

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**PLASTİK ATIKLARIN HARÇLARDA LİF OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Rawa Ahmed MAHMOOD

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2020

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**PLASTİK ATIKLARIN HARÇLARDA LİF OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Rawa Ahmed MAHMOOD

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2020

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLASTİK ATIKLARIN HARÇLARDA LİF OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü Birimi
tarafından FYL-2018-4287 nolu projeyle desteklenmiştir.

HAZİRAN 2020

ÖZET

PLASTİK ATIKLARIN HARÇLARDA LİF OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Rawa Ahmed MAHMOOD

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı

Danışman: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Mayıs 2020; 96 sayfa

Plastiklerin bünyelerinde çevreye zarar verecek kömür, gaz ve ham petrol gibi maddeler bulunmaktadır. Plastiklerin kullanıldıktan sonra doğaya atılmaları hem görüntü kirliliğe sebep olmakta hem de çevredeki canlıları ve toprağı olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun yanı sıra plastik atıkların, normal şartlarda doğaya karışması uzun seneler aldığı için plastik atıkların geri dönüşümü ve kullanımı literatür çalışmalarına konu olmuştur. Plastik atık malzemeler, inşaat sektöründe harç ve beton üretiminde de kullanılmaktadır.

Bu tez çalışması PVC atıklarının harç içerisinde lif olarak değerlendirilmesini ve bu atık malzemenin harç özellikleri üzerine olan etkisinin incelenmesini kapsamaktadır. Üretilmiş olan harçlarda, %0, %1, %2 ve %3 oranlarda toplam harcın, hacimce alınan PVC lif atıklar kullanılmıştır. Silis dumanı ve mikro silika puzolanik bağlayıcı olarak çimentoyla %0, %5, %10 ve %15 oranlarda ağırlıkça yer değiştirerek kullanılmıştır. Hazırlanan harçların taze ve sertleşmiş özellikleri incelenmiş ve PVC lif atıklarının harçlar üzerinde olan etkisi gözlemlenmiştir. Yayılma çapı ve taze halde birim hacim ağırlık tayini taze harçlar üzerinde, yığın yoğunluk, görünür boşluk oranı, su emme, kılcallık, basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı sertleşmiş harçlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda harçların gerilme-şekil değiştirme davranışları incelenerek, elastisite modülü, tokluk ve rezilyans değerleri tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELE: PVC plastik lif, fiziksel özellikler, mekanik özellikler, durabilite, silis dumanı, mikro silika.

JÜRİ: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Doç. Dr. Turhan BİLİR

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE USE OF PLASTIC WASTES AS A FIBER IN MORTARS

Rawa Ahmed MAHMOOD

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Prof.Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

May 2020; 96 pages

Plastics contain substances such as coal, gas and crude oil that have hazardous harmful effects on the environment. Accumulation of waste plastics in nature after using causes both visual pollution and negatively affects the living things and the soil in the environment. In addition, recycling and reusing of plastic wastes have been the subject of literature studies since plastic degradation in nature takes long years under normal conditions. Plastic waste materials are also used in the mortar and concrete production in the construction industry.

This thesis study covers the evaluation of PVC waste as fiber in the mortar and the effect of this waste material on the mortar properties. Waste PVC fibers were mixed in the mortar by 0%, 1%, 2% and 3% by volume of total mortar. Silica fume and micro silica were used as pozzolanic binders and replaced cement in varying proportions such as 0%, 5%, 10% and 15% by weight. Physical and mechanical properties of fresh and hardened mortars were examined. In the case of fresh properties flow table diameter and fresh unit weight tests were conducted on the specimen. for the determination of hardened properties the bulk density, water absorption, porosity, flexural strength, compressive strength and capillary water absorption tests were conducted. At the same time, the stress-strain behavior of the mortars were examined, and the modulus of elasticity, toughness and resistance values were determined based on the stress-strain curves.

KEYWORDS: Waste PVC plastic fiber, physical properties, mechanical properties, silica fume, micro silica.

COMMITTEE: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Asst. Prof. Dr. Turhan BİLİR

ÖNSÖZ

Benim için büyük bilim dünyası için küçücük olan bu adımda, tez çalışma sürecim boyunca beni bilgi ve birikimleriyle yönlendiren, hiçbir zaman yardımını esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL'a teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

Yanımda olamasalar da her zaman yanımda olduklarını hissettiren, varlıklarıyla bana güç veren sevgili annem ve babama ve her koşulda bana maddi ve manevi destek olan ağabeyim Bryar Ahmed'e gönülden teşekkür ederim.

Son olarak bu tez çalışmamı dünyanın neresinde olursa olsun, bilimin ışığını daha da parlatmaya çalışan, doğayı ve canlıları koruyan, kendini bilime ve öğrenmeye adanmış tüm insanlara atfediyorum.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	3
2.1. Çimento.....	3
2.2. Silis Dumanı ve Mikro Silika.....	5
2.3. Plastikler	6
2.3.1. Polietilen tereftalat (PET).....	7
2.3.2. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)	7
2.3.3. Düşük yoğunluklu polietilen (DYPE).....	7
2.3.4. Polyvinyl klorür (PVC)	8
2.3.5. Polipropilen (PP).....	8
2.3.6. Polistiren (PS).....	8
2.4. Atık Plastiklerin Çimentolu Karışımlarda Kullanılması.....	8
2.4.1. Atık plastik içeren çimentolu karışımların işlenebilirliği	11
2.4.2. Atık plastik içeren çimentolu karışımların basınç dayanımları	12
2.4.3. Atık plastik içeren çimentolu karışımların eğilme dayanımları.....	14
2.4.4. Atık plastik içeren çimentolu karışımların yarmada çekme dayanımları	15
2.4.5. Atık plastik içeren çimentolu karışımların elastisite modülleri	16
2.4.6. Atık plastik içeren çimentolu karışımların su emmeleri	17
2.4.7. Atık plastik içeren çimentolu karışımların donma-çözümleri	17
2.4.8. Atık plastik içeren çimentolu karışımların büzölmeleri	18
2.4.9. Atık plastik içeren çimentolu karışımların karbonatlaşmaları	18

3. MATERYAL VE METOT.....	19
3.1. Materyal	19
3.1.1. Bağlayıcı.....	19
3.1.2. Lif.....	20
3.1.3. Karışım suyu	21
3.1.4. Kimyasal katkı	21
3.1.5. Agregat	22
3.2. Metot.....	22
3.2.1. Agregat üzerinde yapılan deneyler.....	22
3.2.1.1. Agreganın özgül ağırlığı	22
3.2.1.2. Agreganın su emmesi.....	24
3.2.1.3. Agreganın birim hacim ağırlığı	24
3.2.1.4. Agreganın tane boyut dağılımı.....	25
3.2.2. Harç üretimi ve malzeme oranları.....	25
3.2.3. Taze harçlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler	29
3.2.3.1. Akma tablası deneyi.....	29
3.2.3.2. Taze harcın birim hacim ağırlık tayini.....	30
3.2.4. Sertleşmiş harçların fiziksel deneyleri	31
3.2.5. Sertleşmiş harçların mekanik deneyleri	32
3.2.5.1. Eğilmede çekme dayanımı deneyi.....	32
3.2.5.2. Basınç dayanımı deneyi	33
3.2.5.3. Gerime şekil değiştirme	34
3.2.5.4 Elastisite modülü tayini.....	34
3.2.6. Sertleşmiş harçların durabilite deneyleri.....	35
3.2.6.1. Kılcal geçirimsizlik deneyi.....	35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	36
4.1 Harç Bileşenlerin Fiziksel Deneyi Bulguları	36
4.1.1. Fiziksel özellikler	36
4.2. Harçların Taze Hal Deneyi Bulguları.....	37
4.3. Sertleşmiş Hal Deneyi Bulguları.....	42
4.3.1. Kuru yığın yoğunluk değerleri.....	42

4.3.2. SDKY yığın yoğunluk değerleri	46
4.3.3. Görünür boşluk değerleri.....	49
4.3.4. Su emme yüzdesi değerleri.....	52
4.3.5. Eğilmede çekme dayanımı değerleri.....	56
4.3.6. Basınç dayanımı değerleri	62
4.3.7. Gerilme-Şekil değiştirme davranışı.....	68
4.3.8. Elastisite modülü değerleri	81
4.3.9. Tokluk değerleri.....	83
4.3.10. Rezilyans değerleri.....	87
4.3.11. Kılcal su emme katsayısı değerleri	91
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	95
6. KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Plastik atıkların harçlarda lif olarak kullanılabilirliğinin araştırılması” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

26/06/2020

Rawa Ahmed MAHMOOD



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Suyu temas eden yüzeyin alanı (cm^2)
A	: Yükleme tablası mesnetler arasındaki açıklık (mm^2)
B	: Numunenin genişliği (mm)
H	: Numunenin yüksekliği (mm)
K	: Kılcal su emme katsayısı ($\text{cm/sn}^{1/2}$)
L	: Yükleme tablası mesnetler arasındaki açıklık (mm)
M ₁	: Kabın boş ağırlığı (kg)
m ₁	: Kabın ağırlığı (kg)
M ₂	: Kap + gevşek agrega ağırlığı (kg)
m ₂	: Kabın ve taze harcın ağırlığı (kg)
P	: Deneyi makinesinde kırılma anındaki en büyük yük (N)
P	: Maksimum yük (N)
Q	: Emilen su miktarı (cm^3)
t	: Zaman (sn)
V	: Kabın hacmi
V	: Kabın Hacmi (m^3)
ε_1	: 5×10^{-5} değerindeki birim şekil değiştirme miktarı
ε_2	: σ_2 değerindeki birim şekil değiştirme miktarı
ρ_m	: Taze harç birim hacim ağırlığı (kg/m^3)
σ	: Basınç dayanımı (MPa)
σ	: Eğilmede çekme dayanımı (Mpa)
σ_1	: 5×10^{-5} değerindeki birim şekil değiştirmesine denk gelen gerilme (MPa)
σ_2	: $(\sigma_{\max}) \times 0,4$ değerine eşit olan gerilme miktarı (MPa)

Bu tez çalışmasında, ondalık ayırıcı olarak “virgül (,)” kullanılmıştır.

Kısaltmalar

BHA	:Birim hacim ağırlık
DDPE	:Düşük yoğunluklu polietilen
GBO	:Görünür boşluk oranı
MS	:Mikro silika
PE	:Polietilen
PET	:Polietilen tereftalat
PP	:Polipropilen
PVA	:Polivinil alkol
PVC	:Polivinil klorür
SD	:Silis dumanı
SDKY	:Suya doygun kuru yüzey
TS EN	:Türk Standartları Enstitüsü
XRF	: X ışını floresans analizi
YYPE	:Yüksek yoğunluklu polietilen

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. 2016 yılında tüketici sonrası plastiklerin işlenmesi	10
Şekil 2.2. Çeşitli plastik atılar	11
Şekil 2.3. Plastik agregası içeren çimentolu karışımların slump değerleri	12
Şekil 2.4. Plastik agregası içeren çimentolu karışımların 28 günlük basınç dayanımları .	13
Şekil 2.5. Plastik lif içeren çimentolu karışımların 28 günlük basınç dayanımları	14
Şekil 2.6. Plastik agregası içeren çimentolu karışımların 28 günlük eğilmede çekme dayanımları	15
Şekil 2.7. Plastik agregası içeren çimentolu karışımların 28 günlük yarmada çekme dayanımları	16
Şekil 2.8. PVC plastik agregası içeren betonun günlük elastisite modülü değerleri.	17
Şekil 3.1. Kullanılan bağlayıcı çeşitleri	19
Şekil 3.2. Kullanılan atık plastik PVC liflerin optik mikroskop görüntüsü	21
Şekil 3.3. Kırma kum agregası	22
Şekil 3.4. (a) Le Chatelier Balonu; (b) Balon Joje	23
Şekil 3.5. Agregaların SDKY hale getirilme işlemi	23
Şekil 3.6. Nem ölçer cihazı	24
Şekil 3.7. Harç karışımların üretilmesinde kullanılan mikser	26
Şekil 3.8. Harçların kalıptan çıkarılması ve kür tankına konulması	26
Şekil 3.9. Akma tablası deneyi	30
Şekil 3.10. Taze harcın birim hacim ağırlık tayını	31
Şekil 3.11. Numunelerin etüve konulması	32
Şekil 3.12. Üç nokta eğilme deneyi düzeneği	33
Şekil 3.13. Basınç dayanımı tayininde kullanılan yükleme çerçevesi	33
Şekil 3.14. Universal test cihazı	34

Şekil 3.15. Kılcal su emme tayini deneyi düzeneği.....	35
Şekil 4.1. Kırma kum agregasının gradasyon eğrisi.....	37
Şekil 4.2. KN karışım serisinin taze haldeki birim hacim ağırlık değerleri.....	39
Şekil 4.3. MS karışım serisinin taze haldeki birim hacim ağırlık değerleri.....	40
Şekil 4.4. SD karışım serisinin taze haldeki birim hacim ağırlık değerleri	40
Şekil 4.5. KN karışım serisinin yayılma çapı değerleri	41
Şekil 4.6. MS karışım serisinin yayılma çapı değerleri	41
Şekil 4.7. SD karışım serisinin yayılma çapı değerleri.....	42
Şekil 4.8. KN karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri	44
Şekil 4.9. MS karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri	45
Şekil 4.10. SD karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri	45
Şekil 4.11. KN karışım serisinin SDKY yığın yoğunluk değerleri	47
Şekil 4.12. MS karışım serisinin SDKY yığın yoğunluk değerleri	48
Şekil 4.13. SD karışım serisinin SDKY yığın yoğunluk değerleri.....	48
Şekil 4.14. KN serisinin görünür boşluk değerleri (%)	51
Şekil 4.15. MS serisinin görünür boşluk değerleri (%)	51
Şekil 4.16. SD serisinin görünür boşluk değerleri (%).....	52
Şekil 4.17. KN karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri	54
Şekil 4.18. MS karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri	55
Şekil 4.19. SD karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri	55
Şekil 4.20. KN karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri.....	59
Şekil 4.21. MS karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri.....	59
Şekil 4.22. SD karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri	60
Şekil 4.23. Karışımların eğilme yükleri altında kırılma şekilleri	60

Şekil 4.24. Karışımların eğilme yükleri altında kırılma şekilleri	61
Şekil 4.25. Karışımların eğilme yükleri altında kırılma şekilleri	61
Şekil 4.26. SD5 karışımın eğilme yükleri altında kırılma şekilleri	62
Şekil 4.27. KN karışım serisinin basınç dayanımı değerleri.....	65
Şekil 4.28. MS karışım serisinin basınç dayanımı değerleri.....	65
Şekil 4.29. SD karışım serisinin basınç dayanımı değerleri	66
Şekil 4.30. Lif içeren bazı harçların basınç deneyi sonrası görünüşleri.....	66
Şekil 4.31. Basınç dayanımı ile kuru yığın yoğunluk arasındaki ilişki	67
Şekil 4.32. Basınç dayanımı ile kuru yığın yoğunluk arasındaki ilişki	67
Şekil 4.33. Basınç dayanımı ile kuru yığın yoğunluk arasındaki ilişki	68
Şekil 4.34. KN karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri	69
Şekil 4.35. KN karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri	70
Şekil 4.36. MS15 karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri	70
Şekil 4.37. MS15 karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri	71
Şekil 4.38. MS10 karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri	71
Şekil 4.39. MS10 karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri	72
Şekil 4.40. MS5 karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri	72
Şekil 4.41. MS5 karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri	73
Şekil 4.42. SD15 karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri	73

Şekil 4.43. SD15 karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri	74
Şekil 4.44. SD10 karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri	74
Şekil 4.45. SD10 karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri	75
Şekil 4.46. SD5 karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri	75
Şekil 4.47. SD5 karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri	76
Şekil 4.48. MS karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri toplu şekilde gösterimi	77
Şekil 4.49. MS karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri toplu şekilde gösterimi	78
Şekil 4.50. SD karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri toplu şekilde gösterimi	79
Şekil 4.51. SD karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri toplu şekilde gösterimi	80
Şekil 4.52. KN karışım serisinin elastisite modülü değerleri.....	82
Şekil 4.53. MS karışım serisinin elastisite modülü değerleri.....	82
Şekil 4.54. SD karışım serisinin elastisite modülü değerleri	83
Şekil 4.55. KN karışım serisinin eğilme tokluğu değerleri.....	84
Şekil 4.56. KN karışım serisinin basınç tokluğu değerleri	85
Şekil 4.57. MS karışım serisinin eğilme tokluğu değerleri.....	85
Şekil 4.58. MS karışım serisinin basınç tokluğu değerleri	86
Şekil 4.59. SD karışım serisinin eğilme tokluğu değerleri	86
Şekil 4.60. SD karışım serisinin basınç tokluğu değerleri	87
Şekil 4.61. KN karışım serisinin eğilme rezilyansı değerleri	88

Şekil 4.62. KN karışım serisinin basınç rezilyansı değerleri	88
Şekil 4.63. MS karışım serisinin eğilme rezilyansı değerleri	89
Şekil 4.64. MS karışım serisinin basınç rezilyansı değerleri	89
Şekil 4.65. SD karışım serisinin eğilme rezilyansı değerleri	90
Şekil 4.66. SD karışım serisinin basınç rezilyansı değerleri.....	90
Şekil 4.67. KN karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri	93
Şekil 4.68. MS karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri	93
Şekil 4.69. SD karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri.....	94



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Çimentoyu oluşturan oksitler ve miktarları (Erdoğan 2007).....	4
Çizelge 2.2. Çimentodaki ana bileşenlerin relatif özellikleri (Erdoğan 2007).....	5
Çizelge 2.3. ABD’de 2013’de plastik türü ve geri kazanım oranları (EPA 2015).....	10
Çizelge 3.1. XRF analizi sonucu bağlayıcıların kimyasal kompozisyonları (%).....	20
Çizelge 3.2. Kimyasal katkının teknik bilgileri.....	21
Çizelge 3.3. Üretilmiş olan karışımların bileşen miktarları (kg/m ³).....	29
Çizelge 4.1. Bileşenlerin özgül ağırlık değerleri.....	36
Çizelge 4.2. Karışımların taze haldeki BHA ve yayılma çapı değerleri.....	38
Çizelge 4.3. Karışımların kuru yığın yoğunluk değerleri (g/cm ³)	43
Çizelge 4.4. Karışımların SDKY yığın yoğunluk değerleri (g/cm ³).....	46
Çizelge 4.5. Karışımların görünür boşluk değerleri (%)	50
Çizelge 4.6. Karışımların su emme değerleri (%)	53
Çizelge 4.7. Karışımların eğilmede çekme dayanımı değerleri (MPa)	58
Çizelge 4.8. Karışımların basınç dayanımı değerleri (MPa).....	64
Çizelge 4.9. Karışımların kılcal su emme katsayısı değerleri (cm/sn ^{1/2}).....	92

1. GİRİŞ

Son yıllarda biyo-bozunur olmayan atık plastiklerin büyük miktarlarda çevreye atılması çevreye önemli ölçüde zarar vermiştir. Ayrıca bu plastik atıklar en tehlikeli kirlilik kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir (İsmail ve AL-hashmi 2008; Ligouri vd. 2014). Plastik atıkların kullanımı, sürdürülebilir katı atık yönetiminde önemli bir rol oynamaktadır. Plastik atık yönetimi, yenilenemeyen doğal kaynakların korunmasına yardımcı olmakta, çevre kirliliğini azaltmakta ve aynı zamanda enerji üretim süreçlerinin korunmasına ve geri dönüştürülmesine yardımcı olarak sağlamaktadır (Ghernouti vd. 2015). Atık plastiklerin yeniden kullanılarak veya geri dönüştürülmesiyle tehlikeli çevresel etkilerin azaltılması için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Atık plastikler, inşaat sektöründe çimentolu karışımların üretiminde agrega ikamesi (kaba veya ince) veya lif gibi yeni bir inşaat malzemesi olarak kullanılmıştır (Yang vd. 2015; Ghernouti vd. 2015).

Lif takviyeli çimentolu karışımlar, bağlayıcı olan çimento ya da çimento ile belli oranlarda çimentoyla yer değiştiren pozolanik malzemeler, agrega ve güçlendirici liflerden oluşmaktadır.

Çimentolu karışımların basınç dayanımı güçlüdür, ancak çekme yükleri altında düşük dayanım sergilemektedir. Çekme dayanımını geliştirmek ve arttırmak için çimentolu karışımlarda genellikle takviye çeliği kullanılmaktadır. Geleneksel çelik takviyenin yanı sıra, esas olarak çekme mukavemetini arttırmak için çimentolu karışımların özelliklerini geliştirmek için çeşitli lifler de kullanılmaktadır. Çimentolu karışımları güçlendirmek için kullanılabilecek temel olarak dört tip lif vardır: çelik lif, cam lif, doğal lif ve sentetik lif (Daniel vd. 2002).

Plastik lifler, mikro plastik lifler veya makro plastik lifler şeklinde olabilen sentetik liflerdir. Mikro plastik lifler, çapı 5 ile 100 µm arasında değişen ve uzunluğu 5-30 mm olan plastik lifler olarak tanımlanır (Nili ve Afroughsabet 2010). Bu mikro lifler, suyun aşırı buharlaşması nedeniyle yerleştirmeden sonraki ilk 24 saat boyunca taze betonun büzülmesinden kaynaklanan plastik büzülme çatlağını etkili bir şekilde kontrol edebilir (Soutsos vd. 2012). Bununla birlikte, Pelisser vd. (2010) ve ve Habib vd. (2013) tarafından bildirildiği gibi, sertleşmiş betonun özellikleri üzerinde belirgin etkileri yoktur. Naylon lifler gibi bazı mikro plastik liflerin betona iyi bir termal enerji depolaması sağlayabilmesi, betonun büzülmesini etkin bir şekilde kontrol edebilmesi ve aynı zamanda betonun gerilme mukavemetini ve dayanıklılığını önemli ölçüde geliştirmesi dikkat çekicidir (Ozger vd. 2013; Song vd. 2005; Spada vd. 2015).

Makro plastik lifler normal olarak 30-60 mm uzunluğa ve 0,6-1 mm² kesite sahiptir (Yin vd. 2015). Makro plastik lifler plastik büzülmeyi kontrol etmenin yanı sıra, kuruma büzülmesini kontrol etmek için de kullanılmaktadır (Chavooshi ve Madhoushi 2013; Pujdas vd. 2014). Kuruma büzülmesi, sertleşmiş betondan su moleküllerinin kaybı nedeniyle oluşur (Jafarifar vd. 2014). Kuruma büzülme çatlaklarını önlemek amacıyla takviye malzemesi olarak çelik kullanılır, ancak son yıllarda inşaat kolaylığı, daha az işçilik ve daha düşük maliyet nedeniyle yavaş yavaş makro plastik lifler kullanılmaya başlanmıştır (Yin vd. 2015). Makro plastik liflerin sağladığı bir diğer önemli avantaj, çatlama sonrası performanstır (Buratti vd. 2011). Gevrek düz betonun etkili bir çatlama sonrası sünekliği yoktur, ancak makro plastik lifler betonun çatlama sonrası davranışı

önemli ölçüde artırabilir, çünkü plastik lifler bir çatlak tutucu olarak davranır ve özünde kırılğan olan beton matrisini daha sünek ve daha iyi bir çatlama direncine sahip bir malzemeye dönüştürür. Bu nedenle, beton kırıldığında, lif varlığı sayesinde büyük bir çatlak yerine yoğun mikro çatlaklar meydana gelebilir (Brandt 2008). Makro plastik lifler prekast elemanlar ve püskürtme beton mayın tünellerinin yapımında giderek daha popüler hale gelmektedir (Peyvandi vd. 2013; Kaufmann vd. 2013).

Bu tez çalışmasında plastik PVC atıkları lif olarak farklı oranlarda hacimce harç üretiminde kullanılmıştır. Silis dumanı ve mikro silika çeşitli oranlarda çimentoyla ağırlıkça yer değiştirmiştir. Hazırlanan harçların taze ve sertleşmiş özellikleri incelenmiş ve PVC lif atıklarının harçlar üzerinde olan etkisi gözlemlenmiştir. Yayılma çapı ve taze halde birim hacim ağırlık tayini taze harçlar üzerinde, yığın yoğunluk, görünür boşluk oranı, su emme, kılcallık, basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı sertleşmiş harçlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada PVC lif atıklı harçların genel özellikleri ile PVC lif atıklarının harçları süneklik ve tokluk açısından hangi oranda ve mertebede etkilediği irdelenmiştir. Tokluk ve rezilyans değerleri basınç ve eğilmede çekme dayanımı deneyinde elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrileri kullanılarak bulunmuş ve sonuçlar tartışılmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

Çalışmada kullanılan bağlayıcılarla ilgili genel bilgilere ve atık plastiklerin çimentolu karışımlarda kullanılmasıyla ilgili önceki çalışmalara bu bölümde yer verilmiştir.

2.1. Çimento

Çimentosu, killi ve kalkerli¹ hammaddelerin uygun oranlarda ($\approx$ %20-%30 kil, %70- %80 kalker) karıştırılıp döner fırınlarda 1400 C° pişirilmesiyle oluşan klinkere az miktarda ($\approx$ %3-%6) alçıtaşı katılıp öğütülerek elde edilen suda erimeyip katılaşılan hidrolik bir bağlayıcıdır. Klinker üretimi için homojen bir karışım elde edilmelidir. Homojen bir karışım elde etmek için iki metot mevcuttur, kuru metot² ve yaş metot³. Ana malzeme yumuşaksa yaş metot, sert ise kuru metot kullanılması uygundur. Yaş metotlu karışımın kontrolü daha kolaydır. Ancak karışımın içerisinde %35 oranında su bulunduğu için, pişirme işlemi için daha çok enerji gerekmekte ve daha pahalı olmaktadır. Günümüzde bu yüzden daha çok kuru yöntemler tercih edilmektedir. Yaş metodun yakıt sarfiyatı, kuru metodun yaklaşık iki katı kadardır. Kuru metotta karışımın istenen homojenlikte yapılması güçtür (Erdoğan 2007). Oluşacak toz nedeniyle çevreye daha çok zarar verir, fakat yakıt tasarrufu sağlar. Homojen karışım, klinker üretimi için hammaddelerin pişirildiği, eğik olarak yerleştirilmiş içi boş bir silindir şeklinde olan döner fırına gönderilir. Yaklaşık %3-%4 eğime sahip çelik fırının içi ateş tuğlası ile kaplıdır. Kendi eksenini etrafında saatte 60-180 devir yapar. Fırınlarda yaş yöntemlerde 80-100 m, kuru yöntemde 40-50m uzunluğundadır. Fırın iç çapları 2-6 m arasındadır. Fırına girecek hammadde karışımı, fırının üst ucundan konmaktadır. Fırındaki sıcaklık fırının alt ucundan püskürtülen yakıtla sağlanır. Yakıt olarak fueloil ve doğalgaz kullanılabilir. Karışımlar fırına girdikten sonra kimyasal reaksiyonlar başlar. Önce, fırının üst kısmında 100 C° civarında hammaddelerde bulunan serbest su buharlaşır. 500-600 C° sıcaklıkta killi maddeler oksitlere ayrışır (Yalçın ve Gürü 2006). Hammaddelerin içerisinde bir miktar MgCO₃ (magnezyum karbonat) bulunduğu takdirde 600-700 C°'de bu madde ayrılarak MgO (magnezyum oksit) haline dönüşür, 900 C° civarında kalker taşı (CaCO₃) da içerisindeki CO₂'den kurtularak kireç (CaO) haline dönüşür. 900-1200 C° arasında kireç, silis ve alümin arasında kimyasal reaksiyonlar başlar. 1250-1280 C° arasında, oksitlerin eriyik haline dönüşmeye başlamasından sonra, 1280 C° ve daha yüksek sıcaklıklarda çimento bileşenleri meydana gelir. Kireç, alümin (Al₂O₃), demir oksit (Fe₂O₃) ve silis (SiO₂) bileşimli hammaddelerin uygun oranda karıştırılıp yüksek sıcaklıkta (1350-1450 C°) pişirilmeleri sonucunda elde edilen ürüne klinker denir (Erdoğan 2007; Yalçın ve Gürü 2006).

¹ Kalker, kireçtaşı dahil olmak üzere, içinde CaCO₃ bulunduran tüm bu karbonatlı kayaların genel ismidir. Karbonatlı kayalar arasında en yaygın olan ise kireçtaşıdır. Kireçtaşının en temel özelliği yüksek oranda kalsit içermesidir

² Kuru metotta kalker ve kil kuru öğütücülerde toz haline getirilir

³ Yaş metotta kil su havuzlarında bekletilir, kalkerle birlikte ıslak değirmenlerde öğütülür

Klinker, yaklaşık olarak 15-50 mm çapında, pürüzlü ve gözenekli yüzeye sahip, sert ve yuvarlak şekildedir. Karakteristik olarak, parlak ve yeşilimsi-koyu gri (veya gri-siyah) renktedir. 1 kg klinker üretmek için yaş sistem fırınlarında 1450-1650 Kcal enerji gerekirken, bu miktar kuru sistem fırınlarında 700-900 Kcal seviyesine düşmektedir (Yalçın ve Gürü 2006).

Klinker hava akımı olan döner soğutuculara gönderilir. Klinker suyla reaksiyon yapmaz ve bağlayıcı özelliği yoktur. Klinker ancak ince şekilde öğütüldükten sonra bağlayıcılık kazanır. Öğütülme işlemi esnasında klinkere bir miktar (%3-%6 oranında) Alçıtaşı (kalsiyum sülfat) katılır. Bunun nedeni; çimentonun katılaşmasında (prizinde) alçıtaşının geciktirici rol oynamasıdır. Alçıtaşı, çimentonun su ile birleşmesi sonucunda göstereceği hızlı katılaşmayı yavaşlatarak kontrol eder. Aksi halde, çimento çok hızlı katılaşır ve betonu rahatça yerine yerleştirme olanağı ortadan kalkar. Ayrıca bu çok hızlı katılaşma, çimentonun kimyasal reaksiyonları sonucunda bağlayıcı özellik sağlayan kalsiyum silikat-hidrat (C-S-H) ürünlerinin sağlıklı gelişmelerini önler. Alçıtaşı ve klinker birlikte çelik bilyelerle öğütülerek, boyutları 1-200 µm arasında olan çimento elde edilir. Çimento tanelerinin büyük çoğunluğu 20-30 µm çapındadır. Çizelge 2.1'de çimentoyu oluşturan oksitler ve miktarları verilmiştir (Erdoğan 2007; Yalçın ve Gürü 2006).

Çizelge 2.1. Çimentoyu oluşturan oksitler ve miktarları (Erdoğan 2007)

Genel İsmi	Oksit	Çimento Kimyasına Göre Sembolü	Miktarı (%)
Kireç	CaO	C	60 – 67
Silis	SiO ₂	S	17 – 25
Alümin	Al ₂ O ₃	A	3 – 8
Demir	Fe ₂ O ₃	F	0.5 – 6
Magnezi	MgO	M	0.1 – 4
Alkaliler	Na ₂ O + K ₂ O	N + K	0.2 – 1.3
Kükürt Anhidriti	SO ₃	S ⁻	1 – 3

Çimentonun ana bileşenlerinden dikalsiyum silikat ($C_2S=2CaO.SiO_2$), trikalsiyum alüminat ($C_3A=3CaO.Al_2O_3$), trikalsiyum silikat ($C_3S=3CaO.SiO_2$) ve tetrakalsiyum alüminoferrit ($C_4AF=4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) çimentonun çoğu özelliklerinin üzerinde etkin rol oynarlar.

Oksitlerin özellikleri, hidratasyon ısı ve hızları ve kimyasal dayanıklılıkları birbirinden farklıdır, bu da her birinin çimento üzerinde farklı etkiye sahip olduğu anlamına gelmektedir. Erken yaştaki çimento dayanımının gelişmesi C_3S tarafından sağlanırken, geç yaştaki dayanımdan C_2S sorumludur.

Çizelge 2.2. Çimentodaki ana bileşenlerin relatif özellikleri (Erdoğan 2007)

	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Reaksiyon Hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidratasyon Isısı	Orta	Az	Çok yüksek	Orta
Dayanıma katkısı:				
İlk günlerde	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Sonunda	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

2.2. Silis Dumanı ve Mikro Silika

Silis dumanı (SD), silisyum ve ferro-silisyum alaşımların üretim endüstrilerinin bir yan ürünüdür (Lewis vd. 2018; Williams ve Partheeban 2018); silis dumanı üretimi kuvarsın yüksek sıcaklıklarda indirgenmesi sırasında gerçekleşir. Yüksek saf kuvars, oksijeni ortadan kaldırmak için elektrik ark fırınlarında 2000 C sıcaklıklarda kömür, kok kömürü veya odun talaşı ile ısıtılır. Silikon monoksit buharı, kuvarsın alaşıma indirgenmesi üzerine salınır ve fırının tabanında toplanır. Duman, oksitlenerek fırının üst kısımlarında silikon oksit olan amorf silika mikro küreleri üreterek yoğunlaşır (Lewis vd. 2018).

Silis dumanı %85-%95 aralığında kristal olmayan silika içeren %75 silikon içeriğine sahip ultra ince bir tozdur (Siddique 2011; Imam vd. 2018). Silis dumanı beyaz veya gri renktedir. küresel şekilli çok ince parçacıklara sahip, parçacıkların %95'i 1 μm 'den daha küçüktür. Parçacıkların yüzey alanı 13,000 ile 30,000 m^2/kg arasında değişmektedir (Siddique 2011; Khan ve Siddique 2011; Siddique ve Chahal 2011). Silis dumanı partikülleri ortalama çimento partikülünden yaklaşık 100 kat daha küçüktür (Khan ve Siddique 2011).

Silis dumanının kimyasal kompozisyonu, ortalama %94,2 ile %85-%98,5 arasında silisyum oksit (SiO_2) içerir ve az miktarlarda demir, magnezyum ve alkali oksitler de bulunmaktadır. Silis dumanında SiO_2 bulunması puzolanik reaktivitesini ve çimentolu özelliklerini artırır, bu da betonda kullanım için uygun hale getirir (Mehta ve Ashish 2019).

Silis dumanının puzolanik ve fiziksel özellikleri, onu dünya çapında kabul edilebilir ek çimentolu malzeme haline getirmektedir. Oldukça reaktif amorf silislerin bulunması sayesinde, çimentolu malzemelerde bağlanma ve dayanım özellikleri geliştiren önemli bir hidratasyon ürünü olan CSH'yi oluşturmak için CH ile reaksiyona

girebilir. Küçük boyutlu silis dumanı parçacıkları sertleşmiş çimento matrisinin içinde bulunan gözenekleri doldurur, böylece sertleşmiş çimento hamurun dayanımını ve yoğunluğunu artırır (Yue vd. 2018).

2.3. Plastikler

Plastikler, geniş ve büyüyen bir uygulama aralığında kullanılan çok çeşitli, sentetik veya yarı sentetik malzemeleri tanımlamak için yaygın olarak kullanılan terimdir. Baktığınız her yerde plastik bulacaksınız. Hayatımızı daha temiz, daha kolay, daha güvenli ve daha eğlenceli hale getirmek için plastik ürünler kullanıyoruz. Giydiğimiz kıyafetlerde, içinde yaşadığımız evlerde ve seyahat ettiğimiz arabalarda plastik buluyoruz. Oynadığımız oyuncaklar, izlediğimiz televizyonlar, kullandığımız bilgisayarlar plastik içeriyor.

Plastikler, yüksek molekül ağırlıklı organik moleküllerden ya da polimerlerden oluşurlar. Organik moleküller ve polimerler, birbirine kimyasal olarak bağlı birimlerin yinelenmesiyle ortaya çıkan zincir yapılarıdır. Plastik, istenilen biçimi alabilen anlamına gelen yunanca "plastikos" sözcüğünden gelir. Plastiklerin başlıca özelliği, kolayca biçim değiştirmeleri ve kalıplama ya da haddeleme gibi işlemlerle çeşitli biçimlere sokulabilmeleridir. Hafif olmalarının yanında; paslanmaz ve korozyona uğramaz olmaları, yüksek ısı ve elektrik izolasyonu sağlamaları, kolay hasara uğramamaları, esnek ve yumuşak olmaları ve kolay şekil verilebilme gibi özellikler, plastikleri vazgeçilmez paketleme malzemesi yapmıştır. Dünyada üretilen petrolün %4'ü plastik üretiminde kullanılmaktadır (Pehlivan vd. 2004).

Plastikler iki gruba ayrılabilir:

- ☐ Temel zincir yapısı selüloz gibi bir doğal üründen türemiş olan yarı sentetik plastikler
- ☐ küçük birimlerden ya da monomerlerden kimyasal yolla yapılmış zincirleri içeren tam sentetik plastikler

birçok farklı plastik türü vardır ve bunlar iki ana polimer ailesine ayrılabilir

- ❖ **Isılsertleşir plastikler (termoset)**
- ❖ **Isılıyumuşar plastikler (termoplastik)**

Isılsertleşir plastikler ısıtıldıklarında çözünmez ve erimezler. Çapraz bağlantılarla serleştirilmişlerdir. Bunlar yeniden ısıtıldıklarında yumuşarlar ancak akışkan hale gelmezler. Bunlar reçinler gibi tekrar tekrar kullanılmazlar ancak yeniden üretim sürecine sokulabilirler.

- ☐ Fenolik reçineler
- ☐ Furan reçineleri
- ☐ Aminoplastlar
- ☐ Alkitler
- ☐ Doymamış asit poliestерleri

- ☐ Epoksi reçineler
- ☐ Poliüretanlar
- ☐ Silikonlar

Isıl yumuşar reçineler ise bir çok kez yumuşatılıp sertleştirilebilirler. ABD de üretilen plastiğin %80-90'nı bu tür plastikler oluşturmaktadır. Bunlar soğuduklarında biçimlenmiş olurlar.

- ❖ Düşük yoğunluklu polietilen (DYPE)
- ❖ Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)
- ❖ Polistirene (PS)
- ❖ Polypropylene (PP)
- ❖ Polyethylenetetrapthalate (PET veya PETE)
- ❖ Polivinilklorür (PVC)

2.3.1. Polietilen tereftalat (PET)

Polietilen tereftalat'ın erime sıcaklığı 250–265 °C arasındadır. PET kolay yanar ve kendiliğinden sönmez. Eriyerek akan kısmı yanar. Alevinin rengi berrak mavidir ve alevin ucu sarı renklidir. Yanma sonucunda siyah renkli bir duman çıkarır (Kaya 2005).

PET suda yüzebilir, açık veya hafif renklidir, yarı saydam özelliktedir. Yoğunluğu 1,37-1,41 g/cm³ arasında değişim göstermektedir. Orta sertlikte en çok kullanılan plastiklerdendir. PET, bazlara, zayıf asitlere ve çoğu çözücülere karşı dayanıklıdır. Bunun yanı sıra parlaklık, yüksek darbe dayanımı, sağlamlık ve sertlik gibi özellikleriyle de dikkat çekmektedir. Gaz geçirgenliği birçok plastiğe göre daha düşüktür (Kılıç ve Yüce 2014).

2.3.2. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)

Yüksek yoğunluklu polietilenin erime sıcaklığı 120oC'dir. YYPE'nin dayanabildiği kullanım sıcaklığı 100–110 °C arasında değişmektedir. Maksimum kristallik oranı %90'dır. Camsı geçiş sıcaklığı -110 °C'dir ve erime sıcaklığı 135 °C'dir (Kaya 2005). Yüksek yoğunluklu polietilenin yoğunluğu 0,96 g/cm³ den fazladır ve en yüksek yoğunluğu 1,0 g/cm³ tür. %75-95 kristal yapıya sahiptir. Her türlü kimyasala oda sıcaklığında dayanıklıdır. Rutubet alımları düşük oldukları için gıda malzemeleri için ambalaj olarak kullanılırlar. Çevreye, kırılmaya ve yüksek darbeye karşı dayanıklıdır (Hazer 1993).

2.3.3. Düşük yoğunluklu polietilen (DYPE)

Düşük yoğunluklu polietilenin erime sıcaklığı 110 °C'dir. DYPE'nin dayanabildiği kullanım sıcaklığı 125oC'dir. Maksimum kristallik oranı %65'dir. Camsı geçiş sıcaklığı -90 °C'dir ve erime sıcaklığı 115 °C'dir (Kaya 2005). Yaklaşık 0,91–0,94 g/cm³ yoğunluğa sahiptir. Elektrik, elektronik, yalıtkan malzeme ve zırat endüstrisinde

kullanılırlar. Kokusuz ve tatsız malzemelerdir. Fizyolojik olarak sakıncaları bulunmamaktadır. Rutubet geçirgenlikleri düşüktür. Oda sıcaklığında her türlü kimyasal malzemelere karşı dayanıklıdır (Hazer 1993).

2.3.4. Polyvinyl klorür (PVC)

PVC'nin erime sıcaklığı 115-140 °C arasında yer almaktadır. Dayanabildiği kullanım sıcaklığı 70 – 95 °C civarındadır. Maksimum kristallik oranı %10'dur. Camsı geçiş sıcaklığı 80 °C'dir. Yoğunluğu 1,32-1,42 g/cm³ arasında değişmektedir. Kokusu klor ve kuvvetli hidrokloriktir. Yanması zordur ve kendiliğinden sönerler. Yandığında alevi sarıdır ve alevin kenarları yeşildir (Kaya 2005). Sağlam, hafif, güçlü, yangına dayanıklı, mükemmel yalıtım özellikleri ve düşük su geçirgenliği olan bir malzemedir.

2.3.5. Polipropilen (PP)

Çevrenin kirliliğinin azaltılması ve ekonomiye kazandırılması gereken, endüstriyel ve ambalaj sektöründe yer alan ve bir süre sonra atık haline gelen plastiklerin başında gelen polimerlerden biri de polipropilendir (Yıldız ve Yıldız 2003).

Polipropilenin erime sıcaklığı 155–160 °C civarındadır. PP farklı monomerlerinin polimerizasyon ile homopolimer ve kopolimer olarak elde edilmektedir. Önemli özellikleri arasında elektriksel özelliklerinin mükemmel olması yer almaktadır ve su absorpsiyonu (su emme) neredeyse yoktur (Kaya 2005).

Polietilen ile genel olarak benzerlik gösteren Polipropilen, ucuz maliyeti ile de dikkat çekmektedir. Yoğunluğu 0,90 - 0,92 g/cm³ arasında değişmektedir (Kılıç ve Yüce 2014).

2.3.6. Polistiren (PS)

Polistirenin erime sıcaklığı 70–115 °C arasındadır, alevi portakal rengidir. Maksimum kullanılabilir sıcaklığı 70 °C'dir. Polistiren havada is yapar ve ağır bir isı vardır. Kendiliğinden sönmeyen ve kolay yanarlar. Eriyerek akan kısım çok hızlı yanarak hızlı bir şekilde söner (Kaya 2005).

Polistiren, sıvı stirenin polimerizasyonu sonucu oluşur ve asıl hammadde petrol ürünüdür. Yoğunluğu 1,03-1,06 g/cm³ civarındadır (Kılıç ve Yüce 2014).

2.4. Atık Plastiklerin Çimentolu Karışımlarda Kullanılması

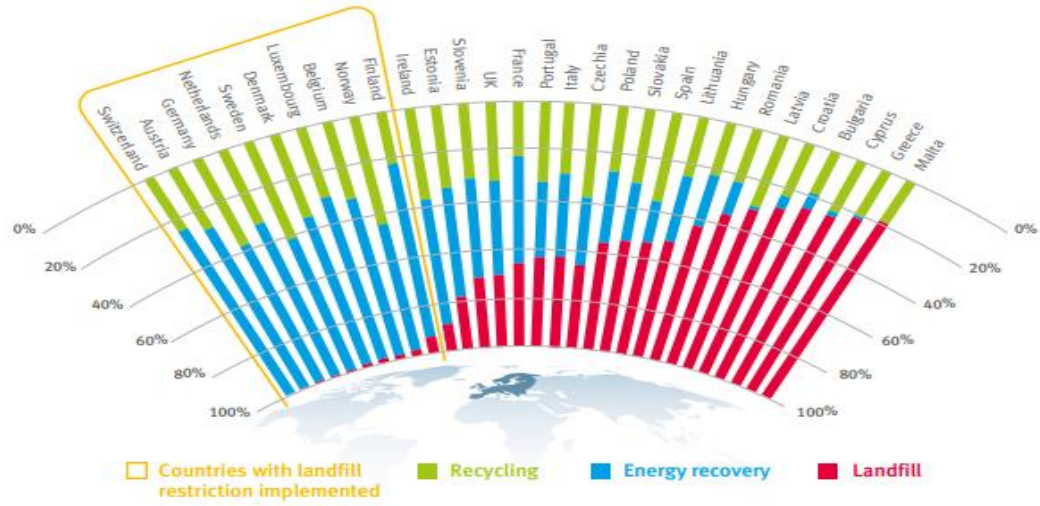
Çevre, günlük yaşamımızda kullanılan, paketlenen malzemeleri, su şişeleri, alışveriş ve çöp torbaları gibi çeşitli plastik atıklarla kirlenmektedir. Plastik malzemelere artan talep, muhtemelen düşük yoğunluk, yüksek mukavemet / ağırlık oranı ve yüksek dayanıklılık gibi plastiklerin avantajlı özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Lei Gu vd. 2016). Subramanian (2000) tarafından yapılan bir araştırmada, plastiklerin küçük olmasına rağmen, atık ürünlerin önemli bir parçası olduğu düşünülmektedir. Bu plastik atık malzemelerin biyodegradasyonu binlerce yıl sürebilir (Nampoothiri vd. 2010). Atık plastiklerin yakılması veya yasal olmayan depolama alanlarında depolanması ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Lei Gu vd. (2016) polivinil klorür (PVC) ve polikarbonat (PC) gibi bazı plastik atıkların zehirli bileşenler üretilip atmosfere salarak çevreyi kirlettiğini bildirmişlerdir. Avrupa'da 2016 yılında 27,1 milyon ton plastik

kullanılmış, bunun 8.42 milyon tonu geri dönüşümle sonuçlanmıştır (Plastics Europe 2016). Şekil 2.1'de gösterildiği gibi plastiklerin kullanıldıktan sonar 2016 yılında ilk kez plastiğin geri dönüşüm oranı plastiğin katı atık depolama sahasından gömme oranından daha yüksek olmuştur. Plastiğin % 31,1'i geri dönüştürülmüş, 41,6'sı geri kazanılmış enerji ve sadece % 27,3'ü katı atık depolama sahasında gömülürken, bu oran 2012'de geri dönüşüm için % 26,3 ve katı atık depolama sahası için %38,1 olmuştur (Plastics Europe 2016). 1960-2012 arasında plastiklerin ürettiği atıklar yaklaşık 80 kat artmış, ancak plastiklerin geri dönüşümü 1980'de %0,3'lük geri dönüşüm oranı ile başlamış, 2012'ye kadar bu oran %8,8'e yükselmiş, ancak yine de çevreyi korumak için yeterli orana ulaşmamıştır (Lei Gu et vd. 2016). Euromonitor International'ın küresel paketleme trendleri raporunda, 2016 yılında tüm dünyada 480 milyardan fazla plastik şişelerinin kullanıldığı rapor edilmiştir. 10 yıl öncesine göre plastik kullanımı, 300 milyar artmıştır. Bu miktarın 2021 yılına kadar 583.3 milyara çıkacağı tahmin edilmektedir.

Çizelge 2.3'de ABD'de 2013 yılında belediye ait katı atıklarındaki plastik türleri ve miktarlarının bir listesi verilmiştir (EPA 2015). Çizelgede, birçok plastik türü ve geri kazanım oranları listelenmiştir. Toplamda 32,5 milyon ton plastik üretilmiş ve % 9,2'lik payı olan 3000 milyon ton geri dönüştürülürken, 2012 yılında üretilen toplam plastik 31,7 milyon ve bunun % 8,8'i geri dönüşümle sonuçlanmıştır.

Doğal kaynaklar sınırsız değildir ve uygun kullanılmaması sonucunda tükenmesi yakındır. Kaynak israfının önlenmesi açısından, artan hayat standartlarına uyum sağlama çabası sonucunda toplumdaki enerjiye olan ihtiyacın artması neticesinde, enerji maliyeti artmaktadır. Dolayısı ile kaynakların etkin bir şekilde kullanımı ve çevrenin korunması açısından atıkların geri kazanılması oldukça önemlidir. Atık plastiklerin yeniden kullanılarak veya geri dönüştürülmesiyle tehlikeli çevresel etkilerin azaltılması için çalışmalar yapılmıştır. Atık plastikler, inşaat sektöründe çimentolu karışımların üretiminde agrega ikamesi (kaba veya ince) veya lif gibi yeni bir inşaat malzemesi olarak kullanılmıştır (Yang vd. 2015; Ghernouti vd. 2015).

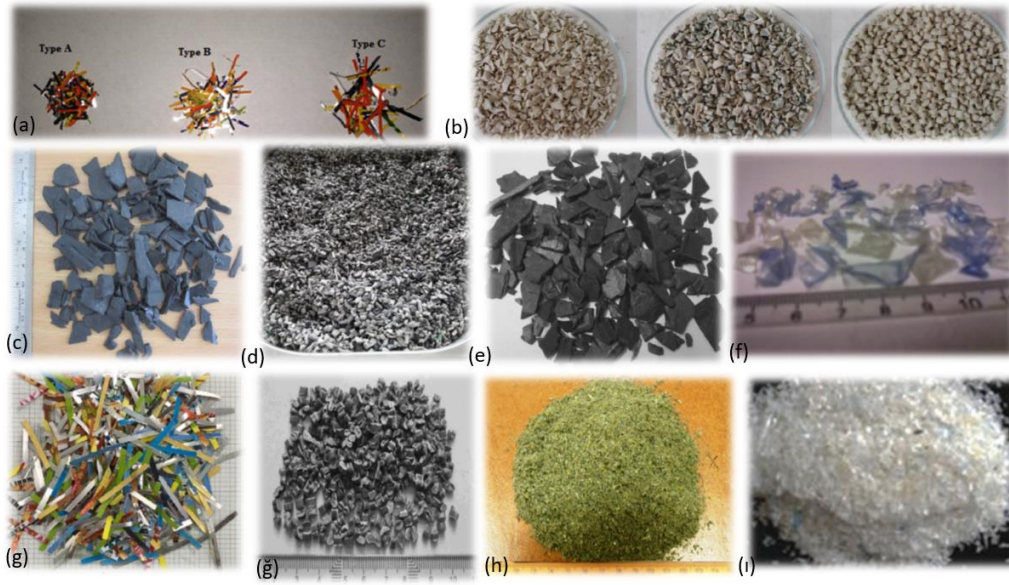
Çekme dayanımı, düşük enerji emilimi ve düşük çatlama direnci gibi çimentolu karışımların mekanik özellikleri liflerin kullanımıyla artırılabilir. Son yıllarda çimento bazlı karışımların üretiminde lif takviyesi olarak polietilen tereftalat (PET), polivinil klorür (PVC), polipropilen (PP) ve diğerleri gibi birçok farklı atık plastik lif kullanılmıştır. Plastik liflerin tipi ve uzunluğu, çimentolu malzemelerin deformasyon davranışını etkileyen ana faktörlerden biridir. Bir çalışmada, uzun liflerin çatlak genişliğini daha kısa olanlardan daha iyi azalttığı, deforme olmuş liflerin düz olanlara göre daha iyi performans gösterdiği bildirilmiştir (Borg vd. 2016). Yapılan çalışmalarda farklı çeşitlerde atık plastikler kullanılmıştır. Polietilen tereftalat (PET) (Silva vd. 2013; Sadrmomtazi vd. 2016; Azhdarpour vd. 2016; Bhogayata ve Arora 2018; Saikia ve Brito 2014), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) (Pirzada vd. 2018; Badache vd. 2018), polipropilen (PP) (Ynag vd. 2015; Zaleska vd. 2018; Özbakkaloğlu vd. 2017), PET şişe lifleri (Won vd. 2010; Al-Hadithi ve Hilal 2016), polistiren (PS) (Wang ve Meyer 2012), e-plastik atığı (Kumar ve Baskar 2014; Manjunath 2016; Bulut ve Şahin 2017) ve Polyvinyl klorür (PVC) (Kou vd. 2009; Haghighatnejad vd. 2016) gibi atık plastikler literatür çalışmalarına konu olmuştur. Şekil 2.2'de farklı çalışmalarda kullanılan atık plastikler gösterilmiştir.



Şekil 2.1. 2016 yılında tüketici sonrası plastiklerin işlenmesi (Plastics Europe 2016)

Çizelge 2.3. ABD’de 2013’de plastik türü ve geri kazanım oranları (EPA 2015).

Plastik tipi	Üretim	Toparlanma		Atık
	1000 ton	1000 ton	% Üretim	1000 ton
PET	4680	930	19.9	3750
YYPE	5580	570	10.2	5010
PVC	900	-	-	900
DYPE/LDYPE	7460	470	6.3	6990
PLA	50	-	-	50
PP	7400	40	0.5	7360
PS	2270	30	1.3	2240
Diğer reçineler	4180	960	23	3220
Toplam	32520	3000	9.2	29520



Şekil 2.2. Çeşitli plastik atıklar : (a): parçalanmış metalize plastik lif (Bhogayata ve Arora 2017); (b): Polipropilen (Záleská vd. 2018); (c): yüksek çarpma dirençli polistiren (Kumar ve Baskar 2018); (d): elektronik plastik lif (Bulut ve Şahin 2017); (e): elektronik plastik lif (Kumar ve Baskar 2015); (f): PET agregası (Saikia ve Brito 2014); (g): metalize plastik lif (Mohammadhosseini vd. 2018); (ğ): polipropilen (Yang vd. 2015); (h): atık plastik kum (Iucolano vd. 2013); (i): PET agregası (Azhdarpour vd. 2016).

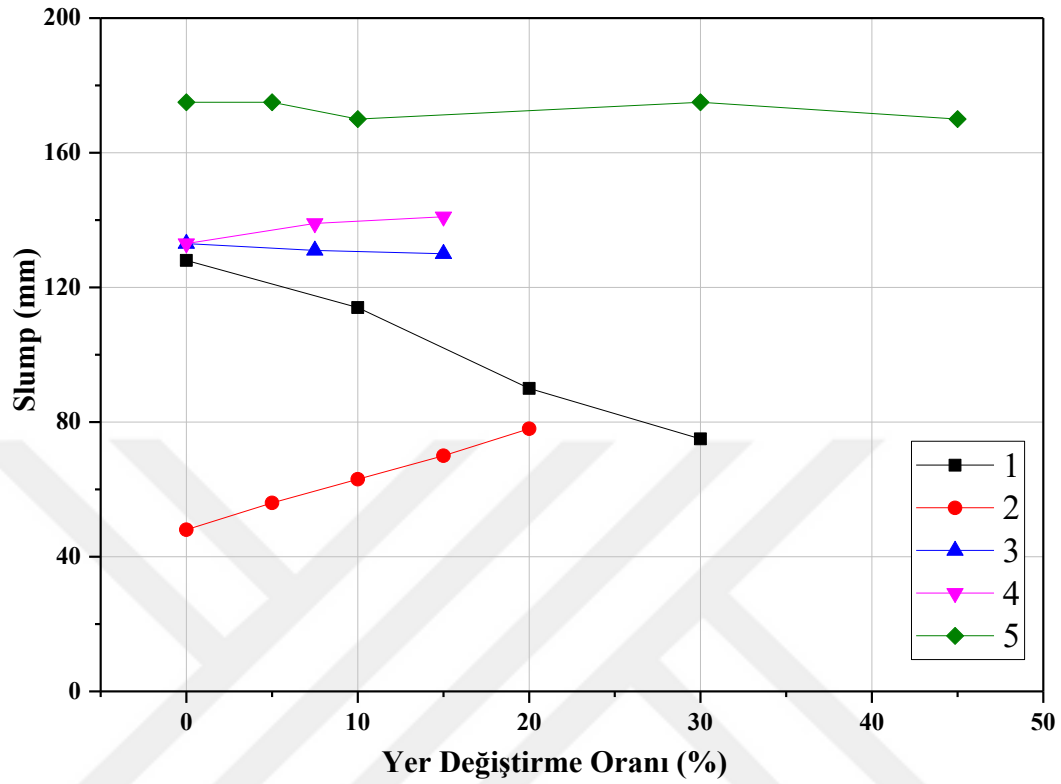
2.4.1. Atık plastik içeren çimentolu karışımların işlenebilirliği

Önceki çalışmalarda plastik atık kullanılarak üretilen çimentolu karışımların slump değerleri Şekil 2.3'te verilmiştir. Pirzada vd. (2018) PET, YYPE ve DYPE'den oluşan plastik atıkları ısıtılıp ısıtılmadan geçirildikten sonra doğal kaba agregası ikamesi olarak kullanmışlardır. plastikler %5 artacak şekilde %0-%20 oranında doğal agregayla yer değiştirmiştir. sonuçlar, plastik oranının artmasıyla işlenebilirliğin arttığı göstermiştir. Ancak süper akışkanlaştırıcı kullanmadan, plastik yüzdesinin artmasıyla işlenebilirliğin düştüğü rapor edilmiştir.

Rabehi vd. (2015) tarafından yapılan bir başka çalışmada, Plastik torba atık lifi (PTAL) ve Polipropilen lifleri (PF) içeren kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) taze özelliklerini incelemek için çökme testi gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, KYB'ye PTAL eklenmesinin, liflerin farklı uzunluk ve yüzdeleri için çökme değerlerinde iyileşme sağladığını ortaya koymaktadır, bu liflerin pürüzsüz yüzeyine atfedilebilir ve bu da beton akışını kolaylaştırır. PTAL 'nin 650 ila 800 mm arasındaki çökme akışı kriterini karşıladığı, ancak PF ilavesinin KYB'nin viskozitesini arttırdığı için çökme akışı kriterini karşılamadığı da bildirilmiştir.

Bhogayata ve Arora (2017), betonun işlenebilirliğini incelemek için polipropilenden (PP) yapılmış ve liflere parçalanmış metalize plastik atıkları (MPA) kullanmışlardır. 5 mm, 10 mm ve 20 mm uzunluğunda plastik lifler hazırlanmış ve bunlar, hacimce %0 ile %2 arasında bir oranda betonla karıştırılmıştır. Çökme testi sonuçları, artan plastik lif yüzdesi ve uzunluğu ile çökme değerlerinin azaldığını göstermektedir. 5 mm uzunluğunda lif kullanıldığında, %0,5 , %1, %1,5 ve %2 oranında lif içeren karışımlar için çökme değerleri sırasıyla %5, %8, %12 ve %16 oranında azalmıştır, bu

azalma daha uzun plastik lifler için daha yüksektir, çünkü uzun lifler homojen bir dağılım sağlayamaz karışım içinde ve ağ benzeri bir yapı oluşturur.



Şekil 2.3. Plastik agregaya içeren çimentolu karışımların slump değerleri: (1): e-plastik agregası (Manjunath 2016); (2): PET, YYPE, DYPE agregası (Ghernouti vd. 2015); (3), (4): PET agregası (Silva vd. 2013); (5): PVC afregası (Kou vd. 2009)

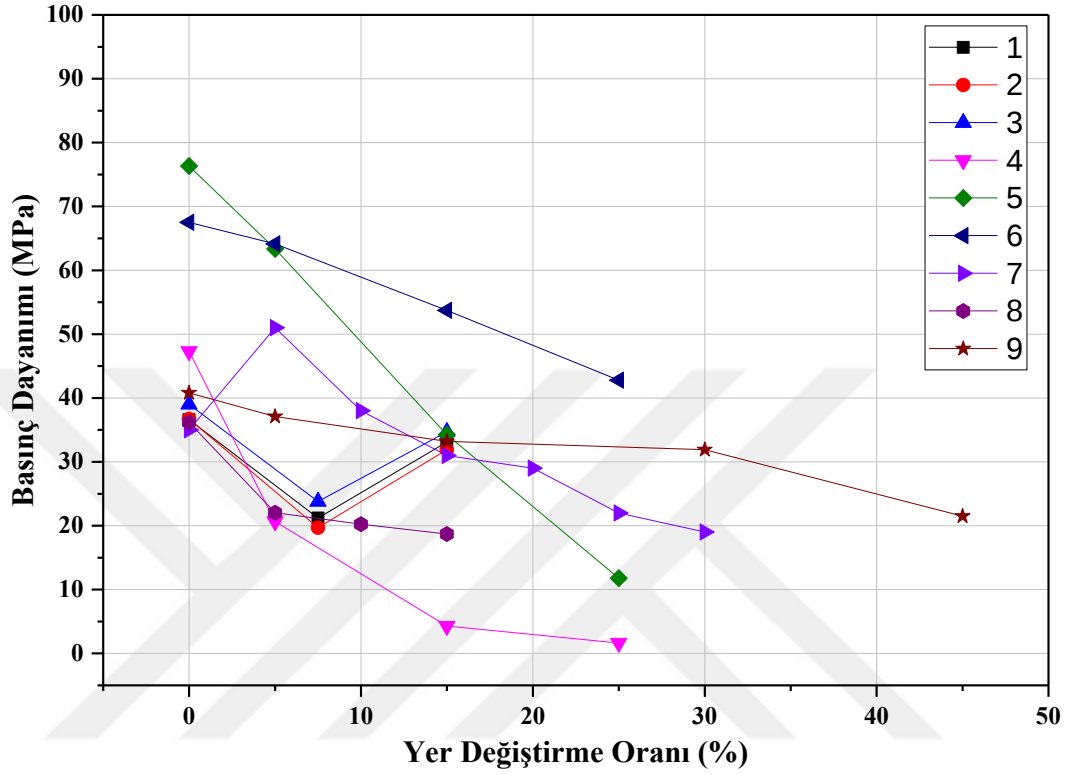
2.4.2. Atık plastik içeren çimentolu karışımların basınç dayanımları

Önceki çalışmalarda plastik atık kullanılarak üretilen çimentolu karışımların basınç dayanımı değerleri Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Silva vd. (2013) yaptıkları çalışmada, farklı oranlarda doğal agregayla yer değiştirmiş plastik PET kullanarak beton üretmişler ve PET agregasının betonun mekanik özelliklerinin üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlar, plastik agregası miktarı arttıkça basınç dayanımında bir azalma olduğunu göstermiştir. Bu azalmanın nedeni, çimento hamuru ve PET agregaları arasındaki zayıf bağ ile açıklanmıştır.

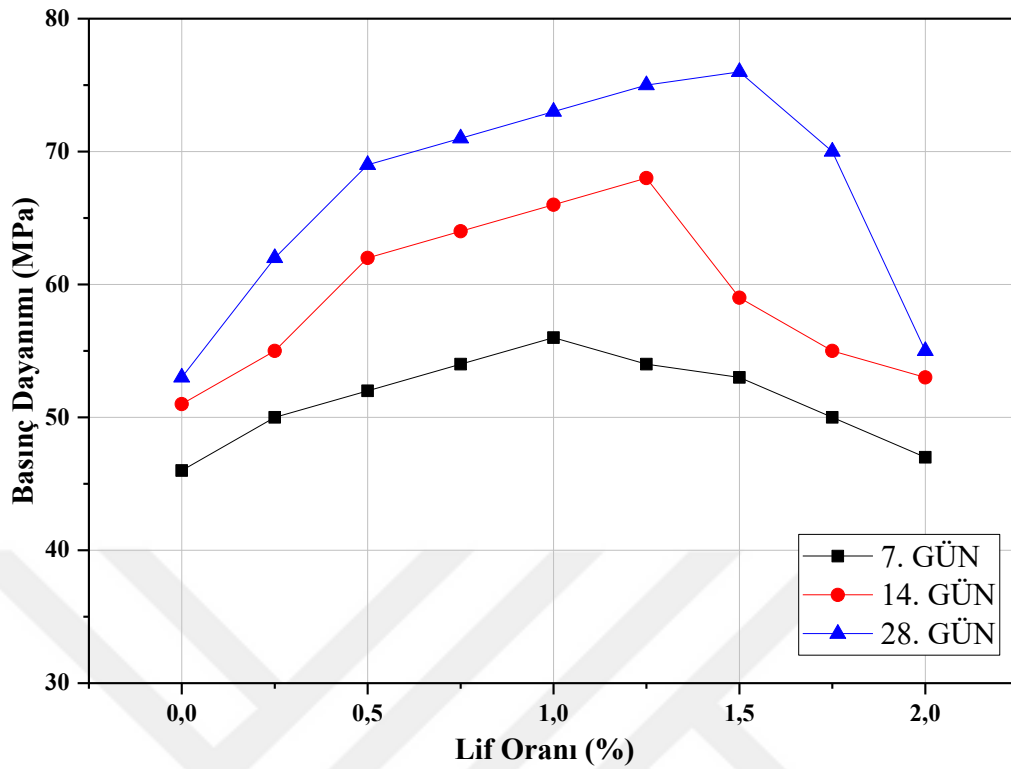
Kumar ve Baskar (2018) ısı şok ve sıcaklığın, kaba agreganın kısmi ikamesi olarak kullanılan yüksek çarpma dirençli polistiren (YÇDP) E-plastik atığı içeren betonun üzerindeki etkileri araştırmak üzere deneysel bir çalışma yapmışlardır. YÇDP her seferinde %10 artarak %10 ile %50 arasında değişen yüzdelerde kullanılmıştır. YÇDP içeriğinin artması basınç dayanımını düşürdüğü bildirilmiştir.

Al-Hadithi ve Hilal (2017), kendiliğinden yerleşen betonun özelliklerindeki gelişmeleri incelemek için içecek şişesinin kesilmesiyle elde edilen atık plastik lifleri kullanmışlardır. Atık plastik lifler hacimce %0, %0,25, %0,5, %0,75, %1, %1,25, %1,5, %1,75 ve %2 yüzdelerde eklenmiştir. Atık plastik liflerle hazırlanan tüm numunelerin

basınç dayanım değerleri, atık plastik lifin %2 dahil edilmesi ile hazırlananlar hariç, kontrol numunesinden daha yüksek olarak ölçülmüştür. Basınç dayanımının maksimum değerleri 7., 14. ve 28. gün için sırasıyla 56 Mpa, 68 Mpa ve 79 Mpa olarak ölçülmüştür (Şekil 2.5).



Şekil 2.4. Plastik agregası içeren çimentolu karışımların 28 günlük basınç dayanımları: (1), (2), (3): PET agregası (Silva vd. 2013); (4), (5), (6): e-plastik agregası (Bulut ve Şahin 2017); (7): PET agregası (Azhdarpour vd. 2016); (8): PET agregası (Sadromtazi vd. 2016); (9) PVC agregası (Kou vd. 2009)



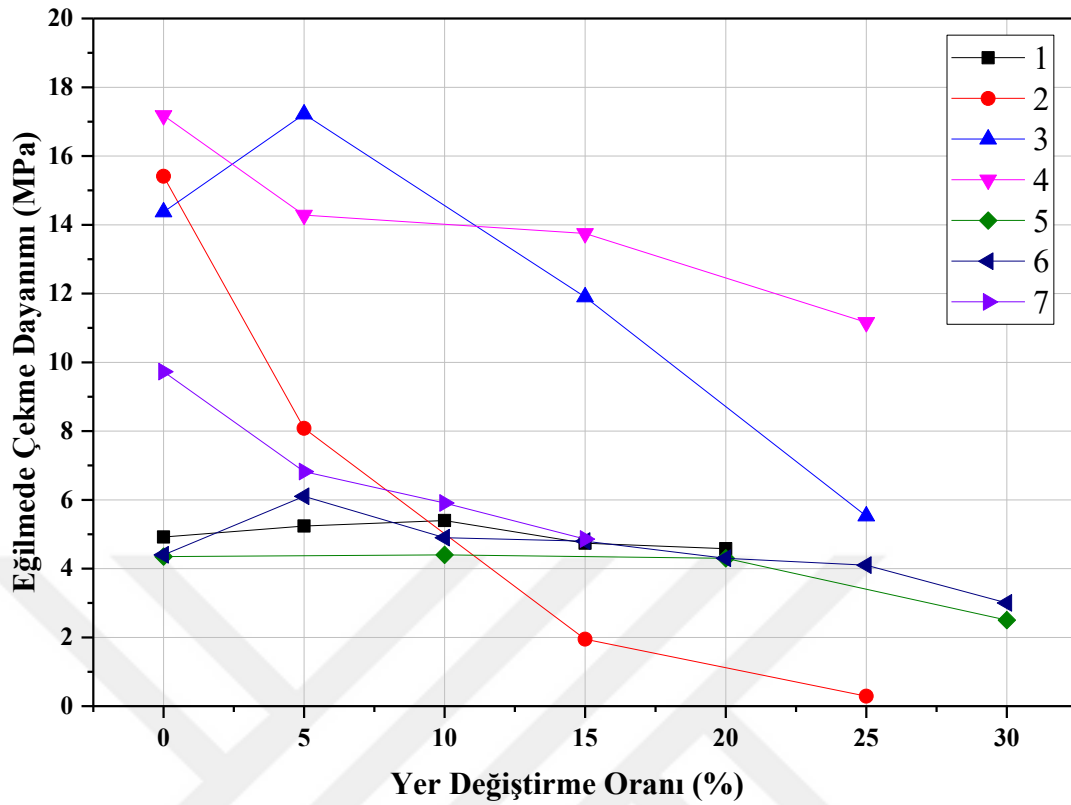
Şekil 2.5. Plastik lif içeren çimentolu karışımların 28 günlük basınç dayanımları (Al-Hadithi ve Hilal 2017)

2.4.3. Atık plastik içeren çimentolu karışımların eğilme dayanımları

Önceki çalışmalarda plastik atık kullanılarak üretilen çimentolu karışımların eğilmede çekme dayanımı değerleri Şekil 2.6’da sergilenmiştir. Iucolano vd. (2013) doğal agreganın kısmen PET ve PE gibi geri dönüştürülmüş plastik atık maddelerle değiştirilmesiyle hazırlanan harçların eğilme dayanımını azalttığını bildirmişlerdir. Harcın eğilme dayanımı %10 ikameyle 2,15 MPa’dan 1,11 MPa’ya düşmüştür. Yazarlar, dayanımdaki bu düşüşün çimento hamuru ve plastik agreganın yüzeyi arasındaki zayıf bağ ile ilişkili olduğunu açıklamışlardır.

Yang vd. (2015) kumun, geri dönüştürülmüş PP plastik agregası ile %15’e kadar ikame edilmesinin, kendiliğinden yerleşen hafif betonun eğilme dayanımını arttırdığı sonucuna varmışlardır. %15 ikamesi maksimum eğilme dayanımı vermiştir. Daha fazla ikame oranı eğilme dayanımının azalmasına neden olmuştur.

Al-Hadithi ve Hilal. (2016) atık plastik liflerin hacimce %1,75’e kadar eklenmesi, betonun eğilme dayanımını geliştirip arttırdığı sonucuna varmışlardır. Lifsiz hazırlanan betona kıyasla eğilme dayanımı değerlerinde maksimum artış %1,75 lif oranıyla kaydedildi, bu da 7, 14 ve 28 günlük kürlenme için sırasıyla %141,4, %93,3 ve %82,2’dir. Ancak, lif oranı %2’ye çıktığında eğilme dayanımı azalmıştır. PET liflerin düşük bağ kurma davranışı, dayanımdaki azalmanın sebeplerinden biridir. Bununla birlikte, yüksek plastik içeriğinin plastik parçacıkların etrafında daha fazla serbest su birikmesine neden olması, plastik-hamur ara yüzeyini azaltarak büyük boşlukların oluşmasına ve önemli ölçüde zayıf adhezyona yol açmıştır.



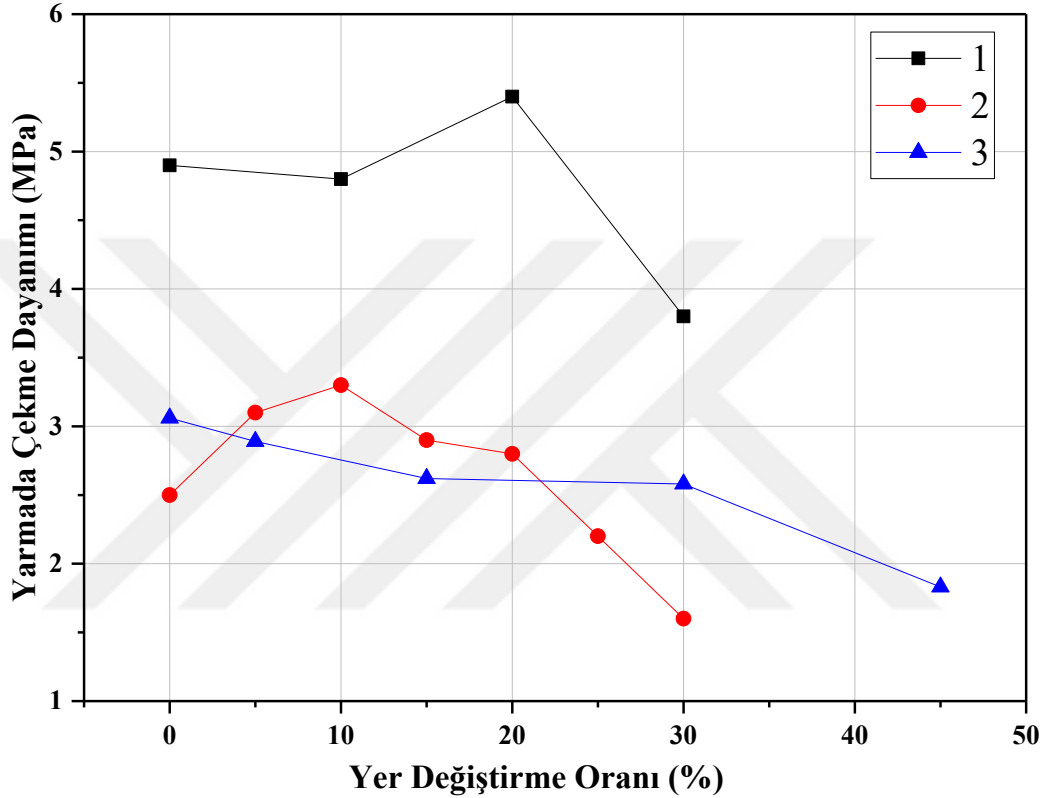
Şekil 2.6. Plastik agregası içeren çimentolu karışımların 28 günlük eğilmede çekme dayanımları: (1): YYPE, DYPE, PET agregası (Pirzade vd. 2018); (2), (3), (4): e-plastik agregası (Bulut ve Şahin 2017); (5): e-plastik agregası (Manjunath 2016); (6): PET agregası (Azhdarpour vd. 2016); (7): PET agregası (Sadromomtazi vd. 2016)

2.4.4. Atık plastik içeren çimentolu karışımların yarmada çekme dayanımları

Önceki çalışmalarda plastik atık kullanılarak üretilen çimentolu karışımların yarmada çekme dayanımı değerleri Şekil 2.7’de verildiği gibidir. Bhogayata vd. (2017) metalize edilmiş plastik atıkların betonda kullanılabilirliğini araştırmışlardır. plastik atıklar, 5 mm, 10 mm ve 20 mm gibi farklı boyutlarda lif olarak kullanılmış ve hacimce %0 ile %2 oranlarda betonda karıştırılmıştır. lif eklenmesinin yarmada çekme dayanımını arttırdığı ve plastik lifin boyutunun ve oranının yarmada çekme dayanımına karşı direnci etkilediği fark edilmiştir. Yazarlar, artan plastik lif miktarının yarmada çekme dayanımı arttırdığını ve daha uzun boyuttaki liflerin, daha kısa liflere kıyasla mikro çatlakların uzamasını azaltarak çatlağa karşı daha iyi direnç gösterdiklerini belirtmişlerdir.

Mohammedhosseini vd. (2018) tarafından yapılan benzer bir çalışmada, beton üretiminde DYPE metalize edilmiş atık plastik lifler kullanılmıştır. Plastik lif yüzdesinin artması, betonun yarmada çekme dayanımını geliştirdiğini gözlemlenmiştir. Tüm yüzdelerde, yarmada çekme dayanımı kontrol numunesinden daha yüksek çıkmıştır. dayanımdaki artış, %0,25, %0,5, %0,75, %1 ve %1,25 lif içeriği için sırasıyla %12, %19, %17, %13 ve %8 olarak ölçülmüştür. Lif içeriği %0,5 olan numunenin en yüksek dayanım değeri sağladığı görülmüştür. Yazarlar, en yüksek yarmada çekme dayanımı değerlerinin 91 günlük kürlenmiş numunelerden elde edildiği sonucuna varmışlardır.

Haghighatnejad vd. (2016) kaba agreganın kısmi ikamesi olarak geri dönüştürülmüş PVC eklenmesinin betonun yarmada çekme dayanımını azalttığını bildirmişlerdir. Kontrol numunesinin 28. gündeki yarmada çekme dayanımı 3,84 MPa olarak ölçülmüştür, bu değer %20, %30, %40 ve %50 PVC kaba agrega ikame oranı ile sırasıyla %3,5, %6,7, %14,1 ve %24,2 azalmıştır. Bu azalma, geri dönüştürülmüş PVC'nin elastik modülünün, çimento partikülünden daha düşük olması nedeniyle PVC parçacıklarının etrafında çatlakların başlamasına ve dolayısıyla yarmada çekme dayanımının azalmasına bağlı olabilir.

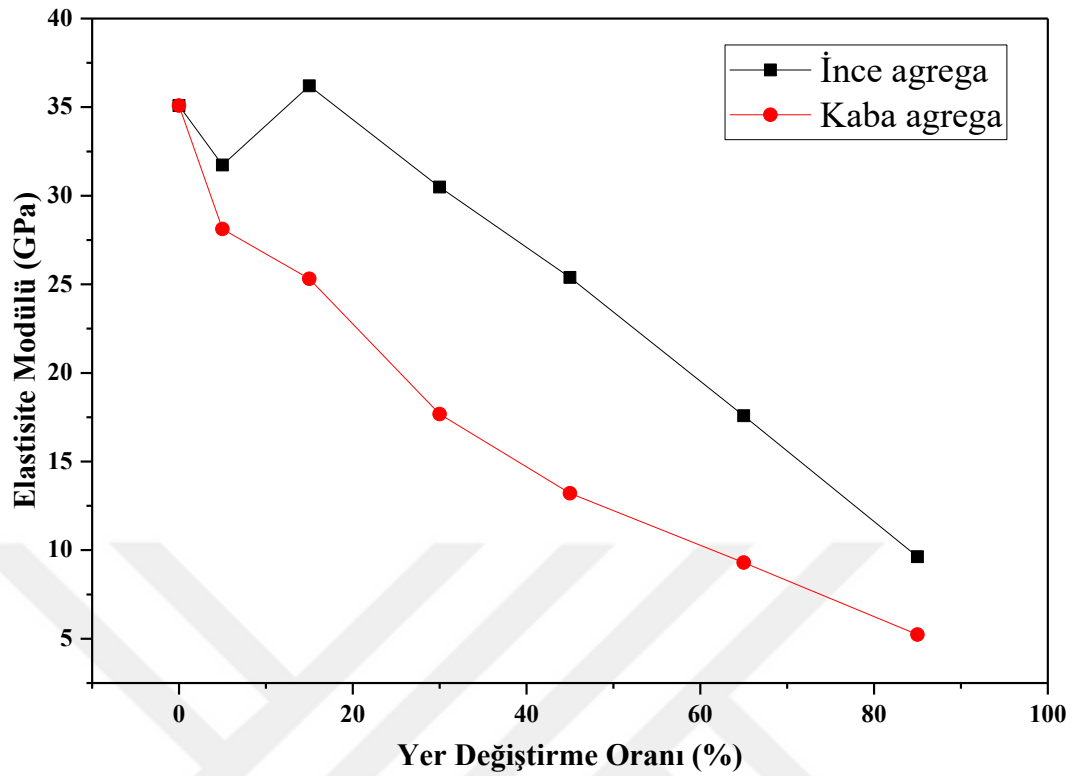


Şekil 2.7. Plastik agrega içeren çimentolu karışımların 28 günlük yarmada çekme dayanımları: (1): e-plastik agregası (Manjunath 2016); (2): PET agregası (Azhdarpour vd. 2016); (3): PVC agregası (Kou vd. 2009)

2.4.5. Atık plastik içeren çimentolu karışımların elastisite modülleri

Mohammed vd. (2019) atık PVC parçacıklarını hem kaba hem de ince agrega olarak kullanmışlardır. Plastik agreganın miktarının artmasıyla elastik modülünün azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.8). PVC plastik agreganın kaba agregayla yer değişiminin, ince agregayla yer değişimine kıyasla, elastisite modülünün daha fazla düşürdüğünü sonucuna varmışlardır. Bu beklenen bir sonuçtur, çünkü agreganın elastik modülünün betonun elastik modülü üzerinde kayda değer bir etkisi vardır ve normal agreganın plastik olanla değiştirilmesi genellikle bu özelliği etkiler.

Kou vd. (2009) yaptıkları çalışmada, PVC agregalarının yüksek oranlarda kullanılması elastisite modülünde bir azalmaya sebep olduğunu belirtmişlerdir. PVC içeriği %5, %15, %30 ve %45 için elastisite modülündeki düşüş sırasıyla %6,1, %13,8, %18,9 ve %60,2 olarak ölçülmüştür.



Şekil 2.8. PVC plastik agregası içeren betonun 28 günlük elastisite modülü değerleri (Mohammed vd. 2019)

2.4.6. Atık plastik içeren çimentolu karışımların su emmeleri

Silva vd. (2013), üç farklı ortamda (dış ortam, laboratuvar ortamı ve ıslak oda) daldırma ve kapiler yoluyla plastik agrega içeren betonun su emme özelliğini gözlemlemişlerdir. Su emme, ortamın bağıl neminden etkilenir. Ortamın yüksek bağıl nemi, çimento matrisindeki boşluklarda daha fazla su olmasını sağlar, bu da daha iyi çimento hidratasyonu için yeterli su anlamına gelir, bu da betonun paketleme seviyesini ve gözenekliliğini optimize eder ve böylece daha düşük su emme ile sonuçlanır. Laboratuvar ortamında kürlenmiş numunelerin diğer iki ortama kıyasla daha düşük bağıl nem nedeniyle en yüksek su emme değerine sahip olması beklenmiştir, ancak sonuçlar beklendiği gibi olmamıştır. Yazarlar bu durumu, açıkta kalan yüzeyde ince bir tabaka oluşturan ve suyun nüfuz etmesi için daha az geçirgen kılın, dış ortamda ve ıslak odada kürlenmiş numunelerin karbonatlaşmasıyla açıklamışlardır. Kapiler yoluyla su emme sonuçları, ıslak ortamda kürlenmiş numunelerin daha kuru ortamlara kıyasla daha düşük su emme özelliğine sahip olduğunu göstermiştir.

2.4.7. Atık plastik içeren çimentolu karışımların donma-çözülmeleri

Kan ve Demairboğa. (2009) tarafından yapılan donma ve çözülme testinin sonuçları, 300 donma-çözülme çevriminin ardından, “modified waste expanded polystyrene aggregates” (MEPS) agregaları ile üretilen betonun basınç dayanımı ve bağıl dinamik elastisite modülünün önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Ayrıca ince hafif agregaların kaba hafif MEPS agregalarına göre donma-çözülme döngülerine daha az duyarlı oldukları bildirilmiştir. Karışımlardaki artan MEPS agregaları betonun daha

yüksek direnç ve dayanıklılık göstermesini sağlamasına rağmen, karışımların hiçbiri temel dayanıklılık gereksinimlerini karşılamamıştır.

Karahan ve Atış (2011), pp lifleri ile üretilen betonun, lifsiz betona göre donma-çözülmeye karşı daha yüksek dirence sahip olduğunu bildirmişlerdir. Bu, betonda rasgele dağılan pp liflerin varlığından kaynaklanmaktadır. Rastgele dağılmış olan bu lifler betondaki donmuş suyun neden olduğu genleşmeyi engeller ve daha sonra donma-çözülme sonucu oluşan beton hasarını azaltır.

2.4.8. Atık plastik içeren çimentolu karışımların büzülmeleri

Akçaözoğlu vd. (2010) PET plastiklerin harçlarda agrega olarak kullanılmasının, hem PET agregaları hem de kum içeren harçlardan daha yüksek büzülme değerleri verdiğini bildirmişlerdir. 28. günde sadece plastik agrega içeren harçlar için boy değişim değerleri %0.17 iken PET agrega ve kum içeren harçlar için bu değer %0.11'e düşmüştür. Hem PET agregaları hem de kum içeren harçlarda daha düşük kuruma büzülme değeri elde edilmiştir, bunun nedeni çimento hamurundaki kum ve PET agregaları tarafından büzülmenin önlenmesidir. Yazarlar ayrıca, hem plastik agrega hem de kum içeren karışımlarda çimento miktarının, sadece PET agregaları içeren karışımlardan daha düşük olduğunu bildirmişlerdir, bu da düşük büzülme değerlerine sahip olmanın bir başka nedenidir, çünkü düşük çimento miktarı büzülmeyi azaltır.

Benzer bir çalışmada, Sadrmomtazi vd. (2016) PET plastiklerin agrega ikamesi olarak kullanılmasının betonun kuruma büzülmesini arttırdığı sonucuna varmışlardır. PET agregalarının %15 oranında kullanıldığı büzülme değerleri normal beton, silis dumanı içeren beton ve uçucu kül içeren beton için sırasıyla 0.31, 0.24 ve 0.27'dir. Referans beton için büzülme değeri 0.18 olarak ölçülmüştür.

2.4.9. Atık plastik içeren çimentolu karışımların karbonatlaşmaları

Akçaözoğlu vd. (2010) agrega olarak sadece PET partikülleri içeren harcın hem PET hem de kum içeren harca göre daha düşük karbonatlaşma derinliğine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Karbonatlaşma derinlikleri sırasıyla 28. ve 90. günde %100 PET ikamesi ile hazırlanan beton numuneleri için 1.2 ve 5.0 mm iken, 28 ve 90. günde PET ve kum içeren betonlar için 1.4 ve 5.9 mm olmuştur. Bu, PET parçacıklarının ve kum agregalarının birbirleriyle iyi bir şekilde birleşmediğini ve harcın gözenekli olmasına neden olduğunu gösterir, bu daha fazla CO₂'nin nüfuz etmesine sebep olmuştur. Yazarlar, ayrıca cüruf kullanımının karbonatlaşma derinliğini büyük ölçüde artırdığını belirtmişlerdir. Silva vd. (2013) agregaların atık plastiklerle değiştirilmesinin betonun karbonatlaşma derinliğini arttırdığını bildirmişlerdir. Yazarlar dış ortam, laboratuvar ortamı ve ıslak oda gibi 3 farklı kürlenme ortamı kullanmışlardır. Laboratuvar ortamında kürlenmiş numunelerin en yüksek karbonatlaşma derinliğine ve ıslak odada kürlenmiş numunelerin en düşük değere sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

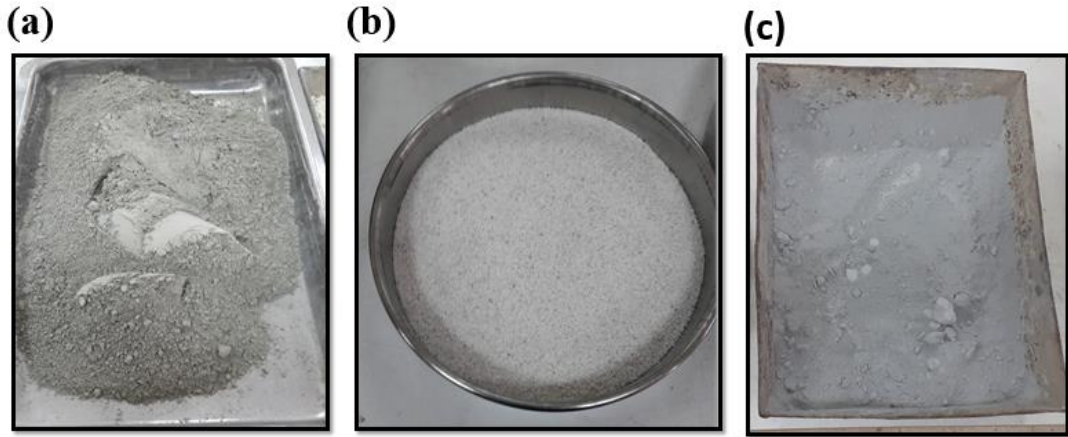
3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, numune üretimi için kullanılan malzemelerin özellikleri ve malzemeler üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan, karışıma girecek malzeme oranlarından, taze ve sertleşmiş harç numuneler üzerinden gerçekleştirilen fiziksel, mekanik ve durabilite deneylerinden bahsedilmiştir.

3.1. Materyal

3.1.1. Bağlayıcı

Çalışmada 3 farklı bağlayıcı kullanılmıştır. Mikro silika ve silis dumanı ağırlıkça farklı yüzdelerde çimentoyla yer değiştirerek farklı karışımlar elde edilmiştir. TS EN 197-1 CEM I 42,5 R portland çimentosu Antalya Bölgesi'nde bulunan Göлтаş Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Silis dumanı, Antalya Eti Elektrometalürji A.Ş.'den elde edilmiştir. Bağlayıcıların özgül ağırlıkları TS-EN 196-6'ya göre, Le Chatelier balonu ile elde edilmiştir. Bağlayıcıların XRF analizi sonucu elde edilen kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Bağlayıcıların kimyasal kompozisyonlarına bakıldığında, mikro silika ve silis dumanının yüksek oranda SiO_2 oksidine sahip olduğu görülmektedir. Çalışmada, mikro silika öğütülmeden kullanılmıştır. Şekil 3.1'e bakıldığında silis dumanının partikül boyutunun mikro silikaninkinden daha küçük olduğu görülmektedir.



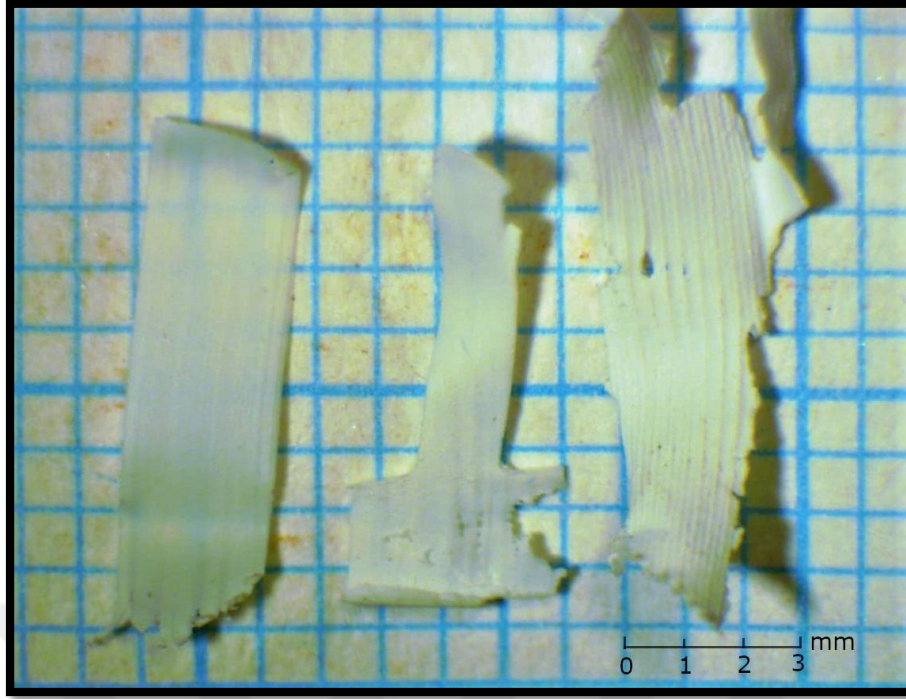
Şekil 3.1. Kullanılan bağlayıcı çeşitleri: (a): Portland çimentosu; (b): Mikro silika; (c) Silis dumanı

Çizelge 3.1. XRF analizi sonucu bağlayıcıların kimyasal kompozisyonları (%)

Oksitler	Çimento	Silis dumanı	Micro silika
Na ₂ O	-	2,150	0,09
MgO	1,91	14,320	0,08
Al ₂ O ₃	4,06	1,684	0,12
SiO ₂	18,3	78,020	97,52
P ₂ O ₅	0,0845	0,02396	-
SO ₃	3,74	0,2984	0
Cl	-	0,02678	-
K ₂ O	0,788	1,097	0,01
CaO	67,7	0,1931	0,06
TiO ₂	0,369	-	1,07
Cr ₂ O ₃	0,0753	1,405	-
MnO	0,0371	0,0560	-
Fe ₂ O ₃	2,77	0,3170	0,16
CuO	0,0047	-	-
ZnO	0,0059	0,1950	-
SrO	0,0878	-	-
ZrO ₂	-	< 0,068	-

3.1.2. Lif

Çalışmada lif olarak kullanılan plastik PVC atığı, Antalya Organize Sanayinden elde edilmiştir. Lifler tamamen atık olarak kullanılmış olup üzerinde her hangi bir işlem yapılmamıştır. Dolayısıyla liflerin boyu ve çapı farklılık göstermiştir. Kullanılan lifin yoğunluğu 1,4 g/cm³'tür. Liflerin uzunluğu 8 – 12 mm arasında değişiklik göstermiştir.



Şekil 3.2. Kullanılan atık plastik PVC liflerin optik mikroskop görüntüsü

3.1.3. Karışım suyu

Harç numunelerin üretiminde kullanılan en önemli bileşenlerinden biri sudur. Çimento hidratasyonu gerçekleşmesi ve harcın işlenebilir olması için gereklidir. Çalışmada Antalya şebeke suyu, üzerinde herhangi bir işlem uygulanmaksızın kullanılmıştır.

3.1.4. Kimyasal katkı

Çalışmada işlenebilirliği 19 ± 2 cm değerlerinde sabit tutmak için lifli karışımlarda %1 ve %2 oranında lignin sülfonat esaslı su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Katkı TS EN 934-2 standardına uygun üretilmiştir. Katkıya ait teknik bilgiler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kimyasal katkının teknik bilgileri

Kimyasal İçerik	Lignin Sülfonat Esaslı
Yoğunluk	1,05 - 1,09 kg/l
pH	4,0 - 6,0
Renk	Kahverengi
Toplam Klor	Maksimum %0,1
Alkali	< 5

3.1.5. Agregas

Çalışmada kırma kum agregası kullanılmıştır. Kırma kum agregası üzerinde yapılan deneyler ve sonuçları tezin ileriki bölümlerinde verilmiştir.



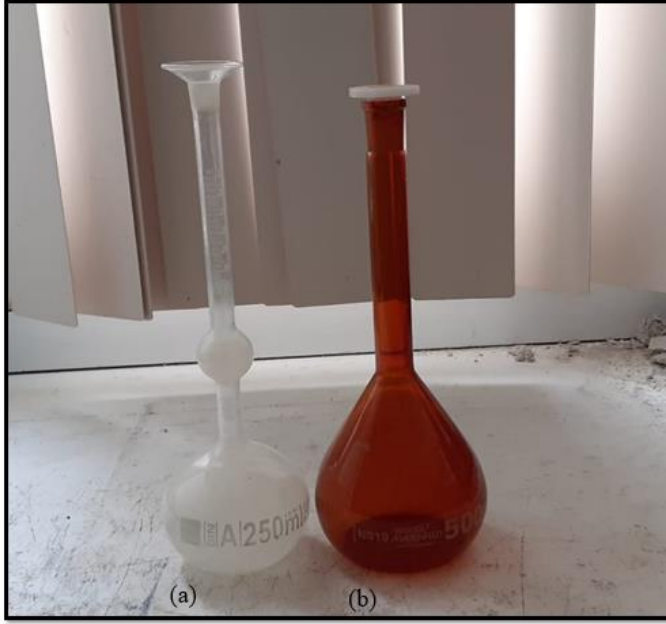
Şekil 3.3. Kırma kum agregası

3.2. Metot

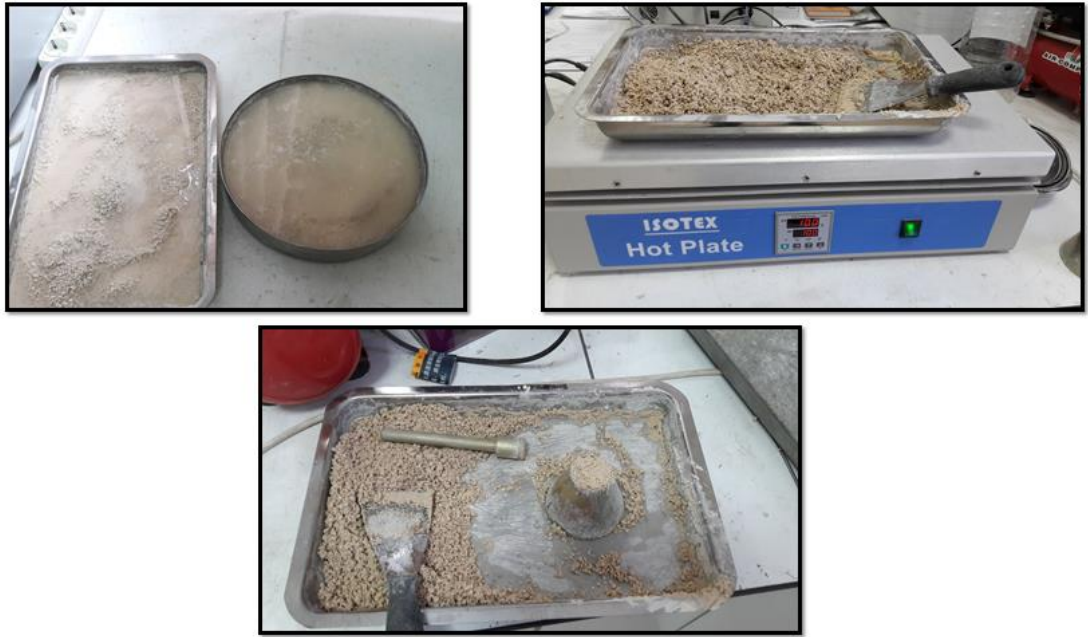
3.2.1. Agregas üzerinde yapılan deneyler

3.2.1.1. Agreganın özgül ağırlığı

Agreganın özgül ağırlığı, karışıma girecek agregas miktarını belirlemek için tayin edilmiştir ve ASTM C128-01'e göre yapılmıştır. Le Chatelier balonu ve balon joje deneyi yönetimi ile özgül ağırlık değeri bulunup her iki yönteminin ortalaması alınmıştır. Deneyi için agreganın suya doymun kuru yüzey (SDKY) halinde olması gerekir. Agregayı SDKY haline getirmek için, önce bir miktar agregas 24 saat boyunca su içerisinde bekletilip suya doymun hale getirilmiştir. Agreganın suyu süzöldükten sonra, agregas ısıtıcı plaka üzerinde 100 °C 'de sürekli karıştırılıp Abraham konisi ile kontrol edilerek suya doymun kuru yüzey (SDKY) haline gelmesi sağlanmıştır. Bu yöntemde SDKY haline geldiğini düşöndüğöümüz agregas 2 kademedede koninin içersine doldurulur ve her kademedede 20 tokmak darbesiyle sıkıştırılmıştır, koni kaldırılıp bir ıspatula yardımı ile agregas ortadan yarıılır, eğer agregas koni şeklinden ayrışarak dağılırsa ve merkezdeki agregalar az da olsa birbirini tutarsa, agregas SDKY haline gelmiş demektir, eğer koni şeklini koruyup dağılmazsa agregas biraz daha kurutulup deneyi tekrarlanmalıdır.



Şekil 3.4. (a) Le Chatelier Balonu; (b) Balon Joje



Şekil 3.5. Agregaların SDKY hale getirilme işlemi

3.2.1.2. Agreganın su emmesi

Agreganın yüzdesel su emme tayini deneyi ASTM C128-01 standardına göre yapılmıştır. Agreganın su emme oranını tayini için SDKY haline getirilmiş bir miktar agrega tartılıp ağırlığı not edildikten sonra etüve konulmuştur. Sabit kütleye gelene kadar etüvde bekletilen agrega etüvden çıkarılıp etüv kurusu halini tartılıp ağırlığı not edilmiştir. Aşağıdaki formül kullanılarak agreganın kütlece % su emme oranını hesaplanmıştır.

$$\% \text{ su emme} = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 \quad (3.1)$$

W_1 = Agreganın SDKY ağırlığı (g)

W_2 = Agreganın etüv kurusu ağırlığı (g)

Bu yöntemin yanında agreganın su emmesi nem ölçer cihazın yardımıyla da ölçülmüştür. Bahsedilen iki yöntemle elden edilen değerlerin ortalaması alınarak agreganın su emme değeri bulunup karışım hesaplamalarında kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Nem ölçer cihazı

3.2.1.3. Agreganın birim hacim ağırlığı

Agreganın birim hacim ağırlıklarını (BHA) belirlemek için bu deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyi TS EN 1097-3 standardına göre yapılmıştır. Kırma kum Etüvde 110 ± 5 °C sıcaklıkta sabit kütleye gelene kadar kurutulmuştur. Agreganın gevşek birim hacim ağırlığını hesaplamak için hacmi 1 lt olan bir kap kullanılmıştır. Kabin boş ağırlığı tartılıp not edilmiştir (M_1), sonrasında agregalar bir kürek yardımıyla kabin içine boşaltılmış, kap doldurulduktan sonra bir çelik şiş kullanılarak sıkıştırılmadan üst yüzey düzenlenmiş ve tartılmıştır (M_2). Agreganın sıkışık BHA tayini için bu sefer kap 3 kademedede doldurularak her kademedede 25 defa şişlenmiştir. Şişleme işlemi, şişleme çubuğunun kabin tabanına değmemesi için dikkatlice gerçekleştirilmiştir. Agreganın gevşek ve sıkışık BHA değerleri aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır. Deneyler 3 defa tekrarlanıp sonuçların ortalaması alınmıştır.

$$BHA = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (3.2)$$

M_1 = Kabın boş ağırlığı (kg)

M_2 = Kap + gevşek agrega ağırlığı (kg)

V = Kabın hacmi

3.2.1.4. Agreganın tane boyut dağılımı

Agreganın granülometresi (tane boyut dağılımı) belirlemek için elek analizi TS EN 933-1 ve ASTM C-136 standardına göre yapılmıştır. İnce agrega kullanıldığı için elek göz açıklıkları 4 mm'den başlamıştır. Elek göz açıklıkları sırasıyla 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm, 0,063 mm olarak belirlenmiştir. Elek göz açıklıkları büyükten küçüğe göre, en üstteki en büyük olacak şekilde, sıralanmıştır. Deneyi için bir miktar agrega en üstteki eleğe (4 mm) koyulup sarsma cihazı ile sarsılmıştır. Elek üstünde kalan agrega miktarları tartılıp elek üstü yığılımlı ağırlıklar hesap edilmiştir. Agreganın incelik modülü elek üstü yüzde yığılımlı değerleri hesap edilerek belirlenmiştir.

3.2.2. Harç üretimi ve malzeme oranları

Karışıma girecek malzeme oranları 1 dm³ hacim için tasarlanmıştır. Homojen bir karışım ve istenilen işlenebilirliği elde etmek için gerektiği miktarda akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0,7 ile sabit tutulurken, çimento değişen yüzdelerde ağırlıkça mikro silika (MS) ve silis dumanı (SD) ile yer değiştirmiştir. Karışımlarda lif olarak kullanılan PVC atığı değişen yüzdelerde (%0, %1, %2, %3) karışıma eklenmiştir. Karışıma giren malzemeler hacimsel olarak çizelge 3.2'de verilmiştir.

Harç üretimi için laboratuvar tipi 2 dm³ hazneli mikser kullanılmıştır. Agregası ve bağlayıcı kuru halinde karıştırılarak miksere eklenmiştir, suyun 3/2'sini koyup 1 dakika boyunca 4'üncü devrede karıştırılmıştır, 1. dakikanın sonunda karıştırma işlemi devam ederken PVC atıkları karışıma eklenerek 1 dakika daha 4'üncü devrede karıştırılmıştır. Homojenlik kaybını önlemek için hazne tabanını bir ıspatula yardımı ile karıştırılıp dağılan ve yapışan taneciklerin tekrar karışım içerisine dönmesi sağlanmıştır. Sonrasında 6'nci devrede karıştırma işlemi karışıma geri kalan su ve akışkanlaştırıcı ilave edilerek 2 dakika boyunca tekrarlanmıştır.

Üretilen karışımlar 40x40x160 mm'lik prizmatik kalıplara yerleştirilerek üstünü nem kaybına uğramaması için plastik örtüyle kapatılmıştır. 24 saat sonra sertleşmiş numuneler kalıptan çıkarılıp kirece doymun kür tankına 20±2 C°'de deneyi gününe kadar kürlenmeye bırakılmıştır.



Şekil 3.7. Harç karışımların üretilmesinde kullanılan mikser



Şekil 3.8. Harçların kalıptan çıkarılması ve kür tankına konulması

Karışım kodları aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

KN/L0: Kontrol numunesi ; bağlayıcılarda sadece çimento; PVC atığı karışımın hacimce %0 kullanılmıştır.

KN/L1: Kontrol numunesi ; bağlayıcılarda sadece çimento; PVC atığı karışımın hacimce %1 kullanılmıştır.

KN/L2: Kontrol numunesi ; bağlayıcılarda sadece çimento; PVC atığı karışımın hacimce %2 kullanılmıştır.

KN/L3: Kontrol numunesi ; bağlayıcılarda sadece çimento; PVC atığı karışımın hacimce %3 kullanılmıştır.

MS15/L0: Bağlayıcılarda ağırlıkça %15 mikro silika, %85 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %0 kullanılmıştır.

MS15/L1: Bağlayıcılarda ağırlıkça %15 mikro silika, %85 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %1 kullanılmıştır.

MS15/L2: Bağlayıcılarda ağırlıkça %15 mikro silika, %85 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %2 kullanılmıştır.

MS15/L3: Bağlayıcılarda ağırlıkça %15 mikro silika, %85 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %3 kullanılmıştır.

MS10/L0: Bağlayıcılarda ağırlıkça %10 mikro silika, %90 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %0 kullanılmıştır.

MS10/L1: Bağlayıcılarda ağırlıkça %10 mikro silika, %90 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %1 kullanılmıştır.

MS10/L2: Bağlayıcılarda ağırlıkça %10 mikro silika, %90 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %2 kullanılmıştır.

MS15/L3: Bağlayıcılarda ağırlıkça %10 mikro silika, %90 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %3 kullanılmıştır.

MS5/L0: Bağlayıcılarda ağırlıkça %5 mikro silika, %95 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %0 kullanılmıştır.

MS5/L1: Bağlayıcılarda ağırlıkça %5 mikro silika, %95 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %1 kullanılmıştır.

MS5/L2: Bağlayıcılarda ağırlıkça %5 mikro silika, %95 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %2 kullanılmıştır.

MS5/L3: Bağlayıcılarda ağırlıkça %5 mikro silika, %95 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %3 kullanılmıştır.

SD15/L0: Bağlayıcılarda ağırlıkça %15 silis dumanı, %85 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %0 kullanılmıştır.

SD15/L1: Bağlayıcılarda ağırlıkça %15 silis dumanı, %85 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %1 kullanılmıştır.

SD15/L2: Bağlayıcılarda ağırlıkça %15 silis dumanı, %85 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %2 kullanılmıştır.

SD15/L3: Bağlayıcılarda ağırlıkça %15 silis dumanı, %85 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %3 kullanılmıştır.

SD10/L0: Bağlayıcılarda ağırlıkça %10 silis dumanı, %90 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %0 kullanılmıştır.

SD10/L1: Bağlayıcılarda ağırlıkça %10 silis dumanı, %90 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %1 kullanılmıştır.

SD10/L2: Bağlayıcılarda ağırlıkça %10 silis dumanı, %90 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %2 kullanılmıştır.

SD10/L3: Bağlayıcılarda ağırlıkça %10 silis dumanı, %90 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %3 kullanılmıştır.

SD5/L0: Bağlayıcılarda ağırlıkça %5 silis dumanı, %95 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %0 kullanılmıştır.

SD5/L1: Bağlayıcılarda ağırlıkça %5 silis dumanı, %95 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %1 kullanılmıştır.

SD5/L2: Bağlayıcılarda ağırlıkça %5 silis dumanı, %95 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %2 kullanılmıştır.

SD5/L3: Bağlayıcılarda ağırlıkça %5 silis dumanı, %95 çimento ; PVC atığı karışımın hacimce %3 kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. Üretilen karışımların bileşen miktarları (kg/m³)

Karışım Kodu	Çimento (kg/m ³)	Silis Dumanı (kg/m ³)	Mikro Silika (kg/m ³)	Kırma Kum Agrega (kg/m ³)	PVC Lif (%)	PVC Lif (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)
KN/L0	340	-	-	1712,29	0	0	274,38	0
KN/L1	340	-	-	1712,29	1	14	274,38	3,4
KN/L2	340	-	-	1712,29	2	28	274,38	6,8
KN/L3	340	-	-	1712,29	3	42	274,38	6,8
MS15/L0	289	-	51	1688,90	0	0	273,88	0
MS15/L1	289	-	51	1688,90	1	14	273,88	3,4
MS15/L2	289	-	51	1688,90	2	28	273,88	6,8
MS15/L3	289	-	51	1688,90	3	42	273,88	6,8
MS10/L0	306	-	34	1696,86	0	0	274,04	0
MS10/L1	306	-	34	1696,86	1	14	274,04	3,4
MS10/L2	306	-	34	1696,86	2	28	274,04	6,8
MS10/L3	306	-	34	1696,86	3	42	274,04	6,8
MS5/L0	323	-	17	1704,83	0	0	274,21	0
MS5/L1	323	-	17	1704,83	1	14	274,21	3,4
MS5/L2	323	-	17	1704,83	2	28	274,21	6,8
MS5/L3	323	-	17	1704,83	3	42	274,21	6,8
SD15/L0	289	51	-	1696,60	0	0	274,04	0
SD15/L1	289	51	-	1696,60	1	14	274,04	3,4
SD15/L2	289	51	-	1696,60	2	28	274,04	6,8
SD15/L3	289	51	-	1696,60	3	42	274,04	6,8
SD10/L0	306	34	-	1702	0	0	274,15	0
SD10/L1	306	34	-	1702	1	14	274,15	3,4
SD10/L2	306	34	-	1702	2	28	274,15	6,8
SD10/L3	306	34	-	1702	3	42	274,15	6,8
SD5/L0	323	17	-	1707,39	0	0	274,27	0
SD5/L1	323	17	-	1707,39	1	14	274,27	3,4
SD5/L2	323	17	-	1707,39	2	28	274,27	6,8
SD5/L3	323	17	-	1707,39	3	42	274,27	6,8

3.2.3. Taze harçlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler

3.2.3.1. Akma tablası deneyi

Taze harçların işlenebilirliği ve kıvam tayını için akma tablası deneyi TS EN 1015-3 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Harçların yeterli işlenebilirliğe sahip olması taze haldeki segregasyonu önlemek için önemlidir. Deneyie başlamadan önce akma tablasının üstü nemli bir bezle temizlenmiştir. Kesik koni şeklindeki bir kalıp akma tablasına ortasına yerleştirilmiş ve taze harçla iki aşamada ıspatula yardımıyla doldurulmuştur. Her aşamada harç sıkıştırma çubuğu yardımıyla 10 defa şişlenerek sıkıştırılmıştır. Koni doldurulduktan sonra üst tabakası bir mala yardımıyla düzleştirilmiş ve harç kalıntılarından temizlenmiştir. Koni kalıbın etrafında dağılan harç kalıntıları bir bezle temizlendikten sonra koni kalıbı kaldırılmıştır. Sonrasında kol 15 defa çevrilerek harç sarsılmıştır. Sarsılma etkisiyle yayılan harcın en büyük iki yayılan çapı birbirine dik olacak şekilde ölçülmüştür. Ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak yayılma çapı değeri elde edilmiştir.



Şekil 3.9. Akma tablası deneyi

3.2.3.2. Taze harcın birim hacim ağırlık tayini

Taze harcın birim hacim ağırlık tayininde TS 1015-6 standardı uygulanmıştır. Taze harç hacmi bilinen (1 dm^3) bir kabın içine yerleştirilmiştir. Yayılma çapı değerine göre farklı metotlar uygulanmıştır. Yayılma çapı değeri 140 mm'den daha düşük harçlar için vibrasyon metodu uygulanmıştır. Bu metotta önce önce kabın tartımı gerçekleştirilip ağırlığı not edilmiştir, sonrasında kap dolana kadar içerisine harç doldurulmuştur, harçla dolmuş kap bir titreşimli tabla üzerine yerleştirilip harç tamamen yerleşene kadar titreşime devam edilmiştir. Son olarak 0,01 g hassasiyetli tartıda tartım gerçekleştirilmiştir.

Yayılma çapı değeri 140 mm – 200 mm arasında değişen harçlar için şok metodu uygulanmıştır. Kabın yarısı harçla doldurulduktan sonra kap sağlam bir yüzeye 10 kez düşürülmüştür. Sonrasında kabın diğer yarısı doldurulmuş ve aynı işlem tekrarlanmıştır. Son olarak kap 0,01 g hassasiyetle tartılmıştır.

Yayılma çapı değeri 200 mm'den daha yüksek olan harçlarda kabın tamamı taşana kadar harçla doldurulmuştur. Sonrasında kabın kenarları nemli bir bezle silinmiş ve kap 0,01 g hassasiyetli tartıda tartılmıştır. Taze harcın birim hacim ağırlığı aşağıdaki formül yardımıyla bulunmuştur.

$$\rho_m = (m_2 - m_1) / V \quad (3.3)$$

ρ_m : Taze harç birim hacim ağırlığı (kg/m^3)

m_1 : Kabın ağırlığı (kg)

m_2 : Kabın ve taze harcın ağırlığı (kg)

V : Kabın Hacmi (m^3)



Şekil 3.10. Taze harcın birim hacim ağırlık tayını

3.2.4. Sertleşmiş harçların fiziksel deneyleri

Sertleşmiş harçlar üzerinde, kuru yığın yoğunluk, suya doymun kuru yüzey (SDKY) yığın yoğunluk, görünür boşluk oranı ve su emme miktarı deneyleri 28 ve 90'ıncı günlerde yapılmıştır. Kür tankından çıkarılan 40x40x160 mm'lik prizma numuneler, önce 0,01 gram hassasiyetli tartının altında su içerisinde bulunan sepetin içine konulup ağırlığı not edilmiştir (W3). Sonrasında nemli bir bezle yüzey silinip SDKY haline getirilen numunenin havada tartımını yapıp ağırlığı not edilmiştir (W2). Son olarak numune etüve konulup 40°C'de sabit tartıma gelene kadar bekletilmiştir, sabit tartıma gelen numunenin kuru hali aynı tarazıyla tartılıp ağırlığı not edilmiştir (W1). Deneyler ASTM C 642' e göre yapılmış ve sonuçlar aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır (Kockal ve Ozturan 2011).

$$\text{Kuru Yığın Yoğunluk} = W1/(W2-W3) \quad (3.4)$$

$$\text{SDKY Yığın Yoğunluk} = W2/(W2-W3) \quad (3.5)$$

$$\text{Görünür Boşluk Oranı (\%)} = ((W2-W1) / (W2-W3)) \times 100 \quad (3.6)$$

$$\text{Su Emme (\%)} = ((W2-W1) / W1) \times 100 \quad (3.7)$$



Şekil 3.11. Numunelerin etüve konulması

3.2.5. Sertleşmiş harçların mekanik deneyleri

3.2.5.1. Eğilmede çekme dayanımı deneyi

Çimentolu karışımlar doğrudan olmasa da dolaylı bir şekilde çekme kuvvetine maruz kalmaktadırlar. Üretilen harçların çekme dayanımını bulmak için üç nokta eğilme deneyi yapılmıştır.

Deneyi TS EN 1015-11'e göre yapılmıştır. Kür tankından çıkarılan 40x40x160 mm ebatlı prizma numuneler üzerine üç nokta eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Numuneler, aralarında 100mm mesafe olan yükleme tablasındaki iki silindir mesnet üzerine oturtularak bir üçüncü silindir tam numunenin ortasına gelecek şekilde yükleme çerçevesine yerleştirilmişlerdir. Numunenin tam ortasından yükleme yapmak için, numunenin tam orta noktası yükleme tablasına yerleştirilmeden önce işaretlenmiştir. Deneyi sonucundan elde edilen maksimum yük kullanılarak aşağıdaki formül yardımıyla numunelerin eğilmede çekme dayanımı Mpa cinsinden hesaplanmıştır.

$$\sigma = ((P \cdot L) / 4) / (b \cdot h^2) / 6)) \quad (3.8)$$

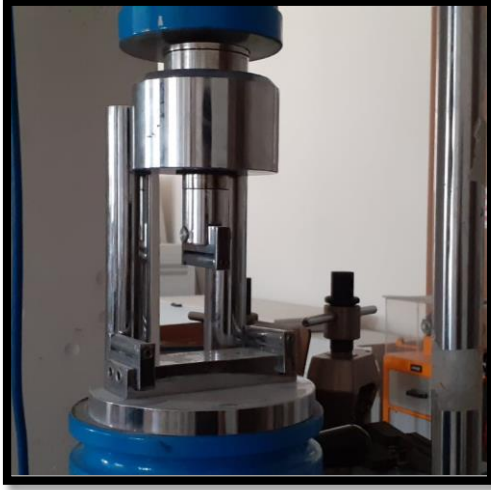
σ : Eğilmede çekme dayanımı (Mpa)

P: Deneyi makinesinde kırılma anındaki en büyük yük (N)

L: Yükleme tablası mesnetler arasındaki açıklık (mm)

b: Numunenin genişliği (mm)

h: Numunenin yüksekliği (mm)



Şekil 3.12. Üç nokta eğilme deneyi düzeneği

3.2.5.2. Basınç dayanımı deneyi

Üç nokta eğilme deneyi sonucunda ikiye ayrılan 40x40x160 mm ebatlı numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Bölünmüş parçalar 40x40 mm boyutundaki çelik pres altında basınç uygulanarak kırılmıştır. Deneyi sonucunda elde edilen maksimum yük değeri kullanılarak aşağıdaki formül yardımıyla numunelerin basınç dayanımı MPa cinsinden hesaplanmıştır. Basınç dayanımı deneyi TS EN 1015-11'e göre gerçekleştirilmiştir.

$$\sigma = P/A \quad (3.9)$$

σ : Basınç dayanımı (MPa)

P: Maksimum yük (N)

A: Yükün uygulandığı kesit alanı (mm²)



Şekil 3.13. Basınç dayanımı tayininde kullanılan yükleme çerçevesi

3.2.5.3. Gerime şekil değiştirme

Yük altında malzemenin göstereceği davranışı incelemek, malzemenin tokluk ve rezilyans değerleri öğrenmek açısından oldukça önemli bir husustur. Bir malzemenin yük altında kopana kadar sönümlendiği enerji miktarı o malzemenin tokluğunu verir. Gerilme şekil değiştirme eğrisinin altındaki alan hesaplanarak tokluk değeri bulunur. Rezilyans bir malzemenin elastik şekil değişimi sırasında depoladığı enerjidir. Rezilyans değeri gerilme şekil değiştirme eğrisinin elastik kısmının altında kalan alanla belirlenir.

Sertleşmiş numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri deformasyon kontrollü UTEST presile belirlenmiştir. 40x40x160 prizmatik numuneler dakikada 1 mm deformasyon yapacak şekilde, 40x40x40 küp numuneler ise dakikada 3 mm deformasyon yapacak şekilde kırılmıştır ve cihazdan alınan veriler UTEST MALZEME TEST programı kullanılarak elde edilmiştir. Bu veriler yardımıyla gerilme-şekil değiştirme eğrileri çizilmiştir.



Şekil 3.14. Universal test cihazı

3.2.5.4 Elastisite modülü tayini

Elastisite modülü bir malzemenin şekil-değiştirmeye karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Başka bir deyişle yük altında şekil değişimine uğrayan bir malzemenin yük kaldırıldıktan sonra tekrar eski haline dönebilme özelliğinin bir ölçüsüdür. elastisite modülü malzemenin rijitliğini belirleyen faktörlerden biridir ve rijitlikle doğru orantılıdır. Elastisite modülü gerilme-şekil değiştirme eğrisinin elastik bölge kısmında kalan lineer bölge üzerinden hesaplanır. Elastisite modülü, teğet, başlangıç teğet, sekant ve kiriş gibi farklı yöntemlerle elde edilebilir. Bu çalışmada kiriş yöntemi kullanılarak elastisite modülü hesaplanmıştır. Bu yöntemde gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerinde maksimum gerilme değerinin %40'ına denk gelen bir nokta belirlenir. Bu noktaya 5×10^{-5} birim şekil değiştirme değerine denk gelen bir noktadan bir

kiriş çizilir. Bu iki nokta arasında bir doğru çizilir ve bu doğru beton için gerilme şekil değiştirme eğrisi olarak kabul edilir. Bu doğrunun eğimi kullanılarak elastisite modülü elde edilir. Bu çalışmada elastisite modülü tayini TS EN 12390-13 standardına göre gerçekleştirilmiştir.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (3.10)$$

σ_1 : 5×10^{-5} değerindeki birim şekil değiştirmesine karşılık gelen gerilme miktarı (MPa)

σ_2 : $(\sigma_{\max}) \times 0,4$ değerine eşit olan gerilme miktarı (MPa)

ϵ_1 : 5×10^{-5} değerindeki birim şekil değiştirme miktarı

ϵ_2 : σ_2 değerindeki birim şekil değiştirme miktarı

3.2.6. Sertleşmiş harçların durabilite deneyleri

3.2.6.1. Kılcal geçirimlilik deneyi

Üretilen harçların kılcal su emme katsayı değerleri $40 \times 40 \times 160$ mm prizma numuneler 24 saat boyunca emilen su miktarının ölçülmesiyle hesaplanmıştır ve deneyi TS EN 480-5 standardına göre yapılmıştır. Numunenin sadece tabandan su almasını sağlamak için tabanın yan yüzeyleri parafinlenerek su emmeleri engellenmiştir. 24 saat sonra sudan çıkarılan numunenin taban yüzeyindeki su nemli bir bezle alınmış ve tartımı yapılmıştır. Aşağıda verilen formül kullanılarak numunelerin kılcal su emme katsayıları hesaplanmıştır.

$$K = Q / (A \times t^{1/2}) \quad (3.11)$$

K: Kılcal su emme katsayısı ($\text{cm}/\text{sn}^{1/2}$)

Q: Emilen su miktarı (cm^3)

A: Suyu temas eden yüzeyin alanı (cm^2)

t: Zaman (sn)



Şekil 3.15. Kılcal su emme tayini deneyi düzeneği

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Harç Bileşenlerin Fiziksel Deneyi Bulguları

Bu bölümde bileşenler üzerinde gerçekleştirilen fiziksel deneyi sonuçları verilmiştir.

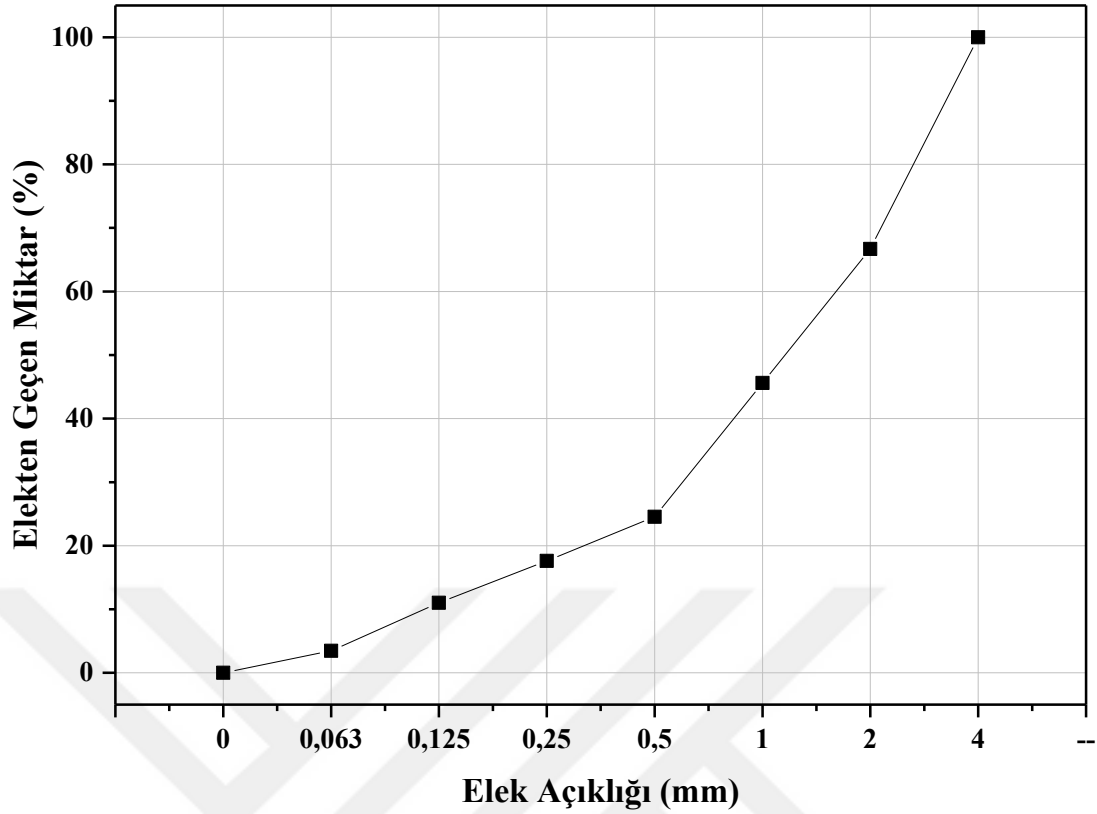
4.1.1. Fiziksel özellikler

Çalışmada agrega olarak kırma kum kullanılmıştır, harç üretimi için 4 mm altı agrega kullanılmıştır. Agreganın özgül ağırlığı tayininde, agrega SDKY halinde kullanılmıştır. Agreganın özgül ağırlığı Le Chatelier balonu yöntemiyle tespit edilmiş olup $2,68 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Bileşenlerin özgül ağırlık değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çimento, silis dumanı ve mikro silikanın özgül ağırlıkları sırasıyla 3,11, 2,26 ve $2,00 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Karışıma girecek malzemelerin miktarları doğru bir şekilde hesaplamak için özgül ağırlık deneyinin düzgün bir şekilde gerçekleştirilmesi önemli bir husustur. Bileşenlerin miktarı numune özelliklerini doğrudan etkilemektedir.

Agreganın gevşek ve sıkışık birim hacim ağırlığı sırasıyla $1,60$ ve $1,74 \text{ g/cm}^3$ olarak saptanmıştır. Agreganın su emme oranı %2,08 olarak bulunmuştur. Son olarak agreganın tane boyut dağılımı bulmak için elek analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’e bakıldığında kırma kumun iri tanelere sahip olduğu görmek mümkündür. Kırma kum incelik modülü 4,31 olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.1. Bileşenlerin özgül ağırlık değerleri

Bileşenler	Özgül Ağırlık
Kırma kum	2,68
Çimento	3,11
Silis dumanı	2,26
Mikro silika	2,01
PVC lifi	1,4



Şekil 4.1. Kırma kum agregasının gradasyon eğrisi

4.2. Harçların Taze Hal Deneyi Bulguları

Taze harçların üzerinde akma tablası ve taze harç birim hacim ağırlık (BHA) tayini deneyleri gerçekleştirilmiştir. PVC atığı içeren lifli harçların işlenebilirliği arttırmak için bağlayıcı miktarının %1 ve %2 oranında akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Harç numunelerin taze birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 4.1 ve Şekil 4.2-7'de sunulmaktadır.

Kontrol numuneleri incelendiğinde, en yüksek yayılma çapı ve birim hacim ağırlık değerlerini sırasıyla 21,5 cm ve 2226,95 g/dm³ olmak üzere KN/L0 numunesi gösterirken, en düşük değerler sırasıyla 17,05 cm ve 1889,79 g/dm³ olmak üzere KN/L3 numunesinde elde edilmiştir.

MS karışım serisi dikkate içerisinde, en yüksek yayılma çapı ve birim hacim ağırlık değerlerini sırasıyla 20,6 cm ve 2196,29 g/dm³ olmak üzere MS5/L0 numunesi gösterirken, en düşük değerler sırasıyla 16,9 cm ve 1686,35 g/dm³ olmak üzere MS15/L3 numunesinde elde edilmiştir.

SD serisi dikkate alındığında, en yüksek yayılma çapı ve birim hacim ağırlık değerlerini sırasıyla 20,4 cm ve 2201,09 g/dm³ olmak üzere SD5/L0 numunesi gösterirken, en düşük değerler sırasıyla 15,7 cm ve 1953,07 g/dm³ olmak üzere SD15/L3 numunesinde elde edilmiştir.

Üretilen kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında mikro silika ve silis dumanı içeren harçların birim hacim ağırlığı daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde, üretilen tüm karışımlarda lif oranının artmasıyla

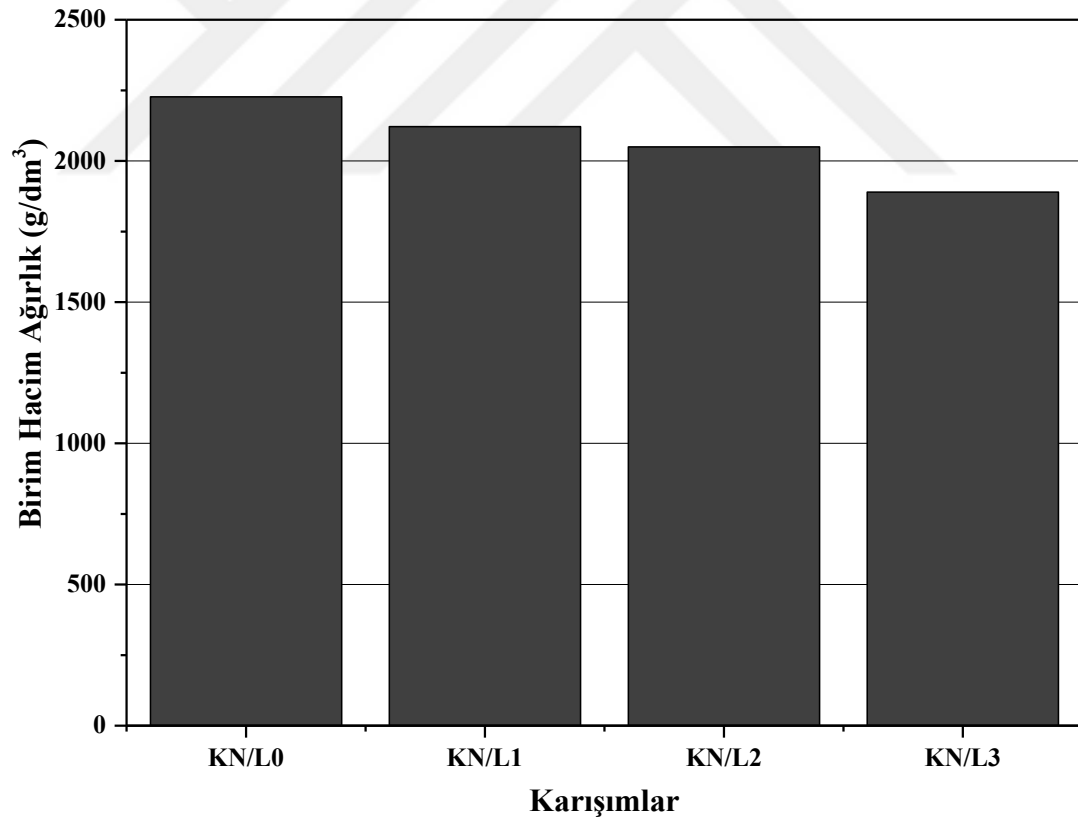
yayılma çapının düştüğü görülmüştür. Bu durum harçların birim hacim ağırlığı için de geçerli. Maksimum lif (%3) içeriğine sahip olan tüm karışımların yayılma çapı ve birim hacim ağırlık değerleri en düşük değerler olduğu saptanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; lif oranının artırılması, gözenekli bir yapı oluşumuna sebep olduğu için harçların birim hacim ağırlıklarını ve işlenebilirliklerini azalttığı söylenebilir. Bu çalışmada kullanılan atık plastik lifin uzunluk ve boyutu birbirlerinden farklı olması ve çimento matrisinin içinde homojen bir şekilde dağılmaması, üretilen harçların yayılma çaplarındaki azalmanın sebebi olarak açıklanabilir. Lif harcın vizkositesini arttırmış ve çimento matrisinin dağılmasını engellemiş, dolayısıyla işlenebilirliğin artmasına neden olmuştur.

Çizelge 4.2. Karışımların taze haldeki BHA ve yayılma çapı değerleri

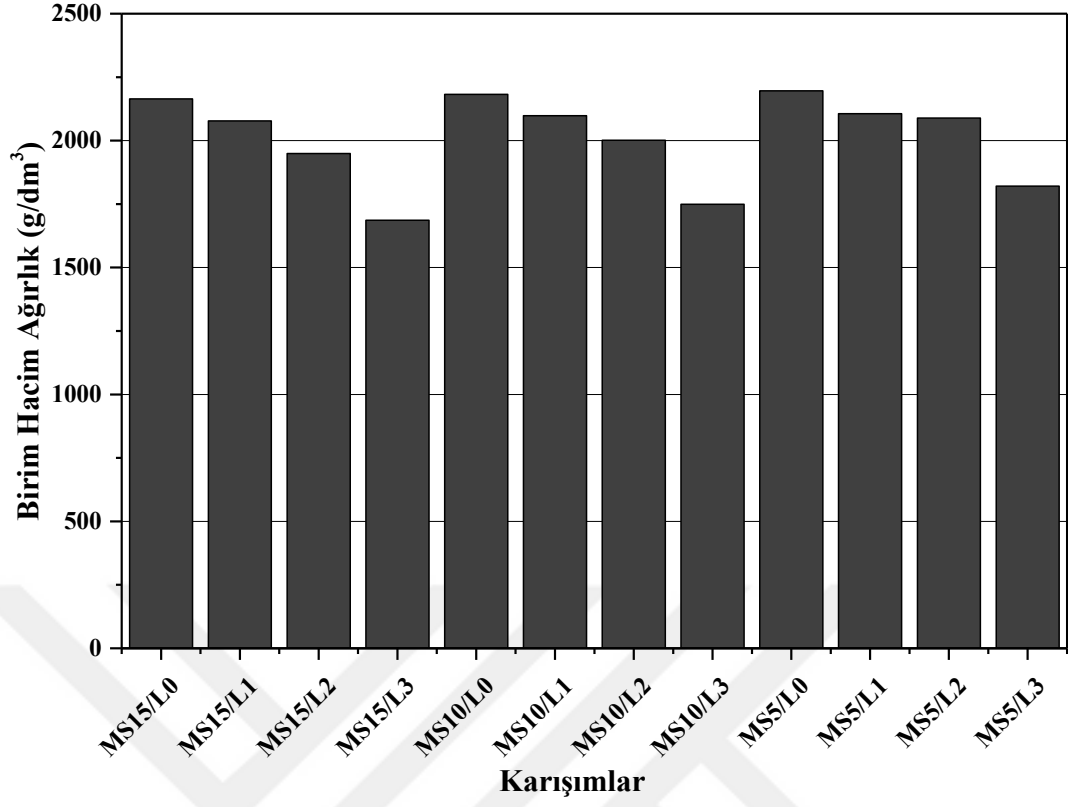
Karışım kodu	BHA (g/dm ³)	Yayılma çapı (cm)
KN/L0	2226,95	21,5
KN/L1	2121,33	18,7
KN/L2	2049,95	17,3
KN/L3	1889,79	17,05
MS15/L0	2164,31	19,5
MS15/L1	2077,62	17,3
MS15/L2	1949,33	17,1
MS15/L3	1686,35	16,9
MS10/L0	2182,49	20
MS10/L1	2097,79	18,2
MS10/L2	2001,49	17,3
MS10/L3	1748,89	17,1
MS5/L0	2196,29	20,6
MS5/L1	2106,04	18,4
MS5/L2	2088,98	17,6
MS5/L3	1820,48	17,3
SD15/L0	2168,74	18,5
SD15/L1	2105,03	17,1
SD15/L2	2073,83	16,5
SD15/L3	1953,07	15,7
SD10/L0	2179,25	19,6
SD10/L1	2170,9	17,9
SD10/L2	2106,85	17,5
SD10/L3	2040,71	16,8
SD5/L0	2201,09	20,4
SD5/L1	2186,39	18,2
SD5/L2	2127,47	17,8
SD5/L3	2095,31	17,3

Elde edilen bulgular önceki çalışmalarla uyumludur. Plastik liflerin çimentolu karışımlarda kullanılmasıyla ilgili yapılan çalışmalarda, işlenebilirliğin kullanılan lifin türü ve oranına bağımsız olarak düştüğü belirtilmiştir. Al-Hadithi ve Hilal (2016) atık

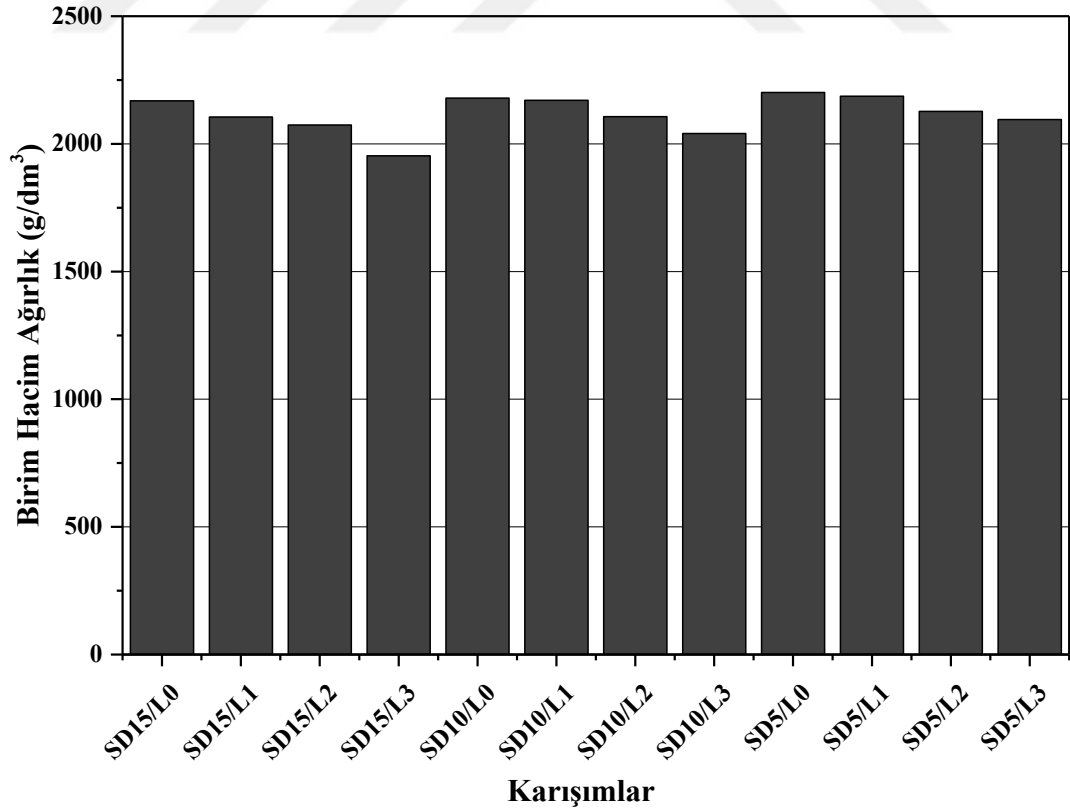
plastik liflerin kendiliğinden yerleşen betonun özellikleri üzerindeki etkileri araştırmak üzer yaptıkları çalışmada, plastik liflerin artmasıyla betonun yayılma çapının düştüğünü bildirmişlerdir. Yazarlar, liflerin birbirlerine dolanarak kümeler oluşturmaları betonun yayılmasını engellediğini ve yayılma çapındaki düşüşün sebebi olduğunu açıklamışlardır. Karahan ve Atış (2011) yaptıkları çalışmada, polipropilen liflerin betonun slump ve taze haldeki birim hacim ağırlık değerlerini düşürdüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca artan lif miktarının işlenebilirliği azalttığı sonucuna varmışlardır. Kurup ve Kumar (2017) atık PVC plastik elektrik kabloları keserek elde ettikleri PVC liflerin betonun üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Atık lifler farklı oranlarda betona eklenmiş ve ayrıca çimento ikamesi olarak %10 oranında silis dumanı kullanılmış. Sonuçlar, lifin eklenmesiyle slump ve taze haldeki birim hacim ağırlık değerlerinde azalma meydana geldiğini göstermiştir. Benzer bir şekilde, silis dumanı içeren numunelerin de işlenebilirlik ve birim hacim ağırlığı referans betona göre daha düşük çıkmıştır. Mazloom vd. (2004) yaptıkları çalışmada, silis dumanı içeren karışımların işlenebilirliği silis dumanı içermeyen karışımlara göre daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Yüksek oranda silis dumanı içeriğine sahip karışımların daha fazla akışkanlaştırıcı dozajına gereksinim duyduğu görülmüştür (Faraj vd. 2019). Silis dumanı içeren betonun süper akışkanlaştırıcıya olan yüksek talebi, süper akışkanlaştırıcının bir kısmının yüzeyinde adsorbe olmasına neden olan çok ince silis dumanı partikül boyutuna atfedilmiştir (Mazloom vd. 2004; Faraj vd. 2019)



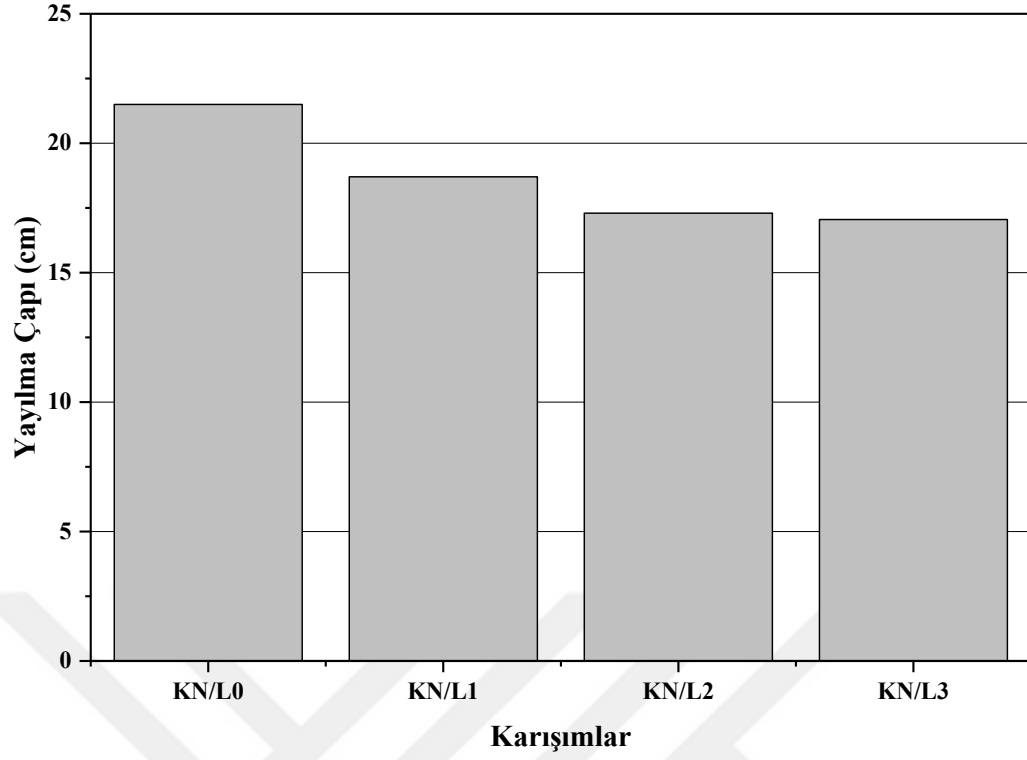
Şekil 4.2. KN karışım serisinin taze haldeki birim hacim ağırlık değerleri



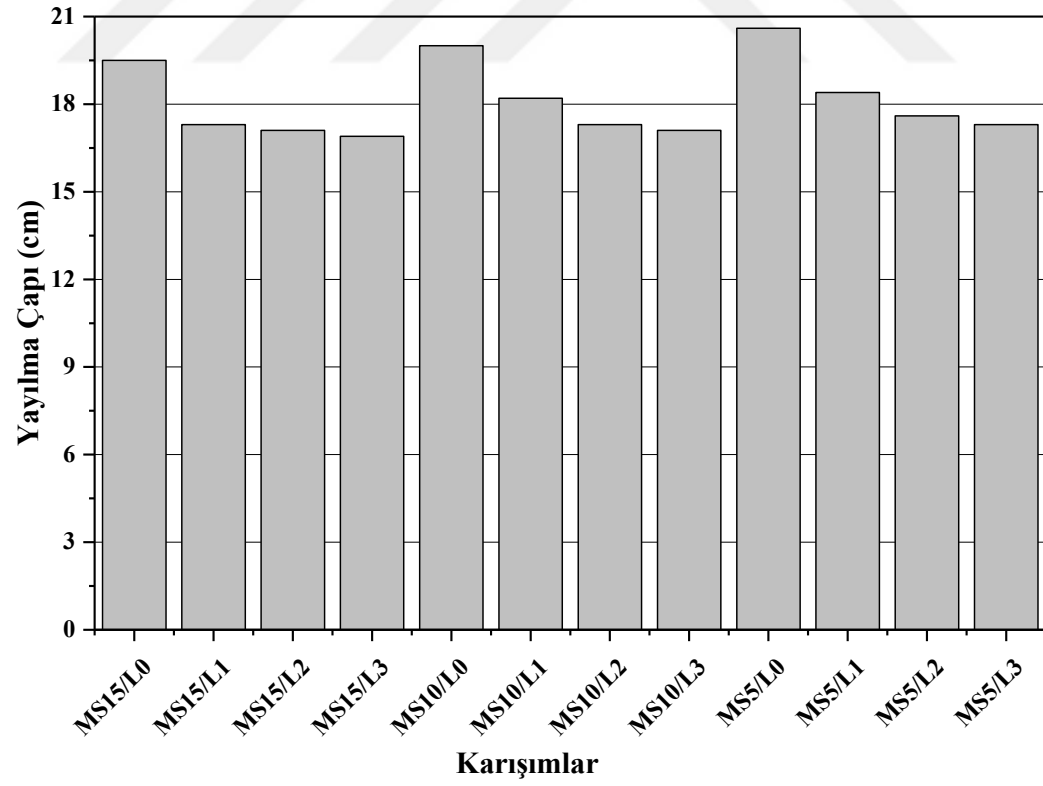
Şekil 4.3. MS karışım serisinin taze haldeki birim hacim ağırlık değerleri



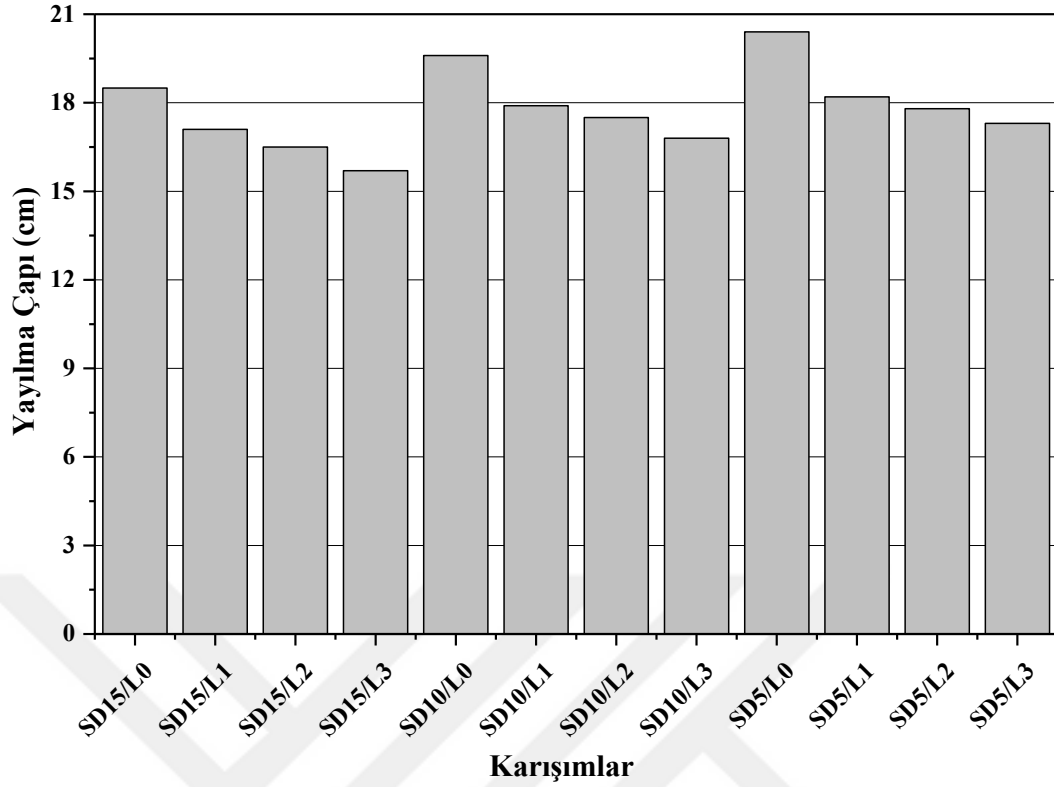
Şekil 4.4. SD karışım serisinin taze haldeki birim hacim ağırlık değerleri



Şekil 4.5. KN karışım serisinin yayılma çapı değerleri



Şekil 4.6. MS karışım serisinin yayılma çapı değerleri



Şekil 4.7. SD karışım serisinin yayılma çapı değerleri

4.3. Sertleşmiş Hal Deneyi Bulguları

4.3.1. Kuru yığın yoğunluk değerleri

Sertleşmiş harçların kuru yığın yoğunluk değerleri Çizelge 4.3 ve Şekil 4.7-10'da verilmektedir. Kontrol numuneleri incelendiğinde, en yüksek kuru yığın yoğunluk değerleri 28. gün ve 90. gün için sırasıyla 2,17 ve 2,18 g/cm³ olmak üzere KN/L0 numunesi gösterirken, en düşük değerler sırasıyla 2,10 ve 2,11 g/cm³ olmak üzere KN/L3 numunesinde elde edilmiştir.

MS serisi dikkate alındığında, en yüksek kuru yığın yoğunluk değerleri 28. gün ve 90. gün için sırasıyla 2,16 ve 2,17 g/cm³ olmak üzere MS5/L0 numunesi gösterirken, en düşük değerler sırasıyla 2,07 ve 2,08 g/cm³ olmak üzere MS15/L3 numunesinde elde edilmiştir.

SD serisi dikkate alındığında, en yüksek kuru yığın yoğunluk değerleri 28. gün ve 90. gün için sırasıyla 2,22 ve 2,23 g/cm³ olmak üzere SD15/L0 numunesi gösterirken, en düşük değerler sırasıyla 2,11 ve 2,12 g/cm³ olmak üzere SD5/L3 numunesinde elde edilmiştir.

Tüm karışımlarda, polimer lifin oranı artması, kuru yığın yoğunluk değerlerinin kademeli bir şekilde düşmesine sebep olmuştur. Bu düşüş, kullanılan polimer lifin özgül ağırlığının kırma kum agregasından daha düşük olmasına bağlanabilir. Elde edilen sonuçlar önceki çalışmalarla uyumludur. Ramezaniyanpour vd. (2013) plastik polipropilen liflerin betonun üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Polipropilen lifler 0 – 4 kg/m³ gibi farklı oranlarda betona eklenmiştir. Eklenen liflerin betonun yoğunluğunu kademeli bir

şekilde düşürmüştür. Lifsiz olan karışımın yoğunluğu $2,42 \text{ kg/m}^3$ iken, bu değer 4 kg/m^3 lif içeriğine sahip karışım için $2,34 \text{ kg/m}^3$ olmuştur. Senhadji vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, atık PVC plastiğin harcın üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada PVC atığı ince kum ile %0, %10, %30, %50 ve %70 oranlarında hacimce yer değişmiştir. PVC ikame oranı arttıkça yoğunluk değerlerinde kaydadeğer bir düşüş gözlemlenmiştir. İnce kumun %70 oranında PVC plastiğiyle yer değiştirdiği harcın yoğunluğu normal kontrol harca kıyasla %30 düşmüştür. Bu düşüş PVC partiküllerinin yoğunluğunun normal kumdan daha düşük olmasına bağlanılmıştır.

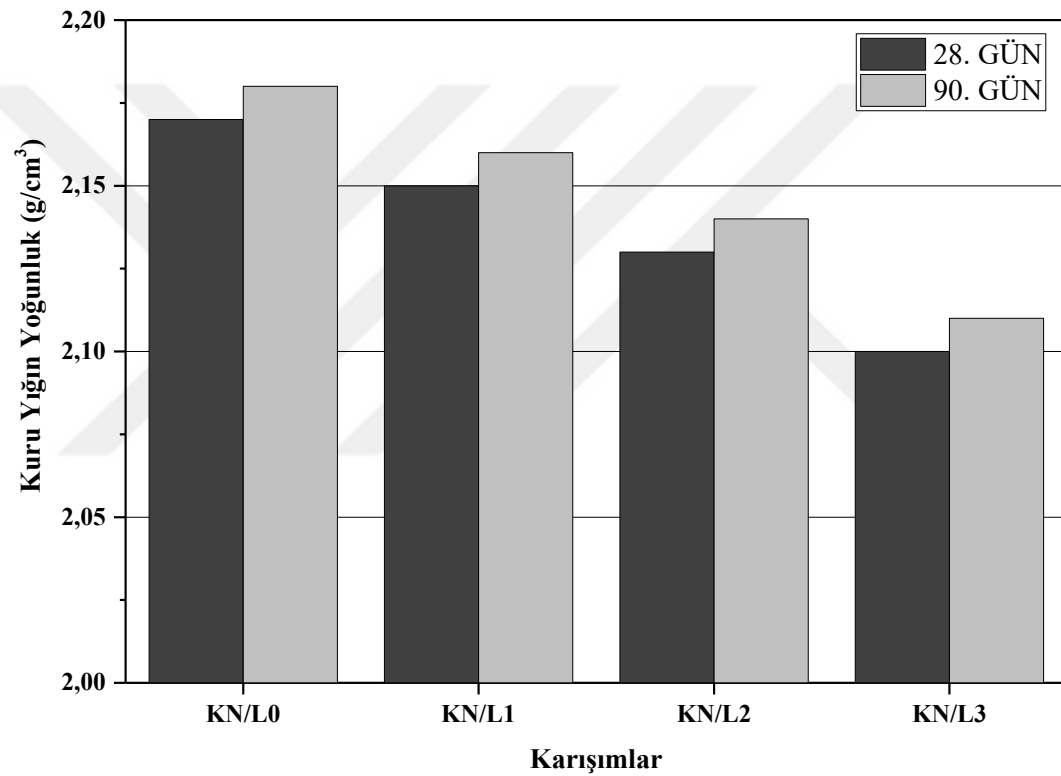
Çizelge 4.3. Karışımların kuru yığın yoğunluk değerleri (g/cm^3)

Karışım Kodu	28. Gün	90. Gün
KN/L0	2,17	2,18
KN/L1	2,15	2,16
KN/L2	2,13	2,14
KN/L3	2,10	2,11
MS15/L0	2,13	2,14
MS15/L1	2,11	2,12
MS15/L2	2,09	2,11
MS15/L3	2,07	2,08
MS10/L0	2,15	2,16
MS10/L1	2,12	2,14
MS10/L2	2,11	2,12
MS10/L3	2,08	2,09
MS5/L0	2,16	2,17
MS5/L1	2,14	2,15
MS5/L2	2,12	2,13
MS5/L3	2,09	2,10
SD15/L0	2,22	2,23
SD15/L1	2,19	2,21
SD15/L2	2,16	2,18
SD15/L3	2,14	2,15
SD10/L0	2,20	2,21
SD10/L1	2,17	2,18
SD10/L2	2,15	2,16
SD10/L3	2,12	2,14
SD5/L0	2,18	2,20
SD5/L1	2,16	2,17
SD5/L2	2,14	2,15
SD5/L3	2,11	2,12

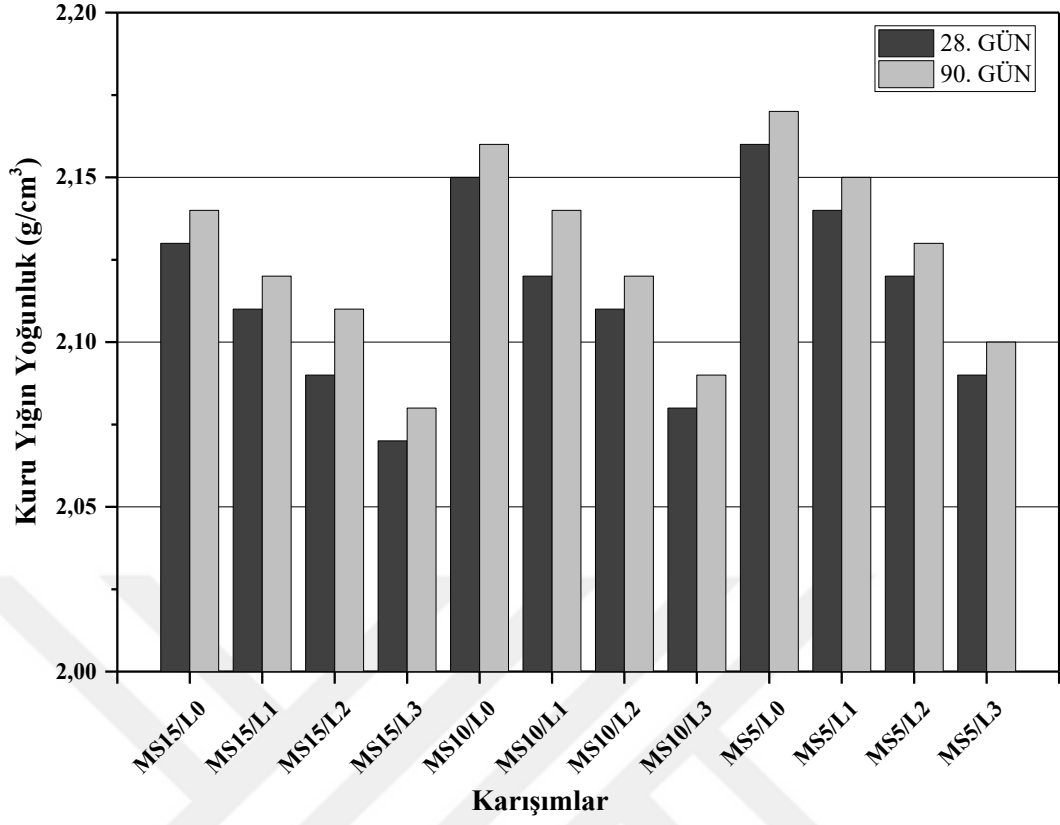
Silis dumanının çimento ikamesi olarak kullanılması, kuru yığın yoğunluk değerlerini arttırdığı görülmüştür. Silis dumanı yer değiştirme oranı arttıkça yığın yoğunluk da artmıştır. Silis dumanın tane boyutunun çimentonunkinden daha küçük olması, daha iyi tane boyut dağılımı etkisi göstererek boşluk oranının düşmesini sağlamış, böylece karışımın ağırlığının artmasına neden olmuştur. Benzer sonuçların elde edildiği çalışmalar literatürde mevcuttur. Gupta vd. (2016) yaptıkları çalışmada silis dumanın %10 çimentoyla yer değiştirmesi beton yoğunluğunu 0,35, 0,45 ve 0,55 su/çimento oranı için sırasıyla %1,2, %1,4 ve %1,7 oranında arttırdığı bildirmişlerdir. Koçkal (2013) yaptığı deneysel çalışmada, silis dumanının çimento ikamesi olarak oranı arttıkça, kuru yığın yoğunluğun arttığını göstermiştir. Wang vd. (2020), silis dumanın %1 oranında çimentoyla yer değiştirmenin köpük beton üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Sertleşmiş betonun kuru yoğunluğunu 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süresi sonunda ölçüp değerleri kaydetmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, numune yaşının ilerlemesiyle, silis dumanı içeren betonların kuru yoğunluğu kontrol betonunkinden daha yüksek değerler aldığını göstermiştir. Yığın yoğunluktaki bu artışın nedenini silis dumanının partikül boyutunun çimentonunkinden daha küçük olmasına bağlanılmıştır. Daha küçük partikül boyutuna sahip silis dumanı, matrisin içindeki boşlukları daha etkili bir şekilde doldurarak daha kompakt bir yapının oluşmasına olanak sağlamıştır.

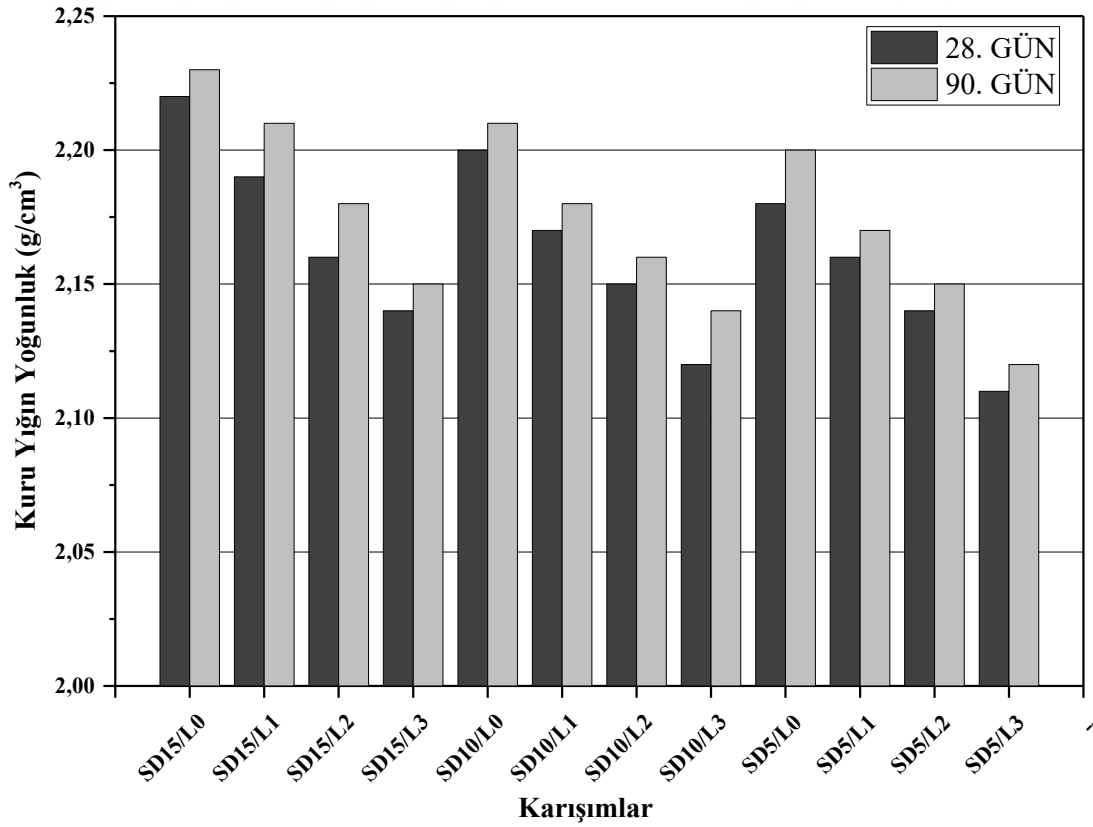
Çimento ikamesi olarak mikro silika kullanılan harçlarda kuru yığın yoğunluk değerleri kontrol numunesinden daha düşük çıkmış olsa da aradaki farkın çok fazla olmadığı görülmüştür. 90. günde elde edilen değerlere bakıldığında, değerlerin 28. günle kıyasla yükseldiği gözlemlenmiştir. Silis dumanı içeren harçların kuru yığın yoğunluk değerleri kontrol ve mikro silika içeren harçlardan daha yüksek değerler almıştır.



Şekil 4.8. KN karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri



Şekil 4.9. MS karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri



Şekil 4.10. SD karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri

4.3.2. SDKY yığın yoğunluk değerleri

Karışımların SDKY yığın yoğunluk değerleri Çizelge 4.4 ve Şekil 4.10-13’de verildiği gibidir. Kontrol numuneleri incelendiğinde, en yüksek SDKY yığın yoğunluk değerleri 28. gün ve 90. gün için sırasıyla 2,27 ve 2,29 g/cm³ olmak üzere KN/L0 numunesi gösterirken, en düşük değerler sırasıyla 2,18 ve 2,20 g/cm³ olmak üzere KN/L3 numunesinde elde edilmiştir.

MS serisi dikkate alındığında, en yüksek kuru yığın yoğunluk değerleri 28. gün ve 90. gün için sırasıyla 2,26 ve 2,27 g/cm³ olmak üzere MS5/L0 numunesi gösterirken, en düşük değerler sırasıyla 2,18 ve 2,19 g/cm³ olmak üzere MS15/L3 numunesinde elde edilmiştir.

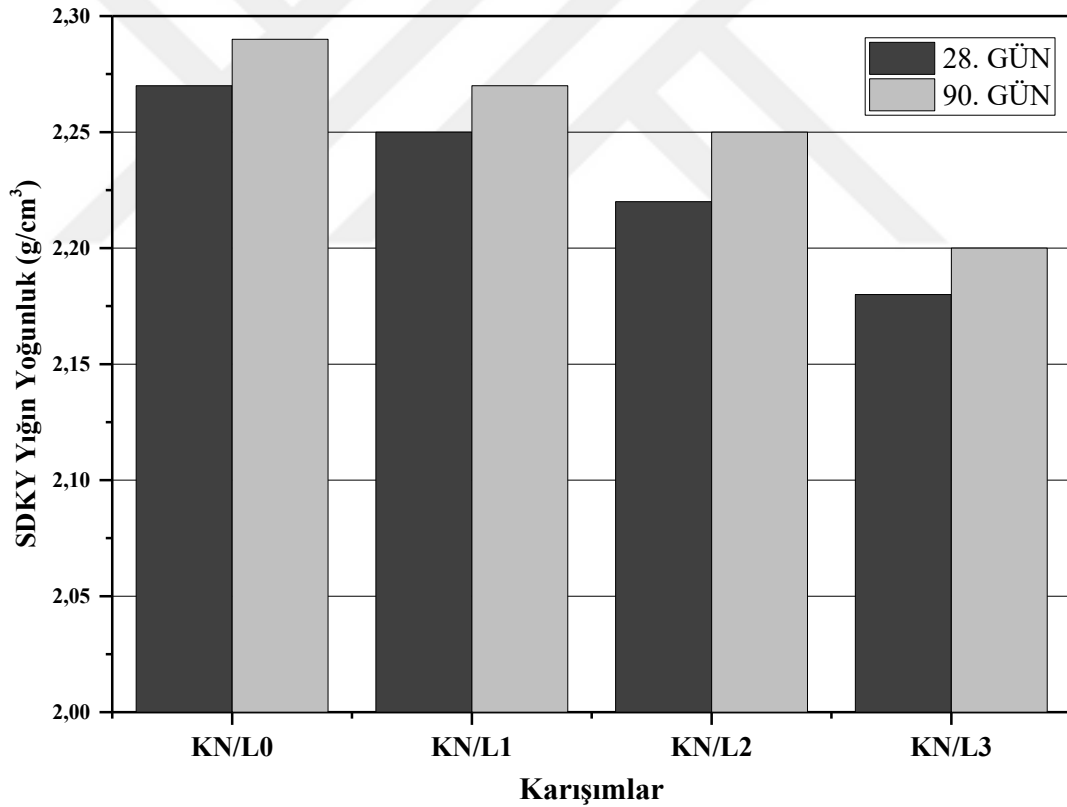
SD serisi dikkate alındığında, en yüksek kuru yığın yoğunluk değerleri 28. gün ve 90. gün için sırasıyla 2,32 ve 2,34 g/cm³ olmak üzere SD15/L0 numunesi gösterirken, en düşük değerler sırasıyla 2,21 ve 2,23 g/cm³ olmak üzere SD5/L3 numunesinde elde edilmiştir.

Çizelge 4.4. Karışımların SDKY yığın yoğunluk değerleri (g/cm³)

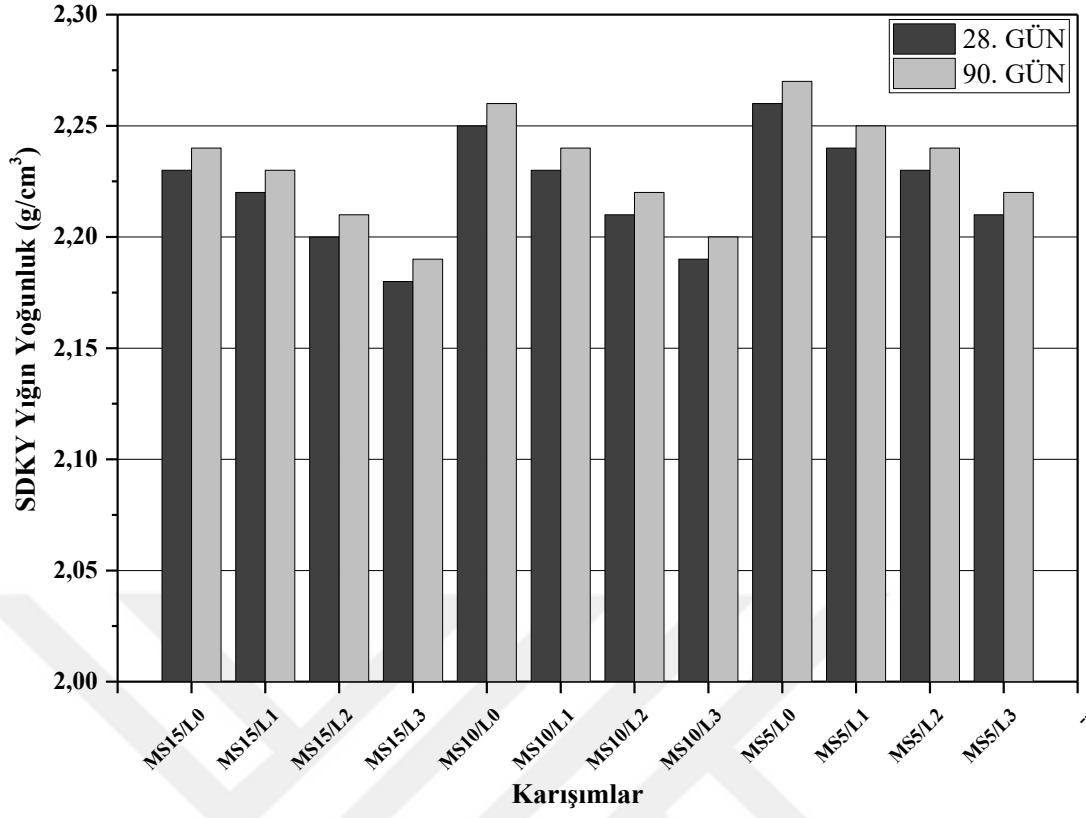
Karışım Kodu	28. Gün	90. Gün
KN/L0	2,27	2,29
KN/L1	2,25	2,27
KN/L2	2,22	2,25
KN/L3	2,18	2,20
MS15/L0	2,23	2,24
MS15/L1	2,22	2,23
MS15/L2	2,20	2,21
MS15/L3	2,18	2,19
MS10/L0	2,25	2,26
MS10/L1	2,23	2,24
MS10/L2	2,21	2,22
MS10/L3	2,19	2,20
MS5/L0	2,26	2,27
MS5/L1	2,24	2,25
MS5/L2	2,23	2,24
MS5/L3	2,21	2,22
SD15/L0	2,32	2,34
SD15/L1	2,29	2,31
SD15/L2	2,27	2,29
SD15/L3	2,26	2,27
SD10/L0	2,30	2,32
SD10/L1	2,28	2,30
SD10/L2	2,25	2,27
SD10/L3	2,23	2,25
SD5/L0	2,28	2,30
SD5/L1	2,26	2,28
SD5/L2	2,24	2,26
SD5/L3	2,21	2,23

Karışımlarda artan plastik PVC lif oranıyla SDKY yığın yoğunluk değerlerin düşmesine sebep olmuştur. Plastik liflerin yoğunluğu, çimento ve kırma kum agregası yoğunluklarından daha düşük olması nedeni ile plastik lif oranının artması karışım yoğunluğuna düşüş olarak yansımıştır. Koçkal ve Çamurlu (2020) agrega olarak kalkerli kumun kullanıldığı harç numunelerde polipropilen lif oranının artması sonucunda SDKY yığın yoğunluk değerlerinde düşüşün meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bu düşüşün sebebini gözenekliğe neden olabilecek polipropilen liflerin hidrofobik davranışına ve liflerin düşük yoğunluğuna bağlamışlardır.

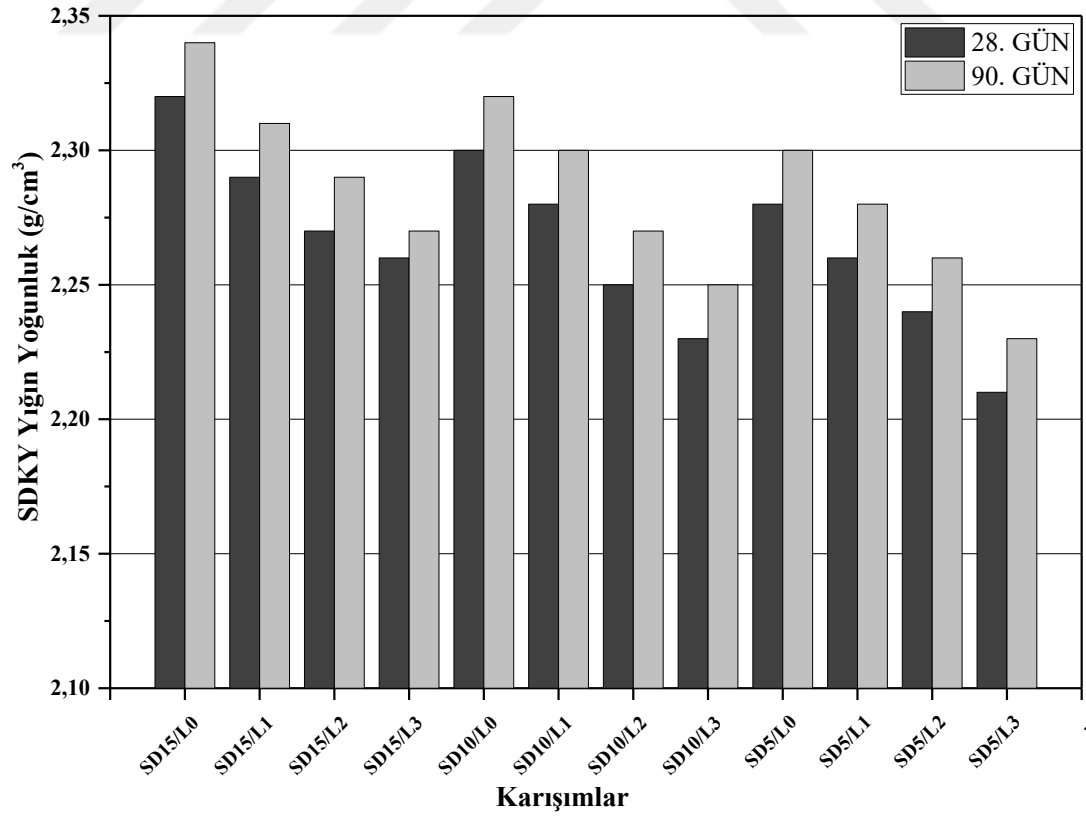
Silis dumanı içeren karışımların SDKY yığın yoğunluk değerleri hem kontrol karışımlardan hem de mikro silika içeren karışımlardan daha yüksek çıkmıştır. Silis dumanının tane boyutunun çimentonunkinden daha küçük olması ve mimeral yapısı sayesinde daha iyi tane boyut dağılımı etkisi göstererek boşluk oranının düşmesini sağlamış, böylece karışımın ağırlığının artmasına neden olmuştur. Bunun yanında silis dumanının çimento ikamesi olarak yer değiştirme miktarı arttıkça, SDKY yığın yoğunluk değerleri de artmıştır. Ancak bu durum mikro silika içeren karışımlarda tam tersi olmuştur. Mikro silikanın yer değiştirme miktarı arttıkça, SDKY yığın yoğunluk değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Kuru yığın yoğunluklarda olduğu gibi, numune yaşı ilerledikçe SDKY yığın yoğunlukları az da olsa artış göstermiştir.



Şekil 4.11. KN karışım serisinin SDKY yığın yoğunluk değerleri



Şekil 4.12. MS karışım serisinin SDKY yığın yoğunluk değerleri



Şekil 4.13. SD karışım serisinin SDKY yığın yoğunluk değerleri

4.3.3. Görünür boşluk değerleri

Harçların görünür boşluk değerleri Çizelge 4.5 ve Şekil 4.14-16'de verildiği gibidir. Kontrol numuneleri incelendiğinde, en yüksek görünür boşluk değerleri 28. gün ve 90. gün için sırasıyla %9,91 ve %9,74 olmak üzere KN/L3 numunesi gösterirken, en düşük değerler ise sırasıyla %9,48 ve %9,27 olmak üzere KN/L0 numunesinde elde edilmiştir.

MS serisi dikkate alındığında, en yüksek görünür boşluk değerleri 28. gün ve 90. gün için sırasıyla %11,46 ve %11,16 olmak üzere MS15/L3 numunesi gösterirken, en düşük değerler ise sırasıyla %10 ve %9,88 olmak üzere MS5/L0 numunesinde elde edilmiştir.

SD serisi dikkate alındığında, en yüksek görünür boşluk değerleri 28. gün ve 90. gün için sırasıyla %8,57 ve %8,42 olmak üzere SD5/L3 numunesi gösterirken, en düşük değerler ise sırasıyla %6,50 ve %6,34 olmak üzere SD15/L0 numunesinde elde edilmiştir.

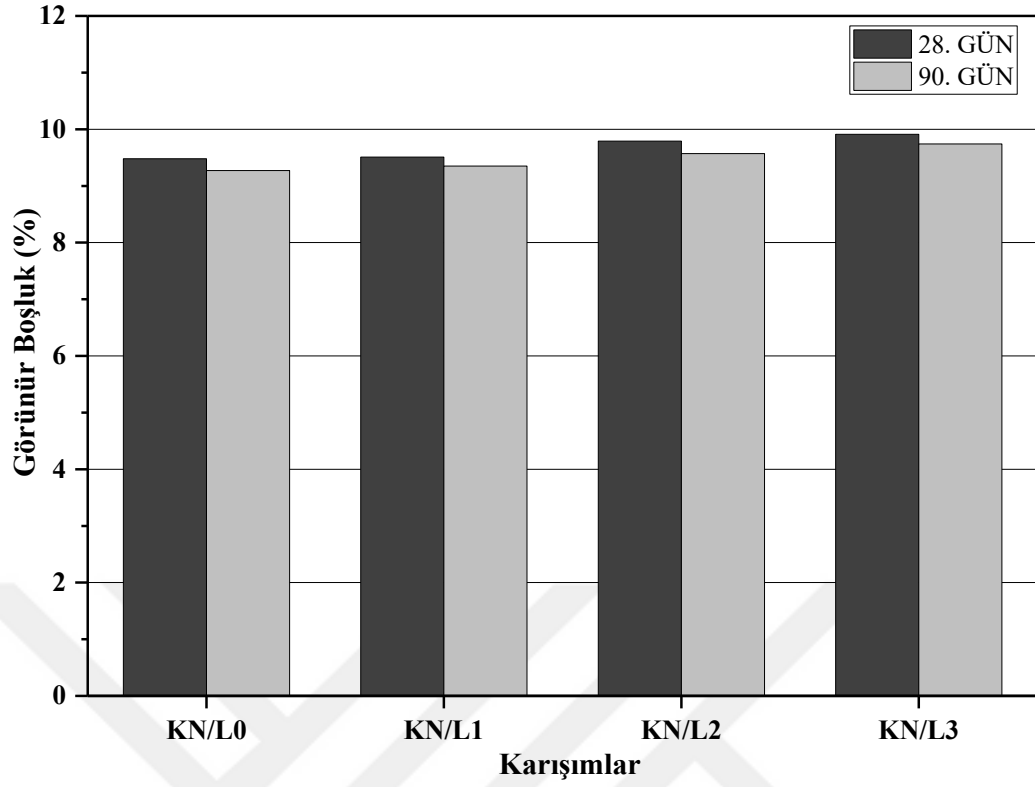
Çalışmada çimento ikamesi olarak farklı oranlarda kullanılan mikro silika ve silis dumanı, boşluk oranları üzerinde farklı etkiler oluşturmuşlar. Silis dumanı içeren harçların boşluk oranları kontrol numuneleriyle kıyasla daha düşük değerler alırken, mikro silika içeren harçların boşluk oranları kontrol numunelerinkinden daha yüksek çıkmıştır. Artan silis dumanının içeriğiyle boşluk oranlarında düşüş gözlemlenirken, mikro silikanın artan içeriğiyle harçların boşluk oranlarında artış meydana geldiği görülmüştür. Bir başka deyişle silis dumanının artmasıyla boşluk miktarı azalma eğilimi gösterirken, mikro silikanın artmasıyla boşluk oranları artarak yüksek değerler almıştır. Kontrol numunesiyle karşılaştırıldığında 28. günde ölçülen görünür boşluk değerleri %15, %10 ve %5 silis dumanı içeren numuneler için sırasıyla %31,44, %25,63 ve %13,18 oranında düşmüştür. Mikro silika içeren harçlarla kıyaslandığında 28. günde ölçülen görünür boşluk değerleri %15, %10 ve %5 silis dumanı içeriğine sahip olan numuneler için aynı oranlarda mikro silika içeriğine sahip olanlara göre sırasıyla %40,04, %31,75 ve %17,70 oranında düşmüştür. Lif içeriğinin görünür boşluk oranı üzerindeki etkisi incelendiğinde, lif yüzdesinin artması, karışımlarda boşluk oranının artmasına neden olduğu görülmüştür. Liflerin çimento matrisi içinde homojen bir dağılım göstermemsi boşluk oranının artmasına yol açmıştır, dolayısıyla gözenekli bir yapının oluşmasına ve harçların boşluk oranlarının artmasına neden olmuştur.

Elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla paralellik göstermiştir. Fallah ve Nematzadeh (2017) tarafından yapılan çalışmada, polipropilen ve makro-polimerik liflerin yüksek dayanımlı beton üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Polipropilen lifler %0, %0,1, %0,2, %0,3, %0,4 ve %0,5 oranlarda, mikro-polimerik lifler ise %0, %0,25, %0,5, %0,75, %1 ve %1,25 oranlarda betona eklenmiştir. Polipropilen liflerin %0,3 ve mikro-polimerik liflerin %0,75 oranında betonun porozitesini düşürdüğü ancak bahsi geçen oranlardan daha fazla eklendiğinde poroziteyi arttırdığı rapor edilmiştir. Liflerin yüksek oranlarda eklenmesi, liflerin topaklanmasına ve betonun içerisinde boşluk oluşturmaya neden olarak boşluk oranını arttırmıştır. Boşluk oranları, %1 ve %1,25 mikro-polimerik lif ve %0,4 ve %0,5 polipropilen lif oranına sahip olan betonlar için kontrol betonla kıyasla sırasıyla %2,38, %3,39 ve 2,61, %2,76 oranlarda artmıştır. Aynı çalışmada silis dumanının kullanılmasının betonun boşluk oranını düşürdüğü bildirilmiştir. %12 silis dumanı içeriğine sahip olan betonun porozite değerini %7,96'dan %6,53'e düşürmüştür. Bu düşüşün sebebi, silis dumanının parçacık boyutu çimentonunkinden çok daha küçük olması ve matris içindeki boşlukları doldurma özelliğinin yüksek olmasına bağlanmıştır.

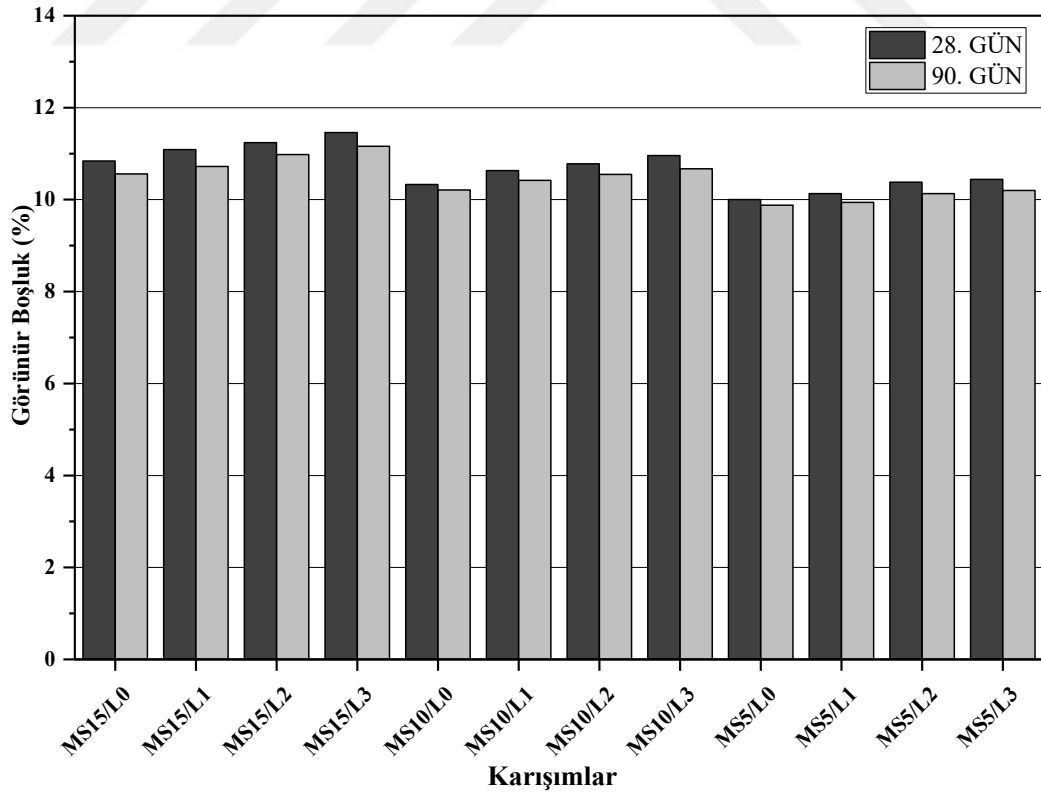
Karahan ve Atış (2011) yaptıkları çalışmada, polipropilen liflerin betonun porozite değerlerini arttırdığını bildirmişlerdir. Kontrol karışımla kıyaslandığında, %0,05, %0,10 ve %0,20 lif içeriğine sahip karışımların porozite değerlerinde sırasıyla %6, %18 ve %28 artış meydana gelmiştir. Porozite değerleri %0, %0,05, %0,10 ve %0,20 lif oranına sahip karışımlar için sırasıyla %7,09, %7,51, %8,28 ve %8,97 olarak ölçülmüştür. Bnezer bir şekilde aynı lif içeriğine sahip %15 oranında uçucu kül içeren karışımın poroziteyi yaklaşık olarak %11, %14 ve %18 oranında arttırdığı rapor edilmiştir.

Çizelge 4.5. Karışımların görünür boşluk değerleri (%)

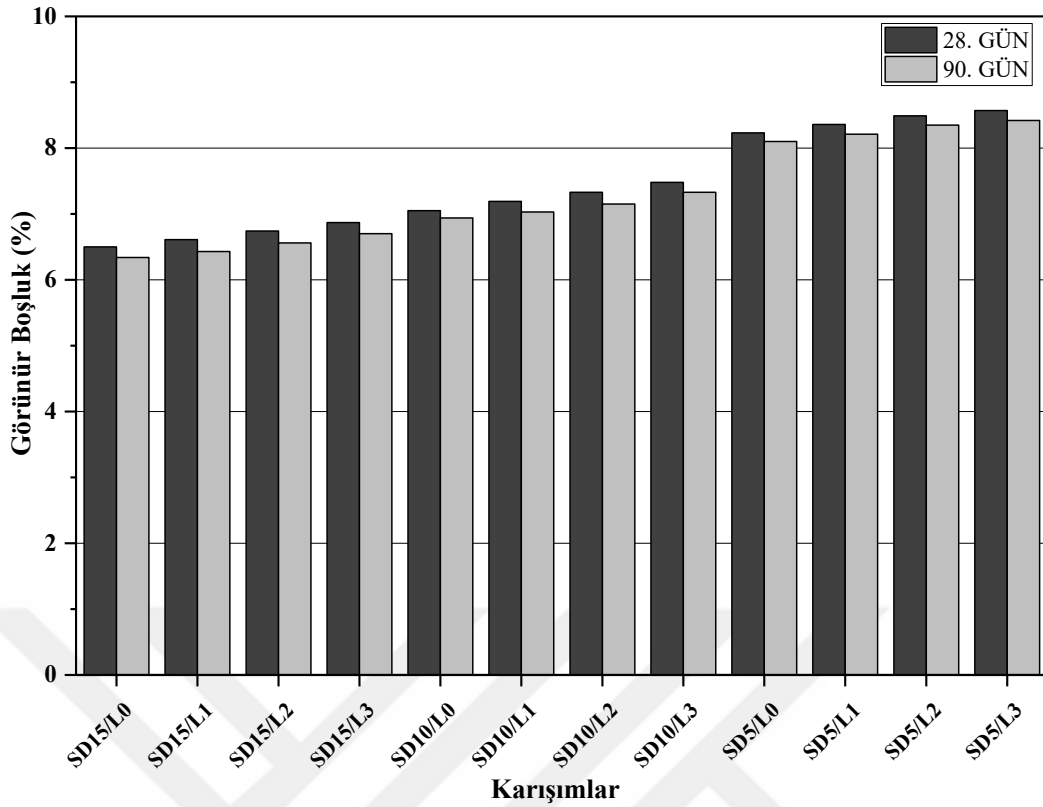
Karışım Kodu	28. Gün	90. Gün
KN/L0	9,48	9,27
KN/L1	9,51	9,35
KN/L2	9,79	9,57
KN/L3	9,91	9,74
MS15/L0	10,84	10,56
MS15/L1	11,09	10,72
MS15/L2	11,24	10,98
MS15/L3	11,46	11,16
MS10/L0	10,33	10,21
MS10/L1	10,63	10,42
MS10/L2	10,78	10,55
MS10/L3	10,96	10,67
MS5/L0	10,00	9,88
MS5/L1	10,13	9,94
MS5/L2	10,38	10,13
MS5/L3	10,44	10,20
SD15/L0	6,50	6,34
SD15/L1	6,61	6,43
SD15/L2	6,74	6,56
SD15/L3	6,87	6,70
SD10/L0	7,05	6,94
SD10/L1	7,19	7,03
SD10/L2	7,33	7,15
SD10/L3	7,48	7,33
SD5/L0	8,23	8,10
SD5/L1	8,36	8,21
SD5/L2	8,49	8,35
SD5/L3	8,57	8,42



Şekil 4.14. KN serisinin görünür boşluk değerleri (%)



Şekil 4.15. MS serisinin görünür boşluk değerleri (%)



Şekil 4.16. SD serisinin görünür boşluk değerleri (%)

4.3.4. Su emme yüzdesi değerleri

Karışımların su emme değerleri Çizelge 4.6 ve Şekil 4.17-19’de sergilenmektedir. Kontrol numuneleri incelendiğinde, en yüksek su emme değerleri 28. gün ve 90. gün için sırasıyla %4,73 ve %4,57 olmak üzere KN/L3 numunesi gösterirken, en düşük değerler sırasıyla %4,34 ve %4,22 olmak üzere KN/L0 numunesinde elde edilmiştir.

MS serisi dikkate alındığında, en yüksek su emme değerleri 28. gün ve 90. gün için sırasıyla %5,55 ve 5,38 olmak üzere MS15/L3 numunesi gösterirken, en düşük değerler sırasıyla %4,63 ve %4,49 olmak üzere MS5/L0 numunesinde elde edilmiştir.

SD serisi dikkate alındığında, en yüksek su emme değerleri 28. gün ve 90. gün için sırasıyla %4,28 ve %4,12 olmak üzere SD15/L3 numunesi gösterirken, en düşük değerler sırasıyla %2,97 cm ve %2,86 olmak üzere SD15/L0 numunesinde elde edilmiştir.

Karışımların ağırlıkça su emme yüzdeleri değişen mikro silika ve silis dumanı oranlarıyla farklı sonuçlar almıştır. Silis dumanı içeren harçların su emme değerleri kontrol numuneleriyle kıyasla daha düşük değerler alırken, mikro silika içeren harçların su emme değerleri kontrol numunelerinkinden daha yüksek çıkmıştır. Harçların su emme değerleri artan silis dumanı değerleriyle düşerken, mikro silikanın artan içeriğiyle daha yüksek değerler aldığı gözlemlenmiştir. Bir başka deyişle silis dumanının artmasıyla su emme değerlerinde azalma gözlemlenirken, mikro silikanın artmasıyla bu değerlerin arttığını tespit edilmiştir. Silis dumanının ince tane boyutu çimentonunkinden daha küçük olması matrisin içindeki ince malzeme oranının artmasına ve dolayısıyla boşlukları doldurup geçirimsizliği arttırmasına olanak sağlamıştır. Ancak çalışmada kullanılan mikro silikanın tane boyutu hem çimento hem de silis dumaninkinden daha büyük olması

gözenek oranının artmasına yol açarak su emme oranını arttırmıştır. Kontrol numunesiyle karşılaştırıldığında 28. günde ölçülen ağırlıkça su emme değerleri %15, %10 ve %5 silis dumanı içeren numuneler için sırasıyla %31,57, %26,26 ve %13,13 oranında düşmüştür. Mikro silika içeren harçlarla kıyaslandığında 28. günde ölçülen ağırlıkça su emme değerleri %15, %10 ve %5 silis dumanı içeriğine sahip olan numuneler için aynı oranlarda mikro silika içeriğine sahip olanlara göre sırasıyla %41,76, %33,33 ve %18,57 oranında düşmüştür. Lif içeriğinin su emme değerleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, lif yüzdesinin artması, karışımlarda su emme değerlerinin artmasına neden olduğu görülmüştür. Liflerin çimento matrisi içinde homojen bir dağılım göstermemesi ve topaklanması boşluk oranının artmasına yol açmıştır, dolayısıyla gözenekli bir yapının oluşmasına ve harçların fazla su emmesine olanak sağlamıştır (Fallah ve Nematzadeh 2017). Hannawi vd. (2010) yapmış olduğu çalışmada iki farklı plastik agregayı (PET ve polikarbonat) ince kum agregasıyla hacimce %3, %10, %20 ve %50 gibi farklı oranlarda yer değiştirerek harç üretiminde kullanmışlardır. Yazarlar, plastik agreganın harçların görünür boşluk ve su emme oranı arttırdığı sonucuna varmışlardır.

Çizelge 4.6. Karışımların su emme değerleri (%)

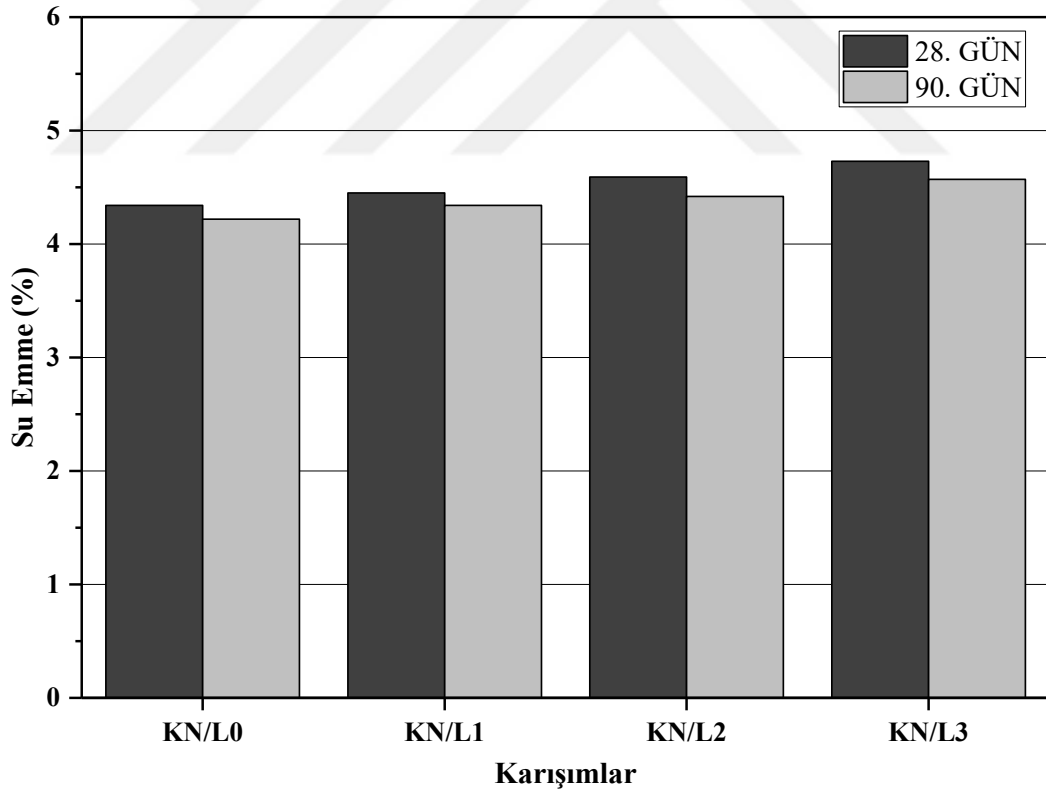
Karışım Kodu	28. Gün	90. Gün
KN/L0	4,34	4,22
KN/L1	4,45	4,34
KN/L2	4,59	4,42
KN/L3	4,73	4,57
MS15/L0	5,15	5,05
MS15/L1	5,29	5,16
MS15/L2	5,39	5,26
MS15/L3	5,55	5,38
MS10/L0	4,80	4,68
MS10/L1	4,98	4,87
MS10/L2	5,09	4,96
MS10/L3	5,22	5,13
MS5/L0	4,63	4,49
MS5/L1	4,79	4,55
MS5/L2	4,92	4,75
MS5/L3	5,07	4,94
SD15/L0	2,97	2,86
SD15/L1	3,12	2,97
SD15/L2	3,25	3,14
SD15/L3	3,36	3,23
SD10/L0	3,20	3,09
SD10/L1	3,36	3,21
SD10/L2	3,48	3,34
SD10/L3	3,61	3,47
SD5/L0	3,77	3,61
SD5/L1	3,92	3,79
SD5/L2	4,13	3,97
SD5/L3	4,28	4,12

Karahan ve Atış (2011) yaptıkları çalışmada, polipropilen liflerin betonun su emme değerlerini arttırdığını bildirmişlerdir. Kontrol karışımla kıyaslandığında, %0,05, %0,10 ve %0,20 lif içeriğine sahip karışımların su emme değerlerinde sırasıyla %6, %18

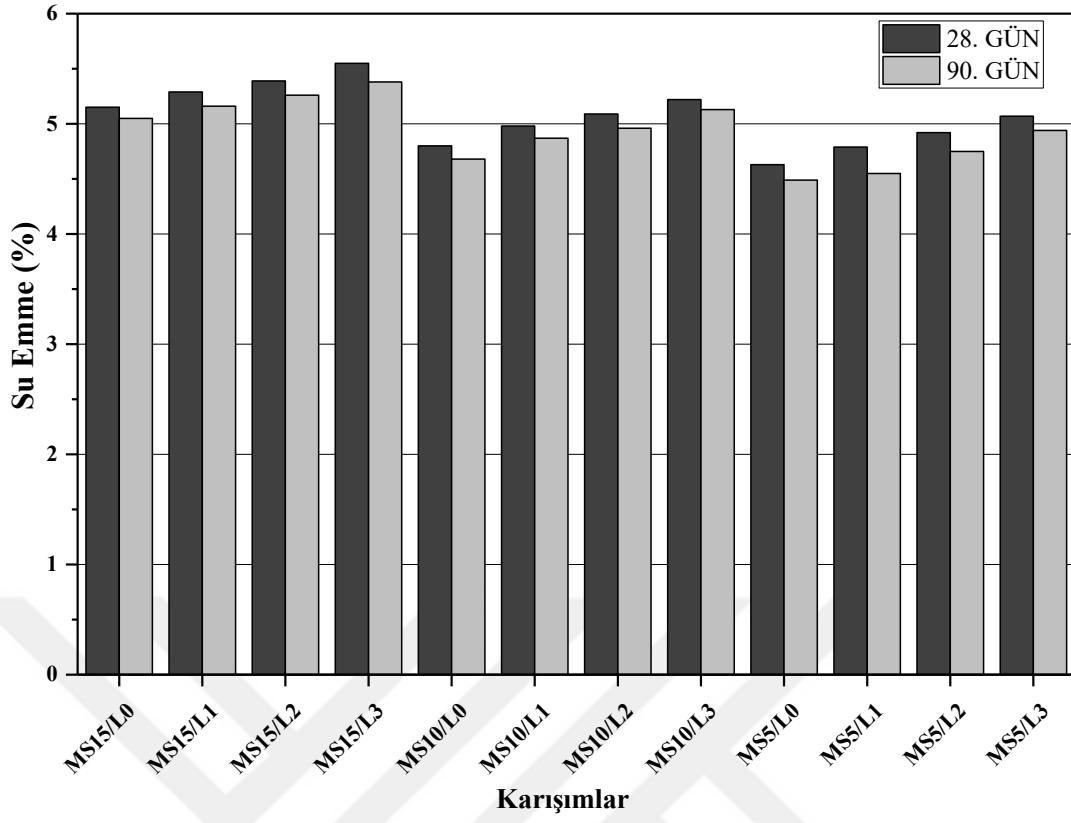
ve %28 artış meydana gelmiştir. Su emme değerleri %0, %0,05, %0,10 ve %0,20 lif oranına sahip karışımlar için sırasıyla %2,86, %3,04, %3,38 ve %3,67 olarak ölçülmüştür. Fallah ve Nematzadeh (2017) yaptıkları çalışmada farklı hacim oran ve boyutlara sahip polimerik lif ve polipropilen lif kullanmışlardır. Polimerik lifler su emme değerlerini düşürürken, polipropilen lifler su emme değerleri arttırmıştır. Yazarlar, yüksek oranlarda eklenen polipropilen liflerin karışımların su emme davranışı üzerinde olumsuz etki oluşturduğunu bildirmişlerdir.

Jalal vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada silis dumanın su emme değerleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, silis dumanı %10 oranında çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Sonuçlar %10 silis dumanı eklemenin 400 ve 500 kg/m³ dozajlı bağlayıcı oranı için, su emme değerlerini sırasıyla %31 ve %34 oranında düşürdüğünü göstermiştir. Koçkal (2013) yaptığı çalışmada silis dumanının %5 ve %10 oranlarında çimentoyla yer değiştirmesi, su emme değerini %27,74 ve %46,42 oranında azalttığını bildirmiştir.

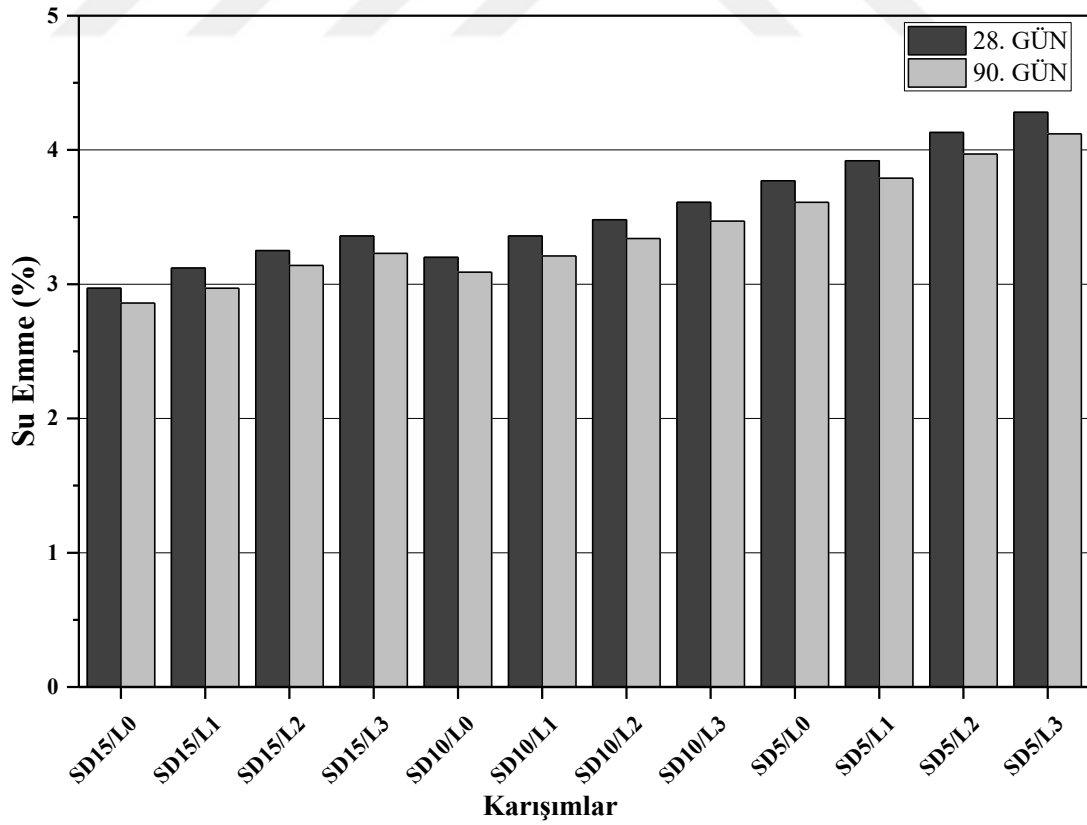
Su emme oranıyla harçların kuru yığın yoğunlukları arasında ters bir ilişki tespit edilmiştir. Kuru yığın yoğunluğu düşük olan harçların su emme değerleri yüksek çıkmıştır. Harçların su emme değerleriyle görünür boşluk oranları arasında ise doğru orantılı bir ilişki vardır.



Şekil 4.17. KN karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri



Şekil 4.18. MS karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri



Şekil 4.19. SD karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri

4.3.5. Eğilmede çekme dayanımı değerleri

Eğilmede çekme dayanımı sonuçları Çizelge 4.7 ve Şekil 4.20-22’de gösterilmektedir. Kontrol numuneleri incelendiğinde, en yüksek eğilmede çekme dayanımlarını 28. gün ve 90. gün için sırasıyla 10,48 ve 12,90 MPa olmak üzere KN/L0 numunesi gösterirken, en düşük değerler ise sırasıyla 8,67 ve 11,31 MPa olmak üzere KN/L3 numunesinde elde edilmiştir.

MS serisi dikkate alındığında, en yüksek eğilmede çekme dayanımlarını 28. gün ve 90. gün için sırasıyla 10,79 ve 11,94 MPa olmak üzere MS10/L1 ve MS10/L0 numuneleri gösterirken, en düşük değerler ise sırasıyla 7,61 ve 9,69 MPa olmak üzere MS15/L2 ve MS10/L3 numunelerinde elde edilmiştir.

SD serisi dikkate alındığında, en yüksek eğilmede çekme dayanımlarını 28. gün ve 90. gün için sırasıyla 12,25 ve 14,87 MPa olmak üzere SD10/L1 ve SD10/L3 numuneleri gösterirken, en düşük değerler ise sırasıyla 9,82 ve 12,18 MPa olmak üzere SD15/L1 numunesinde elde edilmiştir.

Farklı oranlarda hacimce eklenen liflerin eğilmede çekme dayanımı farklı şekillerde etkilediği gözlemlenmiştir. Eklenen liflerin hem dayanım kaybına neden olup hem de dayanımın artmasına olanak sağlamıştır. Bunun nedeni deneyin yapılaşına ve liflerin matrisin içinde gelişigüzel dağılmasına bağlanabilir. Eğilme dayanımı tayin edilirken yük numunenin tam ortasında doğrusal bir mesnetle uygulanmaktadır. Çimentolu karışımların çekme yüklerin etkisi altında düşük performans göstermektedir. Ancak çekme yükü uygulanan alanın içerisinde liflerin bulunması bu davranışı geliştirebilir, dolayısıyla liflerin eklenmesiyle meydana gelen dayanımdaki azalma ve artmanın nedeni olarak düşünülebilir. Koçkal ve Çamurlu (2020) tarafından yapılan çalışmada benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sözü edilen çalışmada %1 polipropilen liflerin eklenmesiyle harçların eğilmede çekme dayanımında artış gözlemlenirken, lif içeriğinin %2’ye çıkarılmasıyla dayanımda düşüş gözlemlenmiştir. SEM görüntülerine dayanarak yapılan gözlemlerde, polipropilen liflerin çimento matrisinden çıktığı görülmüştür. Bu davranış harçların eğilme dayanımdaki artıştan sorumlu olan mekanizmaya bağlanabilir. Dayanımdaki düşüşün nedeni ise %1’den fazla lifin kullanımıyla oluşan gözeneklere bağlanılmıştır. Numune yaşının artmasıyla dayanımın da belirgin bir şekilde arttığı tüm karışımlarda görülmüştür. İleriki yaşlardaki dayanım artışı silis dumanı içeren harçlar için, silis dumanının ince partikül boyutu ve yüksek pozolanik aktivitesine bağlanabilir. Bu durum ileriki yaşlarda agrega- çimento matrisi ara yüzeyini geliştirirmesini sağlar, bu da eğilme dayanımı için önem taşır (Koçkal 2013).

En belirgin dayanım artışı 28. günde alınan sonuçlar için SD10/L1 kodlu numunede görülmüştür, KN/L0 kodlu kontrol numunesiyle karşılaştırıldığında, eğilme dayanımının %16,89 oranında arttığı gözlemlenmiştir. 90. günde elde edilen dayanım artışına bakıldığında, en yüksek dayanım artışı SD10/L3 kontrol numunesinde görülmüştür, KN/L3 kontrol numunesiyle kıyaslandığında, %31,47 oranında dayanım artışı tespit edilmiştir. Önceki çalışmalarda plastik liflerin betonun eğilmede çekme dayanımını arttığına dair gözlemler yapılmıştır (Bagherzadeh vd. 2011; de Oliveira ve Castro-Gomes 2011; López-Buendía vd. 2013; Mazaheripour vd. 2011; Nili ve Afroughsabet 2010). Ochi vd. (2007), PET lif içeren betonun eğilmede çekme dayanımının, lif içeriği kademeli olarak %1,5’e yükseltildiğinde %36,1’e kadar iyileştiğini belirtmiştir. Suji vd. (2007), hacim olarak %0,3 PP lif içeriğine sahip beton karışımlarının eğilme dayanımının, konvansiyonel betonun dayanımı ile karşılaştırıldığında %16,6-23,0

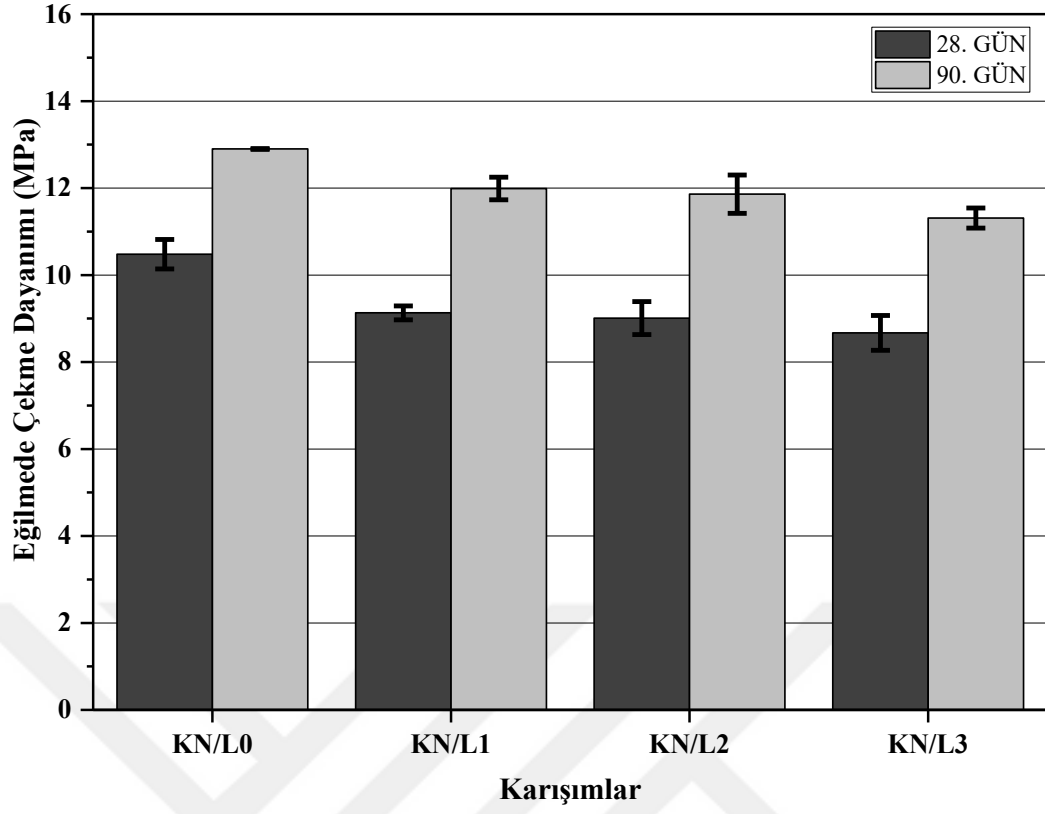
arttığını bildirmiştir. Öte yandan, birkaç çalışma, eğilme dayanımının sadece betonun küçük lif içeriğine sahip olduğu zaman geliştiğini ve lif içeriği belirli bir seviyenin üzerine çıktığı zaman eğilme dayanımının bozulduğunu gözlemlemişlerdir (Nibudey vd. 2013; Wang vd. 2000). Nibudey vd. (2013), PET lif içeren betonun eğilme dayanımının % 1 lif seviyesinde %20 arttığını ve daha sonra %3 lif içeriğinde %16,4 azaldığını tespit etmiştir. Kurup ve Kumar (2017) yaptıkları çalışmada PVC kabolarından elde edilen plastik PVC liflerin %0,8 oranında betona eklenmesi, eğilme dayanımı %9,11 arttığını bildirmişlerdir. Bu artışın nedeni, PVC liflerinin matrisin çatlamasından sonra yükü taşımaya devam etmesi gerçeğine atfedilebilir, bu da eğilme deneyine tabi tutulan numunelerinin yük taşıma kapasitesinde bir artışa neden olmuştur. Ayrıca, PVC lifler çatlakları engelleyerek çatlakların yayılmasını kontrol altına almış bu da numunenin daha sünek davranmasını sağlamıştır. Meddah ve Bencheikh (2009), lif uzunluklarının PP lif içeren betonun eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. 50 ve 60 mm uzunluğundaki PP lifler kullanıldığında, betonun eğilme dayanımı, lif içeriği hacimce %0 ile %1 arttıkça önemli bir değişiklik göstermemiştir. Bununla birlikte, 30 mm uzunluğunda lifler kullanıldığında, lif içeriği arttıkça betonun eğilme dayanımı azalmıştır; geleneksel betonun değerine kıyasla % 44,4'lük en büyük azalma, %1 lif hacmine sahip karışımda görülmüştür.

Silis dumanının kullanımı eğilmede çekme dayanımı geliştirdiği gözlemlenirken, mikro silikanın dayanımı düşürdüğü görülmüştür. Silis dumanının içeriğinin artmasıyla eğilme dayanımı kademeli bir şekilde artarken, mikro silikanın artmasıyla tam tersi bir durum gözlemlenmiştir. Bunun sebebi silis dumanı ve mikro silikanın farklı parçacık boyutlarına sahip olmasıdır. Silis dumanının parçacık boyutları küçük olması ve filler materyal olması boşlukları doldurarak daha kompakt bir yapının oluşmasını sağlarken, mikro silikanın büyük parçacık boyutlarına sahip olması, boşluk oranının artmasına dolayısıyla daha düşük bir eğilme dayanımının meydana gelmesine neden olmuştur. Eğilme dayanımı %15, %10 ve %5 silis dumanı içeriğine sahip karışımlar için kontrol karışımıyla karşılaştırıldığında, %13,36, %7,16 ve %2,10 artarken, aynı oranlarda mikro silika içeriğine sahip olan karışımlar için kontrol karışımıyla karşılaştırıldığında, %18,51, %16,41 ve %14,60 düştüğü görülmüştür. Karthikeyan ve Dhinakaran (2018) çimento ikamesi olarak silis dumanı kullanımının betonun eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. % 10'a kadar silis dumanının dâhil edilmesinde eğilme dayanımında artış gözlemlenmiştir. Yazarlar dayanımdaki bu artışın, toplam özgül gözenek hacmini azaltan silis dumanının ultra-ince parçacıkların ilavesinden dolayı kaynaklandığını bildirmişlerdir. Mastali ve Dalvand (2016) kendiliğinden yerleşen beton üzerinde eğilme dayanımı testi yapmıştır. Araştırma, eğilme dayanımının çimento yerine silis dumanı kullanılarak arttırılabileceğini göstermiştir. Agregası ve matris arasındaki bağ silis dumanı ilavesiyle geliştirilebilir, bu da matris arasındaki arayüzde bağın artmasına neden olur. Kontrol karışıma kıyasla, çimento yerine % 14 silis dumanına sahip beton karışımı için eğilme dayanımı % 11 artmıştır.

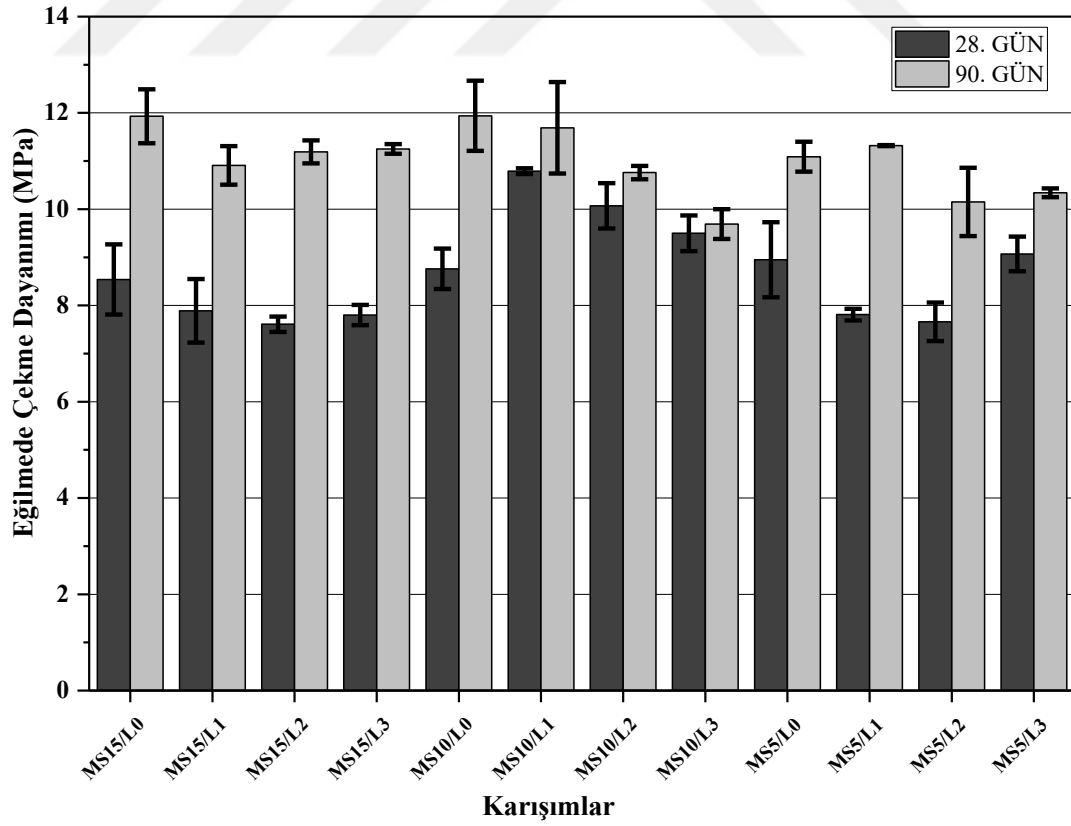
Sertleşmiş harçların kırılma şekilleri şekli 4.23-26'da verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi lifsiz olan karışımlar ortadan ikiye ayrılırken, %3 lif içeriğine sahip karışımlarda çatlaklar oluşmuş olsa da parçanın bütünlüğü eklenen liflerin sayesinde korunduğu görülmüştür. Bu da liflerin anı bir kırılma ya da çatlama önlemesinden kaynaklanmıştır.

Çizelge 4.7. Karışımların eğilmede çekme dayanımı değerleri (MPa)

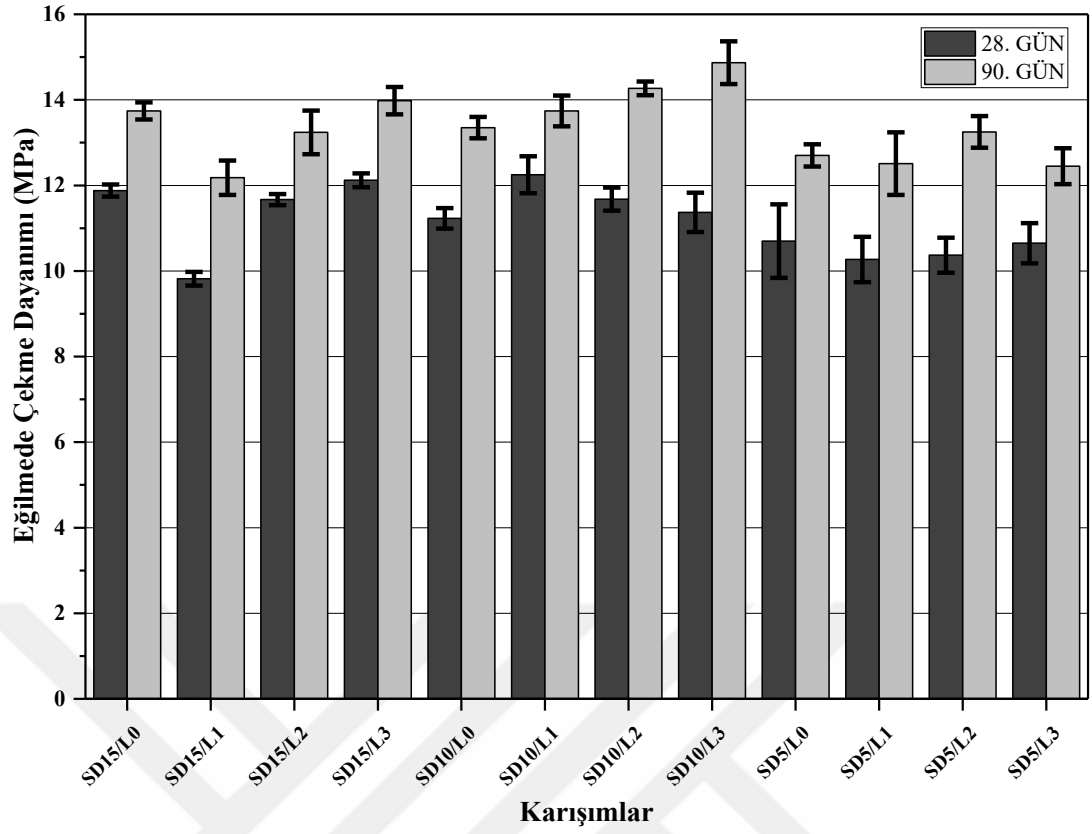
Karışım Kodu	28. Gün	90. Gün
KN/L0	10,48	12,90
KN/L1	9,13	11,99
KN/L2	9,01	11,86
KN/L3	8,67	11,31
MS15/L0	8,54	11,93
MS15/L1	7,89	10,91
MS15/L2	7,61	11,19
MS15/L3	7,80	11,25
MS10/L0	8,76	11,94
MS10/L1	10,79	11,69
MS10/L2	10,07	10,76
MS10/L3	9,50	9,69
MS5/L0	8,95	11,09
MS5/L1	7,81	11,32
MS5/L2	7,66	10,15
MS5/L3	9,07	10,34
SD15/L0	11,88	13,74
SD15/L1	9,82	12,18
SD15/L2	11,67	13,24
SD15/L3	12,12	13,98
SD10/L0	11,23	13,35
SD10/L1	12,25	13,74
SD10/L2	11,68	14,27
SD10/L3	11,37	14,87
SD5/L0	10,70	12,70
SD5/L1	10,27	12,51
SD5/L2	10,37	13,25
SD5/L3	10,65	12,45



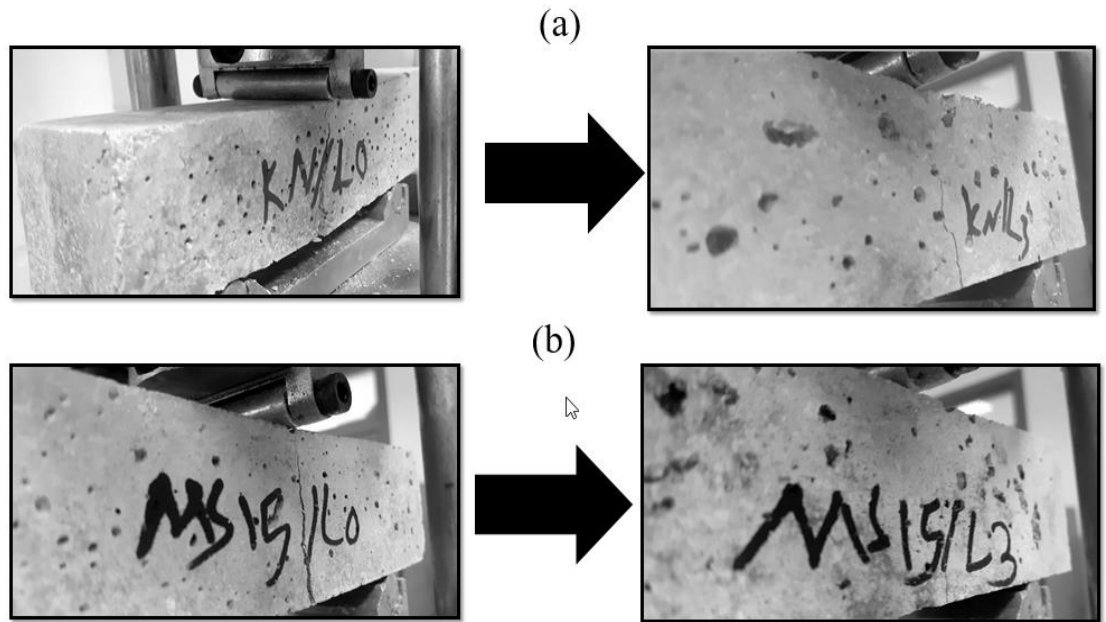
Şekil 4.20. KN karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri



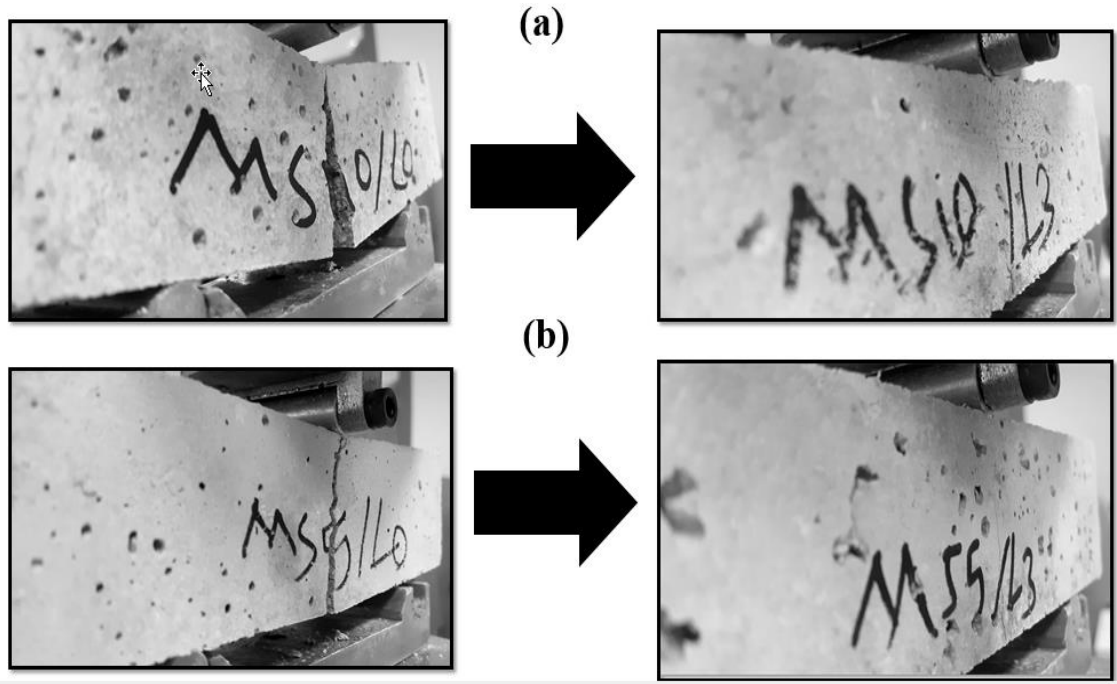
Şekil 4.21. MS karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri



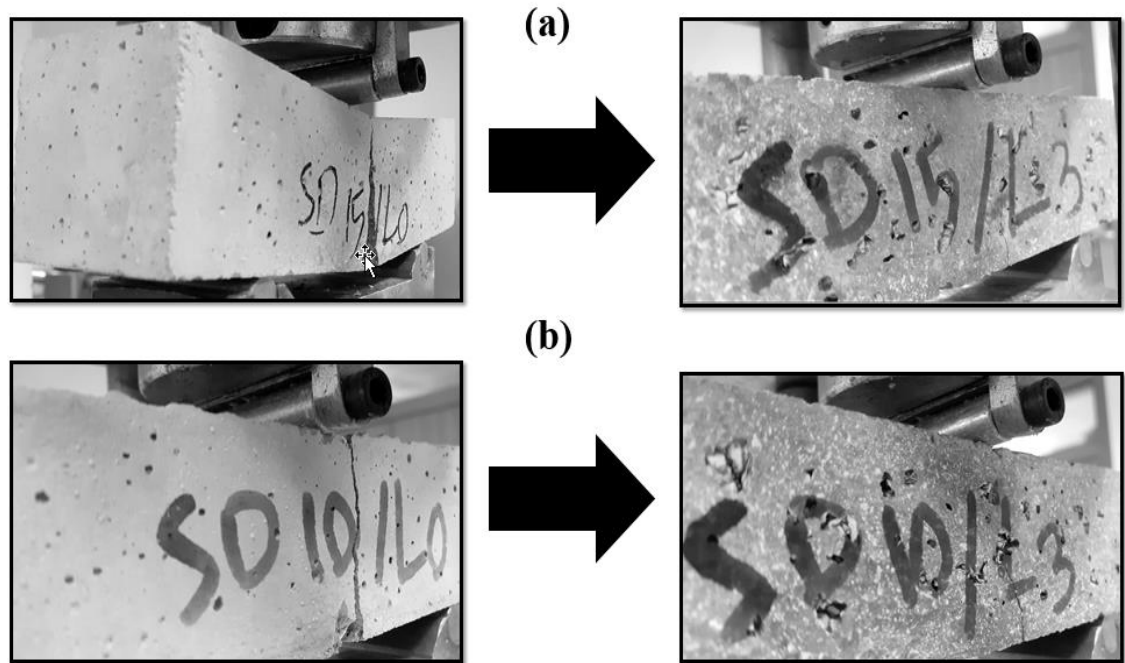
Şekil 4.22. SD karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri



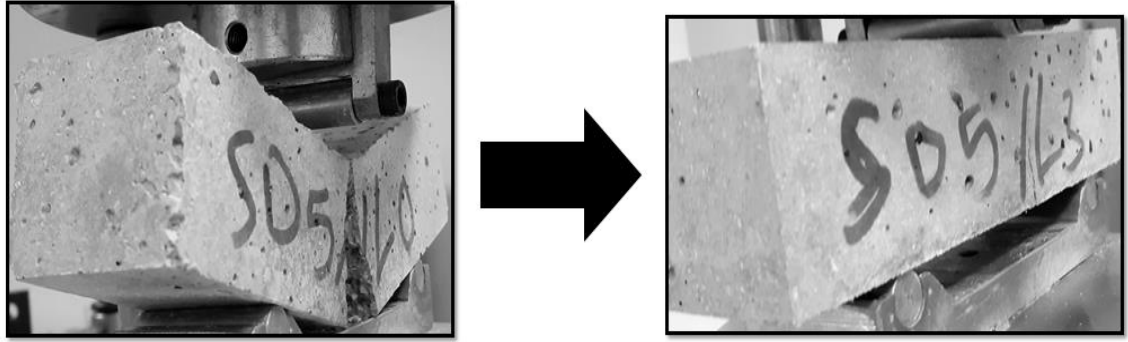
Şekil 4.23. Karışımların eğilme yükleri altında kırılma şekilleri: a) KN serisi, b) MS15 serisi



Şekil 4.24. Karışımların eğilme yükleri altında kırılma şekilleri: a) MS10 serisi, b) MS5 serisi



Şekil 4.25. Karışımların eğilme yükleri altında kırılma şekilleri: a) SD15 serisi, b) SD10 serisi



Şekil 4.26. SD5 karışımın eğilme yükleri altında kırılma şekilleri

4.3.6. Basınç dayanımı değerleri

Basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.8 ve Şekil 4.27-29’de verilmektedir. Kontrol numuneleri incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımlarını 28. gün ve 90. gün için sırasıyla 30,54 ve 37,61 MPa olmak üzere KN/L0 numunesi gösterirken, en düşük değerler ise sırasıyla 27,32 ve 33,96 MPa olmak üzere KN/L3 numunesinde elde edilmiştir.

MS serisi dikkate alındığında, en yüksek basınç dayanımlarını 28. gün ve 90. gün için sırasıyla 26,78 ve 34,63 MPa olmak üzere MS5/L0 numunesi gösterirken, en düşük değerler ise sırasıyla 20,01 ve 28,78 MPa olmak üzere MS15/L3 numunesinde elde edilmiştir.

SD serisi dikkate alındığında, en yüksek basınç dayanımlarını 28. gün ve 90. gün için sırasıyla 34,96 ve 42,55 MPa olmak üzere SD15/L0 numunesi gösterirken, en düşük değerler ise sırasıyla 27,73 ve 35,25 MPa olmak üzere SD5/L3 numunesinde elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar mikro silika ile silis dumanının farklı etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Silis dumanının kullanımı basınç dayanımı arttırken, mikro silika kullanımı basınç dayanımının düşmesine yol açmıştır. Dayanımdaki farkın kullanılan pozolanik malzemelerin tanecik boyutuna ve oluşturdukları boşluk oranlarına bağlanabilir. Mikro silikanın parçacık boyutların silis dumaninkinden daha büyük olması nedeniyle silis dumanına kıyasla boşluk oranı daha yüksek bir yapının oluşmasına neden olmuştur, önceki bölümlerde açıklanan boşluk oranı deneyi sonuçları bu bulguları desteklemiştir. Silis dumanının daha ince bir partikül boyuta sahip olması, boşluk oranları azaltarak daha sağlam ve kompakt bir yapının oluşmasını sağlamıştır. En yüksek basınç dayanımı artışı %15 silis dumanı içeriğine sahip lifsiz karışımda görülmüştür. Kontrol numunesiyle karşılaştırıldığında, %15, %10 ve %5 silis dumanına sahip karışımlar için basınç dayanımı sırasıyla %14,47, %8,02 ve %1,83 artmıştır. Basınç dayanımındaki bu artış, silis dumanının ilavesinin çimento hamuru ve agregaları arasındaki yapışmayı ve ara yüzeyi geçiş bölgesini iyileştirmesi ve ayrıca çimento hamurundaki boşlukları doldurarak, daha yoğun bir çimento matrisi üretmesi ve sonuç olarak basınç dayanımını arttırmasıyla açıklanabilir (Faraj vd. 2019). Öte yandan %15, %10 ve %5 mikro silika içeren karışımlar dikkate alındığında, kontrol numunesiyle kıyasla basınç dayanımı sırasıyla %22,50, %15,88 ve %12,31 düşmüştür.

Bhanja ve Sengupta (2003) yaptıkları deneysel çalışmada silis dumanını %0-%30 arasında değişen oranlarda çimentoyla yer değiştirerek kullanmışlar. Sonuçlar, silis dumanının artmasıyla basınç dayanımının da arttığı ve uygun değer silis dumanı değiştirme yüzdesinin tüm su bağlayıcı oranlarında sabit olmadığını, ancak karışımın su içeriğine bağlı olduğunu göstermiştir. Jalal vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada benzer sonuçlar bulunmuştur. Silis dumanı içeriğinin arttırılması, özellikle daha ileri yaşlarda basınç dayanımını önemli ölçüde arttırmıştır. Kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, % 10 silis dumanı ile değiştirme, 400 ve 500'lük bağlayıcı içeriği için basınç dayanımını sırasıyla 7, 28 ve 90 günlerde %34, %9 ve % 9, % 9, %21 ve %23 oranında arttırmıştır.

Tüm karışımlarda eklenen lif oranının artmasıyla basınç dayanımının kademeli bir şekilde düştüğü ancak bu düşüşün %11,12'den fazla olmadığı gözlemlenmiştir. Eklenen lifer dayanımı geliştirmek açısından olumlu etki göstermese de, harcın bütünlüğünü koruma ve parçalanmasını engelleme açısından olumlu bir etki oluşturduğu söylemek mümkündür (Şekil 4.30). En yüksek basınç dayanımı kaybı %3 lif oranına sahip karışımlarda tespit edilmiştir. Lifli karışımlarda boşluk oranı liffsiz olanlardan daha fazla çıkmıştır. Dayanımdaki düşüş, artan boşluk miktarına ve lif ile çimento matrisin arasındaki düşük arayüzey bağına bağlanabilir (Karahana ve Atış 2011). Ayrıca lifin dayanımı matrisin dayanımından daha düşük olduğu için boşluklu bir yapı gibi davranarak harcın dayanımı düşürmeye yönelik hareket ettiği söylenebilir. Elde edilen bu bulgular, Said vd. (2015) ve Çavdar (2014) tarafından yapılan çalışmalarda elde edilen bulgularla paralellik göstermiştir. Said vd. (2015), polivinil alkol (PVA) liflerin çimentolu karışımların basınç dayanımı düşürdüğünü bildirmiştir. Çadvar (2014) %0,5-%1,5 oranında değişen PVA lif içeriğinin basınç dayanımını kontrol numuneye kıyasla 61,73 Mpa'dan 39,19-47,8 Mpa'ya kadar düşürdüğünü rapor etmiştir. Çavdar (2014) eklenen liflerin çimento matrisi ve agregadan daha esnek olduğunu ve dolayısıyla matrisin içinde süreksizlik oluşturarak dayanım kaybına neden olduğunu bildirmiştir. Bir başka çalışmada, polietilen liflerin betonun basınç dayanımı kötü bir şekilde etkilediği bildirilmiştir (Choi vd. 2014). Basınç dayanımı %1.5 polietilen lif oranına sahip karışım için kontrol numuneye kıyasla %25 oranında düşmüştür. Dayanımdaki bu düşüş eklenen polietilen liflerin hava miktarı arttırdığı ihtimaline bağlanmıştır. Pan vd. (2015)' göre lif oranı kademeli bir şekilde arttırmak, basınç dayanımı kaybına yol açmıştır. Araştırmacılar %1.2, %1.3 ve %1.4 PVA lifin eklenmesi, basınç dayanımda kontrol numuneye kıyasla %9,6, %23,5 ve %32,3 oranında kayba neden olduğunu gözlemlenmişlerdir. PVC plastiklerin agrega olarak kullanıldığı bir çalışmada, plastik agreganın ince deniz kumu agregasıyla yer değiştirme oranı arttıkça basınç dayanımının düştüğü bildirilmiştir (Kou vd. 2009). Çalışmada PVC plastik agreganın %5, %15, %30 ve %45 oranda deniz kumu ile yer değiştirmesi, basınç dayanımı kontrol numunesiyle kıyasla sırasıyla %9,1, %18,6, %21,8 ve %47,3 düşürmüştür. Dayanımdaki kayıp yazarlar tarafından aşağıdaki nedenlere dayandırılmıştır:

- (a) PVC parçacıkların elastisite modülünün çimento hamurununkinden daha düşük olması, çatlakların PVC partiküllerin etrafında başlamasına yol açmıştır.
- (b) PVC partikülleriyle çimento hamuru arasında düşük bir yapışma gücü olması.
- (c) PVC partiküllerin daha büyük tanecik boyutuna sahip olması, betonun paketleme seviyesinde azalmaya yol açmıştır.

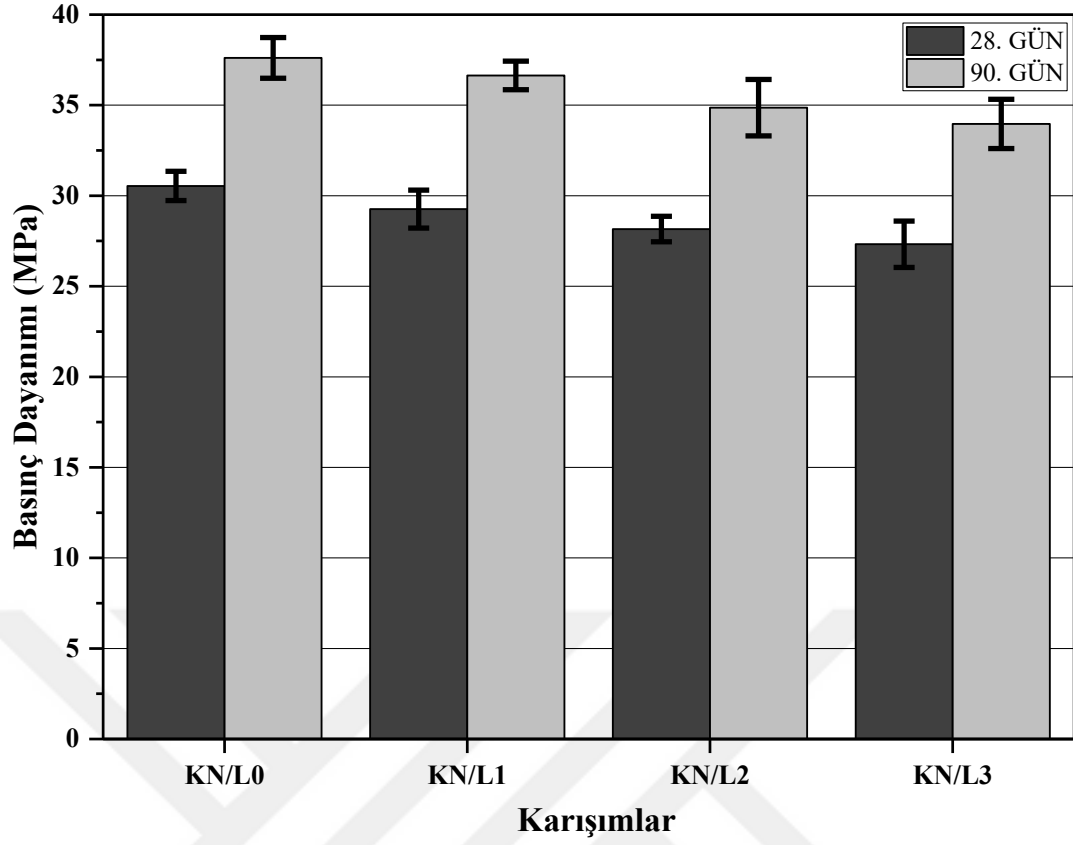
Bazı çalışmalarda plastik liflerin basınç dayanımı üzerinde çok etki bırakmadığı rapor edilmiştir (Sun ve Xu 2009; Mazaheripour vd. 2011; Afroughsabet ve Özbakkaloğlu 2015). Bu bulguların tersine, plastik liflerin basınç dayanımı geliştirdiği bildiren çalışmalar literatürde mevcuttur. Kakoei vd. (2012) 1,5-2 kg/m³ oranına

polipropilen lif oranına sahip, silis agregası içeren karışımların basınç dayanımı %36 oranında arttığı rapr etmişlerdir. Şahmaran vd. (2011) yaptıkları çalışmada PVA lifin kullanımının basınç dayanımı %3,5'e kadar arttırdığını bildirmişlerdir. Kimi vd. (2015) ve Han vd. (2009) tarafından yapılan çalışmalarda benzer bulgulara rastlanmıştır.

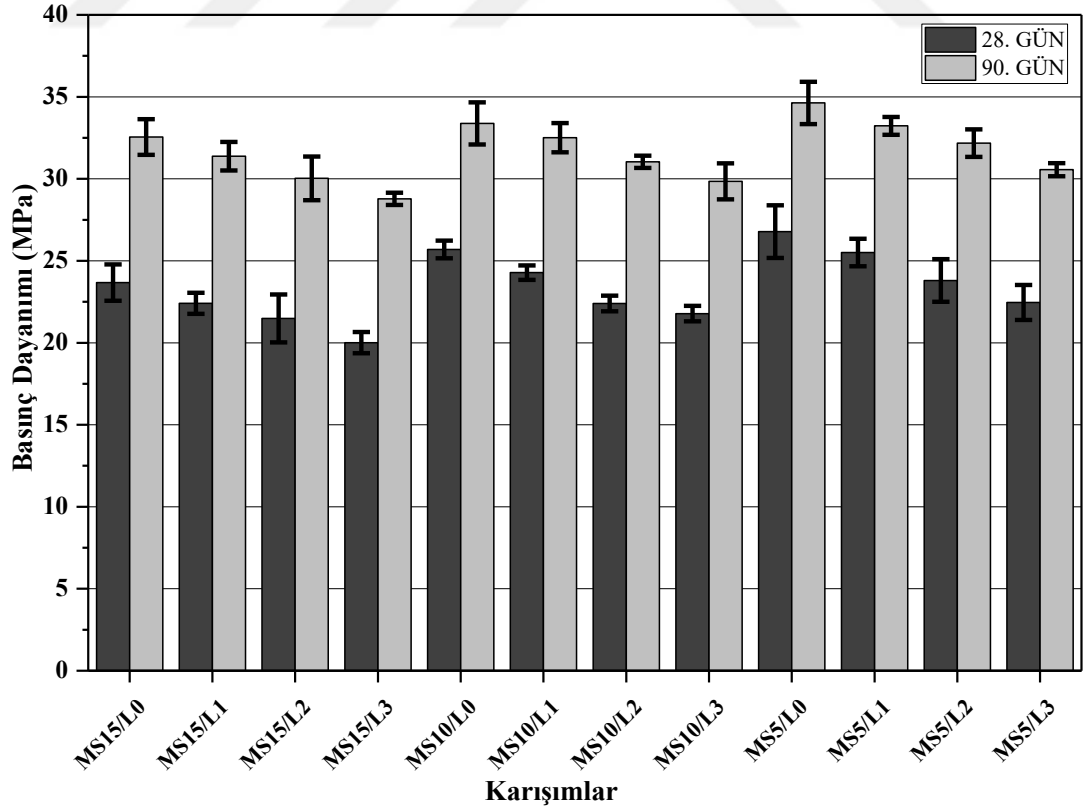
Liflerin en boy oranı (lif uzunluğunun çapa oranı olarak tanımlanır) ve geometrisi, plastik lif içeren karışımların basınç dayanımını etkileyen faktörlerden biridir. Khadakbhavi vd. (2010) YYPE liflerin en boy oranın hacimce% 0,6 lif içeren betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yazarlar, en boy oranları 20, 40, 60 ve 80 olan liflerin basınç dayanımını sırasıyla% 5,% 8,% 14 ve% 3 oranında arttırdığını gözlemlemişlerdir. Ancak 100 en boy oranında basınç dayanımı % 6 azalmıştır.

Çizelge 4.8. Karışımların basınç dayanımı değerleri (MPa)

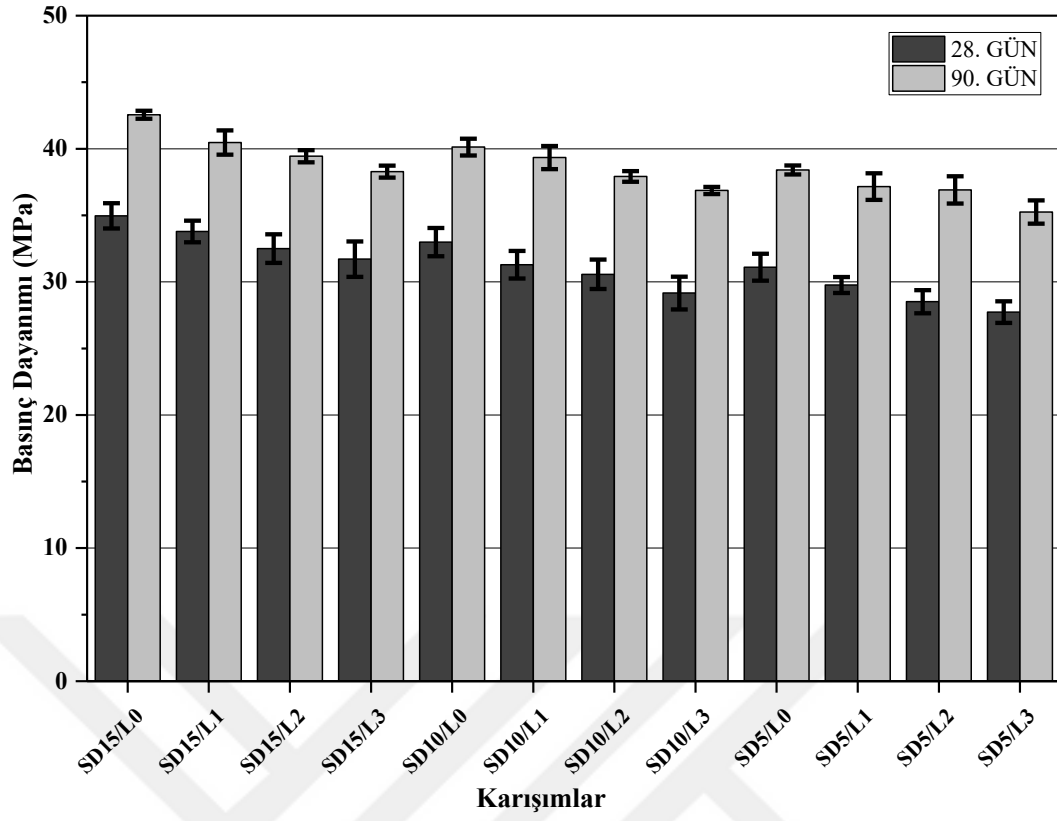
Karışım Kodu	28. Gün	90. Gün
KN/L0	30,54	37,61
KN/L1	29,26	36,64
KN/L2	28,16	34,86
KN/L3	27,32	33,96
MS15/L0	23,67	32,55
MS15/L1	22,41	31,38
MS15/L2	21,49	30,03
MS15/L3	20,01	28,78
MS10/L0	25,69	33,38
MS10/L1	24,28	32,51
MS10/L2	22,40	31,04
MS10/L3	21,78	29,85
MS5/L0	26,78	34,63
MS5/L1	25,51	33,23
MS5/L2	23,80	32,18
MS5/L3	22,46	30,56
SD15/L0	34,96	42,55
SD15/L1	33,79	40,47
SD15/L2	32,50	39,44
SD15/L3	31,71	38,28
SD10/L0	32,99	40,13
SD10/L1	31,29	39,34
SD10/L2	30,57	37,92
SD10/L3	29,16	36,87
SD5/L0	31,10	38,81
SD5/L1	29,77	37,16
SD5/L2	28,51	36,91
SD5/L3	27,73	35,25



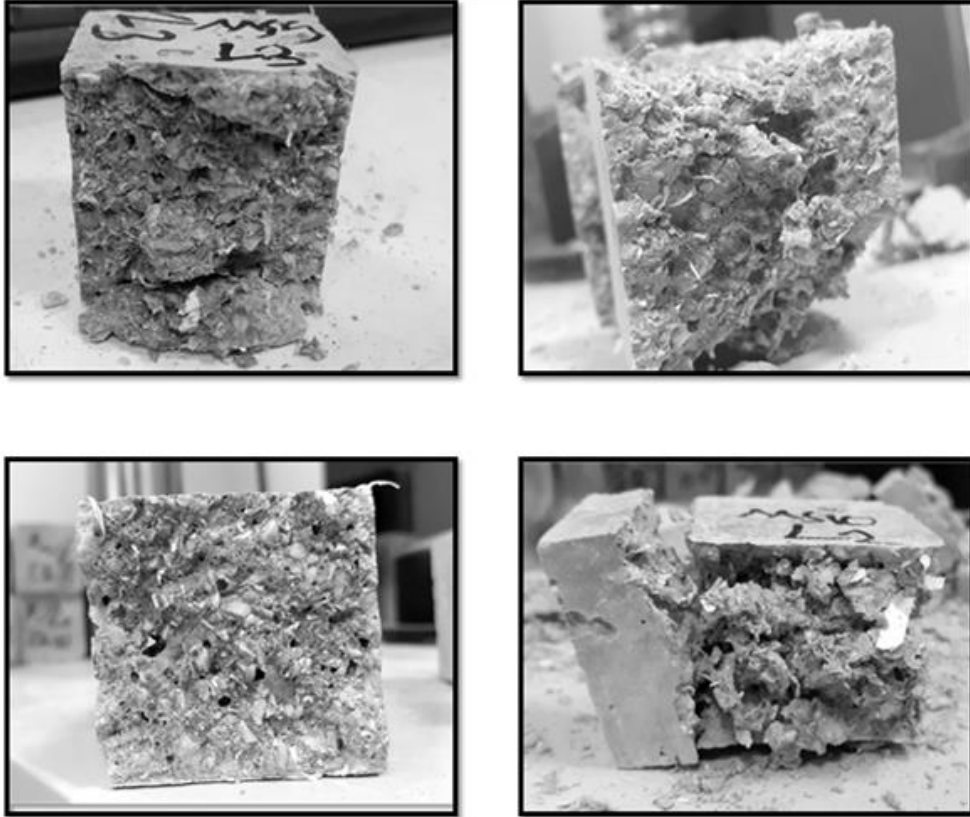
Şekil 4.27. KN karışım serisinin basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.28. MS karışım serisinin basınç dayanımı değerleri

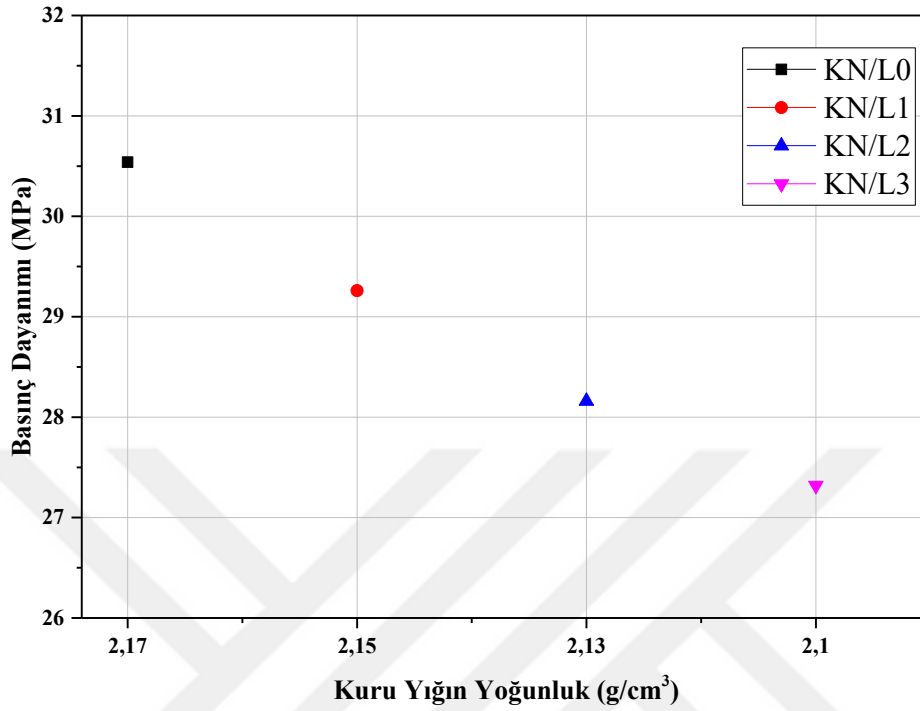


Şekil 4.29. SD karışım serisinin basınç dayanımı değerleri

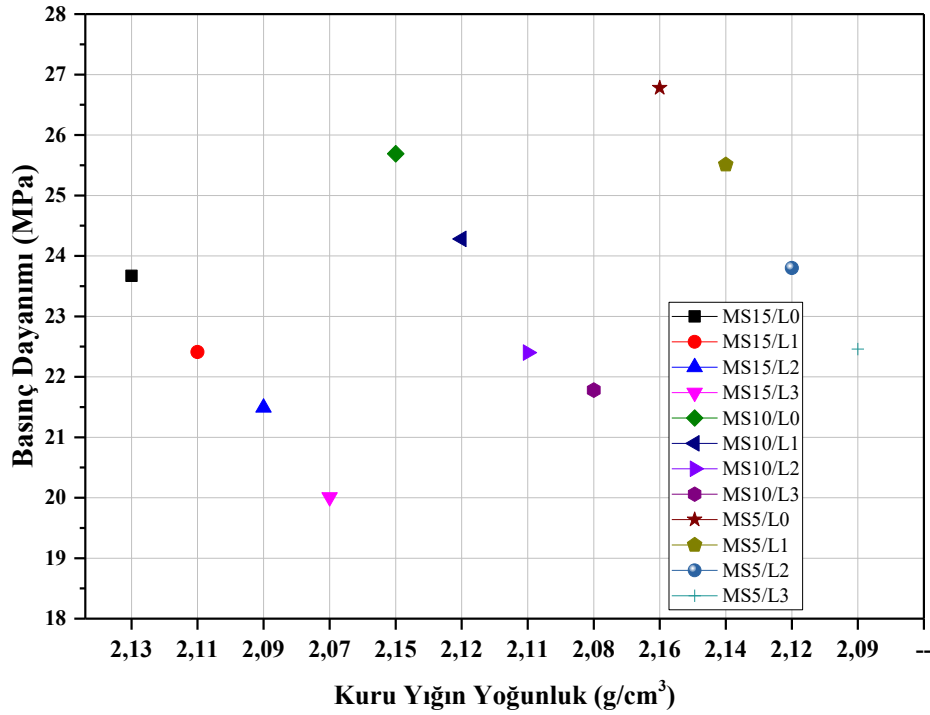


Şekil 4.30. Lif içeren bazı harçların basınç deneyi sonrası görünüşleri

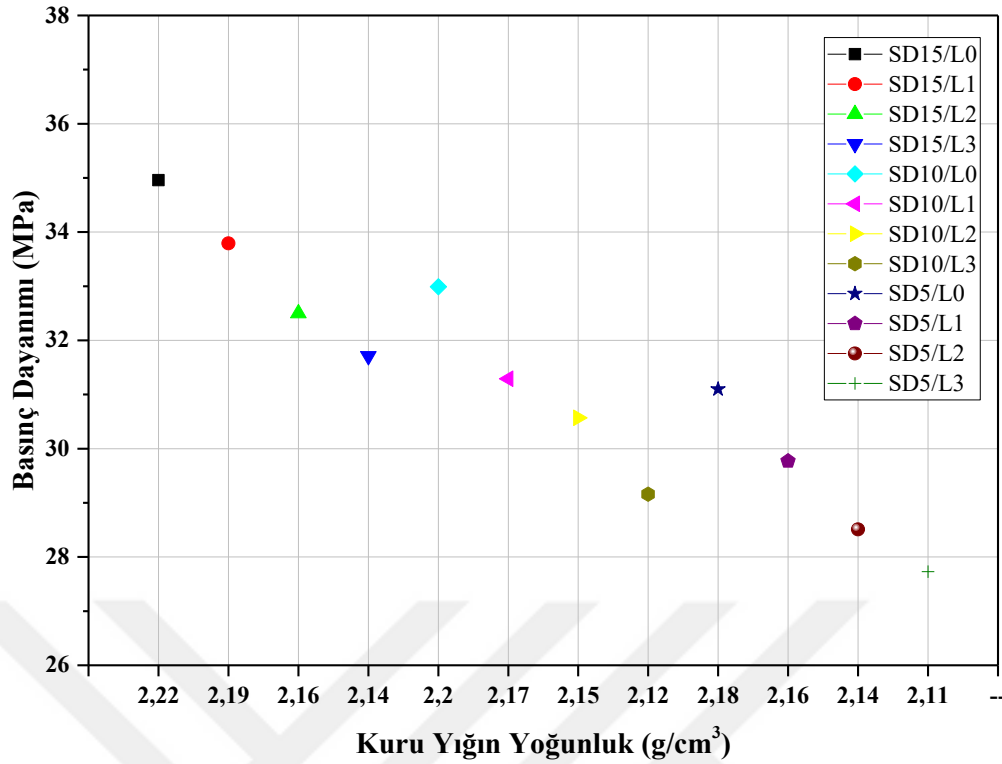
Basınç dayanımı ile kuru yığın yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki tespit edilmiştir. Harçların basınç dayanımı, kuru yığın yoğunluğun yükselmesiyle yükselmiş, düşmesiyle daha düşük değerler almıştır. Bu trend farklı oran ve içeriğe sahip tüm karışımlarda gözlemlenmiştir (Şekil 4.30-32).



Şekil 4.31. Basınç dayanımı ile kuru yığın yoğunluk arasındaki ilişki (KN karışım serisi)



Şekil 4.32. Basınç dayanımı ile kuru yığın yoğunluk arasındaki ilişki (MS karışım serisi)



Şekil 4.33. Basınç dayanımı ile kuru yığın yoğunluk arasındaki ilişki (SD karışım serisi)

4.3.7. Gerilme-Şekil değiştirme davranışı

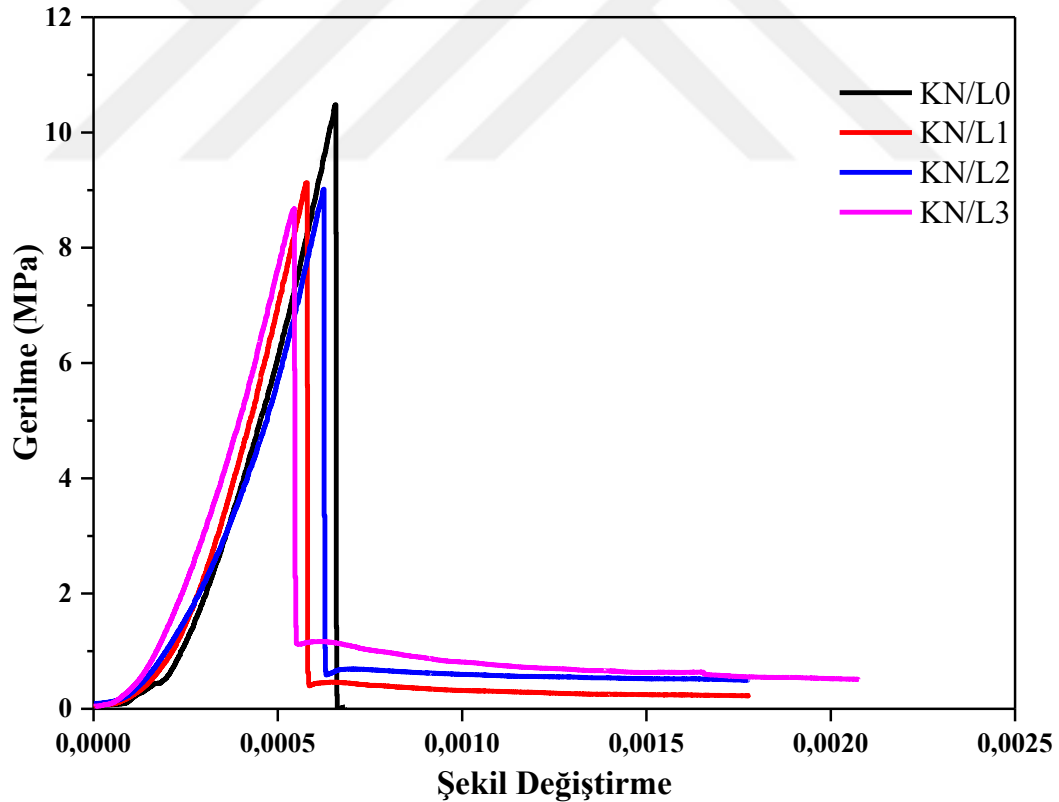
Sertleşmiş harçlar üzerinde gerçekleştirilen eğilme ve basınç deneylerden 28. günde alınan yük ve deplasman verileri kullanılarak karışımların gerilme-şekil değiştirme davranışları hem basınç hem de eğilme yükleri altında incelenmiştir.

Basınç yükleri altında çizilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, karışımlarda lif oranının artmasıyla dayanım kademeli olarak düşmüş olsa da, karışımlar daha fazla şekil değiştirme göstermiş daha fazla yük taşıyarak nihai dayanıma ulaşmışlardır. Bir başka deyişle, lif içeriği fazla olan karışımlar lifsiz olanlara göre daha sünek bir davranış göstermiştir. Silis dumanı içeren karışım serileri içerisinde SD15/L0 ve SD15/L1 kodlu karışımlarda diğer karışımlara göre daha az şekil değiştirme göstermiştir. Sözü edilen karışımlarda rijit bir davranış ve elastik bölgedeki gerilme-şekil değiştirme eğrisinin daha dik bir açığa sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni yüksek silis dumanı içeriğiyle yüksek dayanıma sahip olması olabilir. Lif içeriğinin artmasıyla birlikte dayanımda düşüş meydana gelirken, yük taşıma kapasitesinde artışın meydana geldiği görülmüştür. Gelişgüzel bir şekilde harç matrisinin içerisinde dağılan liflerin harcın yük altında ezilmesine, parçalanmasına ve kabuklenmesine karşı direnç göstermesi, harcın şekil değiştirme davranışını iyileştirip geliştirmiştir (Şekil 4.30). Ayrıca eklenen liflerin harçların kırılma sonrası davranışını geliştirdiğini, çatlakların oluşmasını ve yayılmasını engellediğini söylenebilir. MS10 serisi dikkate alındığında, 0,0075 şekil değiştirmede %0, %1, %2 ve %3 lif oranı için basınç dayanımı sırasıyla 3,24, 5,65, 6,52 ve 6,96 MPa değerleri almıştır. SD15 serisi incelendiğinde, 0,0075 şekil değiştirmede %0, %1, %2 ve %3 lif oranı için basınç dayanımı sırasıyla 3,14, 6,62, 5,57 ve 8,42 MPa değerleri almıştır. Elastik bölgedeki gerilme-şekil değiştirme eğrisi lif oranına bağlı olmaksızın tüm karışımlarda hemen hemen aynı davranış sergilerken, plastik bölgede lif oranının artmasıyla daha duktıl bir davranış sergilediği görülmüştür.

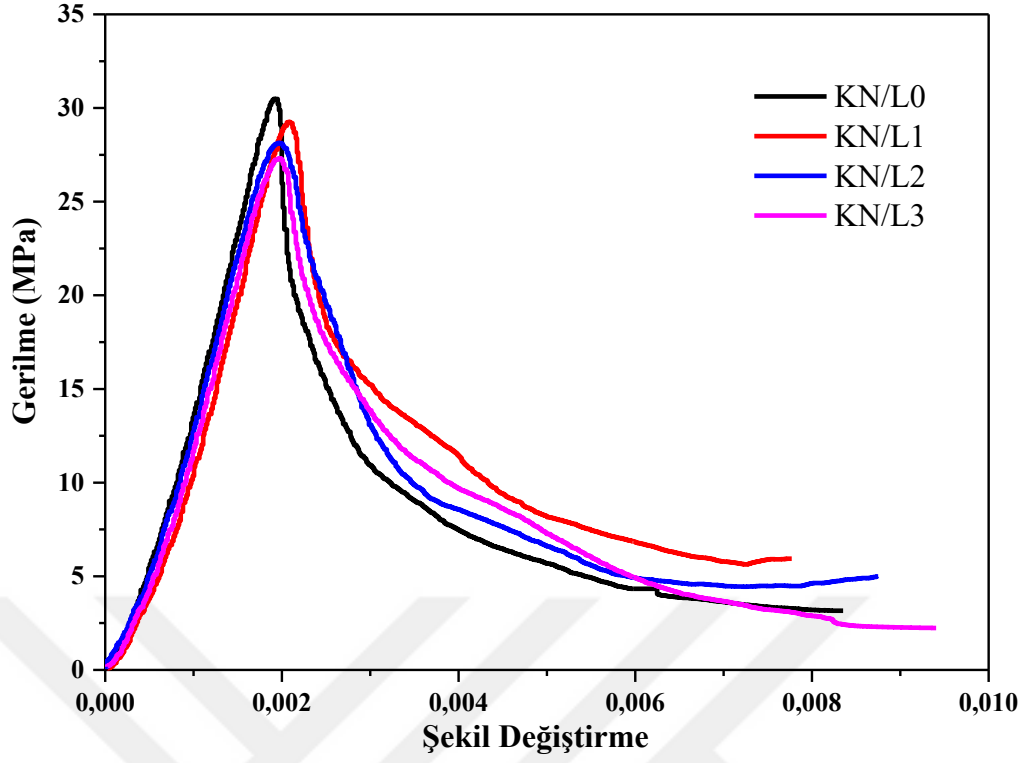
Ghernouti vd. (2015) atık plastik poşetlerden üretilen plastik lif ve polipropilen plastik lif olmak üzere iki tip plastik lifin kendiliğinden yerleşen betonun gerilme-şekil değiştirme davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ayrıca farklı lif uzunluklarının ve içeriğinin etkisini de araştırmışlardır. 2 cm uzunluğunda 5 kg/m³ plastik poşet lif içeren betonun, PP lif içeren ve referans karışımına kıyasla üstün gerilme-şekil değiştirme davranışına sahip olduğu görülmüştür.

Eğilme yükleri altında çizilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, lifsiz karışımlarda maksimum dayanıma ulaştıktan sonra çok sert bir düşüş yaşanırken, lif içeriğin artmasıyla daha yumuşak bir düşüşün meydana geldiği ve maksimum dayanıma ulaştıktan sonra karışımların yük altında ezilmediği ve hala yük taşımaya devam ettiği görülmüştür. Eklenen liflerin karışımların çatlama sonrası davranışını geliştirdiğini gözlemlenmiştir. Kontrol karışımlarla karşılaştırıldığında, silis dumanı içeren lifli karışımların dayanımları daha yüksek değerler almıştır.

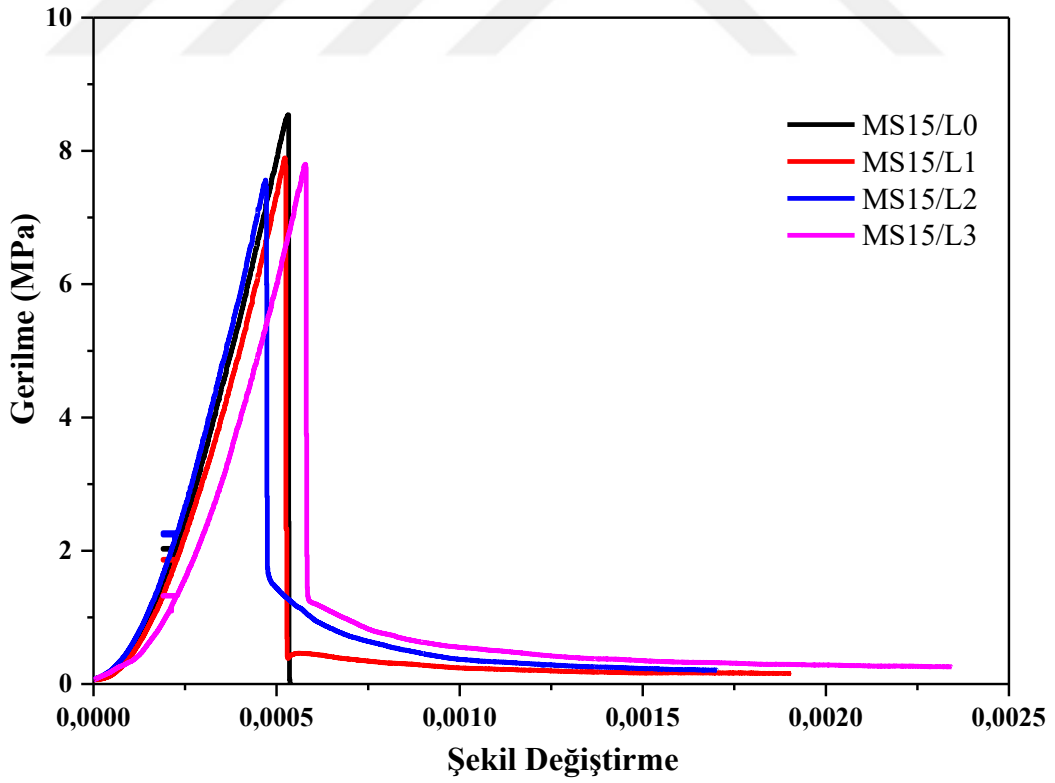
Aslani vd. (2019) PP liflerin lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yük taşıma kapasitesini ve sehimini belirlemek için 100 * 100 * 400 mm boyutlarındaki prizmatik numuneleri kullanılmıştır. PP lif oranı kontrol karışımı olan % 0'dan % 0,25'e artmasıyla, nihai yükün 22,5 KN'den 28 KN'e yükseldiğini, kritik sehimin 0,99 mm'den 0,9 mm'e azaldığını bildirmişlerdir. Sonuçlar, eklenen PP liflerin yük taşıma kapasitesi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu, ancak kritik sehim üzerinde olumsuz bir etki oluşturduğunu göstermiştir.



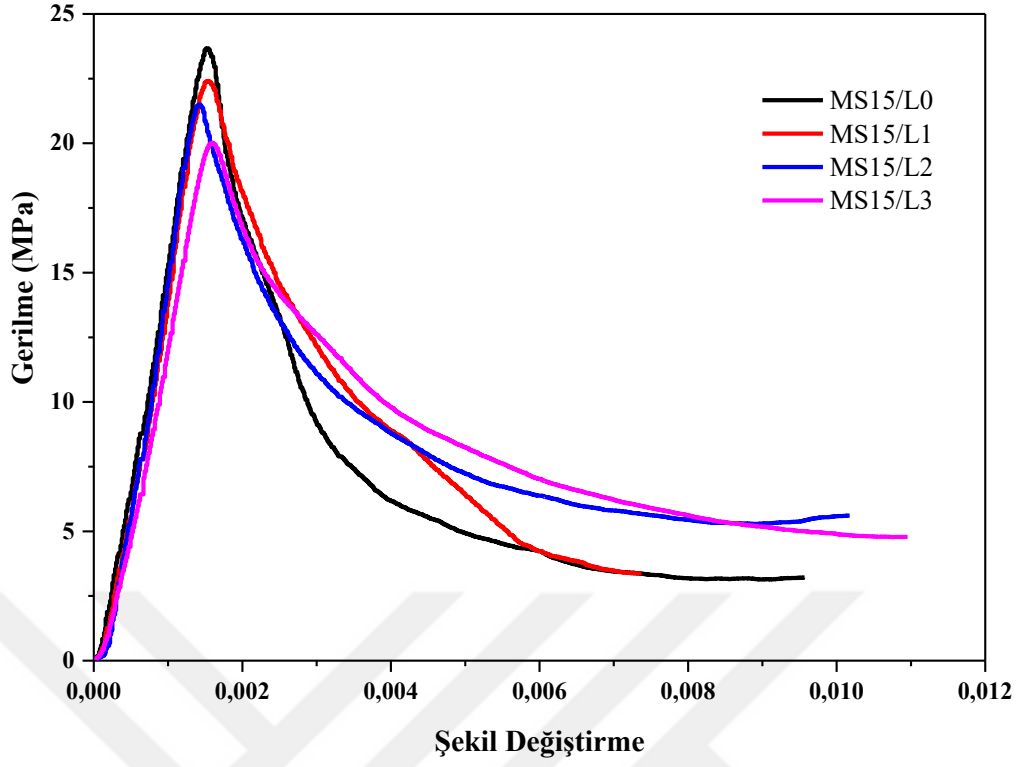
Şekil 4.34. KN karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri



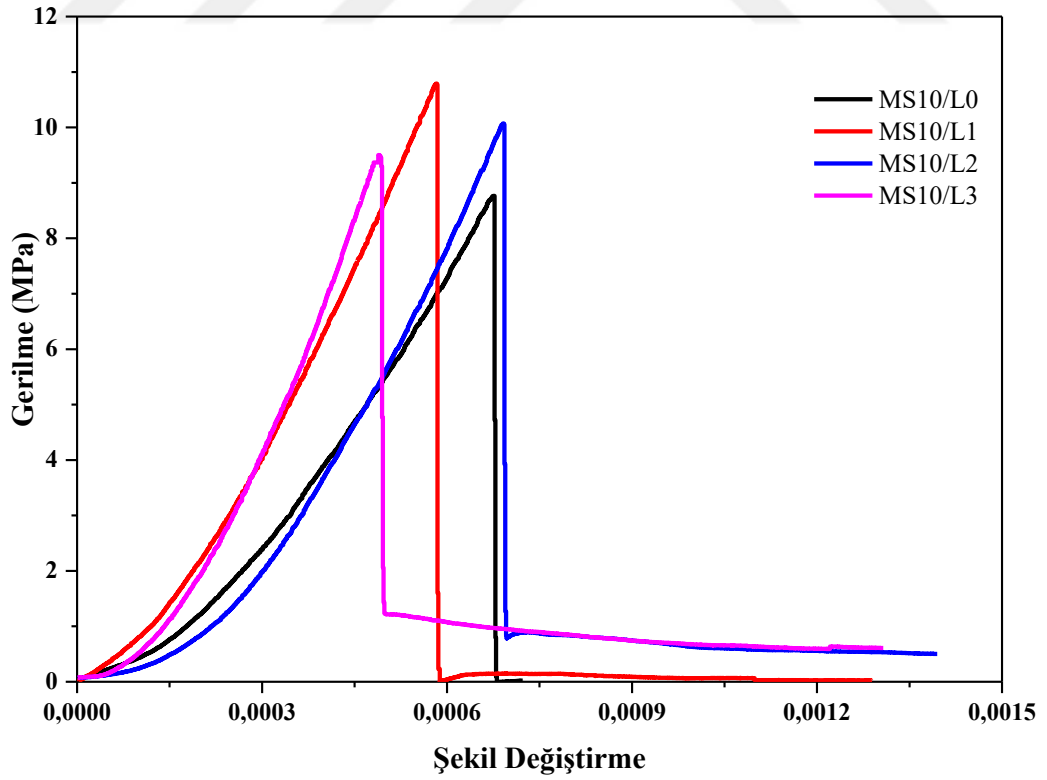
Şekil 4.35. KN karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri



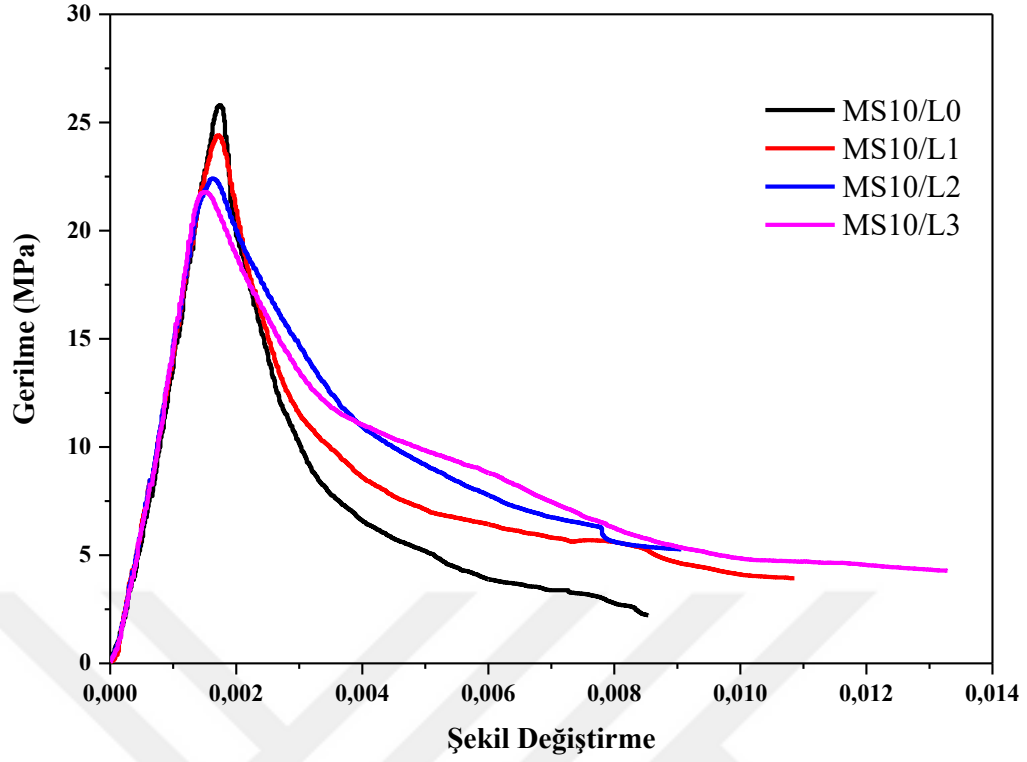
Şekil 4.36. MS15 karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri



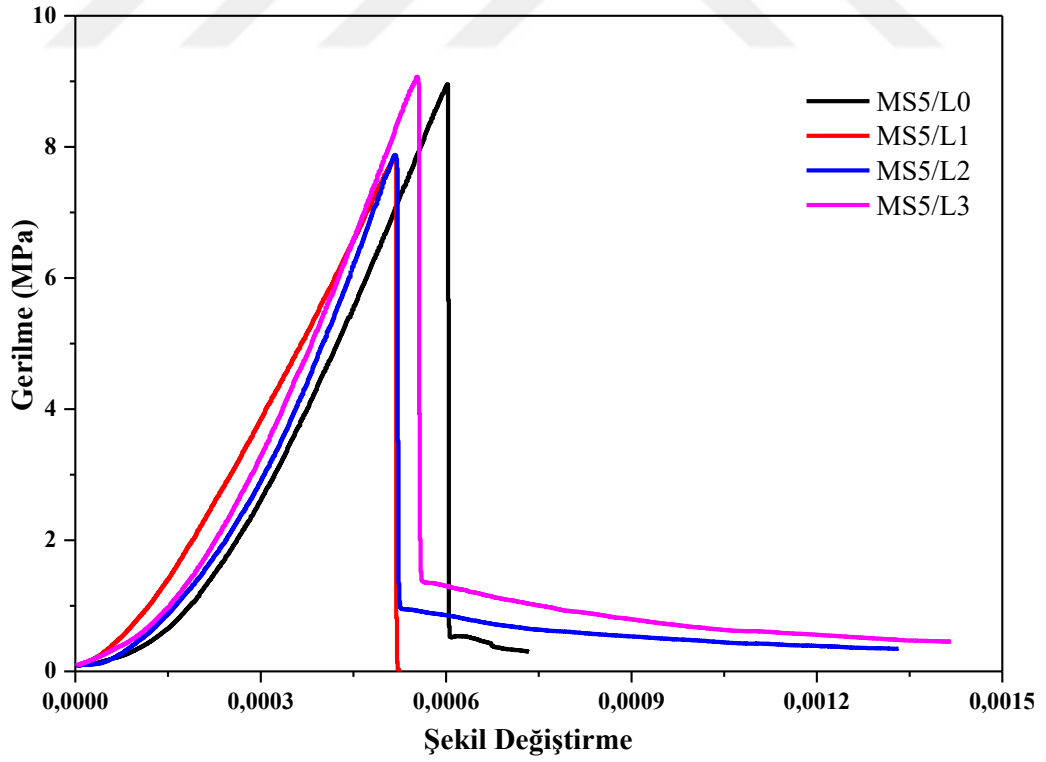
Şekil 4.37. MS15 karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri



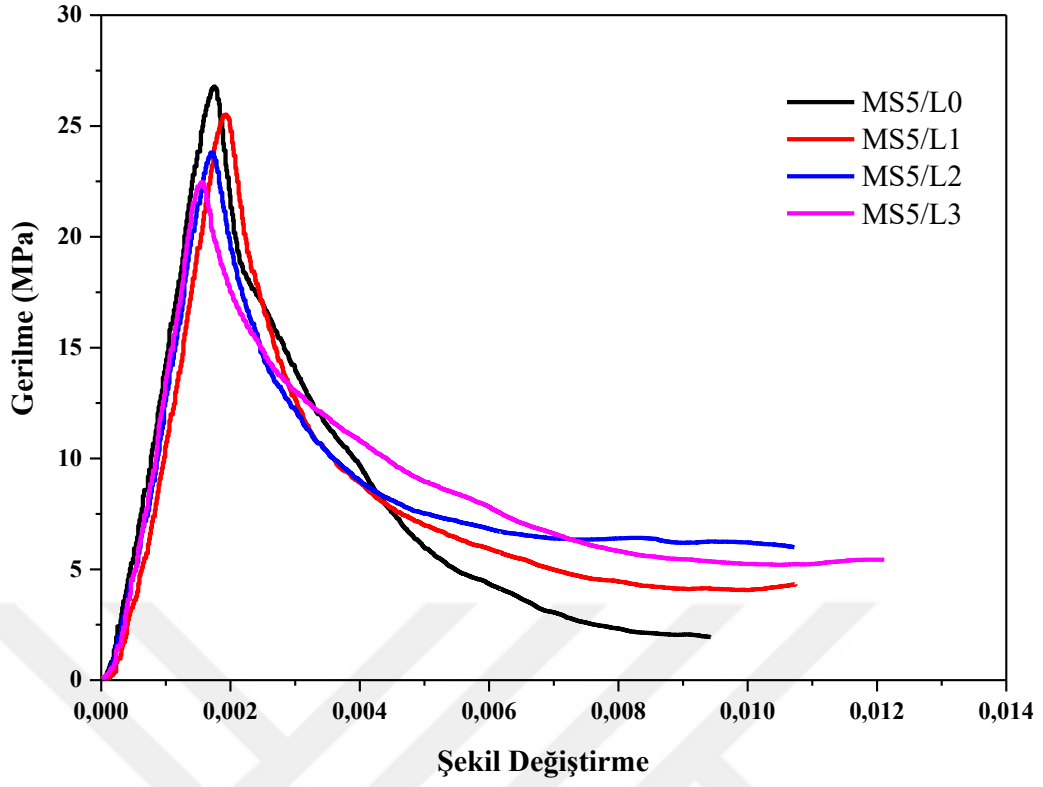
Şekil 4.38. MS10 karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri



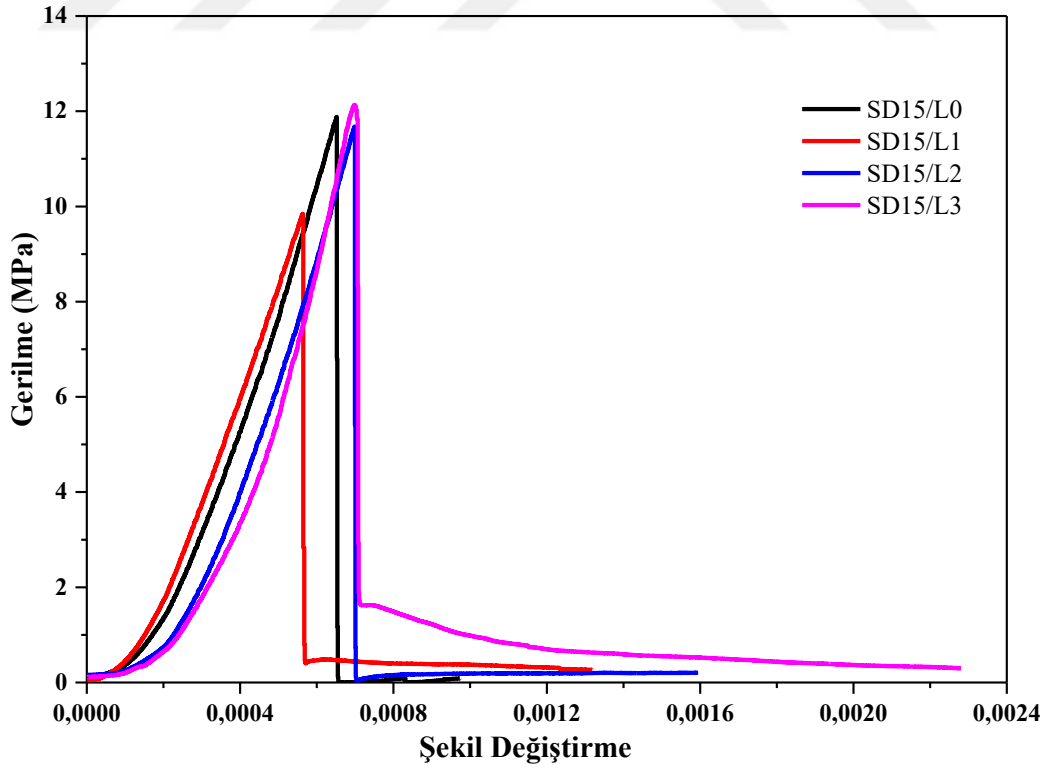
Şekil 4.39. MS10 karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri



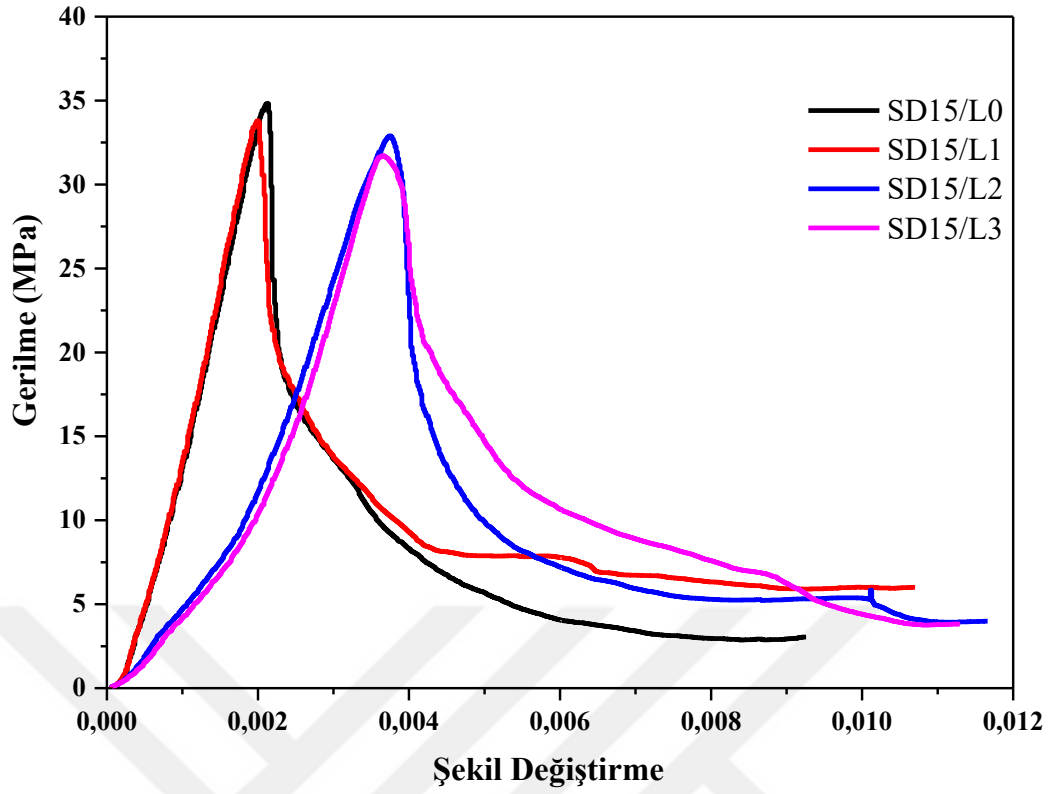
Şekil 4.40. MS5 karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri



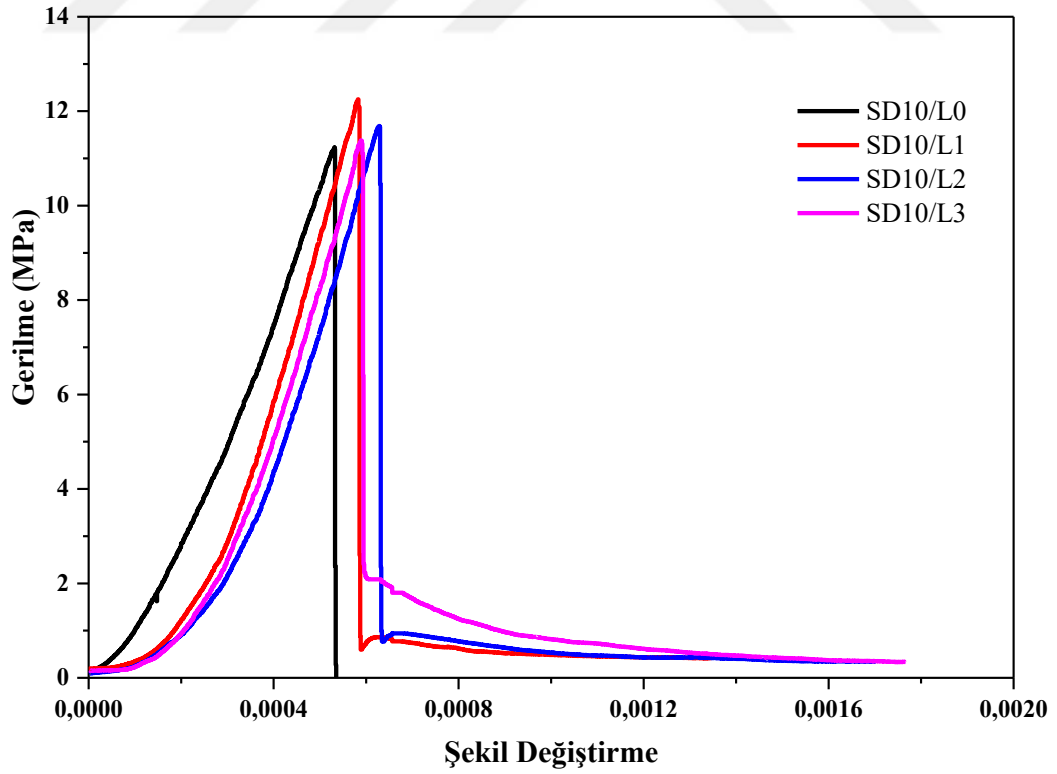
Şekil 4.41. MS5 karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri



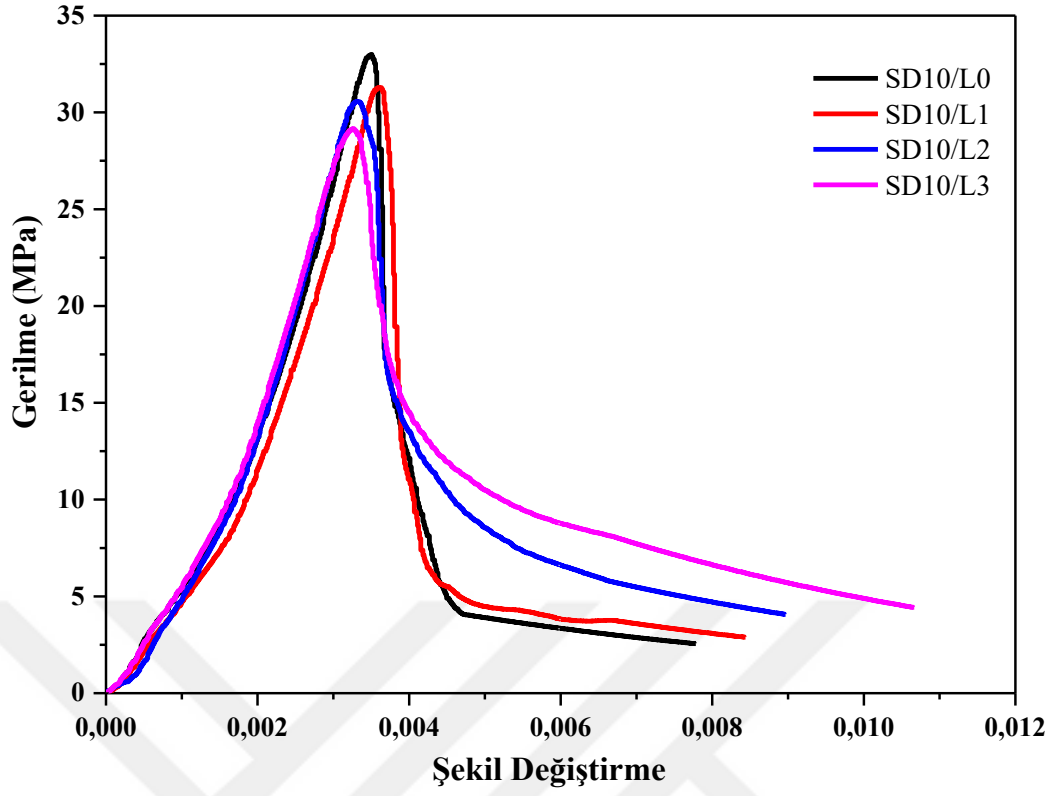
Şekil 4.42. SD15 karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri



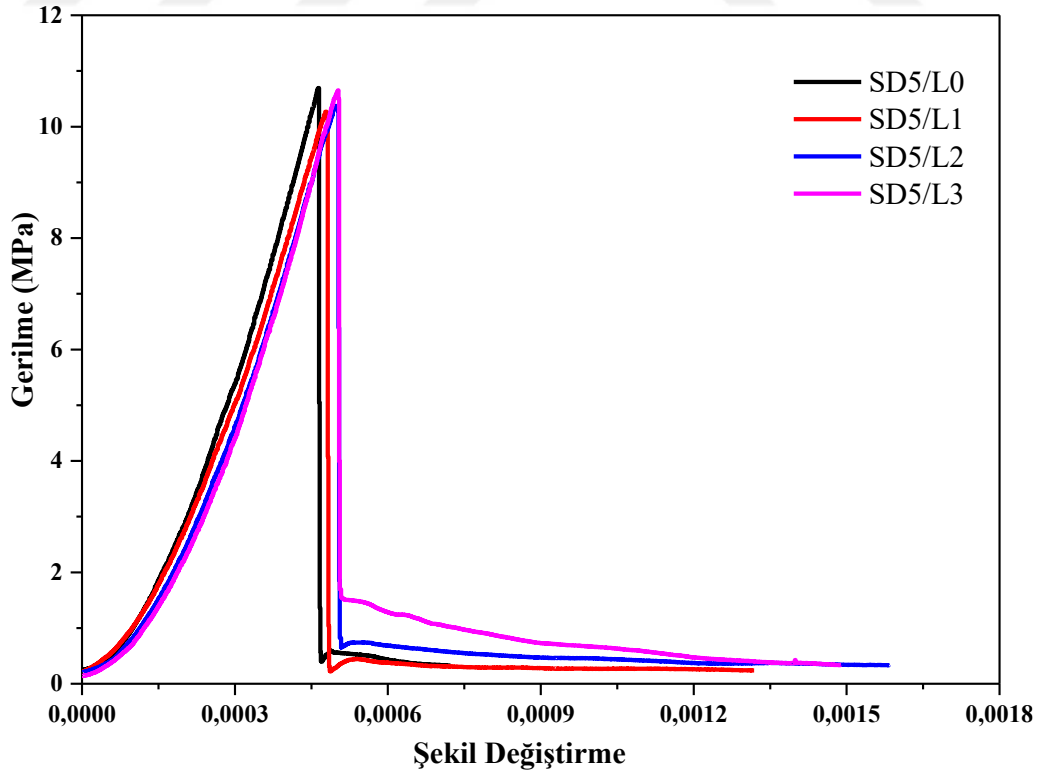
Şekil 4.43. SD15 karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri



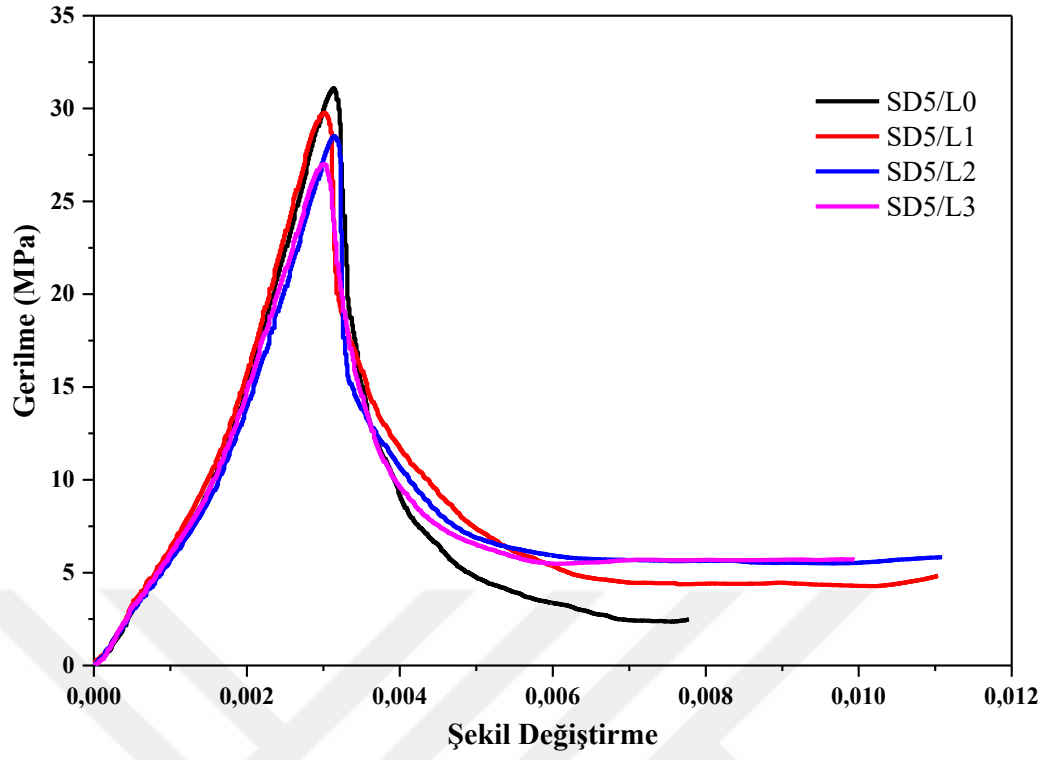
Şekil 4.44. SD10 karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri



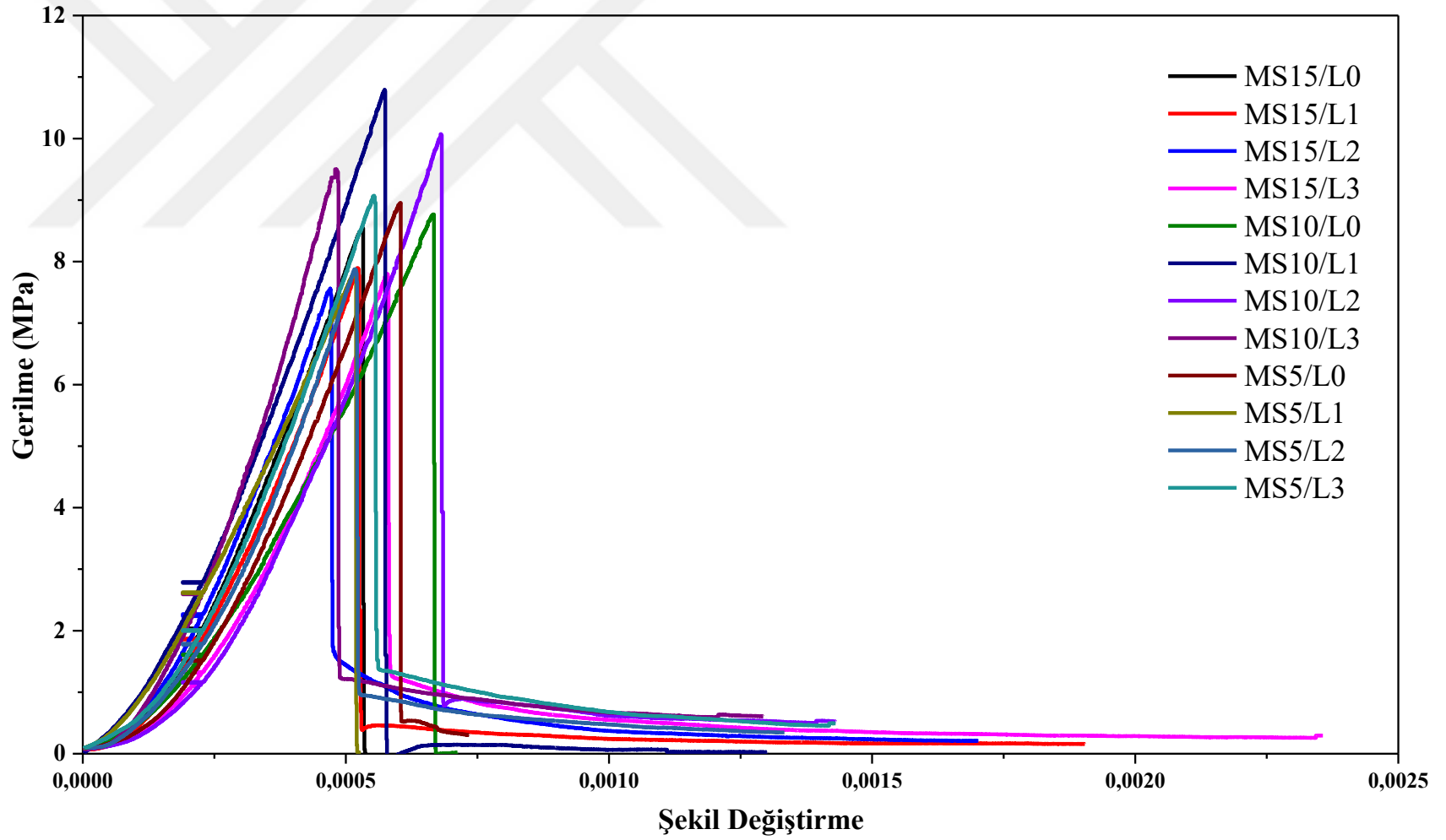
Şekil 4.45. SD10 karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri



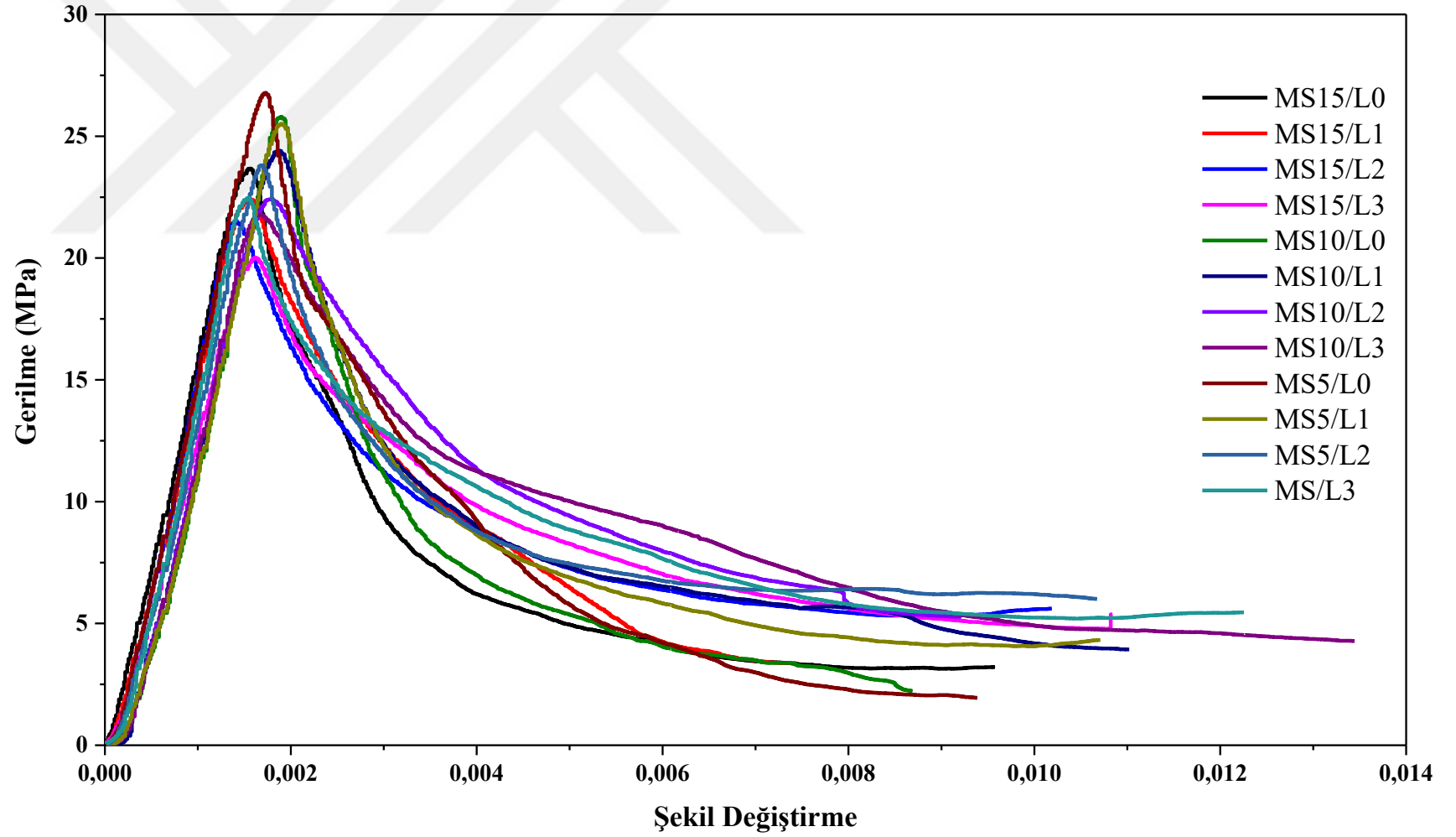
Şekil 4.46. SD5 karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri



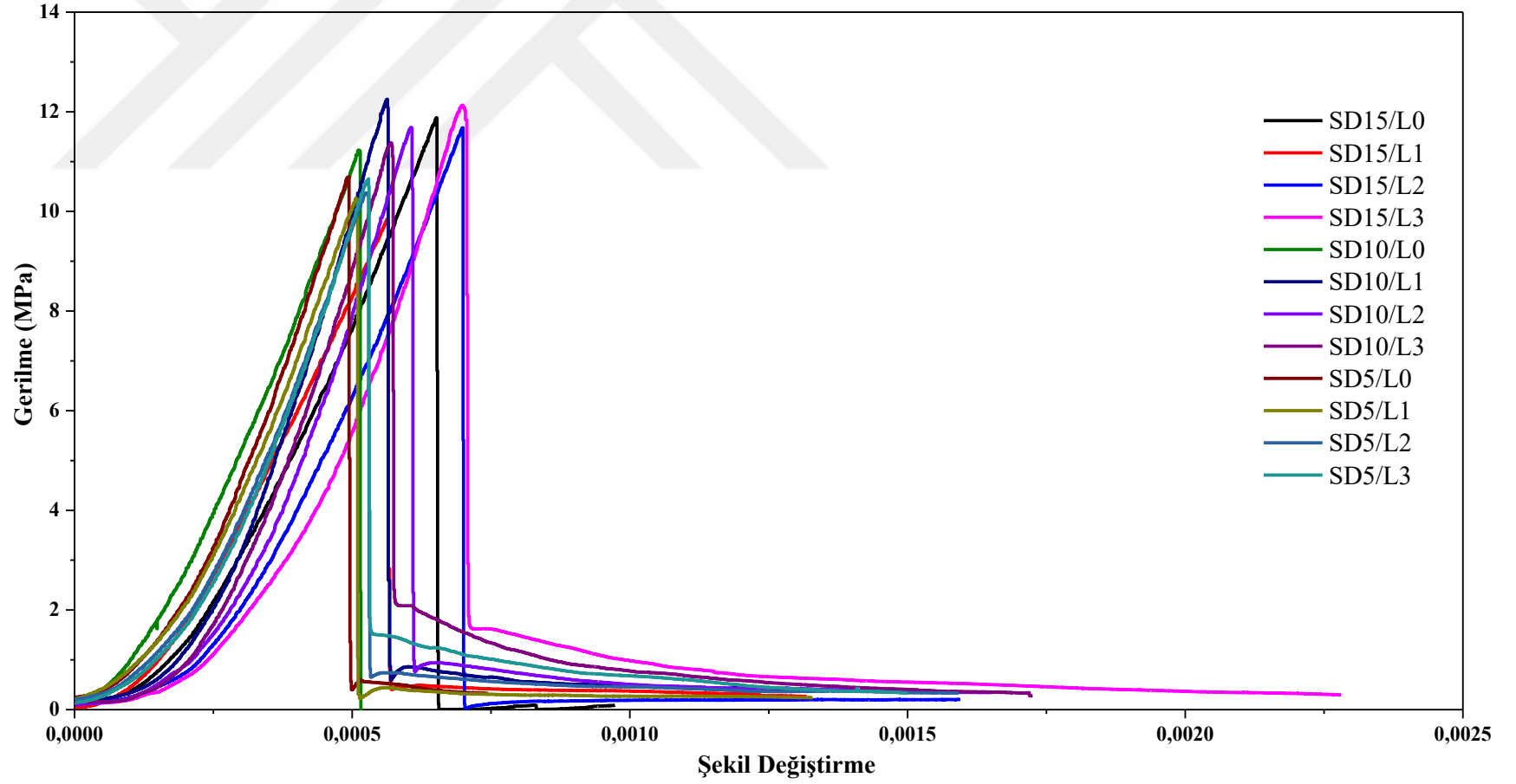
Şekil 4.47. SD5 karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri



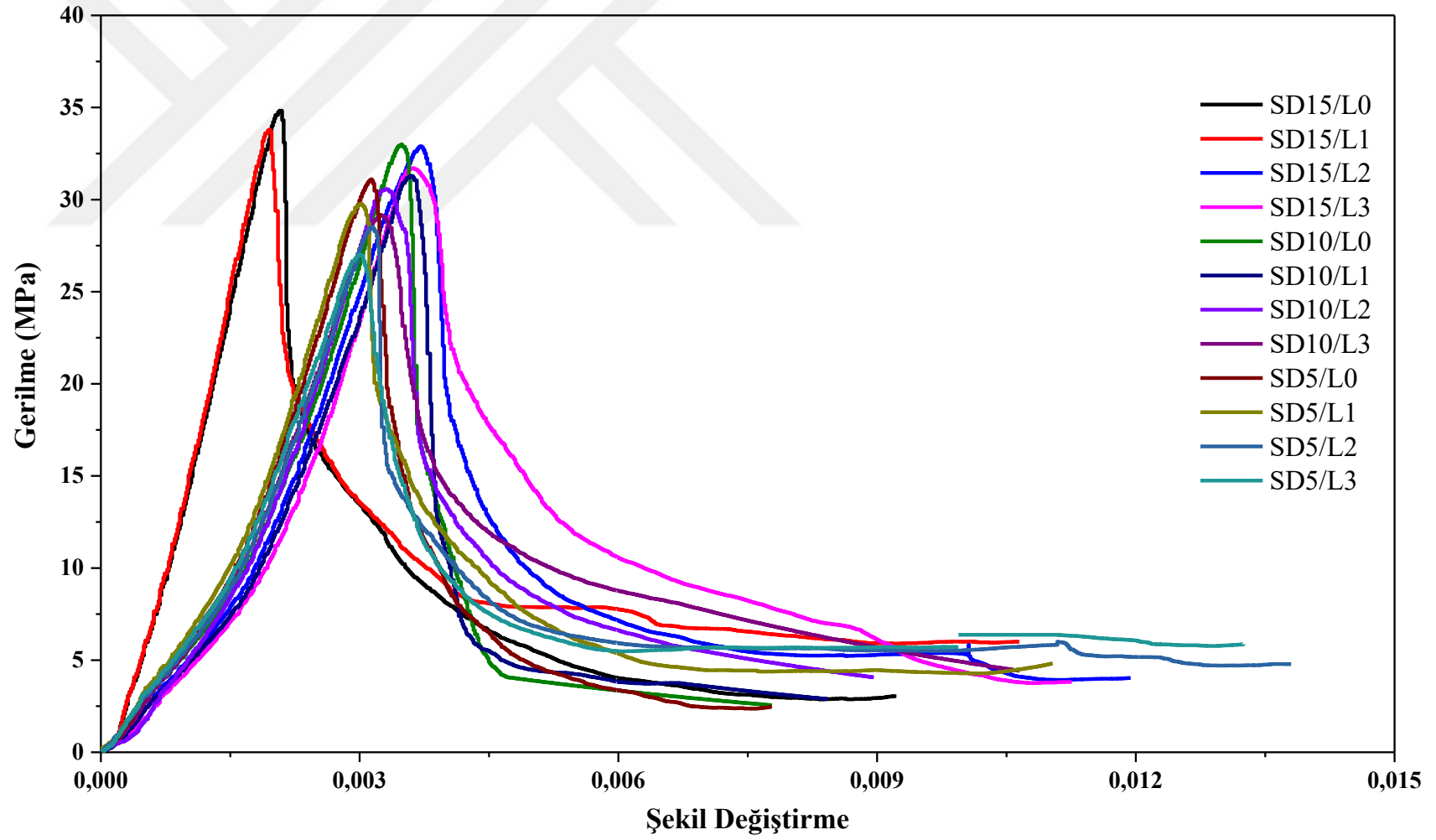
Şekil 4.48. MS karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri toplu şekilde gösterimi



Şekil 4.49. MS karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri toplu şekilde gösterimi



Şekil 4.50. SD karışım serisinin eğilme yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri toplu şekilde gösterimi



Şekil 4.51. SD karışım serisinin basınç yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri toplu şekilde gösterimi

4.3.8. Elastisite modülü değerleri

Elastisite modülü değerleri 4.51-53’de verildiği gibidir. Elastisite modülü tayini 28. günde test edilen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elastisite modülü değerleri artan lif oranlarıyla azalma eğilimi göstermiştir. Elastisite modülünün değerinin düşmesi, eklenen liflerin elastisite modülünün çimento matrisinininkinden daha düşük olmasına bağlanabilir. Silis dumanı içeren karışımlarda SD15/L0 ve SD15/L1 karışımları hariç elastisite modülü 7 GPa’dan daha düşük değerler almıştır. Şekil 4.42’ye bakıldığında, gerilme-şekil değiştirme grafiğindeki elastik bölge SD15/L0 ve SD15/L1’de dik bir açı gözlemlenirken, diğer karışımlarda elastik bölgedeki açının o kadar dik olmadığı ve daha yatay olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca SD15/L0 ve SD15/L1 karışımları 0,002’den daha düşük şekil değiştirme göstererek maksimum dayanıma ulaşırken diğer karışımlar 0.002’den daha yüksek şekil değiştirme göstererek maksimum dayanıma ulaşmışlardır. Bu durum elastisite modülünün düşme sebebi olarak görülebilir. Mikro silika içeren karışımlar serisinde en belirgin düşüş MS15/L3 ve MS5/L1 karışımlarda görülmüştür. MS15/L0 ve MS5/L0 karışımları ile kıyaslandığında elastisite modülün değeri MS15/L3 ve MS5/L1 karışımları için sırasıyla %20,85 ve %22,34 düşmüştür. MS5 serisinde lif oranının %1’den %3’e artmasıyla elastisite modülü 10,6 GPa’dan 12’ye yükselerek %11,66 artış göstermiştir.

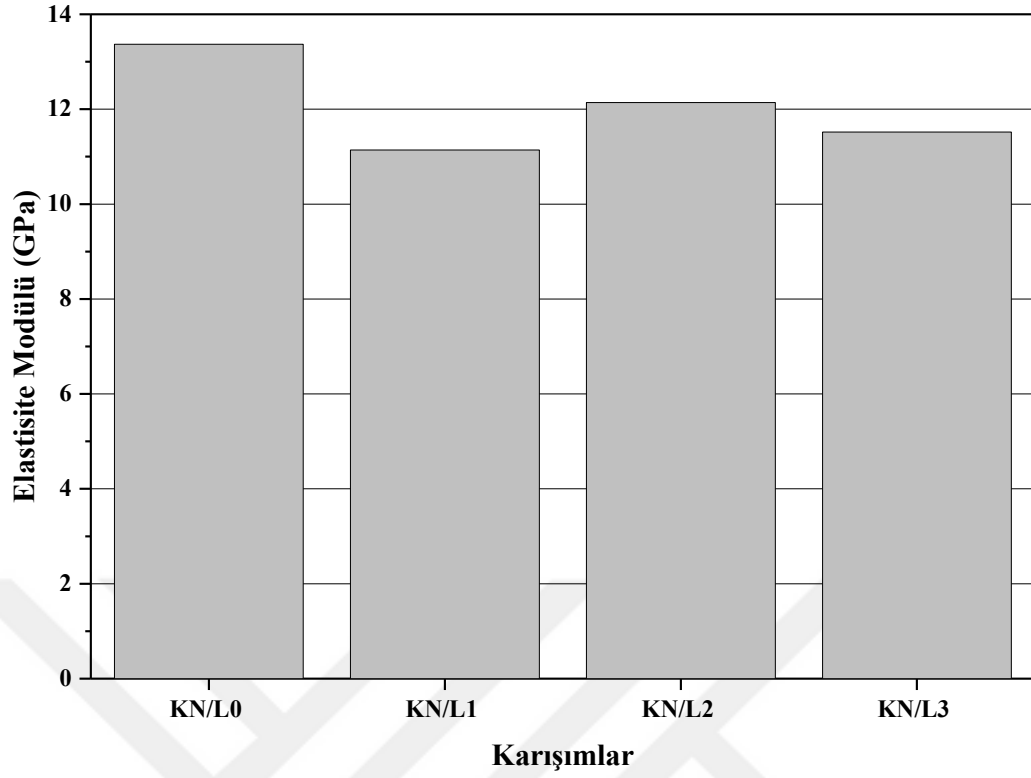
Kurup ve Kumar (2017) % 0,8 PVC lif içeriğinin maksimum elastisite modülünü yaklaşık %40 oranında artırdığını bulmuştur. Silis dumanının %10 oranında çimentoyla yer değiştirdiği PVC lif içeren betonun elastisite modülünü yaklaşık olarak % 49,7 arttırmıştır. Bu muhtemelen lif ve matris arasındaki bağın iyileşmesinden kaynaklanmaktadır. Lif içeriğinin %0,8’inin ötesinde, elastisite modülü azalma eğilimi göstermiştir. Plastik PVC agreganın hafif betonun elastisite modülü üzerindeki etkisi Kou vd. (2009) tarafından araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar PVC içeriğinin artmasıyla elastisite modülünün azaldığını göstermiştir. 28 günlük elastisite modülü değeri %5, %15, %30 ve %45 PVC agrega içeriği için sırasıyla %6,1, %13,8, % 8,9 ve %60,2 oranında düşmüştür. elastisite modülün bozulması aşağıdaki nedenlere atfedilmiştir:

(a) PVC partiküllerin çimento hamuru ile karşılaştırıldığında daha düşük elastisite modülüne sahip olması

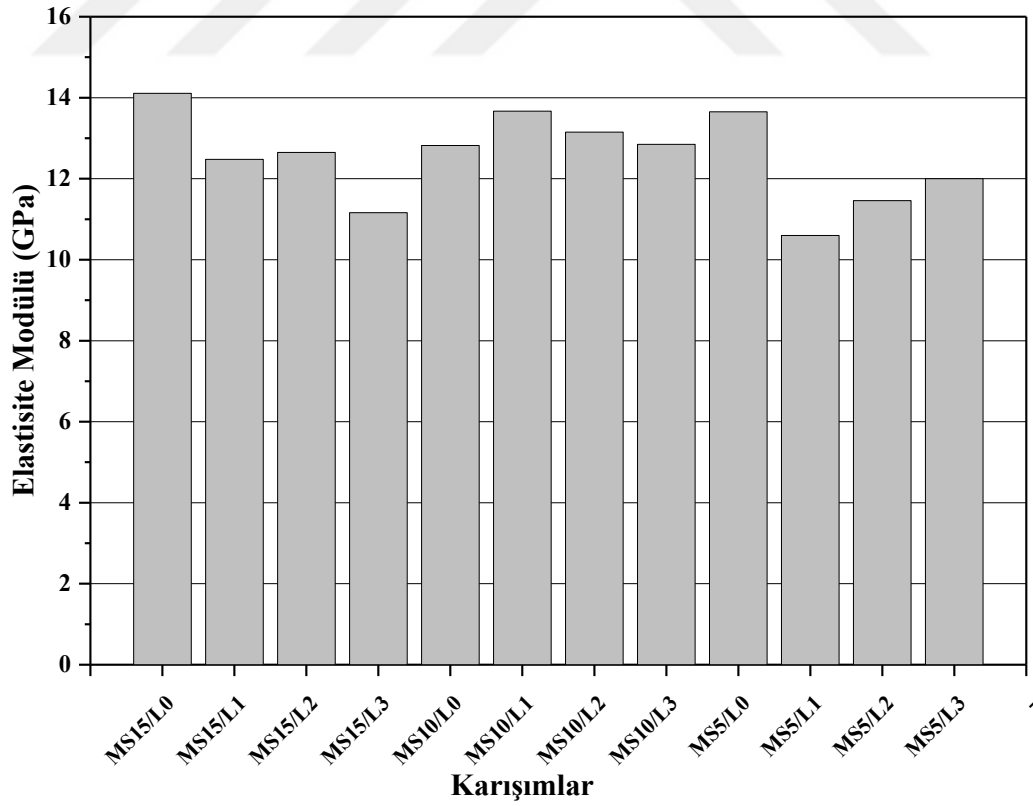
(b) betonun basınç dayanımının PVC agregası ile düşmesi

Hannawi vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada plastik agrega olarak PET ve polikarbonat agregası ince kumla %50’ye varan farklı oranlarda yer değiştirerek kullanılmıştır. Çalışmada plastik agreganın yer değiştirme oranı arttıkça elastisite modülünün referans karışomdan daha düşük değerler aldığı belirtilmiştir. Referans karışımın elastisite modülü 37,3 GPa iken bu değer %50 PET ve polikarbonat agrega içeren karışımlarda sırasıyla 11,8 ve 14,2 GPa olmuştur. Bu düşmenin sebebi, kullanılan plastik agregalarının elastisite modüllerinin düşük olmasına ve çimento matrisi ile plastik agrega arasındaki bağın zayıf olmasına atfedilmiştir.

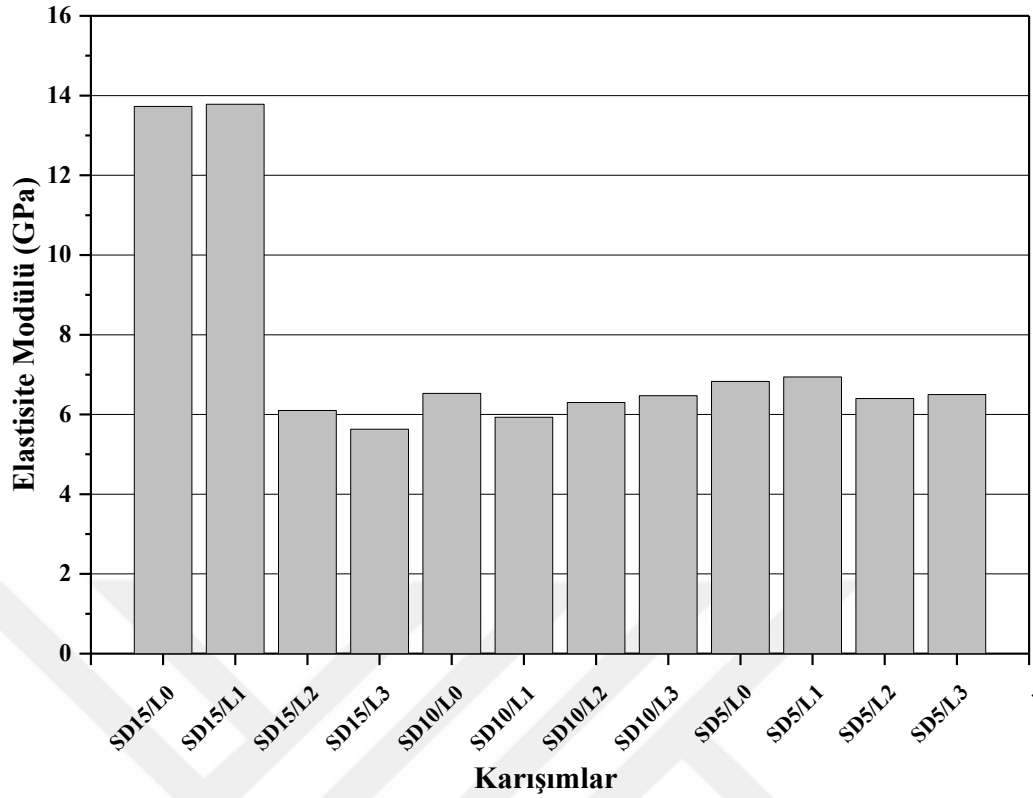
Genel olarak, elastisite modülü öncelikle betondaki her bir bileşenin elastisite modülü ve hacim oranından etkilenir. Her ne kadar plastik lif geleneksel betondan daha düşük bir elastisite modülüne sahip olsa da, lif takviyeli betondaki düşük plastik lif içeriği nedeniyle bu fark elastisite modülü üzerinde sadece küçük bir etkiye sahiptir (Gu ve Özbakkaloğlu 2016).



Şekil 4.52. KN karışım serisinin elastisite modülü değerleri



Şekil 4.53. MS karışım serisinin elastisite modülü değerleri



Şekil 4.54. SD karışım serisinin elastisite modülü değerleri

4.3.9. Tokluk değerleri

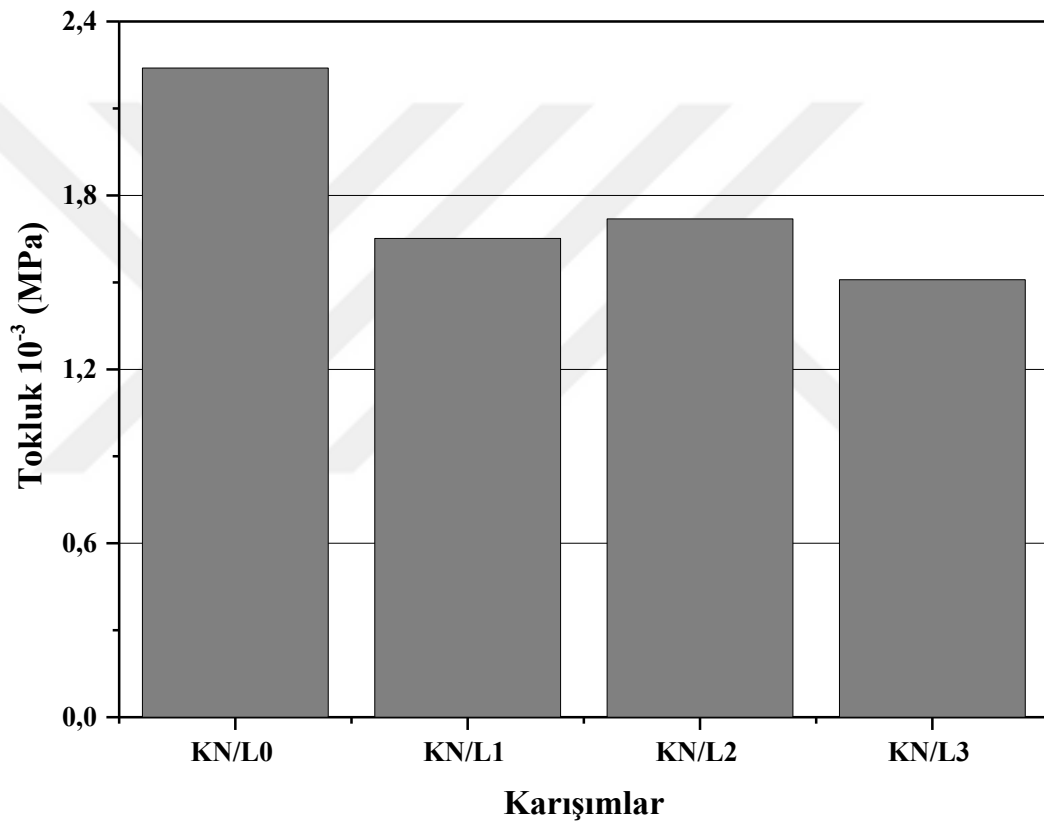
Üretilen harçların eğilme ve basınç yükleri altındaki tokluk değerleri gerilme-şekil değiştirme eğrisinin altındaki alanı hesaplayarak bulunmuştur ve Şekil 4.54-59'de gösterilmiştir. Eğilme tokluğu belirlemek gerilme-şekil değiştirme altındaki alan 0,00070 şekil değiştirme değerine kadar alınmıştır. Basınç tokluğunu belirlemede bu değer 0,0075 olarak seçilmiştir.

Eğilme tokluğu değerleri incelendiğinde, lif oranının artmasıyla tokluk değerlerinin de düştüğü gözlemlenmiştir. En düşük tokluk değerleri kontrol karışımlarda 0,00151 MPa değeri ile KN/L3 numunesinde, mikro silika içeren karışımlar serisinde 0,00237 MPa değeri ile MS15/L2 numunesinde, silis dumanı içeren karışımlar serisinde 0,00181 MPa değeri ile SD10/L3 numunesinde tespit edilmiştir. En yüksek tokluk değerleri kontrol karışımlarda 0,00224 MPa değeri ile KN/L0 numunesinde, mikro silika içeren karışımlar serisinde 0,00254 MPa değeri ile MS10/L1 numunesinde, silis dumanı içeren karışımlar serisinde 0,00288 MPa değeri ile SD15/L0 numunesinde tespit edilmiştir.

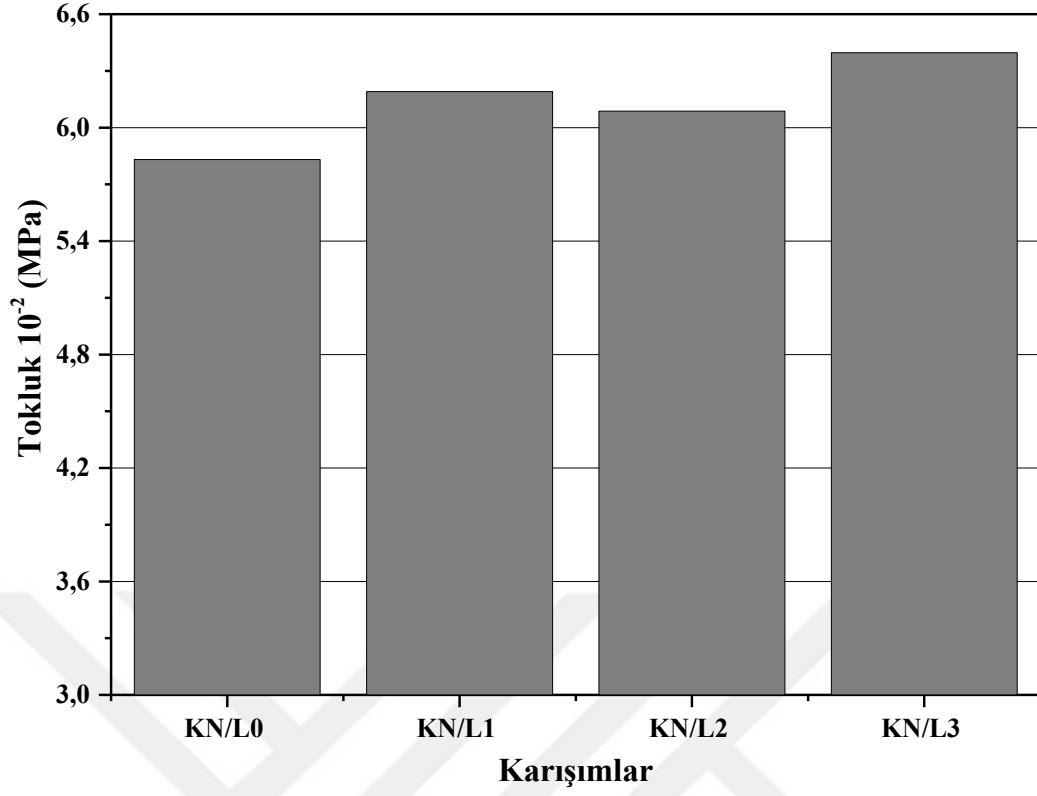
Basınç tokluğu değerleri dikkate alındığında lif oranlarının farklı etki oluşturduğunu görülmüştür. Kimi lif oranlarında tokluk değerleri lifsiz olan karışımlara göre daha düşük değerler almış olsa da, bazı karışımlarda da eklenen liflerin karışımın tokluk kapasitesini geliştirdiğini görülmüştür. Kontrol karışımlarda %3 lif oranı lifsiz olan karışıma göre tokluk değerini %7,31 arttırmıştır. Mikro silika içeren karışımlarda en belirgin tokluk artışı MS10/L2 karışımında görülmüştür, MS10/L0 karışımıyla kıyaslandığında tokluk değeri %16,16 artış göstermiştir. Silis dumanı içeren karışımlarda

SD15/L3 karışımı en yüksek tokluk değerine sahip olmuştur. SD15/L0 karışımıyla karşılaştırıldığında SD15/L3 karışımın tokluk kapasitesini %8,07 arttırdığı gözlemlenmiştir. Eklenen liflerin harcın kırılma sonrası geliştirdiği incelenmiştir. Bu da liflerin çatlakların oluşmasına veya yayılmasına karşı gösterdiği dirence bağlanabilir. Ek olarak, lifli karışımlar nihai dayanıma ulaştıktan sonra daha fazla şekil değiştirme göstererek daha sünek bir davranış sergilemiştir.

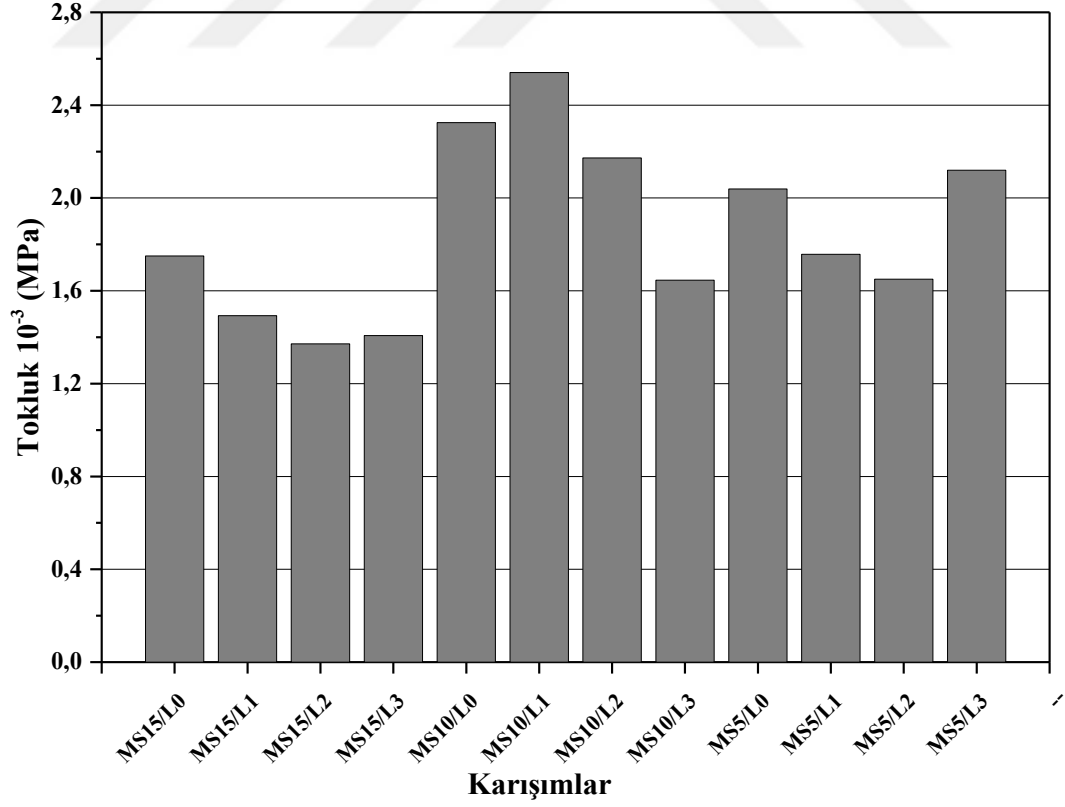
Bui vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada geri dönüştürülmüş plastik liflerin geri dönüştürülmüş agrega içeren betonun tokluk davranışını incelemiştir. PET lif ve geri dönüştürülmüş plastik çuval lifin eklenmesi, geri dönüştürülmüş agregalı betonun tokluğunu arttırmıştır. PET lifler betonun tokluğunu geri dönüştürülmüş plastik çuval lifden daha iyi geliştirmiştir. Sonuç olarak, geri dönüştürülmüş plastik çuval lifin PET lifden daha düşük çatlama sonrası performansa sahip olduğu görülmüştür.



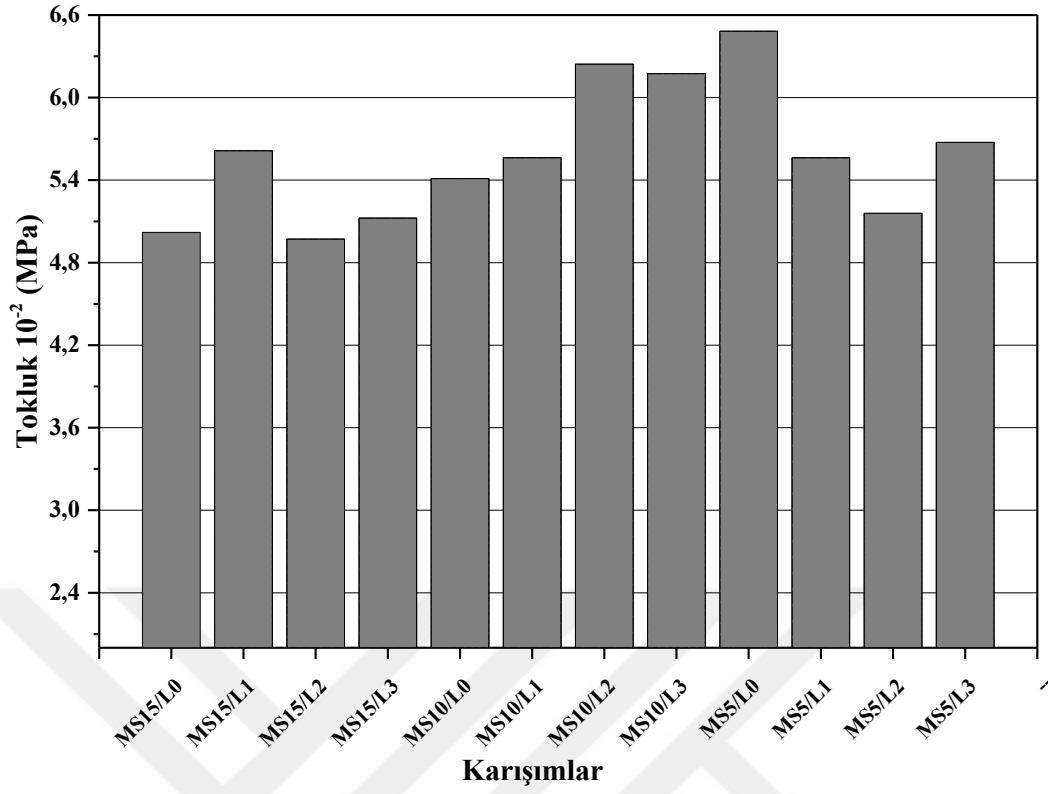
Şekil 4.55. KN karışım serisinin eğilme tokluğu değerleri



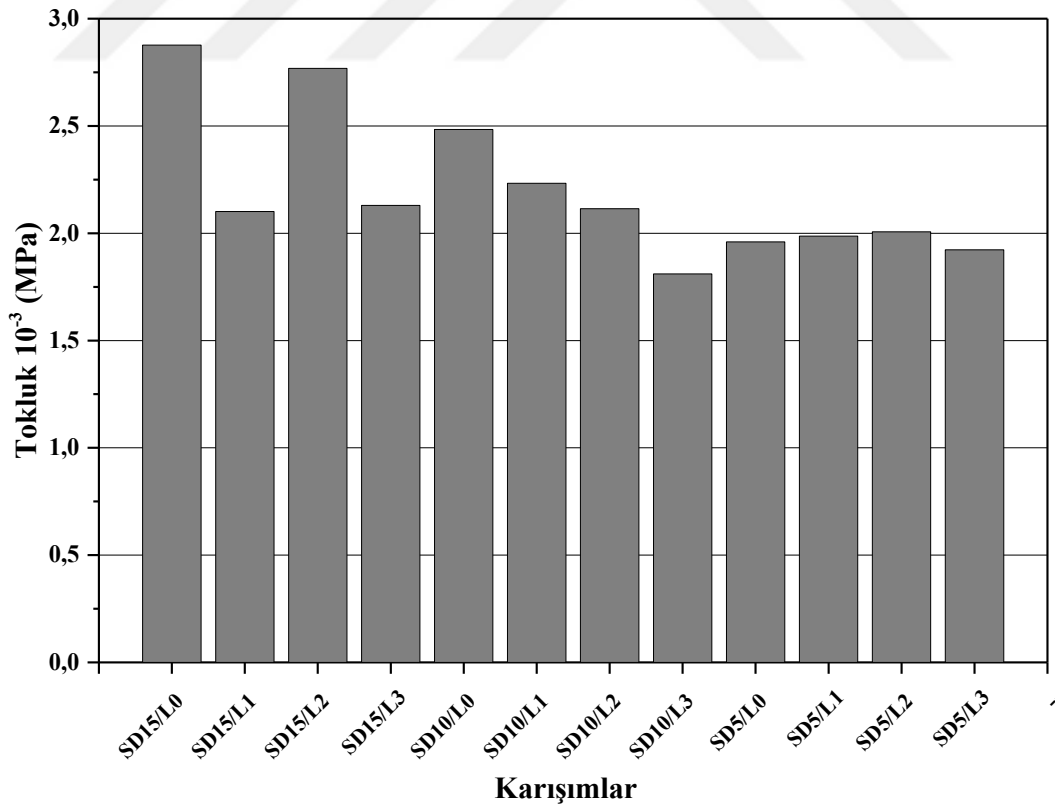
Şekil 4.56. KN karışım serisinin basınç tokluğu değerleri



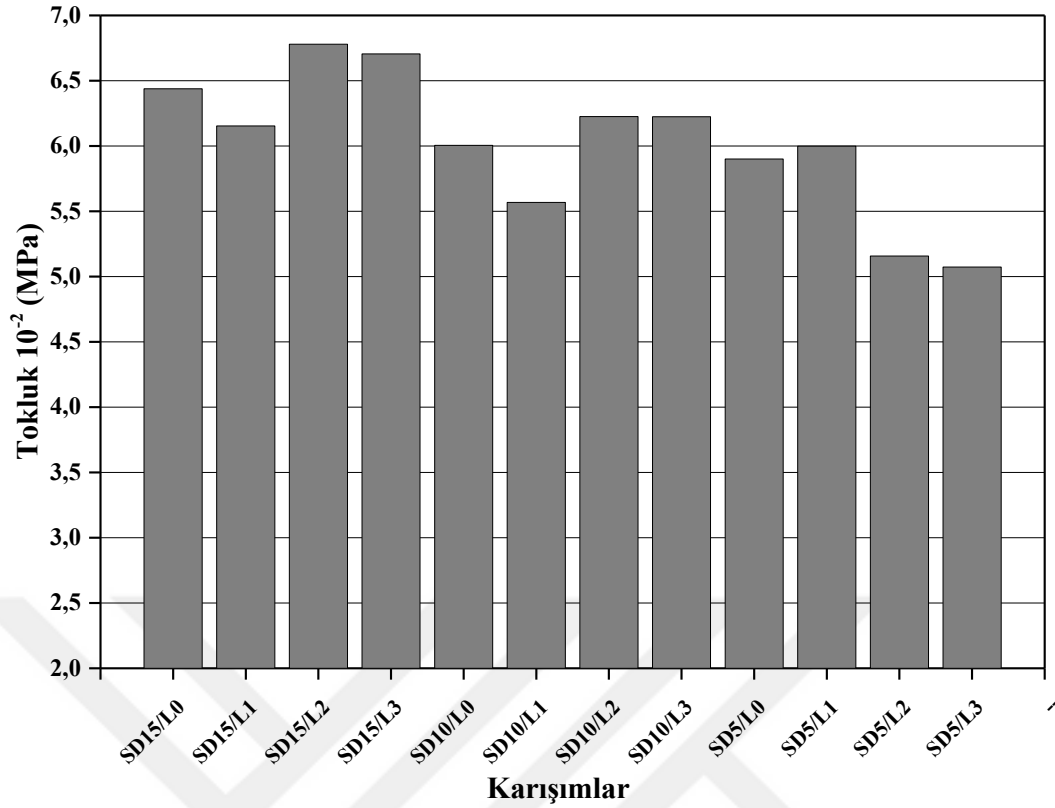
Şekil 4.57. MS karışım serisinin eğilme tokluğu değerleri



Şekil 4.58. MS karışım serisinin basınç tokluğu değerleri



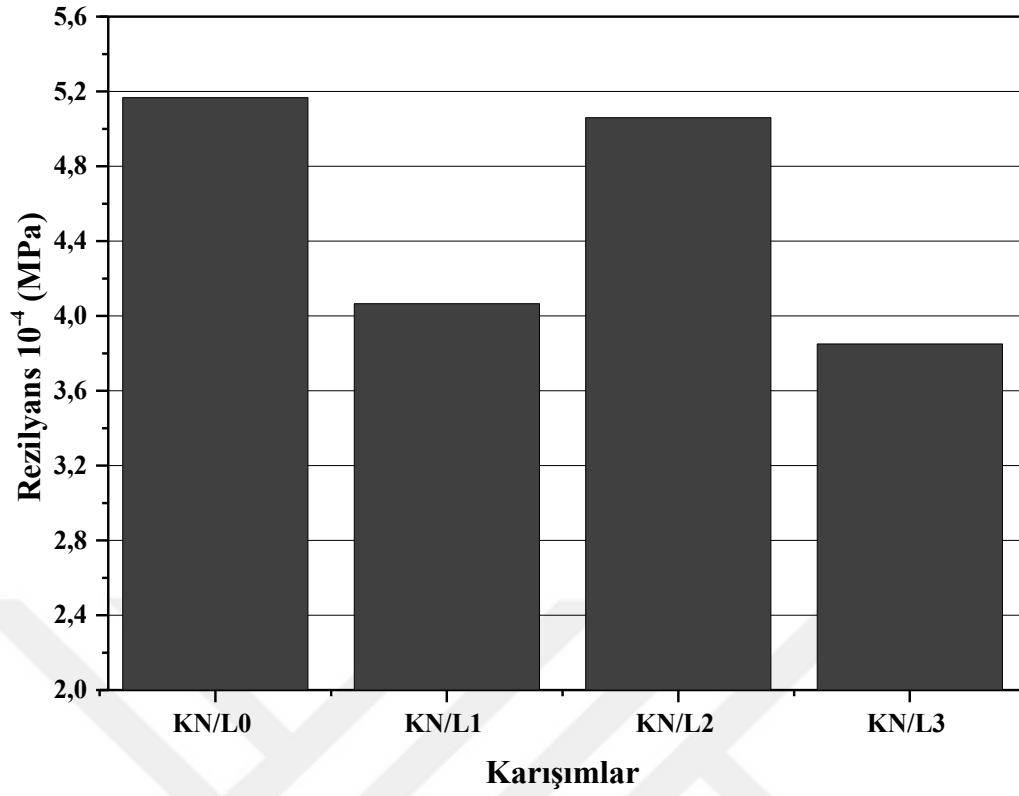
Şekil 4.59. SD karışım serisinin eğilme tokluğu değerleri



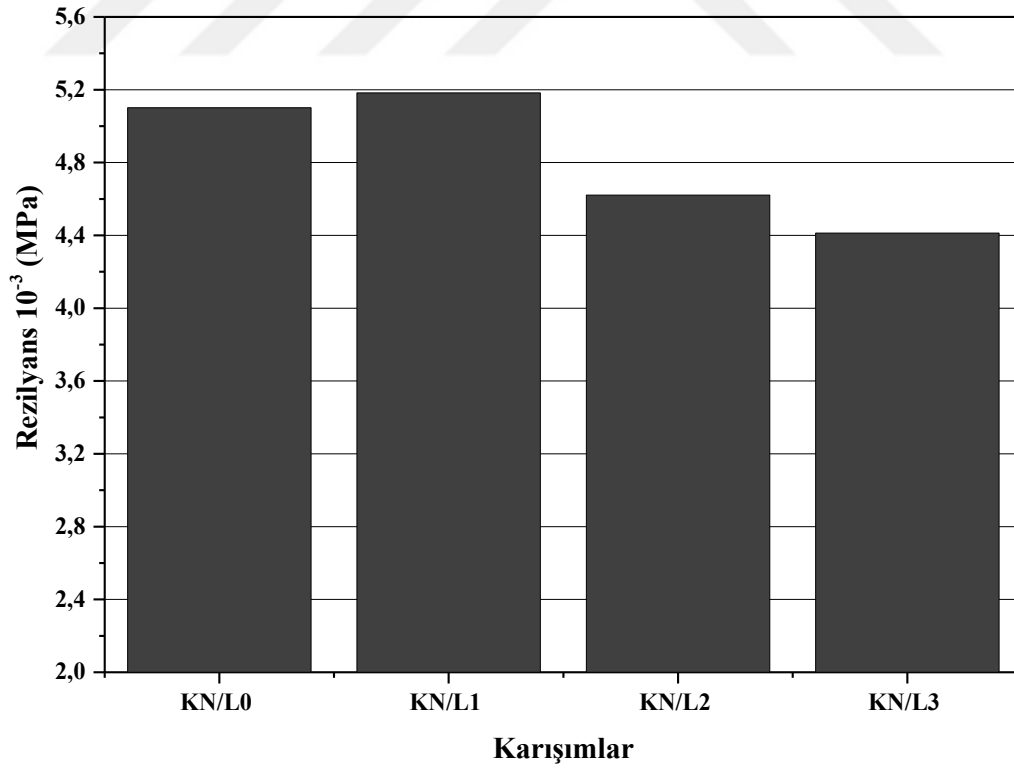
Şekil 4.60. SD karışım serisinin basınç tokluğu değerleri

4.3.10. Rezilyans değerleri

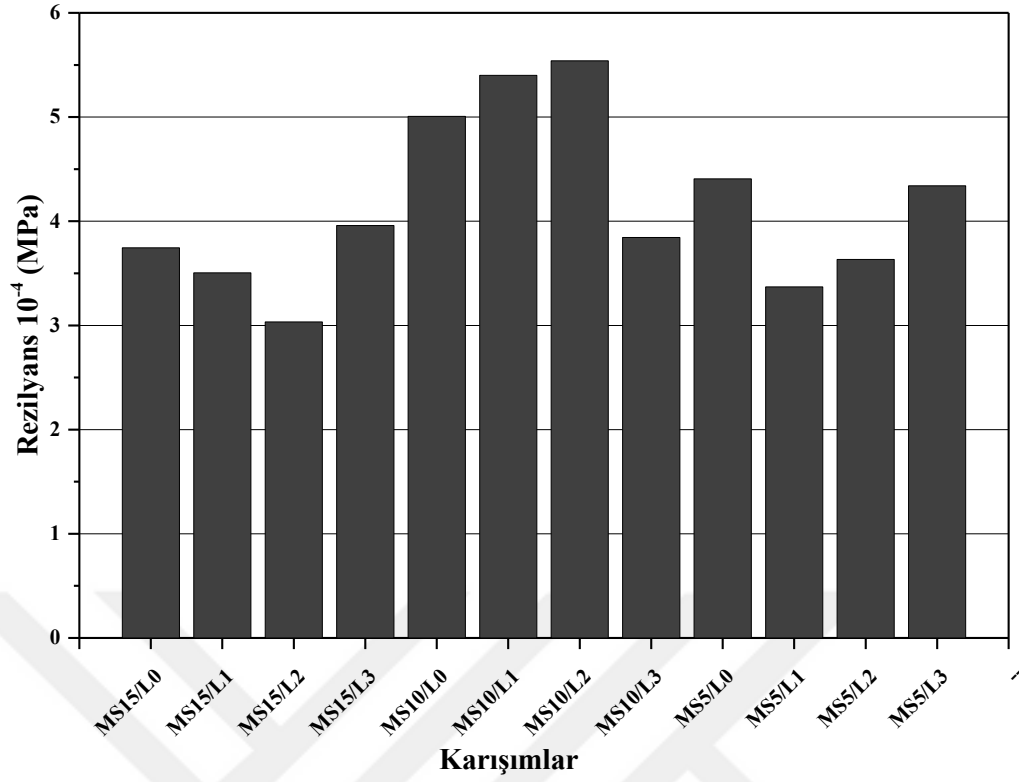
Rezilyans bir malzemenin elastik şekil değişimi sırasında depoladığı enerjidir. Rezilyans değeri gerilme şekil değiştirme eğrisinin elastik kısmının altında kalan alanla belirlenmiştir ve sonuçlar 4.60-65’de gösterilmiştir. Sertleşmiş harçların rezilyans değerleri hem eğilme hem basınç yükleri altında 28. günde yapılan deneyler sonucunda hesaplanmıştır. Elden edilen sonuçlar incelendiğinde harçların rezilyans değerlerinin birbirine yakın değerler aldığı görülmüştür. Ayrıca bazı karışımlarda eklenen PVC plastik liflerin rezilyans kapasitesini iyileştirip geliştirdiği de gözlemlenmiştir. Örneğin MS10 karışım serisinde %2 oranında lif eklenmesi lifsiz oran karışıma göre (MS10/L0) eğilme rezilyansını %10,66 geliştirmiştir. En belirgin rezilyans artışı SD15 karışım serisinde elde edilmiştir. Eğilme rezilyansı SD15/L3 karışımında 0,00072 MPa’dır, SD15/L0 karışımıyla karşılaştırıldığında rezilyans davranışının %15,78 oranında artışı gözlemlenmiştir. Basınç rezilyansına bakıldığında SD15 serisinde %2 oranında lif eklenmesi lifsiz olan karışıma kıyaslandığında rezilyans değerinde çok büyük bir artış sağladığı açıkça görülmüştür. SD15/L0 karışımının rezilyans değeri 0,00594 MPa iken bu değer SD15/L2 karışımında %95,68 artarak 0,0116 MPa olmuştur. Rezilyans değerinin bu kadar artması gerilme-şekil değiştirme grafiğindeki elastik bölgeden kaynaklanmıştır (Şekil 4.42).



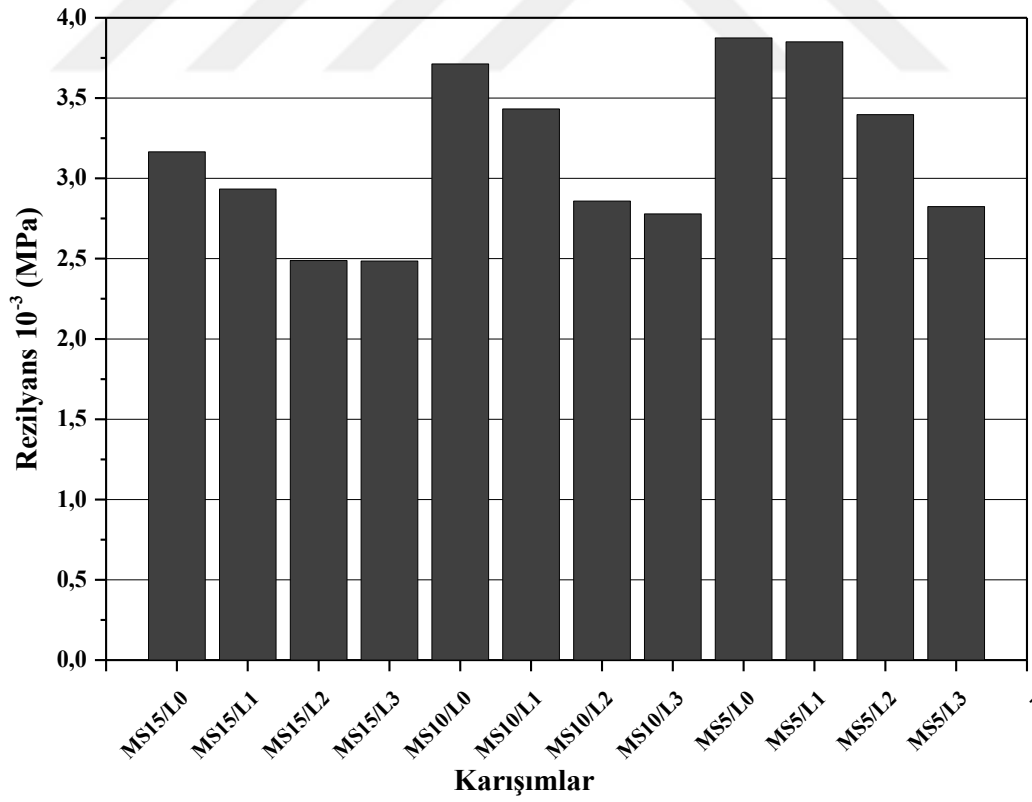
Şekil 4.61. KN karışım serisinin eğilme rezilyansı değerleri



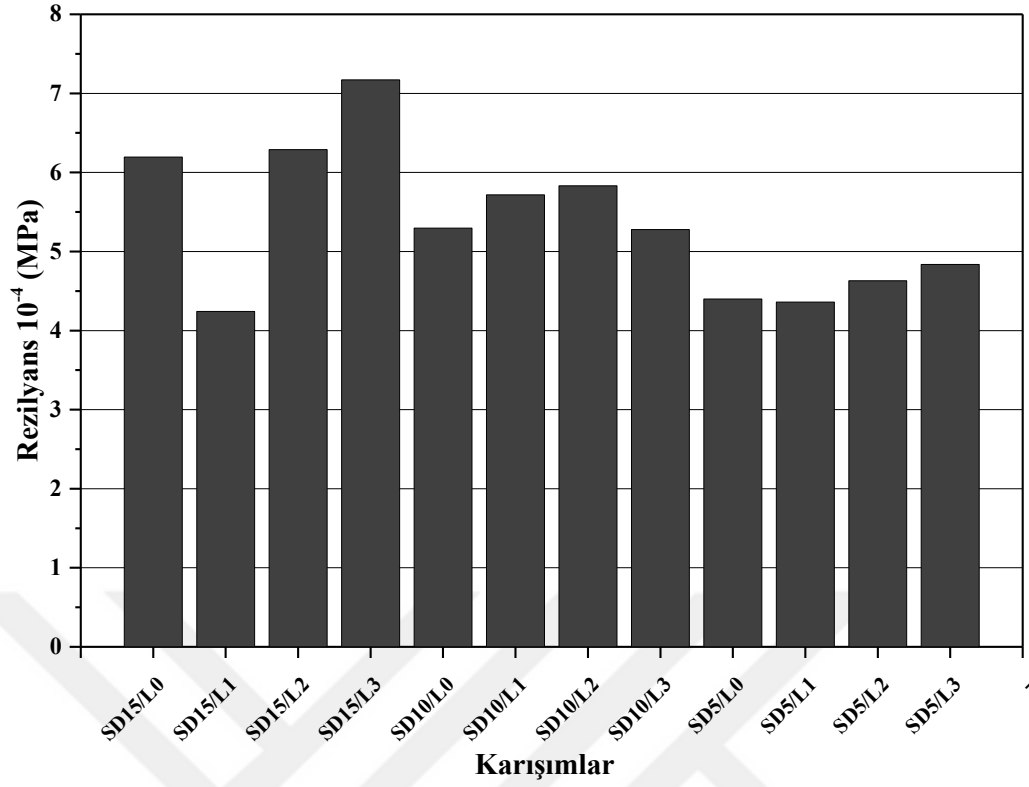
Şekil 4.62. KN karışım serisinin basınç rezilyansı değerleri



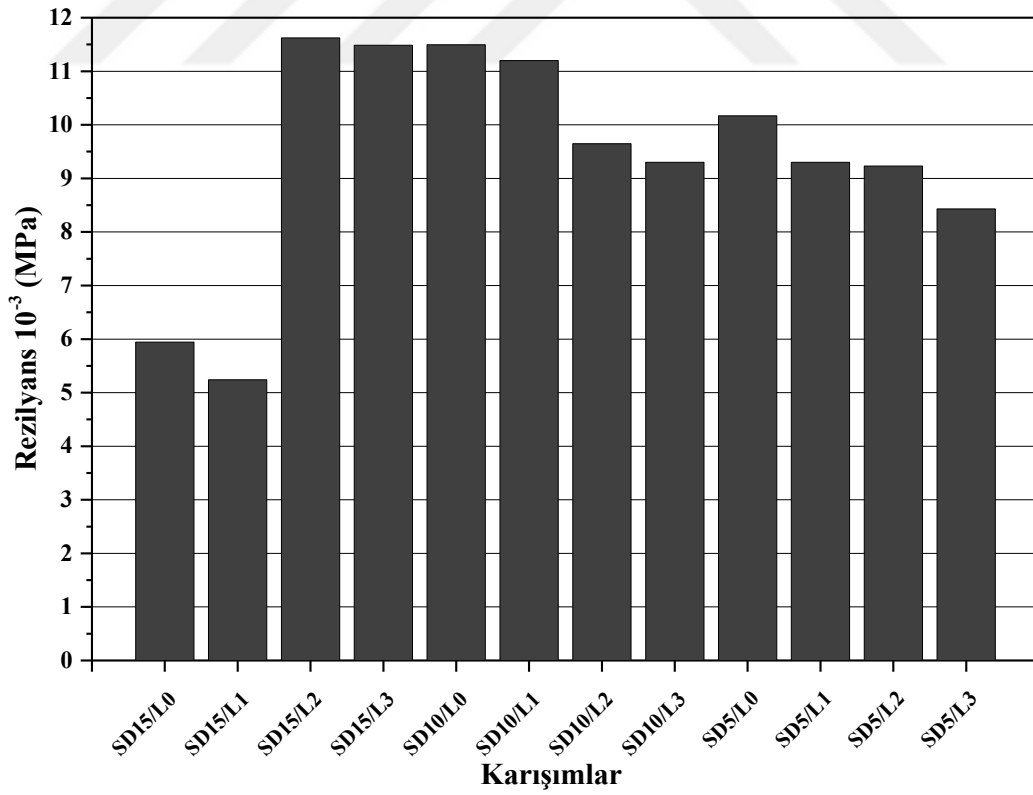
Şekil 4.63. MS karışım serisinin eğilme rezilyansı değerleri



Şekil 4.64. MS karışım serisinin basınç rezilyansı değerleri



Şekil 4.65. SD karışım serisinin eğilme rezilyansı değerleri



Şekil 4.66. SD karışım serisinin basınç rezilyansı değerleri

4.3.11. Kılcal su emme katsayısı değerleri

Harçların kılcal su emme katsayısı değerleri Çizelge 4.9 ve Şekil 4.66-68’de sergilenmektedir. Kontrol numuneleri incelendiğinde, en yüksek kılcal su emme katsayısını 28. gün ve 90. gün için sırasıyla $5,81 \times 10^{-4}$ ve $9,22 \times 10^{-4}$ cm/sn^{1/2} olmak üzere KN/L0 numunesi gösterirken, en düşük değerler ise sırasıyla $4,30 \times 10^{-4}$ ve $6,03 \times 10^{-4}$ cm/sn^{1/2} olmak üzere KN/L1 numunesinde elde edilmiştir.

MS serisi dikkate alındığında, en yüksek kılcal su emme katsayısını 28. gün ve 90. gün için sırasıyla $1,26 \times 10^{-3}$ ve $1,74 \times 10^{-3}$ cm/sn^{1/2} olmak üzere MS15/L0 numunesi gösterirken, en düşük değerler ise sırasıyla $3,98 \times 10^{-4}$ ve $1,10 \times 10^{-3}$ cm/sn^{1/2} olmak üzere MS10/L2 ve MS5/L1 numunelerinde elde edilmiştir.

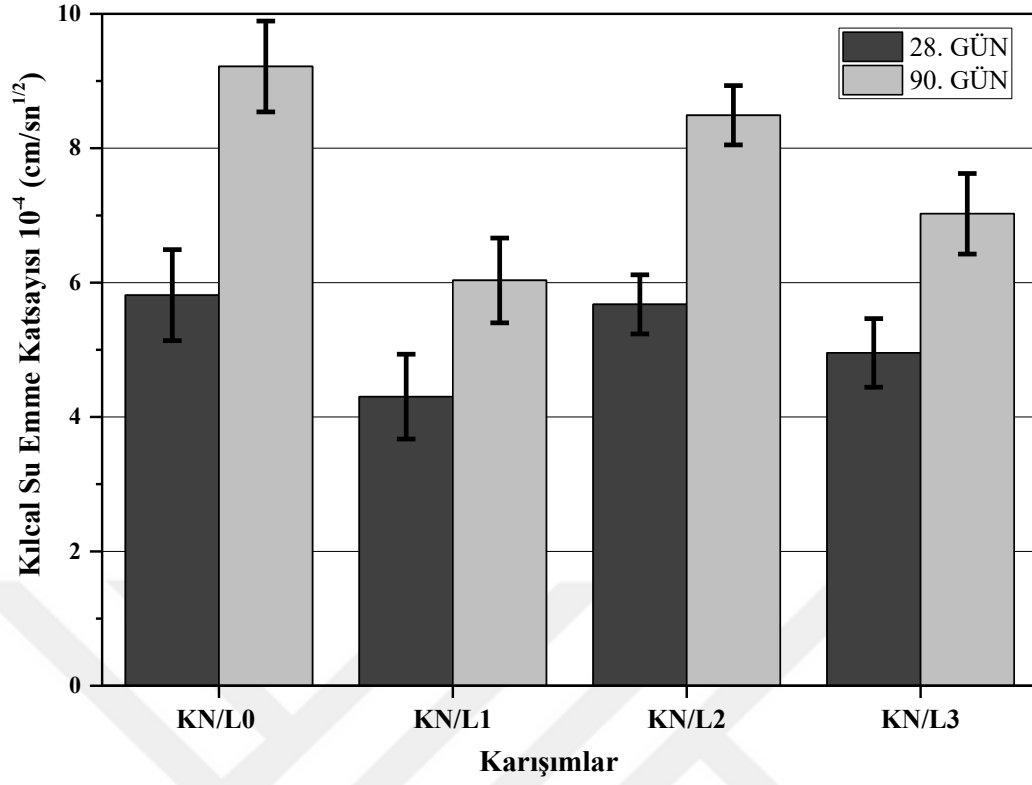
SD serisi dikkate alındığında, en yüksek kılcal su emme katsayısını 28. gün ve 90. gün için sırasıyla $3,99 \times 10^{-4}$ ve $7,91 \times 10^{-4}$ cm/sn^{1/2} olmak üzere SD5/L0 numunesi gösterirken, en düşük değerler ise sırasıyla $2,08 \times 10^{-4}$ ve $4,15 \times 10^{-4}$ cm/sn^{1/2} olmak üzere SD10/L1 ve SD15/L3 numunelerinde elde edilmiştir.

Silis dumanının ince taneleri sayesinde, karışımlarda dozajı arttıkça kılcal su emme katsayısı daha düşük değerler almıştır. Ancak mikro silikanın çimentoyla yer değiştirme oranı arttıkça daha yüksek kılcal su emme katsayısı elde edilmiştir. Kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında, 28. günde elde edilen kılcal su emme katsayıları SD15/L0, SD15/L1, SD15/L2 ve SD15/L3 kodlu numuneler için sırasıyla %44,75, %36,60, %60,74 ve %55,75 oranında düştüğü gözlemlenmiştir.

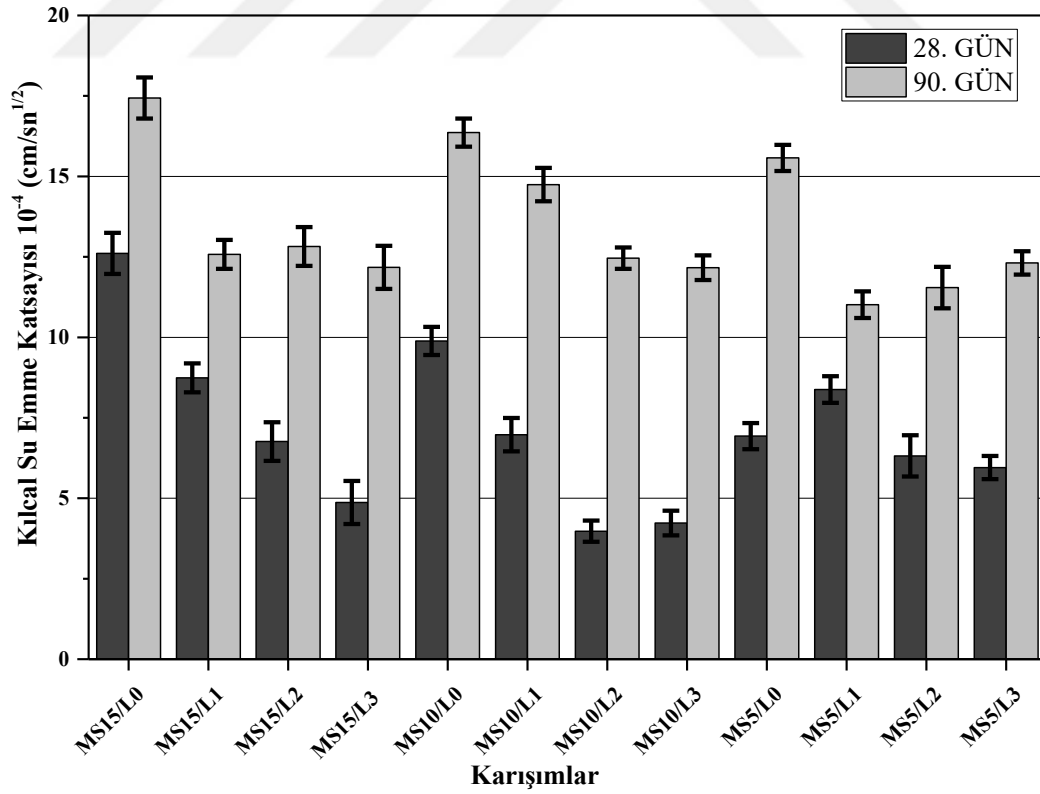
Lif oranının etkisi incelendiğinde, karışımlar üzerinde farklı etkiler oluştursa da, lifsiz olan karışımlarla kıyaslandığında, plastik lif içeren karışımların daha düşük kılcal su emme katsayısı değerine sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni liflerin karışımın içinde rastgele dağıldığı için olabilir. Koçkal ve Çamurlu (2020) farklı ve çeşitli özelliklere sahip agregaları içeren harçlarda %0-2 oranında polipropilen lifin eklenmesi harçların kılcal su emme davranışını farklı etkilediğini bildirmişlerdir. Eklenen liflerin kalkerli kum içeren harçların kılcal su emme katsayısını arttırırken, bazaltik pomza ve asidik pomza içeren harçlarda kılcal su emme katsayısını düşürme eğiliminde olduğunu gözlemlenmiştir. Bu davranış, liflerle agrega arasındaki etkileşimin agreganın kimyasal, minorolojik ve fiziksel özelliklerinden etkilendiği gerçeğine dayandırılmıştır. Ramezaniyanpour vd. (2013) yaptıkları çalışmada, polipropilen liflerin betonun kılcal yoluyla emdiği su oranını düşürdüğünü bildirmişlerdir. Liflerin gözenekleri doldurma etkisiyle boşlukların arasındaki bağlantılarını kopardığını açıklayan yazarlar, bu durumun daha düşük su emme sebebi olduğunu rapor etmişlerdir (Rostami vd. 2011). Pesic vd. (2016) ve Homma vd. (2009) tarafından elde edilen sonuçlar, mevcut çalışmada elde edilen sonuçları destekler durumda. Pesic vd. (2016), %0,4 ve %1,25 arasında değişen oranlarla polietilen liflerin kullanılmasını referans betonla kıyasla su geçirimsizliğini %35 ile %80 oranında azalttığını bildirmişlerdir. Homma vd. (2009), mikro polietilen liflerin kılcal su emme katsayısını azaltmakta etkili olduğunu rapor etmişlerdir.

Çizelge 4.9. Karışımların kılcal su emme katsayısı değerleri (cm/sn^{1/2})

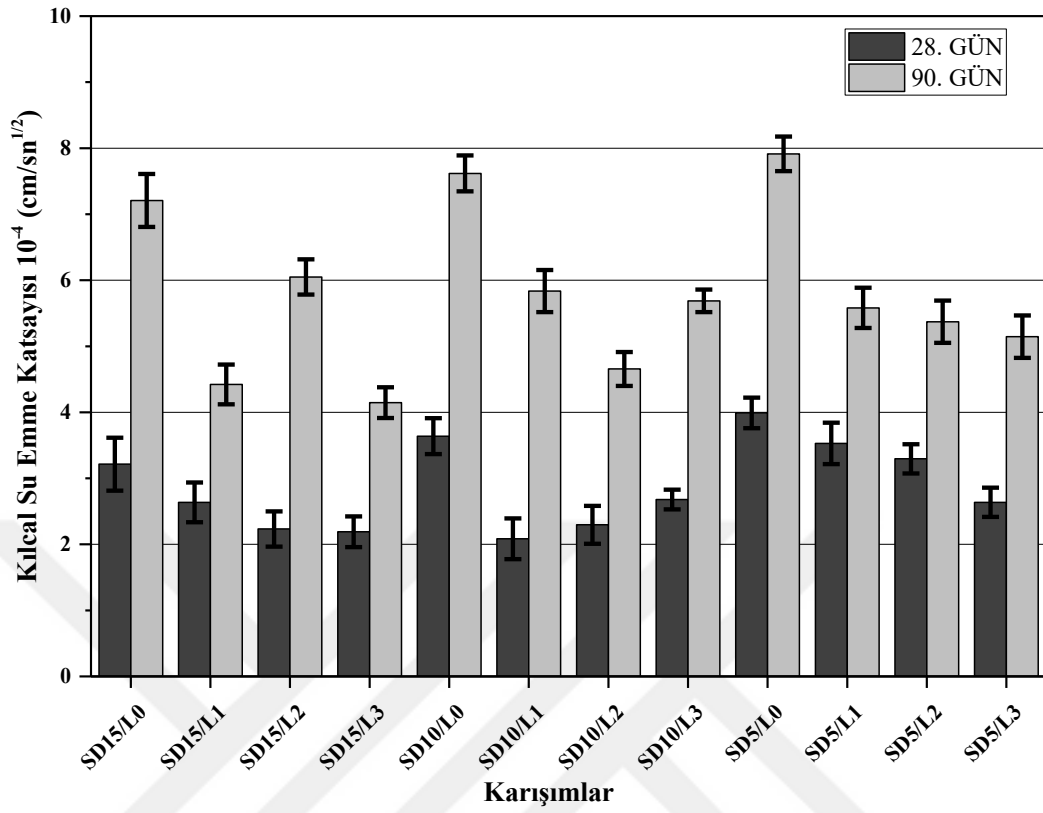
Karışım Kodu	28. Gün	90. Gün
KN/L0	5,81E-04	9,22E-04
KN/L1	4,30E-04	6,03E-04
KN/L2	5,68E-04	8,49E-04
KN/L3	4,95E-04	7,02E-04
MS15/L0	1,26E-03	1,74E-03
MS15/L1	8,74E-04	1,26E-03
MS15/L2	6,76E-04	1,28E-03
MS15/L3	4,87E-04	1,22E-03
MS10/L0	9,89E-04	1,64E-03
MS10/L1	6,97E-04	1,47E-03
MS10/L2	3,98E-04	1,25E-03
MS10/L3	4,23E-04	1,22E-03
MS5/L0	6,93E-04	1,56E-03
MS5/L1	8,38E-04	1,10E-03
MS5/L2	6,32E-04	1,15E-03
MS5/L3	5,95E-04	1,23E-03
SD15/L0	3,21E-04	7,21E-04
SD15/L1	2,64E-04	4,42E-04
SD15/L2	2,23E-04	6,05E-04
SD15/L3	2,19E-04	4,15E-04
SD10/L0	3,64E-04	7,61E-04
SD10/L1	2,08E-04	5,84E-04
SD10/L2	2,30E-04	4,66E-04
SD10/L3	2,68E-04	5,69E-04
SD5/L0	3,99E-04	7,91E-04
SD5/L1	3,53E-04	5,58E-04
SD5/L2	3,30E-04	5,37E-04
SD5/L3	2,64E-04	5,15E-04



Şekil 4.67. KN karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri



Şekil 4.68. MS karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri



Şekil 4.69. SD karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Son yıllarda plastik üretimi ve kullanımı artmaktadır. Bu durumun çevre ve deniz kirliliğine etkisi oldukça fazladır. Plastiklerin çevreye ve insan sağlığına verdiği zararları bir nebze olsa azaltmak amacıyla çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Bu tez çalışmasında atık PVC plastik lifleri kullanılarak çimentolu karışımların fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

PVC plastik liflerin farklı oranlarda karşıma eklenmesi üretilen harçların taze haldeki birim ağırlığı ve işlenebilirliği olumsuz yönde etkilemiştir. Mikro silika ve silis dumanı içeren karışımların taze haldeki birim hacim ağırlık değerleri kontrol karışımlara göre daha düşük değerler almıştır.

Karışımların kuru ve SDKY yığın yoğunluk değerleri eklenen PVC plastik liflerin artmasıyla azalma eğilimi göstermiştir. En düşük değerler en yüksek lif oranına sahip karışımlarda elde edilmiştir. Silis dumanı içeren karışımların yığın yoğunluk değerleri hem kontrol karışımlardan hem de mikro silika içeren karışımlardan daha yüksek değerler aldığı görülmüştür.

Karışımların görünür boşluk oranı ve su emme değerleri birbirine paralel değerler almıştır. Boşluk oranı yüksek olan karışımların yüksek su emme kabiliyetine sahip olduğu gözlemlenmiştir. PVC plastik lifin etkisi incelendiğinde, harçlarda lif oranının artmasıyla boşluk oranların ve su emme kabiliyetinin arttığı tespit edilmiştir. Silis dumanı içeriğinin artması karışımların su emme ve boşluk oranı değerleri düşürmüştür.

Üretilmiş harçlar üzerinde basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı gibi mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı lifli karışımlarda lifsiz olan karışımlara göre daha düşük değerler almıştır ve bu değer lif oranının yükselmesiyle kademeli olarak düşmüştür. Silis dumanının çimentoyla yer değiştirdiği karışımlarda basınç dayanımı hem kontrol karışımlardan hem de mikro silika içeren karışımlardan daha yüksek değerler almıştır. En yüksek basınç dayanımı SD15/L0 kodlu %15 silis dumanı içeriğine sahip lifsiz karışımda elde edilmiştir.

Eğilmede çekme dayanımı sonuçlarına bakıldığında, eklenen PVC plastik liflerin farklı etkiler oluşturduğu görülmüştür. Liflerin çimento matrisi içerisinde düzensiz bir şekilde dağılmasından eğilmede çekme dayanımı üzerinde etkisi net bir şekilde anlaşılmamıştır. Ancak yüksek lif içeriğine sahip olan karışımların lifsiz olan karışımlara göre daha sünek davranış göstermiş ve yük altında ani bir kırılmaya meydan vermeden bütünlüğünü korumuştur. Karışımlarda silis dumanı içeriğinin artmasıyla eğilmede çekme dayanımının arttığı ve ayrıca kontrol karışımlar ve mikro silika içeren karışımlarla kıyasla silis dumanı içeren karışımların dayanımı daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir.

Mikro silika üzerinde herhangi bir işlem yapılmadan, alındığı gibi kullanılmış ve üretilmiş harçlar üzerinde etkisi araştırılmıştır. Mikro silika öğütülmediği için iri tanelere sahiptir ve çimentoyla yer değiştirdiği zaman istenilen bağlayıcılık özelliği kazanamamıştır. Dolayısıyla dayanım, birim hacim ağırlık ve su geçirimsizliği üzerinde olumsuz etki oluşturmuştur. Mikro silikayı işlemsiz kullanmanın amacı, maliyet ve enerji tasarrufu sağlamaktır.

Karışımların elastisite modülü değerleri PVC plastik lif içeren karışımlarda lifsiz olan karışımlara göre daha düşük değerler almıştır. SD15/L0 ve SD15/L1 karışımları dışında silis dumanı içeren tüm karışımlarda elastisite modülü 7 GPa'dan daha düşük değerler almıştır.

Üretilmiş harçların tokluk ve rezilyans değerleri eğilme ve basınç dayanımı verileri kullanılarak çizilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılarak bulunmuştur. Farklı oranlarda eklenen PVC plastik atıkların karışımların tokluk ve rezilyans değerleri üzerinde farklı etkiler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Karışımların tokluk ve rezilyans değerleri aynı karışım serisi içerisinde birbirine yakın değerler almıştır.

Kılcal su emme katsayısı değerleri lifli harçlarda lifsiz olan harçlara göre daha düşük değerler almıştır. Silis dumanı içeren karışımların hem kontrol karışımlardan hem de mikro silika içeren karışımlardan daha düşük değerlere sahip olmuştur.

Yapılan literatür çalışmaları, kullanılan lifin çeşidi, lif oranı (hacimce), ve lifin geometrisi çimentolu karışımların performansını etkileyen önemli ve kritik faktörler olduğunu göstermiştir. Yüksek dayanım ve elastisite modülüne sahip lifler, karışımların dayanımı ve enerji absorbe etme kapasitesini geliştirmekte etkin rol oynar. Sentetik liflerin çimentolu kompozitlerde kullanılması, dayanıklı ve sürdürülebilir yapıya önemli katkıda bulunma potansiyeline sahiptir.

Plastik atıkların çimentolu karışımlarda agrega veya lif olarak kullanılmasıyla ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Ancak şuana kadar plastik atık içeren çimento-bazlı karışımların geri dönüştürülmesiyle ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Gelecek çalışmalar için, atık plastik içeren karışımların yaşam döngüsünü bittikten sonra atık olarak geri dönüştürülmüş agrega haline getirilerek beton veya harç üretiminde kullanılması önerilebilir. Bu tarz çalışmaların yapılması, inşaat sektörünün sürdürülebilir yapı malzemeleri üretmek açısından önemli katkıda bulunacaktır. Böylece plastik atıkların çevresel etkileri azalacak ve bu atıklar sürdürülebilir yapı inşaatında daha geniş bir yelpazeye sahip olacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Afrouhsabet, V., & Ozbakkaloglu, T. (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 94, 73-82. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051
- Akcaozoglu, S., Atis, C. D., & Akcaozoglu, K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Manag*, 30(2), 285-290. doi:10.1016/j.wasman.2009.09.033
- Al-Hadithi, A. I., & Hilal, N. N. (2016). The possibility of enhancing some properties of self-compacting concrete by adding waste plastic fibers. *Journal of Building Engineering*, 8, 20-28. doi:10.1016/j.job.2016.06.011
- Al-Tulaian, B., Al-Shannag, M., & Al-Hozaimy, A. (2016). Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*, 127, 102-110.
- Aslani, F., Liu, Y., & Wang, Y. (2019). The effect of NiTi shape memory alloy, polypropylene and steel fibres on the fresh and mechanical properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 215, 644-659. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.207
- Azhdarpour, A. M., Nikoudel, M. R., & Taheri, M. (2016). The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. *Construction and Building Materials*, 109, 55-62. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.01.056
- Badache, A., Benosman, A. S., Senhadji, Y., & Mouli, M. (2018). Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE). *Construction and Building Materials*, 163, 40-52. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.069
- Bagherzadeh, R., Sadeghi, A.-H., & Latifi, M. (2011). Utilizing polypropylene fibers to improve physical and mechanical properties of concrete. *Textile Research Journal*, 82(1), 88-96. doi:10.1177/0040517511420767
- Bhanja, S., & Sengupta, B. (2003). Modified water–cement ratio law for silica fume concretes. *Cement and Concrete Research*, 33(3), 447-450.
- Bhogayata, A. C., & Arora, N. K. (2017). Fresh and strength properties of concrete reinforced with metalized plastic waste fibers. *Construction and Building Materials*, 146, 455-463. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.095
- Bhogayata, A. C., & Arora, N. K. (2018). Workability, strength, and durability of concrete containing recycled plastic fibers and styrene-butadiene rubber latex. *Construction and Building Materials*, 180, 382-395. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.175

- Borg, R. P., Baldacchino, O., & Ferrara, L. (2016). Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 108, 29-47. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.01.029
- Brandt, A. M. (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures*, 86(1-3), 3-9. doi:10.1016/j.compstruct.2008.03.006
- Bui, N. K., Satomi, T., & Takahashi, H. (2018). Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study. *Waste Management*, 78, 79-93. doi:10.1016/j.wasman.2018.05.035
- Bulut, H. A., & Şahin, R. (2017). A study on mechanical properties of polymer concrete containing electronic plastic waste. *Composite Structures*, 178, 50-62. doi:10.1016/j.compstruct.2017.06.058
- Buratti, N., Mazzotti, C., & Savoia, M. (2011). Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2713-2722. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.12.022
- Chavooshi, A., & Madhoushi, M. (2013). Mechanical and physical properties of aluminum powder/MDF dust/polypropylene composites. *Construction and Building Materials*, 44, 214-220. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.02.079
- Choi, J., Zi, G., Hino, S., Yamaguchi, K., & Kim, S. (2014). Influence of fiber reinforcement on strength and toughness of all-lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 69, 381-389. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.07.074
- Çavdar, A. (2014). Investigation of freeze–thaw effects on mechanical properties of fiber reinforced cement mortars. *Composites Part B: Engineering*, 58, 463-472. doi:10.1016/j.compositesb.2013.11.013
- Erdoğan, T.Y. 2007. Beton. 2. Baskı. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara, 19 s. , 67 s.
- Fallah, S., & Nematzadeh, M. (2017). Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and Building Materials*, 132, 170-187. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.11.100
- Faraj, R. H., Sherwani, A. F. H., & Daraei, A. (2019). Mechanical, fracture and durability properties of self-compacting high strength concrete containing recycled polypropylene plastic particles. *Journal Of Building Engineering*, 25, 100808.
- Ghernouti, Y., Rabehi, B., Bouziani, T., Ghezraoui, H., & Makhloufi, A. (2015). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC). *Construction and Building Materials*, 82, 89-100. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.059

- Gu, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Manag*, 51, 19-42. doi:10.1016/j.wasman.2016.03.005
- Gupta, T., Chaudhary, S., & Sharma, R. K. (2016). Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume. *Journal of Cleaner Production*, 112, 702-711. doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.081
- Haghighatnejad, N., Mousavi, S. Y., Khaleghi, S. J., Tabarsa, A., & Yousefi, S. (2016). Properties of recycled PVC aggregate concrete under different curing conditions. *Construction and Building Materials*, 126, 943-950. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.047
- Han, C.-G., Han, M.-C., & Heo, Y.-S. (2009). Improvement of residual compressive strength and spalling resistance of high-strength RC columns subjected to fire. *Construction and Building Materials*, 23(1), 107-116. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.01.011
- Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., & Prince, W. (2010). Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Manag*, 30(11), 2312-2320. doi:10.1016/j.wasman.2010.03.028
- Hazer, B. (1993). *Polimer teknolojisi*. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi.
- Homma, D., Mihashi, H., & Nishiwaki, T. (2009). Self-healing capability of fibre reinforced cementitious composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7(2), 217-228.
- Ismail, Z. Z., & Al-Hashmi, E. A. (2008). Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Manag*, 28(11), 2041-2047. doi:10.1016/j.wasman.2007.08.023
- Iucolano, F., Liguori, B., Caputo, D., Colangelo, F., & Cioffi, R. (2013). Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties. *Materials & Design (1980-2015)*, 52, 916-922. doi:10.1016/j.matdes.2013.06.025
- Jafarifar, N., Pilakoutas, K., & Bennett, T. (2014). Moisture transport and drying shrinkage properties of steel-fibre-reinforced-concrete. *Construction and Building Materials*, 73, 41-50. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.039
- Jalal, M., Pouladkhan, A., Harandi, O. F., & Jafari, D. (2015). Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 94, 90-104. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.001
- Kakooei, S., Akil, H. M., Jamshidi, M., & Rouhi, J. (2012). The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, 27(1), 73-77. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.015

- Kan, A., & Demirboğa, R. (2009). A novel material for lightweight concrete production. *Cement and Concrete Composites*, 31(7), 489-495. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.05.002
- Karahan, O., & Atış, C. D. (2011). The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials & Design*, 32(2), 1044-1049.
- Karthikeyan, B., & Dhinakaran, G. (2018). Influence of ultrafine TiO₂ and silica fume on performance of unreinforced and fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 161, 570-576. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.133
- Kaufmann, J., Bork, E. W., Alexander, M. J., & Blenis, P. V. (2013). Habitat selection by cattle in Foothill landscapes following variable harvest of aspen forest. *Forest Ecology and Management*, 306, 15-22. doi:10.1016/j.foreco.2013.06.004
- Kaya, F. (2005). Ana hatlarıyla plastikler ve katkı maddeleri. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Khadakbhavi, B., Reddy, D. V. V., & Ullagaddi, D. (2010). Effect of aspect ratios of waste Hdpe fibres on the properties of fibres on fiber reinforced concrete. *Res. J. Eng. Technol*, 3, 13-21.
- Khan, M. I., & Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 30-35. doi:10.1016/j.resconrec.2011.09.016
- Kılıç, M., & Yüce, A. E. (2014). PVC ve PET atıkların seçimli flotasyonu. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, <http://docplayer.biz.tr/9036382-Pvc-ve-pet-atiklarin-secimli-flotasyonu-bolum-1-plastikler-cevresel-etkileri-geri-donugumu.html>, Erişim tarihi: 14/04/2020.
- Kim, B., Boyd, A. J., Kim, H. S., & Lee, S. H. (2015). Steel and synthetic types of fibre reinforced concrete exposed to chemical erosion. *Construction and Building Materials*, 93, 720-728. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.06.023
- Kockal, N.U. ve Ozturan, T. b: 2011. Characteristics of lightweight fly ash aggregates produced with different binders and heat treatments. *Cement and Concrete Composites*, 33: 61-67.
- Kockal, N. (2013). Effects of elevated temperature and re-curing on the properties of mortars containing industrial waste materials.
- Kockal, N. U., & Camurlu, H. E. (2020). Lightweight Pumice Mortars with Polypropylene Fiber Reinforcement. *Arabian Journal for Science and Engineering*. doi:10.1007/s13369-020-04617-0

- Kou, S. C., Lee, G., Poon, C. S., & Lai, W. L. (2009). Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Manag*, 29(2), 621-628. doi:10.1016/j.wasman.2008.06.014
- Kurup, A. R., & Kumar, K. S. (2017). Novel fibrous concrete mixture made from recycled PVC fibers from electronic waste. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 21(2), 04016020.
- Liguori, B., Iucolano, F., Capasso, I., Lavorgna, M., & Verdolotti, L. (2014). The effect of recycled plastic aggregate on chemico-physical and functional properties of composite mortars. *Materials & Design*, 57, 578-584. doi:10.1016/j.matdes.2014.01.006
- López-Buendía, A. M., Romero-Sánchez, M. D., Climent, V., & Guillem, C. (2013). Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 54, 29-35. doi:10.1016/j.cemconres.2013.08.004
- Madhavan Nampoothiri, K., Nair, N. R., & John, R. P. (2010). An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research. *Bioresour Technol*, 101(22), 8493-8501. doi:10.1016/j.biortech.2010.05.092
- Manjunath, B. T. A. (2016). Partial Replacement of E-plastic Waste as Coarse-Aggregate in Concrete. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 731-739. doi:10.1016/j.proenv.2016.07.079
- Mastali, M., & Dalvand, A. (2016). Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC). *Construction and Building Materials*, 125, 196-209. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.046
- Mazaheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S. H., & Hosseinpour, I. (2011). The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25(1), 351-358. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.018
- Mazloom, M., Ramezaniapour, A. A., & Brooks, J. J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 347-357. doi:10.1016/s0958-9465(03)00017-9
- Meddah, M. S., & Bencheikh, M. (2009). Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials. *Construction and Building Materials*, 23(10), 3196-3205. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.06.017
- Mehta, A., & Ashish, D. K. (2020). Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*, 29. doi:10.1016/j.jobbe.2019.100888

- Mohammadhosseini, H., Tahir, M. M., & Sam, A. R. M. (2018). The feasibility of improving impact resistance and strength properties of sustainable concrete composites by adding waste metalized plastic fibres. *Construction and Building Materials*, 169, 223-236. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.210
- Mohammed, A. A., Mohammed, I. I., & Mohammed, S. A. (2019). Some properties of concrete with plastic aggregate derived from shredded PVC sheets. *Construction and Building Materials*, 201, 232-245. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.145
- Nili, M., & Afroughsabet, V. (2010). The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 24(6), 927-933. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.11.025
- Ochi, T., Okubo, S., & Fukui, K. (2007). Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*, 29(6), 448-455. doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002
- Ozger, O. B., Girardi, F., Giannuzzi, G. M., Salomoni, V. A., Majorana, C. E., Fambri, L., . . . Di Maggio, R. (2013). Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for energy storage systems. *Materials & Design*, 51, 989-997. doi:10.1016/j.matdes.2013.04.085
- Pan, Z., Wu, C., Liu, J., Wang, W., & Liu, J. (2015). Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). *Construction and Building Materials*, 78, 397-404. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.071
- PEHLİVAN, E., ÜNAL, S., TUNÇSİPER, B., 2004. Plastik Ambalaj Malzemelerinin Hayatımızdaki Yeri ve Bunların geri kazanılması ve Azaltımında Çağdaş Yöntemler. POLSEM 2004, Polimer İşleme ve Geri Kazanımı Sempozyumu, Mersin, s.114-128.
- Pelisser, F., Neto, A. B. d. S. S., Rovere, H. L. L., & Pinto, R. C. d. A. (2010). Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2171-2176. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.041
- Pešić, N., Živanović, S., Garcia, R., & Papastergiou, P. (2016). Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres. *Construction and Building Materials*, 115, 362-370. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.050
- Peyvandi, A., Soroushian, P., & Jahangirnejad, S. (2013). Enhancement of the structural efficiency and performance of concrete pipes through fiber reinforcement. *Construction and Building Materials*, 45, 36-44. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.03.084

- Pujadas, P., Blanco, A., Cavalaro, S., & Aguado, A. (2014). Plastic fibres as the only reinforcement for flat suspended slabs: Experimental investigation and numerical simulation. *Construction and Building Materials*, 57, 92-104. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.01.082
- Ramezaniapour, A. A., Esmaeili, M., Ghahari, S. A., & Najafi, M. H. (2013). Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers. *Construction and Building Materials*, 44, 411-418. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.02.076
- Rostami, V., Shao, Y., & Boyd, A. J. (2011). Durability of concrete pipes subjected to combined steam and carbonation curing. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3345-3355. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.03.025
- Sadrmomtazi, A., Dolati-Milehsara, S., Lotfi-Omran, O., & Sadeghi-Nik, A. (2016). The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2363-2373. doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.107
- Said, S. H., Razak, H. A., & Othman, I. (2015). Flexural behavior of engineered cementitious composite (ECC) slabs with polyvinyl alcohol fibers. *Construction and Building Materials*, 75, 176-188. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.10.036
- Saikia, N., & de Brito, J. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 52, 236-244. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049
- Senhadji, Y., Siad, H., Escadeillas, G., Benosman, A. S., Chihaoui, R., Mouli, M., & Lachemi, M. (2019). Physical, mechanical and thermal properties of lightweight composite mortars containing recycled polyvinyl chloride. *Construction and Building Materials*, 195, 198-207. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.070
- Senthil Kumar, K., & Baskar, K. (2014). Recycling of E-plastic waste as a construction material in developing countries. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17(4), 718-724. doi:10.1007/s10163-014-0303-5
- Senthil Kumar, K., & Baskar, K. (2018). Effect of Temperature and Thermal Shock on Concrete Containing Hazardous Electronic Waste. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 22(2). doi:10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000387
- Siddique, R., & Chahal, N. (2011). Use of silicon and ferrosilicon industry by-products (silica fume) in cement paste and mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(8), 739-744. doi:10.1016/j.resconrec.2011.03.004

- Silva, R. V., de Brito, J., & Saikia, N. (2013). Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 23-31. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017
- Song, P. S., Hwang, S., & Sheu, B. C. (2005). Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1546-1550. doi:10.1016/j.cemconres.2004.06.033
- Soutsos, M. N., Le, T. T., & Lampropoulos, A. P. (2012). Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres. *Construction and Building Materials*, 36, 704-710. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.042
- Spadea, S., Farina, I., Carrafiello, A., & Fraternali, F. (2015). Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement. *Construction and Building Materials*, 80, 200-209. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.075
- Subramanian, P. (2000). Plastics recycling and waste management in the US. *Resources, Conservation and Recycling*, 28(3-4), 253-263.
- Suji, D., Natesan, S. C., & Murugesan, R. (2007). Experimental study on behaviors of polypropylene fibrous concrete beams. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 8(7), 1101-1109. doi:10.1631/jzus.2007.A1101
- Sun, Z., & Xu, Q. (2009). Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 527(1-2), 198-204. doi:10.1016/j.msea.2009.07.056
- Şahmaran, M., Özbay, E., Yücel, H. E., Lachemi, M., & Li, V. C. (2011). Effect of Fly Ash and PVA Fiber on Microstructural Damage and Residual Properties of Engineered Cementitious Composites Exposed to High Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(12), 1735-1745. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000335
- Wang, X., Huang, J., Dai, S., Ma, B., & Jiang, Q. (2020). Investigation of silica fume as foam cell stabilizer for foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 237. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117514
- Won, J.-P., Jang, C.-I., Lee, S.-W., Lee, S.-J., & Kim, H.-Y. (2010). Long-term performance of recycled PET fibre-reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*, 24(5), 660-665. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.11.003
- Yalçın, H., Gürü, M. 2006. Çimento ve Beton. Palme Yayıncılık: 414, Ankara, 15s. , 107s.
- Yang, S., Yue, X., Liu, X., & Tong, Y. (2015). Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles. *Construction and Building Materials*, 84, 444-453. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.038

- Yıldız, T., & Yıldız, C. (2003). Soma termik santrali uçucu kül ve polipropilen atıklarının yeni bir malzeme üretiminde değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 163-169.
- Yin, S., Tuladhar, R., Shanks, R. A., Collister, T., Combe, M., Jacob, M., . . . Sivakugan, N. (2015). Fiber preparation and mechanical properties of recycled polypropylene for reinforcing concrete. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(16), n/a-n/a. doi:10.1002/app.41866
- Yin, S., Tuladhar, R., Shi, F., Combe, M., Collister, T., & Sivakugan, N. (2015). Use of macro plastic fibres in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 93, 180-188. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.105
- Yue, Y., Wang, J. J., & Bai, Y. (2018). Tracing the status of silica fume in cementitious materials with Raman microscope. *Construction and Building Materials*, 159, 610-616. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.015
- Záleská, M., Pavlíková, M., Pokorný, J., Jankovský, O., Pavlík, Z., & Černý, R. (2018). Structural, mechanical and hygrothermal properties of lightweight concrete based on the application of waste plastics. *Construction and Building Materials*, 180, 1-11. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.250

ÖZGEÇMİŞ

RAWA AHMED MAHMOOD

Rawa.ahmed12@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2017-2020	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Antalya Bilim Üniversitesi
2012-2017	Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya

MESLEKİ GÖREVLER

Saha Mühendisi	
2017	Aldek Mimarlık Mühendislik İnş. Emlk. Turz. Tic.ve San. Ltd.Şti
Stajyer	Chwar Chra İnşaat
2015	Aker İnşaat A.Ş.
2016	

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

Projeler

12/2018-12/2019 **“Plastik Atıkların Harçlarda Lif Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”**, Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri, Proje No: FYL-2018-4287, Proje Bütçesi: 16488,41TL, Projedeki Görevi: **Araştırmacı**

