

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOĞAL PERLİT AGREGASI VE ATIK MALZEMELERLE ÜRETİLEN
BETONLARIN GERİLME-ŞEKİL DEĞİŞTİRME DAVRANIŞININ DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ

Sabire MAYDA

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Ahmet İhsan TURAN

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Prof. Dr. Adı SOYADI

Prof. Dr. Adı SOYADI

Prof. Dr. Adı SOYADI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZİNCAN, 2026

© 2026 [Sabire MAYDA]. Tüm hakları saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Dr. Öğretim Üyesi Ahmet İhsan TURAN danışmanlığında, Sabire MAYDA tarafından hazırlanan bu çalışma tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği AnaBilim Dalı'nda Yüksek Lisans/Doktora Tezi olarak kabul oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Unvan Ad SOYAD İmza:

Üye : Unvan Ad SOYAD İmza:

Üye : Unvan Ad SOYAD İmza:

Üye : Unvan Ad SOYAD İmza:

Üye : Unvan Ad SOYAD İmza:

Bu tez Enstitü Yönetim Kurulunun / / 20.... tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR
Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etięe Uygunluk Sayfası

“Doğal Perlit Agregası ve Atık Malzemelerle Üretilen Betonların Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi” isimli “Yüksek Lisans” tezim tarafımca intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim.

..../..../2026

(İmza)

Sabire MAYDA

ÖZET

Doğal Perlit Agregası ve Atık Malzemelerle Üretilen Betonların Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışının DeneySEL Olarak İncelenmesi

Sabire MAYDA

Yüksek Lisans Tezi

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Ahmet İhsan TURAN

2026, 85 sayfa

Betonda geleneksel agregaların alternatif ve atık bazlı malzemelerle değiştirilmesi, sürdürülebilir yapı üretimi açısından önemli bir araştırma alanıdır. Bu çalışmada, doğal perlit agrega ikamesi ile lif donatısının betonun mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkileri deneySEL olarak incelenmiştir. Doğal perlit agregası, geleneksel taş agreganın yerine %0, %30, %70 ve %100 oranlarında kullanılmış; kenevir kütüğü, geri dönüştürülmüş plastik atık lifleri ve polipropilen (PP) lifler ise hacimce %0.0, %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında karışımlara ilave edilmiştir. Yirmi sekiz günlük kür sonrasında basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilme ve yarmada çekme dayanımı, ultrases geçiş hızı (UPV), gerilme-şekil değiştirme davranışı ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, %30 perlit ikamesinin referans karışıma göre basınç dayanımı ve elastisite modülünü sırasıyla yaklaşık %6.67 ve %4.08 artırdığını göstermiştir. Buna karşılık, %70 ve %100 perlit ikamelerinde gözenekli yapı ve zayıf ara yüzey geçiş bölgesi nedeniyle mekanik performans azalmıştır. Lif katkılarında optimum oran %1.0 olarak belirlenmiş, en iyi performans ise çatlak köprüleme ve enerji yutma kapasitesi bakımından PP liflerde elde edilmiştir. Genel olarak, %30 perlit ikamesi ve %1.0 PP lif kullanımı, dengeli mekanik özelliklere sahip düşük karbonlu beton üretimi için uygun bir çözüm olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğal Perlit Agregası, Geri Dönüştürülmüş Plastik Atık, Kenevir Kütüğü, Polipropilen Lif, Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı, Sürdürülebilir Beton.

ABSTRACT

Experimental Investigation of the Stress-Strain Behavior of Concrete Produced with Natural Perlite Aggregate and Waste Materials

Sabire MAYDA

Master's Thesis

Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and Technology,

Department of Civil Engineering

Advisor: Dr. Öğretim Üyesi Ahmet İhsan TURAN

2026, 85 pages

The replacement of conventional aggregates in concrete with alternative and waste-based materials has become an important research area for sustainable construction. This study experimentally investigated the effects of natural perlite aggregate replacement and fiber reinforcement on the mechanical and microstructural properties of concrete. Natural perlite aggregate was used to replace conventional crushed stone aggregate at replacement levels of 0%, 30%, 70%, and 100%, while hemp shives, recycled plastic waste fibers, and polypropylene (PP) fibers were incorporated at volume fractions of 0.0%, 0.5%, 1.0%, and 1.5%. After 28 days of curing, compressive strength, modulus of elasticity, flexural strength, splitting tensile strength, ultrasonic pulse velocity (UPV), compressive stress-strain behavior, and scanning electron microscopy (SEM) analyses were performed. The results showed that 30% perlite replacement increased the compressive strength and modulus of elasticity by approximately 6.67% and 4.08%, respectively, compared with the reference mixture. In contrast, replacement levels of 70% and 100% reduced the mechanical performance due to the porous structure of perlite and the weaker interfacial transition zone. Among the fiber-reinforced mixtures, the optimum fiber content was found to be 1.0%, while PP fibers provided the best overall performance in terms of crack-bridging ability and energy absorption. Overall, the combination of 30% natural perlite aggregate replacement and 1.0% PP fiber was identified as an effective approach for producing low-carbon concrete with balanced mechanical properties.

Keywords: Natural Perlite Aggregate, Recycled Plastic Waste, Hemp Shives, Polypropylene Fiber, Stress-Strain Behavior, Sustainable Concrete.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince bilgi, deneyim ve yönlendirmeleriyle bana her zaman destek olan, çalışmamın planlanması ve yürütülmesinde değerli katkılarını esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ahmet İhsan Turan'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmamın gerçekleştirilmesinde laboratuvar imkânlarından yararlanmamı sağlayan Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür ederim. Hayatım boyunca sevgi, sabır ve destekleriyle her zaman yanımda olan, bugünlere gelmemde büyük emekleri bulunan kıymetli aileme ve bu süreçte çalışmalarına yardım edip her daim yanımda bulunan sevgili arkadaşım Burhan Alperen Buldu 'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sabire MAYDA

Temmuz, 2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	5
3. YÖNTEM	9
3.1. Malzemeler	9
3.1.1. Agregalar	9
3.1.2. Çimento	12
3.1.3. Çalışmada Kullanılan Malzemeler	13
3.1.4. Karışım Oranları, Numune Hazırlama ve Deneysel Tasarım	16
3.2. Deneysel Süreç	18
4. BULGULAR	22
4.1. Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü	22
4.1.1. Perlit Kullanım Oranının Etkisi	22
4.1.2. Perlit Oranı ve Lif Takviyesinin Etkisi	25
4.2. Gerilme- Birim Şekil Değiştirme Davranışı ve Tokluk	31
4.3. Yarmada Çekme Dayanımı	43
4.4. Ultrases Geçiş Hızı (UPV)	48
4.5. Eğilme Dayanımı	55
4.6. SEM Analizi	59
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	63

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 1. PET ve lif takviyeli betonlar üzerine yapılan çalışmaların özeti	7
Tablo 2. Çalışmada kullanılan agregalarının fiziksel özellikleri	10
Tablo 3. Beton karışımlarında kullanılan agregaların özellikleri	11
Tablo 4. Deneysel çalışmada kullanılan Portland çimentosuna ait özellikler	13
Tablo 5. Çalışmada kullanılan plastik atık lif, polipropilen lif ve kenevir kütüğünün fiziksel ve morfolojik özellikleri ile SEM görüntüleri.	15
Tablo 6. Deneysel programda kullanılan beton karışım oranları ve numune kodlaması.	17
Tablo 7. Mekanik ve mikroyapısal deneylerin özeti ve ilgili standartlar.	19
Tablo 8. UPV sınır değerleri.....	21
Tablo 9. Elastisite modülünün tahmin edilmesinde kullanılan ampirik modeller	29
Tablo 10. Modellerin tahmin performansları.	30
Tablo 11. Silindir numunelerde gözlenen hasar durumları.	47
Tablo 12. Literatürde önerilen ve bu çalışmada elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılan ampirik UPV-basınç dayanımı ilişkileri/modelleri.....	54
Tablo 13. Farklı perlit ikame oranlarında perlit-matris ara yüzey özelliklerinin SEM mikroyapısal karşılaştırması.	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Taş ocaklarındaki çevresel tahribatın uydu görüntüleri: (a) Erzincan, Türkiye, (b)	2
Şekil 2. Kenevir kırılgının farklı kullanım alanları	3
Şekil 3. Perlitin farklı sektörlerdeki kullanım alanları	3
Şekil 4. Lif takviyeli betonda kısa liflerin mikro çatlakları, uzun liflerin ise makro çatlakları köprüleyerek çatlak ilerlemesini sınırlandırma mekanizması.	6
Şekil 5. Eleme analizi sonrası iri ve ince agregalar: a) Doğal ince ve iri agregalar (0-5, 5-12 ve 12-19 mm), b) Ham doğal perlit agregası (0-5 mm) (Mayda ve Turan, 2026)	9
Şekil 6. Granülometri dağılım eğrisi.	10
Şekil 7. Ham doğal perlit agregasının X-ışını kırınımı (XRD) deseni ve SEM analizi.	12
Şekil 8. Tip I Portland çimentosu (OPC).....	12
Şekil 9. Portland çimentosunun mikroyapısal karakterizasyonu: a) XRD, b) SEM	13
Şekil 10. Kenevir kırılgının tane boyutuna göre sınıflandırılması amacıyla gerçekleştirilen elek analizi işlemi: (a) kullanılan elek seti, (b) titreşimli elek cihazı, (c) elek analizi sonucunda elde edilen farklı boyutlardaki kenevir kırılgı fraksiyonları.....	14
Şekil 11. Numune üretim süreci: a) elek analizi, b) laboratuvar tipi karıştırma işlemi, c) taze betonun kalıplara dökülmesi, d) kalıptan çıkarılmış numuneler ve e) kür edilmiş küp, kiriş ve silindir numuneleri.....	18
Şekil 12. Mekanik deney düzenekleri: a) yarmada çekme deneyi, b) basınç deneyi ve c) LVDT'ler kullanılarak gerçekleştirilen birim şekil değiştirme ölçüm düzeneği.....	20
Şekil 13. Eğilme deneyi düzeneği	21
Şekil 14. Perlitli betonların basınç dayanımı ve elastisite modülü sonuçları	23
Şekil 15. Basınç deneyi sonrasında numunelerde gözlenen hasar durumları: a) NP0, b) NP30, c) NP70 ve d) NP100.....	24
Şekil 16. a) NP0 ve b) NP30 karışımlarında lif türü ve lif hacim oranının basınç dayanımı ile elastisite modülü üzerindeki etkileri.....	26
Şekil 17. Basınç dayanımı ve elastisite modülü sonuçları: a) NP70 lif serisi ve b) NP100 lif serisi.....	28
Şekil 18. DeneySEL ve teorik elastisite modülü değerlerinin oranı	31
Şekil 19. Lif takviyesi içermeyen referans numunelere ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri..	32
Şekil 20. NP0 ve NP30 lif takviyeli serilerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	34
Şekil 21. NP70 ve NP100 lif takviyeli numune serilerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri..	37
Şekil 22. Farklı perlit ve lif içeriğine sahip numunelerde gözlenen hasar dağılımları.....	38
Şekil 23. %1.5 lif hacim oranına sahip tüm karışımlara ait hasar durumları.	39
Şekil 24. Tokluk değerleri.	42
Şekil 25. Silindir numunelerden elde edilen çekme dayanımı sonuçları:.....	44
Şekil 26. Silindir numunelerden elde edilen çekme dayanımı sonuçları:.....	46
Şekil 27. UPV sonuçları.	49
Şekil 28. UPV ile beton basınç dayanımı arasındaki ilişki	51
Şekil 29. UPV ile yarma çekme dayanımı arasındaki ilişki.	52
Şekil 30. UPV ile mekanik dayanım özellikleri arasındaki ilişkiler: a) basınç dayanımı, b) yarma çekme dayanımı.	53
Şekil 31. Tahmin edilen / hesaplanan basınç dayanımı.....	55
Şekil 32. Eğilme dayanımları	56
Şekil 33. Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki korelasyon.	57
Şekil 34. Lif içermeyen numuneler: a)NP0, b)NP30, c)NP70, ve d)NP100	58
Şekil 35. Dört noktalı eğilme altında prizmatik numunelerin orta açıklık hasar desenleri ve kayma kırılma özellikleri.....	58

Şekil 36. SEM görüntüleri: a) NP30-H15 (kenevir kütüğü), b) NP30-R15 (plastik atık) ve c) NP30-S15 (PP lif).....	61
--	----

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standard
EN	European Standard (Avrupa Standardı)
HDPE	High Density Polyethylene (Yüksek Yoğunluklu Polietilen)
ITZ	Interfacial Transition Zone (Ara Yüzey Geçiş Bölgesi)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
NP	Doğal Perlit Agregalı Beton Karışımı
OD	Fırında Kurutulmuş Durum (Oven Dry)
OPC	Ordinary Portland Cement (Normal Portland Çimentosu)
PET	Polyethylene Terephthalate (Polietilen Tereftalat)
PP	Polypropylene (Polipropilen)
rpm	Dakikadaki Devir Sayısı
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SSD	Saturated Surface Dry (Yüzeyden Kuru Doygun)
TS	Türk Standardı
UPV	Ultrasonic Pulse Velocity (Ultrases Geçiş Hızı)
XRD	X-Ray Diffraction (X-Işını Kırınımı)

1. GİRİŞ

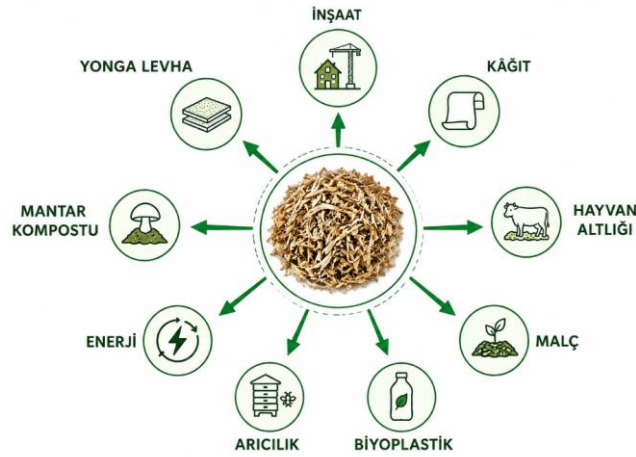
Günümüzde inşaat, sanayi ve bilgi teknolojileri gibi sektörlerde artan üretim ve tüketim faaliyetleri, doğal kaynakların hızla tükenmesine ve atık miktarlarının önemli ölçüde artmasına neden olmaktadır. Özellikle inşaat-yıkım atıkları, plastik atıklar, atık çelik teller ve elektronik atıklar; çevresel etkileri, depolama gereksinimleri ve bertaraf maliyetleri nedeniyle önemli bir sürdürülebilirlik sorunu oluşturmaktadır (Luhar vd., 2019; Ram vd., 2020; Gálvez-Martos vd., 2018). Bu nedenle, söz konusu atıkların düşük enerji gerektiren yöntemlerle yeniden değerlendirilmesi ve üretim süreçlerine kazandırılması büyük önem taşımaktadır (Liao vd., 2015; Ghernouti vd., 2015). Beton, günümüzde sudan sonra en fazla tüketilen yapı malzemesi olarak kabul edilmekte olup konut, ulaşım, enerji ve altyapı projelerinin temel yapı malzemesini oluşturmaktadır. Dünya genelinde her yıl milyarlarca ton beton üretilmekte ve bu üretim için önemli miktarda doğal kaynak tüketilmektedir. Özellikle çimento üretimi sırasında ortaya çıkan karbon dioksit emisyonları ile doğal agregaların ocaklardan elde edilmesi sırasında meydana gelen çevresel etkiler, beton sektörünün sürdürülebilirlik açısından yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu nedenle çevre dostu, düşük karbon ayak izine sahip ve geri dönüştürülebilir malzemelerin beton üretiminde kullanılması giderek önem kazanmaktadır. İnşaat sektörü, küresel enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları üzerindeki etkisi nedeniyle sürdürülebilirlik tartışmalarının merkezinde yer almaktadır. Beton üretiminde kullanılan doğal agregaların yüksek miktarlarda tüketilmesi hem doğal kaynakların azalmasına hem de çevresel etkilerin artmasına neden olmaktadır (Almusaed vd., 2017; Wang vd., 2017). Bu durum, alternatif agrega kullanımına yönelik araştırmaları hızlandırmıştır. Doğal agregaların elde edilmesi amacıyla işletilen taş ocakları, arazi kullanımında değişimlere, bitki örtüsünün tahrip olmasına ve doğal peyzajın bozulmasına neden olabilmektedir. Özellikle beton üretiminin yoğun olduğu bölgelerde agrega ihtiyacının karşılanması amacıyla gerçekleştirilen madencilik faaliyetleri, zaman içerisinde çevresel etkilerin daha belirgin hale gelmesine yol açmaktadır. Bu kapsamda, söz konusu tahribatı somut olarak ortaya koymak amacıyla Erzincan ve Rize illerinde beton santrallerine agrega temin eden taş ocaklarına ait Google Earth Pro görüntüleri incelenmiştir. Şekil 1'de verilen görüntülerden, 2000'li yılların başından günümüze kadar geçen süreçte ocak alanlarında meydana gelen genişleme ve arazi bozulması açıkça görülebilmektedir (Atlı vd., 2025).



Şekil 1. Taş ocaklarındaki çevresel tahribatın uydu görüntüleri: (a) Erzincan, Türkiye, (b) Rize.

Son yıllarda sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda döngüsel ekonomi yaklaşımı ön plana çıkmıştır. Döngüsel ekonomi, atık olarak değerlendirilen malzemelerin yeniden kullanılarak ekonomik değere dönüştürülmesini ve doğal kaynak tüketiminin azaltılmasını amaçlamaktadır. Bu kapsamda tarımsal atıklar, plastik atıklar ve endüstriyel yan ürünlerin yapı malzemelerinde değerlendirilmesi hem çevresel etkilerin azaltılması hem de atık yönetiminin iyileştirilmesi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Beton teknolojisinde geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı, sürdürülebilir yapı üretimine katkı sağlayan etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Aynı zamanda plastik atıkların düşük geri dönüşüm oranları ve doğada uzun süre kalıcılık göstermeleri, bu atıkların yapı malzemelerinde değerlendirilmesini çevresel açıdan önemli hale getirmektedir (Browning vd., 2021; da Silva vd., 2021; Saikia vd., 2012; Sharma vd., 2016). Betonun düşük çekme dayanımı ve gevrek davranışı, lif takviyesinin yaygın olarak kullanılmasına neden olmuştur (Mohammad hosseini vd., 2017; Prakash vd., 2020). Literatürde plastik kökenli liflerin çatlak kontrolü, enerji yutma kapasitesi ve süneklik üzerinde olumlu etkiler sağladığı belirtilmektedir (Huang vd., 2022; Sukontasukkul vd., 2020). Ancak yüksek lif içeriklerinin işlenebilirliği olumsuz etkileyebildiği ve dayanım kayıplarına yol açabildiği de bildirilmektedir (López-Buendía vd., 2013). Bunun yanında ticari liflerin maliyet ve karbon ayak izini artırması, geri dönüştürülmüş plastik lifler gibi alternatif çözümlere olan ilgiyi artırmıştır (Ali vd., 2020; Lin vd., 2018). Son yıllarda kenevir kütüğü gibi biyobazlı malzemeler de sürdürülebilir yapı malzemeleri arasında öne çıkmaktadır.

Kenevirin yenilenebilir bir kaynak olması, karbon tutma kapasitesi ve çevre dostu özellikleri önemli avantajlar sunmaktadır (Amaducci vd., 2015; Malabadi vd., 2023; Stevulova vd., 2018; Williamss vd., 2017). Yüksek su emme kapasitesi ve lif-matris ara yüzeyinde oluşturduğu zayıflıklar nedeniyle mekanik performans açısından bazı sınırlamalar bulunmaktadır (Terpáková vd., 2012). Şekil 2’de gösterilmektedir. Bu nedenle kenevir esaslı malzemelerin beton içerisindeki davranışlarının daha ayrıntılı incelenmesi gerektiği düşünülmektedir.



Şekil 2. Kenevir kütüğünün farklı kullanım alanları

Türkiye, dünya perlit rezervlerinin önemli bir kısmına sahip olup perlit üretiminde önde gelen ülkeler arasında yer almaktadır. Düşük yoğunluğu, yüksek gözenekliliği ve ısı yalıtım özellikleri sayesinde perlit, hafif yapı malzemelerinin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3’te perlitin farklı sektörlerdeki kullanım alanı verilmektedir. Yerli kaynakların yapı sektöründe değerlendirilmesi, hem ekonomik açıdan dışa bağımlılığın azaltılmasına hem de sürdürülebilir yapı teknolojilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu nedenle doğal ham perlit agregasının beton üretiminde kullanılması, son yıllarda araştırmacılar tarafından yoğun ilgi gören konular arasında yer almaktadır.

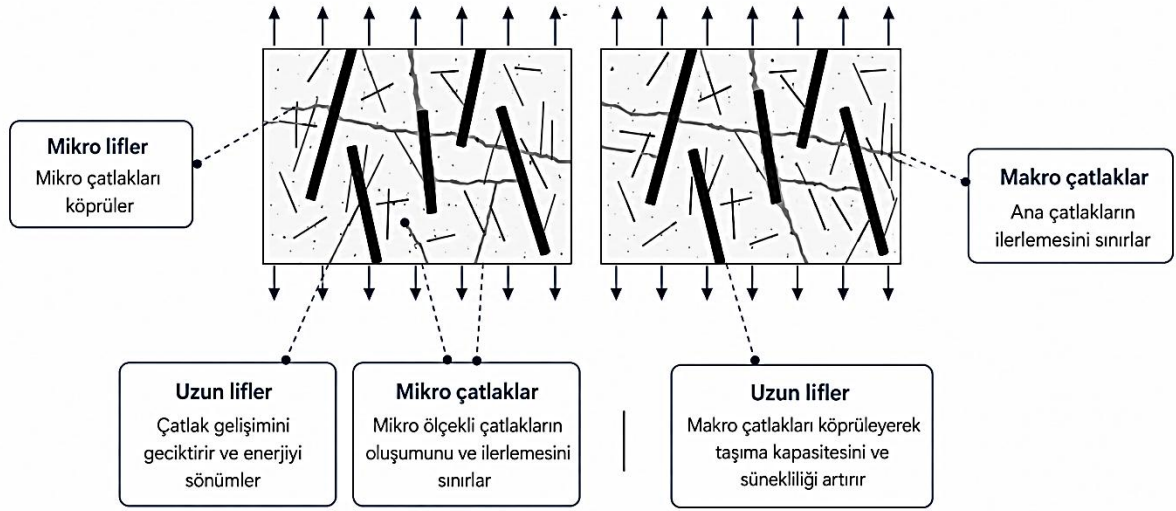


Şekil 3. Perlitin farklı sektörlerdeki kullanım alanları

Agrega düzeyinde yapılan sürdürülebilirlik çalışmaları incelendiğinde, perlitin hafif beton üretiminde dikkat çeken doğal malzemelerden biri olduğu görülmektedir (Adhikary vd., 2022; Haque vd., 2004; Maxineasa vd., 2022; Oktay vd., 2015; Rózycka vd., 2016; Sengul vd., 2011; Stefanidou vd., 2023). Düşük yoğunluğu, yüksek gözenekliliği ve ısı yalıtım özellikleri sayesinde perlit, sürdürülebilir beton tasarımlarında önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, yüksek perlit ikame oranlarının mekanik özellikleri olumsuz etkileyebildiği ve bu durumun lif takviyesi ile iyileştirilebileceği literatürde vurgulanmaktadır (Atlı vd., 2025; Bulut vd., 2024; Gül vd., 2007; Ragul vd., 2022). Literatürde geri dönüştürülmüş plastik lifler, kenevir bazlı malzemeler ve perlit agregası ayrı ayrı incelenmiş olmasına rağmen, ham perlit agregasının tarımsal ve plastik atıklardan elde edilen liflerle birlikte kullanıldığı çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir (Kumbasaroğlu ve Kumbasaroğlu, 2025). Bu nedenle, söz konusu malzemelerin birlikte kullanımının betonun mekanik ve mikroyapısal özelliklerine etkisinin araştırılması önemli bir boşluk olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, doğal perlit agregası içeren hafif betonlarda kenevir kütüğü, geri dönüştürülmüş plastik atık lifleri ve ticari polipropilen liflerin birlikte kullanılmasıyla elde edilen performans incelenmiştir. Çalışmanın özgün yönü, kullanılan atık malzemelerin herhangi bir enerji yoğun ön işleme tabi tutulmadan yalnızca basit mekanik işlemlerle değerlendirilmesidir. Bu yaklaşımın hem atık yönetimine katkı sağlayacağı hem de yapısal olarak kullanılabilir, düşük karbonlu ve sürdürülebilir beton üretimi açısından önemli bir alternatif sunacağı düşünülmektedir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Geleneksel beton, basınç yükleri altında yüksek performans göstermesine rağmen düşük çekme dayanımı ve yüksek rijitliği nedeniyle kırılğan davranış sergileyen bir yapı malzemesi olarak tanımlanmaktadır (Hosseini vd., 2017). Betonun bu zayıf yönlerini iyileştirmek, enerji yutma kapasitesini artırmak ve daha yüksek deformasyon kabiliyeti kazandırmak amacıyla lif takviyesi yaygın olarak uygulanmaktadır (Prakash vd., 2020). Lif takviyeli beton (FRC), bağlayıcı malzemeler, agregalar ve ilave olarak kullanılan takviye liflerinden oluşan kompozit bir yapı malzemesidir. Teknolojik gelişmelerle birlikte farklı sektörlerden elde edilen çok sayıda lif türü beton üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Bu lifler; doğal veya sentetik kökenli olmak üzere, inorganik, organik ve bitkisel esaslı çeşitli boyut ve mekanik özelliklere sahip malzemelerden oluşmaktadır. Selüloz, kenevir ve jüt gibi doğal liflerin yanı sıra çelik, polipropilen, polietilen ve naylon gibi sentetik lifler de yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Plastik esaslı lifler arasında özellikle polipropilen, polietilen, polyester ve naylon lifler öne çıkmaktadır. Bu lifler; düşük yoğunlukları, çelik liflere kıyasla daha ekonomik olmaları, korozyona uğramamaları ve işlenebilirlik açısından avantaj sağlamaları nedeniyle tercih edilmektedir (Fraternali vd., 2014). Lif ilavesinin betonun basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde sınırlı veya ihmal edilebilir düzeyde etkisi olduğu bilinmektedir (ACI Committee 1988). Şekil 4'te gösterilmektedir (Markovic vd., 2006). Bununla birlikte, lif-matris ara yüzeyinde oluşan bağlanma etkisi sayesinde lif takviyeli betonların dayanıklılık, enerji yutma kapasitesi ve tepe gerilmesi altındaki deformasyon kabiliyetlerinde önemli gelişmeler sağlanmaktadır (Ramesh vd., 2003). Plastik liflerin uygun oranlarda kullanılması ve beton içerisinde homojen şekilde dağılması durumunda, çatlaklar boyunca oluşturdıkları köprüleme etkisi sayesinde basınç dayanımı, süneklik ve diğer mekanik özelliklerde iyileşmeler meydana gelebilmektedir (Huang vd., 2022; Sukontasukkul vd., 2020).



Şekil 4. Lif takviyeli betonda kısa liflerin mikro çatlakları, uzun liflerin ise makro çatlakları köprüleyerek çatlak ilerlemesini sınırlandırma mekanizması.

Ancak lif miktarının aşırı artırılması, karışımın işlenebilirliğini olumsuz yönde etkileyebilmekte ve segregasyon gibi yerleşme problemlerine yol açabilmektedir. Bu durumun sonucunda dayanım değerlerinde düşüşler meydana geldiği çeşitli araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir (López-Buendía vd., 2013). Ayrıca plastik liflerin genel olarak hidrofobik özellik göstermeleri nedeniyle Portland çimentosunun hidratasyon sürecine belirgin bir etkilerinin olmadığı ifade edilmektedir (Silva vd., 2005). Sentetik lif takviyeli betonların geleneksel betonlara göre önemli dezavantajlarından biri, üretim sürecinde kullanılan liflerin ve işlenebilirliği artırmak amacıyla gerekli olan kimyasal katkıların maliyetleri artırmasıdır. Ali ve arkadaşları (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, polipropilen ve çelik lif kullanımının beton maliyetlerini sırasıyla yaklaşık %15 ve %85 oranında yükselttiği belirtilmiştir. Ekonomik etkilerinin yanı sıra lif takviyeli betonların karbon ayak izlerinin de geleneksel betonlara göre daha yüksek olduğu bildirilmektedir. Bu nedenle son yıllarda ticari sentetik liflere alternatif olarak, ekonomik ve çevresel açıdan daha sürdürülebilir atık kökenli liflerin kullanımına olan ilgi artmıştır. Literatürde, sentetik plastik liflerin yanı sıra geri dönüştürülmüş plastik atık liflerin beton performansı ve yaşam döngüsü üzerindeki etkilerini inceleyen çok sayıda araştırma bulunmaktadır (Donatone vd., 2010; Dormer vd., 2013; Papong vd., 2014; Prahallada vd., 2013). Bu çalışmalar kapsamında polietilen tereftalat (PET) atıkları, parçalanmış polietilen torbalar ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) atıkları gibi farklı plastik türlerinin beton içerisinde değerlendirilmesi araştırılmıştır. Atık plastikler beton karışımlarında agrega yerine (Choi vd., 2005), ince agrega yerine (Batayneh vd., 2007) veya doğrudan lif katkısı olarak kullanılabilir. PET atıklarından lif üretiminde genellikle

mekanik parçalama veya eritme yöntemleri tercih edilmektedir. Mekanik geri dönüşüm yönteminin ekonomik açıdan avantajlı olduğu belirtilirken, eritme işlemiyle elde edilen liflerin beton performansına daha olumlu katkı sağladığı rapor edilmiştir (Gu vd., 2016). Ochi vd. (2007), mekanik yöntemle üretilen PET liflerinin çekme dayanımının, eritme yöntemiyle elde edilen liflere göre yaklaşık %11,25 daha düşük olduğunu ortaya koymuştur (Ochi vd., 2007). Kou vd. (2009), hafif agregalı betonlarda plastik atık kullanımının işlenebilirlik, basınç dayanımı ve çekme dayanımı üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğunu bildirmiştir (Kou vd., 2009). Kim vd. (2010) ise PET lif oranının artmasıyla birlikte basınç dayanımı ve elastisite modülünün azaldığını, buna karşın betonun sünek davranışının iyileştiğini belirtmiştir. Gu ve Ozbakkaloglu (2016), beton performansının korunabilmesi için PET lif oranının %1'in altında tutulmasını önermiş, daha yüksek oranlarda lif kullanımının mekanik özelliklerde bozulmalara neden olabileceğini ifade etmiştir. Pereira de Oliveira vd. (2011), %1.5'e kadar PET lif kullanımının eğilme dayanımını artırdığını rapor etmiştir. Benzer şekilde Al-Tulaian vd. (2016) da %1.5 seviyesine kadar atık plastik lif kullanımının betonun mekanik özelliklerinde iyileşme sağladığını bildirmiştir. Geri dönüştürülmüş PET (R-PET) liflerinin beton performansı üzerindeki etkileri incelendiğinde, özellikle ilk çatlak dayanımı ve tokluk açısından olumlu katkılar sağladığı konusunda genel bir görüş birliği bulunmaktadır. Bununla birlikte, basınç dayanımı üzerindeki etkileri konusunda araştırma sonuçları arasında farklılıklar görülmektedir. Beton karışımında %1 oranında R-PET lif kullanılan çalışmalar değerlendirildiğinde, Ochi vd. (2007) yaklaşık %9.4 oranında dayanım artışı elde edildiğini belirtirken, Kim vd. (2010) %7-9 arasında dayanım kaybı gözlemlemiştir. Fraternali vd. (2011) ise basınç dayanımında %22 ile %35 arasında değişen oranlarda artış rapor etmiştir. Bu farklı sonuçlar, liflerin üretim yöntemi, malzeme özellikleri, su/çimento oranı ve diğer karışım tasarım parametrelerinin lif performansı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Tablo 1'de literatür özeti verilmiştir.

Tablo 1. PET ve lif takviyeli betonlar üzerine yapılan çalışmaların özeti

Çalışma	Materyal	Etki / Sonuç
Ochi vd. (2007)	Geri dönüştürülmüş PET lifleri	Mekanik yöntemle üretilen PET liflerinin çekme dayanımı, eritme yöntemiyle üretilen liflere göre yaklaşık %11,25 daha düşük bulunmuştur.
Ochi vd. (2007)	%1 R-PET lifi	Basınç dayanımında yaklaşık %9,4 artış elde edilmiştir.
Kou vd. (2009)	Plastik atık katkılı hafif beton	İşlenebilirlik, basınç dayanımı ve çekme dayanımında azalma meydana gelmiştir.
Kim vd. (2010)	PET lifli beton %1 R-PET lifi	Lif oranının artmasıyla basınç dayanımı ve elastisite modülü azalmış, süneklik artmıştır. Basınç dayanımında %7-9 oranında düşüş gözlenmiştir.

Pereira de Oliveira vd. (2011)	PET lifli beton	%1,5 lif oranına kadar eğilme dayanımında artış sağlanmıştır.
Fraternali vd. (2011)	R-PET lifli beton	Basınç dayanımında %22-35 arasında artış rapor edilmiştir.
Gu ve Ozbakkaloglu (2016)	PET lifli beton	Beton performansının korunabilmesi için PET lif oranının %1'in altında tutulması önerilmiştir.
Al-Tulaian vd. (2016)	Atık plastik lif katkılı beton	%1,5 lif oranına kadar mekanik özelliklerde iyileşme sağlanmıştır.
Ali vd. (2020)	Polipropilen ve çelik lifler	Polipropilen lif kullanımı maliyeti yaklaşık %15, çelik lif kullanımı ise yaklaşık %85 artırmıştır.
Donatone vd. (2010)	Geri dönüştürülmüş plastik atık lifler	Süneklik, enerji yutma kapasitesi ve çatlak kontrolünde iyileşme sağlanmış; basınç dayanımı üzerindeki etkilerin karışım parametrelerine bağlı olduğu belirtilmiştir.

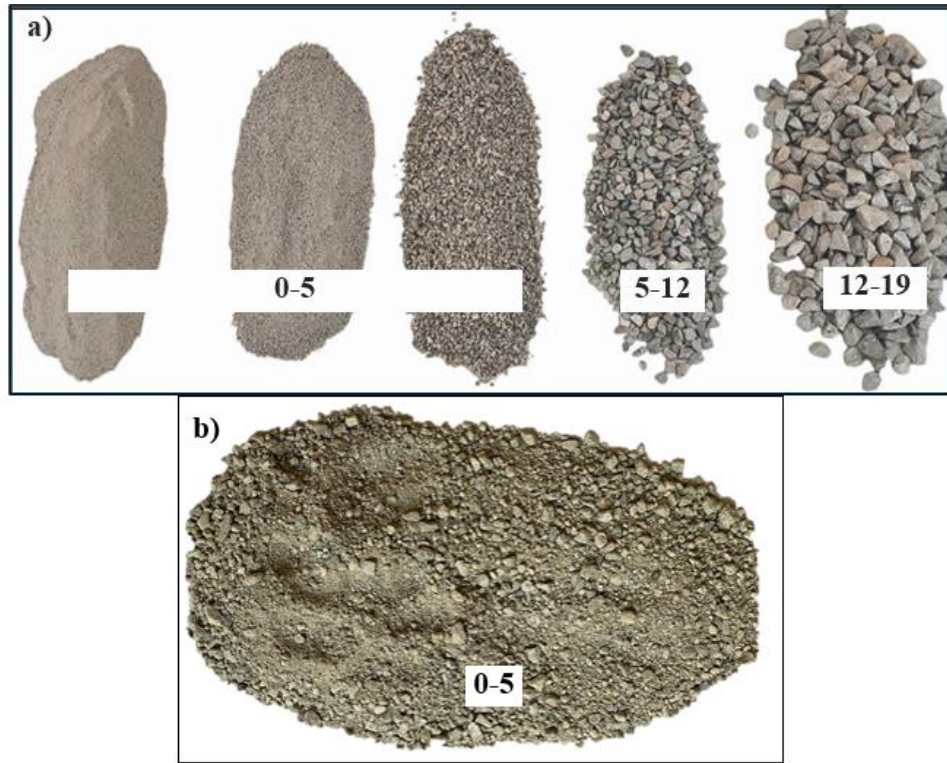
3. YÖNTEM

3.1. Malzemeler

Numune üretiminde geleneksek agregası ve perlit agregası kullanılmıştır. Deney numunelerinin üretim ve test aşamalarına ait bilgiler bu bölümde sunulmuştur.

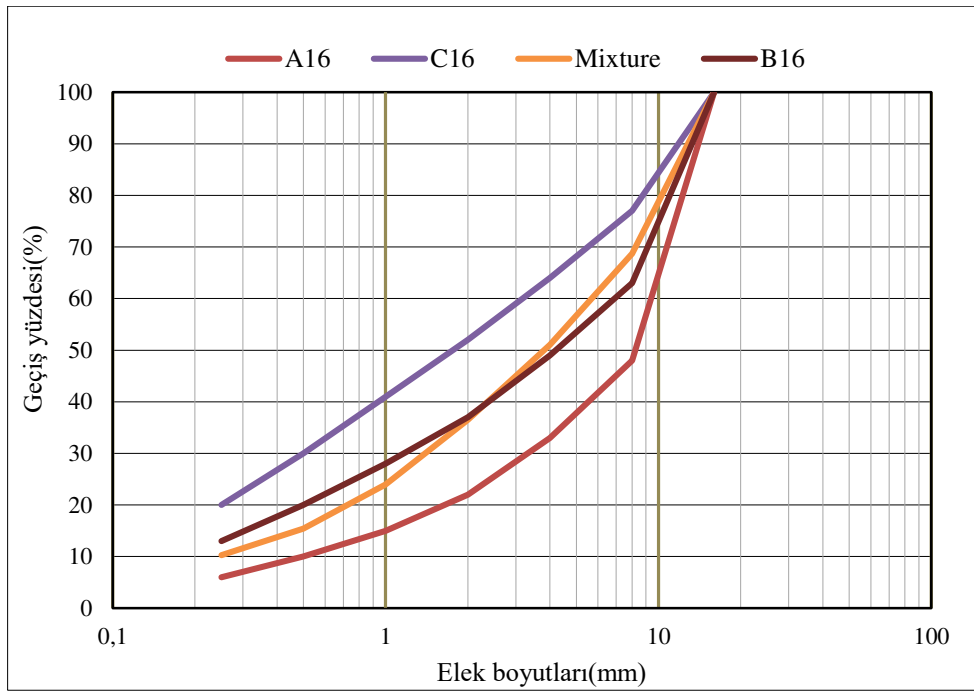
3.1.1. Agregalar

Şekil 5’te görüldüğü üzere, beton karışımlarının hazırlanmasında doğal taş agregası ve ham perlit agregası olmak üzere iki farklı agregası türü kullanılmıştır. Doğal taş agregaları 0-5 mm, 5-12 mm ve 12-19 mm tane boyutu aralıklarında temin edilmiş, ham perlit agregası ise 0-5 mm fraksiyonunda kullanılmıştır. Agregaların tane boyutu dağılımlarının belirlenmesi ve uygunluğunun kontrol edilmesi amacıyla eleme analizleri TS EN 933-1 (2012) ve TS 802 (2016) standartları doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Eleme analizi sonrası iri ve ince agregalar: a) Doğal ince ve iri agregalar (0-5, 5-12 ve 12-19 mm), b) Ham doğal perlit agregası (0-5 mm) (Mayda ve Turan, 2026)

Şekil 6’da doğal taş agregası ile ham perlit agregasının tane boyutu dağılım eğrileri, A16, B16 ve C16 sınır eğrileri ile sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, bu çalışmada kullanılan agregası granülometri eğrisinin A16 ve C16 sınır eğrileri arasında kaldığını ve beton üretimi için önerilen uygun granülometri aralığını sağladığını göstermektedir. Ayrıca, belirlenen granülometrik özelliklerin, daha ayrıntılı değerlendirmelerin yer aldığı Öztürk vd. (2026) tarafından bildirilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 6. Granülometri dağılım eğrisi.

Karışımlarda kullanılan geleneksel ve ham perlit agregalarının fiziksel özellikleri, ASTM C127 2016 ve ASTM C128 2016 standartlarına göre belirlenmiş ve Tablo 2’de sunulmuştur. Ayrıca, her iki agregaya ait tedarikçi tarafından sağlanan mineralojik bilgiler Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan agregalarının fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	İnce Agrega (0-5 mm)	İri Agrega (5-12 mm)	İri Agrega (12-19 mm)	Perlit Agregası (0-5 mm)
Maksimum agrega boyutu	5 mm	12 mm	19 mm	5 mm
Özgül ağırlık (OD)	2.48	2.65	2.67	1.88
Özgül ağırlık (SSD)	2.57	2.67	2.68	2.05
Görünen özgül ağırlık	2.71	2.69	2.70	2.26
Emilim, %	3.51	0.59	0.45	9.02

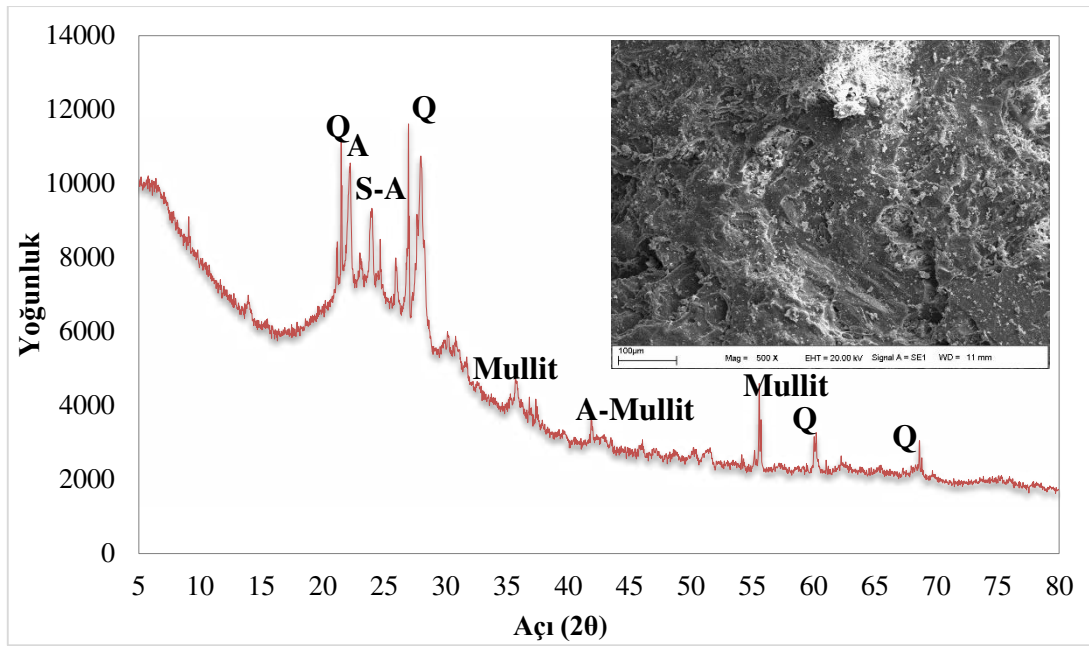
OD: fırında kurutulmuş, SSD: yüzeyden doymuş halde kurutulmuş

Tablo 2’de görüldüğü üzere, ham perlit agregasının su emme oranı (%9.02), geleneksel ince agreganın su emme oranına (%3.51) kıyasla oldukça yüksektir. Bu değer, ham perlit agregasının yaklaşık %157 daha fazla su emme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Söz konusu farklılık, özellikle yüksek perlit ikame oranlarında, benzer işlenebilirlik ve kıvam özelliklerinin sağlanabilmesi için karışımlarda ihtiyaç duyulan su miktarının artmasına neden olmaktadır. Tablo 3’te verilen mineralojik bileşim incelendiğinde ise, perlit agregasının yüksek SiO₂ ve Al₂O₃ içeriğine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, perlitin büyük ölçüde amorf karakterli bir yapıya sahip olduğuna işaret etmektedir.

Tablo 3. Beton karışımlarında kullanılan agregaların özellikleri

Formül	Perlit	Nehir Kumu	ASTM C 618 Gereksinimleri (2023)
SiO ₂	73.79	68.74	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃
Al ₂ O ₃	12.90	2.39	Min. 70 (%)
Fe ₂ O ₃	1.02	1.13	
CaO	0.76	16.05	Max 4.0%
MgO	0.04	0.63	
TiO ₂	0.033	0.10	
Na ₂ O	3.93	0.88	
K ₂ O	4.21	8.00	
FeO	0.38	-	
MnO	-	0.25	
MnO	0.070	-	
P ₂ O ₅	-	0.065	
P ₂ O ₃	0.009	-	

Ham perlit agregasının kristal yapısını ortaya koymak ve amorf karakterini değerlendirmek amacıyla X-ışını kırınımı (XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Ham perlite ait XRD deseni Şekil 7’de verilmiştir. Analiz sonuçları, perlit bünyesinde kuvars (Q-SiO₂), anortit (An-CaAl₂Si₂O₈), sanidin (S-KAlSi₃O₈) ve mullit (Al₆Si₂O₁₃) fazlarının bulunduğunu göstermektedir. Ayrıca, Şekil 8’de ham perlit agregasının yüzey yapısını ortaya koyan SEM görüntüsü de sunulmuştur. XRD analizlerinden elde edilen bulgulara göre, $2\theta = 22 - 28^\circ$ aralığında geniş ve belirgin tepeliklerin olduğu gözlenmiştir. Bu durum, perlit agregasının önemli ölçüde amorf bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. SEM incelemeleri ise perlit tanelerinin düzensiz bir morfoloji sergilediğini, ince taneli bir yapıda olduğunu, sınırlı sayıda hava boşluğu içerdiğini ve çok sayıda kılcık boşluk ile ince lamel yapılara sahip olduğunu ortaya koymuştur (Schumacher vd., 2020). Elde edilen yüzey morfolojisi bulguları, literatürde perlit agregası için rapor edilen sonuçlarla da uyumlu bulunmuştur (Aghabeyk vd., 2022).



Şekil 7. Ham doğal perlit agregasının X-ışını kırınımı (XRD) deseni ve SEM analizi.

3.1.2. Çimento

Bu çalışmada bağlayıcı malzeme olarak, Aşkale Çimento (Erzurum, Türkiye) tarafından üretilen ve ASTM C150/C150M-20 (2017) standardına uygun Tip I Portland çimentosu (OPC) tercih edilmiştir. Şekil 8’de verilmiştir. Kullanılan çimentonun yoğunluğu 3.10 g/cm³, Blaine özgül yüzey alanı ise 3410 cm²/g olarak belirlenmiştir.



Şekil 8. Tip I Portland çimentosu (OPC)

Çimentoya ait fiziksel özellikler ile kimyasal bileşim bilgileri, üretici firma tarafından sağlanan veriler doğrultusunda Tablo 4’te sunulmuştur. Çimentonun mineralojik ve mikroyapısal özelliklerini ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilen X-ışını kırınımı (XRD) analizi ve

taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 9’da verilmiştir. XRD analizleri, Panalytical Empyrean difraktometresi kullanılarak Cu-K α radyasyonu altında, $2\theta = 5 - 80^\circ$ tarama aralığında ve $2^\circ/\text{dk}$ tarama hızıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan XRD ve SEM incelemeleri, Portland çimentosuna özgü karakteristik mineral fazlarını ve tipik mikroyapısal özellikleri doğrulamış; ayrıca deneysel çalışmada kullanılan çimentonun tüm beton karışımları için uygun ve tutarlı özelliklere sahip olduğunu göstermiştir.

Özellik	Test Standardı	Standart Gereksinimler	Değer
3 günlük basınç dayanımı (MPa)	EN 196-1	≥ 20 MPa	27.5
28günlük basınç dayanımı (MPa)	EN 196-1	$\geq 42.5 \leq 62.5$	54.9
Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	EN 196-6	-	3410
Kızdırma kaybı (%)	EN 196-2	≤ 5	2.84
C ₃ A (%)	EN 196-2	≤ 10	7.22
Alkali içeriği (%)	EN 196-21	-	0.58
İlk priz süresi (min)	EN 196-3	≥ 60	145
Son priz süresi (min)	EN 196-4	-	215

Şekil 9. Portland çimentosunun mikroyapısal karakterizasyonu: a) XRD, b) SEM

Bu araştırmada takviye malzemesi olarak kullanılan kenevir kütüğü, Türkiye’de faaliyet gösteren Keneviro firmasından temin edilmiştir. Kenevir kütükleri, kenevir bitkisinin ekonomik açıdan

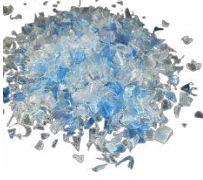
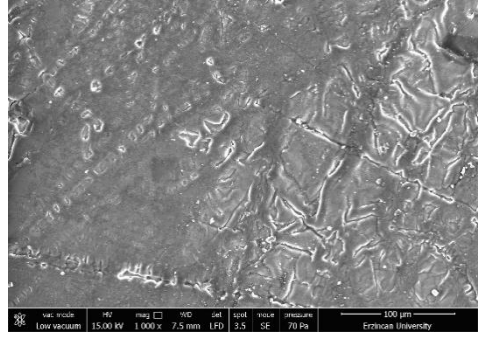
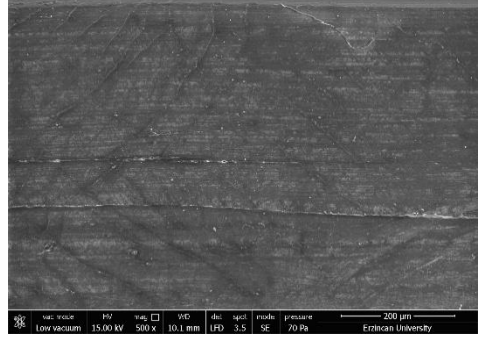
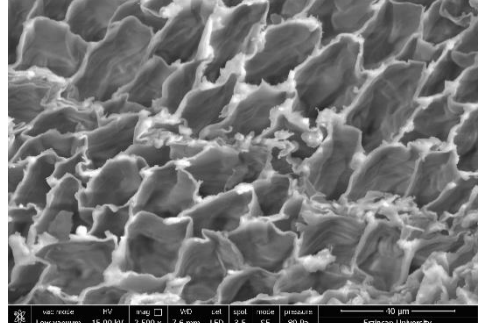
değerlendirilen bölümlerinin işlenmesi sonrasında ortaya çıkan lifli gövde kalıntılarından oluşmaktadır. Kullanılan kenevir kırıtlarının ortalama yığın yoğunluğu 120 kg/m^3 olup, tane boyutları 40-50 mm arasında değişmektedir. Kenevir kırıtları beton karışımlarında kullanılmadan önce tane boyutlarına göre sınıflandırılmıştır. Bu amaçla farklı göz açıklıklarına sahip standart elekler kullanılmış ve malzeme titreşimli elek cihazında elenmiştir. Elek analizi sonucunda elde edilen fraksiyonlar ayrılarak deneysel çalışmada kullanılacak tane boyutu aralığı belirlenmiştir. Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Kenevir kırıtlarının tane boyutuna göre sınıflandırılması amacıyla gerçekleştirilen elek analizi işlemi: (a) kullanılan elek seti, (b) titreşimli elek cihazı, (c) elek analizi sonucunda elde edilen farklı boyutlardaki kenevir kırıtları fraksiyonları.

Elek analizi sonucunda elde edilen fraksiyonlar incelenmiş ve deneysel çalışmada kullanılacak kenevir kırıtları tane boyutları belirlenmiştir. Literatürde, özellikle PET esaslı lif takviyelerinde, lif ile çimento matrisi arasındaki aderansı artırmak ve böylece lif performansını iyileştirmek amacıyla çeşitli yüzey modifikasyonları ve şekillendirme tekniklerinin kullanıldığı bildirilmektedir (Yin vd., 2012). Ancak bu çalışmada kullanılan atık PET esaslı lifler (bundan sonraki bölümlerde plastik atık lifler olarak adlandırılacaktır), herhangi bir kimyasal işlem veya ilave endüstriyel uygulamaya tabi tutulmadan, atık PET şişelerin mekanik yöntemlerle parçalanması sonucunda elde edilmiştir. Beton matrisine ilave edilen plastik atık lif, polipropilen (PP) lif ve kenevir kırıtları miktarları, literatürde yaygın olarak tercih edilen oranlar dikkate alınarak hacimce %0, %0.5, %1.0 ve %1.5 olarak belirlenmiştir. Kullanılan polipropilen lifler 54 mm nominal uzunluğa sahip olup, yüksek en-boy oranları sayesinde çatlak köprüleme davranışını geliştirebilecek özellik göstermektedir. Üç farklı takviye malzemesine ait temel fiziksel ve mekanik özellikler ile SEM görüntüleri Tablo 5'te sunulmuştur. Tablo 5 incelendiğinde, kenevir kırıtlarının yüksek poroziteye sahip olduğu görülmektedir. Bu özellik, literatürde kenevir esaslı malzemeler için sıklıkla rapor edilen bulgularla da uyumludur.

Tablo 5. Çalışmada kullanılan plastik atık lif, polipropilen lif ve kenevir kütüğünün fiziksel ve morfolojik özellikleri ile SEM görüntüleri.

Malzeme	Kriterler	Değer	SEM Görüntüsü
Plastik atık 	İçsel Viskozite	>0.73 dl/g	
	Parçacık Boyutu	2-12.5mm	
	Nem içeriği	<1%	
	Yığın Yoğunluğu	> 0.25 Kg/m ³	
	Yapıştırıcılar	<60 unit/1000g	
	PVC	<50 ppm	
	Diğer Polimerler (Th, PP, etc.)	<50 ppm	
	PA (polyamide)	<0.07 %	
Polipropilen Lif 	Çekme Mukavemeti	37 MPa	
	Yoğunluk	0.91(g/cm ³)	
	Yanma Sıcaklığı	>350°C	
	Çekme Mukavemeti	600-750 MPa	
	Hammadde	99% PP	
	Yüzey	Kabartmalı yüzey	
Kenevir Kütüğü 	Dış görünüş	Bükümlü	
	Elyaf Uzunluğu	54 mm	
	Yoğunluk	120 kg/m ³	
	Elyaf Uzunluğu	50 mm	
	Görünüm	Düzensiz	
	Yüzey	Pürüzlü	
	Çekme Mukavemeti	32 MPa	

SEM görüntülerinde belirlenen yüzey morfolojileri; plastik atık liflerin nispeten pürüzsüz yapıya sahip olması, PP liflerin kabartılı yüzey özellikleri göstermesi ve kenevir kütüğünün yüksek gözeneklilik içermesi bakımından birbirinden farklılık göstermektedir. Bu morfolojik özelliklerin lif-matris aderansı ile çatlak köprüleme davranışı üzerinde etkili olabileceği düşünülmekte olup, söz konusu etkiler ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri, granüler yapıdaki plastik atık ile lif formundaki takviye elemanlarının beton içerisindeki pekiştirme mekanizmalarının birbirinden farklı olmasıdır. Granüler plastik atıklar, kompozit davranışı esas olarak karışımın paketlenme

özelliklerini, ara yüzey geçiş bölgesinin (ITZ) yapısını ve matris içerisindeki yerel gerilme dağılımlarını değiştirerek etkilemektedir. Buna karşın, polipropilen lifler ve kenevir kütüğü gibi lif esaslı takviyeler, mikro ve makro çatlaklar boyunca gerilme transferi sağlayarak, sıyrılma direncini artırarak ve çatlak köprüleme mekanizması oluşturarak özellikle çekme davranışına katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle, çalışma kapsamında gerçekleştirilen karşılaştırmalı değerlendirmelerde, söz konusu malzemelerin beton performansını farklı mekanizmalar aracılığıyla etkilediği ve dayanım gelişimine farklı şekillerde katkı sağladığı göz önünde bulundurulmuştur.

3.1.4. Karışım Oranları, Numune Hazırlama ve Deneysel Tasarım

Bu araştırmada, geleneksel ince agreganın hacimce %0, %30, %70 ve %100'ü ham perlit agregası ile ikame edilmiştir. Çalışmada ele alınan diğer deneysel değişkenler ise lif türü ve lif hacim oranıdır. Takviye malzemesi olarak kullanılan kenevir kütüğü, plastik atık lif ve polipropilen (PP) lifler, hacimce %0, %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında beton karışımlarına ilave edilmiştir. Numune isimlendirme sisteminde “NP” ifadesi doğal perlit agregasını temsil etmekte, bunu takip eden sayı ise perlit ikame oranını göstermektedir. Kodun ikinci kısmında yer alan harf, kullanılan lif türünü (H: kenevir kütüğü, S: polipropilen lif, R: plastik atık lif) belirtirken, son kısımda yer alan sayı lif hacim oranını ifade etmektedir. Örneğin, NP30-R15 kodlu karışımda ince agreganın %30'u perlit ile değiştirilmiş ve karışıma hacimce %1.5 oranında plastik atık lif eklenmiştir. Çalışmada kullanılan beton karışımlarına ait detaylar Tablo 6'da verilmiştir. Tüm karışımlarda çimento miktarı 326 kg/m^3 olarak sabit tutulmuş, iri agrega içeriği 947.23 kg/m^3 seviyesinde korunmuş ve su/çimento (s/ç) oranı 0.69 olarak seçilmiştir. Su/çimento oranının tüm karışımlarda aynı tutulması, farklı karışımların doğrudan karşılaştırılabilmesini sağlamak ve mekanik özellikler üzerindeki perlit ikamesi ile lif katkısının etkilerini daha net ortaya koyabilmek amacıyla tercih edilmiştir. Her karışım için farklı su/çimento oranlarının kullanılması, ilave değişkenlik oluşturarak malzeme kaynaklı etkilerin değerlendirilmesini güçleştirebilecektir. Beton karışımları, Şekil 11'de gösterilen, 100 L kapasiteli ve 120 rpm karıştırma hızına sahip laboratuvar tipi bir beton mikseri kullanılarak hazırlanmıştır. Karıştırma işleminde ilk olarak iri ve ince agregalar 3 dakika süreyle kuru olarak karıştırılmış, daha sonra su ilave edilerek karıştırma işlemine devam edilmiştir. Son aşamada lifler karışıma eklenmiş ve karıştırma işlemi ilave 1 dakika daha sürdürülmüştür. Şekil 11'de beton numunelerinin hazırlanması, kalıplanması ve kür işlemlerine ait üretim süreci gösterilmektedir. Lif türü ve lif miktarının taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki

etkilerini doğrudan inceleyebilmek amacıyla karışımlarda herhangi bir kimyasal katkı maddesi kullanılmamıştır. Deney programı kapsamında çökme (slump) değerleri ayrıca ölçülmemiştir. Bununla birlikte, tüm taze beton karışımları karıştırma ve kalıplama aşamalarında dikkatli bir şekilde gözlemlenmiş ve benzer kıvam özelliklerinin elde edilmesine özen gösterilmiştir. Numune üretimi sırasında tüm karışımların segregasyon göstermeden, aşırı terleme oluşturmada ve yerleştirme güçlüğü yaşanmadan stabil bir davranış sergilediği gözlenmiştir (Şekil 11). Bu yaklaşım, tüm numune gruplarında benzer döküm koşullarının sağlanmasına katkıda bulunmuştur. Her bir beton karışımı için üç adet prizmatik kiriş ($100 \times 100 \times 400$ mm), üç adet küp numune ($150 \times 150 \times 150$ mm) ve üç adet silindir numune (100×200 mm) hazırlanmıştır. Döküm işleminin tamamlanmasının ardından numuneler 24 saat boyunca kalıplarında bekletilmiş, daha sonra kalıptan çıkarılarak 20°C sıcaklık ve %95 bağıl nem koşullarına sahip standart kür odasında 28 gün süreyle kür işlemine tabi tutulmuştur.

Tablo 6. Deneysel programda kullanılan beton karışım oranları ve numune kodlaması.

	Su (Kg/ m^3)	Çimento (Kg/ m^3)	Perlit agregası (Kg/ m^3)	İnce taneli agrega (kg/ m^3)	Kaba agrega (kg/ m^3)	H	R	S
NP0	225	326	0	718.15	947.23	0	0	0
NP30	225	326	163.37	502.71	947.23	0	0	0
NP70	225	326	381.19	215.45	947.23	0	0	0
NP100	225	326	544.55	0	947.23	0	0	0
NP ₀ -R05	225	326	0	718.15	947.23	0	0.5%	0
NP ₀ -R10	225	326	0	718.15	947.23	0	1.0%	0
NP ₀ -R15	225	326	0	718.15	947.23	0	1.5%	0
NP ₀ -H05	225	326	0	718.15	947.23	0.5%	0	0
NP ₀ -H10	225	326	0	718.15	947.23	1.0%	0	0
NP ₀ -H15	225	326	0	718.15	947.23	1.5%	0	0
NP ₀ -S05	225	326	0	718.15	947.23	0	0	0.5%
NP ₀ -S10	225	326	0	718.15	947.23	0	0	1.0%
NP ₀ -S15	225	326	0	718.15	947.23	0	0	1.5%
NP ₃₀ -R05	225	326	163.37	502.71	947.23	0	0.5%	0
NP ₃₀ -R10	225	326	163.37	502.71	947.23	0	1.0%	0
NP ₃₀ -R15	225	326	163.37	502.71	947.23	0	1.5%	0
NP ₃₀ -H05	225	326	163.37	502.71	947.23	0.5%	0	0
NP ₃₀ -H10	225	326	163.37	502.71	947.23	1.0%	0	0
NP ₃₀ -H15	225	326	163.37	502.71	947.23	1.5%	0	0
NP ₃₀ -S05	225	326	163.37	502.71	947.23	0	0	0.5%
NP ₃₀ -S10	225	326	163.37	502.71	947.23	0	0	1.0%
NP ₃₀ -S15	225	326	163.37	502.71	947.23	0	0	1.5%
NP ₇₀ -R05	225	326	381.19	215.45	947.23	0	0.5%	0
NP ₇₀ -R10	225	326	381.19	215.45	947.23	0	1.0%	0
NP ₇₀ -R15	225	326	381.19	215.45	947.23	0	1.5%	0
NP ₇₀ -H05	225	326	381.19	215.45	947.23	0.5%	0	0
NP ₇₀ -H10	225	326	381.19	215.45	947.23	1.0%	0	0
NP ₇₀ -H15	225	326	381.19	215.45	947.23	1.5%	0	0
NP ₇₀ -S05	225	326	381.19	215.45	947.23	0	0	0.5%
NP ₇₀ -S10	225	326	381.19	215.45	947.23	0	0	1.0%
NP ₇₀ -S15	225	326	381.19	215.45	947.23	0	0	1.5%
NP ₁₀₀ -R05	225	326	544.55	0	947.23	0	0.5%	0
NP ₁₀₀ -R10	225	326	544.55	0	947.23	0	1.0%	0
NP ₁₀₀ -R15	225	326	544.55	0	947.23	0	1.5%	0
NP ₁₀₀ -H05	225	326	544.55	0	947.23	0.5%	0	0

NP ₁₀₀ -H10	225	326	544.55	0	947.23	1.0%	0	0
NP ₁₀₀ -H15	225	326	544.55	0	947.23	1.5%	0	0
NP ₁₀₀ -S05	225	326	544.55	0	947.23	0	0	0.5%
NP ₁₀₀ -S10	225	326	544.55	0	947.23	0	0	1.0%
NP ₁₀₀ -S15	225	326	544.55	0	947.23	0	0	1.5%

Not: H: Kenevir lifleri, R: plastik atık lifleri ve S: polipropilen (PP) lifleri.

Referans karışım (NP0), optimum özelliklere sahip geleneksel bir taşıyıcı beton karışımını temsil etme amacıyla değil, tüm karışımlar için ortak ve tutarlı bir karşılaştırma temeli oluşturacak şekilde aynı su/çimento oranı esas alınarak tasarlanmıştır. Bu sayede performansta meydana gelen göreceli değişimlerin doğrudan kullanılan malzeme modifikasyonlarından kaynaklandığı daha net bir şekilde değerlendirilebilmektedir.



Şekil 11. Numune üretim süreci: a) elek analizi, b) laboratuvar tipi karıştırma işlemi, c) taze betonun kalıplara dökülmesi, d) kalıptan çıkarılmış numuneler ve e) kür edilmiş küp, kiriş ve silindir numuneleri.

3.2. Deneysel Süreç

Bu araştırmada, farklı perlit agrega ikame seviyeleri ile çeşitli lif türlerinin betonların mekanik performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda numuneler üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü, gerilme-şekil değiştirme davranışı ve ultra ses geçiş hızı (UPV) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesinin yanı sıra, numunelerin mikroyapısal karakteristiklerini incelemek ve hasar mekanizmalarını değerlendirmek amacıyla SEM analizleri de yapılmıştır. Çalışmada kullanılan numune geometrileri ile ilgili deney standartlarına ait bilgiler Tablo 7’de özetlenmiştir.

Tablo 7. Mekanik ve mikroyapısal deneylerin özeti ve ilgili standartlar.

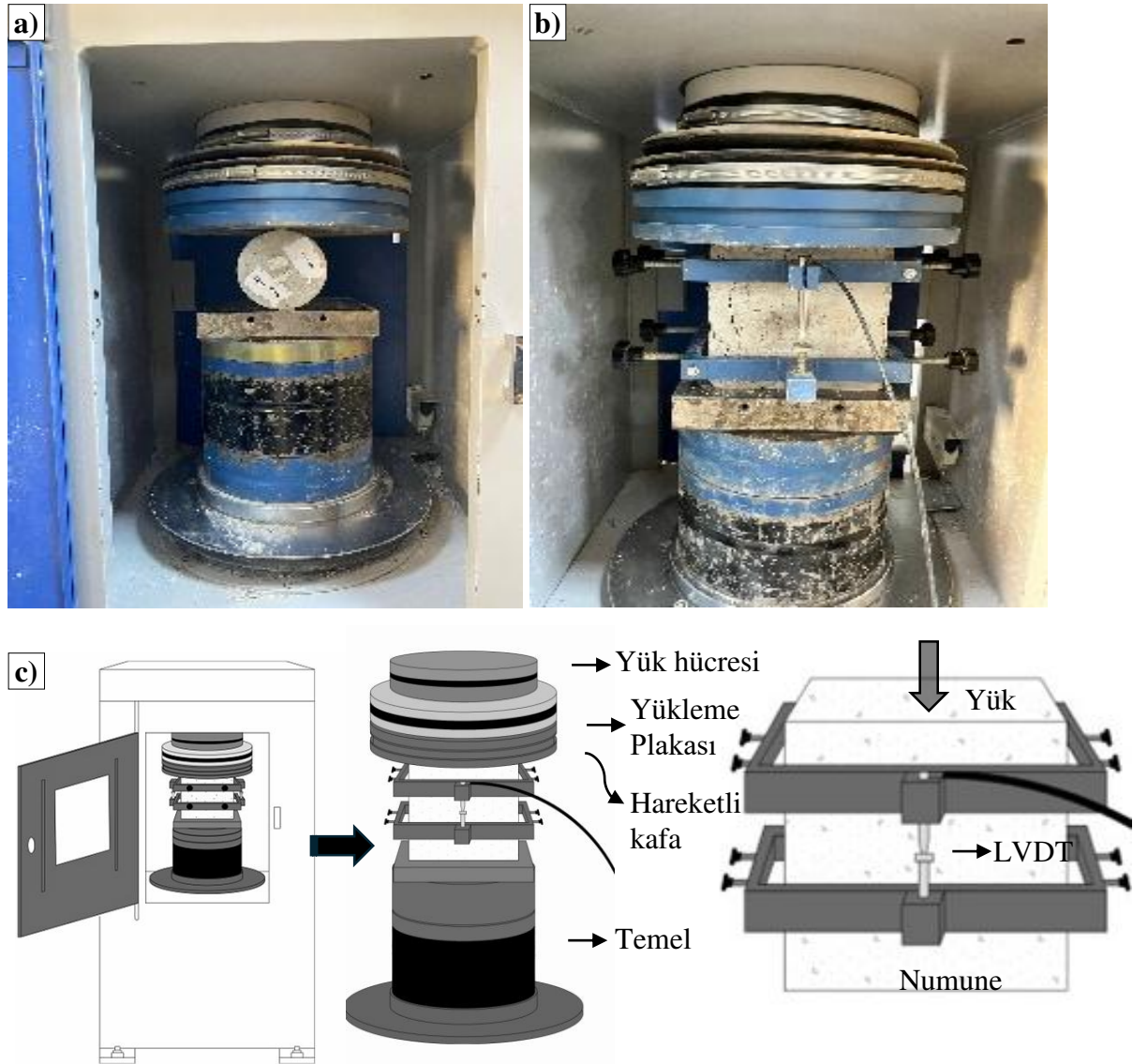
Test	Referans Standardı	Numune Geometrisi	Boyutlar (mm)
Basınç dayanımı	ASTM C39 (2014)		150 x 150 mm, küp
Eğilme mukavemeti	ASTM C78 (2018)		100 x 100 x 400 mm, kiriş
Yarmada Çekme Dayanımı	ASTM C 496 (2017)		100 x 200 mm, silindir
Elastisite modülü	ASTM C469 (2014)		150 x 150 mm, küp
UPV	ASTM C597 (2016)		100 x 200 mm, silindir 150 x 150 mm, küp
SEM	ASTM C1723 (2016)		Beton parçası ve malzemeleri

Her bir beton karışımı için üç adet küp numune hazırlanmış ve 28 günlük kür sürecinin tamamlanmasının ardından, Şekil 12’de gösterilen deney düzeneği kullanılarak tek eksenli basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, TS EN standartlarına uygun özelliklere sahip ve 3000 kN yük kapasitesinde ELE marka basınç test cihazı kullanılarak yürütülmüştür. Basınç deneyleri sırasında, EN 12390-3 (2009) standardı doğrultusunda numunelere kırılma meydana gelinceye kadar 0.6 MPa/s sabit yükleme hızı uygulanmıştır. Ayrıca, Şekil 12’de gösterildiği gibi numunelere yerleştirilen deplasman ölçüm cihazı (düşey potansiyometre) aracılığıyla şekil değiştirme verileri kaydedilmiş ve bu verilerden gerilme-şekil değiştirme eğrileri ile elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Elastisite modülü hesaplamalarında ASTM C469 (2017) standardı esas alınmış, σ - ϵ verileri kullanılarak elastisite modülü Denklem (1) yardımıyla belirlenmiştir.

$$E = (S_2 - S_1) / (\epsilon_2 - 0.00005) \quad (1)$$

Bu denklemde; E elastisite modülünü, S_1 $\epsilon = 0.00005$ birim şekil değiştirmeye karşılık gelen gerilme değerini, S_2 maksimum basınç gerilmesinin %40’ına karşılık gelen gerilmeyi ($0.40 \times \sigma_{\max}$) ve ϵ_2 ise bu gerilme seviyesine karşılık gelen birim şekil değiştirme değerini ifade etmektedir. Ayrıca, aynı numune grupları üzerinde yarmada çekme dayanımı deneyleri de gerçekleştirilmiştir. ASTM C469 standardında önerildiği üzere, doğrusal elastik davranış

bölgesinin temsil edilebilmesi amacıyla hesaplamalarda maksimum gerilmenin %40'ına karşılık gelen gerilme seviyesi esas alınmıştır.



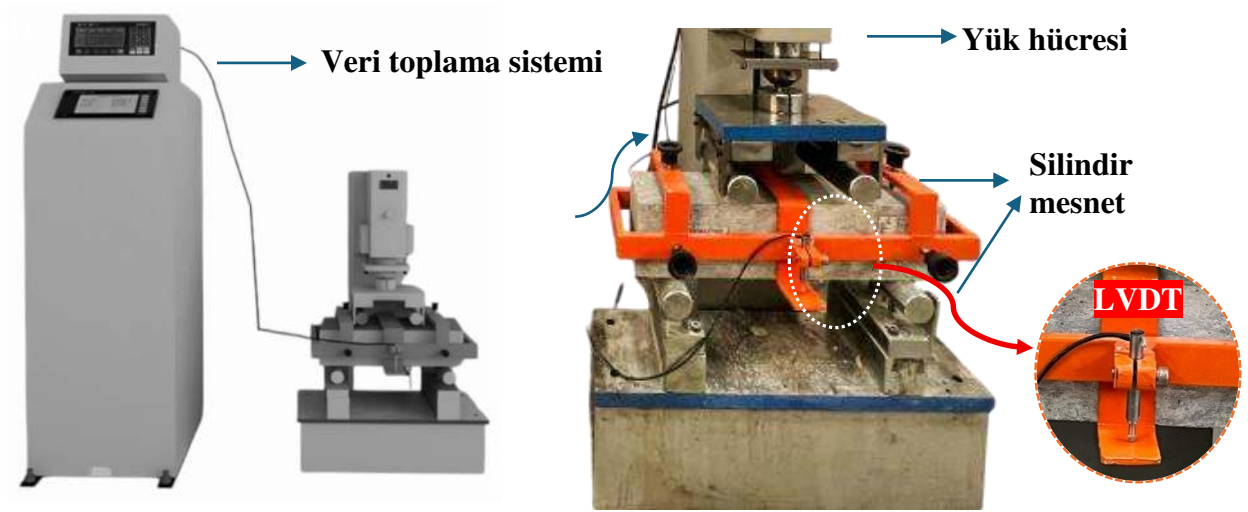
Şekil 12. Mekanik deney düzenekleri: a) yarmada çekme deneyi, b) basınç deneyi ve c) LVDT'ler kullanılarak gerçekleştirilen birim şekil değiştirme ölçüm düzeneği.

Ultra ses geçiş hızı (UPV) testi, betonun içyapısında bulunan mikro çatlakların, boşluk miktarının ve dinamik fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan tahribatsız deney yöntemlerinden biridir. Bu doğrultuda, BS 1881:203 (1986) ve Whitehurst (1951) tarafından önerilen UPV değerlerine bağlı beton kalite sınıflandırması Tablo 8'de sunulmuştur. Çalışma kapsamında UPV ölçümleri, ASTM C597-02 (2016) standardı esas alınarak küp, silindir ve prizmatik kiriş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde, biri verici diğeri alıcı olmak üzere 54 kHz frekanslı iki dönüştürücüye sahip Pundit Lab cihazı kullanılmıştır. Her bir karışım grubu için üç adet aynı numune test edilmiş ve elde edilen UPV sonuçlarının aritmetik ortalaması değerlendirmelerde esas alınmıştır.

Tablo 8. UPV sınır değerleri

BS 1881:203 (1986)		Whitehurst 1951	
UPV(km/h)	Sınıf	UPV(km/h)	Sınıf
4.5'ten büyük	Mükemmel	4.5'dan büyük	Mükemmel
3.5 - 4.5	İyi	3.5 - 4.5	İyi
3.0 - 3.5	Orta	3.0 - 3.5	Şüpheli
3.0'dan küçük	Zayıf	2.0 - 3.0	Zayıf
		2.0'dan küçük	Çok zayıf

Kür işleminin tamamlanmasının ardından, dört noktalı eğilme deneyleri ASTM C78 (2018) standardı esas alınarak $100 \times 100 \times 400$ mm boyutlarındaki prizmatik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, Şekil 13'te sunulan yükleme düzeneği kullanılmıştır. Her bir karışım grubundan üç adet numune teste tabi tutulmuş ve eğilme dayanımı değerleri bu numunelerden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak belirlenmiştir. Yükleme işlemi, iki farklı noktadan uygulanmış ve numunelerde kırılma oluşuncaya kadar kontrollü bir şekilde artırılarak sürdürülmüştür.



Şekil 13. Eğilme deneyi düzeneği

Mekanik deneylerin tamamlanmasının ardından, harç matrisi, agrega ve liflerin mikroyapısal özelliklerini incelemek amacıyla SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, 15 kV ivmelendirme gerilimi ile çalışan Quanta 450 FEG taramalı elektron mikroskobu (FEI Company, Hillsboro, OR) kullanılmıştır. SEM incelemeleri, özellikle lif-matris ara yüzey davranışının ve çatlak oluşum mekanizmalarının değerlendirilmesi yoluyla, numunelerin mekanik performanslarının daha ayrıntılı yorumlanmasına katkı sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR

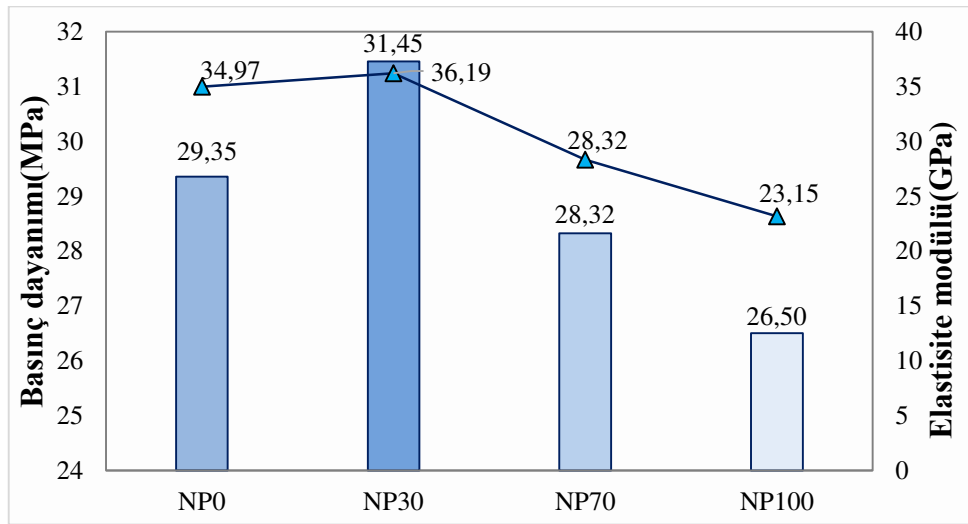
Mekanik deney sonuçlarının ayrıntılı olarak sunulmasına geçmeden önce, bu bölümde değerlendirilen performans farklılıklarının yorumlanması, Bölüm 3.1.3'te açıklanan granüler ve lif esaslı katkıların farklı takviye mekanizmalarına dayandığı göz önünde bulundurularak yapılması gerektiği belirtilmelidir. Granüler plastik atıklar, başlıca matrisin paketlenme yapısını ve agrega-hamur ara yüzey özelliklerini etkilerken; lif takviyeleri ise daha çok çatlak köprüleme kapasitesi ve gerilme transfer mekanizmaları sayesinde performansa katkı sağlamaktadır. Bu nedenle, aşağıda verilen karşılaştırmalı değerlendirmeler söz konusu malzemelerin mikro ve makro ölçekte sergilediği farklı davranışları yansıtacak şekilde ele alınmıştır. Bu bölümde sunulan tüm mekanik özellikler, aynı deney koşulları altında test edilen tekrar numunelerinden elde edilen ortalama sonuçları ifade etmektedir. Deneysel çalışmalar, karışım grupları içerisindeki değişkenliği minimum düzeyde tutacak şekilde kontrollü olarak yürütülmüş olup, elde edilen saçılım değerlerinin çimento esaslı kompozitler için kabul edilebilir ve yaygın olarak karşılaşılan deneysel sınırlar içerisinde olduğu görülmüştür.

4.1. Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü

4.1.1. Perlit Kullanım Oranının Etkisi

Betonun mekanik performansını belirleyen en önemli unsurlardan biri çimento hamuru ile agrega arasındaki ara yüzey bölgesidir (Jebli vd., 2018). Yüklerin etkin bir şekilde taşınabilmesi için hem çimento hamurunun hem de agregaların yeterli dayanım ve rijitlik özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Agregaların çimento hamuruna göre çok daha rijit davranması veya hamurun mekanik açıdan yetersiz kalması durumunda, yük etkisi altında ara yüzey bölgesinde mikro çatlaklar meydana gelebilmektedir. Zamanla gelişen ve birleşen bu çatlaklar, betonun hem dayanımında hem de dayanıklılığında azalmaya neden olabilmektedir. Öte yandan, agrega ile çimento hamuru arasındaki elastik özelliklerin birbirine uyumlu olması, malzeme içerisinde gerilmelerin daha dengeli dağılmasını sağlamaktadır. Böylece çatlak oluşumu ve ilerlemesi sınırlandırılmakta, ara yüzey bölgesinin dayanımı artmakta ve betonun genel mekanik davranışı olumlu yönde etkilenmektedir. 28 günlük kür süresini tamamlayan küp numuneler üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli basınç deneylerinden elde edilen dayanım değerleri ile ASTM C469 (2014) standardına göre hesaplanan elastisite modülü sonuçları birlikte değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular Şekil 14'te verilmiştir. Sunulan sonuçlar, her karışım serisi için test edilen üç adet numunenin ortalama değerlerini temsil etmektedir. Şekil 14 incelendiğinde, ince agreganın

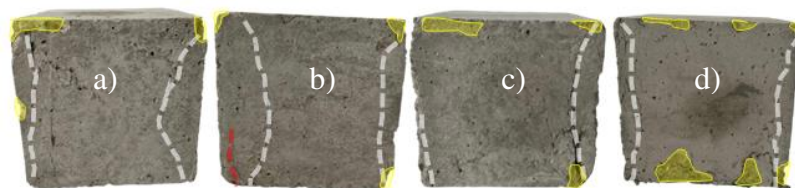
hacimce %30'unun ham perlit agregası ile ikame edildiği NP30 karışımının, referans karışım olan NP0'a göre yaklaşık %7.16 daha yüksek basınç dayanımı sağladığı görülmektedir. Bu artışın, taze çimento hamurunun perlit agregasının açık gözenekli yapısına nüfuz etmesi sonucunda hamur-agrega ara yüzey bağının güçlenmesinden ve perlitin oluşturduğu iç kütleme etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuçlar, %30 oranındaki ham perlit kullanımının dayanım kazanımı ile rijitliğin korunması arasında uygun bir denge oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Bunun yanında, perlit gibi puzolanik özellik gösterebilen malzemeler, ikincil hidratasyon reaksiyonlarına katılarak ek C-S-H jeli oluşumuna katkı sağlayabilmektedir. Bu durum daha yoğun ve kompakt bir mikroyapının gelişmesine yardımcı olmakta, boşluk oranını azaltmakta ve buna bağlı olarak harcın mekanik performansını iyileştirmektedir (Joshaghani vd.,2018). Ancak perlit ikame oranı %70 ve %100 seviyelerine yükseltildiğinde, basınç dayanımında referans karışıma göre sırasıyla yaklaşık %3.51 ve %9.71 oranlarında düşüş meydana geldiği belirlenmiştir. Bu azalma, ince agregaların oluşturduğu dolgu etkisinin belirli bir seviyeye kadar yararlı olmasıyla açıklanabilmektedir. Optimum seviyenin aşılması durumunda ince malzeme miktarındaki artış boşluk oluşumunu artırabilmekte, mikroyapıyı zayıflatılabilmekte ve sonuç olarak betonun mekanik özelliklerinde olumsuz değişimlere yol açabilmektedir. Benzer bulgular, Bisht ve Ramana (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da rapor edilmiştir.



Şekil 14. Perlitli betonların basınç dayanımı ve elastisite modülü sonuçları

Perlit ikame oranındaki artışla birlikte, harç ve perlit agregası arasında oluşan geçiş bölgesinin (ITZ) birim hacimdeki miktarı da artış göstermektedir. Bunun sonucunda, harç-agrega ara yüzey bölgesinin hacimsel oranındaki yükselme betonun elastisite modülünün azalmasına yol açmaktadır (Jebli vd., 2018). Nispeten zayıf ve süreksiz karakterde olan bu geçiş bölgesi, yük

etkisi altında gerilme yoğunlaşmalarının oluşmasına neden olmakta; bu durum ise basınç dayanımında düşüşe, yerel hasarların gelişmesine ve çatlak oluşumunun hızlanmasına sebep olabilmektedir (Law Yim Wan vd., 2018). Bunun yanında, yüksek oranlarda perlit kullanımına bağlı olarak gözlenen dayanım kayıpları, perlit agregasının gözenekli yapısı ile düşük mekanik dayanım özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Bulut vd., 2024; Ciminli vd., 2025; Schumacher vd., 2020). Elastisite modülü, beton ve betonarme elemanların tasarımında dikkate alınan en önemli malzeme özelliklerinden biridir. Literatürde, perlit gibi hafif agregaların yüksek oranlarda kullanılması durumunda elastisite modülündeki azalmanın, basınç dayanımındaki düşüşten daha belirgin olduğu ifade edilmektedir (Esfandiari vd., 2019). Bu araştırmada elde edilen bulgular da söz konusu değerlendirmeyi doğrulamaktadır. Ham perlit ikame oranının %30 seviyesinin üzerine çıkması, geleneksel ince agregaya içeren karışımlara göre elastisite modülünde azalmaya neden olmuştur. Buna karşın, %30 perlit ikamesi uygulanan NP30 karışımında, NP0 referans serisine kıyasla elastisite modülünde yaklaşık %3.49 oranında artış elde edilmiştir. Yüksek perlit içeriklerinde meydana gelen elastisite modülü düşüşleri, özellikle yapısal uygulamalarda sehim davranışı ve çatlak genişliği kontrolü açısından servis performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Hafif betonlarda en kritik ve zayıf bölgenin çoğunlukla agregaya ile harç arasındaki geçiş bölgesi olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada da perlit ikame oranının yükselmesiyle birlikte elastisite modülünde belirgin azalmalar meydana gelmiş; %70 ve %100 perlit içeren karışımlarda bu azalma sırasıyla %19.02 ve %33.80 olarak belirlenmiştir. Şekil 15'te lif takviyesi içermeyen serilere ait basınç yükü altındaki hasar oluşumları sunulmaktadır. Şekilde yer alan beyaz kesikli çizgiler numune yüzeyinde meydana gelen çatlakları, sarı ile gösterilen bölgeler ise kopma parçalarını ve yüzey dökülmelerini temsil etmektedir. Perlit ikame oranındaki artışın hem çatlak boyutları hem de çatlakların yüzey üzerindeki dağılımı üzerinde önemli değişikliklere neden olduğu görülmüştür. Referans NP0 numunesinde küçük kapiller çatlaklar ve daha düzenli, simetrik bir hasar şekli gözlenirken, NP30 numunesinde düşey doğrultudaki çatlakların daha belirgin hale geldiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, numunenin üst ve alt bölgelerinde belirgin ezilme davranışı veya ciddi yüzey dökülmesi oluşmamıştır.



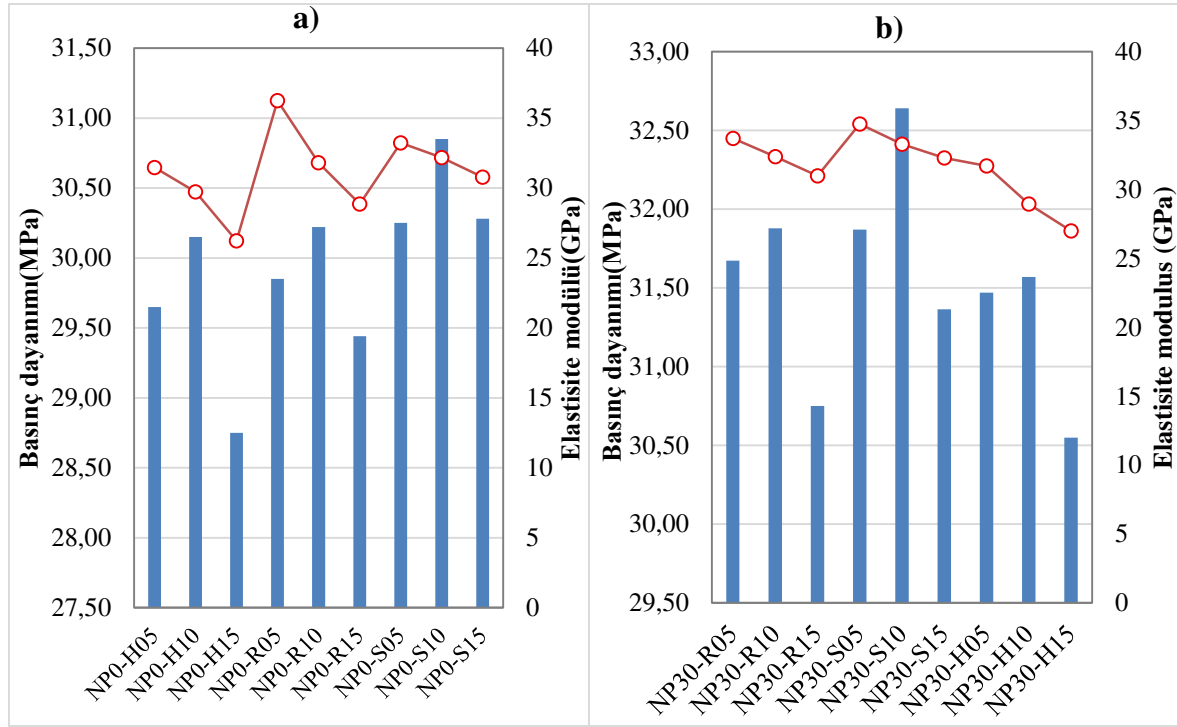
Şekil 15. Basınç deneyi sonrasında numunelerde gözlenen hasar durumları: a) NP0, b) NP30, c) NP70 ve d) NP100.

NP70 ve NP100 karışımlarında, perlit ikame oranının yükselmesi betonun iç yapısının daha boşluklu ve gevşek bir karakter kazanmasına neden olmuş, buna bağlı olarak dayanım değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir. Ayrıca, numunelerin üst ve alt kısımlarında yerel ezilme bölgelerinin olduğu gözlenmiştir. Bu lokal ezilmelerin, yükleme sırasında numunelerin yanal yöndeki deformasyonlarını belirli ölçüde kısıtladığı değerlendirilmektedir. Elde edilen hasar görüntüleri, perlit miktarının artmasıyla birlikte çatlak açıklıklarının büyüdüğünü ve ezilme ile yüzey dökülmesi gibi hasar türlerinin daha belirgin hale geldiğini ortaya koymaktadır. Literatürde, perlit, genişletilmiş kil ve cüruf gibi hafif agregalar kullanılarak üretilen betonlarda kırılma düzlemi boyunca ilerleyen çatlakların çoğunlukla hafif agrega tanelerinin içerisinde geçtiği ve bunun sonucunda daha yerel hasar bölgelerinin olduğu bildirilmektedir (Sim vd., 2013). Bu doğrultuda, yüksek oranlarda perlit kullanımı betonun birim ağırlığının azaltılmasına katkı sağlasa da lif takviyesi veya mikroyapıyı iyileştirmeye yönelik ek uygulamalar yapılmadığında mekanik performans açısından bazı sınırlamaları beraberinde getirebilmektedir.

4.1.2. Perlit Oranı ve Lif Takviyesinin Etkisi

Basınç dayanımı üzerinde etkili olan temel faktörlerden biri, lif ile çimento matrisi arasındaki aderans performansı ve kullanılan lif miktarıdır (Naseri vd., 2017). Farklı perlit ikame oranları (%0, %30, %70 ve %100), lif türleri (kenevir kütüğü, geri dönüştürülmüş plastik atık ve polipropilen) ile lif hacim oranlarına (%0, %0.5, %1.0 ve %1.5) sahip küp numunelerden elde edilen basınç dayanımı sonuçları Şekil 16'da verilmiştir. Perlit içermeyen NP0 serisinde, lif ilavesinin basınç dayanımı üzerindeki etkisinin genel olarak sınırlı olduğu ve yalnızca küçük oranlarda artış veya azalışlara neden olduğu belirlenmiştir. İncelenen üç lif türünde de benzer bir davranış eğilimi gözlenmiştir. Lif hacim oranının %0.5 olduğu karışımlarda dayanımda sınırlı bir iyileşme meydana gelirken, %1.0 lif içeriğinde en yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Lif oranının %1.5'e yükseltilmesi ise dayanımda düşüşe neden olmuştur. Bu durum, yüksek lif miktarlarının karışım içerisinde boşluk hacmini artırması, zayıf ara yüzey bölgelerinin oluşmasına yol açması ve liflerin topaklanma eğilimi göstermesi gibi iç yapısal olumsuzluklarla açıklanabilmektedir. Bu tür etkilerin basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediği literatürde de belirtilmektedir (Li vd.,2018). En yüksek lif içeriği olan %1.5 seviyesinde, basınç dayanımındaki en belirgin azalma kenevir kütüğü takviyeli numunelerde görülmüş ve referans karışıma göre yaklaşık %2.04 oranında dayanım kaybı meydana gelmiştir. Lif türleri karşılaştırıldığında ise en başarılı performansın polipropilen liflerde olduğu

belirlenmiştir. Polipropilen lif içeren karışımlarda basınç dayanımı, sırasıyla %0.5, %1.0 ve %1.5 lif hacim oranlarında yaklaşık %3.07, %5.11 ve %3.16 oranlarında artış göstermiştir.

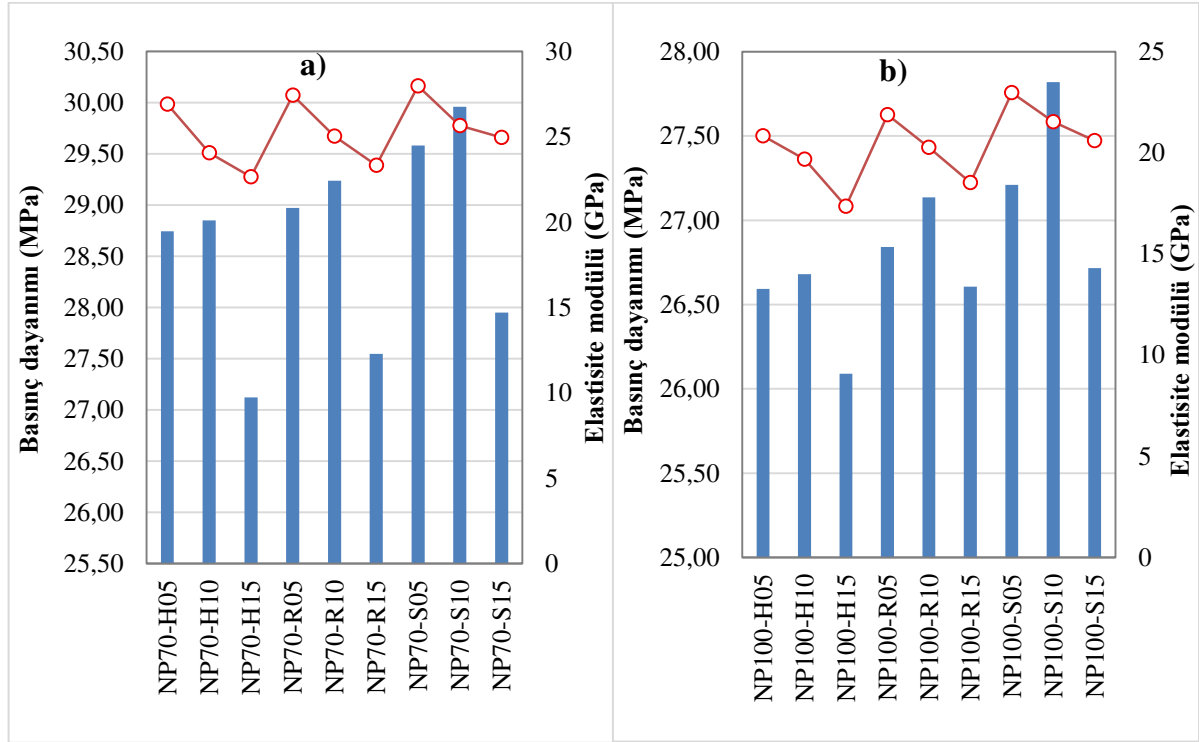


Şekil 16. a) NP0 ve b) NP30 karışımlarında lif türü ve lif hacim oranının basınç dayanımı ile elastisite modülü üzerindeki etkileri.

%30 perlit ikamesi içeren NP30 serisinde, lif ilavesinin basınç dayanımına olan etkisinin NP0 serisinde elde edilen sonuçlarla büyük ölçüde benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Tüm lif türleri dikkate alındığında, en uygun lif hacim oranının %1.0 olduğu görülmüştür. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, lifsiz referans karışıma göre basınç dayanımının %0.5 lif içeriğinde belirgin şekilde arttığı ve bu artışın %1.0 lif hacim oranında da devam ettiği tespit edilmiştir. Lif miktarının %1.5'e çıkarılması durumunda ise basınç dayanımı referans numuneden yüksek kalmasına rağmen, %1.0 seviyesinde elde edilen iyileşmenin üzerine çıkılamamıştır. Bu durumun, lif miktarındaki artışa bağlı olarak işlenebilirliğin azalması, karışım içerisinde ek boşlukların oluşması ve zayıf bölgelerin meydana gelmesi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Basınç dayanımı açısından dikkat çeken bir diğer sonuç, %0.5 ve %1.0 lif hacim oranlarında kullanılan kenendir kütüğü ve geri dönüştürülmüş plastik liflerin benzer düzeyde dayanım artışları sağlamasıdır. Bu oranlarda, plastik atık lif kullanılan karışımlarda dayanım artışı yaklaşık %7.90-%8.62 aralığında gerçekleşirken, kenendir kütüğü içeren karışımlarda bu değer yaklaşık %7.22-%7.56 arasında değişmiştir. Polipropilen lif takviyeli karışımlarda ise lif oranının %0.5'ten %1.0'a yükseltilmesiyle basınç dayanımının yaklaşık %8.58'den %11.20'ye çıktığı

belirlenmiştir. Bu performans artışının, polipropilen liflerin burulmuş geometrisi sayesinde çatlak ilerlemesini daha etkin biçimde sınırlandırabilmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Literatürde de benzer şekilde, polipropilen liflerin betonun basınç dayanımını artırabildiği ve ani kırılmaları sınırlandırarak enerji yutma kapasitesini geliştirdiği bildirilmektedir (Ortega-Lopez vd., 2021). Kenevir kütüğü ve plastik atık liflerin polipropilen liflere göre daha düşük performans göstermesi, büyük ölçüde lif yüzey özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Kenevir kütüğü sahip olduğu pürüzlü yüzey yapısı sayesinde aderansı artırmakta, ancak aynı zamanda yüksek su emme kapasitesi göstermektedir. Plastik atık lifler ise daha düzgün yüzey karakteri nedeniyle çimento hamuru ile nispeten daha zayıf bir bağ oluşturma eğilimindedir. Tablo 5’te verilen SEM görüntüleri de kenevir kütüğünün pürüzlü yüzey morfolojisinin lif-matris ara yüzeyinde düzensiz ve lifsi bir yapı meydana getirdiğini ortaya koymaktadır. Her ne kadar bu yapı mekanik kenetlenmeyi ve aderansı artırsa da, lif yüzeyi boyunca su hareketini kolaylaştırarak genel dayanım üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Bu nedenle kenevir kütüğü, geliştirdiği mekanik kenetlenmeye rağmen yüksek su emme özelliği nedeniyle dayanım kazanımlarını sınırlandırmaktadır. Plastik atık lifler ise daha zayıf ara yüzey bağı nedeniyle orta düzeyde bir iyileşme sağlayabilmektedir. Lif katkısının etkisi yalnızca NP30 referans karışımı esas alınarak incelendiğinde, optimum lif oranı olan %1.0 seviyesinde NP30-H10 ve NP30-R10 numunelerinde elde edilen basınç dayanımı artışlarının sırasıyla yaklaşık %0.37 ve %1.33 ile sınırlı kaldığı görülmüştür. Buna karşın, polipropilen lif içeren NP30-S10 karışımında, lifsiz NP30 referans numunesine göre yaklaşık %3.78 oranında daha belirgin bir dayanım artışı elde edilmiştir. Bölüm 4.1.1’de sunulan sonuçlarla uyumlu olarak, perlit ikame oranının yükselmesi tüm lif türlerinde basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir. Bu nedenle NP70 serisindeki lif takviyeli karışımların basınç dayanımları, genel olarak NP0 serisine göre daha düşük kalmış veya yalnızca sınırlı düzeyde iyileşme göstermiştir. Şekil 17’de görüldüğü gibi, NP70-S05 ve NP70-S10 numunelerinde sırasıyla yaklaşık %0.78 ve %2.08 oranlarında dayanım artışı elde edilmiştir. Ancak bu değerler, geleneksel betonlarda gözlenen polipropilen lif performansına kıyasla daha düşüktür. %70 perlit içeren karışımlarda polipropilen liflerin basınç dayanımına sağladığı olumlu katkının yaklaşık %2.5-%7.7 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu durumun, yüksek perlit içeriğinin betonu daha gevrek hale getirmesi ve lifler aracılığıyla gerçekleşen yük aktarımının etkinliğini azaltmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Sabit perlit oranına sahip karışımlar içerisinde lif takviyesinin etkisi değerlendirildiğinde, lif hacim oranının %1.0 seviyesine kadar artırılmasıyla basınç dayanımının yükseldiği, ancak %1.5 seviyesinde tekrar azalma eğilimine girdiği görülmüştür. Optimum lif oranı olan %1.0 seviyesinde, NP70-H10,

NP70-R10 ve NP70-S10 numunelerinin basınç dayanımları, lifsiz NP70 referans karışımına göre sırasıyla yaklaşık %1.87, %5.79 ve %3.24 oranlarında artmıştır. Buna karşılık, lif hacim oranının %1.5'e yükseltilmesi, lif kaynaklı boşluk oluşumu ve yerleşim sırasında ortaya çıkan işlenebilirlik problemleri nedeniyle dayanımın azalmasına neden olmuştur. Bu azalma oranları H serisinde yaklaşık %4.23, R serisinde %2.71 ve S serisinde ise %1.30 olarak belirlenmiştir.



Şekil 17. Basınç dayanımı ve elastisite modülü sonuçları: a) NP70 lif serisi ve b) NP100 lif serisi.

İnce agreganın tamamının ham perlit agregası ile ikame edildiği NP100 serisinde, lif takviyesi içeren tüm karışımların basınç dayanımlarının NP0 referans serisine (29.35 MPa) göre %5.2 ile %11.1 arasında değişen oranlarda azaldığı belirlenmiştir. En yüksek dayanım kaybı %11.1 ile 26.09 MPa değerine sahip NP100-H15 numunesinde görülürken, en düşük kayıp %5.2 ile 27.82 MPa basınç dayanımına sahip NP100-S10 numunesinde elde edilmiştir. Lif türlerine göre değerlendirme yapıldığında, dayanım kayıplarının kenevir kütüğü (H) serisinde %9.1-11.1, geri dönüştürülmüş plastik atık (R) serisinde %7.5-9.3 ve polipropilen (S) serisinde ise %5.2-9.0 aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Bu dayanım düşüşleri; yüksek iç boşluk oranı, yoğunluktaki belirgin azalma ve ara yüzey bağının zayıflaması nedeniyle liflerden çimento matrisine gerçekleşen yük aktarımının etkinliğinin azalmasıyla açıklanabilmektedir. Lif takviyeli NP100 karışımları, lifsiz NP100 referans numuneleriyle karşılaştırıldığında ise farklı bir eğilim ortaya çıkmıştır. Yüksek gözeneklilik ve düşük yoğunluğun liflerin etkinliğini sınırlandırmasına rağmen, %0.5 ve %1.0 lif hacim oranlarında kullanılan kenevir kütüğü, plastik

atik ve polipropilen liflerin basınç dayanımında sırasıyla yaklaşık %0.33-0.67, %1.28-2.41 ve %2.67-4.98 oranlarında sınırlı da olsa iyileşme sağladığı görülmüştür. Leong vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da düşük hacim oranlarında kullanılan polipropilen liflerin basınç dayanımı üzerinde önemli bir değişim oluşturmadığı rapor edilmiştir. Dayanım sonuçlarının değerlendirilmesinin yanı sıra, lif takviyeli perlitli betonların elastisite modülünün mevcut analitik modellerle ne ölçüde tahmin edilebildiği de araştırılmıştır. Betonun elastisite modülünün (MOE) doğru şekilde belirlenmesi, yapıların uzun dönem performansı ve özellikle çatlak kontrolü açısından kritik öneme sahiptir (Aslani vd., 2012). Her ne kadar basınç dayanımındaki artış çoğu durumda elastisite modülündeki artışla ilişkilendirilse de bu ilişkinin her zaman doğrusal olmadığı bilinmektedir. Elastisite modülü; agrega tipi, birim hacim ağırlık, su/çimento oranı ve malzemenin gözeneklilik düzeyi gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Bu nedenle literatürde, basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişkiyi açıklamak amacıyla çok sayıda deneysel çalışma gerçekleştirilmiş ve çeşitli ampirik modeller geliştirilmiştir (Vakhshouri vd., 2019). Şekil 18’de deneysel olarak elde edilen elastisite modülü değerlerinin, Tablo 9’da verilen ve literatürde yaygın olarak kullanılan modeller yardımıyla hesaplanan MOE değerlerine oranları sunulmuştur. Tablo 9’da yer alan ampirik bağıntılar, farklı yönetmelik ve araştırmacılar tarafından önerilen modellerin incelenen karışımları tahmin etmedeki başarılarını değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Hesaplamalarda, deneysel olarak belirlenen 28 günlük basınç dayanımı sonuçları ilgili denklemlere doğrudan uygulanmış ve karşılık gelen elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Daha sonra bu hesaplanan değerler, deneysel MOE sonuçlarıyla karşılaştırılarak her bir modelin perlit esaslı lif takviyeli betonlar için uygunluğu ve tahmin performansı analiz edilmiştir. Söz konusu ampirik bağıntıların kullanım alanları belirli basınç dayanımı seviyeleri ve agrega özellikleri ile sınırlı olduğundan, yapılan karşılaştırmalar her model için önerilen dayanım aralıkları ve malzeme karakteristikleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 9. Elastisite modülünün tahmin edilmesinde kullanılan ampirik modeller

Standart/Şartname	Model	Sınırlar ve katsayılar
ACI 363R-92 (1984)	$E_c = 3320\sqrt{f_c} + 6890$	21 MPa < f_c < 83 MPa
CAN 23.3-M94 (1994)	$E_c = 5\sqrt{f_c}$ GPa	
SP 52-101 (2003)	$E_c = 11.652 \ln(f_c) - 7.4713$	10 MPa $\leq f_c \leq$ 60 MPa
BS 5400-4 (1990)	$E_c = 8647.5(f_c)^{0.348}$ MPa	20 MPa $\leq f_c \leq$ 60 MPa
Eurocode 2 (2004)	$E_c = 22000 \left(\frac{f_c}{10}\right)^{0.3}$ MPa	
CEB-FIP (1993)	$E_c = 10000^3 \sqrt{f_c} + 8$	
TS 500 (2000)	$E_c = 3250\sqrt{f_c} + 14000$ MPa	
IDC 3274 (2003)	$E_c = 5.7(f_c)^{0.5}$ MPa	

*Kireçtaşı ve kumtaşı agregalarının kullanılması durumunda, elde edilen değerlerin sırasıyla %10 ve %30 oranlarında azaltılması; bazalt agregalarının kullanılması durumunda ise %20 oranında artırılması önerilmektedir.

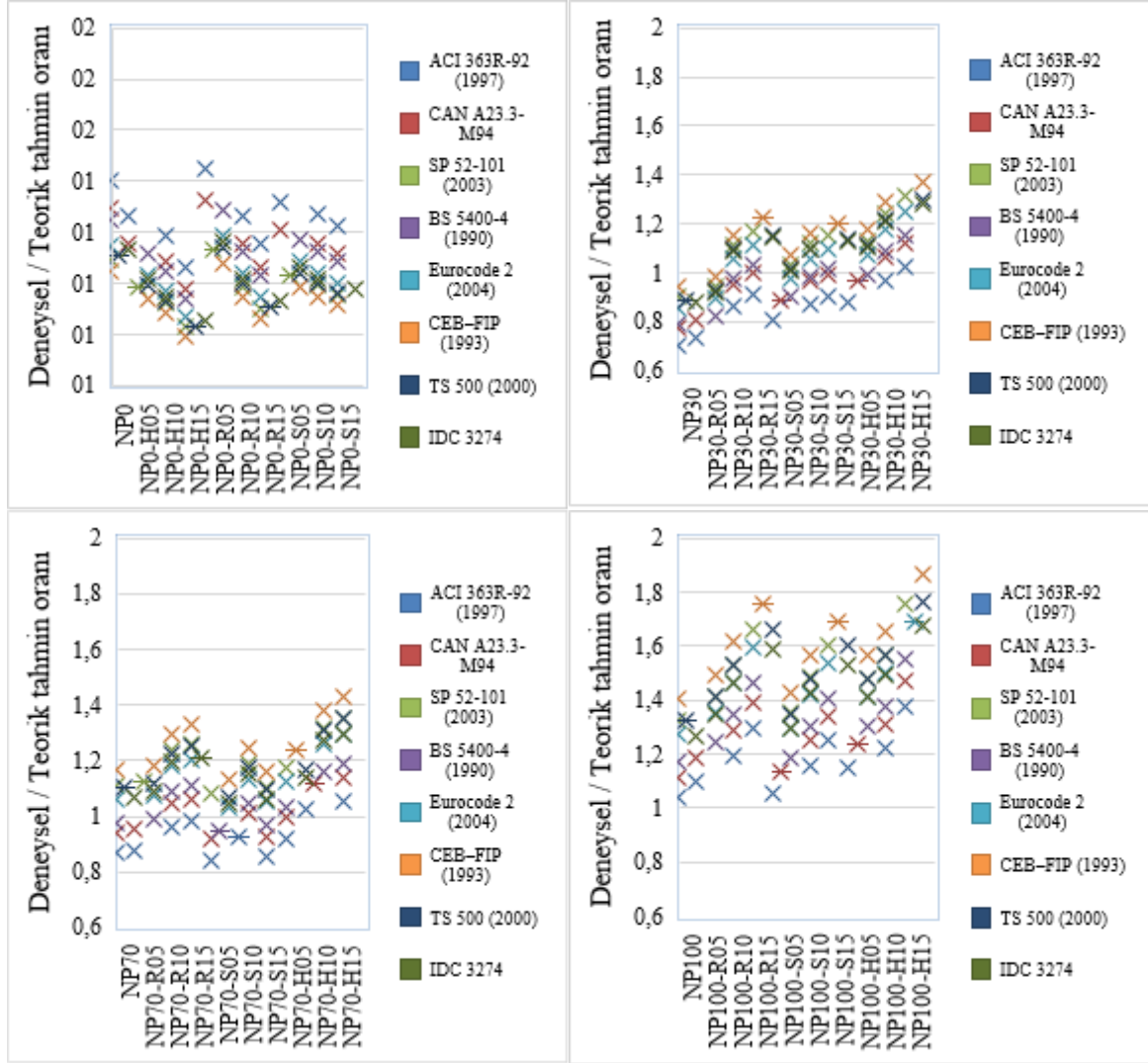
Perlit içeriğinin artmasıyla birlikte, tüm modellerin elastisite modülünü deneysel değerlere kıyasla genel olarak daha yüksek tahmin etme eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Başka bir ifadeyle, perlit ikame oranı arttıkça tahmin edilen MOE değerleri ile ölçülen değerler arasındaki fark artmış ve teorik değerler deneysel sonuçların üzerinde kalmıştır. NP70 serisinde gözlenen eğilimlerle uyumlu olarak, ACI 363R-92 (1997) modeli, NP100 serisi için de incelenen diğer modellere kıyasla en doğru tahminleri sağlamıştır. Bu modellere ait deneysel/teorik oranlar Tablo 10’da özetlenmiştir.

Tablo 10. Modellerin tahmin performansları.

Numune	Değerin tanımı	ACI 363R-92 (1997) [101]	CAN 23.3-M94 [102]	SP 52-101 (2003) [103]	BS 5400-4 (1990) [104]	Eurocode 2 (2004) [105]	CEB-FIP (1993) [106]	TS 500 (2000) [107]	IDC 3274 [108]
NP0	MIN	0.94	1.02	1.21	1.06	1.15	1.27	1.20	1.17
	MAX.	0.69	0.75	0.89	0.78	0.84	0.93	0.88	0.86
NP30	MIN	1.02	1.12	1.31	1.15	1.25	1.37	1.30	1.28
	MAX.	0.70	0.77	0.90	0.79	0.86	0.94	0.89	0.88
NP70	MIN	1.05	1.14	1.35	1.19	1.29	1.43	1.35	1.29
	MAX.	0.84	0.92	1.08	0.95	1.03	1.13	1.07	1.05
NP100	MIN	1.37	1.47	1.76	1.55	1.69	1.87	1.76	1.68
	MAX.	1.04	1.11	1.33	1.17	1.27	1.41	1.33	1.27

NP0 serisinde kenevir kütüğü takviyesi içeren numuneler değerlendirildiğinde, %0.5, %1.0 ve %1.5 lif hacim oranları için elde edilen deneysel/teorik elastisite modülü oranlarının BS 5400-4 (1990) modeli ile sırasıyla 0.89, 0.95 ve 1.06 değerlerinde en iyi uyumu gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek sapmaların CEB-FIP (1993) modelinde meydana geldiği ve bu model için söz konusu oranların sırasıyla 1.06, 1.13 ve 1.26 olduğu görülmüştür. Atık plastik lif içeren numunelerde deneysel/teorik oranların yaklaşık 0.88-1.10 aralığında değiştiği tespit edilmiş ve bu aralıkta en başarılı tahminlerin SP 52-101 (2003) modeli tarafından sağlandığı belirlenmiştir. Polipropilen lif takviyeli numunelerde ise IDC 3274 (2003) modelinin, deneysel/teorik oranların 0.94 ile 1.07 arasında değişmesi nedeniyle en güvenilir sonuçları verdiği görülmüştür. NP0 serisinin tamamı birlikte değerlendirildiğinde, IDC 3274 (2003) modelinin deneysel/teorik elastisite modülü oranlarını yaklaşık 0.86-1.17 aralığında tahmin ettiği ve incelenen modeller arasında genel olarak en uygun yaklaşımı sunduğu belirlenmiştir. NP30 serisinde ise atık plastik takviyeli karışımlarda BS 5400-4 (1990) modeli yaklaşık 0.94 ortalama oran elde etmiştir. Kenevir kütüğü içeren karışımlarda ACI 363R-92 (1997) modeli, polipropilen lif takviyeli karışımlarda ise BS 5400-4 (1990) modeli yaklaşık 0.96 ortalama oranlarla diğer modellere kıyasla daha başarılı tahminler sunmuştur. NP70 serisi sonuçları incelendiğinde ise ACI 363R-92 (1997) modelinin en yüksek uyumu sağladığı görülmüş; bu model kenevir kütüğü takviyeli numunelerde ortalama 0.93, atık plastik takviyeli numunelerde ise ortalama 0.94 deneysel/teorik oranları vermiştir. Genel değerlendirme yapıldığında, perlit ikame oranından

bağımsız olarak lif hacim oranının %1.0 seviyesinin üzerine çıkması, işlenebilirlikte meydana gelen azalma, boşluk oranındaki artış ve lif-matris ara yüzey bağının zayıflaması nedeniyle basınç dayanımında düşüşlere neden olmuştur. Tüm lif türlerinde benzer şekilde gözlenen bu eğilim, mekanik performans ile karışım bütünlüğü arasında optimum dengeyi sağlayan lif hacim oranının %1.0 olduğunu ortaya koymaktadır.

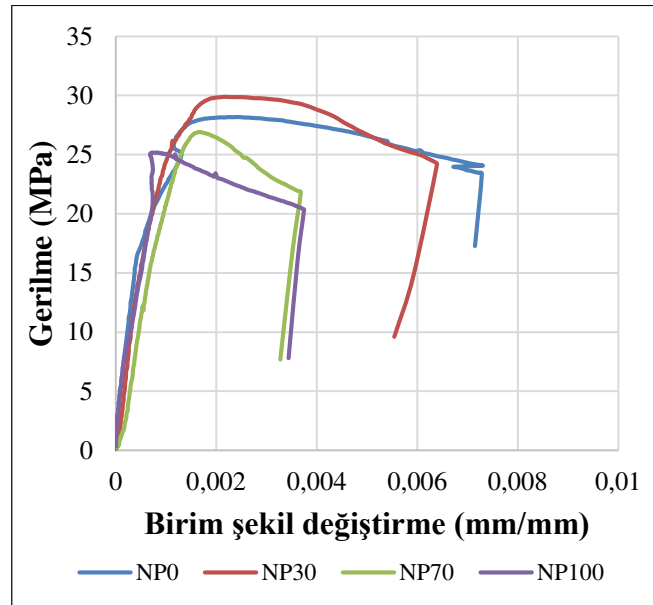


Şekil 18. Deneysel ve teorik elastisite modülü değerlerinin oranı

4.2. Gerilme- Birim Şekil Değiştirme Davranışı ve Tokluk

Betonun gerilme-şekil değiştirme davranışı; basınç dayanımı, su/çimento oranı, agrega tipi ve tane boyutu dağılımı, yerleştirme kalitesi, kür koşulları ile yükleme şekli ve yükleme hızı gibi birçok etkene bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Ayrıca bu davranış, betonun enerji sönümlenme ve enerji yutma kapasitesini belirleyen temel özelliklerden biri olarak kabul edilmektedir (Bakhshi vd., 2023). Bununla birlikte, literatürde betonun mikroyapısını

geliştirmek ve tokluk performansını artırmak amacıyla farklı lif türlerinin kullanımını inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Ortega-Lopez vd., 2021; Revilla-Cuesta vd., 2022). Bu araştırmada, tüm küp numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç deneylerinden elde edilen gerilme ve şekil değiştirme verileri kullanılarak gerilme-şekil değiştirme eğrileri oluşturulmuştur. Elde edilen eğriler perlit ikame oranlarına göre sınıflandırılmış ve Şekil 19’da verilmiştir. Gerilme-şekil değiştirme davranışı genel olarak iki temel aşamada incelenebilir: (i) maksimum gerilme değerine kadar devam eden yükselen bölüm ve (ii) tepe gerilmesinden sonraki gerilme azalım bölgesi. İlk aşamada gerilmenin şekil değiştirme ile yaklaşık doğrusal olarak arttığı elastik davranış gözlenmiştir, daha sonra tepe gerilmesine ulaşıncaya kadar artış hızının azaldığı elasto-plastik bölgeye geçilmiştir. Yüklemin ilerlemesiyle birlikte düşey doğrultudaki kapiller çatlaklar genişlemiş ve bunun sonucunda parçalanmalar ile yerel yüzey dökülmeleri meydana gelmiştir. Bu hasar mekanizmalarına paralel olarak, tepe gerilmesinden sonraki bölgede gerilme değerleri azalırken, lif türüne bağlı olarak şekil değiştirme kapasitesinde artışlar gözlenmiştir. Bu bölüm yumuşama bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Tepe şekil değiştirmesi, nihai şekil değiştirme ve tokluk parametreleri, tüm numunelere ait gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden hesaplanmıştır. Tokluk değeri, gerilme-şekil değiştirme eğrisi altında kırılma anına kadar veya belirlenen şekil değiştirme sınırına kadar kalan alan olarak tanımlanmıştır. Elde edilen bu karakteristik parametreler, betonun mekanik davranışının ve enerji yutma kapasitesinin değerlendirilmesinde önemli göstergeler olarak kullanılmaktadır.

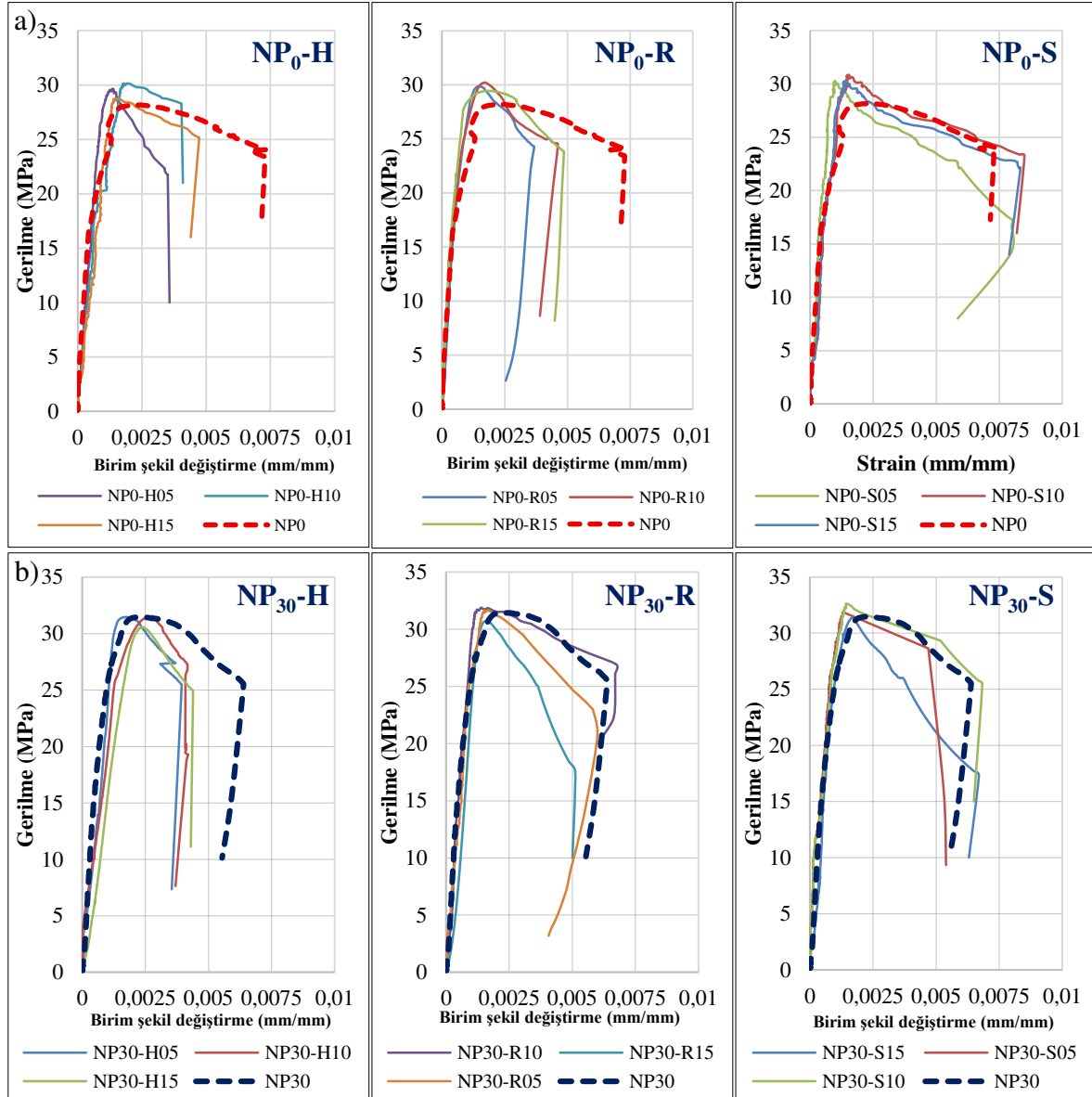


Şekil 19. Lif takviyesi içermeyen referans numunelere ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

Şekil 20a’da verilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerinde perlit ikame oranı sabit tutularak (%0), lif türü ve lif hacim oranının etkisi incelenmiştir. Karşılaştırma amacıyla, lif içermeyen referans

karışımı (NP0) temsil eden koyu kırmızı kesikli eğri de aynı şekilde gösterilmiştir. Kenevir kütüğü takviyeli betonların, geleneksel beton karışımlarına göre genel olarak daha düşük mekanik performans sergilediği bilinmektedir (Saleh vd., 2025). Bu davranışın temel nedeni, kenevir liflerinin hidrofilik karaktere sahip olmasıdır. Söz konusu özellik, liflerin su emmesine ve matris içerisinde ek boşlukların oluşmasına yol açabilmektedir. Ayrıca, betonun yüksek alkali ortamında (pH 11-13) liflerin zamanla bozunmaya eğilim göstermesi de performansı etkileyen önemli faktörlerden biridir (Pacheco-Torgal vd., 2011). Bunun yanında, liflerin şişmesi lif-matris ara yüzeyinde ilave bozulmalara neden olabilmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2011). Ca(OH)_2 'nin lif gözeneklerine nüfuz etmesi ise liflerin daha gevrek bir yapıya dönüşmesine yol açarak erken yükleme aşamalarında çatlak oluşumunu hızlandırabilmektedir (Addis vd., 2022). Bu mekanizmaların ortak etkisi sonucunda, liflerin çatlak köprüleme kapasitesi ve yük aktarım etkinliği azalmaktadır. Sunumun sadeleştirilmesi amacıyla yalnızca temsil niteliğindeki eğriler ayrıntılı olarak değerlendirilmiş olup, benzer eğilimlerin tüm numunelerde gözlemlendiği belirlenmiştir. Kenevir kütüğü takviyeli betonlar genel olarak lifsiz NP0 referans numunesine göre daha düşük performans göstermiştir. %0.5, %1.0 ve %1.5 lif hacim oranlarında tepe şekil değiştirmesi ve nihai şekil değiştirme değerleri, NP0 numunesine kıyasla sırasıyla NP0-H05 için %44.14 ve %52.03, NP0-H10 için %71.22 ve %43.81, NP0-H15 için ise %62.31 ve %34.22 oranlarında azalmıştır. Lif hacim oranının %1.0 seviyesinin üzerine çıkmasıyla birlikte artan lif yoğunluğunun tepe sonrası bölgede çatlak köprüleme etkisini kısmen geliştirdiği ve bunun nihai şekil değiştirme kapasitesinde belirli bir toparlanma sağladığı görülmüştür. Takviye oranının %1.5'e yükseltilmesi, beton içerisindeki çatlak ilerleme yollarını daha karmaşık hale getirerek çatlak yayılımını belirli ölçüde sınırlandırmıştır. Plastik atık liflerin %0.5 hacim oranında kullanıldığı karışımlarda geçiş bölgesi (ITZ) etkisinin daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Ancak lif oranının %1.5'e çıkarılmasıyla birlikte çatlak yollarının daha karmaşık bir yapıya kavuştuğu ve çatlak yayılımının sınırlandığı belirlenmiştir. Optimum seviye olarak değerlendirilen %1.5 lif hacim oranında dahi, tepe şekil değiştirmesi ve nihai şekil değiştirme değerleri NP0 referans numunesine göre sırasıyla yaklaşık %17.08 ve %34.22 oranlarında daha düşük kalmıştır. Burulmuş geometriye sahip polipropilen (PP) lifler, ilave sürtünme yüzeyleri oluşturarak diğer lif türlerine kıyasla daha güçlü aderans ve daha etkin bir çatlak köprüleme mekanizması sağlamaktadır. %0.5 PP lif içeriğinde tepe şekil değiştirmesi daha erken meydana gelirken, nihai şekil değiştirme kapasitesinin NP0 numunesine göre yaklaşık %10 oranında arttığı ve böylece betonun enerji yutma kapasitesinin iyileştiği görülmüştür. Gerilme-şekil değiştirme davranışı bakımından en uygun PP lif hacim oranı %1.0 olarak belirlenmiştir. Bu seviyede, nihai şekil değiştirme değeri NP0 numunesine göre yaklaşık

%16.52 oranında artış göstermiştir. Buna karşın, NP0 numunesi yaklaşık %26.84 daha yüksek tepe şekil değıştirmesi sergilemiştir. Lif hacim oranının %1.5'e yükseltilmesi ise işlenebilirlik sorunlarını artırmış, daha boşluklu ve daha zayıf bir iç yapının oluşmasına neden olmuştur. Bunun sonucunda, %1.0 lif içeriğine kıyasla tepe ve nihai şekil değıştirme değerlerinde sırasıyla yaklaşık %9.23 ve %14.91 oranlarında azalma meydana gelmiştir.

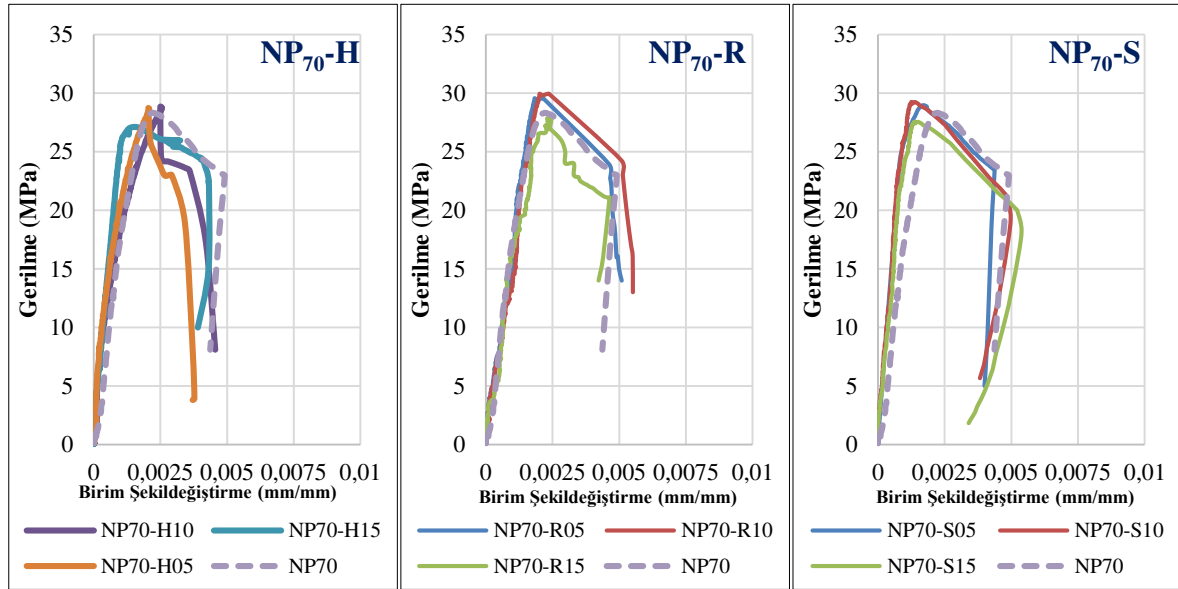


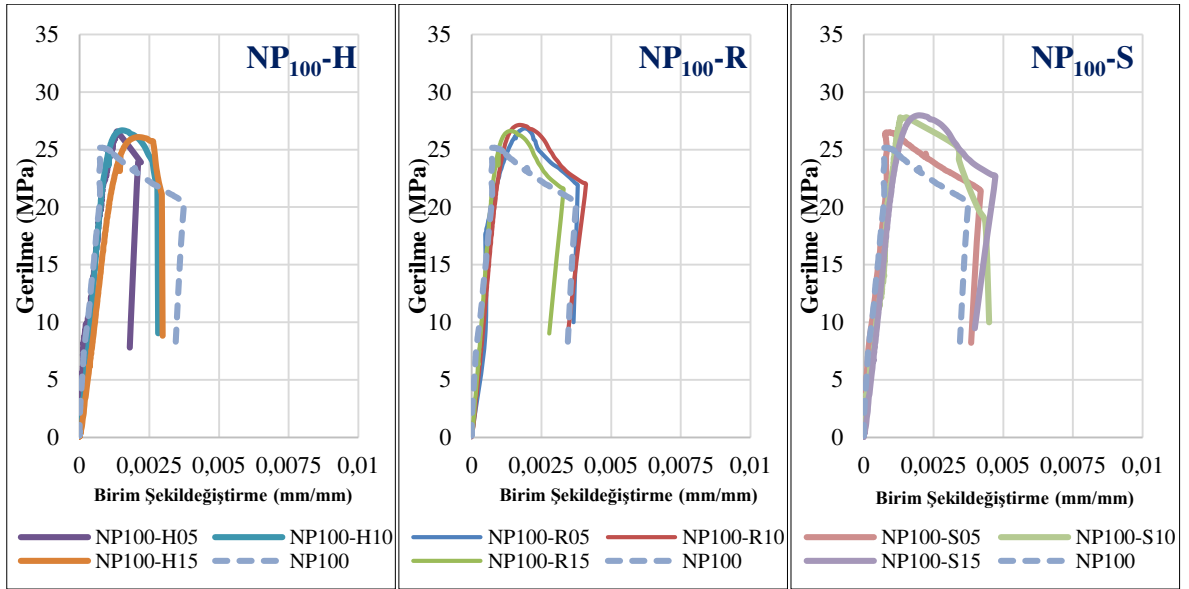
Şekil 20. NP0 ve NP30 lif takviyeli serilerinin gerilme-şekil değıştirme eğrileri.

Şekil 20b'de NP30 serisine ait gerilme-şekil değıştirme eğrileri gösterilmektedir. İnce agreganın %30 oranında ham perlit ile ikame edilmesi, betonun mekanik davranışını üzerinde hem olumlu hem de olumsuz etkiler meydana getirmiştir. Olumlu yönden değerlendirildiğinde, perlitin oluşturduğu dolgu etkisi ve iç kütleme mekanizması mikroyapının gelişmesine katkı sağlayarak mekanik performansı desteklemiştir. Perlit agregasının nispeten düşük dayanım

göstermesi nedeniyle oluşan zayıf geçiş bölgesi (ITZ), çatlakların daha erken başlamasına neden olmuş ve buna bağlı olarak tepe şekil değiştirmesinin azalmasına ve tepe sonrası bölgenin daha sınırlı kalmasına yol açmıştır. Nihai şekil değiştirme açısından değerlendirildiğinde, NP30 numunesinin deformasyon kapasitesi, geleneksel ince agrega içeren NP0 numunesine göre yaklaşık %13.66 oranında daha düşük bulunmuştur. NP30 serisinde en düşük performansın kenevir kütüğü takviyeli karışımlarda elde edildiği belirlenmiştir. Kenevir lif oranındaki artış nihai şekil değiştirme değerlerinde belirli düzeyde iyileşme sağlamakla birlikte, liflerin yüksek alkali ortama karşı hassas olması, su emme kapasitesinin yüksekliği ve lif çevresinde oluşan boşluklar nedeniyle optimum takviye seviyesi olarak belirlenen %1.5 lif oranında dahi nihai şekil değiştirme değerleri NP30 referans numunesine göre yaklaşık %30 daha düşük kalmıştır. Plastik atık lif takviyeli NP30 numuneleri, plastik liflerin düşük elastisite modülü ve hidrofobik yüzey özellikleri nedeniyle lifsiz NP30 numunesine kıyasla daha düşük performans göstermiştir. %0.5 lif hacim oranına sahip NP30-R05 numunesinde, tepe şekil değiştirmesi ve nihai şekil değiştirme değerleri NP30 referans numunesine göre sırasıyla yaklaşık %22.22 ve %4.75 oranlarında azalmıştır. Lif hacim oranının %1.0'a çıkarıldığı NP30-R10 numunesinde, artan plastik yüzey alanının etkisiyle tepe sonrası davranışta sınırlı bir iyileşme gözlenmiştir. Buna rağmen tepe şekil değiştirmesi değeri NP30-R05 numunesine yakın kalmış ve geçiş bölgesinin hâlen zayıf karakterini koruduğunu göstermiştir. Nihai şekil değiştirme değeri ise NP30 numunesine göre yalnızca yaklaşık %4.76 oranında artmıştır. Lif hacim oranının %1.5'e yükseltildiği NP30-R15 numunesinde ise yüksek lif içeriğine bağlı olarak daha heterojen ve daha gözenekli bir iç yapı oluşmuş, bunun sonucunda nihai şekil değiştirme değeri NP30 referans numunesine göre yaklaşık %18.79 oranında azalmıştır. Polipropilen (PP) lif takviyeli NP30 numuneleri, NP0 serisinde elde edilen sonuçlarla uyumlu şekilde en yüksek deformasyon kapasitesini göstermiştir. %1.5 PP lif hacim oranı, lifsiz NP30 numunesine göre nihai şekil değiştirme değerinde yaklaşık %8 oranında artış sağlamıştır. Buna karşılık, %0.5 ve %1.0 PP lif içeren numunelerin gerilme-şekil değiştirme davranışlarının NP30 referans karışımına oldukça benzer olduğu görülmüştür. Bölüm 4.1'de ifade edildiği üzere, yüksek perlit içerikleri betonun gözenekliliğini artırmış ve geçiş bölgesinin zayıflamasına neden olmuştur. Bu etkinin, Şekil 21a'da verilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerinde elastik bölge eğiminin azalması şeklinde açıkça görüldüğü belirlenmiştir. NP70 referans numunesinin nihai şekil değiştirme değeri, sırasıyla NP0 ve NP30 numunelerine göre yaklaşık %32.85 ve %22.10 oranlarında daha düşük bulunmuştur. NP70 serisinde kenevir kütüğü takviyeli karışımlarda, lif yüzey dokusunun rijitliği artırıcı bir etki oluşturduğu gözlenmiştir. Ancak liflerin su emmesi ve yüksek pH ortamında bozulmaya uğraması nedeniyle lif çevresinde oluşan boşluklar, ara yüzey

performansını olumsuz yönde etkilemiştir. Bu seride optimum lif hacim oranı %1.0 olarak belirlenmiş olmasına rağmen, bu seviyede elde edilen nihai şekil değiştirme değeri lifsiz NP70 numunesinden yaklaşık %6.93 daha düşük kalmıştır. Plastik atık lif içeren NP70 serisinde optimum lif hacim oranı %1.5 olarak belirlenmiştir. NP70-R15 numunesi, NP70 referans numunesine göre yaklaşık %9.80 daha yüksek nihai şekil değiştirme değeri göstermiştir. Bununla birlikte, elde edilen değerler NP30 ve NP0 numunelerine kıyasla sırasıyla yaklaşık %14.59 ve %26.27 oranlarında daha düşük kalmıştır. NP70 polipropilen lif takviyeli numunelerde, liflerin burulmuş geometrisinin elastik bölgede daha yüksek rijitlik sağladığı görülmüştür. En uygun lif hacim oranı %1.0 olarak belirlenmiş ve NP70-S10 numunesinin nihai şekil değiştirme değeri, lifsiz NP70 referans numunesine göre yaklaşık %10.91 oranında artmıştır. Ancak lif hacim oranının %1.5'e çıkarılması, işlenebilirliğin azalması ve boşluk oranının artması nedeniyle hem rijitlikte hem de deformasyon kapasitesinde olumsuz değişimlere neden olmuştur.





Şekil 21. NP70 ve NP100 lif takviyeli numune serilerinin gerilme-şekil değıştirme eğrileri.

Perlit ikame oranının %70 ve üzerine çıktığı karışımlarda, betonun baskın mekanik davranışının matris kontrollü yapıdan, geçiş bölgesi (ITZ) ve gözeneklilik etkilerinin belirleyici olduğu bir davranışa dönüştüğü görülmüştür. NP100 serisinde, geleneksel betonlarda kullanılan tüm ince agrega 0-5 mm tane boyutuna sahip perlit agregası ile tamamen değiştirilmiştir. NP30 ve NP70 serilerinde gözlenen gözenekli iç yapı, NP100 numunelerinde en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Tam perlit ikamesi sonucunda, daha önce açıklanan gözeneklilik kontrollü davranış mekanizması NP100 serisinde çok daha baskın hale gelmiştir. Bu durumun bir sonucu olarak, NP30 ve NP70 serilerinde kenevir kıtğı takviyesine bağılı olarak ortaya çıkan olumsuz etkiler NP100 serisinde de devam etmiş ve nihai şekil değıştirme kapasitesinde azalmalar meydana gelmiştir.

Plastik atık lif içeren NP100-R05 ve NP100-R10 numuneleri, lifsiz NP100 referans numunesine göre sırasıyla yaklaşık %2.63 ve %9.70 oranlarında daha yüksek nihai şekil değıştirme kapasitesi göstermiştir. Buna karşın, NP100-R15 numunesinde diğer serilerde de gözlenen eğilim devam etmiş; yüksek lif içeriğinin neden olduğu daha heterojen ve daha gözenekli iç yapı deformasyon kapasitesini sınırlandırarak mekanik davranışını olumsuz yönde etkilemiştir. NP0, NP30 ve NP70 serilerinde elde edilen sonuçlarla uyumlu şekilde, polipropilen (PP) lifler NP100 serisinde de deformasyon kapasitesini artıran en etkili takviye türü olarak belirlenmiştir. Optimum PP lif hacim oranı %1.0 olarak tespit edilmiş ve NP100-S10 numunesi, lifsiz NP100 ve NP70 referans numunelerine göre sırasıyla yaklaşık %70.27 ve %28.57 oranlarında daha yüksek nihai şekil değıştirme değerleri göstermiştir. Benzer nihai şekil değıştirme seviyeleri NP30 numunesinde de elde edilmiştir. NP100-S05 ve NP100-S15 numunelerinde nihai şekil

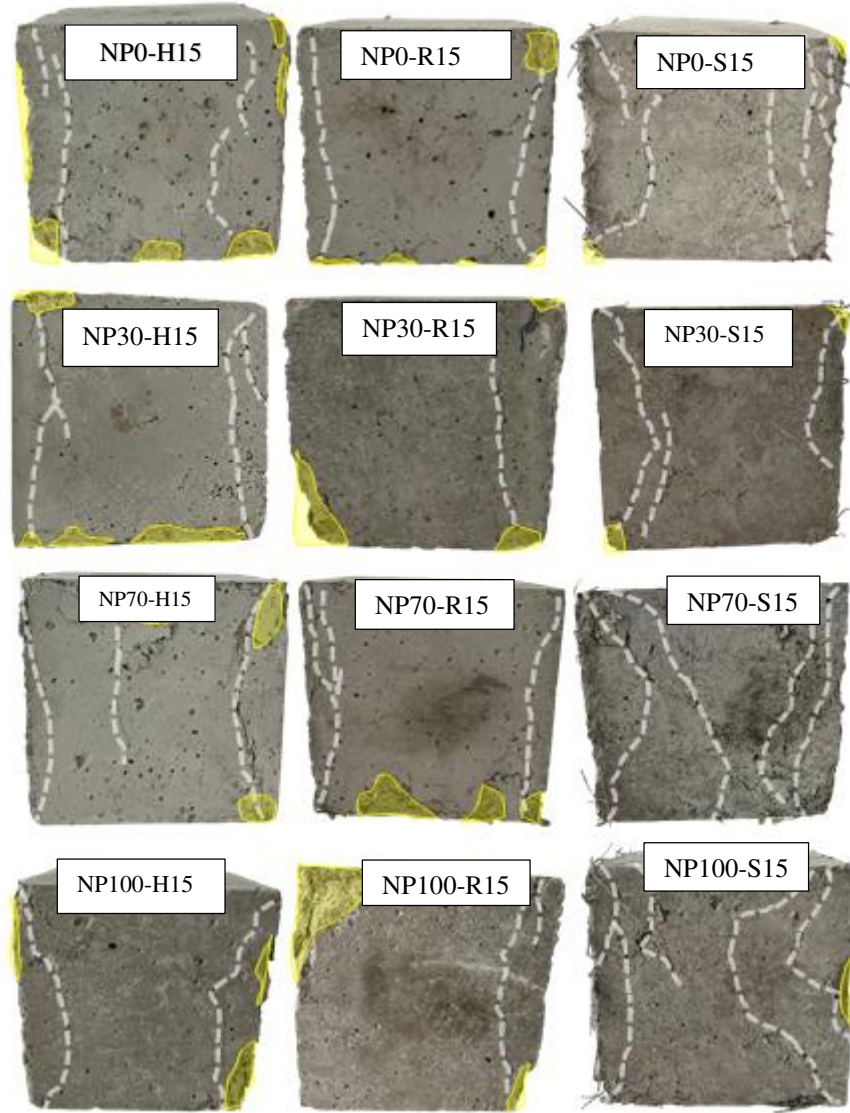
değiştirme değerleri, lifsiz NP100 numunesine kıyasla sırasıyla yaklaşık %5.40 ve %24.32 oranlarında artmıştır. Bununla birlikte, bu değerlerin NP70 numunesine göre sırasıyla yaklaşık %20.40 ve %6.12 oranlarında daha düşük olduğu belirlenmiştir. Özellikle NP100-S10 numunesinde, PP liflerin tepe yükünden sonraki gerilme-şekil değiştirme davranışını uzattığı ve böylece tepe sonrası deformasyon kapasitesini önemli ölçüde geliştirdiği görülmüştür. Farklı karışımlarda oluşan çatlakların dağılımı ve yayılım karakteristikleri Şekil 22'de verilmiştir.



Şekil 22. Farklı perlit ve lif içeriğine sahip numunelerde gözlenen hasar dağılımları

Şekil 23'te, %1.5 lif hacim oranına sahip tüm karışımların hasar mekanizmalarına ilişkin karşılaştırmalı değerlendirme sunulmuştur. Hasar gözlemleri, kenevir kıtığı ve plastik atık takviyeli numunelerde daha az sayıda ancak daha geniş açıklıklı çatlakların oluştuğunu göstermiştir. Buna karşılık, PP lif takviyeli numunelerde daha fazla sayıda, ince ve kapiller ölçekte çatlaklar meydana gelmiştir. Şekil 23'te görüldüğü üzere, kenevir ve plastik atık takviyeli karışımlarda üst ve alt bölgelerde ezilme ile yüzey dökülmeleri oluşmuş ve bu hasarlara belirli bölgelerde gelişen sınırlı sayıdaki kapiller çatlaklar eşlik etmiştir. Perlit ikame oranının %70 ve üzerine çıkmasıyla birlikte söz konusu çatlak ve yüzey dökülmesi davranışlarının daha belirgin hale geldiği gözlenmiştir. Buna karşılık, PP lif takviyesi hasarın

büyük ölçüde çatlak oluşumu ile sınırlanmasını sağlamış ve beton elemanın bütünlüğünün korunmasına önemli katkıda bulunmuştur. Şekil 23'te sunulan hasar desenleri, gerilme-şekil değiştirme davranışı ve tokluk performansına ilişkin yukarıda yapılan değerlendirmeleri görsel olarak desteklemektedir.



Şekil 23. %1.5 lif hacim oranına sahip tüm karışımlara ait hasar durumları.

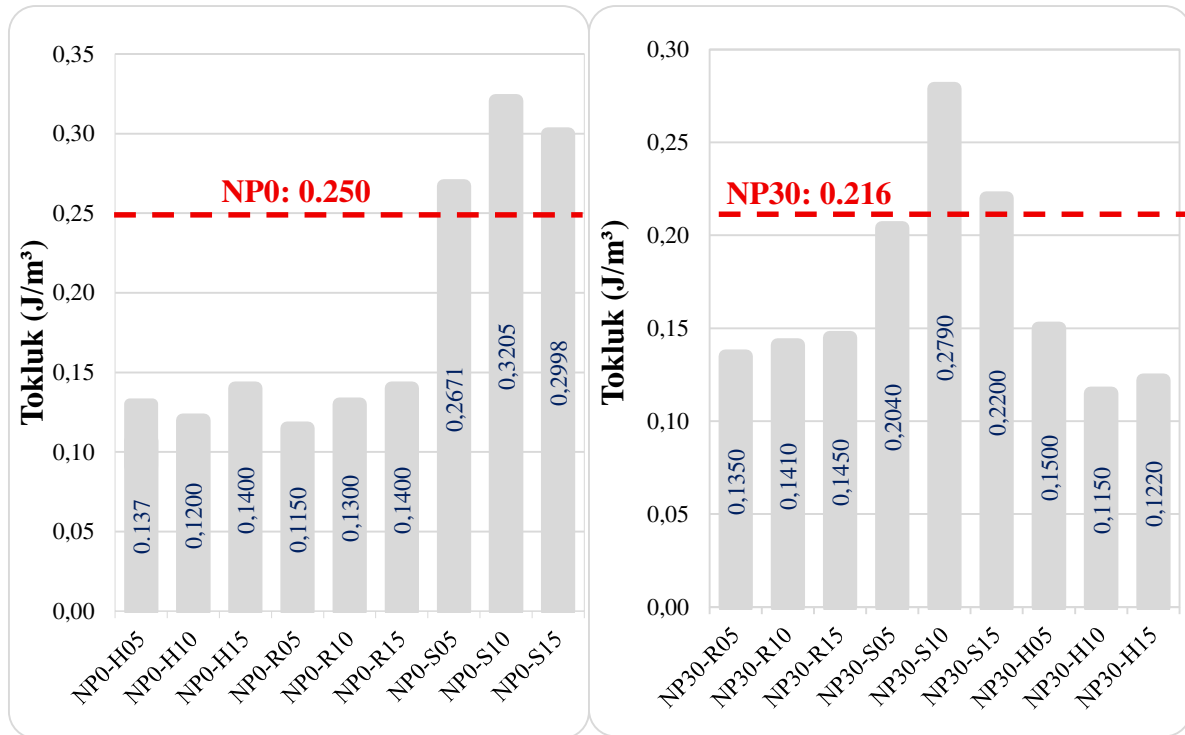
Gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin nitel olarak değerlendirilmesinin yanı sıra, betonun enerji yutma kapasitesinin nicel olarak belirlenmesi amacıyla tokluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Lif takviyesi, betonun yalnızca çekme ve eğilme dayanımlarını iyileştirmekle kalmamakta, aynı zamanda enerji yutma kapasitesini ve dolayısıyla tokluğunu da artırabilmektedir. Bu çalışmada, eksenel basınç yükü altında betonun tokluk kapasitesi, gerilme-şekil değiştirme eğrisi altında kalan alanın integrasyonu ile hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 24'te sunulmuştur. Sonuçlar, kenevir kütüğü ve plastik atık lif takviyelerinin genel olarak betonun tokluk

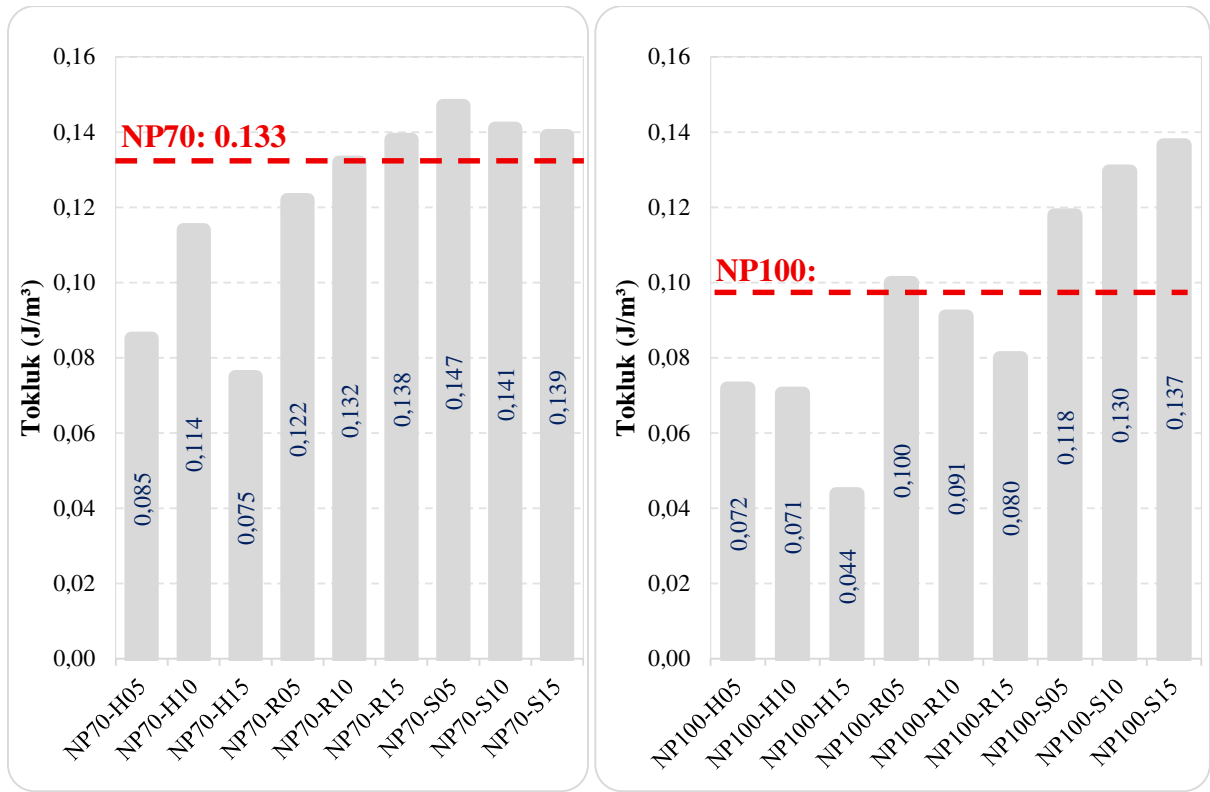
performansını olumsuz etkilediğini göstermiştir. Lifsiz NP0 referans numunesinin tokluk kapasitesi 0.250 J/m^3 olarak belirlenirken, bu değerin NP0-H05, NP0-H10 ve NP0-H15 numunelerinde sırasıyla yaklaşık %45.2, %52 ve %44 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir.

Kenevir kütüğünün yüksek alkali beton ortamında zamanla bozulması, lif-harç ara yüzeyindeki aderansın zayıflamasına neden olmakta ve buna bağlı olarak liflerin çatlak köprüleme etkinliği önemli ölçüde azalmaktadır. Benzer şekilde, plastik atık lif takviyeli NP0-R05, NP0-R10 ve NP0-R15 numunelerinde de tokluk kapasitesi NP0 referans numunesine göre sırasıyla yaklaşık %54, %48 ve %44 oranlarında düşmüştür. Plastik atık liflerin kenevir kütüğüne göre nispeten daha iyi performans göstermesi, lif miktarının artmasıyla birlikte çatlak yollarının daha karmaşık hale gelmesine ve bunun çatlak ilerlemesini belirli ölçüde sınırlandırmasına bağlanabilmektedir. Buna karşın, polipropilen (PP) lif takviyeli numunelerde tüm takviye oranlarında referans karışımdan daha yüksek tokluk değerleri elde edilmiştir. %0.5, %1.0 ve %1.5 lif hacim oranlarında sırasıyla 0.27 J/m^3 , 0.32 J/m^3 ve 0.29 J/m^3 tokluk kapasitesi ölçülmüştür. En başarılı sonuç %1.0 PP lif içeriğinde elde edilmiş ve NP0-S10 numunesi, NP0 referans karışımına göre yaklaşık %28.4 oranında daha yüksek tokluk kapasitesi göstermiştir. PP liflerin burulmuş geometrisi, çatlak ilerlemesine karşı etkili bir mekanik kenetlenme sağlayarak performansı artırmaktadır. Ayrıca lif sıyrılması ve lif kopması sırasında tüketilen ilave enerji, tepe sonrası deformasyon bölgesini genişletmekte ve toplam enerji yutma kapasitesini yükseltmektedir. Bu davranış, beton matrisi içerisinde çok sayıda yerel lif sıyrılması olayının gerçekleşmesine benzer bir mekanizma olarak değerlendirilebilir. İnce agreganın %30'unun perlit ile değiştirildiği NP30 referans numunesinin tokluk kapasitesi 0.216 J/m^3 olarak belirlenmiş olup, bu değer NP0 numunesine göre yaklaşık %13.6 daha düşük bulunmuştur. Bu azalmanın temel nedeni, perlit agregasının gözenekli yapısı ve yüksek su emme eğiliminin düşük yük seviyelerinde mikro çatlak oluşumunu teşvik etmesidir. Her ne kadar tüm karışımlarda su/çimento oranı sabit tutulmuş olsa da perlit agregalarının su emme özelliklerinin optimum lif içeriğinin belirlenmesinde önemli rol oynadığı görülmüştür. Kenevir kütüğü içeren NP30 numunelerinde, NP30-H05 karışımının NP0-H05 numunesine göre yaklaşık %8.36 daha yüksek tokluk göstermesi dikkat çekici bir sonuç olarak ortaya çıkmıştır. Ancak lif oranının %1.0'a yükseltilmesiyle birlikte, kenevir liflerinin hidrofilik yapısı nedeniyle karışım suyunun bir kısmını absorbe etmesi işlenebilirliği azaltmış; perlitin su emme etkisi ile birleşen bu durum gözenekliliğin artmasına neden olmuştur. Lif oranının %1.5'e çıkarılması sayısal olarak kısmi bir iyileşme sağlamasına rağmen, genel mekanik performansta belirgin bir gelişme sağlanamamıştır. Plastik atık lif takviyeli NP30 numunelerinde de, lif-matris ara yüzeyindeki

zayıf aderans nedeniyle performansın sınırlı kaldığı görülmüş ve bu seri için optimum lif hacim oranı %1.5 olarak belirlenmiştir.

NP30 serisinde PP liflerin sağladığı tokluk artışının NP0 serisine kıyasla daha düşük olması, perlit içeren karışımlarda burulmuş lif geometrisi çevresinde daha zayıf bir bağ oluşmasına ve lif sıyrılmasının daha erken başlamasına bağlanmaktadır. Bu seride en yüksek tokluk artışı %1.0 PP lif içeriğinde elde edilmiş ve lifsiz NP30 numunesine göre yaklaşık %29.1 oranında artış sağlanmıştır. %0.5 lif hacim oranında lif ağı yeterince gelişmediğinden, tokluk kapasitesi yaklaşık %5.6 oranında azalmıştır. %1.5 lif hacim oranında ise daha gözenekli iç yapının etkisiyle PP liflerin olumlu katkısı sınırlandırılmış ve yalnızca yaklaşık %1.8 oranında artış elde edilmiştir. İnce agreganın %70'inin perlit ile ikame edildiği NP70 referans numunesinin tokluk kapasitesi, NP0 ve NP30 numunelerine göre sırasıyla yaklaşık %46.8 ve %38.4 oranlarında daha düşük bulunmuştur. Diğer karışımlarda olduğu gibi, NP70 serisinde kullanılan kenevir kütüğü lifleri de yüksek alkali ortamın olumsuz etkilerine maruz kalmış ve tüm lif türleri arasında en düşük tokluk değerlerini göstermiştir. Bu durum, ilgili gerilme-şekil değiştirme eğrilerinde tepe sonrası bölgenin belirgin şekilde daralmasıyla da uyum göstermektedir.





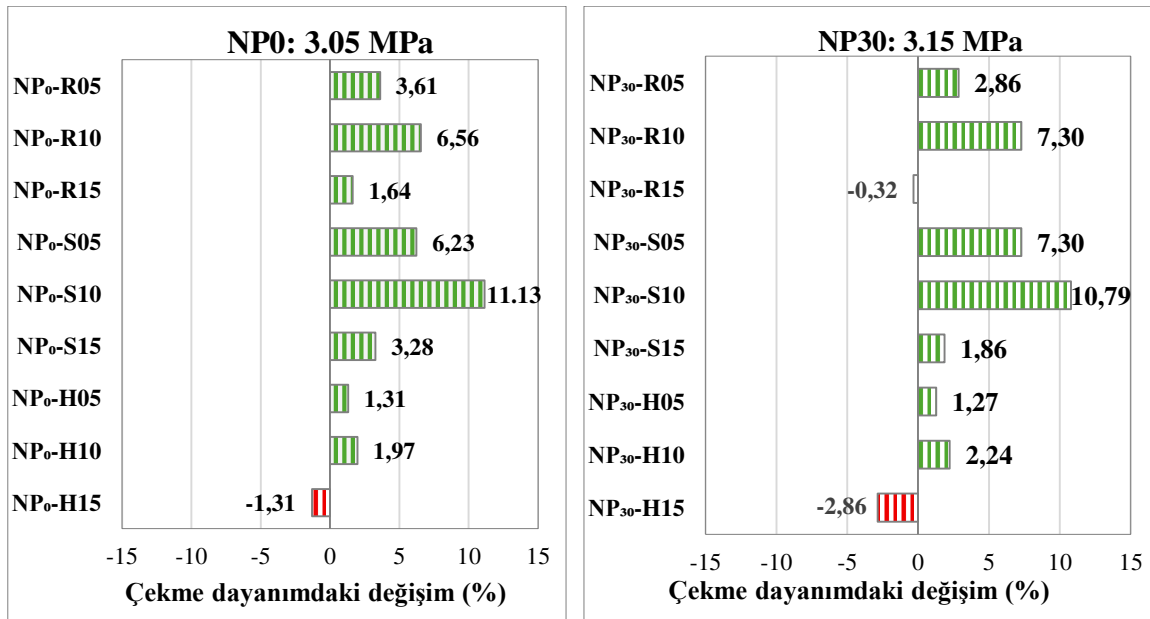
Şekil 24. Tokluk değerleri.

Genel bir değerlendirme yapıldığında, gerilme-şekil değiştirme davranışı ile tokluk sonuçları, perlit esaslı betonların mekanik performansının büyük ölçüde iç gözeneklilik düzeyi, geçiş bölgesi (ITZ) kalitesi ve lif-matris ara yüzey aderansının ortak etkisi altında şekillendiğini ortaya koymaktadır. Tüm perlit ikame seviyelerinde, lif takviyesinin yaklaşık %1.0 hacim oranına kadar olumlu katkı sağladığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, lif içeriğinin %1.5 seviyesine yükseltilmesi; işlenebilirlikte azalma, boşluk oluşumunda artış ve ara yüzeydeki yük aktarım etkinliğinin zayıflaması nedeniyle deformasyon kapasitesi ve tokluk performansında genel bir düşüşe neden olmuştur. İncelenen lif türleri arasında, burulmuş yapıya sahip polipropilen liflerin çatlak köprüleme mekanizmasını en etkin şekilde gerçekleştirdiği ve tepe sonrası deformasyon kapasitesini sürekli olarak artırdığı görülmüştür. Bu nedenle, en yüksek tokluk performansı polipropilen lif takviyeli karışımlarda elde edilmiştir. Kenevir kütüğü ve plastik atık lifler daha sınırlı düzeyde fayda sağlamıştır. Kenevir kütüğünde bu durumun temel nedeni liflerin alkali ortama karşı hassas olması ve yüksek su emme kapasitesi gösterirken, plastik atık liflerde ise nispeten zayıf lif-matris aderansının etkili olduğu düşünülmektedir. Perlit ikame oranının %70 ve üzerine çıktığı karışımlarda, gözeneklilik ve ITZ kaynaklı mekanizmaların belirleyici hale gelmesi lif takviyesinin etkinliğini azaltmıştır.

Bu bulgu, yüksek gözenekliliğe sahip perlitli betonlarda sünekliğin artırılması amacıyla kullanılan takviye yöntemleri arasında, özellikle orta düzey hacim oranlarında kullanılan polipropilen liflerin en etkili ve güvenilir çözüm olduğunu göstermektedir.

4.3. Yarmada Çekme Dayanımı

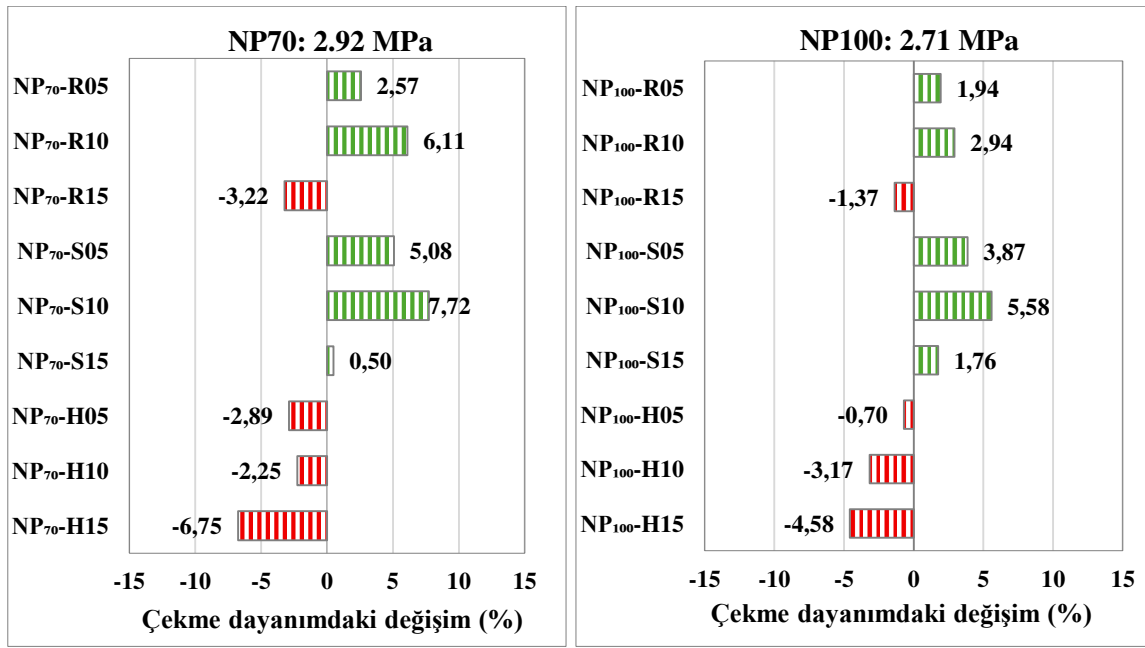
Silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilen yarma çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar, lifsiz referans karışım olan NP0'a göre hesaplanan artış ve azalış oranlarıyla birlikte Şekil 25'te verilmiştir. Basınç dayanımı deneylerinde olduğu gibi, burada sunulan çekme dayanımı değerleri de her karışım için test edilen üç adet aynı numunenin ortalama sonuçlarını temsil etmektedir. Lifsiz NP0, NP30, NP70 ve NP100 karışımlarına ait yarma çekme dayanımları sırasıyla 3.05, 3.15, 2.92 ve 2.71 MPa olarak belirlenmiştir. Lifsiz karışımlar arasında en yüksek çekme dayanımı NP30 numunesinde elde edilmiştir. İnce agreganın %30'unun perlit ile değiştirildiği bu karışım, NP0 referans numunesine göre yaklaşık %3.17 oranında daha yüksek çekme dayanımı göstermiştir. Bu iyileşmenin temel nedeni, perlit agregasının gözenekli yapısının sağladığı iç kürleme etkisidir. Perlit bünyesinde depolanan suyun hidratasyon sürecini desteklemesi, ilave C-S-H oluşumuna katkı sağlayarak daha yoğun bir mikroyapının ve daha dayanıklı bir geçiş bölgesinin (ITZ) gelişmesine yardımcı olmaktadır. Ancak perlit ikame oranının %30'un üzerine çıkarılmasıyla birlikte boşluk yapısının optimum seviyeden uzaklaştığı ve bunun sonucunda çekme dayanımının azaldığı görülmüştür. Bu nedenle NP70 ve NP100 karışımlarının çekme dayanımları, NP0 referans karışımına kıyasla sırasıyla yaklaşık %4.26 ve %11.15 oranlarında düşüş göstermiştir. Kenevir kütüğü ile takviye edilen betonlarda ise çekme dayanımı üzerinde sınırlı düzeyde veya olumsuz etkiler gözlenmiştir. NP0 serisinde en düşük performans, referans numuneye göre yaklaşık %1.31 oranında dayanım kaybı gösteren NP0-H15 karışımında elde edilmiştir. Buna karşılık, %0.5 ve %1.0 kenevir kütüğü içeren karışımlarda çekme dayanımında yalnızca sırasıyla yaklaşık %1.31 ve %1.97 oranlarında sınırlı artışlar meydana gelmiştir. Plastik atık lif takviyesi de yarma çekme dayanımına olumlu katkıda bulunmuş, ancak bu katkı polipropilen liflere göre daha düşük seviyede kalmıştır. NP0 referans karışımına kıyasla, %0.5, %1.0 ve %1.5 hacim oranlarında plastik atık lif kullanımı çekme dayanımını sırasıyla yaklaşık %3.61, %6.56 ve %1.64 oranlarında artırmıştır. Elde edilen bu iyileşme, plastik atık liflerin yük aktarımına kısmen katkı sağlaması ve çatlakların oluşumu ile ilerlemesini belirli ölçüde sınırlandırmasıyla açıklanabilmektedir.



Şekil 25. Silindir numunelerden elde edilen çekme dayanımı sonuçları:
a) NP0 serisi ve b) NP30 serisi.

NP30 karışımı, lifsiz NP0 referans numunesine göre yaklaşık %3.3 oranında daha yüksek çekme dayanımı göstermiş ve 3.15 MPa değerine ulaşmıştır. NP0 ve NP30 serilerinde ortak olarak gözlenen bir diğer durum ise, kenendir kütüğü takviyeli karışımların çekme dayanımı açısından nispeten düşük performans sergilemesidir. Bu olumsuz etkinin temel nedeni, kenendir liflerinin hidrofilik karakteri ile betonun yüksek alkali ortamında meydana gelen bozulma süreçlerinin birlikte etkili olmasıdır. Bu nedenle, %1.5 kenendir kütüğü içeren karışımın çekme dayanımı, lifsiz NP30 referans numunesine göre yaklaşık %2.86 oranında düşmüştür. NP30 serisinde plastik atık lif takviyeli karışımlar incelendiğinde, %1.5 lif içeriğinin çekme dayanımı üzerinde olumsuz bir etki oluşturduğu görülmüştür. Buna karşılık, %0.5 ve %1.0 lif hacim oranlarında çekme dayanımında sırasıyla yaklaşık %2.86 ve %7.30 oranlarında artış elde edilmiştir. NP30-R05 ve NP30-R10 numunelerinde gözlenen bu iyileşme, plastik atık liflerin çatlak ilerlemesini belirli ölçüde engelleyebilmesine bağlanmaktadır. Ancak lif içeriğinin %1.5 seviyesine yükseltilmesi, yük aktarım mekanizmasının etkinliğini azaltmış ve çekme dayanımında düşüşe neden olmuştur. NP30 serisinde değerlendirilen lif türleri arasında en yüksek çekme dayanımı artışı polipropilen liflerde elde edilmiştir. NP0 serisinde olduğu gibi, bu seride de maksimum çekme dayanımı %1.0 polipropilen lif içeren NP30-S10 karışımında belirlenmiştir. NP0 ve NP30 serilerinde %1.5 PP lif içeriğinde ortaya çıkan benzer dayanım kayıpları; işlenebilirliğin azalmasına bağlı olarak daha gözenekli bir iç yapının oluşması, liflerin yük transferine yeterince katılamaması ve karışım içerisinde topaklanma eğilimi göstermesi ile açıklanabilmektedir.

Literatürde de polipropilen liflerin beton matrisi içerisinde dolaşarak kümelenme eğilimi gösterebildiği bildirilmektedir (Deng vd., 2018). Şekil 26’da görüldüğü üzere, perlit ikame oranının %70 seviyesine yükseltilmesi çekme dayanımında belirgin bir azalmaya neden olmuş ve NP30 ile NP0 karışımlarına kıyasla sırasıyla yaklaşık %7.30 ve %4.26 oranlarında düşüş meydana gelmiştir. Bu azalmanın temel nedenleri arasında artan gözeneklilik, harç-agrega geçiş bölgesinde (ITZ) zayıf aderans bölgelerinin oluşması ve perlit agregalarının yüksek su emme kapasitesi yer almaktadır. Bununla birlikte, NP0 ve NP30 serilerinde gözlenen polipropilen liflerin üstün performansı NP70 serisinde de devam etmiştir. Bu seride en yüksek çekme dayanımı NP70-S10 karışımında elde edilirken, NP70-R10 karışımı da önemli bir iyileşme göstermiştir. Lifsiz NP70 referans numunesi ile karşılaştırıldığında, NP70-S10 ve NP70-R10 karışımlarında çekme dayanımı sırasıyla yaklaşık %6.11 ve %7.72 oranlarında artmıştır. NP0 ve NP30 serilerinden farklı olarak, NP70 serisindeki tüm kenevir kütüğü takviyeli karışımlarda çekme dayanımında düşüş meydana gelmiştir. Bu azalmalar, %0.5, %1.0 ve %1.5 lif hacim oranlarında NP70 referans karışımına göre yaklaşık %2.8 ile %6.75 arasında değişmiştir. İnce agreganın tamamen perlit ile ikame edildiği NP100 serisinde ise çekme dayanımı, NP0, NP30 ve NP70 karışımlarına göre sırasıyla yaklaşık %11.1, %14.0 ve %7.2 oranlarında daha düşük bulunmuştur. Tamamen gözenekli ince agregaların kullanılması sonucu gelişen yüksek mikro-gözeneklilik ve zayıf ara yüzey bağları ile ilişkilendirilmektedir. Bu seride kenevir kütüğü takviyesi, lif-matris ara yüzeyinde oluşan boşluklar ve liflerin alkali ortama duyarlılığı nedeniyle tüm dozaj seviyelerinde çekme dayanımını olumsuz etkilemiştir. Plastik atık lif içeren karışımlarda, %0.5 ve %1.0 lif hacim oranlarında sınırlı düzeyde dayanım artışları elde edilmiş ve NP100-R10 karışımı, lifsiz NP100 referans numunesine göre yaklaşık %2.94 oranında daha yüksek çekme dayanımı göstermiştir. İncelenen tüm lif türleri içerisinde en başarılı sonuçlar polipropilen liflerde elde edilmiştir. Optimum lif hacim oranı %1.0 olarak belirlenmiş ve bu seviyedeki NP100-S10 karışımı, NP100 referans numunesine kıyasla çekme dayanımında yaklaşık %5.58 oranında artış sağlamıştır.

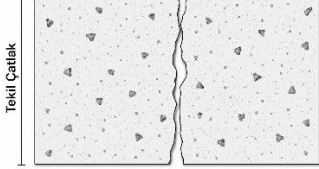
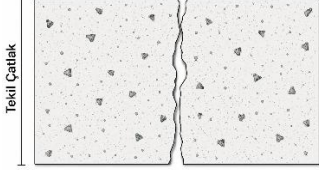
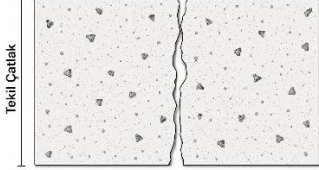
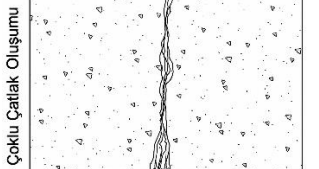


Şekil 26. Silindir numunelerden elde edilen çekme dayanımı sonuçları:
a) NP70 serisi ve b) NP100 serisi.

Kenevir kütüğü takviyesi, betonun yüksek alkali ortamında liflerde meydana gelen bozulma nedeniyle çekme dayanımına sınırlı düzeyde katkı sağlamıştır. Buna karşın, polipropilen (PP) lifler, perlit ikame oranından bağımsız olarak incelenen tüm lif türleri arasında çekme dayanımında en yüksek iyileşmeyi sağlayan takviye malzemesi olmuştur. PP lifler kadar etkili olmamakla birlikte, atık plastik lif takviyeleri de özellikle düşük yük seviyelerinde çatlakların ilerlemesini belirli ölçüde engelleyerek çekme dayanımının artmasına katkıda bulunmuştur. Tüm lif türleri birlikte değerlendirildiğinde, %1.5 lif hacim oranında çekme performansının tüm serilerde azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Buna karşılık, %1.0 lif hacim oranı mekanik performans açısından daha dengeli sonuçlar vermiş ve genel olarak en uygun takviye seviyesi olarak öne çıkmıştır. Tablo 11’de verilen hasar görüntülerinin incelenmesi, PP lif takviyeli numunelerde mikro çatlak oluşumunun daha yaygın olduğunu ortaya koymaktadır. Burulmuş geometriye sahip PP lifler, yük altında etkin bir çatlak köprüleme mekanizması oluşturarak daha sünek bir hasar davranışının gelişmesini sağlamıştır. Diğer lif türleri ile takviye edilen karışımlardan farklı olarak, PP liflerin yük aktarımına aktif şekilde katılması çatlak açıklıklarını sınırlandırmış ve numunelerin bütünlüğünün büyük ölçüde korunmasına yardımcı olmuştur. Hasar mekanizmasındaki bu olumlu etki, kademeli hasar gelişimi ve sünek kırılma davranışı ile açık biçimde gözlenmiş olup literatürde rapor edilen sonuçlarla da uyum göstermektedir (Akkaş vd., 2010; Madhavi vd., 2014). PP lif takviyeli numunelerin aksine, plastik atık ve kenevir kütüğü içeren karışımlarda baskın bir merkezi çatlak oluşmuş ve bu durum yarıma tipi kırılma davranışına neden olmuştur. Genel olarak değerlendirildiğinde, hasar görüntüleri uygun lif

takviyesinin kullanımının büyük ve belirgin tekil çatlakların oluşmasını engelleyerek daha homojen dağılıma sahip bir mikro çatlak ağı geliştirebildiğini göstermektedir. Bu tür bir hasar davranışı, dayanıklılık ve yapısal bütünlük açısından daha avantajlı bir performans olarak değerlendirilmektedir (American Concrete Institute, ACI 116R 2000).

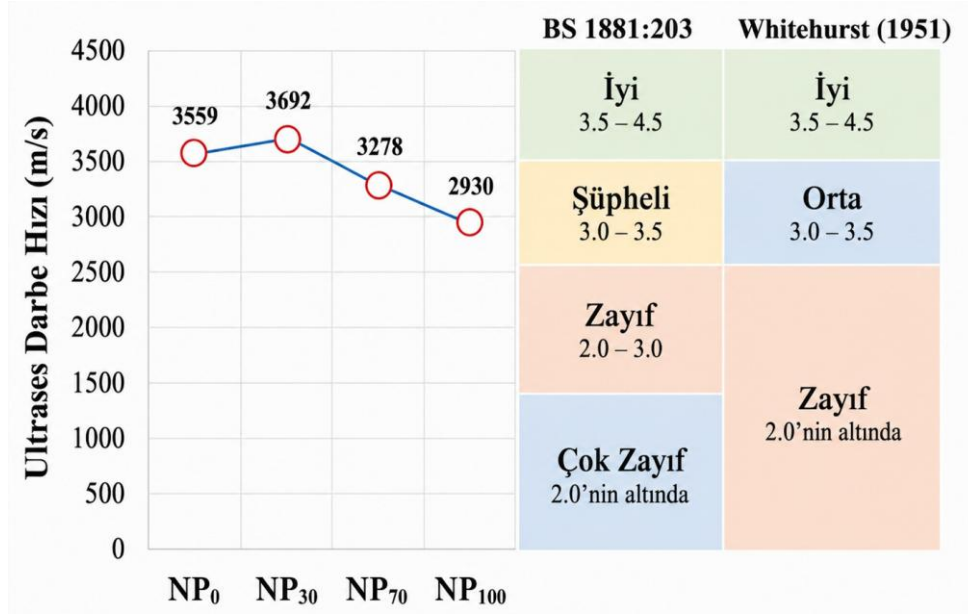
Tablo 11. Silindir numunelerde gözlenen hasar durumları.

Numune	Hasar Deseni	NP0	NP30	NP70	NP100
-					
H15					
R15					
S15					

Genel değerlendirme yapıldığında, yarma çekme dayanımı sonuçları, lif takviyesinin etkinliğinin yalnızca kullanılan lif türüne bağlı olmadığını, aynı zamanda perlit ikame oranı ile lif hacim oranının ortak etkisiyle şekillendiğini göstermektedir. İncelenen tüm lif türleri arasında polipropilen (PP) lifler, yüksek perlit içeriklerinde dahi çatlak köprüleme mekanizmasını etkin şekilde sürdürerek ve daha homojen bir mikro çatlak dağılımı oluşturarak çekme dayanımında en istikrarlı ve güvenilir iyileşmeyi sağlamıştır. Buna karşılık, kenevir kütüğü takviyesi; hidrofilik yapısı ve betonun yüksek alkali ortamında bozulmaya eğilim göstermesi nedeniyle çekme performansına sınırlı düzeyde katkı sağlamış, bazı durumlarda ise olumsuz etkiler oluşturmuştur. Öte yandan, yüksek lif içeriklerinin (%1.5) genel olarak çekme dayanımını olumsuz etkilediğı belirlenmiştir. Bu durum; işlenebilirlikte meydana gelen azalma, gözeneklilikteki artış ve lif-matris ara yüzeyindeki aderansın zayıflaması ile ilişkilendirilmektedir. Elde edilen bulgular, optimum mekanik performansın lif miktarının artırılmasıyla değil, uygun lif dozajının belirlenmesiyle sağlanabileceğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, dengeli bir çekme davranışı elde edebilmek açısından optimum lif oranının seçimi kritik bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmektedir.

4.4. Ultrases Geçiş Hızı (UPV)

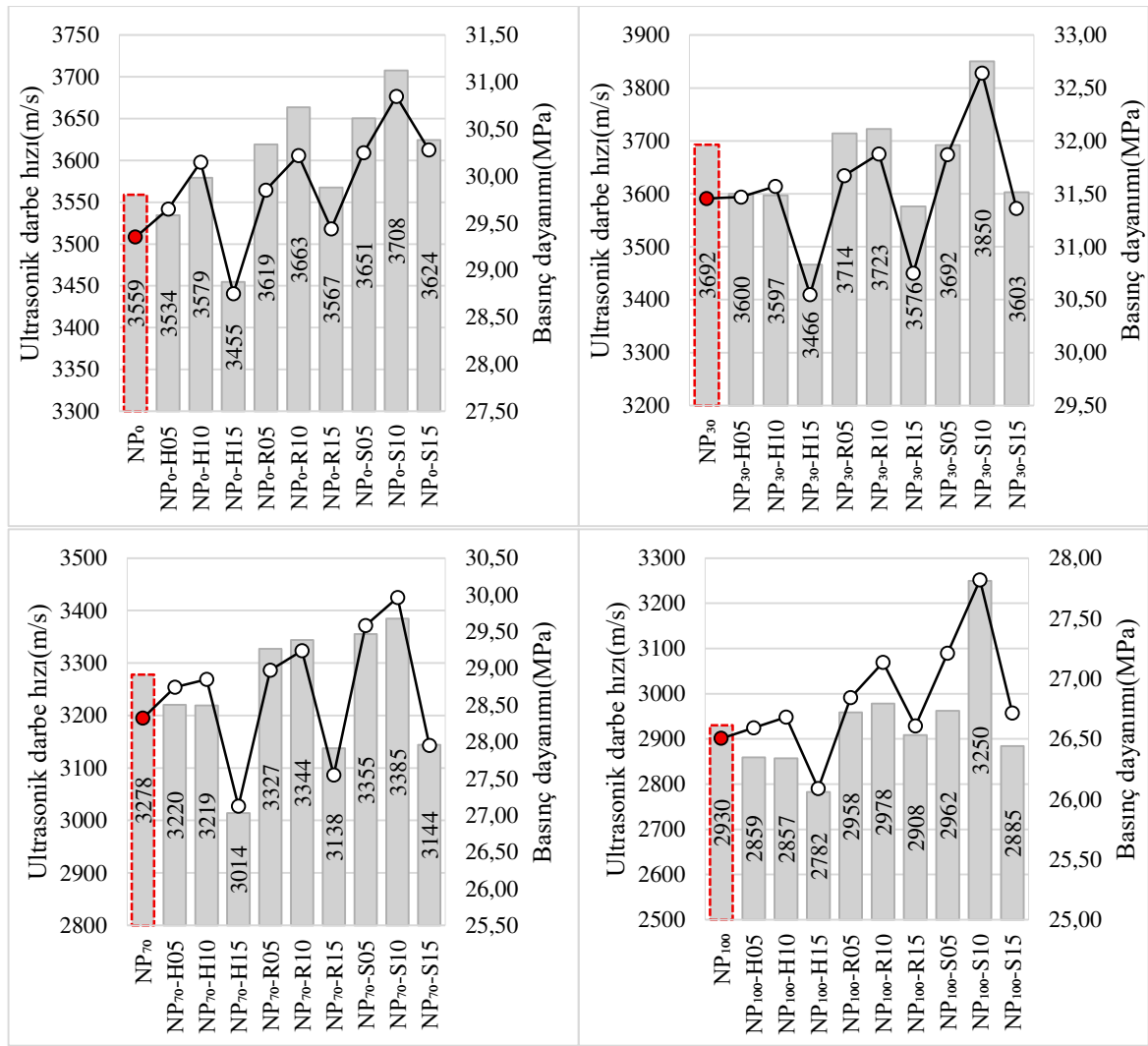
Betonun kalitesinin tahribatsız yöntemlerle değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan ultrases geçiş hızı (UPV) testi, aynı zamanda malzeme içerisindeki iç çatlakların, boşluk yapısının ve çeşitli mikroyapısal kusurların belirlenmesinde etkili bir araç olarak kabul edilmektedir (Karagöl vd., 2013). Bu araştırmada UPV ölçümleri hem küp hem de silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Küp numunelerden elde edilen UPV değerleri, ilgili basınç dayanımı sonuçları ile değerlendirilmiş ve Şekil 27’de verilmiştir. Lif içermeyen karışımlar için ölçülen UPV değerleri NP0, NP30, NP70 ve NP100 serilerinde sırasıyla 3559.0, 3692.4, 3278.1 ve 2930.1 m/s olarak belirlenmiştir. İnce agreganın %30 oranında perlit ile değiştirilmesi, NP0 referans karışımına göre UPV değerinde yaklaşık %3.61 oranında bir artış sağlamıştır. Bu iyileşmenin; perlit agregasının oluşturduğu iç kür etkisi, daha iyi sıkışma davranışı ve geçiş bölgesinde (ITZ) meydana gelen kısmi iyileşmeler sonucunda ortaya çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 27. UPV sonuçları.

Perlit ikame oranının %30 seviyesinin üzerine çıkması, UPV değerlerinde belirgin düşüşlere neden olmuştur. Özellikle NP70 ve NP100 karışımlarında ölçülen UPV değerleri, NP0 referans karışımına kıyasla sırasıyla yaklaşık %7.89 ve %17.67 oranlarında daha düşük bulunmuştur (Huang vd., 2021). Perlit miktarındaki artışla birlikte gözlenen bu azalma, daha gözenekli bir matris yapısında ultra ses dalgalarının daha fazla saçılmasıyla ilişkilendirilmektedir. Artan boşluk hacmi, betonun iç yapısını zayıflatmış ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerde düşüşe yol açmıştır. UPV sonuçları ayrıca BS 1881:203 (1986) ve Whitehurst (1951) tarafından önerilen beton kalite sınıflandırmalarına göre değerlendirilmiştir. Şekil 30 incelendiğinde, NP0 ve NP30 karışımlarının 3500-4500 m/s aralığında yer aldığı ve bu nedenle “İyi” kalite beton sınıfında değerlendirildiği görülmektedir. NP70 karışımı ise BS 1881:203 (1986) standardına göre “Şüpheli”, Whitehurst (1951) sınıflandırmasına göre ise “Orta” kalite beton olarak sınıflandırılmıştır. Buna karşılık, en düşük UPV değerlerinin elde edildiği NP100 karışımları her iki değerlendirme sisteminde de “Zayıf” kalite beton kategorisinde yer almıştır. NP0 serisi değerlendirildiğinde, %0.5 ve %1.0 lif hacim oranlarında PP ve plastik atık takviyeli karışımların, lifsiz NP0 numunesine göre daha yüksek UPV değerleri sergilediği belirlenmiştir. Buna karşın, kenevir kütüğü içeren tüm karışımlarda (NP0-H05, NP0-H10 ve NP0-H15) UPV değerleri referans karışımın altında kalmıştır. Kenevir içeriğindeki artışla birlikte ortaya çıkan bu düşüş; liflerin su emme eğilimi, lif çevresinde oluşan boşluklar ve buna bağlı olarak karışım içerisindeki heterojenliğin artmasıyla açıklanabilmektedir. Her ne kadar UPV ile basınç dayanımı arasında genel bir ilişki bulunsa da UPV değerlerinin yalnızca dayanımdan etkilenmediği; boşlukların bağlantıllığı, hidratasyon seviyesi ve çimento matrisinin yoğunluğu

gibi birçok parametrenin de bu ilişki üzerinde belirleyici olduğu unutulmamalıdır. Lif takviyeli karışımlara ait UPV sonuçları Şekil 28’de verilmiştir. NP0 serisinde, NP0-H15 numunesi dışında kalan tüm karışımlar 3500-4500 m/s aralığında yer almış ve “İyi” kalite beton sınıfında değerlendirilmiştir. 3384 m/s UPV değerine sahip NP0-H15 karışımı ise BS 1881:203 (1986) standardına göre “Şüpheli”, Whitehurst (1951) sınıflandırmasına göre ise “Orta” kalite beton olarak sınıflandırılmıştır. Benzer bir durum NP30 serisinde de gözlenmiştir. %1.5 kenevir kütüğü içeren NP30-H15 numunesi, her iki sınıflandırma sisteminde belirtilen 3500 m/s sınır değerinin altında kalmıştır. Bu seride en yüksek UPV değeri, lifsiz NP30 karışımına göre yaklaşık %4.10 oranında artış sağlayan NP30-S15 numunesinde (3850 m/s) elde edilmiştir. Buna karşılık, NP30-R15 ve NP30-H15 karışımları NP30 referansına göre sırasıyla yaklaşık %3.24 ve %6.52 oranlarında daha düşük UPV değerleri göstermiştir. Bu durum, yüksek lif içeriklerinin karışım yapısında oluşturduğu olumsuz etkilerle ilişkilendirilmektedir. NP70 serisinde, NP70-S15, NP70-R15 ve tüm kenevir kütüğü takviyeli karışımların UPV değerleri lifsiz NP70 referans karışımından daha düşük bulunmuştur. Buna karşın, serideki en yüksek UPV değerleri NP70-S10 ve NP70-R10 numunelerinde elde edilmiştir. Genel olarak lif miktarının artmasıyla birlikte UPV değerlerinde gözlenen azalma, beton içerisindeki sürekli katı fazın azalmasına ve boşluk hacminin artmasına işaret etmektedir (Albano vd., 2009). Son olarak, NP100 serisindeki tüm karışımların, kullanılan lif türü ve lif dozajından bağımsız olarak 2500-3000 m/s aralığında UPV değerleri gösterdiği belirlenmiştir. Bu değerler, hem BS 1881:203 (1986) hem de Whitehurst (1951) sınıflandırmalarına göre “Zayıf” kalite beton sınıfına karşılık gelmektedir. Elde edilen sonuçlar, yüksek boşluk oranına sahip düşük yoğunluklu matris yapısının NP100 serisindeki tüm karışımların mikroyapısal davranışını belirleyen temel faktör olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 28. UPV ile beton basınç dayanımı arasındaki ilişki

Denklem (2)-(5), farklı perlit ikame oranları için oluşturulan ultra ses geçiş hızı (UPV) ile basınç dayanımı (f_c) arasındaki ilişkileri sunmaktadır. Bu ifadeler, karışımlardaki perlit içeriğine bağlı olarak geliştirilen ampirik modelleri temsil etmektedir. Denklemlerde, 28 günlük küp numuneler üzerinde ölçülen UPV değerini, ise tek eksenli basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımını ifade etmektedir.

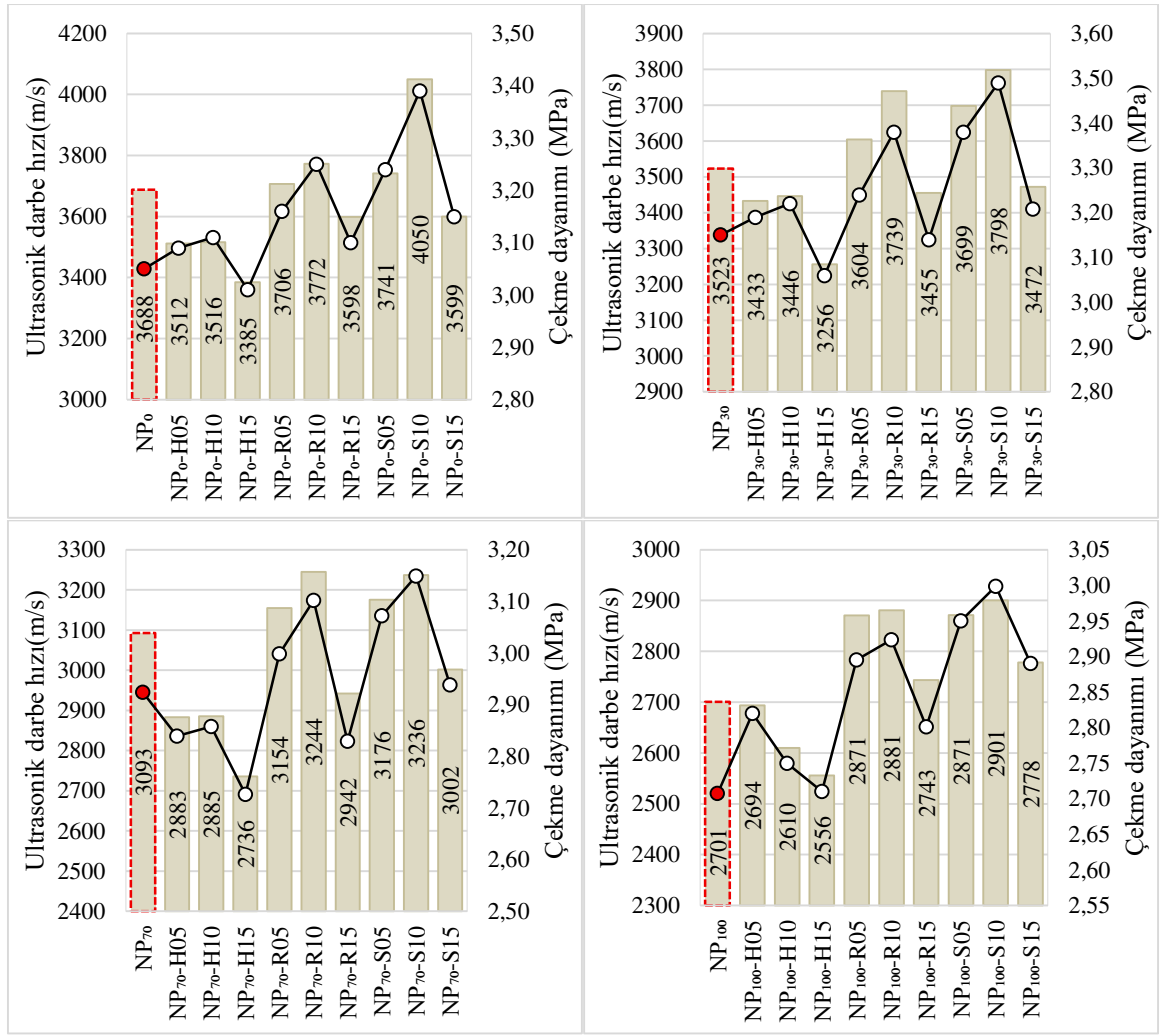
$$NP_0, \quad f_c = 0.0076 \times V + 2.41, R^2 = 0.86 \quad (2)$$

$$NP_{30}, \quad f_c = 0.0052 \times V + 12.68, R^2 = 0.85 \quad (3)$$

$$NP_{70}, \quad f_c = 0.0071 \times V + 5.55, R^2 = 0.88 \quad (4)$$

$$NP_{100}, \quad f_c = 0.0035 \times V + 16.56, R^2 = 0.86 \quad (5)$$

Basınç dayanımına ek olarak, UPV ile çekme dayanımı arasındaki ilişki de perlit ikame oranının bir fonksiyonu olarak modellenmiş ve Şekil 29’da gösterilmiştir. Bu kapsamda, her bir perlit ikame seviyesi için ayrı korelasyonlar oluşturulmuştur.



Şekil 29. UPV ile yarma çekme dayanımı arasındaki ilişki.

$$NP_0, \quad f_{ct} = 0.0006 \times V + 1.13, R^2 = 0.82 \quad (6)$$

$$NP_{30}, \quad f_{ct} = 0.0007 \times V + 0.61, R^2 = 0.89 \quad (7)$$

$$NP_{70}, \quad f_{ct} = 0.0008 \times V + 0.63, R^2 = 0.93 \quad (8)$$

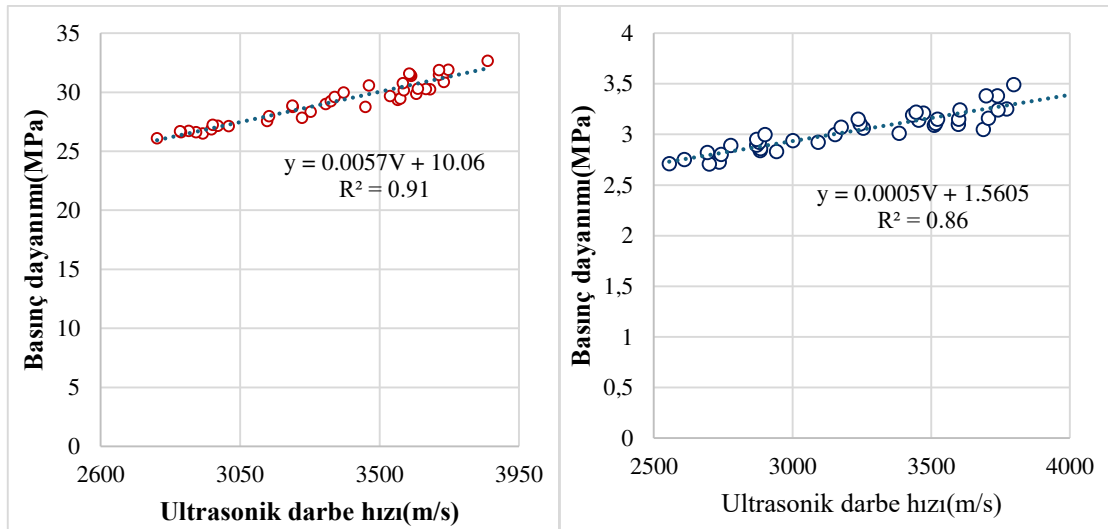
$$NP_{100}, \quad f_{ct} = 0.008 \times V + 0.71, R^2 = 0.84 \quad (9)$$

Şekil 29’da her bir perlit ikame oranı için oluşturulan özel ilişkiler ayrı ayrı sunulmuş olup; basınç dayanımı için Denklem (2)-(5), çekme dayanımı için ise Denklem (6)-(9) verilmiştir. Ayrıca, tüm karışımlara ait veriler birlikte değerlendirilerek geliştirilmiş UPV-dayanım ilişkileri geliştirilmiştir (bkz. Şekil 30). Bu kapsamda geliştirilen geliştirilmiş modeller, farklı perlit içeriklerine sahip betonların genel davranış eğilimlerini temsil etmeyi amaçlamaktadır. Elde edilen ilişkiler aşağıda sunulmuştur.

$$f_c = 0.0057V + 10.06 \quad (10)$$

$$f_{ct} = 0.0005V + 1.5605 \quad (11)$$

Denklem (10) ve (11), Şekil 30’da sunulan deneysel verilere dayanarak türetilmiş olup, ultra ses geçiş hızı (UPV) ile hem basınç hem de çekme dayanımları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu genelleştirilmiş modeller, farklı perlit içeriklerine sahip beton karışımlarının mekanik davranışına ilişkin genel bir değerlendirme sunmaktadır. Şekil 30’da verilen UPV sonuçları ile betonun basınç dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde, iki parametre arasında belirgin bir doğrusal korelasyon olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, UPV-basınç dayanımı ilişkisi için yüksek bir belirleme katsayısı ($R^2 = 0.91$) elde edilmiştir. Benzer şekilde, UPV ile yarma çekme dayanımı arasındaki ilişki de güçlü bir korelasyon sergilemiş olup ($R^2 = 0.86$), iki parametre arasındaki uyumu ortaya koymuştur. Tüm karışımların birlikte değerlendirilmesi sonucunda genelleştirilmiş ampirik ilişkiler oluşturulmuş ve bunlar sırasıyla UPV-basınç dayanımı ve UPV-yarma çekme dayanımı ilişkilerini temsil eden Denklem (10) ve (11)’de ifade edilmiştir. Bu denklemler, farklı perlit içeriklerine sahip karışımlarda gözlenen doğrusal eğilimleri nicel olarak tanımlamakta ve dayanım tahmini için genelleştirilmiş bir yaklaşım sunmaktadır. Elde edilen bulgular literatürde bildirilen sonuçlarla uyumlu olup, UPV yönteminin betonun mekanik özelliklerinin tahmin edilmesinde güvenilir bir gösterge olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Karakoç vd., 2004).



Şekil 30. UPV ile mekanik dayanım özellikleri arasındaki ilişkiler: a) basınç dayanımı, b) yarma çekme dayanımı.

Literatürde gerçekleştirilen birçok araştırma, ultra ses geçiş hızı (UPV) ile beton dayanımı arasındaki ilişkiyi incelemiş ve bu ilişkiyi tanımlamak amacıyla çeşitli ampirik modeller geliştirmiştir (Tablo 12). Raouf ve Ali (1983), 650 adet beton küp numunesinden elde edilen deneysel verileri kullanarak UPV ile küp basınç dayanımı arasında bir korelasyon önermiştir. Benzer şekilde, Nash vd. (2005), farklı kür koşullarında bekletilen ve yaşları 7 ile 138 gün arasında değişen 161 adet beton küp numunesi (150×150×150 mm) üzerinde gerçekleştirdikleri

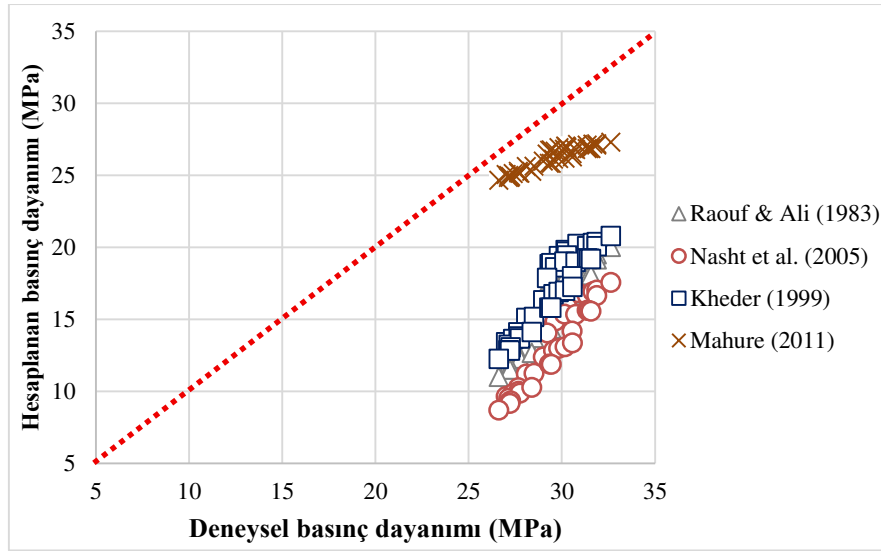
deneyler sonucunda bir tahmin modeli geliştirmiştir. Mahure vd. (2011) ise yoğunlukları 1650-2469 kg/m³ arasında değişen 103 farklı beton karışımından elde edilen verilere dayanarak kendi ampirik ilişkilerini oluşturmuştur. Söz konusu çalışmada, 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımı değerlerinin 12.6-50.2 MPa, UPV değerlerinin ise 3100-5358 m/s aralığında değiştiği rapor edilmiştir. Bunun yanı sıra, Kheder (1999), farklı dayanım sınıflarına sahip beton numunelerinden elde edilen deneysel sonuçları kullanarak üstel formda bir ampirik ilişki önermiştir. Bu çalışmalar incelendiğinde, UPV ile dayanım arasındaki ilişkilerin çoğunlukla belirli malzeme bileşimleri, yoğunluk aralıkları ve kür koşulları esas alınarak geliştirilen ampirik modelleme yaklaşımlarına dayandığı görülmektedir. Bu doğrultuda, mevcut çalışmada önerilen genelleştirilmiş bağıntılar; farklı perlit ikame oranları ve çeşitli lif türleri içeren beton karışımlarından elde edilen kapsamlı deneysel veri seti kullanılarak oluşturulmuştur.

Tablo 12. Literatürde önerilen ve bu çalışmada elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılan ampirik UPV-basınç dayanımı ilişkileri/modelleri.

Yazar	Model
Raouf and Ali (1983)	$f_c = 2.01 \times e^{0.61V}$
Nash't vd., (2005)	$f_c = 1.19 \times e^{0.715V}$
Mahure vd., (2011)	$f_c = (9.502 \times V) - 18.89$
Kheder (1999)	$f_c = 1.20 \times 10^{-5} \times (V \times 10^3)^{1.7447}$

V: Ultrases geçiş hızı (km/s) ve f_c : Basınç dayanımı (MPa).

Daha önce önerilmiş ampirik ilişkilerin uygulanabilirliğini ve genellenebilirliğini değerlendirmek amacıyla, bu çalışmada elde edilen deneysel UPV değerleri Tablo 12’de özetlenen modellere yerleştirilmiştir. Literatür tabanlı bu modeller kullanılarak hesaplanan basınç dayanımı değerleri daha sonra deneysel olarak ölçülen dayanım değerleri ile karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 31’de sunulmuştur.



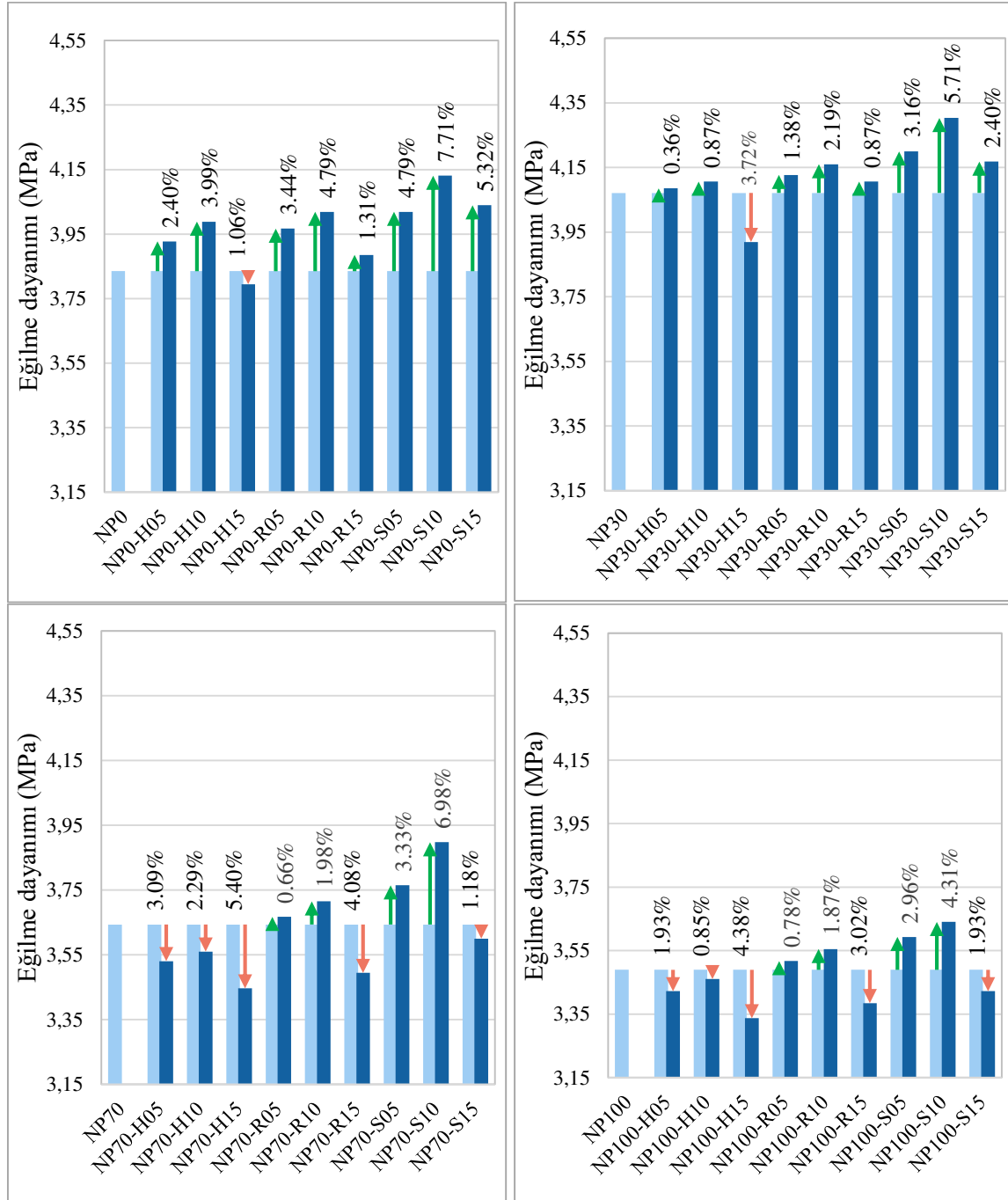
Şekil 31. Tahmin edilen / hesaplanan basınç dayanımı

Şekil 31’te görüldüğü üzere, kırmızı kesikli çizgi ideal doğrusal ilişkiyi ($y = x$) temsil etmekte ve deneysel sonuçlar ile tahmin edilen değerler arasında tam uyumu ifade etmektedir. İncelenen modeller içerisinde, Mahure vd. (2011) tarafından önerilen bağıntı deneysel veri setiyle en yüksek uyumu göstermiştir. Bununla birlikte, özellikle yüksek perlit ikame oranına sahip karışımlarda ideal doğrudan sapmaların sistematik olarak ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bu durum, artan gözeneklilik ve azalan matris yoğunluğunun ultra ses dalga yayılımını etkilediğini ve bu nedenle geleneksel modeller kullanıldığında dayanım tahmin doğruluğunun azaldığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, literatürde yer alan genelleştirilmiş modellerin perlit içeren betonlara doğrudan uygulanmasının sınırlı olduğunu ortaya koymakta ve bu çalışmada geliştirilen karışıma özgü ampirik ilişkilerin gerekliliğini doğrulamaktadır.

4.5. Eğilme Dayanımı

Prizmatik kiriş numuneleri üzerinde eğilme deneyleri dört noktalı yükleme düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Basınç ve çekme deneylerine benzer şekilde, Şekil 32’de verilen eğilme dayanımı değerleri her bir karışım için aynı tasarımla hazırlanan üç özdeş numunenin ortalama sonuçlarını temsil etmektedir. Lifsiz karışımlarda, geleneksel ince agreganın (0-5 mm) %30’unun doğal perlit agregası ile değiştirilmesi NP0 karışımına kıyasla eğilme dayanımında %5.79 oranında bir artış sağlamıştır. Buna karşın, perlit ikame oranının %70 ve %100 seviyelerine yükseltilmesi eğilme dayanımında sırasıyla %5.27 ve %9.90 oranlarında azalmaya yol açmıştır. Lif takviyeli karışımlar açısından değerlendirildiğinde, eğilme dayanımı için optimum lif oranının %1.0 olduğu belirlenmiştir. En yüksek eğilme dayanımı, perlit ikame oranından bağımsız olarak sürekli şekilde PP lif içeren karışımlarda elde

edilmiştir. Buna karşılık, kenevir kütüğü takviyesi özellikle %70 ve üzeri perlit oranlarında eğilme dayanımında daha belirgin düşüöşlere neden olmuştur. Bu eğilimler, basınç dayanımı sonuçlarıyla uyumlu olup, orta seviyede PP lif kullanımının olumlu etkisinin ve yüksek perlit içeriğinin olumsuz etkisinin yalnızca eksenel yükleme davranışını değil, aynı zamanda eğilme performansını da doğrudan etkilediğini göstermektedir.



Şekil 32. Eğilme dayanımları

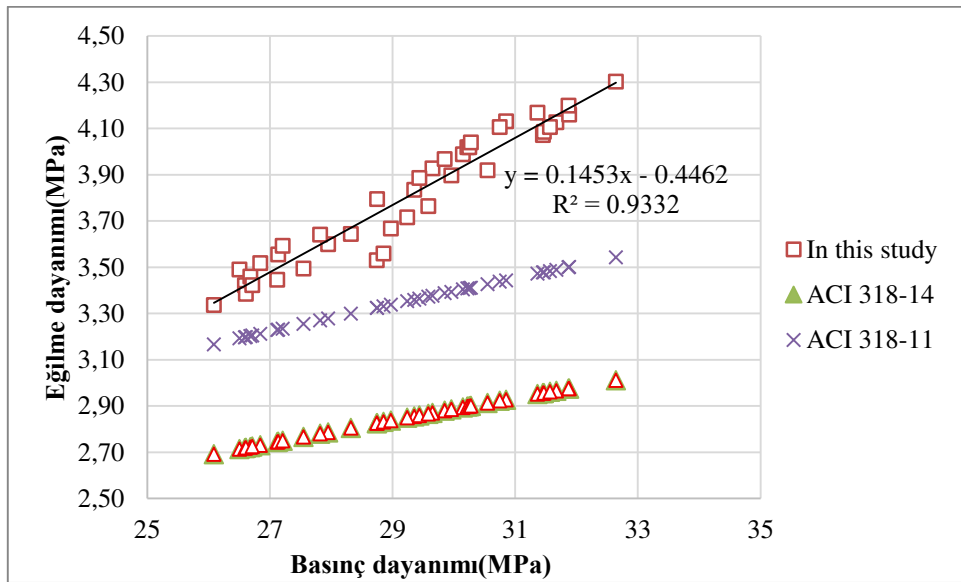
Şekil 33, eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi tanımlayan Denklem (6) ve (7)'yi göstermektedir. Eğilme ve basınç dayanımı verileri kullanılarak gerçekleştirilen

regresyon analizi sonucunda, yüksek korelasyona sahip ($R = 0.93$) ampirik bir tahmin modeli elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 33'te, bu çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlar ile basınç dayanımına bağlı olarak eğilme dayanımını tahmin etmek amacıyla kullanılan yönetmelik temelli modeller karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, normal ağırlıklı beton için ACI 318-11 ve hafif beton için ACI 318-14 tarafından önerilen ifadeler dikkate alınmıştır. Karşılaştırmada hem normal ağırlıklı hem de hafif beton için verilen ACI modelleri birlikte değerlendirilmiştir.

$$F_s = 0.62 \times \sqrt{f_c} \quad (\text{ACI 318-11- Normal ağırlık beton}) \quad (6)$$

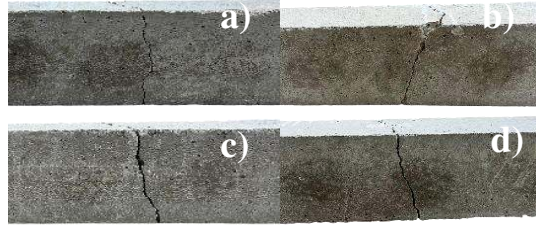
$$F_s = 0.62 \times \lambda \times \sqrt{f_c} \quad (\text{ACI 318-14- Hafif beton}) \quad (7)$$

Genel olarak, deneysel olarak elde edilen eğilme dayanımı değerlerinin yönetmelik tabanlı tahminlerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, lif takviyesinin eğilme performansı üzerindeki olumlu etkisini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 33. Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki korelasyon.

Şekil 34, eğilme deneyleri sonrasında prizmatik numunelerin orta açıklık bölgesinde gözlenen kesme tipi kırılma davranışını göstermektedir. Uygulanan yük arttıkça, numunelerdeki deformasyon da artmış ve buna bağlı olarak çatlak açıklıkları genişlemiştir. Çatlak desenlerinin incelenmesi, NP70 ve NP100 numunelerinde daha geniş çatlak açıklıkları ve daha belirgin çatlak oluşumları geliştiğini ortaya koymuştur. Şekil 34'te görüldüğü üzere, lifsiz seriler çoğunlukla tek bir çatlak hattı boyunca kırılmış ve neredeyse düzgün bir kırılma yüzeyi oluşturmuştur.



Şekil 34. Lif içermeyen numuneler: a) NP0, b) NP30, c) NP70 ve d) NP100

Şekil 35 incelendiğinde, özellikle PP lif takviyeli numunelerde belirgin şekilde baskın tek bir çatlak gözlenmemiştir. Bunun yerine, düzensiz yollar boyunca ilerleyen çoklu yayılmış çatlaklar oluşmuştur. PP lif kullanımına bağlı olarak ortaya çıkan bu makroskobik iyileşmeler; lif köprüleme, lif sıyrılması/ayrılması ve kesme çatlakları tarafından kontrol edilen daha yüksek enerji tüketimli kırılma süreci ile açıklanabilmektedir (Leong vd.,2020; Chin vd.,2012). Bu mekanizma kırılma enerjisini artırmakta ve çatlak lokalizasyonunu geciktirerek daha yaygın dağılımlı bir çatlak deseni oluşmasına neden olmaktadır.

Numunelerin Hasar dağılımları					
NP ₀ -R05		NP ₀ -S05		NP ₀ -H05	
NP ₀ -R10		NP ₀ -S10		NP ₀ -H10	
NP ₀ -R15		NP ₀ -S15		NP ₀ -H15	
NP ₃₀ -R05		NP ₃₀ -S05		NP ₃₀ -H05	
NP ₃₀ -R10		NP ₃₀ -S10		NP ₃₀ -H10	
NP ₃₀ -R15		NP ₃₀ -S15		NP ₃₀ -H15	
NP ₇₀ -R05		NP ₇₀ -S05		NP ₇₀ -H05	
NP ₇₀ -R10		NP ₇₀ -S10		NP ₇₀ -H10	
NP ₇₀ -R15		NP ₇₀ -S15		NP ₇₀ -H15	
NP ₁₀₀ -R05		NP ₁₀₀ -S05		NP ₁₀₀ -H05	
NP ₁₀₀ -R10		NP ₁₀₀ -S10		NP ₁₀₀ -H10	
NP ₁₀₀ -R15		NP ₁₀₀ -S15		NP ₁₀₀ -H15	

Şekil 35. Dört noktalı eğilme altında prizmatik numunelerin orta açıklık hasar desenleri ve kayma kırılma özellikleri.

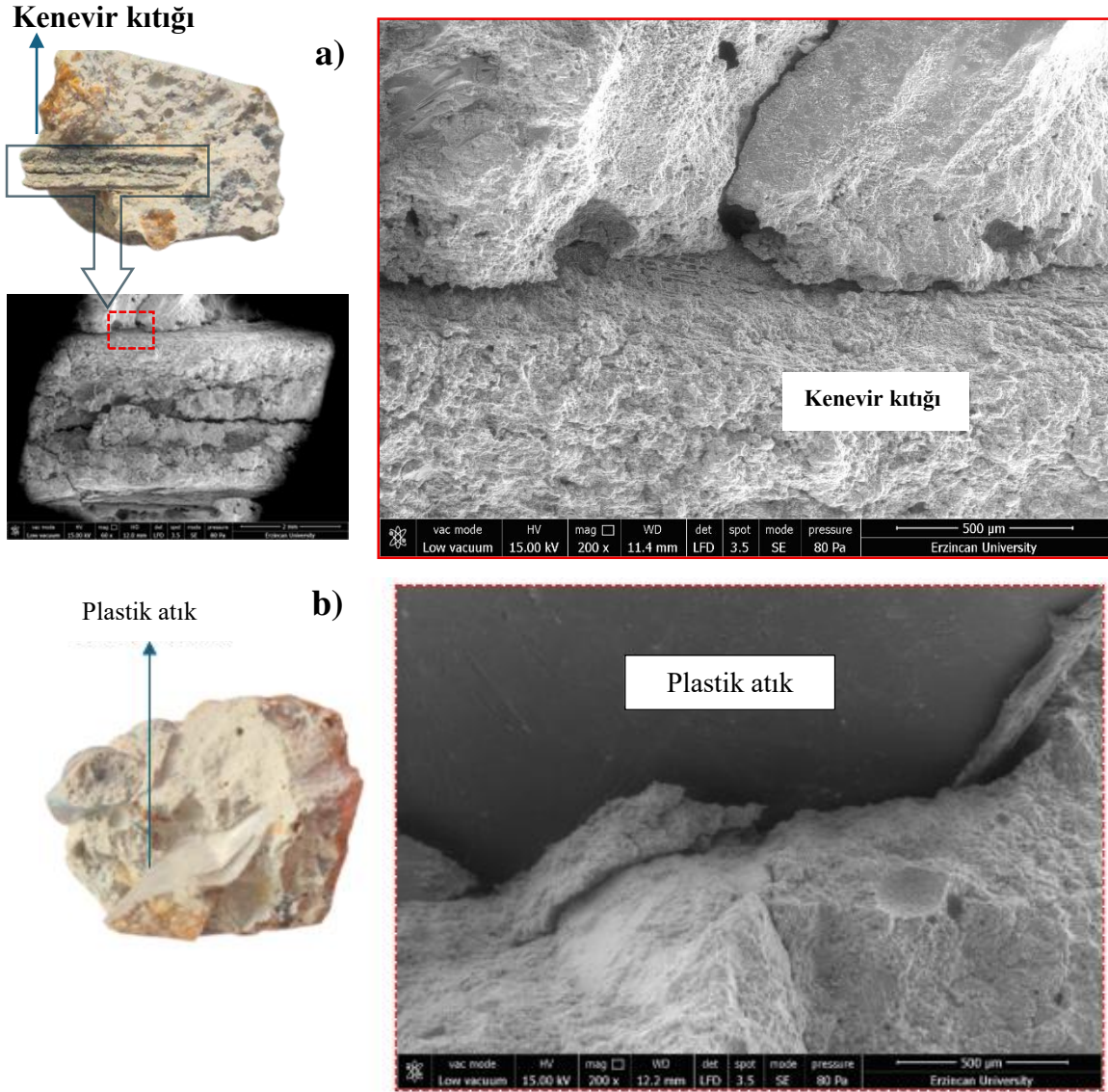
Genel olarak, eğilme deneyi sonuçları, gelişmiş eğilme performansı elde edebilmek için perlit ikamesi ile lif takviyesi arasında optimum bir dengenin sağlanmasının gerekli olduğunu göstermektedir. %30 perlit ikame oranı ile kullanılan %1.0 PP lif içeriği; artan dayanım, iyileşmiş çatlak dağılımı ve daha sünek kırılma davranışı ile en uygun eğilme performansını sağlamıştır.

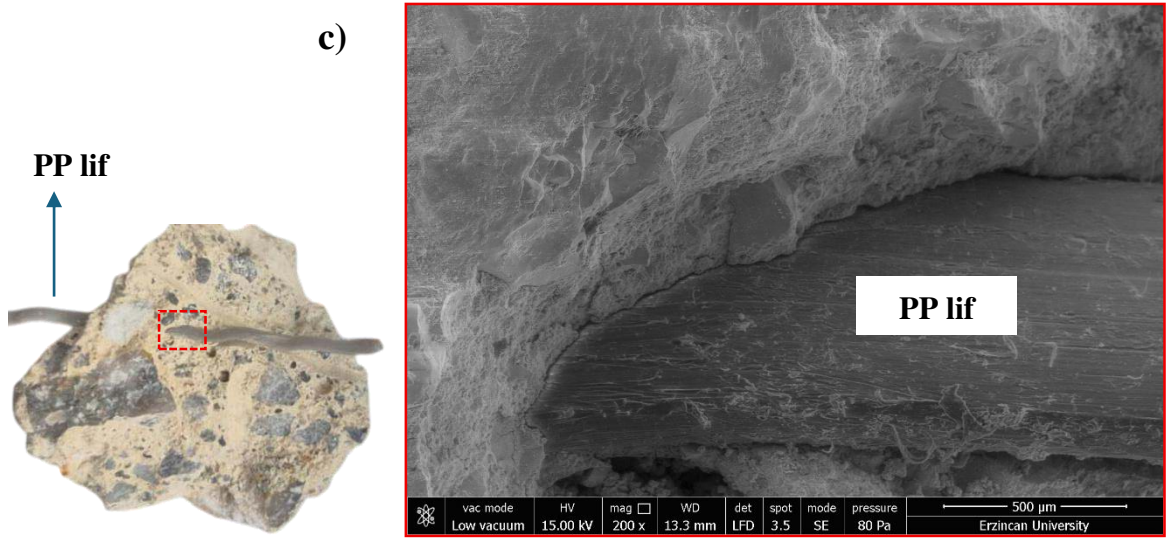
4.6. SEM Analizi

Şekil 36'a (NP30-H15), %30 ince perlit agregası ve %1.5 kenevir kütüğü içeren karışıma ait SEM görüntüsünü göstermektedir. Kenevir kütükleri yüksek gözenekliliğe sahip olup hidrofilik bir davranış sergilemektedir. Bu özellik, karışım hazırlığı sırasında önemli miktarda suyun emilmesine ve liflerde şişmeye yol açmaktadır. Kür süreci boyunca nemin geri salınması ile lif ve çevresindeki çimentolu matris arasındaki diferansiyel rötre, yerel çatlak bantlarının ve ara yüzey boşluklarının oluşumunu teşvik etmektedir. Kenevir-matris ara yüzeyi boyunca yaklaşık 7-37 µm genişliğinde bir çatlak bandı gözlenmiş, ara yüzey boşluklarının ise 60-90 µm aralığında değiştiği belirlenmiştir. Bu yerel süreksizlikler, klasik anlamda sürekli bir ITZ oluşumundan ziyade hacimsel uyumsuzluk ve rötre kaynaklı mikro çatlaklanmaya işaret etmektedir. Bu tür ara yüzey hasar bölgeleri, gerilme transfer etkinliğini azaltarak kenevir içeren karışımlarda gözlenen basınç dayanımı ve elastisite modülü düşüşlerini, ayrıca görece yüksek su emme ve düşük ultra ses geçiş hızı değerlerini kısmen açıklamaktadır. Şekil 36b (NP30-R15), %1.5 plastik atık takviyesi içeren karışıma ait SEM görüntüsünü sunmaktadır.

Plastik atık fazı nispeten düzgün bir morfolojiye sahiptir. Hidrofobik yapısı ve pürüzsüz yüzeyi nedeniyle plastik atıklar, çimentolu matris ile sınırlı kimyasal aderans ve zayıf mekanik kenetlenme göstermektedir. Buna ek olarak, hidrasyon süreci sırasında oluşan matris rötrelerine uyum sağlayamaması, deformasyon uyumsuzluklarına ve yerel ara yüzey boşlukları ile mikro çatlakların gelişimine neden olmaktadır. Bu özellikler, sürekli bir geçiş bölgesi yerine süreksiz bir ara yüzey yapısına işaret etmektedir. Söz konusu ara yüzey zayıflıkları, etkin gerilme dağılımını sınırlandırarak plastik atık takviyeli karışımlarda gözlenen sınırlı çekme dayanımı ve süneklik artışlarını açıklamaktadır. Şekil 36c (NP30-S15), PP lif takviyeli betonun SEM görüntüsünü göstermektedir. PP lifler hidrofobik özellik göstermesine rağmen, lif-matris ara yüzeyinde kenevir ve plastik atık takviyeli karışımlara kıyasla daha az boşluk oluşumu ve daha homojen çatlak dağılımı gözlenmiştir. Bu daha iyi ara yüzey performansı; çatlak köprüleme, lif sıyrılmasına karşı direnç ve mekanik ankraj mekanizmaları ile ilişkilidir. Bu ara yüzey özellikleri, matris içerisinde daha etkin gerilme transferi ve çatlak kontrolü sağlayarak

tepe sonrası davranışı ve tokluğu iyileştirmektedir. SEM gözlemlerinin mikroyapısal açıdan nitel bir değerlendirme sağladığı ve yerel çatlak ile boşluk boyutlarının belirlenmesine olanak verdiği; ancak klasik bir ara yüzey geçiş bölgesinin (ITZ) sürekliliği veya kalınlığının kesin olarak belirlenmesine imkân tanımadığı vurgulanmalıdır. Bu nedenle bu çalışmada “ara yüzey bölgesi” ifadesi, takviye ile matris arasındaki lokal etkileşim alanını tanımlamak için kullanılmıştır. Genel olarak SEM analizleri, karışımlar arasındaki mekanik performans farklılıklarının sürekli bir ITZ tabakasının varlığından ziyade; ara yüzey bütünlüğü, hacimsel uyumluluk, neme bağlı deformasyon davranışı ve çatlak köprüleme etkinliği ile kontrol edildiğini göstermektedir. Bu mikroyapısal bulgular, dayanım, rijitlik, tokluk ve dayanıklılıkla ilgili deneysel sonuçlarla uyumlu bir davranış sergilemektedir.

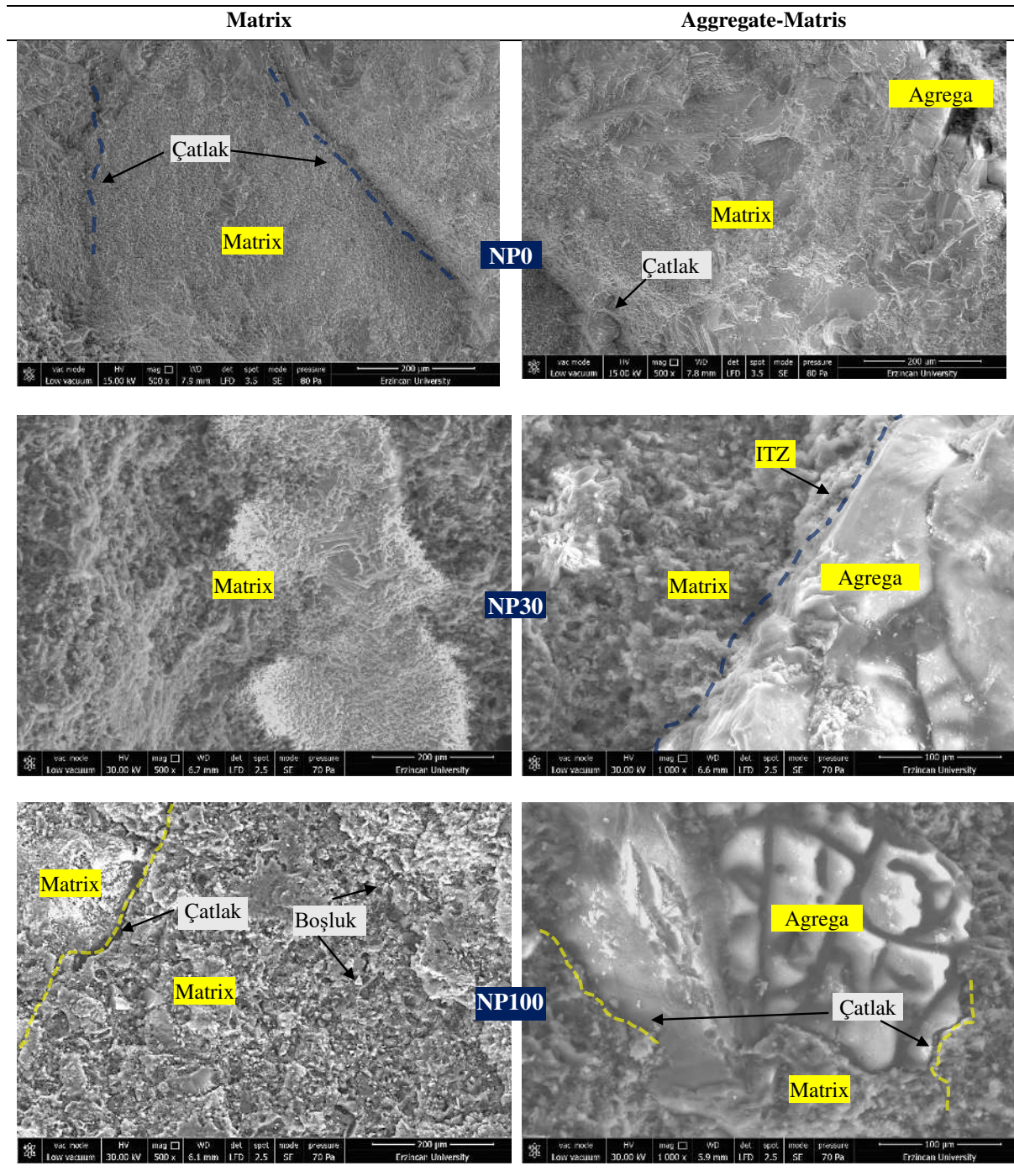




Şekil 36. SEM görüntüleri: a) NP30-H15 (kenevir kütüğü), b) NP30-R15 (plastik atık) ve c) NP30-S15 (PP lif)

Hafif agrega betonlarında, agrega ile hidratasyon sürecindeki çimento hamuru arasında daha bütünleşik bir ara yüzey geçiş bölgesinin (ITZ) oluştuğu literatürde yaygın olarak bildirilmektedir (Bentz vd., 2009; Holm vd., 1984; Lo TY vd., 2004). Geleneksel yoğun ince agregaların aksine, gözenekli hafif agregalar agrega yüzeyi yakınında hidratasyon ürünlerinin daha homojen dağılmasına imkân vererek klasik duvar etkisini azaltabilmektedir (Bentz vd., 2009). Genleştirilmiş perlit, gözenekli yüzey yapısı ve yüksek su emme kapasitesi sayesinde iç kür rezervuarı gibi davranabilmektedir. Hidratasyon sürecinde emilen suyun zamanla geri salınması, yerel hidratasyon reaksiyonlarını artırmakta ve özellikle orta düzey ikame oranlarında ikincil C-S-H oluşumunu desteklemektedir (Erdem vd., 2007; Whwah vd., 2024). Bu çalışmada elde edilen SEM gözlemleri, Tablo 13’te sunulduğu üzere bu mekanizmayı doğrulamaktadır. NP0 numunelerinde, agrega-matris ara yüzeyinde klasik ITZ davranışıyla uyumlu süreksizlikler ve yerel boşluklar gözlenmiştir. Buna karşılık NP30 numuneleri daha yoğun ve daha bütünleşik bir ara yüzey yapısı sergilemiş; perlit taneleri çevresinde daha az mikro çatlak ve daha iyi matris aderansı tespit edilmiştir. Bu mikroyapısal yoğunlaşma, literatürde rapor edilen perlitin iç kür etkisi ve olası puzolanik katkısıyla uyumludur (Ayudhya vd., 2011; Erdem vd., 2007; Whwah vd., 2024; Whwah vd., 2025). Bununla birlikte, tam ikame durumunda (NP100), agrega fazındaki yüksek gözeneklilik ve artan su tutma kapasitesi matris sürekliliğini bozmuş ve agrega taneleri çevresinde yerel çatlak oluşumuna neden olmuştur. Bu bulgular, %30 ikame oranının faydalı iç kür etkisi ile aşırı gözeneklilik arasında kritik bir denge oluşturduğunu ve deneysel olarak elde edilen optimum mekanik performansı açıkladığını göstermektedir.

Tablo 13. Farklı perlit ikame oranlarında perlit-matris ara yüzey özelliklerinin SEM mikroyapısal karşılaştırması.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu deneysel çalışmada, ince agreganın ham perlit ile ikame edilmesinin ve üç farklı lif türünün (kenevir lifi, geri dönüştürülmüş plastik atık lifi ve burulmuş polipropilen lif) birlikte kullanımının betonun mekanik özellikleri, gerilme-şekil değiştirme davranışı, tokluk performansı ve hasar mekanizmaları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Mekanik deney sonuçları, hasar deseni incelemeleri ve mikroyapısal analizler birlikte değerlendirilerek perlit esaslı lif takviyeli betonların performansı kapsamlı bir şekilde ortaya konmuştur. Çalışma kapsamında elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Deney sonuçları, ince agreganın %30 oranında ham perlit ile ikame edildiği NP30 karışımının, referans beton karışımına (NP0) göre daha yüksek basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri sergilediğini göstermiştir. Bununla birlikte, perlit ikame oranının artırılmasıyla birlikte beton bünyesindeki gözenekliliğin artması ve ara yüzey geçiş bölgesindeki (ITZ) zayıflamalar nedeniyle mekanik özelliklerde belirgin azalmalar meydana gelmiştir.
- Lif katkısı açısından değerlendirildiğinde, en uygun lif hacim oranının %1.0 olduğu belirlenmiştir. Lif oranının %1.5'e çıkarılması durumunda ise işlenebilirlikte meydana gelen azalma ve buna bağlı olarak artan boşluk oranı mekanik performansı olumsuz yönde etkilemiştir. Kenevir lifleri yüzeylerinin pürüzlü olması nedeniyle mekanik kenetlenmeye katkı sağlasa da hidrofilik yapıları nedeniyle yüksek su emme eğilimi göstermiş ve alkali çimento ortamında kısmen bozularak lif-matris bağının zayıflamasına neden olmuştur. Buna karşılık, burulmuş geometrili polipropilen lifler etkin çatlak köprüleme davranışı sergileyerek çekme direncini artırmış, böylece süneklik, tokluk ve hasar kontrolü bakımından en başarılı performansı göstermiştir. Geri dönüştürülmüş plastik atık lifler ise daha düzgün yüzey morfolojileri nedeniyle nispeten düşük aderans göstermiş, ancak özellikle düşük yük seviyelerinde çatlak oluşumu ve ilerlemesini belirli ölçüde sınırlandırmıştır.
- Hasar deseni incelemeleri, kenevir ve geri dönüştürülmüş plastik atık lif içeren numunelerde daha az sayıda ancak daha geniş açıklıklı çatlakların oluştuğunu, bu çatlaklara ezilme ve yüzey dökülmelerinin eşlik ettiğini ortaya koymuştur. Polipropilen lif takviyeli numunelerde ise daha fazla sayıda ince ve düzenli çatlak gelişmiş, bu durum daha sünek ve kontrollü bir kırılma davranışının oluştuğunu göstermiştir.
- Deneysel elastisite modülü değerleri ile çeşitli ampirik tahmin modellerinin karşılaştırılması sonucunda, IDC 3274, BS 5400-4 ve ACI 363R-92 modellerinin düşük ve orta seviyedeki perlit ikame oranlarında kabul edilebilir doğrulukta tahminler sunduğu belirlenmiştir. Ancak %70 ve %100 perlit içeren karışımlarda söz konusu modellerin elastisite modülünü önemli ölçüde

yüksek tahmin ettiği görülmüştür. Bu sonuç, mevcut ampirik bağıntıların yüksek gözenekliliğe sahip perlit esaslı hafif betonların davranışını tam olarak yansıtamadığını ve bu tür betonlar için yeni modellerin veya düzeltme katsayılarının geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

- SEM incelemeleri, tüm lif türlerinde lif-matris ara yüzey bölgesinde çatlak oluşumlarının meydana geldiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, kenevir liflerinin hidrofilik karakteri nedeniyle çimento matrisi çevresinde daha belirgin boşluk yapılarının oluştuğu ve bu durumun diğer lif türlerinden farklı bir ara yüzey davranışı ortaya çıkardığı gözlemlenmiştir.
- Elde edilen mekanik performans sonuçları ve hasar mekanizmaları birlikte değerlendirildiğinde, %30 ham perlit ve %1.0 polipropilen lif içeren NP30-S10 karışımının hem sürdürülebilirlik açısından avantaj sağlaması hem de mekanik özellikler bakımından geleneksel betonlarla rekabet edebilir performans göstermesi nedeniyle en uygun karışım olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKÇA

- Acar, C. T., & Ramyar, K. (2024). Effect of Raw Perlite aggregate on concrete mechanical and transport properties. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 30(3), 386-394.
- ACI 363R-92,1984. Materials and General Properties of Concrete, ACI Manual of Concrete Practice Part 1, Michigan.
- ACI Committee 544. (1988). Measurements of properties of fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 85(6), 583-593.
- Addis, L. B., Sendekie, Z. B., & Satheesh, N. (2022). Degradation Kinetics and Durability Enhancement Strategies of Cellulosic Fiber-Reinforced Geopolymers and Cement Composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 1981755. <https://doi.org/10.1155/2022/1981755>
- Adhikary, S. K., Ashish, D. K., Sharma, H., Patel, J., Rudžionis, Ž., Al-Ajamee, M., ... & Khatib, J. M. (2022). Lightweight self-compacting concrete: A review. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 15, 200107. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200107>
- Aghabeyk, F., Azadmehr, A., & Hezarkhani, A. (2022). Fabrication of feldspar-based geopolymers from perlite toward decontamination of heavy metals from aqueous solution: hydrolysis process, characterizations, kinetic and isotherm studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(4), 108087. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108087>
- Ahmad, S. H., Arockiasamy, M., Balaguru, P. N., Ball, C. G., Ball Jr, H. P., Batson, G. B., ... & Daniel, J. I. (1988). Measurement of properties of fiber reinforced concrete. *American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA*.
- Akkaş A, Alpaslan L, Arabacı S, et al. Compressive strength properties of polypropylene fiber added semi lightweight concrete. *SDU Int J Technol Sci*. 2010;2(1):9-14. (In Turkish)
- Aksoy, Ö., Alyamaç, E., Mocan, M., Sütçü, M., Özveren-Uçar, N., & Özgür Seydibeyoğlu, M. (2022). Characterization of perlite powders from Izmir, Türkiye region. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 58(6).
- Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A., & Gutierrez, A. J. W. M. (2009). Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste management*, 29(10), 2707-2716. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.007>
- Ali, B., Qureshi, L. A., & Kurda, R. (2020). Environmental and economic benefits of steel, glass, and polypropylene fiber reinforced cement composite application in jointed plain concrete pavement. *Composites Communications*, 22, 100437. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100437>
- Almusaed, A., Yitmen, I., Myhren, J. A., & Almssad, A. (2024). Assessing the impact of recycled building materials on environmental sustainability and energy efficiency: a comprehensive framework for reducing greenhouse gas emissions. *Buildings*, 14(6), 1566. <https://doi.org/10.3390/buildings14061566>
- Altalabani, D., Bzeni, D. K., & Linsel, S. (2020). Mechanical properties and load deflection relationship of polypropylene fiber reinforced self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 252, 119084. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119084>
- Al-Tulaian, B. S., Al-Shannag, M. J., & Al-Hozaimy, A. R. (2016). Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*, 127, 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.131>
- Alzein, R., Kumar, M. V., Raut, A. N., Alyaseen, A., Sihag, P., Lee, D., & Singh, T. (2024). Polypropylene waste plastic fiber morphology as an influencing factor on the

- performance and durability of concrete: experimental investigation, soft-computing modeling, and economic analysis. *Construction and Building materials*, 438, 137244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137244>
- Amaducci, S., Scordia, D., Liu, F. H., Zhang, Q., Guo, H., Testa, G., & Cosentino, S. L. (2015). Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. *Industrial Crops and Products*, 68, 2-16. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.041>
- American Concrete Institute, ACI 116R: Cement and concrete terminology, Farmington Hills, MI, USA, 2000
- Anderson, J., & Moncaster, A. (2020). Embodied carbon of concrete in buildings, Part 1: analysis of published EPD. *Buildings & Cities*, 1(1). <https://doi.org/10.5334/bc.59>
- Aslani, F., & Nejadi, S. (2012). Mechanical properties of conventional and self-compacting concrete: An analytical study. *Construction and Building Materials*, 36, 330-347. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.034>
- ASTM (American Society for Testing and Materials): Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. C496/C496M – 17, West Conshohocken, PA (2017)
- ASTM C127. (2016). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, *American Society for Testing and Material*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C128. (2016). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, *American Society for Testing and Material*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1723-16. (2016). Standard guide for examination of hardened concrete using scanning electron microscopy. Annual book of ASTM standards.
- ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, American Society for Testing and Material, West Conshohocken, PA, USA, 2014
- ASTM C469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, American Society for Testing and Material, West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM C597-16, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, American Society for Testing and Material, West Conshohocken, PA, 2016.
- ASTM C618 (2023) Standard specification for coal ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. *American Society for Testing and Material*, West Conshohocken, PA.
- ASTM, A. (2017). C150/C150M-17, standard specification for Portland cement. *American Society for Testing and Material*, West Conshohocken, PA.
- ASTM, A. (2018). C78/C78M-18 standard test method for flexural strength of concrete using simple beam with third-point loading. West Conshohocken: ASTM International.
- Atlı, S., Yalciner, H., Kumbasaroglu, A., Ayaz, Y., Turan, A. İ., Bulut, H. A., & Naimi, S. (2025). Experimental evaluation of reinforced concrete columns produced with natural perlite aggregates under cyclic loading. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.70223>
- Ayudhya, N., & Israngkura, B. (2011). Compressive and splitting tensile strength of autoclaved aerated concrete (AAC) containing perlite aggregate and polypropylene fiber subjected to high temperatures. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 33(5).
- Bakhshi, M., Dalalbashi, A., & Soheili, H. (2023). Energy dissipation capacity of an optimized structural lightweight perlite concrete. *Construction and Building Materials*, 389, 131765. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131765>
- Batayneh, M., Marie, I., & Asi, I. (2007). Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*, 27(12), 1870-1876.

- Bentz, D. P. (2009). Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars. *Cement and concrete composites*, 31(5), 285-289. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.03.001>
- Bisht, K., & Ramana, P. V. (2017). Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete. *Construction and building materials*, 155, 811-817. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.131>
- Brown, T. J., Idoine, N. E., Wrighton, C. E., Raycraft, E. R., Hobbs, S. F., Shaw, R. A., & Kresse, C. (2021). World mineral production 2015-2019.
- Browning, S., Beymer-Farris, B., & Seay, J. R. (2021). Addressing the challenges associated with plastic waste disposal and management in developing countries. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 32, 100682. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100682>
- BS 1881: Part 203 (1986). Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete. London: British Standard Institution (BSI) Standards Publication.
- BS 5400-4, 1990. Steel, concrete and composite bridges, Part 4: Code of practice for design of concrete bridges, British Standard, UK.
- Bulut, H. A. (2024). Effect of natural perlite on mechanical properties of light-weight aggregate composites by alkali-silica reaction. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(3), 1009-1019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1451305>
- Bulut, H. A. (2024). Examination of mechanical, permeability, and durability properties of sustainable lightweight concrete composites with natural perlite aggregate. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48(3), 1329-1352. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01226-3>
- Celep G. Thermal properties of concrete with polypropylene fibers [master's thesis]. Eskişehir Osmangazi University Institute of Science and Technology, Eskişehir, 2010. (In Turkish).
- Chin, C. S., & Xiao, R. Y. (2012). Experimental and nonlinear finite element analysis of fiber-cementitious matrix bond-slip mechanism. In *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6: HPFRCC 6* (pp. 145-152). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Choi, Y. W., Moon, D. J., Chung, J. S., & Cho, S. K. (2005). Effect of PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35, 776-781.
- Ciminli, A. T., & Bulut, H. A. (2025). A new approach for lightweight polymer concrete production: Determination of the influence of resin and perlite types on the mechanical performance of polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 490, 142608. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142608>
- Comité Euro-International du Béton. (1993). *CEB-FIP model code 1990: Design code*. Thomas Telford Publishing.
- CSA. 1994. Design of concrete structures for buildings. Standard CAN3-A23.3-M94, Canadian Standards Association, Rexdale.
- da Silva, T. R., de Azevedo, A. R. G., Cecchin, D., Marvila, M. T., Amran, M., Fediuk, R., & Szelag, M. (2021). Application of plastic wastes in construction materials: A review using the concept of life-cycle assessment in the context of recent research for future perspectives. *Materials*, 14(13), 3549. <https://doi.org/10.3390/ma14133549>
- de Bruijn, P. B., Jeppsson, K. H., Sandin, K., & Nilsson, C. (2009). Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres. *Biosystems engineering*, 103(4), 474-479. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005>
- de Oliveira, L. A. P., & Castro-Gomes, J. P. (2011). Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1712-1717. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.044>
- de Souza, A. M., de Carvalho, J. M. F., Santos, C. F. R., Ferreira, F. A., Pedroti, L. G., & Peixoto, R. A. F. (2022). On the strategies to improve the eco-efficiency of self-

- compacting concrete using industrial waste: An analytical review. *Construction and Building Materials*, 347, 128634. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128634>
- Deng, F., Ding, X., Chi, Y., Xu, L., & Wang, L. (2018). The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: Experimental study and analytical modelling. *Composite Structures*, 206, 693-712. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.066>
- Donatone, G., Foti, D., & Paparella, F. (2010). Soluzioni innovative nel campo dei calcestruzzi fibrorinforzati: Analisi preliminare su un calcestruzzo rinforzato con fibre di PET. *Concreto*, 95(lug/ago), 36-44. [In Italian]
- Dormer, A., Finn, D. P., Ward, P., & Cullen, J. (2013). Carbon footprint analysis in plastics manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 51, 133-141.
- E. Whitehurst, Soniscope tests concrete structures, *J Am Concr Inst* 47 (1951) 433-444.
- Ehrenbring, H. Z., Pacheco, F., Christ, R., & Tutikian, B. F. (2022). Bending behavior of engineered cementitious composites (ECC) with different recycled and virgin polymer fibers. *Construction and Building Materials*, 346, 128355. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128355>
- Erdem, T. K., Meral, Ç., Tokyay, M., ve Erdoğan, T. Y. (2007). Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 29(1), 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.018>
- Esfandiari, J., & Loghmani, P. (2019). Effect of perlite powder and silica fume on the compressive strength and microstructural characterization of self-compacting concrete with lime-cement binder. *Measurement*, 147, 106846. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.07.074>
- Frahat, N. B., Malek, A. S., Ali, A., & Ibrahim, O. M. O. (2024). New strategy for closing the plastic loop: Lightweight concrete by the waste of recycled synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 423, 135896. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135896>
- Fraternali, F., Ciancia, V., Chechile, R., Rizzano, G., Feo, L., & Incarnato, L. (2011). Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete. *Composite structures*, 93(9), 2368-2374. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.03.025>
- Fraternali, F., Spadea, S., & Berardi, V. P. (2014). Effects of recycled PET fibres on the mechanical properties and seawater curing of Portland cement-based concretes. *Construction and Building Materials*, 61, 293-302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.019>
- Gálvez-Martos, J. L., Styles, D., Schoenberger, H., & Zeschmar-Lahl, B. (2018). Construction and demolition waste best management practice in Europe. *Resources, conservation and recycling*, 136, 166-178. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.016>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.059>
- Gu, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*, 51, 19-42. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005>
- Gül, R., Okuyucu, E., Türkmen, İ., & Aydin, A. C. (2007). Thermo-mechanical properties of fiber reinforced raw perlite concrete. *Materials Letters*, 61(29), 5145-5149. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.04.050>
- Haque, M. N., Al-Khaiat, H., & Kayali, O. (2004). Strength and durability of lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 307-314. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00141-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00141-5)

- Holm, T. A., Bremner, T. W., & Newman, J. B. (1984). Concrete bridge decks: Lightweight aggregate concrete subject to severe weathering. *Concrete international*, 6(6), 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.080>
- Huang, G., Pudasainee, D., Gupta, R., & Liu, W. V. (2021). Thermal properties of calcium sulfoaluminate cement-based mortars incorporated with expanded perlite cured at cold temperatures. *Construction and building materials*, 274, 122082. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122082>
- Huang, Y., Zhang, W., & Liu, X. (2022). Assessment of diagonal macrocrack-induced debonding mechanisms in FRP-strengthened RC beams. *Journal of Composites for Construction*, 26(5), 04022056. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001255](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001255)
- I. Markovic, High-Performance Hybrid-Fibre Concrete, DUP Science DUP, Delft, 2006.
- IDC 2003 Italian Design Code, IDC3274, Come Modificato Dall'OPCM 3431. Italy: Public and Health Ministry
- Jaskula, B. W. (2017). US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2017, ed. by Survey USG. *US Geological Survey, US department of the Interior, US Geological Survey, Reston, Virginia*, 100-101.
- Jebli, M., Jamin, F., Malachanne, E., Garcia-Diaz, E., & El Youssoufi, M. S. (2018). Experimental characterization of mechanical properties of the cement-aggregate interface in concrete. *Construction and Building Materials*, 161, 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.100>
- Joshaghani, A., Moeini, M. A., Balapour, M., & Moazenian, A. (2018). Effects of supplementary cementitious materials on mechanical and durability properties of high-performance non-shrinking grout (HPNSG). *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 7(1), 38-56. <https://doi.org/10.1080/21650373.2017.1372318>
- Kadey Jr. FL. (1983). Perlite. In: Lefond SJ (ed.) *Industrial minerals and rocks*, 5th ed. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 571-7.
- Kalpana, M., & Tayu, A. (2020). Experimental investigation on lightweight concrete added with industrial waste (steel waste). *Materials Today: Proceedings*, 22, 887-889. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.096>
- Karagöl, F., Demirboğa, R., Kaygusuz, M. A., Yadollahi, M. M., & Polat, R. (2013). The influence of calcium nitrate as antifreeze admixture on the compressive strength of concrete exposed to low temperatures. *Cold Regions Science and Technology*, 89, 30-35. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.02.001>
- Karakoç, M. B. (2004). Effects of expanded perlite aggregate on physical and mechanics properties of high strength concrete. *A Master's thesis, Department of Civil Engineering, Ataturk University, Erzurum, Turkey*.
- Kheder, G., 1999. A two-stage procedure for assessment of in situ concrete strength using combined non-destructive testing. *Mater. Struct.* 32. <https://doi.org/10.1007/BF02482712>
- Kim, S. B., Yi, N. H., Kim, H. Y., Kim, J. H. J., & Song, Y. C. (2010). Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement and concrete composites*, 32(3), 232-240. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002>
- Kosiński, P., Brzyski, P., Tunkiewicz, M., Suchorab, Z., Wiśniewski, D., & Palczyński, P. (2022). Thermal properties of hemp shives used as insulation material in construction industry. *Energies*, 15(7), 2461. <https://doi.org/10.3390/en15072461>
- Kou, S., Lee, G., Poon, C., & Lai, W. (2009). Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Management*, 29, 621-628.
- Kumbasaroglu, H., & Kumbasaroglu, A. (2025). Applicability of Agro-Waste Materials in Structural Systems for Building Construction: A Scoping Review. *Applied Sciences*, 15(1), 71. <https://doi.org/10.3390/app15010071>

- Law Yim Wan, D. S., Aslani, F., & Ma, G. (2018). Lightweight self-compacting concrete incorporating perlite, scoria, and polystyrene aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8), 04018178.
- Leong, G. W., Mo, K. H., Loh, Z. P., & Ibrahim, Z. (2020). Mechanical properties and drying shrinkage of lightweight cementitious composite incorporating perlite microspheres and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 246, 118410. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118410>
- Li, B., Chi, Y., Xu, L., Shi, Y., & Li, C. (2018). Experimental investigation on the flexural behavior of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 191, 80-94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.202>
- Liao, M. (2015, November). Linkage studies of China's urbanization and construction industry. In *2015 Sixth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)* (pp. 522-526). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICICIP.2015.7388227>
- Lin, X., Yu, J., Li, H., Lam, J. Y., Shih, K., Sham, I. M., & Leung, C. K. (2018). Recycling polyethylene terephthalate wastes as short fibers in strain-hardening cementitious composites (SHCC). *Journal of hazardous materials*, 357, 40-52. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.05.046>
- Lo TY, Cui HZ. Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete. *Mater Letters* 2004; 58:916-9. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.07.036>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.08.004>
- Luhar, S., & Luhar, I. (2019). Potential application of E-wastes in construction industry: A review. *Construction and Building Materials*, 203, 222-240.
- Madhavi, T. C., Raju, L. S., & Mathur, D. (2014). Polypropylene fiber reinforced concrete-a review. *International journal of emerging technology and advanced engineering*, 4(4), 114-118.
- Mahure, N., Vijh, G., Sharma, P., Sivakumar, N., Ratnam, M., 2011. Correlation between pulse velocity and compressive strength of concrete. *Int. J. Earth Sci. Eng.* 4 (6).
- Malabadi, R. B., Kolkar, K. P., & Chalannavar, R. K. (2023). Industrial Cannabis sativa (hemp fiber): Hempcrete-A plant based and eco-friendly building construction material. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*, 8(3), 67-78. <https://doi.org/10.51584/IJRIAS>
- Mancuso, C., & Bartlett, F. M. (2017). ACI 318-14 Criteria for Computing Instantaneous Deflections. *ACI Structural Journal*, 114(5).
- Maxineasa, S. G., Isopescu, D. N., Lupu, M. L., Baci, I. R., Pruna, L., & Somacescu, C. (2022, April). The use of perlite in civil engineering applications. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 1242, No. 1, p. 012022). IOP Publishing.
- Mayda, S., & ihsan Turan, A. (2026). Hemp shives vs. plastic waste vs. polypropylene fibers in perlite concrete: An experimental comparative study of mechanical performance. *Construction and Building Materials*, 519, 145920.
- Mohammadhosseini, H., & Yatim, J. M. (2017). Evaluation of the effective mechanical properties of concrete composites using industrial waste carpet fiber. *INAE Letters*, 2(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s41403-017-0016-x>
- Muhit, I. B., Ahmed, S. S., Zaman, M. F., & Ullah, M. S. (2018). Effects of Multiple Supplementary Cementitious Materials on Workability and Strength of Lightweight Aggregate Concrete. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 12(1).
- Muhit, I. B., Omairey, E. L., & Pashakolaie, V. G. (2024). A holistic sustainability overview of hemp as building and highway construction materials. *Building and Environment*, 256, 111470. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111470>

- Naseri, F., Jafari, F., Mohseni, E., Tang, W., Feizbakhsh, A., & Khatibinia, M. (2017). Experimental observations and SVM-based prediction of properties of polypropylene fibres reinforced self-compacting composites incorporating nano-CuO. *Construction and Building Materials*, 143, 589-598. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.124>
- Nash't, I., A'bour, S., Sadoon, A., 2005. Finding an unified relationship between crushing strength of concrete and non-destructive tests. In: Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition, Bahrain, Manama.
- Nazmul, R. T., Sainsbury, B. A., Garcez, E. O., Al-Deen, S., & Ashraf, M. (2023). Characterisation of the effects of hemp shives for internal curing of concrete. *Construction and Building Materials*, 409, 133916. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133916>
- Niyigena, C., Amziane, S., Chateauneuf, A., Arnaud, L., Bessette, L., Collet, F., ... & Walker, P. (2016). Variability of the mechanical properties of hemp concrete. *Materials Today Communications*, 7, 122-133. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2016.03.003>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002>
- Oktaý, H., Yumrutaş, R., & Akpolat, A. (2015). Mechanical and thermophysical properties of lightweight aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 96, 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.015>
- Ortega-Lopez, V., Garcia-Llona, A., Revilla-Cuesta, V., Santamaría, A., & San-Jose, J. T. (2021). Fiber-reinforcement and its effects on the mechanical properties of high-workability concretes manufactured with slag as aggregate and binder. *Journal of Building Engineering*, 43, 102548. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102548>
- Ozturk, A. B., Turan, A. İ., Kumbasaroglu, A., Yalciner, H., & Ayaz, Y. (2025). The Effect of Elevated Temperature on the Mechanical Properties of Concrete Produced with Raw Perlite Aggregate. *Journal of Building Engineering*, 115093. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.115093>
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. *Construction and building materials*, 25(2), 575-581. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>
- Papong, S., Malakul, P., Trungkavashirakun, R., Wenunun, P., Chom-in, T., Nithitanakul, M., & Sarobol, E. (2014). Comparative assessment of the environmental profile of PLA and PET drinking water bottles from a life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 65, 539-550. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.030>
- Pelisser, F., Montedo, O. R. K., Gleize, P. J. P., & Roman, H. R. (2012). Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete. *Materials research*, 15, 679-686. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000088>
- Pereira-De-Oliveira, L. A., Castro-Gomes, J. P., & Nepomuceno, M. C. S. (2011). Physical and mechanical behavior of recycled PET fibre reinforced mortar. *Construction and Building Materials*, 25, 1712–1717.
- Prahallada, M. C., & Parkash, K. B. (2013). Effect of different aspect ratio of waste plastic fibers on the properties of fiber reinforced concrete: An experimental investigation. *International Journal of Advanced Research in IT and Engineering*, 2, 1–13.
- Prakash, R., Thenmozhi, R., Raman, S. N., & Subramanian, C. (2020). Characterization of eco-friendly steel fiber-reinforced concrete containing waste coconut shell as coarse aggregates and fly ash as partial cement replacement. *Structural Concrete*, 21(1), 437-447. <https://doi.org/10.1002/suco.201800355>
- Ragul, P., Hari, M. N. T., Arunachelam, N., & Chellapandian, M. (2022). An experimental study on the partial replacement of fine aggregate with perlite in cement

- concrete. *Materials Today: Proceedings*, 68, 1219-1224. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.578>
- Ram, V. G., Kishore, K. C., & Kalidindi, S. N. (2020). Environmental benefits of construction and demolition debris recycling: Evidence from an Indian case study using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120258. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120258>
- Ramesh, K., Seshu, D. R., & Prabhakar, M. (2003). Constitutive behaviour of confined fibre reinforced concrete under axial compression. *Cement and Concrete Composites*, 25(3), 343-350. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00051-3)
- Raouf, Z., & Ali, Z. (1983). Assessment of concrete characteristics at an early age by ultrasonic pulse velocity. *J. Build. Res*, 2(1), 31-44.
- Revilla-Cuesta, V., Ortega-López, V., Skaf, M., Khan, A. U. R., & Manso, J. M. (2022). Deformational behavior of self-compacting concrete containing recycled aggregate, slag cement and green powders under compression and bending: Description and prediction adjustment. *Journal of building engineering*, 54, 104611. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104611>
- Rózycka, A., & Pichór, W. (2016). Effect of perlite waste addition on the properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 120, 65-71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.019>
- Saikia, N., & De Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 34, 385-401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>
- Saleh, H., Abiza, Y., Yacine, F. M., Mesticou, Z., Kacem, M., & Larbi, A. S. (2025). Impact of hemp shiv surface treatments on the mechanical and hygrothermal behavior of hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 499, 144060.
- Schumacher, K., Saßmannshausen, N., Pritzel, C., & Trettin, R. (2020). Lightweight aggregate concrete with an open structure and a porous matrix with an improved ratio of compressive strength to dry density. *Construction and Building Materials*, 264, 120167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120167>
- Sengul, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F., & Tasdemir, M. A. (2011). Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy and Buildings*, 43(2-3), 671-676. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.008>
- Sharma, R., & Bansal, P. P. (2016). Use of different forms of waste plastic in concrete—a review. *Journal of cleaner production*, 112, 473-482. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.042>
- Silva, D., Betioli, A. M., Gleize, P. J. P., Roman, H. R., Gomez, L. A., & Ribeiro, J. L. D. (2005). Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1741-1746.
- Sim, J. I., Yang, K. H., & Jeon, J. K. (2013). Influence of aggregate size on the compressive size effect according to different concrete types. *Construction and building materials*, 44, 716-725. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.066>
- Sinka, M., Radina, L., Sahmenko, G., Korjakins, A., & Bajare, D. (2015). Enhancement of lime-hemp concrete properties using different manufacturing technologies. *Academic journal of civil engineering*, 33(2), 301-308. <https://doi.org/10.26168/icbbm2015.46>
- SP-52-101, 2003. Concrete and reinforced concrete structures without prestressing, In Gosstroi of Russia, Moscow.
- Standard, A. A. (2011, August). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11). In *American Concrete Institute*.
- Standard, B. (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures—. *Part, 1*(1), 230.

- Standard, B. (2009). Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, BS EN, 12390-3.
- Stefanidou, M., Pachta, V., & Konstantinidis, G. (2023). Exploitation of waste perlite products in lime-based mortars and grouts. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 32, 101024. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101024>
- Števílová, N., Čigasová, J., Schwarzová, I., Šicáková, A., & Junák, J. (2018). Sustainable bio-aggregate-based composites containing hemp hurds and alternative binder. *Buildings*, 8(2), 25. <https://doi.org/10.3390/buildings8020025>
- Sukontasukkul, P., Chindaprasirt, P., Pongsopha, P., Phoo-Ngernkham, T., Tangchirapat, W., & Banthia, N. (2020). Effect of fly ash/silica fume ratio and curing condition on mechanical properties of fiber-reinforced geopolymer. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 9(4), 218-232. <https://doi.org/10.1080/21650373.2019.1709999>
- Terpáková, E., Kidalová, L., Eštoková, A., Čigášová, J., & Števílová, N. (2012). Chemical modification of hemp shives and their characterization. *Procedia Engineering*, 42, 931-941. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.486>
- TS 500, 2000. Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 802, Design of Concrete Mixes, Turkish Standards Institution, Ankara, Turkey, 2016 (Turkish Codes).
- TS EN 933-1, Tests for Geometrical Properties of Aggregates Part 1: Determination of Particle Size Distribution Sieving Method, Turkish Standards Institution, Ankara, Turkey, 2012 (Turkish Codes).
- Vakhshouri, B., & Nejadi, S. (2019). Empirical models and design codes in prediction of modulus of elasticity of concrete. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(1), 38-48. <https://doi.org/10.1007/s11709-018-0479-1>
- Vashistha, P., Park, S., & Pyo, S. (2022). A review on sustainable fabrication of futuristic cementitious binders based on application of waste concrete powder, steel slags, and coal bottom ash. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 16(1), 51. <https://doi.org/10.1186/s40069-022-00541-9>
- Wang, L., Wang, J., Qian, X., Chen, P., Xu, Y., & Guo, J. (2017). An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 144, 432-441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.191>
- Whwah, M. S., Radhi, M. S., Dulaimi, A., Bernardo, L. F. A., & Ribeiro, T. P. (2025). Simultaneous Effects of Perlite Fine Aggregate and Silica Fume on the Physical Properties of Lightweight Cement Mortars. *CivilEng*, 6(3), 51. <https://doi.org/10.3390/civileng6030051>
- Whwah, M. S., Mahmmod, L. M. R., Abdoulhaleem, H. H., & Dulaimi, A. (2025). Internal curing utilising recycled concrete aggregate: a sustainable approach for improving high-strength concrete's performance. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50(11), 8061-8076.
- Williams, J., Lawrence, M., & Walker, P. (2017). The influence of the casting process on the internal structure and physical properties of hemp-lime. *Materials and Structures*, 50(2), 108. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0976-4>
- Yin, S., Tuladhar, R., Collister, T., Combe, M., Sivakugan, N., & Deng, Z. (2015). Post-cracking performance of recycled polypropylene fibre in concrete. *Construction and building materials*, 101, 1069-1077.

Zerrouki, R., Benazzouk, A., Courty, M., & Hamed, H. B. (2022). Potential use of matakaolin as a partial replacement of preformulated lime binder to improve durability of hemp concrete under cyclic wetting/drying aging. *Construction and Building Materials*, 333, 127389. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127389>