin verileri incelendiğinde PET ilave edilen numunede ortalama çatlak genişliği 0.36 cm, PLY ilavesinde ortalama çatlak genişliği 0.29 cm, KPF ilave edilen numunede ise ortalama çatlak genişliği 0.16 cm olarak ölçülmüştür. Buna göre %1.5 katkı ilave edilen numunelerde ortalama çatlak genişliği azaltmada en iyi performansı %1.5 KPF ilave edilen numunede ortaya çıktığı görülmektedir. Ayrıca %0.5-%1.0 ve %1.5 PET ilave edilen numune bulguları incelendiğinde çatlak genişliğini azaltmada en iyi performansın %0.5 PET ilave edilen numunede ortaya çıktığı görülmektedir. %0.5, %1.0 ve %1.5 PLY ilave edilen numune bulguları incelendiğinde ise çatlak genişliğini azaltmada en iyi performansın %1.0 PLY ilaveli numunede ortaya çıktığı görülmektedir. %0.5, %1.0 ve %1.5 KPF katkılı numunelerin bulguları incelendiğinde ortalama çatlak genişliğini azaltmada en iyi performansı %1.5 KPF ilave edilen numunede ortaya çıktığı görülmektedir. Yazıcı ve Sezer [68] yaptıkları çalışmada lif ilave edilen betonların makro çatlak oluşturan darbe

miktarını olumlu etkilediğini buna karşın ultra ses geçiş hızını düşürdüğünü belirtmişlerdir. Bulunan bu sonuçlar tez çalışmamızda elde edilen sonuçları destekler niteliktedir.



Şekil 8.21 Katkılı beton numunelerin ortalama çatlak uzunluğu grafiği

Şekil 8.21 de verilen grafikteki bulgular incelendiğinde %0.5 katkı ilave edilen numunelerde ortalama çatlak uzunluğu PET ilavesinde 0.36 cm, PLY ilavesinde 0.53 cm ve KPF ilavesinde 2.15 cm ölçülmüştür. Buna göre en iyi performansı %0.5 PET ilave edilen numunelerde olduğu görülmektedir. %1.0 katkılı numunelerin grafik bulgularına bakıldığında ise ortalama çatlak uzunluğu PET ilavesinde 7.5 cm, PLY ilavesinde 0.41 cm, KPF ilavesinde ise 6.42 cm olarak ölçülmüştür. %1.0 katkılı numune bulguları karşılaştırıldığında ortalama çatlak uzunluğunu azaltmada en iyi performansın %1.0 PLY katkılı numunede ortaya çıktığı görülmektedir. Grafikte %1.5 katkılı numunelerin verileri incelendiğinde PET ilave edilen numunede ortalama çatlak uzunluğu 1.07 cm, PLY ilavesinde ortalama çatlak uzunluğu 0.93 cm, KPF ilave edilen numunede ise ortalama çatlak uzunluğu 0.99 cm olarak ölçülmüştür. Buna göre %1.5 katkı ilave edilen numunelerde ortalama çatlak uzunluğunu azaltmada en iyi performansı %1.5 PLY ilave edilen numunede ortaya çıktığı görülmektedir. Ayrıca %0.5-%1.0 ve %1.5 PET ilave edilen numune bulguları incelendiğinde çatlak uzunluğunu azaltmada en iyi performansın %0.5 PET ilave edilen numunede ortaya çıktığı görülmektedir. %0.5, %1.0 ve %1.5 PLY ilave edilen numune bulguları incelendiğinde ise çatlak genişliğini azaltmada en iyi performansın %1.0 PLY ilaveli numunede ortaya çıktığı görülmektedir. %0.5, %1.0 ve %1.5 KPF katkılı numunelerin bulguları incelendiğinde ortalama çatlak uzunluğunu

azaltmada en iyi performansı %1.5 KPF ilave edilen numunede ortaya çıktığı görülmektedir.

Ayrıca betona PLY ilave edilmesinin ortalama çatlak uzunluğunu azaltmada PET ve KPF ilavesine göre daha iyi performans sağladığı görülmektedir. Xu, Hao ve Li [69] yaptıkları çalışmada lif içeren beton numunelerin dinamik yüklemeler altında çatlak artışını azaltmada şahit betonlara göre daha başarılı sonuçlar gösterdiğini belirtmişlerdir. Elde ettikleri bu sonuçlar bu tez çalışmasındaki sonuçlar ile örtüşmektedir.



9. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında öğütülmüş PET, PLY ve KPF ilave edilen beton numunelerin mekanik özellikleri ve görüntü işleme tekniği ile kırık-çatlak değerlendirmeleri yapılmıştır. Bu amaçla şahit numune, %0.5, %1.0 ve %1.5 PET, PLY ve KPF katkılı küp ve prizmatik kırış numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler ultrases hızı, Schmidt çekici, basınç, eğilmede çekme ve aletli ağırlık düşürme testlerine tabi tutulmuş ve betona katkı ikame edilmesinin basınç ve çekme dayanımına etkisi ile katkılı betonun dinamik yükler altındaki mekanik özellikleri araştırılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen verilerden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- ✓ Ultrases geçiş hızı deneyi bulguları incelendiğinde şahit beton numunelerine göre katkılı beton numunelerin ultrases geçiş hızları daha düşük olduğu belirlenmiştir. PET katkılı numunelerde en yüksek hız %0.5 katkılı numunede (4.56 km/s) tespit edilmiş, PET katkı oranının artırılmasıyla geçiş hızlarının düştüğü tespit edilmiştir. PLY katkılı beton numunelerde en yüksek hız %1.0 PLY katkılı numunede (4.62 km/s) belirlenmiştir. KPF katkılı beton numunelerde KPF katkı oranının artışıyla paralel bir şekilde geçiş hızının arttığı belirlenmiştir. KPF katkılı numunelerde en yüksek hız %1.5 KPF katkılı numunede (4.56 km/s) Genel olarak da bütün numunelerde ultrases geçiş hızlarının birbirine yakın değerler olduğu görülmüştür. Katkılı beton numunelerin ultrases geçiş hızlarının şahit numuneye oranla daha düşük olması kullanılan katkı malzemesinin yoğunluğunun betonun yoğunluğundan daha düşük olması ve katkı ilavesinin betonun işlenebilirliğini azaltması sonucu oluştuğu tahmin edilmektedir.
- ✓ Schmidt çekici deneyi bulguları incelendiğinde şahit numuneye kıyaslandığında PET katkılı tüm numunelerde geri sıçrama değeri (R değeri) daha düşük çıkmıştır. PET katkılı en numunelerde yüksek geri sıçrama değeri %1.0 PET katkılı numunede (18.20) belirlenmiştir. PLY katkılı beton numunelerin sonuçları incelendiğinde %0.5 PLY katkılı numune değeri şahit numune değerinden daha düşük çıktığı, ancak %1.0 PLY ve %1.5 PLY katkılı numunelerin değerleri şahit numune değerinden daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. PLY numunelerde en yüksek değer ise %1.0 PLY katkılı numunede geri sıçrama değeri (22.70) elde

edilmiştir. KPF katkılı numunelerin sonuçları incelendiğinde ise tüm KPF katkılı numunelerde geri sıçrama değerleri şahit numune dayanım değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. KPF katkılı numunelerin en yüksek geri sıçrama değeri ise % 0.5 KPF katkılı numunede (23.20) elde edilmiştir.

- ✓ Basınç deneyi bulgularına göre PET katkılı beton numunelerin basınç dayanımları şahit numuneye göre daha düşük çıktığı, PET katkılı oranının artışına paralel olarak basınç dayanımının düştüğü belirlenmiştir. PLY katkı beton numunelerde %0.5 PLY katkılı numunede basınç dayanımı şahit numuneden yüksek çıktığı, PLY katkı oranının artırılması ile basınç dayanımının belirgin olarak düştüğü belirlenmiştir. KPF katkılı numunelerde en yüksek basınç dayanımı %0.5 katkılı numunede tespit edilmiş ve lif oranının artışıyla basınç dayanımı da belirgin olarak düştüğü, KPF katkılı tüm numunelerde basınç dayanımı şahit numuneden daha düşük çıktığı belirlenmiştir. Genel olarak numunelerin basınç dayanımlarının şahit numuneye oranla düşük çıkmasının kullanılan katkı malzemelerinin basınç dayanımlarının düşüklüğünden kaynaklandığı tahmin edilmektedir.
- ✓ Prizmatik kırış numunelerde yapılan eğilmede çekme deneyi bulguları incelendiğinde PET katkılı numunelerin tümünde eğilme dayanımları şahit numune dayanımından daha düşük çıkmıştır. PET katkılı numunelerin en yüksek dayanım değeri ise % 1.5 PET katkılı numunede (6.35 MPa) olarak belirlenmiştir. PLY katkılı numunelerin sonuçları incelendiğinde betona artan oranda PLY katkısının betonun eğilme dayanımını artırdığı belirlenmiştir. PLY katkılı numunelerin en yüksek dayanımı ise %1.5 PLY katkılı numunede (6.69 MPa) tespit edilmiş ve bu değer şahit numunenin eğilme değerinden biraz yüksek bir değerdir. KPF katkılı numunelerin eğilme deneyi bulguları incelendiğinde artan oranda KPF katkısına paralel bir şekilde eğilme dayanımında artış belirlenmiştir. Ayrıca %0.5 KPF katkılı numunenin eğilme dayanımı şahit numuneye yakın çıkmış, %1.0 ve %1.5 KPF katkılı numunelerin eğilme dayanımları şahit numune eğilme dayanımından daha yüksek çıkmıştır. En yüksek dayanım ise %1.5 KPF katkılı numunede (6.78 MPa) belirlenmiştir.
- ✓ Küp numuneler aletli ağırlık deneyi ile noktasal bir yük ile zorlanmış ve elde edilen sonuçlarına göre kuvvetin zamanla değişimi grafiği incelendiğinde PET katkılı numunelerde maksimum kuvvet değeri 40.156 kN'luk değer ile %15 PET katkılı

numunede ölçülmüştür. PLY katkılı numunelerde ise maksimum kuvvet değeri 45.888 kN olarak %1.0 PLY katkılı numunede ölçülmüştür. KPF katkılı beton numunelerde maksimum kuvvet değeri ise 42.028 kN olarak %0.5 KPF katkılı numunede ölçülmüştür. PET, PLY ve KPF katkılı beton numunelerin kuvvet değerleri karşılaştırıldığında en iyi sonucun %1.0 PLY katkılı beton numune olduğu belirlenmiştir. Ayrıca PLY ve KPF katkılı betonlarda kuvvetin zamanla değişim grafiğinde tepe noktasına ulaşıldıktan sonra kuvvet eğrisi yavaş bir şekilde sıfıra yaklaşırken bu eğri şahit betonda ani bir şekilde sıfıra yaklaşmaktadır.

- ✓ Aletli ağırlık deneyinde enerjinin zamanla değişimi grafiği incelendiğinde şahit numunede maksimum enerji değeri şahit numunede 99.829 joul, PET katkılı numunelerde maksimum enerji değeri %1.5 PET katkılı numunede 117.499 joul olarak ölçülmüştür. PLY katkılı numunelerde maksimum enerji değeri %1.0 PLY katkılı numunede ve 117.483 joul, KPF katkılı numunelerde maksimum enerji değerlerinin %0.5 KPF katkılı numunede 117.209 joul, %1.0 KPF katkılı numunede 117.335 joul ve %1.5 KPF katkılı numunede 117.338 joul gibi bir birine çok yakın değerler aldığı belirlenmiştir. Ayrıca katkılı tüm numunelerin maksimum enerji değerlerinin şahit numune enerji değerlerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum betona PET, PLY ve KPF katkılı betonun enerji sönümlleme oranını artırdığı şeklinde değerlendirilmiştir.
- ✓ Aletli ağırlık düşürme deney sonuçlarına göre betona PLY ve KPF liflerinin ilavesinin betonun ani bir şekilde kırılmasını önlediği belirlenmiştir. Ancak PET kırıkları lifli yapıda olmadığından ani kırılmayı önleyemediği belirlenmiştir.
- ✓ Aletli ağırlık düşürme deneyine tabi tutulan numunelerin yapılan makro yapı incelemesinden Şahit numune ve PET katkılı numunelerin uygulanan noktasal yüke dayanamayıp parçalandığı ve kırılmanın daha çok agrega-çimento ara yüzünde meydana geldiği ve çok az miktarda da agreganın kırıldığı belirlenmiştir. PLY ve KPF katkılı numunelerin yapılan makro yapı incelemesinde PLY ve KPF liflerinin uygulanan noktasal darbe yükü altında krater derinliği ve çatlak genişliğini şahit numuneye oranla azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca PLY ve KPF katkılı betonlarda gözle görülebilen makro çatlakların beton matrisi içinde düzensiz bir şekilde dağıldığı belirlenmiştir.
- ✓ Aletli ağırlık düşürme deneyine tabi tutulan numunelerin yapılan ince kesit incelemesinden PET katkılı beton numunelerde çatlak alanı, çatlak genişliği çatlak

uzunluğu ve çatlak çapı oranlarını azaltmada en başarılı sonuçları %0.5 PET katkılı beton numunelerde belirlenmiştir. PLY katkılı numunelerde %0.5 ve %1.5 PLY katkılı numuneler ile karşılaştırıldığında çatlak alanı, çapı, uzunluğu ve genişliğini azaltmada en başarılı sonucu %1.0 PLY katkılı numunelerde ortaya çıktığı belirlenmiştir. KPF katkılı numunelerde çatlak alanı, çapı, uzunluğu ve genişliğini azaltmada en başarılı sonucu %1.5 KPF katkılı numunede ortaya çıktığı belirlenmiştir. Ayrıca PET, PLY ve BR sonuçları karşılaştırıldığında çatlak alanı, çapı, uzunluğu ve genişliğini azaltmada en başarılı sonuçları PLY katkılı numunenin verdiği belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında öğütölmüş PET katkısının dinamik yüklere maruz numunelerin ani kırılmasını önleyemediğı bu nedenle dinamik yüklere maruz yapılarda kullanılmasının ani kırılmasını önlemekte etkili olamayacağı buna karşın PLY ve KPF liflerinin kullanılmasının dinamik yüklere maruz yapılarda ani kırılmaları önlenmesi açısından kullanılmasının faydalı olacağı sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada üç farklı katkı oranı (%0.5, %1.0 ve %1.5) ve üç farklı katkı (PET, PLY, KPF) kullanılmıştır. Farklı katkı oranları kullanılarak yapılacak deneysel çalışmalardan elde edilecek farklı verilerin literatüre katkı sağlayacağı önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] B. Baradan, H. Yazıcı, S. Aydın, Beton, İzmir: Dokuz Eylül Ün. Müh. Fak. Yayınları, 2015.
- [2] O. Şimşek, Beton ve Beton Teknolojisi, Ankara: Seçkin, 2012.
- [3] ASTM D8-11. Standart terminology relating to materials for roads and pavements. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Philadelphia, PA . 1999.
- [4] TS 706 EN 12620 A1, Beton agregaları. TSE , Bakanlıklar, Ankara. 2009.
- [5] A.M. Neville, J.J. Brooks, Concrete Technology, Second edition England: 2010.
- [6] T. Y. Erdoğan, Beton, Ankara : METU Press, 2003.
- [7] M. Demiralp, A. Beycioğlu, F. Köksal, H. O. Anadut, H. Ürünveren, ‘‘ Çelik Lifli Betonlarda Agregat Tipinin Kırılma Enerjisine Etkisi’’, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(1), ss. 207-218, Mart 2021.
- [8] S. Akçaözoğlu, ‘‘ Atık Pet Şişe Kırıklarının Hafif Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliği’’, Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2008.
- [9] O. Günaydın, K. Güçlüer, ‘‘Bazalt Lifi Katkılı Betonların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması’’, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt: 5, No: 2, ss. 416-424, 2018.
- [10] M. G. Muktedir, M. I. F. Alam, A. Rahman, M. R. Haque, ‘‘Comparison of compressive strength and flexural capacity between engineered cementitious composites (bendable concrete) and conventional concrete used in bangladesh’’, Journal Of materials And Engineering Structur, Cilt: 7, ss. 72-73, 2020.
- [11] Y. Sandeep, B. Ambika, ‘‘ Experimental Investigation on Bendable Concrete’’, International Research Journal of Engineering and Technology, Cilt: 06, Sayı: 12, ss 1308-1310, 2019.
- [12] O. Ünal, T. Uygunoğlu, O. Gençel, ‘‘Çelik liflerin beton basınç ve eğilme özelliklerine etkisi’’, Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt: 13, Sayı: 1, ss. 23-30, 2007.
- [13] F. Çivici, E. Güngör, ‘‘Karma lifli betonların tokluk açısından

- değerlendirilmesi’’, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt: 7, Sayı: 3, ss. 365-376, 2016.
- [14] G. Erdoğan, “Bazalt Lif Katkılı Betonların Mekanik ve Geçirimlilik Özelliklerinin Araştırılması’’, Yüksek lisans tezi, Yıldız teknik Üniversitesi, İstanbul, 2014.
- [15] E. Arslan, H. Sarıkaya, “Farklı Boyutlardaki Poliamid, Poliester ve Jüt Liflerin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi’’, Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi, Cilt: 5, Sayı: 1, ss. 30 - 49, 2021.
- [16] S. Aslan, “Cam Lif Takviyesinin Beton Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi’’, Yüksek Lisans Tezi, Avrasya Üniversitesi, 2020.
- [17] F. A. Öncel, “Çelik ve Polipropilen Lif İlavesinin Betonun Davranışına Etkisi: Statik Ve Dinamik Değerlendirme’’, Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman Üniversitesi, Adıyaman, 2021.
- [18] A. O. Atahan, A. Ö. Yücel, “ Crumb rubber in concrete: Static and dynamic evaluation’’, Construction and Building Materials Cilt: 36, ss. 617-622, November 2012.
- [19] Y. Mohammadi , R. Carkon-Azad, S.P. Singh, S.K. Kaushik, “Impact resistance of steel fibrous concrete containing fibres of mixed aspect ratio’’, Construction and Building Materials, Cilt: 23, Sayı: 1, ss. 183-189, January 2009.
- [20] K. Marar, Ö. Eren, T. Çelik, “Relationship between impact energy and compression toughness energy of high-strength fiber-reinforced concrete’’, Materials Letters, Cilt: 47, Sayı: 4–5, ss. 297-304, February 2001.
- [21] M. M. Al-Tayeb, B.H. Ebu Bekir, H. İsmail, H. Md. Akil, “Effect of partial replacement of sand by recycled fine crumb rubber on the performance of hybrid rubberized-normal concrete under impact load: experiment and simulation’’, Journal of Cleaner Production, Cilt: 59, ss. 284-289, November 2013.
- [22] A. A. E. Aliabdo, A. E. MohamedAbd_Elmoaty, M. Hamdy, “ Effect of internal short fibers, steel reinforcement, and surface layer on impact and penetration resistance of concrete’’, Alexandria Engineering Journal, Cilt: 52, Sayı: 3, ss. 407-417, September 2013.
- [23] K. Akçaözöğlü, “Microstructural examination of concrete exposed to elevated

- temperature by using plane polarized transmitted light method”, Construction and Building Materials, Cilt: 48, ss. 772-779, November 2013.
- [24] K. Akçaözöglü, M. Fener, S. Akçaözöglü, R. Öcal, “Microstructural examination of the effect of elevated temperature on the concrete containing clinoptilolite”, Construction and Building Materials, Cilt: 72, ss. 316-325, 15 December 2014.
- [25] M. Mahal, T. Blanksvärd, B. Täljsten, G. Sas, “Using digital image correlation to evaluate fatigue behavior of strengthened reinforced concrete beams”, Engineering Structures, Cilt: 105, ss. 277-288, 15 December 2015.
- [26] M. Pekgöz, O. Günaydın, K. Güçlüer, “ An Investigation Of Concrete Stress-Strain Behavior By The Image Analysis Method”, Journal of Construction, Cilt: 20 Sayı: 2, ss. 308-320, 2021.
- [27] M. H. Balav, “Farklı Yöntemlerle Sıkıştırılmış Betonların Petrografisinin Görüntü Analizi Yöntemi İle İncelenmesi”, Doktora tezi, Ankara Üniversitesi, 2021.
- [28] TS EN 934-2, Kimyasal katkılar – Beton, harç ve şerbet için- Bölün 2 Beton katkıları TSE , Ankara. Mart 2002.
- [29] S. T. Erdoğan, T. Y. Erdoğan, “Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişler”, Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu 2. Gün oturumu, Ankara, ss. 264-267, 2007.
- [30] E. Özdemir, “PÇ Ve Mineral Katkı Maddelerinin İkili, Üçlü Ve Dörtlü Kombinasyonlarını İçeren Harç Numunelerinin Bazı Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi, 2006.
- [31] B. Y. Pekmezci, H. N. Atahan, “Kimyasal ve Nano Katkılar: Betonda Kullanımı ve Beton Performansına Etkileri”, Hazır Beton Dergisi, Sayı: 123, ss. 69-70, 2014.
- [32] A. Öz, “Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Yerleşen Hibrid Lifli Betonların Bazı Özelliklerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, 2014.
- [33] M. Kozak, “Çelik Lifli Betonlar ve Kullanım Alanlarının Araştırılması”, Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi, Cilt: 3, Sayı: 5, ss. 26-35, 2013.
- [34] İ. B. Topçu, Beton Teknolojisi, Eskişehir: Uğur Ofset A.Ş., 2006.
- [35] S 10513, , “Çelik Teller – Beton Takviyesinde Kullanılan”, Türk Standardları

Enstitüsü, Ankara. 1992.

- [36] P. S. Song, S. Hwang, B.C. Sheu, “Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes”, Cement and Concrete Research, Cilt: 35 ss. 1546 – 1550, 2005.
- [37] M. Sarı, “Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi” , Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2013.
- [38] P. Soroushian, H. Elyamany, A. Tlili, K. Ostowari, “Mixed-mode fracture properties of concrete reinforced with low volume fractions of steel and polypropylene fibers”, Cement and Concrete Composites, Cilt: 20 Sayı: 1, ss. 67-78. 1998.
- [39] G.S. Ghodke, N.S. Daphal, Y.S. Bandgar, D. S. Gaddekar, S. A. Chavan, A. Waghule, “ Experimental Study Of Bendable Concrete By Using Admixture And Fiber” , International Journal For Technological Research In Engineering, Cilt: 4, Sayı: 9, ss. 1743-1744, 2017.
- [40] O. Karahan, C. D. Atış, “The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete”, Materials and Design, Cilt: 32, sayı: 2, ss. 1044-1049, 2011.
- [41] I. F. Al-Mulla, A. S. Al-Rihimy, M. S. Abd-Alameer,” Properties of engineered cementitious composite concrete (bendable concrete) produced using Portland limestone cement” 3rd International Conference on Engineering Sciences , Kerbala, Cilt: 671, No: 1, IOP Publishing, 2020.
- [42] C. Machhi, N. Parth, P. Akshay, N. Hardik, “Experimental Investigation On Engineered Cementitious Composite” International Research Journal of Engineering and Technology, Cilt: 06, Sayı: 04, ss. 88-89 , 2019.
- [43] V. C. Li, “ Can concrete be bendable?”, American Scientist, Cilt: 100, ss. 489, 2012.
- [44] A. A. Koç, “Betonun çekme dayanımı üzerine bir çalışma”, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, 2010.
- [45] C. Kanbak, “ Elastik zemine oturan çelik tellerle güçlendirilmiş betonarme plakların davranışı ve sayısal modelleme” Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2003.
- [46] İ. Sekban, “ Çelik lif katkısının tekrarlı yük etkisindeki geleneksel ve yüksek performanslı betonarme kolonların davranışlarına etkisinin incelenmesi”,

Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2007.

- [47] H. Wu,, J. Zhao, Z. Wang, ‘’ Study on micro-structure and durability of fiber concrete’’, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Cilt: 5, Sayı: 2, ss. 659-664, 2013.
- [48] F. Mili, B. Necib, ‘’Impact behavior of cross-ply laminated composite plates under low velocities’’, Composite Structures, Cilt: 51, Sayı: 3, ss. 237-244, March 2001.
- [49] M. Sayer, ‘’Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi’’, Doktora tezi, Pamukkale Üniversitesi, 2009.
- [50] ACI 544.2R-89, Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, 1999.
- [51] G. Çankaya, M. H. Arslan, M. Ceylan, ‘’Görüntü İşleme Ve Yapay Sinir Ağları Yöntemleri İle Betonun Basınç Dayanımının Belirlenmesi’’, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi, Cilt: 1, Sayı: 1, 2013.
- [52] S. Roux, F. Hild,’’ Digital image correlation and fracture: an advanced technique for estimating stress intensity factors of 2D and 3D cracks’’, Journal of Physics D: Applied Physics, Cilt: 42, sayı: 21, ss. 214004, 2009.
- [53] T. Yıldırım, K. T. Felekoğlu, E. Gödek , M. Keskinates, B. Felekoğlu, O. Önal, ‘’Çimento esaslı lifli kompozitlerin dijital görüntü korelasyonu yöntemi ile çoklu çatlak davranışının incelenmesi’’, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Dergisi, Cilt:34, Sayı: 1, ss. 479-493, 2019.
- [54] M. Topaloğlu, O. Günaydın, K. Güçlüer, ‘’ Kopolimer Fiber Katkılı Betonların Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi’’, International Conference on Global Practice of Multidisciplinary Scientific Studies, Cyprus, ss. 396-403, 2022,
- [55] TS 802, Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları, Ankara, Türk Standartları Enstitüsü, 2016.
- [56] Z. Zebari, İ. Bedirhanoğlu, M. Aydın, ‘’Beton basınç dayanımının ultrasonik ses dalgası yayılma hızı ile tahmin edilmesi’’, Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi, Cilt: 8, Sayı.1, ss. 43-52, 2017.
- [57] TS EN 12390-3, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2019.

- [58] TS EN 12390-5, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2019.
- [59] M. Gül, “Hafif Beton Agregası Olarak Atık Plastiklerin ve Pet’in Kullanımının Araştırılması”, Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, 2018.
- [60] M. E. Arslan, “Bazalt liflerin geleneksel betonların mekanik özellikleri ve kırılma enerjilerine etkilerinin incelenmesi”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt: 23, Sayı: 3, ss. 203-208, 2017.
- [61] M. Akgül, O. Doğan, S. Etli, " Farklı Çimento ile Üretilen Granül Atık Kauçuk Agregaların İkame Edilmiş Kendiliğinden Yerleşen Beton Harcının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, Cilt. 12, Sayı. 2, ss. 787-798, 2020.
- [62] M. F. Şahan, F.A. Öncel, İ. Ünsal, “Effect of fiber ratio on the impact behavior of polypropylene fiber reinforced samples”, Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics, Cilt: 4 Sayı. 4, ss. 239-248, 2021.
- [63] Z. Xu, H. Hao, H.N. Li, “Experimental Study Of Dynamic Compressive Properties Of Fibre Reinforced Concrete Material With Different Fibres”, Materials and Design Cilt: 33, ss. 42–55, 2012.
- [64] V. Koç, F. Birinci, “Lifli Betonda Boyut Etkisi Tokluk Ve Kırılma Enerjisi”, SDU International Technologic Science, Cilt: 4, No: 3, ss. 24-40, December 2012.
- [65] D.Y. Yoo, U. Gohil, T. Gries, Y.S. Yoon, “Comparative low-velocity impact response of textile-reinforced concrete and steel-fiber-reinforced concrete beams”, Journal of Composite Materials, Cilt: 50, Sayı: 17, ss. 2421-2431, 2015.
- [66] M. Pekgöz, “Görüntü İşleme Yöntemiyle Betonda Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışının Değerlendirmesi”, Yüksek lisans tezi, Adıyaman Üniversitesi, 2020.
- [67] C.D. Johnston, "Strength and deformation of concrete in uniaxial tension and compression", Magazine of Concrete Research, Cilt: 22, No: 70, 1970.
- [68] Ş. Yazıcı, G. İ. Sezer, "Çelik Lifli Betonların Darbe Direncine Agreg Maksimum Boyutunun Etkisi”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt. 14, Sayı: 3, ss. 234-245, 2008.

- [69] Z. Xu, H. Hao, H.N. Li, “Dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres”, *Materials & Design*, Cilt: 42, ss. 72-88, December 2012.

