

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

ATIK LASTİK AGREGALI HAFİF BETONLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mustafa KEKLİK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Doç. Dr. H. Alperen BULUT

Dr. Öğr. Üyesi Safa NAYIR

Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZİNCAN, 2026

© 2026 [Mustafa KEKLİK]. Tüm hakları saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL danışmanlığında, Mustafa KEKLİK tarafından hazırlanan bu çalışma 12.01.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. H. Alperen BULUT İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Safa NAYIR İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL İmza:

Yukarıdaki Yüksek Lisans Enstitü Yönetim Kurulunun / / 20.... tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. 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 Etiğe Uygunluk Sayfası

“Atık Lastik Agregalı Hafif Betonların Mekanik Ve Durabilite Özelliklerinin 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. 12/01/2026

(İmza)

Mustafa KEKLİK

ÖZET

ATIK LASTİK AGREGALI HAFİF BETONLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mustafa KEKLİK

**Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL**

2026, 69 sayfa

Bu tez kapsamında, ham perlit agregası kullanılarak üretilen hafif betonlarda farklı oranlarda ince atık lastik agregasının (İALA), ince ham perlit agregası ile ikame edilmesinin hafif betonlar üzerinde meydana getirdiği etkiler incelenmiştir. Araştırmada, İALA içermeyen referans karışımın yanı sıra ince perlit agregasının %5, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında İALA ile ikame edilmesiyle üretilen toplam yedi farklı hafif beton serisi hazırlanmıştır. Hazırlanan beton numuneler 28 gün kür sonunda basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ultrases geçiş hızı, elektriksel özdirenç, su emme, kılcallık ve donma-çözülme deneylerine tabi tutulmuştur. Ayrıca bu deneylerin bazıları 90 gün kür sonunda da gerçekleştirilerek kür süresinin etkisi de incelenmiştir. Bulgular, İALA ikame oranının artışı ile hafif betonun yoğunluğunda, mekanik özelliklerinde, ultrases geçiş hızında azalma; kılcallık katsayıları ve su emme yüzdelerinde artış olduğunu göstermektedir. İALA'nın %30 oranına kadar kullanımı elektriksel özdirenci azaltmış olmasına karşın bundan daha yüksek oranlarda İALA ikamesi ile elektriksel özdirenç artmış ve %50 İALA ikameli betonda en yüksek değerine ulaşmıştır. Donma-çözülme deneyinden elde edilen veriler İALA içerikli betonların donma çözölmeye daha iyi dayanıklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. SEM görüntüleri ile diğer deneylerden elde edilen veriler uyum göstermiştir. Ekonomik, çevreci ve sürdürülebilir bir yaklaşım ile %5 İALA ikamesinin hafif beton üretiminde optimum değer olduğu, %10'dan fazla İALA ikamesinin ise beton özelliklerinde ciddi bozulmalar meydana getirdiği söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: atık lastik, ham perlit, hafif beton, mekanik, durabilite, donma-çözülme

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH WASTE RUBBER AGGREGATE

Mustafa KELİK

**Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and
Technology,**

Department of Civil Engineering

Advisor: Assist. Prof. Dr. Ufuk KANDİL

2026, 69 pages

This thesis investigates the effects of substituting fine raw perlite aggregate with different ratios of fine waste rubber aggregate (FWRA) on lightweight concrete produced using raw perlite aggregate. In the study, a total of seven different lightweight concrete series were prepared, including a reference mix without FWRA, as well as those produced by substituting 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% FWRA for fine raw perlite aggregate. The prepared concrete samples were subjected to compressive strength, splitting tensile strength, ultrasonic pulse velocity, electrical resistivity, water absorption, capillarity, and freeze-thaw tests after 28 days of curing. Some of these tests were also performed after 90 days of curing to investigate the effect of curing time. The findings show that increasing the FWRA substitution ratio leads to a decrease in density, mechanical properties, and ultrasonic pulse velocity of the lightweight concrete, while capillarity coefficients and water absorption percentages increase. Electrical resistivity decreased with FWRA substitution up to 30%; however, higher substitution ratios resulted in increased electrical resistivity, with the highest value observed in concrete containing 50% FWRA. Data from freeze-thaw tests revealed that FWRA-containing concrete exhibited better freeze-thaw resistance. SEM images were consistent with data from tests. Overall, a 5% FWRA substitution appears to be the most suitable option for lightweight concrete production, while substitution levels above 10% lead to a noticeable deterioration in concrete properties.

Keywords: waste rubber, raw perlite, lightweight concrete, mechanical, durability, freeze–thaw

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam süresince bilgi, tecrübe ve yol göstericiliğiyle bana her zaman destek olan değerli danışman hocam Ufuk KANDİL'e en içten teőekkürlerimi sunarım. Ayrıca; bu süreçte sabrı, anlayıőı ve sevgisiyle yanımda olan kıymetli eőim Gülnur KEKLİK'e ve varlıklarıyla bana güç ve motivasyon veren sevgili ocuklarım Mehmet Fatih KEKLİK, Zeynep Su KEKLİK ve Meryem İpek KEKLİK'e sonsuz őükranlarımı sunarım.

Mustafa KEKLİK

Ocak, 2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırmanın Amacı	3
1.2. Araştırmanın Önemi	3
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR.....	5
2.1. Hafif Beton	5
2.1.1. Hafif betonun kullanım alanları.....	5
2.1.2. Hafif betonun avantaj ve dezavantajları	5
2.1.3. Hafif beton agregaları.....	6
2.1.3.1. Doğal hafif agregalar	6
2.1.3.1.1. Pomza	6
2.1.3.1.2. Diatomit.....	7
2.1.3.1.3. Perlit.....	7
2.1.3.1.4. Tüf	9
2.1.3.1.5. Lav cürufu.....	9
2.1.3.2. İşlenmiş doğal hafif agregalar	10
2.1.3.2.1. Genleştirilmiş perlit	10
2.1.3.2.2. Genleştirilmiş kil	10
2.1.3.2.3. Genleştirilmiş vermikülit.....	10
2.1.3.3. Yapay hafif agregalar	11
2.1.3.3.1. Yüksek fırın cürufu.....	11
2.1.3.3.2. Uçucu kül.....	12
2.2. Atık lastikler	12
2.2.1. Atık lastiklerin çevresel etkileri.....	12
2.2.2. Atık lastiklerin geri dönüşümü ve kullanım alanları	12
2.2.3. Türkiye’de kullanılmış lastiklerin mevcut durumu ve değerlendirilmesi	13

2.2.4. Atık lastiklerin Uluslararası Mevzuatlar çerçevesinde yönetimi.....	14
2.2.5. Ülkemizde atık lastik yönetimine dair mevzuatlar	16
2.3. Kaynak Özetleri.....	17
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	21
3.1. Materyal.....	21
3.1.1. Agregalar	21
3.1.2. Çimento	23
3.1.3. Su.....	23
3.1.4. Kimyasal katkı maddesi.....	23
3.2. Yöntem	23
3.2.1. Beton karışımları ve numunelerin hazırlanması	23
3.2.2. Yürütülen deneyler	27
3.2.2.1. Taze beton deneyleri.....	27
3.2.2.1.1. Çökme deneyi.....	27
3.2.2.1.2. Taze beton birim hacim kütle deneyi	27
3.2.2.2. Sertleşmiş beton deneyleri.....	28
3.2.2.2.1. Kuru hal birim hacim kütle deneyi	28
3.2.2.2.2. Basınç dayanımı deneyi.....	29
3.2.2.2.3. Yarmada çekme dayanımı deneyi	30
3.2.2.2.4. Elektriksel özdirenç deneyi	31
3.2.2.2.5. Kılcallık deneyi.....	31
3.2.2.2.6. Su emme oranı tayini deneyi	32
3.2.2.2.7. Ultrases geçiş hızı deneyi	33
3.2.2.2.8. Donma- çözülme deneyi.....	33
4. BULGULAR	35
4.1. Taze Betonlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları	35
4.2. Sertleşmiş Betonlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları	35
4.2.1. Sertleşmiş hal birim ağırlıklar	35
4.2.2. Basınç dayanımı ölçümleri	36
4.2.3. Yarmada çekme dayanımı ölçümleri.....	36
4.2.4. Ultrases geçiş hızı ölçümleri.....	37
4.2.5. Elektriksel özdirenç ölçümleri.....	37
4.2.6. Kılcallık ölçümleri.....	37
4.2.7. Su emme ölçümleri.....	38

4.2.8. Donma-çözölmeye maruz kalan hafif betonlarda meydana gelen ağırlık kayıpları.....	38
4.2.9. Donma-çözölmeye maruz kalan hafif betonların basınç dayanımları	39
4.2.10. Donma-çözölmeye maruz kalan hafif betonların ultrases geçiş hızları.....	39
5. TARTIŞMA.....	40
5.1. Birim Hacim Kütleli.....	40
5.2. Basınç Dayanımı.....	41
5.3. Yarmada Çekme Dayanımı	42
5.4. Ultrases Geçiş Hızı (UGH).....	45
5.5. Elektriksel Özdirenç	46
5.6. Kılcal Su Emme.....	48
5.7. Su Emme.....	49
5.8. Donma-Çözölme.....	51
5.8.1. Donma-çözölme sonrası ağırlık kayıpları.....	51
5.8.2. Donma-çözölme sonrası basınç dayanımı kayıpları	52
5.8.3. Donma-çözölme sonrası ultrases geçiş hızı kayıpları.....	54
5.8.4. Donma-çözölme sonrası SEM incelemesi	55
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	58
6.1. Sonuçlar	58
6.2. Öneriler.....	60
KAYNAKÇA	61
ÖZGEÇMİŞ.....	62

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Dünya perlit rezervleri	8
Tablo 2.2. Dünya perlit üretimi	8
Tablo 2.3. Türkiye perlit rezervleri	9
Tablo 2.4. Atık lastiklerin geri dönüştürülerek kauçuk parçacıklar halinde inşaat mühendisliği uygulamalarındaki kullanım alanları (Ulusoy, 2021).....	13
Tablo 3.1. Agregalara ilişkin doymuş yüzey kuru özgül ağırlıkları ve su emme değerleri.....	21
Tablo 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan çimentoya ait özellikler	23
Tablo 3.3. Çalışmada gerçekleştirilen beton karışımları (kg/m ³).....	24
Tablo 4.1. Karışımların çökmeleri ve taze hal birim hacim kütleleri.....	35
Tablo 4.2. Karışımların 28 gün kür sonunda sertleşmiş hal kuru birim hacim kütleleri.....	36
Tablo 4.3. Karışımların basınç dayanımları	36
Tablo 4.4. Karışımların yarmada çekme dayanımları	36
Tablo 4.5. Karışımların ultrases geçiş hızları.....	37
Tablo 4.6. Karışımların elektriksel özdirençleri.....	37
Tablo 4.7. Karışımların kılcallık katsayıları.....	38
Tablo 4.8. Karışımların su emmeleri.....	38
Tablo 4.9. Hafif betonlarda donma çözülme etkisi ile meydana gelen ağırlık kayıpları.....	38
Tablo 4.10. Silindirik numunelerde elde edilen donma- çözülme deneyi öncesi ve 300 kez donma-çözölmeye maruz bırakılmış numunelerin basınç dayanımları	39
Tablo 4.11. İALA içerikli hafif betonların donma-çözölme deneyi öncesi ve sonrası ultrases geçiş hızı değerleri.....	39

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. İnce atık lastik agregası	21
Şekil 3.2. Atık lastik agregasına ait SEM görüntüsü	22
Şekil 3.3. Atık lastik agregasına ait EDX analiz sonucu	22
Şekil 3.4. Beton üretimlerinde kullanılan karıştırıcı.....	25
Şekil 3.5. Numunelerin şematik gösterim	25
Şekil 3.6. Bir üretimde kalıplanan numuneler	26
Şekil 3.7. Numunelerin yerleştirildiği kür havuzu	26
Şekil 3.8. Çökme deneyi	27
Şekil 3.9. Etüv	28
Şekil 3.10. Tartı	29
Şekil 3.11. Basınç dayanımı deneyi.....	30
Şekil 3.12. Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği (solda) ve yarılan numune (sağda)	30
Şekil 3.13. Elektriksel özdirenç ölçümünde kullanılan ekipmanlar ve düzenek.....	31
Şekil 3.14. Kılcallık deney düzeneği	32
Şekil 3.15. Ultrases geçiş hızı deneyi.....	33
Şekil 3.16. Donma çözülme kabini.....	34
Şekil 5.1. Üretilen hafif betonların kuru hal birim hacim kütleleri	40
Şekil 5.2. Basınç dayanımlarının İALA oranına ve yaşa göre değişimi.....	41
Şekil 5.3. Yarmada çekme dayanımlarının İALA oranına ve yaşa göre değişimi	43
Şekil 5.4. Yarmada çekme deneyi testinde numunelerin yarılan yüzeylerinden alınan fotoğraflar	44
Şekil 5.5. 50İALA betonunun yarıлма yüzeyinden çekilen büyütülmüş görüntü.....	44
Şekil 5.6. UGH değerlerinin İALA oranına ve yaşa göre değişimi.....	46
Şekil 5.7. Elektriksel özdirenç değerlerinin İALA oranına göre değişimi	47
Şekil 5.8. Kılcallık katsayılarının İALA oranına ve yaşa göre değişimi	49
Şekil 5.9. Su emme oranlarının İALA oranına ve yaşa göre değişimi	50
Şekil 5.10. Donma-çözülme döngüleri sonrası İALA içeren hafif betonların ağırlık kayıpları.....	51
Şekil 5.11. 300 donma-çözülme döngüsü sonrası İALA içeren hafif betonların basınç dayanımı kayıpları	53
Şekil 5.12. 300 donma-çözülme döngüsü sonrası İALA içeren hafif betonların UGH	

kayıpları	54
Şekil 5.13. 0İALA betonu için 300 donma-çözülme döngüsü sonundaki SEM görüntüsü	55
Şekil 5.14. 50İALA betonu için 300 donma-çözülme döngüsü sonundaki SEM görüntüsü	56

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EDX	Energy Dispersive X-ray
FWRA	Fine Waste Rubber Aggregate
İALA	İnce Atık Lastik Agregası
LASDER	Lastik Sanayicileri Derneği
ÖTL	Ömrünü Tamamlamış Lastik
SEM	Scanning Electron Microscope
TÇÜD	Türkiye Çelik Üreticileri Derneği
THBB	Türkiye Hazır Beton Birliği
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UGH	Ultrases Geçiş Hızı
UNEP	United Nations Environment Programme

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve inşaat sektöründeki ihtiyaç ile birlikte beton endüstrisindeki beklentileri karşılamak amacıyla farklı özellikleri ile ön plana çıkan beton arayışı artmış ve bu doğrultuda özel beton üretimleri hız kazanmıştır. Özel betonlar, farklı kullanım ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla üretilen betonlardır. Ağır veya hafif beton, yüksek akışkanlığa sahip beton, yalıtım amaçlı üretilen beton vb. özel betonlara verilebilecek birkaç örnek olarak sıralanabilir. Betona bu ve benzeri özelliklerin kazandırılması ancak betonun alışılmış bileşenlerinin dışındaki farklı yapı malzemelerinin karışıma ilave edilmesi veya farklı üretim tekniklerinin kullanımı ile mümkün olmaktadır (Yazıcıoğlu ve Bozkurt, 2006). Hafif betonlar; düşük yoğunlukları, iyi ısı yalıtımı özellikleri ve yapı elemanlarında ağırlık azaltımı sağlamaları nedeniyle sürdürülebilir yapı sistemlerinde ön plana çıkmaktadır (Chandra and Berntsson, 2002). Hafif agregalar ile üretilen hafif betonlar arasında, ısı yalıtım özelliği en yüksek düzeyde olan beton türünden biri perlit agregası içeren hafif betonlardır (Duaij vd., 1997). Perlitin beton agregası olarak inşaat sektöründe kullanım alanının genişlemesinin, ülke ekonomisine ve iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılmasına katkı sunacağı öngörülmektedir (Gökçe vd., 2010). Ancak ham perlitin yüksek gözenekliliği, bazen betonun mekanik özelliklerinde düşüslere neden olabilmektedir. Bu nedenle, perlit agregalı hafif betonların performansını artırmaya yönelik katkı malzemeleri veya alternatif agregalar ile kompozit sistemler oluşturulması, güncel bir araştırma alanı olarak dikkat çekmektedir.

İnsanoğlu yaşamını sürdürebilmesi veya daha konforlu hale getirebilmesi için birçok malzemeyi kullanmakta veya tüketmektedir. Kullanılan malzemeler ömürleri dolduğunda atık meydana getirmektedir. Atık maddelerin geri dönüştürülmemesi veya bilinçsizce yok edilmeye çalışılması sonucunda çevre sağlığı ciddi ölçüde tehlike altına girmektedir. Bu bağlamda, geri dönüştürülebilir ve ekonomik malzemelerin beton üretiminde kullanılması hem çevresel etkilerin azaltılması hem de yapı sektöründe sürdürülebilirliğin sağlanması açısından büyük önem arz etmektedir. Günümüzde konforlu ulaşım ihtiyacının artması sonucu taşıt üretimi artmıştır. Taşıt üretiminin artması ile araç lastiği üretimi de giderek artmıştır. Ancak kullandıkça yıpranan ve ömrünü tamamlayan bir malzeme olan araç lastiğinin üretimine paralel olarak atık lastik miktarı da aynı hızla artmıştır. Hatta bu konu da ömrünü tamamlamış lastiklerin; çevreye zarar verecek şekilde doğrudan veya dolaylı olarak ortama bırakılmasının önlenmesi amacıyla Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından hazırlanan ve 25.11.2006 tarih ve 26357 sayılı Resmi Gazetede yayınlanan “Ömrünü Tamamlamış

Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği” yayınlanmıştır. Atık lastiklerin geri kazanımı için günümüzde tekrar kaplama, yakma, öğütme, rejenere gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden kaplama, kullanılmış lastiğin geri kazanılması için en önemli yöntemdir. Ancak bu yöntemin yanı sıra atık lastikler öğütülerek inşaat sektörü uygulamalarında, zirai kullanımlarda veya kompozit malzemelerin üretiminde de kullanılabilir ve böylelikle hem atıkların oluşturacağı çevre kirliliği önlenir hem de bu atıklar kullanılarak malzemenin özellikleri iyileştirilebilir (Doğan, 2005). Araç lastikleri özellikle agrega olarak çeşitli boyutlarda beton içerisine katıldığında, betonun darbe dayanımı, esnekliği ve enerji sönmeme kapasitesinde artışlar sağladığı belirtilmektedir (Li vd., 2025).

Gerçekleştirilen bu çalışmada Erzincan ilinden temin edilen ham perlit agregası kullanılarak üretilen hafif betonlarda ince atık lastik agregası (İALA) kullanımının etkisini incelemek amaçlanmıştır. Bu amaçla İALA, ince perlit agrega ile %5, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında ikame edilerek hafif betonlar üretilmiştir. Ayrıca İALA içermeyen (%0) bir betonda kıyaslama amacı ile üretilmiştir. Yedi farklı tasarıma sahip hafif betonlar üzerinde basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ultrases geçiş hızı, elektriksel özdirenç, kılcallık ve su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elektriksel özdirenç deneyi hariç tüm deneyler hem 28 gün hem de 90 gün standart kür sonunda gerçekleştirilmiştir. Elektriksel özdirenç deneyi sadece 28 gün kür gören betonlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hafif betonların donma-çözülme direncine etkisine dayanıklılığı da incelenmiştir. Betonların donma-çözülme etkisine karşı direncini belirlemek için 28 gün kür görmüş numuneler 300 kez donma-çözülme çevrimine maruz bırakılmışlardır. Donma-çözülme deneyi boyunca her 50 döngüde bir betonlar tartılarak ağırlıkları ölçülmüş ve ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Ayrıca betonların donma çözülme etkisine maruz bırakılmadan önce ve 300 kez donma-çözülme etkisine maruz bırakıldıktan sonra ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımları ölçülmüştür. Donma çözülme maruz kalan %0 ve %50 İALA ikameli betonlar için SEM (taramalı elektron mikroskopu) deneyi ile mikroyapı analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen tüm bu deneyler sonucunda betonların donma çözülme performansları ve İALA'nın bu performansa etkisi ortaya koyulmuş ve irdelenmiştir. İALA ikame oranı arttıkça hafif betonların mekanik ve durabilite özellikleri genel olarak kötüye gitmiştir. Fakat elektriksel özdirenç deneyi için %50 İALA ikameli betonun özdirenci İALA içermeyenden yüksek bulunmuştur. İALA içeren betonların donma-çözülme dirençleri de genel olarak daha iyidir. Tüm bu bulguların SEM görüntüleri ile paralellik gösterdiği görülmüştür. %5 İALA oranı ekonomik, çevreci ve sürdürülebilirlik bakımından optimum orandır.

1.1. Araştırmanın Amacı

Hafif betonların yapıda kullanımının birçok avantajı vardır. Bunlardan başlıcaları; ısı yalıtımı, ses yalıtımı, yapı yükünün azalması sonucu kesitlerin azalması, binaya etkiyen deprem yüklerinin azalması vb. şeklinde sıralanabilir. Diğer taraftan çevre kirliliğini büyük ölçüde etkileyen endüstriyel atıkları beton teknolojisinde kullanarak betonun mekanik ve durabilite özelliklerinin geliştirilmesi veya sürdürülebilir bir beton üretilmesi son zamanlarda sıkça araştırılan konulardan biri olmaktadır. Bu çalışmanın amacı; ham perlit agregalı hafif betonlarda, ince perlit agregası yerine ince atık lastik agregasının farklı oranlarda ikame edilerek kullanımının hafif betonların özellikleri üzerinde meydana getirdiği değişimi çok yönlü olarak araştırmaktır.

1.2. Araştırmanın Önemi

Bu araştırmanın önemi ve özgünlüğü aşağıdaki gibi maddeler halinde sıralanabilir;

- Atık bir madde olan kullanılmış araba lastiklerinin agrega boyutuna getirilerek betonda normal agrega ile ikame edilerek kullanılmasının bazı avantajları vardır. Bunlardan ilki, atık lastiklerin çevreye atılmasını veya bertarafı için harcanan enerjiyi azaltmaktır. İkincisi, betonda atık lastik agregası kullanımı ile doğal agrega kullanımının azaltılmasıdır. Böylece hem doğal kaynakların korunmasına hem de çevreye verilen zararın en aza indirilmesine olanak sağlanacaktır. Üçüncü olarak, atık lastik agregasının betonda kullanılması betona esneklik kazandırarak betonun bazı özelliklerinde olumlu yönde etki meydana getirebilmektedir. Özellikle atık lastik agregası kullanımı ile yoğunluğu azalan betonlarda esneklik, ısı ve ses yalıtımı artmaktadır. Bunun sonucunda enerji tasarrufu ve gürültü kontrolü daha ekonomik bir şekilde yapılabilmektedir. Atık lastik içeren betonlar bu açıdan konforu artırabilmektedir. Sonuç olarak; atık lastik agregasının betonda doğal agrega ile ikame edilerek kullanımı ile hem daha çevreci ve sürdürülebilir hem bazı özellikler bakımından daha üstün hem de daha ucuz bir hafif beton üretimi hedeflenmektedir.
- Hafif betonların yapılarda kullanımı, geleneksel betonlara kıyasla birim ağırlıklarının az olmasından dolayı üretilen yapıların ağırlığını azaltır, yapıya etkiyen deprem yüklerini azaltır, ısı ve ses yalıtımını artırdığı için enerjinin boşa gitmesini önler, konforu artırır ve ekonomiye katkı sağlar. Günümüzde taşıyıcı hafif beton kullanılarak üretilen yapıların

sayısında artış olmakla birlikte hala arzu edilen düzeye gelinebilmiştir. Bunun birkaç nedeni vardır. Başta geleneksel betonlarda olan standartlaşmanın hafif betonlarda oldukça sınırlı olması ve dolayısıyla istenen beton kalitesinin temininde yaşanan korkulardır. Çünkü hafif beton üretiminin birçok yöntemi vardır ve taşıyıcı hafif beton üretiminin en yaygın yolu ise üretimde geleneksel agregalar yerine hafif agregalar kullanmaktır. Hafif betonlar üzerinde gerçekleştirilen bu çalışma ile literatüre bu konuda destek sunulmuş olacaktır.

- Ham perlit agregası içeren hafif betonlarda ince atık lastik agregası kullanımının etkilerini araştıran ve literatürde, ham perlit agregalı hafif betonun hem mekanik hem donma-çözülme hem de diğer durabilite özelliklerini bütüncül şekilde ele alan bir çalışmayla karşılaşılmamıştır. Bu durum, bu çalışmanın özgünlüğünü ortaya koymaktadır. Ayrıca 28 günlük ve 90 günlük kür süresi sonunda hafif betonlar üzerinde deneyler gerçekleştirilmesi gün parametresinin de değişimlere etkisini ortaya koymakta ve çalışmaya önem kazandırmaktadır.
- Bu çalışma ham perlit agregalı hafif betonlarda ince atık lastik agregası kullanımının geniş yelpazede beton özelliklerine nasıl etki ettiğini ortaya koyan öncü bir çalışma konumundadır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Hafif Beton

Amerikan Beton Enstitüsü tarafından yayınlanan ACI 213R-87 (1999) raporunda yapısal hafif betonlar, etüv kurusu yoğunluğu 1440-1850 kg/m³ arasında olan ve basınç dayanımı minimum 17,2 MPa (28 günlük) olan beton olarak tanımlanmaktadır. Betonun hafifliği; karışımda doğal agrega yerine ponza, perlit, genleştirilmiş kil vb. hafif agregalar kullanarak, hava sürükleyici katkıları kullanarak hava boşlukları oluşturarak veya atık lastik, geri dönüştürülmüş plastikler gibi hafif malzemeler kullanarak sağlanabilir. Hafif inşaat malzemesinin yapılarda kullanımının; ekonomiklik, deprem etkisi, ısı ve ses yalıtımı, donma-çözülme vb. birçok problemin çözümünde önemli etkisi bulunmaktadır (Demirboğa vd., 2001).

2.1.1. Hafif betonun kullanım alanları

Hafif betonun kullanım alanları genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Bölme duvar yapımında,
- Yangın ve korozyona karşı dayanıklılık gerektiren alanlarda,
- Hafiflik sağlamak amacıyla döşeme ve çatı dolgusunda,
- Prefabrik yapı bloklarının üretiminde,
- Su borularının yalıtımında,
- Dekoratif amaçlı mimari kaplamalarda,
- Genel olarak ısı ve ses yalıtımı gerektiren uygulamalarda,
- Çatılarda ısı yalıtımı amacıyla,
- Uzun açıklıklı köprü döşemelerinde hafif betonlar kullanım alanı bulmaktadır (Agrawal vd., 2021).

2.1.2. Hafif betonun avantaj ve dezavantajları

Hafif agrega kullanımının getirmiş olduğu avantajlar, dünyada bu agregalar ile yapılan hafif betonların kullanımını yaygınlaştırmıştır (Chandra and Berntsson, 2002). Hafif betonun bazı olumlu ve olumsuz yönleri şu şekilde özetlenebilir.

Hafif betonun geleneksel betona kıyasla olumlu yönleri;

- İyi ısı ve ses yalıtımı sağlamaktadır.
- Hafif olması sebebiyle taşınması ve montajı kolaydır.
- Geleneksel betona göre daha düşük ölü yük taşınması nedeniyle, deprem kuvvetleri de buna paralel olarak azalmakta ve yıkıcı etkisi zayıflamaktadır.
- Üretimlerinde bazen atık ürünler kullanıldığından çevre dostu olabilir.
- Yangına karşı dayanıklıdır.

Hafif betonun geleneksel betona kıyasla olumsuz yönleri;

- Elastisite modülleri daha düşüktür.
- Dayanımı geleneksel betonlara kıyasla daha düşüktür
- Betonda ayrışma riski, sünme ve rötre daha yüksektir.
- Boşluklu yapılarından dolayı aşınmaya karşı gösterdiği direnç genellikle daha azdır.
- Rezervin yetersiz olduğu bölgelerde hafif betonun üretim maliyeti artabilmektedir (Nayır, 2021).

2.1.3. Hafif beton agregaları

Hafif beton yapımında kullanılan bu agregalar hem doğal hem de yapay olabilmektedir. Genelde bir volkanizma ürünü olarak meydana gelen doğal hafif agregalar; gözenekli yapılarıyla geniş hacimsel dağılım gösterir. Taşıyıcı hafif beton için gereken yapay agregaların üretimi için ise henüz Türkiye’de bir sanayi kolu kurulmamıştır. Ancak yurtdışında bu alanda yaygın bir kullanım söz konusudur (Gönen, 2009).

2.1.3.1. Doğal hafif agregalar

2.1.3.1.1. Pomza

Doğal bir volkanik kayadır. Boşluklu, süngerimsi bir yapıda olan pomza; fiziksel ve kimyasal etkenlere karşı belirli bir düzeyde dayanıklılık gösterebilmektedir. Doğal olarak kullanılmasının yanında kırma ve eleme suretiyle beton yapımında da pomza agregası olarak

kullanılabilmektedir (Akkaş, 2011). Asidik pomza ve bazik pomza olmak üzere ikiye ayrılır. İnşaat sektöründe yaygın kullanıma sahip olan asidik pomza beyaz veya kirli renktedir. Bazik pomza ise kahverengi veya siyah renktedir (Gündüz vd., 2001).

İnsanların barınma ihtiyacının karşılanabilmesi için günümüzde yüksek katlı yapılar inşa edilmektedir. Ancak bu durum betonun kütlesinden dolayı binanın öz ağırlığında ciddi manada artışa sebebiyet vermektedir. Bu ağırlığın azaltılması amacıyla betonun yaklaşık %75 'ini oluşturan doğal agreganın en azından belirli bir miktarında olmak üzere pomza taşı kullanılan uygulamalar ve çalışmalar bulunmaktadır. Pomza taşı normal agregaya oranla daha hafif olması sebebiyle betonun özgül ağırlığını da azaltmaktadır. Buna ek olarak, gözenekli yapısı ısı ve ses yalıtımına katkı sağlamaktadır.

2.1.3.1.2. Diatomit

Mikroskopla görülebilecek kadar küçük boyutta ve su yosunları sınıfından olan tek hücreli diatomların silisli kavkılarının birikerek fosilleşmesi sonucu meydana gelen organik tortul kayalardır (Meisinger, 1985; Borat, 1992).

Diatomit, yapı sektöründe çimento ve bentonitli hafif tuğlalarda karışım malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda, betonda %3 oranında diatomit kullanımı, basınç ve çekme dirençlerini sırasıyla %20 ve %10 artırdığını göstermektedir. Ayrıca yüksek gözenekli yapısından dolayı ısı ve ses yalıtımında da önemli katkılar sağlamaktadır (Uygun, 1976).

2.1.3.1.3. Perlit

Perlit, silis açısından zengin volkanik kayalardır. Perlitin tanımına bakacak olursak; volkanik patlama sonucu meydana gelen magmanın asit fazında oluşan lavlarının soğuyarak gözle veya mikroskopla görülecek şekilde kırılmasıyla oluşan ve bünyesinde %2-%6 oranında su bulunduran volkanik bir camdır. Belirli bir sıcaklığa kadar ısıtıldığında genişler ve genişleme neticesinde son derece hafif ve gözenekli bir yapı kazanır (Emiroğlu, 2012; Gönen, 2009).

Yapılan araştırmalara göre ülkemiz perlit rezervi bakımından oldukça zengin bir ülke konumundadır. Dünya genelindeki potansiyel perlit rezervlerinin yarısından fazlası Türkiye'de

yer almaktadır (Uyanık, 2005). Dünya perlit rezervleri Tablo 2.1.'de görülmektedir.

Tablo 2.1. Dünya perlit rezervleri (Milyon Ton) (US Geological Survey, 2009)

Ülkeler	Görünen Rezervler	Olası Rezervler
Amerika	50	200
Yunanistan	50	300
Türkiye	-	5.700
Diğer Ülkeler	600	1.500
Toplam	700	7.700

Perlit üretiminde Çin, 1,9 milyon ton ile lider konumda olup, Yunanistan ve Türkiye bu üretim sıralamasında sırasıyla ikinci ve üçüncü sıradadır. 2018 ve 2019 yıllarındaki dünya perlit üretim miktarları Tablo 2.2' de verilmektedir.

Tablo 2.2. Dünya perlit üretimi (Bin Ton) (US Geological Survey, 2020)

Ülkeler	2018	2019
ABD	510.000	520.000
Türkiye	650.000	650.000
Çin	1.900.000	1.900.000
Yunanistan	750.000	800.000
Macaristan	39.000	40.000
İran	20.000	20.000
Meksika	20.000	20.000
Yeni Zelanda	20.000	20.000
Ermenistan	45.000	45.000
Diğer Ülkeler	50.000	50.000
Toplam	4.020.000	4.100.00

Dünya perlit rezervleri incelendiğinde %74'ünün Türkiye'de bulunduğu görülmektedir. Bu nedenle perlit Türkiye için oldukça önemli bir mineraldir. Türkiye perlit rezervleri, Gül (2016)'ün çalışmasında MİGEM, 2007-2013 tarafından aktarılan bilgiye göre Tablo 2.3.'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Türkiye perlit rezervleri (Bin Ton) (Gül, 2016)

Bölge	Rezerv	Bölge	Rezerv
Kars- Sarıkamış	2.043.000	Ankara- Çubuk	51.000
Van- Erciş	1.400.000	Ankara- Kızılcahamam- Güvem	31.500
Bitlis- Adilcevaz ve Tatvan	940.000	Balıkesir- Savaştepe	26.000
Nevşehir- Derinkuyu- Acıgöl	800.000	Balıkesir- Sındırgı	21.206
Erzurum- Pasinler	386.824	Manisa- Saruhanlı	17.700
Çankırı- Orta- Kalfat	128.200	Kütahya- Avdan	11.500
İzmir- Bergama- Cumaovası- Foça	88.000	Ankara- Kızılcahamam- Çamkoru	8.000
Erzincan- Mollatepe	71.500	Ankara- Kızılcahamam- Korkmazlar	3.700
Toplam Rezerv			6.028.130

Türkiye perlit rezervleri açısından zengin bir ülke olmasına rağmen talebi oldukça azdır. İyi bir ses ve ısı izolasyon malzemesi olan ham perlit kayacı; kırma, öğütme ve eleme işlemleri neticesinde kullanılabilirdiği gibi doğal agrega olarak da değerlendirilebilmektedir. Ham perlitin, kırılmış, öğütülmüş ve farklı tane boyutlarına ayrılmış halleri; kanalizasyon borusu üretimi, iç ve dış inşaat sıvalar, su arıtma tesisleri, karayolları ve demiryolları olarak görünmektedir.

2.1.3.1.4. Tüf

Tüfler, volkanizma sırasında oluşan şiddetli patlamalarda katı halde dışarı püskürtülen, farklı tane büyüklüğündeki malzemelerin birikmesiyle meydana gelen piroklastik kayalardır (Pötzl vd., 2022). Tüf, inşaat sektöründe; sıvalarda, hafif yapı elemanlarında ve yalıtım elemanları yapımında kullanılmaktadır.

2.1.3.1.5. Lav cürufu

Lav cürufu, çeşitli volkanik aktiviteler sonucu oluşan ve bazaltik karakter gösteren lavların, patlamamın oluşturduğu basıncın etkisiyle, çatlaklardan sızması sonucu meydana gelen gözenekli, camsı volkanik bir kayadır (Kaldı, 2011). Lav cürufları, birbiriyle bağlantısız gözenekli bir yapıya sahip olması sebebiyle ısı ve ses izolasyonu sağlayabilmektedir. Cürufların

birçok kullanım alanı vardır. Çimento üretiminde, briket ve tuğla yapımında, dolgu malzemesi olarak, demiryolu balastında, çeşitli tarım uygulamalarında kullanılmaktadır (Uysal ve Bahar, 2018).

2.1.3.2. İşlenmiş doğal hafif agregalar

Mineral kökenli agregaların ısı işlem veya değişik endüstriyel işlemlerden geçmesi sonucu oluşan agregalardır.

2.1.3.2.1. Genleştirilmiş perlit

Öğütülen ve boyutlandırılan ham perlit, 400°C ön ısıtma ve ardından 750-1200°C ani ısıtma işlemlerine tabi tutularak bünyesinden çıkan buharın etkisiyle genişerek köpük agregasına dönüşür. Bu ürüne genleştirilmiş perlit denilmektedir (DPT, 2001).

Ülkemizde özellikle inşaat sektöründe; izolasyon malzemesi, perlitli sıva, yüzey döşemeler, perlit agregalı hafif yalıtım betonu ve hafif yapı elemanı yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca sanayi alanında; filtre yardımcı malzeme, ilaç ve kimya sanayiinde, sanayide ısı yalıtım malzemesi, seramik ve cam sanayiinde kullanılırken, tarım alanında ise; içerisinde toprağın fiziksel özelliklerini artıran “substrat” madde bulundurması sebebiyle de tarla tarımında, bahçe ve seracılıkta kullanılmaktadır (DPT, 2001).

2.1.3.2.2. Genleştirilmiş kil

Sinterleşme süreci hızlı olan ve 1100°C- 1300°C arasında belirli bir hacim artışı gösteren kil, killi şist ve şeyllere genel olarak genişleyen killer denir. Hafifliği, yüksek dayanımı ve ısı yalıtımı sağlaması başlıca özellikleri olan bu malzemeler yapı sektöründe hafif yapı elemanlarının yapımında hafif agrega malzemesi olarak değerlendirilebilmektedir (Gönen, 2009).

2.1.3.2.3. Genleştirilmiş vermikülit

Vermikülit, genişleme özelliğine sahip tüm mika grubu minerallerini içeren genel bir terimdir. Mineraloji açısından ise, tek başına bir grup oluşturan sulu magnezyum, alüminyum, demir silikat olarak da tanımlanabilir. Renkleri genellikle sarımsı kahverengi, yeşil veya siyah

tonlarında görülebilmektedir. Türkiye’de bilinen vermikülit rezervleri ise Malatya (Darende-Kuluncak), Eskişehir (Sarıcakaya), Sivas (Yıldızeli- Karakoç) ve Elazığ (Harput- Arduçluk) civarındadır (DPT, 2001). Ham halinin kullanılması oldukça az olmasıyla birlikte endüstride en çok geliştirilmiş hali tercih edilmektedir.

Genleştirilmiş vermikülit, ısı ve ses yalıtımı, hafif yapı malzemelerinin yapımı, dökümhaneler ve çelik fabrikalarında gerek yalıtım özellikleri ve kolay uygulanabilirliği gerekse hafifliği ve ateşe karşı dayanıklılığıyla tercih edilir (Toksoy, 1997).

2.1.3.3. Yapay hafif agregalar

Endüstriyel üretim süreçleriyle doğal malzemelerin işlenmesi veya atık malzemelerin geri dönüştürülmesi sonucu elde edilen düşük yoğunluklu agregalara yapay hafif agregalar denir. Özellikle sürdürülebilirlik projelerinde ön plana çıkan bu agregalar hafif beton üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.1.3.3.1. Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufu, pik demirin yüksek fırında üretimi sırasında elde edilen bir yan üründür. Genel olarak; silis (SiO_2), kalsiyum oksit (CaO), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve magnezyum oksit (MgO) gibi bileşenleri içerir.

Yüksek fırın cürufu çeşitli endüstriyel alanlarda farklı şekilde değerlendirilebilir:

- Betonda yüksek dayanıklılık ve nihai dayanım, düşük hidrasyon ısıyı elde etmek için çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılması.
- Bazı cam ve seramik üretiminde hammadde olarak kullanılması.
- Yol inşaatlarında temel ve alt temel malzemesi olarak kullanılması.
- Tarım alanında toprak düzenleyici olarak kullanılması.
- Betonda hafif agrega olarak kullanılması. (TÇÜD, 2015)

Yüksek fırın cürufunun bu sektörlerde değerlendirilmesi hem maliyet tasarrufu hem de çevresel yarar sağlamaktadır.

2.1.3.3.2. Uçucu kül

Kömürün termik santrallerde yakılması sonucunda meydana gelen ve baca gazları ile taşınan ince taneciklerin farklı yöntemlerle tutulmasıyla elde edilen yan ürüne uçucu kül denilmektedir. İçerisinde genellikle silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve kalsiyum oksit (CaO) gibi bileşenler içerir. İnşaat sektöründe, betonun mukavemetinin artırılması, su ihtiyacının azaltılması ve işlenebilirliğin iyileştirilmesi için çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılır. Ayrıca gazbeton ve tuğla gibi hafif yapı elemanlarının dayanıklılığının artırılması için bu malzemelerin üretiminde de kullanılır. Böylelikle endüstriyel bir yan ürün olan uçucu kül, uygun şekilde değerlendirilerek faydalı bir malzeme olarak kullanılmış olur. Hafif agra olarak beton üretiminde de kullanılabilir (Arescimento, 2017).

2.2. Atık Lastikler

Atık lastikler, kullanım ömürlerini tamamlamış araç lastikleri olup uygun şekilde yönetilmediklerinde çevreye ve insan sağlığına negatif yönde etki edebilirler. Bu nedenle, atık lastiklerin geri dönüşümü ve yerinde kullanımı büyük önem arz etmektedir.

2.2.1. Atık lastiklerin çevresel etkileri

- Atık lastiklerin kontrolsüz bir şekilde depolanması olası yangınlara neden olabilir. Bu yangınlar, uzun süreli ve kontrolü zor olabilir. Böylelikle atmosfere yüksek miktarda zararlı gaz salınımına yol açılmış olur.
- Depolama alanlarında biriktirilen atık lastikler su birikintilerine sebebiyet verebilirler. Bu su birikintileri de sivrisinek gibi hastalık taşıyan canlıların üremesine olanak tanır. (Laftah and Rahman, 2025).

2.2.2. Atık lastiklerin geri dönüşümü ve kullanım alanları

Atık lastiklerin geri dönüşüm işlemleri ya çevreci olmadığı için ya da yüksek maliyetli olması sebebiyle sürdürülebilir çözüm olmaktan çıkmış, bu durum insanları, atık lastiklerin yeniden kullanılması veya geri dönüştürülmesi için yeni çözümler bulmaya teşvik etmiştir.

Atık lastiklerin geri dönüştürülmesi neticesinde elde edilen kauçuk, yeni ürünlerin imalatında hammadde olarak kullanılabilir. Ayrıca çok geniş endüstriyel alana sahip inşaat sektöründe atık lastiklerin kullanılması hem bu atık lastikleri değerlendirmek için hem de çevre dostu iyi bir yöntem olarak düşünülmüştür. 2023 yılı içerisinde üretilen hazır beton Türkiye’de 115 milyon m³, Avrupa’da 239 milyon m³ iken 2022 yılı içerisinde asfalt yol Türkiye’de 30,1 milyon ton, Avrupa’da ise 279,4 milyon ton olarak görünmektedir. Bu miktarlar dikkate alındığında, atık lastiklerin inşaat mühendisliği sektöründe kullanılmasının geri dönüşüme etkisinin büyük olacağı ve doğa dostu bir yöntem olacağı görülmektedir (EAPA, 2022; THBB, 2023). Atık lastiklerin geri dönüştürülerek kauçuk parçacıklar halinde inşaat mühendisliği uygulamalarındaki başlıca kullanım alanları özetle Tablo 2.4’de verilmiştir.

Tablo 2.4. Atık lastiklerin geri dönüştürülerek kauçuk parçacıklar halinde inşaat mühendisliği uygulamalarındaki kullanım alanları (Ulusoy, 2021)

Beton	Kendiliğinden yerleşen beton Geleneksel beton Hafif beton Geri dönüşümlü agrega betonu Harç Özel beton
Geoteknik	Zemin dolgu malzemesi ve iyileştirmeleri
Ulaştırma	Asfalt kaplama performansının iyileştirilmesi

2.2.3. Türkiye’de kullanılmış lastiklerin mevcut durumu ve değerlendirilmesi

Türkiye’de kullanılmış lastikler, her yıl artan araç sayısına paralel olarak büyük bir atık potansiyeli oluşturmaktadır. Dünya genelinde 17 milyon ton/yıl kadar ömrünü tamamlamış lastik oluşmakta olup bu miktar ülkemizde yaklaşık 180.000 ila 300.000 ton aralığındadır (Eryılmaz ve Demirarslan, 2019). “Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği ve Uygulamaları 2018” raporuna göre, 2017 yılı içerisinde toplanması öngörülen ömrünü tamamlamış lastik miktarı 236.660 ton iken bunun sadece 184.313 tonu geri toplanmış ve bu miktarın da 163.000 tonu LASDER tarafından toplanmıştır. LASDER’in 2018 yılında topladığı ömrünü tamamlamış lastik miktarı ise 178.133 ton olmuştur. Toplanan bu miktarın yaklaşık %56 lık kısmı malzeme geri kazanımına, %9 luk kısmı pirolitik yağ kazanımına, %35 lik kısmı ise çimento sektörüne enerji amaçlı ek yakıt olarak değerlendirilmiştir (Eryılmaz ve Demirarslan, 2019; Anadolu Ajansı, 2019).

Atık lastiklerin değerlendirilmesinde çevreye duyarlı ve zarar vermeyen teknikler kullanılması, hammadde olarak kullanılması için dönüşüme elverişli olması, ekonomik olması ve ticari değeri olan ürün elde edilebilmesi gibi durumlar göz önünde bulundurulmalıdır. Ömrünü tamamlamış lastiklerin yönetiminde yaygın olarak uygulanan teknikler ise aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Yeniden kullanma
- Enerji üretme
- Malzeme geri kazanımı
- Geri dönüştürme
- Depolama

Ülkemiz, artan atık lastik miktarıyla başa çıkmak ve bu atıkların ekonomik değerini yükseltmek için etkin bir yönetim sistemi oluşturmalıdır. Bu hem çevresel koruma hem de döngüsel ekonomiye katkı sağlayacaktır.

2.2.4. Atık lastiklerin Uluslararası Mevzuatlar çerçevesinde yönetimi

Atık lastik yönetimi, çevresel etkileri minimize etmek ve ekonomik olarak değerlendirmek amacıyla dünya genelinde çeşitli uluslararası mevzuatlarla düzenlenmektedir. Bu mevzuatlar, atık lastiklerin toplanması, nakledilmesi, geri kazandırılması ve imhasını kapsamaktadır.

Bizim de taraf olduğumuz Basel Sözleşmesinde; tehlikeli atıkların uluslararası taşınması ve bertarafının kontrol altına alınması amaçlanmıştır. Söz konusu sözleşmenin Şubat 1998'de yapılan 4. Toplantısı sonucunda yayınlanan doküman da;

- Ek- 8, liste A'da (Annex VIII-List A) zararlı atıkların listesi verilmiştir.
- Ek- 9, liste B' de (Annex IX-List B) yer alan atıkların ise, ek 8 liste A'da verilen maddelerden, ek 3'de verilen tehlikeli özellikleri gösterecek miktarda içerisinde barındırmadığı takdirde zararlı olmayan atıklar verilmiştir.

Atık lastikler, Basel Sözleşmesine göre Ek-8 liste A'da yer almamaktadır. Ek-9 liste B'de ise B3 organik, inorganik ve metal içeren atıklar listesinde B3140 altında tanımlanmıştır (Doğan, 2005).

Avrupa Birliği ülkelerinde kullanılmış lastiklerin yönetimine ilişkin direktifler;

- **Direktif 2000/53/EC** : Hurda araçların geri dönüşümü ve bertarafını kapsar. Araçlar için %95 geri dönüşüm hedefi belirler.
- **Direktif 1999/31/EC** : Atıkların düzenli depolama alanlarına gönderilmesini sınırlar. Bu direktif, düzenli depolama alanlarında atık lastiklerin bertarafını yasaklar.
- **Avrupa Lastik ve Kauçuk Üreticileri Derneği (ETRMA)** : AB ülkelerinde lastik geri dönüşümünü teşvik etmek ve teknik standartlar oluşturmak amacıyla çalışır (ChemRisk LLC, 2009).

Atık lastiklerin yönetimine ilişkin genel ilke ve politikalar ise;

- **Kirlilik kontrolü:** Atık lastikler kontrolsüz bir şekilde doğaya bırakıldığında yangın riski, su birikintilerinde haşere üremesi ve hava kirliliği gibi ciddi çevresel tehditler oluşturur. Bu nedenle, Birleşmiş Milletler tarafından hazırlanan teknik rehberde, atık lastiklerin çevresel olarak güvenli bir biçimde yönetilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (UNEP, 2024)
- **Geri dönüşüm teşvikleri:** Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı raporlarına göre Türkiye’de 2015 yılında yenileme pazarına 315.000 ton lastik satılmış olup bu miktarın yaklaşık 190.000 tonluk kısmı LASDER üyelerinin yenileme pazarına sattığı miktardır. Ayrıca LASDER her yıl 100.000 tonu aşan ömrünü tamamlamış lastikleri ülkemiz genelinde toplayarak geri kazanımını sağlamaktadır (LASDER, 2020). Bu süreçte en yaygın yöntem çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak kullanımı ve granül üretimidir.
- **Döngüsel ekonomi yaklaşımları:** Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan Döngüsel Ekonomi Eylem Planı’nda, atık lastiklerin geri dönüştürülerek ikinci hammadde olarak kullanılması, kaynak verimliliğini artırmak ve karbon ayak izini azaltmak için temel stratejilerden biri olarak sunulmuştur (European Commission, 2020).

Bu düzenlemeler, atık lastiklerin çevresel etkilerini minimize ederken, ekonomik potansiyellerini de artırmayı amaçlamaktadır. Ulusal düzeyde mevzuatlar bu uluslararası düzenlemelere dayalı olarak şekillendirilmektedir.

2.2.5. Ülkemizde atık lastik yönetimine dair mevzuatlar

Türkiye'de atık lastik yönetimi, çevre ve insan sağlığını koruma amacıyla çeşitli mevzuatlarla düzenlenmiştir. Bu mevzuatlar, ömrünü tamamlamış lastiklerin (ÖTL) toplanması, nakledilmesi, geri dönüşümü ve imhasına ilişkin yasal çerçeveyi belirler.

Ülkemizde atık lastik kapsamında çıkarılan en önemli yönetmelik 25 Kasım 2006 tarih ve 26357 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan ve 1 Ocak 2007 tarihinde yürürlüğe giren “Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği” dir. Bu yönetmelik, Türkiye'de ÖTL çevreye zarar vermeden yönetimini sağlamak amacıyla hazırlanmıştır. ÖTL'lerin çevreye zarar vermeden toplanması, nakledilmesi, geçici muhafazası, geri kazanılması, imha edilmesi ve ithalat- ihracatına ilişkin yasal sınırlama ve yükümlülükler bu yönetmelik kapsamında belirlenmiştir. Temel ilkeleri;

- Hem çevrenin korunması hem de ekonomik gelir elde edilmesi için ÖTL'lerin geri kazanımı esastır.
- Hava kirliliğinin önlenmesi ve insan sağlığının korunması amacıyla ÖTL'lerin yakılması yasaktır.
- Ülkemizde oluşan atıkların yönetiminin kolaylaştırılması ve çevrenin korunması amacıyla ÖTL'lerin ithalatı yasaktır.
- Çevre kirliliğinin önlenmesi amacıyla sanayi ve benzeri yerlerde ÖTL'lerin açık alanda depolanması veya biriktirilmesi yasaktır (Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği, 2006).

Ülkemizde; 2 Nisan 2015 tarih ve 29314 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan “Atık Yönetimi Yönetmeliği” kapsamında ÖTL'ler “tehlikeli olmayan atık” olarak sınıflandırılmıştır (Atık Yönetimi Yönetmeliği, 2015).

Bu mevzuatlar, ömrünü tamamlamış lastiklerin (ÖTL) çevreye zarar vermeden toplanması, taşınması ve geri kazanımı süreçlerini düzenleyerek, doğal kaynakların korunmasına ve çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır.

2.3. Kaynak Özetleri

Günümüzde sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirme çabaları, doğal kaynakların korunması veya etkin kullanılması ve atık yönetiminin uygulanabilir bir şekilde sağlanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda, hafif betonlarda hem doğal hafif agregaların hem de atık bazlı alternatif malzemelerin kullanımı ile ilgili çalışmalar giderek artmaktadır. Literatür taramasında ham perlit agregası içeren betonlarda atık lastiğin agrega olarak kullanımına ilişkin bir çalışmaya rastlanmamıştır. Dolayısıyla hafif betonlar, perlit agregalı hafif betonlar, atık lastik içeren betonlar ve hafif betonlarda donma-çözülme etkisini inceleyen çalışmaların bir kısmının özetleri bu bölümde kronolojik olarak sunulmuştur.

Chandra ve Berntsson (2002) yazdıkları “lightweight aggregate concrete” isimli kitapta, hafif agregalı betonların tarihsel gelişimi, malzeme özellikleri, üretim teknikleri ve uygulama alanları üzerine detaylı bilgiler sunmaktadır. Perlit, genleştirilmiş kil, vermikülit gibi doğal ve yapay agregaların fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiş, bu agregaların betona etkisi mekanik ve dayanıklılık parametreleri açısından sunulmuştur. Ayrıca, hafif agregalı betonların ısı iletkenliği, yangına dayanım, elastisite modülü gibi birçok mühendislik özelliği tartışılmıştır.

Demirboğa ve Gül (2004) yaptıkları çalışmada genleştirilmiş perlit ve pomza agregasının betonların donma-çözülme dirençlerine etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda perlit agregası ile üretilen betonların donma-çözülme direncinin %130’a kadar arttığını bulmuşlardır.

Babu ve Babu (2004) gerçekleştirdikleri çalışmada genleştirilmiş polistiren köpük agregalarının hafif betonlar üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bağlayıcı malzeme olarak çimento ile ikame olacak şekilde %50 uçucu kül kullanmışlardır. Genleştirilmiş polistiren, normal agrega ile kısmen ve tamamen ikame edilmiştir. Dolayısıyla ürettikleri betonların yoğunlukları 550 kg/m^3 – 2200 kg/m^3 olacak şekilde geniş bir aralıkta değişim göstermiştir. Uçucu kül kullanılan genleştirilmiş polistiren köpük içeren betonların, daha önce literatürde sunulmuş uçucu kül içermeyen polistiren köpük içeren betonları inceleyen çalışmalara kıyasla daha az su emme değerlerine sahip olduğu ve daha iyi kimyasal direnç gösterdikleri raporlanmıştır. Polistiren köpük kullanılan betonlarda hızlı klor geçirimsizlik değerlerinin %50’den fazla oranda azaldığı ortaya çıkmıştır.

Güneyisi vd. (2004) yaptıkları çalışmada, silis dumanı içeren ve içermeyen atık lastik katkılı betonların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Hacimce agrega hacminin %2,5 - %50'si arasında değişen farklı kauçuk oranları kullanılmıştır. Silis dumanı ise %5 - %20 arasında kullanılmıştır. 0,4 - 0,6 su/bağlayıcı oranlarına sahip toplamda yetmiş farklı içeriğe sahip betonların incelendiği çalışmada 86 MPa'ya varan dayanımlar elde edilebilmiştir. Kauçuk oranlarının artmasının dayanım ve elastisite modülünü düşürdüğü, silis dumanı kullanımının ise mekanik özellikleri iyileştirdiği raporlanmıştır. 16 MPa – 32 MPa dayanım aralığında %25 oranına kadar kauçuk kullanılabileceği çalışmada belirtilmiştir.

Topçu ve Işıkdağ (2008) tarafından yapılan çalışmada, geliştirilmiş perlit agregasının farklı çimento türleri ve dozajlarıyla betonun taze ve sertleşmiş özelliklerine etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, %30 geliştirilmiş perlit agregası ikamesiyle 20-30 MPa arasında basınç dayanımı elde edildiğini ve minimum birim hacim ağırlığının 1800 kg/m³ olduğunu göstermiştir. Uygun oranlar seçilmek koşuluyla geliştirilmiş perlit agregası kullanılarak C20 – C40 kalitesinde betonlar üretilebileceği ortaya konulmuştur.

Sancak vd. (2008) yaptıkları deneysel çalışmada, pomza agregası kullanılarak üretilen hafif betonlar ile normal ağırlıklı betonların yüksek sıcaklık etkisi karşısındaki davranışlarını kıyaslayarak incelemişlerdir. Ürettikleri betonları 1000°C'ye varan farklı sıcaklıklara maruz bırakmışlardır. Silis dumanının etkisini incelemek amacıyla silis dumanı %0, %5 ve %10 oranlarında çimento ile ikame edilerek betonlar üretilmiştir. Ayrıca süperakışkanlaştırıcının etkisini belirlemek amacıyla karışımların yarısı %2 oranında süperakışkanlaştırıcı kullanılarak üretilmiştir. Sonuç olarak; üretilen hafif betonların normal betonlara kıyasla %23 oranında daha düşük birim ağırlığa sahip olduğunu bulmuşlardır. Hafif betonların yüksek sıcaklıklar altındaki bozulma oranı normal betonlarda kıyasla daha az bulunmuştur. Süperakışkanlaştırıcı kullanımı betonların basınç dayanımlarının azalmasını azaltmıştır. Silis dumanı kullanılan betonların özellikle yüksek sıcaklıklarda (>800°C) basınç dayanımı kayıplarının yüksek olduğu raporlanmıştır.

Gökçe (2010) tarafından yapılan çalışmada, farklı boyutlardaki ham ve geliştirilmiş perlit agregalarının hafif beton üzerindeki etkileri incelenmiştir. Farklı agrega karışımları ve geliştirilmiş perlit kullanımı, betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini kayda değer biçimde etkilemiştir. Basınç dayanımı 10 MPa ile 86,4 MPa arasında değişmiş ve su emme oranları %2,6 ile %13,2 arasında bulunmuştur.

Bogas ve Gomes (2013) gerçekleştirdikleri çalışmada, yapay ve doğal agregaların beton üzerindeki mekanik etkilerini sistematik olarak incelenmiş, farklı agrega cinslerinin yoğunluk, su emme, gözeneklilik gibi özelliklerinin hafif agregalı betonların basınca karşı dayanımı, elastik davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda; düşük yoğunluklu agregaların, betonda daha fazla boşluk oluşturduğu ve bu durumun hem dayanımı hem de ultrases geçirgenliğini etkilediği tespit edilmiştir.

Eser (2014) yaptığı tez çalışmasında, doğal perlit agregası ve perlit tozu katkısıyla elde edilen yüksek dayanımlı hafif betonların mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin incelemiş ve 28 günlük basınç dayanımı 50 MPa seviyesine ulaşan betonlar elde edilmiştir. Bu betonların dayanım performanslarının benzer özgül dayanımlı normal ağırlık betonlara kıyasla üstün veya en azından eşdeğer olduğu gösterilmiştir.

Argunhan (2017) yaptığı çalışmada, yapı elemanlarında kullanılan atık lastiklerin ısı performansı üzerine yapılan bir incelemede, lastik agregaların betonun termal özelliklerini iyileştirdiği ve hafif beton üretiminde kullanılabilceği belirtilmiştir. Ayrıca, atık lastiklerin kullanımıyla üretilen hafif betonların, taşıyıcı hafif beton sınıfına girebileceği ifade edilmiştir.

Yılmaz vd. (2018) gerçekleştirdikleri çalışmada normal betonda iri agrega yerine %25 ve %100 oranlarında pomza agregası ikame ederek betonlar üretmişlerdir. İri agrega ile %100 pomza ikame edilerek üretilen betonların birim ağırlıkları $1750 \text{ kg/m}^3 - 1850 \text{ kg/m}^3$ arasında ölçülmüş olup hafif beton sınıfında yer almışlardır.

Tapan ve Engin (2019) gerçekleştirdikleri araştırmada, farklı boyutlardaki genişletilmiş perlit agregalarının ultra hafif betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi değerlendirilmiş olup daha büyük agrega boyutlarının boşluk hacmini ve su emme oranını artırırken, birim hacim ağırlığını, ısı iletkenliğini ve basınç dayanımını azalttığı bulunmuştur.

Topçu ve arkadaşlarının (2021) yürüttüğü araştırmada, atık lastik kullanılarak üretilen beton kompozitlerin süspansiyon teorisi ile incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen süspansiyon katsayıları ile yeni üretilecek lastik agregalı betonların mekanik özelliklerinin tahmin edilebileceğini öne sürmüşlerdir.

İpek ve arkadaşları (2022) tarafından ortaya koyulan derleme makalesinde, atık lastiklerin beton imalatında agrega olarak ikame edilmesinin taze ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. Sonuçlar, atık lastiklerin betonun birim ağırlığını düşürdüğünü ve basınç dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özellikleri olumsuz etkilediğini göstermektedir. Buna rağmen, atık lastiklerin hafifliği ve iyi ses emme kapasitesi, hafif beton uygulamaları için avantaj sağladığı belirtilmiştir.

Şimşek vd. (2022) gerçekleştirdikleri çalışmada, atık lastik kullanılmış betonlarda uçucu kül ikame edilmesinin aderans ve basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır. Uygun miktarlarda uçucu kül ile atık lastiğin beraber kullanımı, lastik ikameli betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinde olumlu yönde bir katkı sağlayarak beton performansını artırmakta olduğu belirtilmiştir.

Başığit ve arkadaşlarının (2023) ortaya koyduğu araştırmada, atık taşıt lastiklerinden elde edilen granül agregaların beton harcına katılmasının darbe dayanımına etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, lastik agrega oranı arttıkça darbe dayanımının arttığını göstermiştir. Bu tür betonların yapısal olmayan, kentsel peyzaj yapılarında kullanımı önerilmektedir.

Bulut ve Kandil (2024) gerçekleştirdikleri çalışmada farklı oranlarda atık lastiğin hem irisinin hem incesinin normal agrega ile aynı anda ikamesinin betonlar üzerindeki mekanik etkisini incelemiştir. Çalışmada farklı su/çimento oranı ve kür süreleri de parametre olarak incelenmiştir. Atık lastik kullanım oranlarının artması ile mekanik özelliklerde bozulmaların arttığını bildiren çalışmayla %8 oranına kadar atık lastik ikamesi ile yüksek dayanımlı betonların üretilebileceği ortaya konulmuştur. Ayrıca su/çimento oranının azalmasının ve kür süresindeki artışında mekanik özellikler üzerinde ciddi iyileşmeler meydana getirdiği savunulmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Agregalar

Hafif beton üretimlerinde kullanılan agreganın türü ham perlittir. Bu agregaya üç farklı büyüklükte tedarik edilmiş olup, bunların büyüklükleri; ince (0-4 mm), iri1 (4-12 mm) ve iri2 (12-15 mm) şeklindedir. Öncelikle elek analizi yapılarak agregaların granülometrik birleşimleri belirlenmiştir. Belirlenen granülometrik sonuçlarında, TS 802 (1985) standardına göre ideal eğriler aralığında granülometri eğrisi elde etmek için karışım agregası %25 iri1, %25 iri2 ve %50 ince agregaya oranında seçilmiştir. İnce atık lastik agregası (İALA) 0-4 mm olacak şekilde bir geri dönüşüm tesisinden elde edilmiştir. İALA'ya ait fotoğraf Şekil 3.1'de verilmiştir.



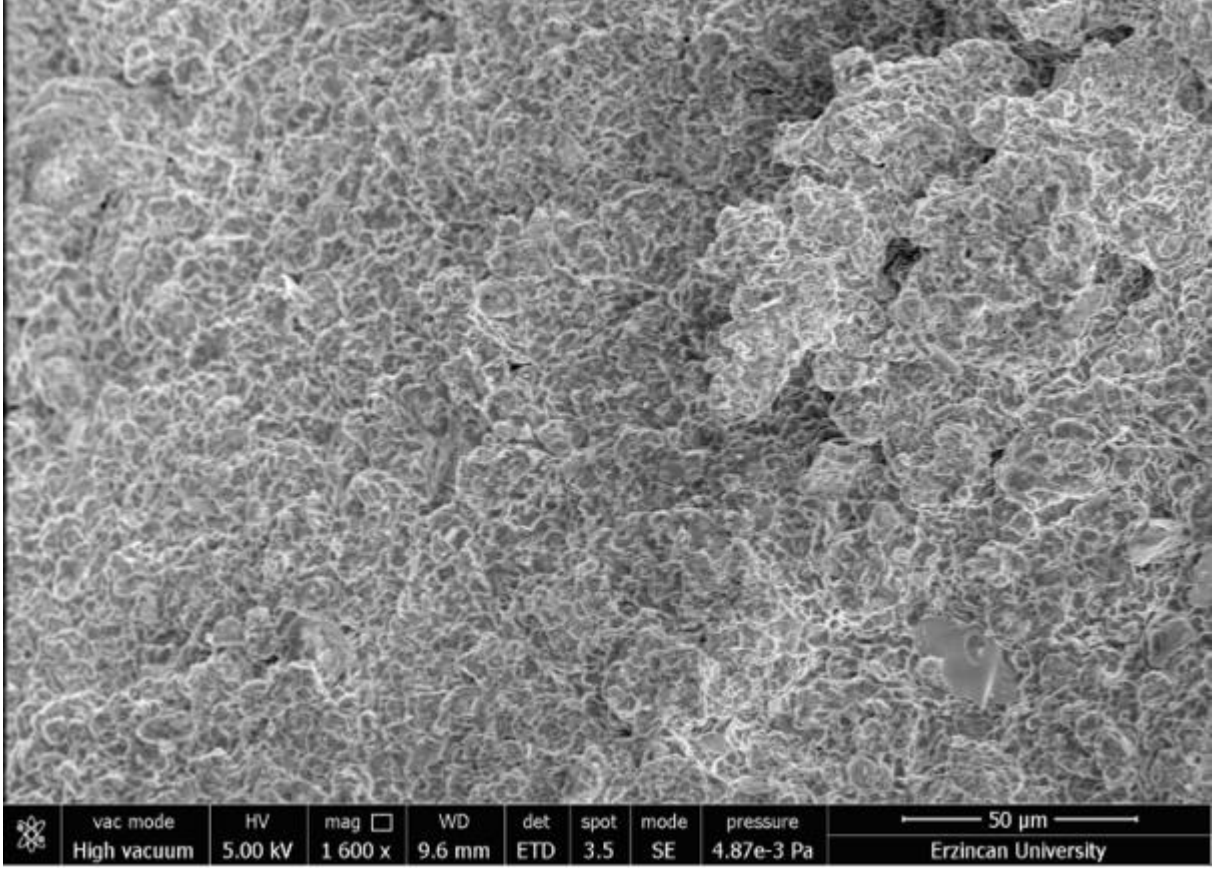
Şekil 3.1. İnce atık lastik agregası

Beton üretiminde kullanılan ham perlit agregaları için hesaplanan doygun yüzey kuru özgül ağırlıkları ve su emme (%) değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

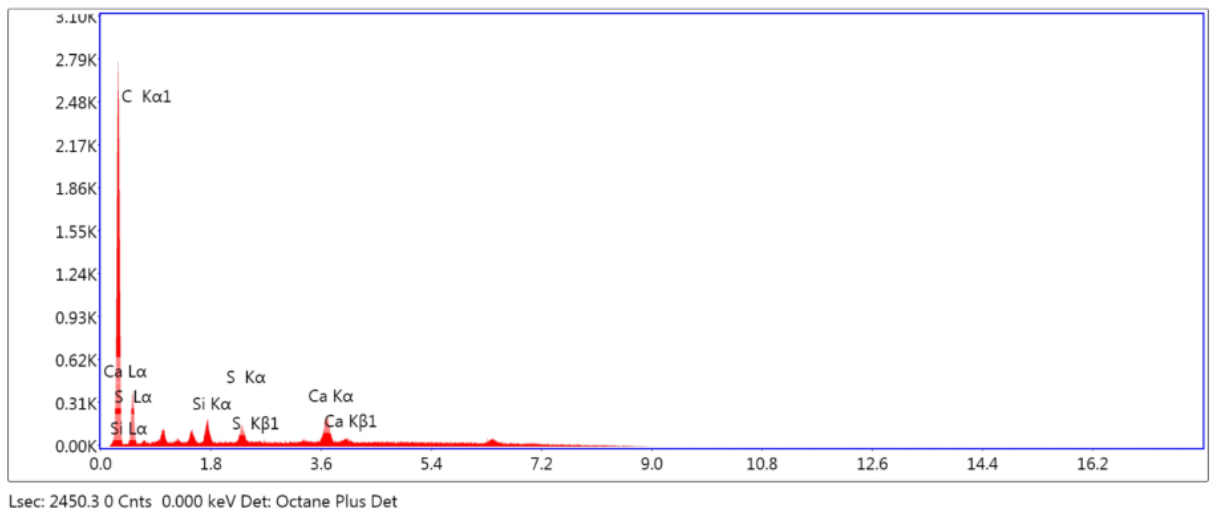
Tablo 3.1. Agregalara ilişkin doygun yüzey kuru özgül ağırlıkları ve su emme değerleri

Agrega Cinsi	Su emme (%)	Özgül ağırlık
Ham perlit agregası – İri1	4,68	1,95
Ham perlit agregası – İri2	4,85	1,91
Ham perlit agregası – İnce	4,06	2,03

Beton üretimlerinde kullanılan İALA'ya ait SEM görüntüsü Şekil 3.2'de, EDX analiz sonucu ise Şekil 3.3'te verilmiştir. Şekil 3.2'den görüleceği üzere kullanılan İALA'nın içeriğinde %90'dan fazla karbon (C) bulunmaktadır.



Şekil 3.2. Atık lastik agregasına ait SEM görüntüsü



Şekil 3.3. Atık lastik agregasına ait EDX analiz sonucu

3.1.2. Çimento

Beton üretimlerinde, Erzincan Çimento Fabrikasından alınan CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan çimentoya ait özellikler

Kimyasal özellikler		Fiziksel ve mekanik özellikler	
Bileşenler	(%)	32 mikron elek üstünde kalan (%)	7,77
SiO ₂	18,38	Özgül yüzey (Blaine) (cm ² /g)	3543
Al ₂ O ₃	4,43	Özgül ağırlık	3,10
Fe ₂ O ₃	3,01	Priz süresi	Başlangıç 170
CaO	61,9	(Vikat) (dak)	Bitiş 210
MgO	2,12	Su ihtiyacı (%)	30,46
SO ₃	2,89	Hacim genişmesi (mm)	1
Na ₂ O	0,21	Basınç	2 gün 29,8
Serbest CaO	1,19	Dayanımı	7 gün 43,6
K ₂ O	0,89	(MPa)	28 gün 53,5
Cl ⁻	0,01		
Kızdırma kaybı	3,64		

3.1.3. Su

Beton karışımlarında kullanılan su içilebilir şebeke suyudur.

3.1.4. Kimyasal katkı maddesi

Beton üretimleri esnasında hafif betonların çökme değerlerini belirli bir aralıkta tutmak amacıyla betonlara polikarboksilik eter esaslı bir süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi ilave edilmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Beton karışımları ve numunelerin hazırlanması

Bu çalışma kapsamında İALA'nın ham perlit agregası ile üretilen hafif beton özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, ince ham perlit agregası %0, %5, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında İALA ile hacimce ikame edilerek yedi farklı içerikte hafif beton üretilmiştir. Tüm

imalatlarda çimento miktarı 380 kg/m³ ve su/çimento oranı ise 0,5 olarak sabit tutulmuştur. Gerçekleştirilen üretilere ait beton bileşenleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Çalışmada gerçekleştirilen beton karışımları (kg/m³)

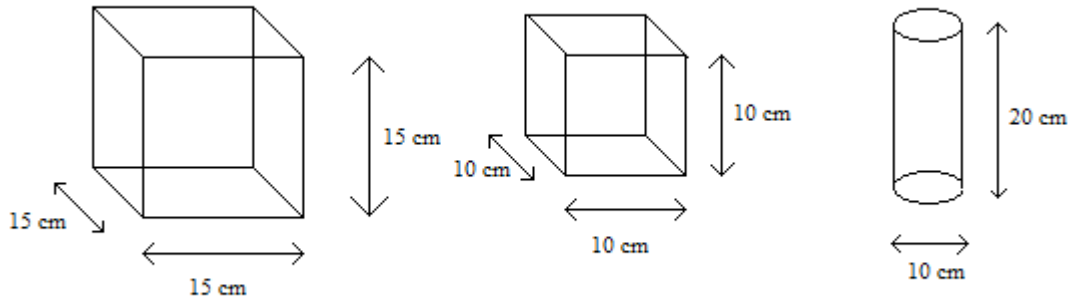
İALA oranı (%)	Çimento	Su	Ham Perlit Agregası (İri2)	Ham Perlit Agregası (İri1)	Ham Perlit Agregası (İnce)	İALA
0					671	0
5					637	18
10					604	35
20	380	190	314	329	537	70
30					470	105
40					402	140
50					335	175

TS 2511 (1977) standardı doğrultusunda tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen hafif betonlarda beton karışımı esnasında önce iri1 sonra iri2 ve en son olarak ise ince perlit agregası ile İALA beton mikserine eklenerek kuru bir şekilde 1 dk boyunca karıştırılmıştır. Daha önce hesaplanan miktarda doyma suyu agrega karışımına ilave edilerek mikser 1 dk boyunca çalıştırılıp agregaların doyma suyunu emmesi beklenilmiştir. Sonrasında çimentonun tamamı ve karışım suyunun yaklaşık dörtte üçü ilave edilerek mikserdeki malzemeler yaklaşık 3 dk karıştırılmıştır. Geri kalan suya ise belirlenen miktarda süperakışkanlaştırıcı ilave edilerek karıştırılmış ve elde edilen katkı maddeli su yavaş yavaş karışıma mikser çalışırken ilave edilmiş ve ilave edildikten sonra mikserdeki malzemeler 5 dk karıştırılarak beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4, beton üretimlerinde kullanılan mikserde ait fotoğrafı göstermektedir.



Şekil 3.4. Beton üretimlerinde kullanılan karıştırıcı

Karışım hazırlandıktan sonra üretilen her bir betonda çökme deneyi ve taze hal birim ağırlık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Üretim sonucu, taze beton deneylerinden sonra alınan numune çeşitlerine ait geometrik gösterim Şekil 3.5'te verilmiştir. 15 cm boyutlu küp numuneden 6 adet, 10 cm boyutlu küp numuneden 8 adet, 10 cm çapında, 20 cm boyutundaki silindir numuneden ise 8 adet alınmıştır. Bir üretimde kalıplanan numuneler Şekil 3.6'da sunulmuştur. 15 cm küp numuneler öncelikle ultrases geçiş hızı testine, sonrasında ise basınç dayanımı testine (3'ü 28 gün, 3'ü 90 gün sonunda), 10 cm küp numunelerin 4 adedi su emme deneyine (2'si 28 gün 2'si 90 gün sonunda), diğer 4 adedi ise kılcallık deneyine (2'si 28 gün 2'si 90 gün), silindir numunelerin 4'ü elektriksel özdirenç deneyine, sonrasında ise yarmada çekme dayanımı deneyine (2'si 28 gün 2'si 90 gün sonunda) tabi tutulmuştur. Diğer 4 adet silindir numune ise donma çözülme deney sonuçlarının elde edilmesinde kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Numunelerin şematik gösterimi



Şekil 3.6. Bir üretimde kalıplanan numuneler

Numuneler 24 saat boyunca kalıplarında bekletildikten sonra kalıplarından çıkarılmış ve deney zamanı gelene kadar Şekil 3.7’de gösterilen 23 °C’de sabit tutulan su kür tankında korunmuştur.



Şekil 3.7. Numunelerin yerleştirildiği kür havuzu

3.2.2. Yürütülen deneyler

3.2.2.1. Taze beton deneyleri

3.2.2.1.1. Çökme deneyi

TS EN 12350-2 (2010) standardı doğrultusunda gerçekleştirilen çökme deneyinde çökme hunisi eşit üç aşamada doldurulmuştur. Her bir aşamada beton yirmi beş kez şişlenmiştir. En son üstü mala ile düzeltilen beton dolu huni yavaşça yukarı çekilerek betonun huniden ayrılması sağlanmış ve betonun çökmesi Şekil 3.8’de gösterildiği gibi ölçülmüştür.



Şekil 3.8. Çökme deneyi

3.2.2.1.2. Taze beton birim hacim kütlesi deneyi

Bu deney kapsamında TS EN 12350-6 (2019) standardı doğrultusunda taze hafif betonların birim hacim kütlesi belirlenmiştir. 15x15x15 cm küp numune kalıbının darası alındıktan sonra içine beton numune yerleştirilip, sıkıştırılıp, yüzeyi mala ile düzlenip fazla beton alındıktan

sonra tartım yapılarak betonların kütleleri bulunmuştur. Daha sonra kütlelerin hacme bölünmesi ile betonların birim hacim kütleleri elde edilmiştir.

3.2.2.2. Sertleşmiş beton deneyleri

3.2.2.2.1. Kuru hal birim hacim kütlesi deneyi

Kuru birim hacim kütlelerin belirlenmesinde 10 cm küp numuneler kullanılmıştır. 28 günlük kür süresinin ardından kür havuzundan çıkarılan numunelerin yüzeyleri kurulanıp Arşimet terazisinde suda tartılarak hacimleri belirlenmiştir. Daha sonra fırında değişmez ağırlığa gelinceye kadar 100°C sıcaklıkta bekletilmiş ve tartılarak kütleleri belirlenmiştir. Kütlelerin hacme bölünmesi ile birim hacim kütleler elde edilmiştir. Bu deney, su emme ve kılcallık deneylerinde numuneleri kurutmak için kullanılan sıcaklık ayarlı fırın Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Etiv

Tartımlarda kullanılan tartı Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Tartı

3.2.2.2.2. Basınç dayanımı deneyi

TS EN 12390-3 (2019) standardı doğrultusunda gerçekleştirilen basınç dayanımı deneyinde 28 gün ve 90 gün kür havuzunda bekletilen 15 cm boyutlu küp numuneler kullanılmıştır. Kür havuzundan çıkarılan numuneler yüzeyleri kuruyana kadar bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuşlardır. Deneylerde 100 ton kapasiteli basınç dayanımı test makinası kullanılmış olup deneye ait görsel Şekil 3.11’de sunulmuştur.



Şekil 3.11. Basınç dayanımı deneyi

3.2.2.2.3. Yarmada çekme dayanımı deneyi

Yarmada çekme dayanımı deneyi 28 ve 90 günlük 10x20 cm boyutlarındaki silindir numuneler üzerinde TS EN 12390-6 (2010) standardı doğrultusunda yapılmıştır. Deneyde Şekil 3.12’de görüldüğü gibi test cihazının basınç levhaları arasına silindir beton numune yatay olarak yerleştirilerek (test cihazı yüzeyi ile numune yüzeyi arasında ahşap konularak) basınç uygulanmış olup düşey çap doğrultusunda yarılmaya kadar yüklenmiştir.



Şekil 3.12. Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği (solda) ve yarılan numune (sağda)

3.2.2.2.4. Elektriksel özdirenç deneyi

Elektriksel özdirenç deneyi 10 cm çaplı, boy/çap oranı 2 olan silindirik numuneler üzerinde ASTM C 1760 standart dikkate alınarak 28 gün kür gören betonlar için uygulanmıştır. Öncelikle numuneler kür havuzundan çıkarılmış ve tüm yüzeyleri bir bez yardımıyla kurulanmıştır. Daha sonra voltaj ayarlı cihaz 60 volt gerilime ayarlanmış ve bu gerilimde numune üzerinden geçen akım okunmuştur. Numunenin baş ve uç kısmına tuzlu su çözeltisinde bekletilen bezler yerleştirilmiş ve akım 10 cm çapında dairesel kesitli bakır üzerinden bu bezlere temas ettirilerek numuneye verilmiştir. Elde edilen voltaj ve akım değerlerinden numunelerin özdirenci $k\Omega.cm$ birimi cinsinden hesaplanmıştır. Teste tabi tutulan numune ve test ekipmanları Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13. Elektriksel özdirenç ölçümünde kullanılan ekipmanlar ve düzenek

3.2.2.2.5. Kılcallık deneyi

Deney 28 ve 90 gün standart kür gören 10x10x10 cm boyutlarındaki beton numunelerde gerçekleştirilmiştir. Deney günü kür havuzundan alınan numuneler 70°C'ye ayarlanmış fırına yerleştirilerek iki gün süreyle kurutulmuş ve sabit ağırlığa ulaşmaları sağlanmıştır. Fırından çıkarılan numunelerin laboratuvar ortamında soğuması beklenmiştir. İlgili standartta belirtildiği gibi numunelerin sadece suya temas eden alt yüzeyden su emmesi için suya temas edecek olan yüzeyin bitişiğindeki dikey yüzeyler bant ile sarılarak yalıtılmıştır. Kılcallık deneyinde kullanılan düzenek Şekil 3.14'te sunulmuştur.



Şekil 3.14. Kılcallık deney düzeneği

Numuneler tepsi içerisine yerleştirilen metal çubuklar üzerine yaklaşık 2 mm suyun içinde kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Deney işlemine başlamadan önce numunelerin ağırlıkları ölçülmüş olup daha sonrasında su temasından itibaren 5. dk, 10. dk, 20. dk, 30. dk, 45. dk, 60. dk ve 120. dk sonunda ağırlıkları ölçülmüş ve not alınmıştır. ASTM C 1585 standardı doğrultusunda; numunelerin bahsi geçen süreler sonunda absorbe ettiği su miktarı belirlenerek kılcallık katsayıları hesaplanmıştır.

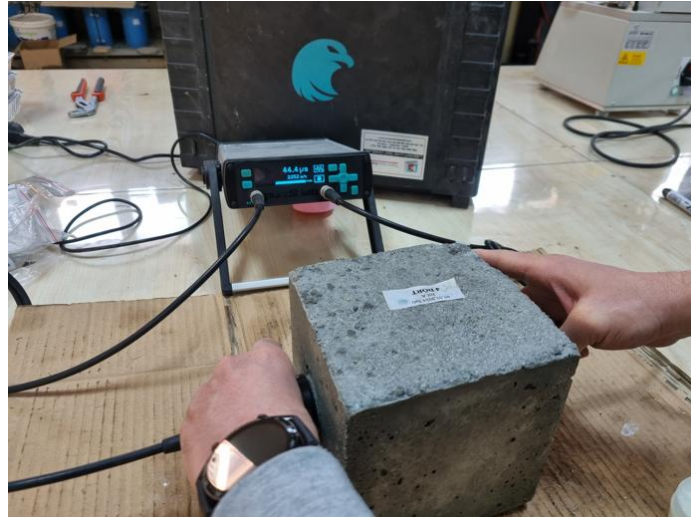
3.2.2.2.6. Su emme oranı tayini deneyi

TS EN 12390-7 standardı dikkate alınarak sertleşmiş beton numunelerin su emme oranları belirlenmiştir. Deney günü gelen numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra etüvde kurutulmuş ve kuru hal ağırlıkları (W_K) tartılarak not alınmıştır. Daha sonra iki gün boyunca suda bekletilen bu numuneler sudan çıkarılıp yüzeyleri kurulanıp tekrar tartılarak doymuş kuru yüzey (DKY) haldeki ağırlıkları (W_{DKY}) belirlenmiştir. Numunelerin su emme oranı (%) Denklem 3.1 yardımı ile bulunmuştur.

$$\text{Su emme oranı} = \frac{W_{DKY} - W_K}{W_K} \times 100 \quad (3.1)$$

3.2.2.2.7. Ultrases geçiş hızı deneyi

Ultrases geçiş hızı deneyinin gerçekleştirilmesinde IS 13311 (1992) standardı uyarıları esas alınmıştır. Deneyi 15 cm boyutlu küp numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyinden hemen önce gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde kullanılan cihazda bir alıcı bir verici bir u betonun ultrases geçmesine olanak tanımakta ve cihaz betondan geçen sesin süresini vermektedir. Sesin geçme yolunun (beton yüzey ayrıtı = 15 cm) ses geçiş süresine bölünmesi ile ultrases geçiş hızı değeri ortaya çıkmaktadır. Alıcı ve verici uçların betonla temas eden yüzeylerinde boşluk olmasını engellemek ve sesin geçişinin sürekliliğini daha iyi sağlamak için ultrasonik jel kullanılmıştır. Deneyi gerçekleştirmede kullanılan alıcı ve verici uçlar 54 kHz’lidir. Ultrases geçiş hızı deney düzeneğine ait fotoğraf Şekil 3.15’te verilmiştir.



Şekil 3.15. Ultrases geçiş hızı deneyi

3.2.2.2.8. Donma- zlme deneyi

Donma zlme deneyinin gerçekleştirilmesinde ASTM C 666 standardı dikkate alınmış olup, 10 cm x 20 cm boyutundaki silindir numuneler kullanılmıştır. Havada donma suda zlme prosedürüne göre bu deney gerçekleştirilmiştir. Deneyde her bir döngüde numuneler -18°C’ye kadar soğutulmuş +4°C’ye kadar su verilerek ısıtılmıştır. Bu Şekilde toplamda 300 kere beton numuneler dondurulmuş ve zdrlmştir. Donma zlme etkisinin beton numuneler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla beton numunelerin her 50 döngüde bir ağırlıkları llmş, ayrıca donma zlme deneyi öncesi ve 300 donma zlme deneyi sonunda ultrases

geçiş hızları ve basınç dayanımları ölçülmüştür. Donma çözülme deneyinde kullanılan cihaza ait fotoğraf Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16. Donma çözülme kabini

4. BULGULAR

Bu bölümde, üretilen hafif beton numuneleri üzerinde yapılan deneylerin sonuçları tablolar halinde sunulmuştur. Tablolarda yer alan İALA ifadesi ince atık lastik agregasını, başındaki sayı ise İALA'nın ikame oranını belirtmektedir.. Örneğin; “50İALA” şeklindeki kodlama, kontrol betonundaki ince perlit agregasının %50'sinin İALA ile ikame edildiği anlamına gelmektedir.

4.1. Taze Betonlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları

Hazırlanan kontrol betonu ve atık kauçuk içerikli hafif betonların taze hal çökme değerleri ve birim ağırlıkları Tablo 4.1'de sunulmuştur. Yaklaşık 8 cm çökme hedeflendiğinden üretilen tüm betonlarda %0,7 oranında süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Tablo 4.1. Karışımların çökmeleri ve taze hal birim hacim kütleleri

Numune kodu	Çökme (cm)	Birim hacim kütlesi – Taze Hal (g/cm ³)
0İALA	8	1,91
5İALA	8	1,86
10İALA	9	1,83
20İALA	8	1,75
30İALA	9	1,73
40İALA	9	1,69
50İALA	9	1,63

4.2. Sertleşmiş Betonlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları

4.2.1. Sertleşmiş hal birim ağırlıklar

28 gün kür gören numunelerin hacminin belirlenip, fırında 100°C'de değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulduktan sonra elde edilen birim hacim kütleleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Karışımların 28 gün kür sonunda sertleşmiş hal kuru birim hacim kütleleri

Numune kodu	Birim hacim kütlesi – 28 gün kuru (kg/m ³)
0İALA	1,78
5İALA	1,77
10İALA	1,74
20İALA	1,66
30İALA	1,63
40İALA	1,57
50İALA	1,53

4.2.2. Basınç dayanımı ölçümleri

Kontrol betonu ve atık kauçuk içerikli hafif betonların basınç dayanımları Tablo 4.3'te sunulmuştur.

Tablo 4.3. Karışımların basınç dayanımları

Numune Kodu	28 günlük basınç dayanımı (MPa)	90 günlük basınç dayanımı (MPa)
0İALA	51,2	53,3
5İALA	44,8	49,3
10İALA	35,8	41,1
20İALA	25,7	30,0
30İALA	24,0	26,0
40İALA	17,2	19,4
50İALA	13,7	15,2

4.2.3. Yarmada çekme dayanımı ölçümleri

Kontrol betonu ve atık kauçuk içerikli hafif betonların yarmada çekme dayanımları Tablo 4.4'te sunulmuştur.

Tablo 4.4. Karışımların yarmada çekme dayanımları

Numune Kodu	28 günlük yarmada çekme dayanımı (MPa)	90 günlük yarmada çekme dayanımı (MPa)
0İALA	3,9	4,1
5İALA	3,7	4,0
10İALA	3,5	3,8
20İALA	2,4	3,2
30İALA	2,2	2,6
40İALA	1,8	2,1
50İALA	1,6	1,8

4.2.4. Ultrases geçiş hızı ölçümleri

Kontrol betonu ve atık kauçuk içerikli hafif betonların ultrases geçiş hızları Tablo 4.5'te sunulmuştur.

Tablo 4.5. Karışımların ultrases geçiş hızları

Numune Kodu	28 günlük ultrases geçiş hızı (m/s)	90 günlük ultrases geçiş hızı (m/s)
0İALA	3676	3703
5İALA	3601	3623
10İALA	3537	3542
20İALA	3367	3424
30İALA	3311	3318
40İALA	3191	3208
50İALA	3021	3102

4.2.5. Elektriksel özdirenç ölçümleri

Kontrol betonu ve atık kauçuk içerikli hafif betonların elektriksel özdirençleri Tablo 4.6'da sunulmuştur.

Tablo 4.6. Karışımların elektriksel özdirençleri

Numune Kodu	28 günlük özdirenç (kΩ.cm)
0İALA	5,4
5İALA	4,8
10İALA	4,8
20İALA	5,1
30İALA	5,2
40İALA	5,3
50İALA	5,6

4.2.6. Kılcallık ölçümleri

Kontrol betonu ve atık kauçuk içerikli hafif betonların hesaplanan kılcallık katsayıları Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Karışımların kılcallık katsayıları

Numune Kodu	28 günlük kılcallık katsayısı (mm/s ^{0.5})x10 ⁻²	90 günlük kılcallık katsayısı (mm/s ^{0.5})x10 ⁻²
0İALA	1,75	1,59
5İALA	1,97	1,69
10İALA	1,97	1,74
20İALA	2,24	2,12
30İALA	2,49	2,38
40İALA	2,59	2,39
50İALA	2,61	2,48

4.2.7. Su emme ölçümleri

Kontrol betonu ve atık kauçuk içerikli hafif betonların su emmeleri Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.8. Karışımların su emmeleri

Numune Kodu	28 günlük su emme değerleri (%)	90 günlük su emme değerleri (%)
0İALA	4,10	2,65
5İALA	4,26	2,87
10İALA	4,60	3,14
20İALA	5,86	3,89
30İALA	7,58	5,91
40İALA	8,30	7,44
50İALA	8,48	8,01

4.2.8. Donma-çözölmeye maruz kalan hafif betonlarda meydana gelen ağırlık kayıpları

Tablo 4.9’da 300 döngü boyunca 50 döngüde bir ağırlığı ölçölen beton numunelerin donma çözölmeye maruz kalmadan önceki ağırlıklarına göre meydana gelen ağırlıklarındaki azalmalar yüzdesel olarak verilmiştir.

Tablo 4.9. Hafif betonlarda donma çözölmeye etkisi ile meydana gelen ağırlık kayıpları

Numune Kodu	50.döngü	100.döngü	150.döngü	200.döngü	250.döngü	300.döngü
0İALA	0,9	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1
5İALA	0,9	0,9	1,1	1,1	1,1	1,1
10İALA	1,0	1,2	1,3	1,3	1,3	1,4
20İALA	1,0	1,2	1,3	1,3	1,4	1,6
30İALA	1,0	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6
40İALA	0,9	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4
50İALA	0,9	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3

4.2.9. Donma-çözölmeye maruz kalan hafif betonların basınç dayanımları

Tablo 4.10'da donma çözülmeye maruz bırakılmamış (0 döngü) ve 300 donma çözülmeye gören silindirik beton numuneler üzerinde elde edilen basınç dayanımları sunulmuştur.

Tablo 4.10. Silindirik numunelerde elde edilen donma- çözülmeye deneyi öncesi ve 300 kez donma-çözölmeye maruz bırakılmış numunelerin basınç dayanımları

Numune Kodu	Donma- çözülmeye öncesi basınç dayanımı (MPa) (0.döngü)	Donma- çözülmeye sonrası basınç dayanımı (MPa) (300.döngü)
0İALA	40.2	36.3
5İALA	32.4	29.4
10İALA	26.6	24.3
20İALA	17.0	15.7
30İALA	13.5	12.7
40İALA	9.4	8.9
50İALA	8.2	7.8

4.2.10. Donma-çözölmeye maruz kalan hafif betonların ultrases geçiş hızları

0 döngü ve 300 döngü donma çözülmeye deneyine tabi tutulan ve farklı oranlarda atık lastik agregası ikame edilen hafif betonların ultrases geçiş hızı (UGH) değerleri Tablo 4.11'de sunulmuştur.

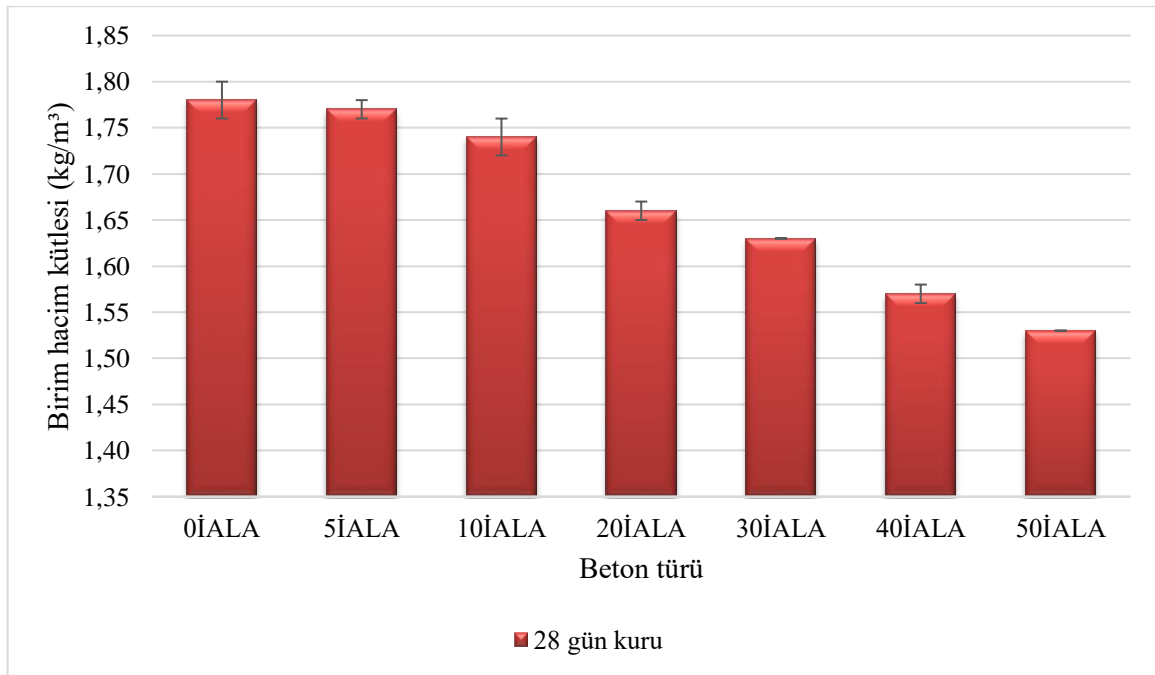
Tablo 4.11. İALA içerikli hafif betonların donma-çözülmeye deneyi öncesi ve sonrası ultrases geçiş hızı değerleri

Numune Kodu	Donma- çözülmeye öncesi UGH (m/s) (0.döngü)	Donma- çözülmeye sonrası UGH (m/s) (300.döngü)
0İALA	3704	3662
5İALA	3630	3594
10İALA	3559	3527
20İALA	3419	3384
30İALA	3333	3301
40İALA	3226	3198
50İALA	3048	3022

5. TARTIŞMA

5.1. Birim Hacim Kütlesi

Üretilen betonlar, 28 gün su küründen sonra fırında kurutularak kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Üretilen betonlara ait kuru birim hacim ağırlıklar Şekil 5.1’de verilmiştir. Şekil 5.1’den görüldüğü üzere karışımda kullanılan ince perlit agregasının yerine ince atık lastik agregası (İALA) kullanım oranının artması ile birlikte betonların birim hacim kütlesi azalmaktadır. İALA içermeyen betona kıyasla birim hacim kütlesindeki azalma oranı 5İALA ve 50İALA betonlarında sırası ile %0,6 ve %14,0 bulunmuştur. İALA’nın ince ham perlit agregasından çok daha düşük birim hacim kütlesine sahip olması nedeniyle betonların birim hacim kütleleri İALA kullanım oranı artışı ile düşmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar literatürle paralellik göstermektedir (Hisbani vd., 2025).



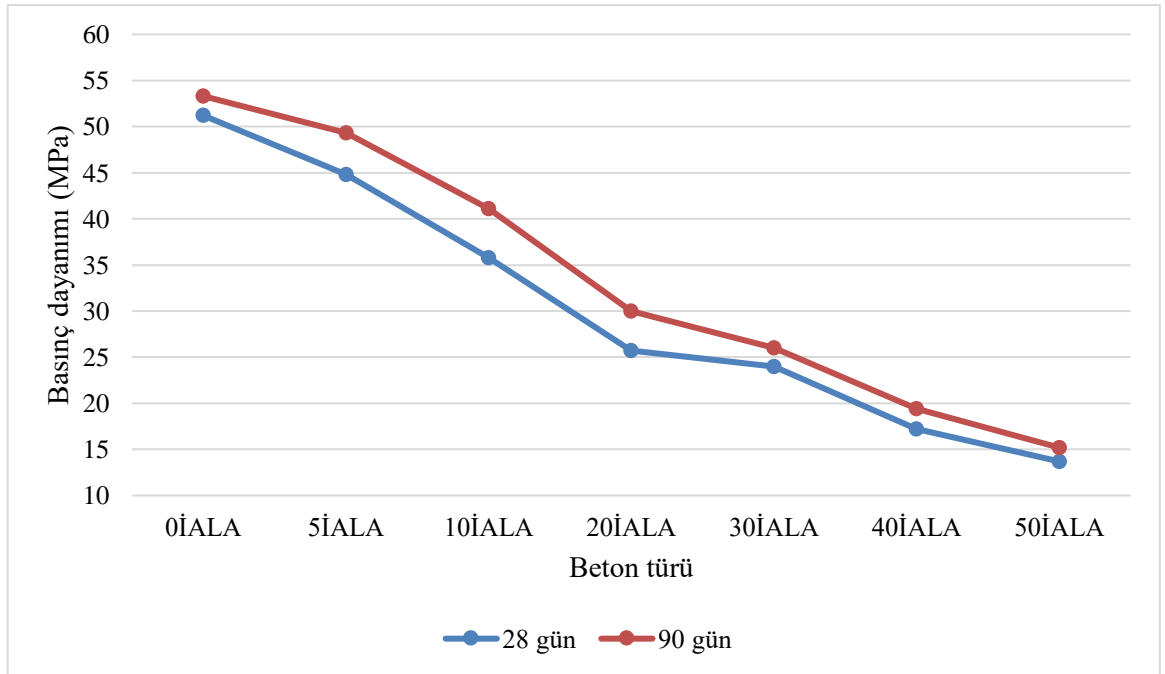
Şekil 5.1. Üretilen hafif betonların kuru hal birim hacim kütleleri

Hafif betonlar, kuru birim hacim kütleleri $2,0 \text{ g/cm}^3$ 'ten küçük olan betonlardır (TS EN 206-1, 2002). Şekil 5.1’de görüldüğü gibi $1,78 \text{ g/cm}^3$ değeri ile en yüksek birim hacim kütleye sahip olan 0İALA betonu da dahil olmak üzere üretilen tüm betonların hafif beton sınıfında yer aldığı görülmektedir. Geleneksel beton yüksek yoğunluklu bir malzemedir. Yüksek yoğunluğu nedeniyle dışarıdan gelen ses dalgalarını ya malzeme üzerinden geçirerek içeri almakta ya da

yansıtarak çevredeki ses kirliliğini ve yankıyı artırmaktadır (Bala ve Gupta, 2021). Ayrıca hafif agregalar genellikle düzensiz gözenekli bir yapı gösterirler. Bu nedenle hafif agregalar kullanılarak üretilen beton, ısı yalıtımı açısından geleneksel betona kıyasla daha avantajlıdır (Wang vd., 2025). Sonuç olarak, betonun birim hacim kütlesi azaldıkça ısı ve ses yalıtım performansının arttığını söylemek mümkündür. Çalışmamızda İALA ikamesinin artması ile yalıtım oranı yüksek betonların elde edildiği düşünülmektedir.

5.2. Basınç Dayanımı

Şekil 5.2’de 28 ve 90 gün kür gören betonların basınç dayanım sonuçları verilmiştir. Şekil 5.2’den, en yüksek basınç dayanımının 53,3 MPa ile 90 gün neticesinde kontrol betonundan, en düşük basınç dayanımının 13,7 MPa ile 28 gün sonunda 50İALA içerikli betondan elde edildiği tespit edilmiştir. Karışımlarda atık lastik agregasının kullanımının artmasıyla birlikte basınç dayanımlarında azalmalar görüldüğü tespit edilmiştir. Bu azalmalar, lastik agregalarının bağlayıcı malzeme ile yeterli aderans sağlayamaması, elastik doğası gereği yük taşıma kapasitesinin azalması ve mekanik bütünlüğün zayıflamasıyla açıklanabilir (Siddique and Naik, 2004).



Şekil 5.2. Basınç dayanımlarının İALA oranına ve yaşa göre değişimi

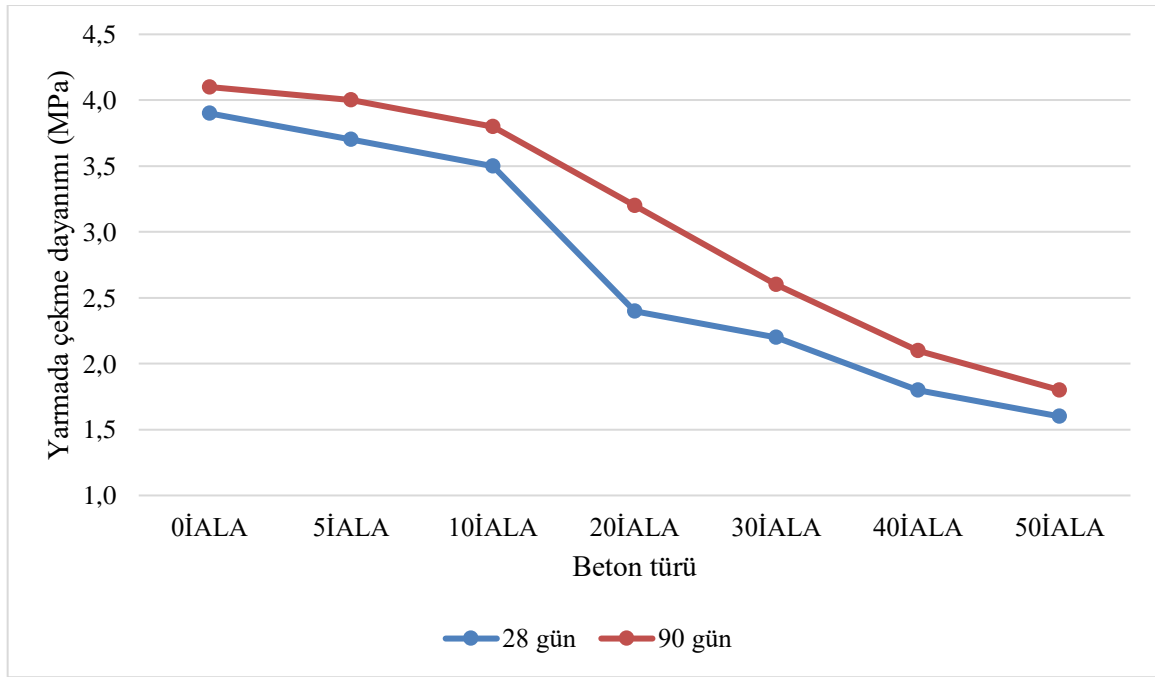
İALA'nın %50 ile en yüksek oranda kullanıldığı hafif betonun basınç dayanımları, kontrol betonundan %74,24 (28 günlük) ile %71,58 (90 günlük) arasında kayba uğramıştır. Atık lastik agregalı hafif betonlar içerisinde en yüksek basınç dayanımları 28 ve 90 gün için sırasıyla 44,8 MPa ve 49,3 MPa olacak şekilde %5 İALA kullanılan betonlarda görülmüştür. 5İALA ve 10İALA betonlarının kontrol betonlarına göre basınç dayanımlarında meydana gelen kayıp her iki kür süresinde incelenen betonlar için ortalama olarak sırasıyla %10 ve %26,5 olarak hesaplanmıştır. Basınç dayanımı açısından, %5 İALA ikame oranı, basınç dayanımı ve sürdürülebilirlik açısından optimum değer olarak gösterilebilir. Yapılan bir çalışmada %40 oranında İALA ikamesinin basınç dayanımında %50 oranında bir kayıp (Ismail and Hassan, 2016), başka bir çalışmada ise yine %40 oranında İALA ikamesinin basınç dayanımında yaklaşık %67 oranında bir kayıp (Raffoul vd., 2016) meydana getirmiş olduğu görülmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmada ise %40 İALA ikameli betonlarda bu oran %66,5 olarak bulunmuştur. Bu irdelemeden, normal betonlarda kauçuk agrega kullanılması ile meydana gelen azalma miktarlarının ham perlit agregalı hafif betonlar ile benzer olduğu görülmektedir. Kür süresinin uzun tutulması betonların basınç dayanımına olumlu bir etki göstermiştir. 28 gün küre tabi tutulan betonlara kıyasla 90 gün küre tabi tutulan betonların basınç dayanımında ortalama olarak %11 gibi ciddi oranda bir artış olmuştur. Kür süresinin uzatılmasından meydana gelen bu basınç dayanımı artışı ile düşük oranlarda ikame olarak kullanılan İALA'nın basınç dayanımı üzerinde meydana getirdiği negatif etkinin ortadan kaldırılabileceği görülmektedir.

5.3. Yarmada Çekme Dayanımı

Şekil 5.3'te 28 ve 90 gün kür gören betonların yarmada çekme dayanım sonuçları verilmiştir. Betonlarda İALA kullanımının artmasıyla yarmada çekme dayanımında düşüş olduğu gözlemlenmiştir. İlgili grafik incelendiğinde, en yüksek yarmada çekme dayanımı 90 gün sonunda kontrol betonunda 4,1 MPa, en düşük yarmada çekme dayanımı ise 28 gün sonunda %50 İALA içeren betonda 1,6 MPa olarak tespit edilmiştir. Kontrol betonuna (0İALA) kıyasla, 5İALA ve 10İALA betonlarının yarmada çekme dayanımlarındaki azalma oranı 28 gün kür görenler için sırasıyla %4,4 ve %8,9 iken 90 gün kür görenler için ise sırasıyla %2,7 ve %7,3 olarak hesaplanmış olup İALA ikamesiyle meydana gelen azalmanın az olduğu görülmektedir. Fakat 50İALA betonu için hesaplanan bu kayıp ortalama olarak %57 olarak hesaplanmıştır. Literatürde, belirli bir orana kadar İALA kullanımının betonun sünekliğini artırarak çatlak yayılımını yavaşlatabildiği ve plastik enerji yutma kapasitesini geliştirdiği raporlanmıştır (Eldin

and Senouci, 1993). Bu nedenle, düşük İALA oranlarında yarmada çekme dayanımının korunabildiği veya çok az değiştiği düşünülmektedir. Sonuç olarak bu çalışmada, yarmada çekme dayanımı açısından, %5 veya %10 İALA ikameli hafif betonların sürdürülebilirlik açısından optimum oranlar olduğu söylenebilir. Literatürde, gerçekleştirilmiş birçok çalışmada İALA kullanım oranının artışıyla ilgili olarak betonların yarmada çekme dayanımının azaldığı sonucu ortaya çıkmış ve bu doğrultuda çalışmamızdan literatüre paralel sonuçlar elde edildiği görülmüştür (Batayneh vd, 2008; Aslani vd. 2018).

Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması ile yarmada çekme dayanımında ortalama yaklaşık %15'lik bir artış meydana gelmiştir. Bu artış oranı bize düşük oranlarda İALA ikame edilerek üretilen betonlarda meydana gelen çekme dayanımı kaybının kür süresinin artırılması ile ortadan kaldırılabilirliğini göstermektedir.



Şekil 5.3. Yarmada çekme dayanımlarının İALA oranına ve yaşa göre değişimi

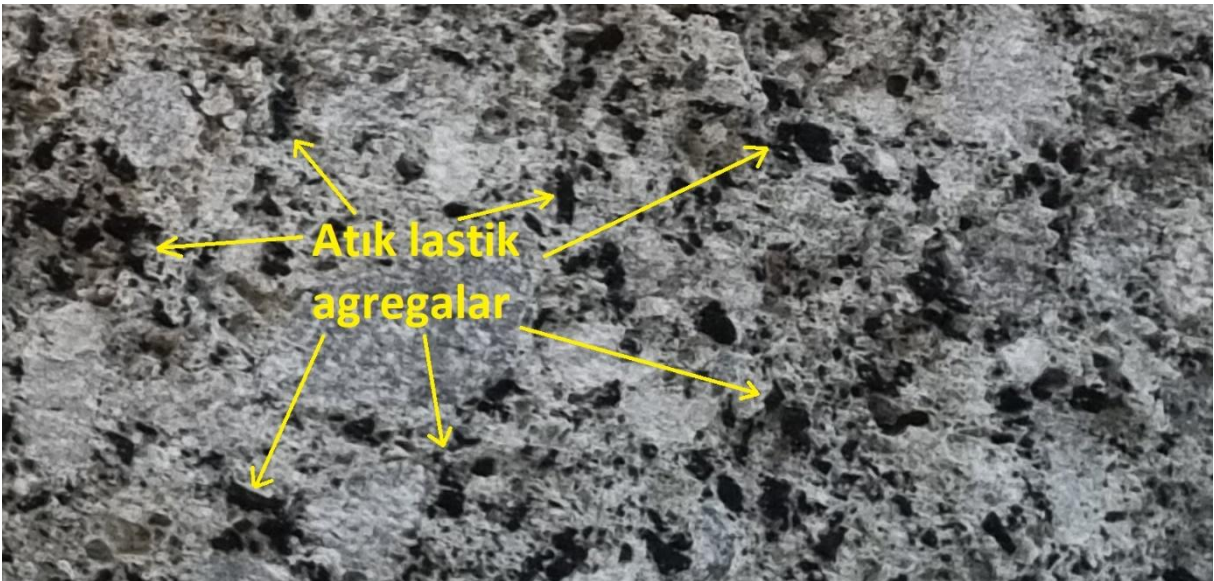
Şekil 5.4'te yarmada çekme deneyinde yarılan numunelerin yarıma düzlemlerinin fotoğrafları Şekil 5.5'te ise 50İALA betonuna ait çekilen görüntünün büyütülmüş hali sunulmuştur. Şekil 5.4'te İALA ikame oranının artışı ile betonun renginin İALA'nın siyah renginden dolayı koyulaşmış olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca İALA ikame oranının yüksek olduğu betonlarda gözle görülen boşluk büyüklüklerinin de artmış olduğu tespit edilmiştir. Yüksek İALA içeriğine

sahip (örneğin %50 İALA içeren) betonda yer yer homojen yapının ortadan kaybolarak yerini heterojen bir iç dokuya bıraktığı bölgelere rastlanmıştır.



Şekil 5.4. Yarmada çekme deneyi testinde numunelerin yarılan yüzeylerinden alınan fotoğraflar.

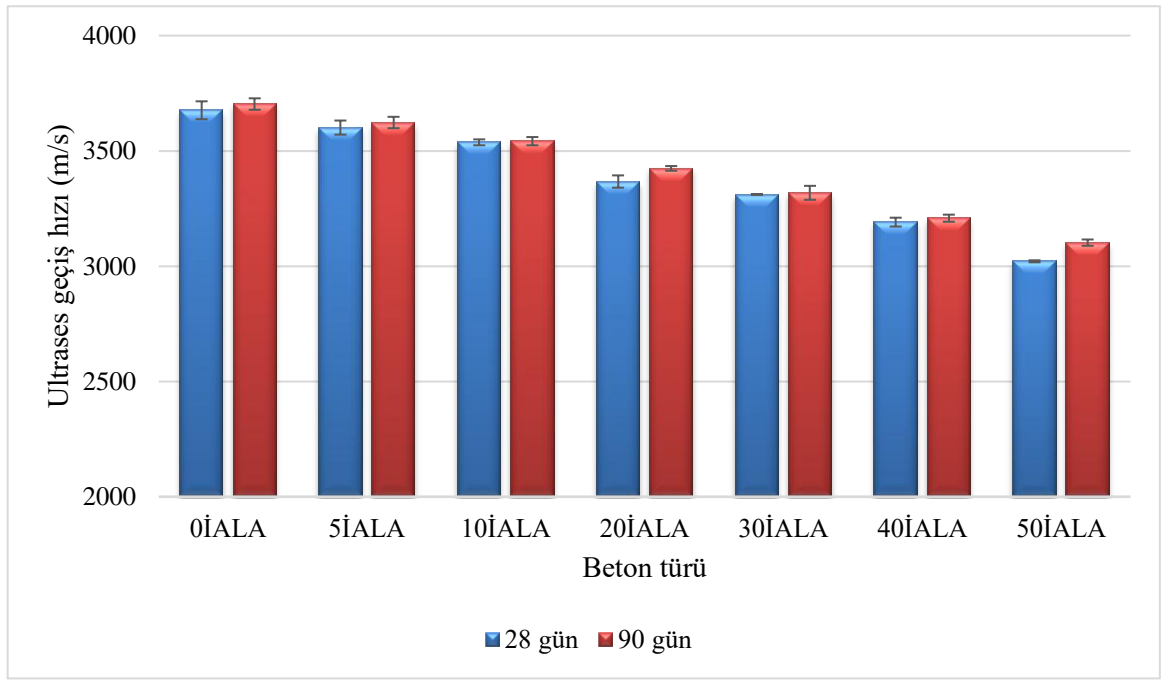
Şekil 5.5'te İALA parçacıklarının beton içinde dağılımı görülmektedir. İncelemede dikkat çeken bir nokta İALA içeriği arttıkça genel olarak betondaki boşluklarında daha çok arttığıdır. Özellikle İALA parçacıklarının etrafındaki boşlukların fazlalığı dikkat çekicidir. Bu boşlukların artmasındaki nedenin hidrofobik İALA ile hidrofilik çimento hamurunun etkileşiminin uyumsuzluğundan dolayı olduğu düşünülmektedir. Bu durum ayrıca İALA ve çimento hamuru arasındaki aderansı da olumsuz etkilemektedir (Di Mundo vd., 2018)



Şekil 5.5. 50İALA betonunun yarıлма yüzeyinden çekilen büyütölmüş görüntü.

5.4. Ultrases Geçiş Hızı (UGH)

şekil 5.6'da 28 ve 90 gün sonunda farklı oranlarda İALA içeren ve İALA içermeyen hafif betonların UGH değerleri verilmiştir. Atık lastik miktarının artmasına bağlı olarak hafif betonların UGH değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. En yüksek İALA ikame oranına sahip olan 50İALA hafif betonun 28 gün kür sonundaki UGH'si 3021 m/s, kontrol betonuna (3676 m/s) göre %17,82 oranında azalırken; 90 gün kür için ise bu azalma oranı %16,23 olarak hesaplanmıştır. Bu durumun, lastik agregalarının yoğun bir iç yapı oluşturamaması ve imento pastası ile düşük aderans göstermesi nedeniyle i yapıda daha fazla boşluk oluşmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Sesin ve dolayısıyla ultrasesin geçtiği ortamın yoğunluğunun artması sonucu o ortamdan daha hızlı geçeceği bilinmektedir. Bunun tersi durum ise kullanılan betonun yoğunluğunun azalmasına bağlı olarak ultrases geçiş hızının azalacağıdır. Burada İALA kullanım oranı artışı ile birlikte betonların birim ağırlıkları azalmakta ve yoğunluğu azalan malzemeden ise ses daha yavaş geçmektedir. İALA'nın normal agregaya kıyasla yoğunluğunun çok düşük olması ve İALA kullanım oranındaki artış ile ayrıca beton içinde oluşan boşluklar betonun birim ağırlığı üzerinde ve dolayısıyla UGH değerleri üzerinde ciddi azalma meydana getirmiştir. Bu azalmanın bir diğer nedeni de İALA'nın gözenekliliği artırarak betonun homojenliğini olumsuz etkilemesidir (Najim and Hall, 2010). Düşük miktarlarda İALA kullanılan 5İALA ve 10İALA betonlarında UGH'de meydana gelen azalmalar ortalama olarak sırasıyla %2,1 ve %4,1 olarak bulunmuştur. Bu oranlar kabul edilebilir sınırlar içerisinde olup betonun UGH ve UGH korelasyonlu özelliklerini önemli derecede etkilemeyeceğinden %10 oranına kadar İALA kullanımının uygun olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.6. UGH değerlerinin İALA oranına ve yaşa göre değişimi

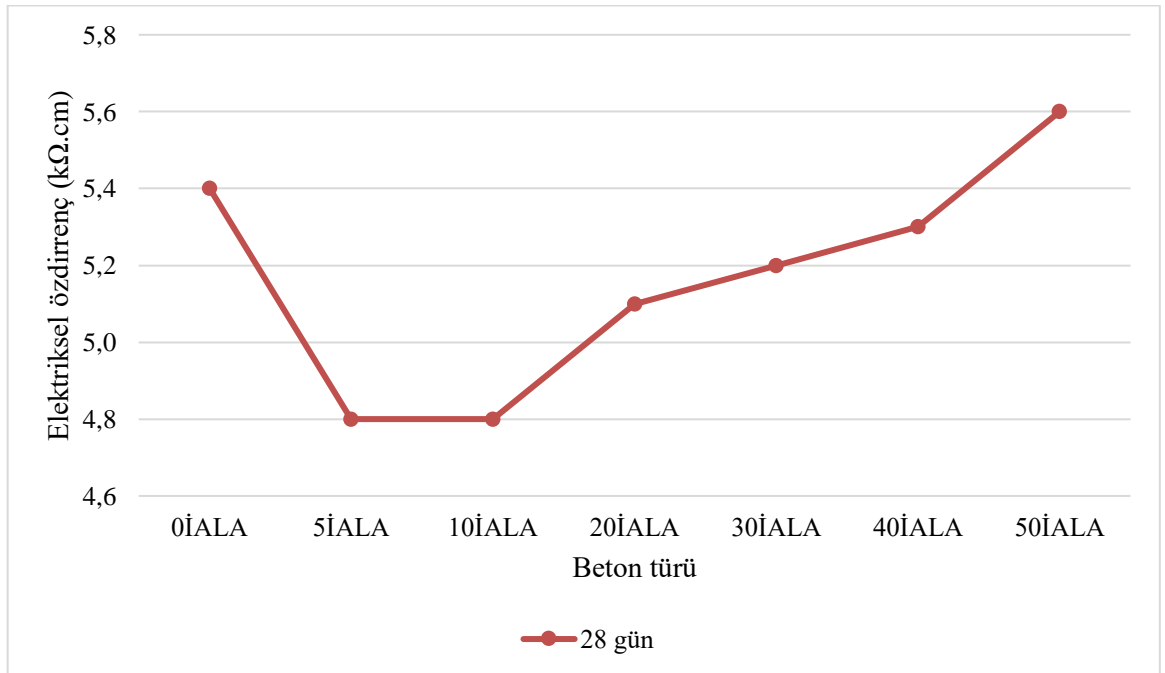
Betonların kürlenme süresinin 28 günden 90 güne artırılması ile UGH değerlerinde hafif de olsa bir artış oluşturmuştur. Tüm betonlar için kür süresinin etkisi incelendiğinde kür süresinin uzatılması betonların UGH'sinde ortalama olarak %0,9 oranında bir artış meydana getirmiştir. Artan kür süresi betonun hidrasyonunun daha fazla gelişmesine yol açmaktadır. Gelişen reaksiyonla artan reaksiyon ürünleri betonu daha boşluksuz, sıkı ve yoğun hale getirerek daha yüksek UGH değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır (Memon vd., 2022).

IS 13311 (1992) standardına göre betonlar, ultrases geçiş hızı (UGH) sonuçlarına bağlı olarak sınıflandırılmıştır. Buna göre; 3000-3500 m/s aralığındaki değerler orta kaliteyi, 3500-4500 m/s aralığındaki değerler iyi kaliteyi, 4500 m/s'nin üzerindeki değerler ise mükemmel kaliteyi göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre; hem 28 gün hem de 90 gün kür gören betonlardan 0İALA ve 5İALA ve 10İALA betonları iyi kalitede iken İALA içeriği daha fazla olan diğer betonlar ise orta kalite sınıfına girmiştir.

5.5. Elektriksel Özdirenç

Şekil 5.7'de farklı oranlarda İALA içeren hafif betonların 28 gün kür sonundaki elektriksel özdirenç sonuçları verilmiştir. Sonuçlar irdelendiğinde, en yüksek elektriksel özdirenç 5,6 kΩ.cm değeri ile 50İALA betonunda, en düşük değerin ise 4,8 kΩ.cm değeri ile 5İALA ve

10İALA betonlarında oluğu görülmektedir. İALA içermeyen betonda düşük oranda İALA ikamesi elektriksel özdirenci düşürmüştür, %10 İALA'dan daha fazla İALA içeren betonlarda ise elektriksel özdirenç değeri tekrar yükselmeye başlamıştır. 40İALA betonunun elektriksel özdirenci İALA içermeyen betona oldukça yakın olmakla birlikte 50İALA betonun elektriksel özdirenci İALA içermeyen betondan yaklaşık %4 fazladır. Elektriksel özdirenç değerlerinin en az olduğu betonlar olan 5İALA ve 10İALA betonlarında ise azalma miktarı %11 seviyesindedir. Betonun özdirenci, genel olarak geçirimsizlik ve dayanıklılığın bir göstergesidir. Bünyesel elektriksel özdirenç, çimentolu kompozitlerin elektrik akımına direnme yeteneğini gösteren bir terim olmakla birlikte betonun gözeneklilik yapısı ve gözenek çözeltisi ile yakından ilişkilidir (De Weerd vd., 2023). Literatürde bazı çalışmalarda İALA içeren betonların elektriksel özdirenç değerlerinde artışlar olduğu görülmüş olmasına karşın (Mohammed vd., 2012; Wang vd., 2018); bazı çalışmalarda ise belirli bir orana kadar azalma ve sonrasında artış görüldüğü raporlanmıştır (Hunag vd., 2016). Hunag ve arkadaşlarının (2016) yaptığı çalışmada, lastik agrega içermeyen betonlar ile %40 lastik agrega içeren betonların elektriksel özdirenci yaklaşık 5 kΩ.cm düzeylerinde bulunmuş olup bu değer bizim çalışmamızda aynı oranlarda İALA kullanımında 5,4 kΩ.cm mertebesindeydi. Ayrıca ara değerler olan %10-%30 lastik içeren betonlarda elektriksel özdirenç değerinin lastik içermeyenden daha az olduğunu bildirmişlerdir. Elde edilen bulgular çalışmamızdan elde edilen bulgular ile büyük ölçüde paralellik göstermiştir.

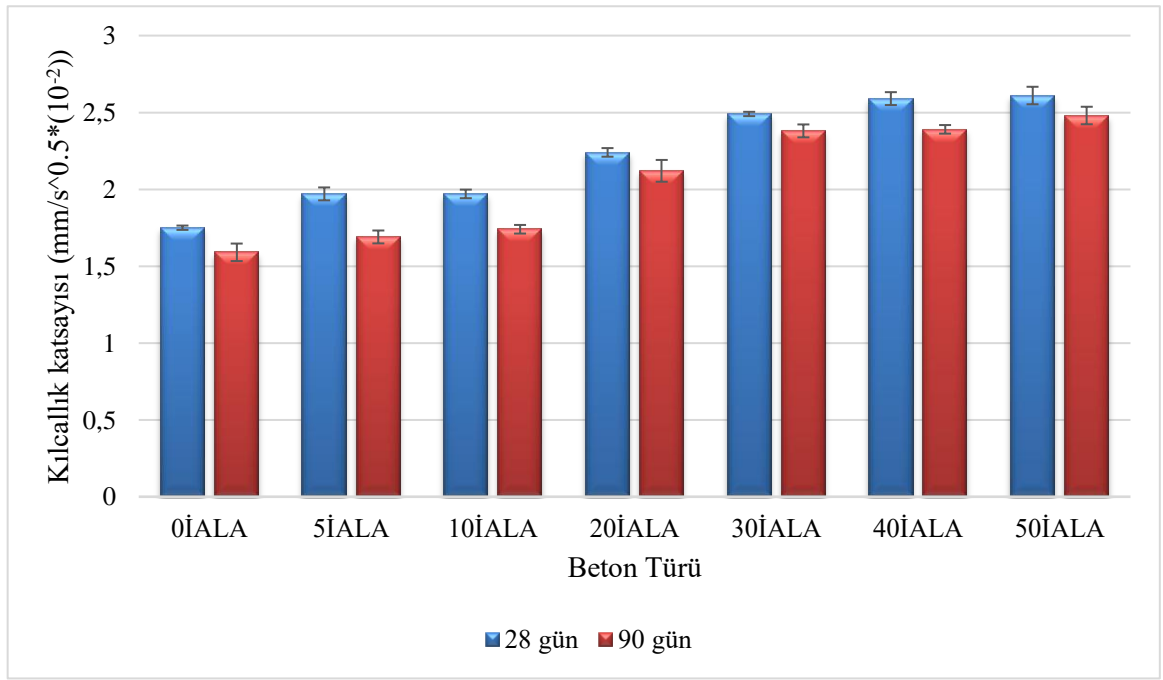


Şekil 5.7. Elektriksel özdirenç değerlerinin İALA oranına göre değişimi

İnce agrega olarak kullanılan İALA'nın zararlı gözenekliliği arttırdığı literatürde ortaya konulmuştur (Chen vd., 2025). Bu nedenle düşük oranlarda kullanılan İALA ile elektriksel özdirenç değerlerinde İALA kullanılmayan betona kıyasla azalmalar olduğu görülmüştür. %10 İALA kullanımı ve sonrasında ise elektriksel özdirenç değerlerinde Şekil 5.7'de görüldüğü gibi artış meydana gelmesinin nedeni su emmeyen ve yalıtkan olan kauçuk İALA'nın beton bünyesinde artması ile birlikte betonun yalıtkanlık özelliğinin artmasıdır (Pham vd., 2019). Betonun yalıtkanlık özelliği arttıkça elektrik iletimi azalmış ve elektriksel özdirenç değeri artmıştır. Sonuç olarak elektriksel özdirenç deneyi açısından en dayanıklı beton 50İALA betonu bulunmuştur fakat deneyin doğası dikkate alındığında yukarıdaki gibi bu sonuçları iyi yorumlamak gerekmektedir.

5.6. Kılcal Su Emme

Şekil 5.8'de üretilen kontrol betonu ve İALA içerikli hafif betonlara ait kılcallık katsayıları sunulmuştur. Grafikten İALA ikame oranı artışına bağlı olarak kılcallık katsayısının arttığı görülmektedir. 0İALA betonunun 28 günlük kılcallık katsayısı $1,75 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^{0.5}$ iken, 50İALA betonu için bu değer $2,61 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^{0.5}$ olarak bulunmuş olup kılcallık katsayısında meydana gelen artış yaklaşık %50 seviyesindedir. 5İALA betonu için bu artış miktarı hesaplandığında ise 28 ve 90 gün için sırasıyla %13 ve %6 seviyelerinde bir artış olduğu görülmektedir. Literatürde kauçuk agrega kullanımının oransal artışı ile kılcallık katsayısının arttığını rapor eden çalışmalar bulunmakta olup bulunan sonuçlar literatürle paralellik göstermektedir (Gesöglü ve Güneyisi, 2011). Kılcallık katsayısının İALA ikame oranı artışı ile artmasının nedeni hidrofobik olan kauçuğun yüzeylerinde hava hapsedmesidir. Bu durum sertleşmiş betonda mikro çatlaklı bir yapı oluşturarak gözenekliliği artırmakta ve suyun geçeceği kanalların miktarını artırarak su geçirgenliğinde ve dolayısıyla kılcallık katsayısında artışa neden olmaktadır (Ma vd., 2023).



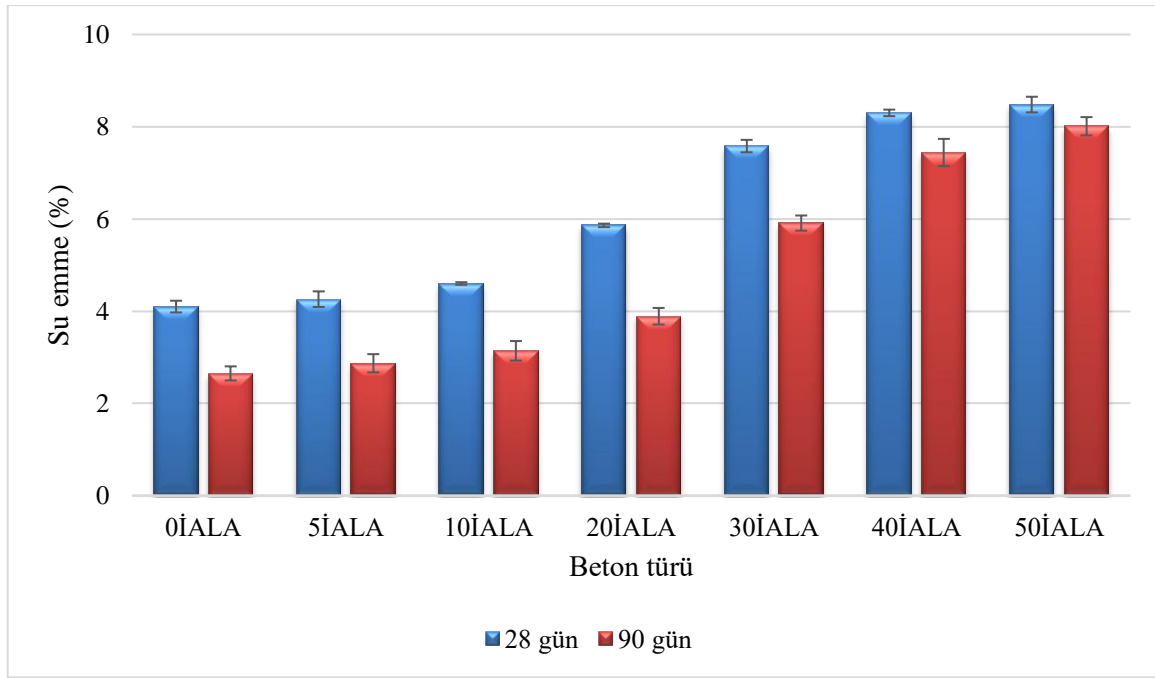
Şekil 5.8. Kılcallık katsayılarının İALA oranına ve yaşa göre değişimi

Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması sonucunda kılcallık katsayısında ortalama olarak %8,2 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Kür süresinin artırılması ile beton daha sıkı bir yapı kazanmış ve özellikle İALA ve çimento hamuru arasındaki mikroçatlaklı ve gözenekli yapı azalmış ve bu durumda kılcallık katsayısında bir azalma meydana getirmiştir. Buradan özellikle düşük seviyede İALA ikamesinin (örneğin %5 İALA ikameli beton) meydana getirdiği olumsuzluğun kür süresinin uzatılması ile bertaraf edilebileceği görülmektedir.

5.7. Su Emme

Şekil 5.9'da üretilen hafif betonlar için su emme oranları verilmiştir. Su emme hafif betonun durabilitesi açısından önemli bir deneydir. İALA ikame oranının artışı ile her iki kür süresi içinde su emme değerlerinin dramatik bir şekilde arttığı görülmektedir. Örneğin; 28 gün kür gören betonlar için, su emme değerlerindeki artış 0İALA betonuna kıyasla 5İALA betonunda %3,9 iken, 50İALA betonunda ise %100'den fazla olmuştur. Literatürde, su emme deneyi betonun porozitesini gösteren bir deney olarak kabul edilebilmektedir (Mao vd., 2021). İALA kullanım oranının yüksek tutulmasının betonların su emmesini dolayısıyla gözenekliliğini ciddi oranda arttırdığı gerçekleştirilen çalışma sonucunda gözlemlenmiştir. Kauçuk miktarı arttıkça betonda gözenekliliğin arttığı literatürde bazı çalışmalarda da

bulunmuştur. Örneğin; %25 kauçuk esaslı agrega kullanımı ile su emme değerlerinde yaklaşık olarak; %35 (Gesoglu ve Güneyisi, 2011) ile %322 (Sidhu and Siddique, 2023) arasında artış olduğu literatürde incelenen çalışmalardan saptanmıştır. Gerçekleştirdiğimiz çalışmada ise %30 İALA ikameli betonda bu oran 28 gün kür gören betonlar için %85, 90 gün kür gören betonlar için ise %123 olarak hesaplanmış olup literatürde bulunan ve hesaplanan değerler arasında bir değer elde edildiği görülmektedir. İALA ikame oranı artışına bağlı olarak su emme değerlerinde meydana gelen artışın nedeninin ise, kauçuklaştırılmış betonların karıştırılması esnasında karıştırılırken beton içine daha fazla hava hapsolmesine bağlanmaktadır (Bignozzi vd., 2006).



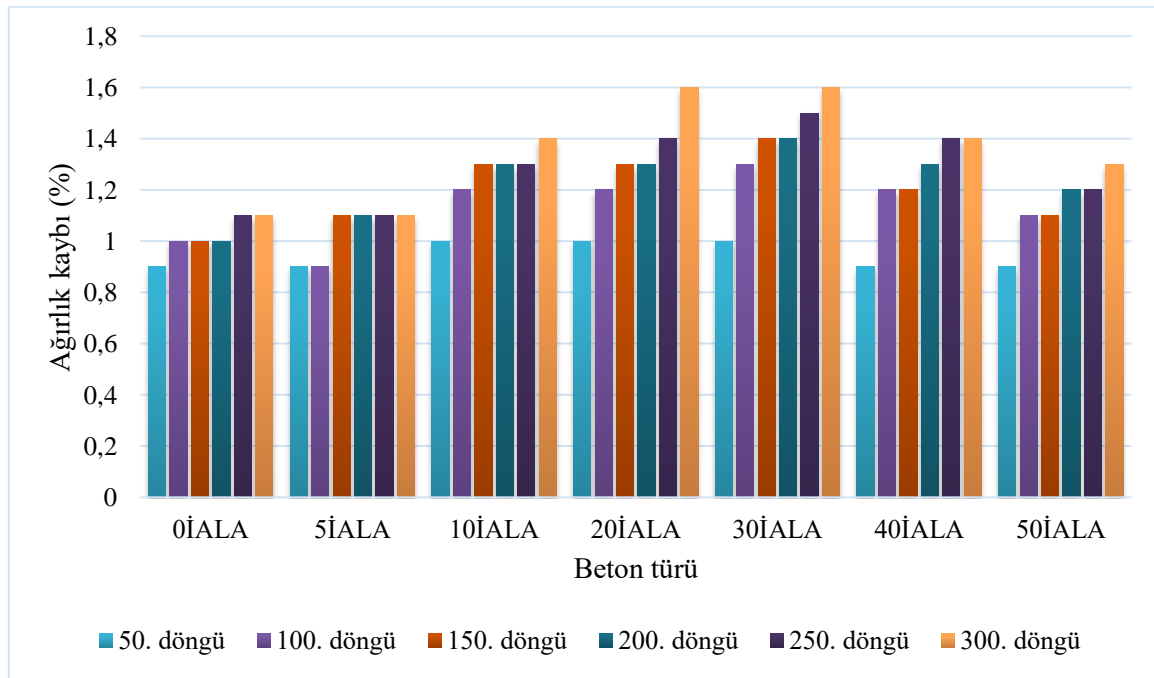
Şekil 5.9. Su emme oranlarının İALA oranına ve yaşa göre değişimi

Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması ile su emme değerlerinde bir miktar azalmalar görülmüştür. Kür süresinin artması ile su emme değerlerindeki azalma oranı 0İALA betonunda daha fazla iken, İALA oranının artması ile 50İALA betonunda daha az bulunmuş olup azalma miktarları ise bu betonlar için sırası ile yaklaşık %35 ve %6 olarak hesaplanmıştır. Yani diğer bir deyişle kür süresinin uzatılması, İALA içermeyen betonlarda daha güçlü olumlu bir etki gösterirken İALA içeriği arttıkça bu etki azalmıştır. Bu durumun, hafif betonda İALA içeriğinin artmasıyla birlikte hacimsel olarak daha fazla karışımda yer kaplaması ve boşluk hacmindeki artışın, kür süresinin olumlu etkisini kısıtlamasından dolayı olduğu düşünülmektedir. Su emme açısından bakıldığında; düşük İALA ikamesinden dolayı (Örn: %5 İALA) meydana gelen olumsuz etkinin kür süresi ile azaltılabileceği veya ortadan kaldırılabileceği görülmektedir.

5.8. Donma-Çözülme

5.8.1. Donma-çözülme sonrası ağırlık kayıpları

Farklı İALA ikame oranlarına sahip hafif betonların donma-çözülme döngüleri sonunda yaşadıkları ağırlık kayıpları Şekil 5.10'da sunulmuştur. Buna göre donma-çözülme döngü sayısı arttıkça hafif betonların ağırlık kayıplarında da artışlar olduğu gözlemlenmiştir. 300 döngü donma-çözülme maruz kalmış betonlar incelendiğinde; en yüksek ağırlık kayıplarının %1,6 değeri ile 20İALA ve 30İALA betonlarında en düşük ağırlık kayıplarının ise %1,1 değeri ile 0İALA ve 5İALA betonlarında olduğu görülmektedir. Ayrıca diğer bir dikkat çeken sonuç ise %30'dan daha fazla İALA içeren betonlarda ağırlık kaybının tekrar azaldığıdır. En büyük ağırlık kaybı 30İALA betonunda meydana geldikten sonra 40İALA ve 50İALA betonlarındaki ağırlık kaybı azalarak sırasıyla %1,4 ve %1,3 değerlerine gerilemiştir. Hafif betonların, normal betonlara kıyasla daha iyi veya yakın düzeyde bir donma direncine sahip olduğunu belirten çalışmalar vardır (Domagala, 2020).



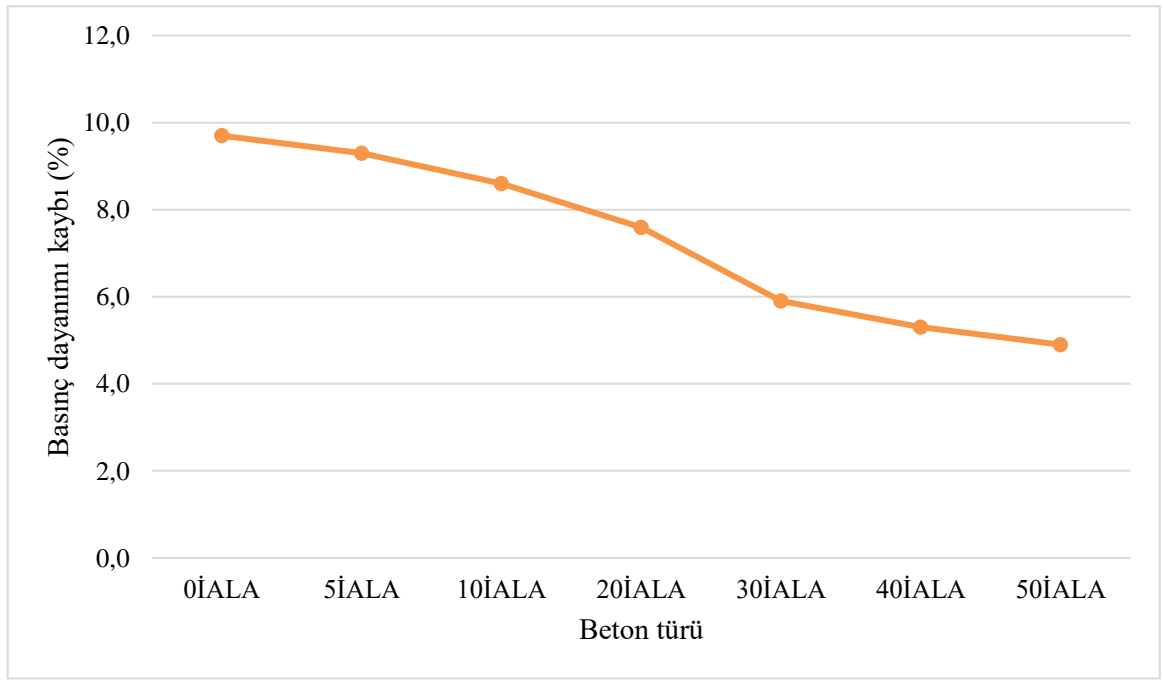
Şekil 5.10. Donma-çözülme döngüleri sonrası İALA içeren hafif betonların ağırlık kayıpları

Ağırlık kaybı açısından incelendiğinde, literatürde farklı oranlarda atık lastik içeren betonlarda 240 donma çözülme çevrimi sonunda %3,5'ten daha az ağırlık kaybı oluştuğunu belirten

çalışmalar vardır (Gesoglu vd., 2014). Bu sonuç çalışmamızla benzerlik göstermesine rağmen çalışmamızda elde edilen ağırlık kayıplarının daha da düşük olmasının nedeninin hafif betonların donma-çözülme deneyinde daha dirençli olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. %20-30 oranlarına kadar İALA kullanımının ağırlık kaybını giderek arttırması, İALA kullanımının betonlarda özellikle bağlantılı boşlukların artmasına neden olduğunun bir göstergesidir. İALA içeren betonların gevşek ve zayıf yapıya sahip bir agrega-çimento hamuru arayüzey fazı oluşturduğu ve boşluk miktarlarını arttırdığı gerçekleştirilen çalışmalarda belirtilmiştir (Thomas and Gupta,2016; Chen vd., 2019). %40 ve daha fazla İALA içeriğine sahip olan betonlarda ise giderek ağırlık kaybının azalmasının nedeninin, betonlarda artan İALA içeriği ile İALA'nın kırılan ve ufalanan beton parçalarını tutması ve yapıdan ayrılmasını engellemesi olduğu düşünülmektedir. Özellikle daha iri yapıya sahip İALA parçacıklarının betonların ufalanarak yapıdan uzaklaşmasını zorlaştırdığı değerlendirilmektedir. 0İALA ve 5İALA betonlarından sonra en az ağırlık kaybı 50İALA betonunda meydana gelmiştir. Sonuç olarak, ağırlık kaybı açısından değerlendirildiğinde, düşük ve yüksek İALA içeriğinin betonların donma çözülme direncinde daha iyi performans sergilediği vurgulanabilir.

5.8.2. Donma-çözülme sonrası basınç dayanımı kayıpları

İALA içeren ve içermeyen hafif betonların donma-çözülme deneyi sonrasında basınç dayanımlarının nasıl değiştiğini incelemek amacıyla deney öncesinde silindir numunelerin basınç dayanımları 28 günlük kür sonunda ölçülmüş, daha sonra ise 300 döngü donma-çözülme maruz kalan beton silindir numunelerin basınç dayanımları ölçülmüştür. TS EN 12390-3 (2019) standardı doğrultusunda gerçekleştirilen donma-çözülme deneyi evvelinde ve ahirinde ölçülen basınç dayanımı deney sonuçlarına göre hesaplanan basınç dayanımı kayıpları Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Burada gösterilen kayıp aynı betonun donma-çözülme deneyi sonrası basınç dayanımında ne kadarlık bir azalmaya denk geldiğini belirtmektedir.

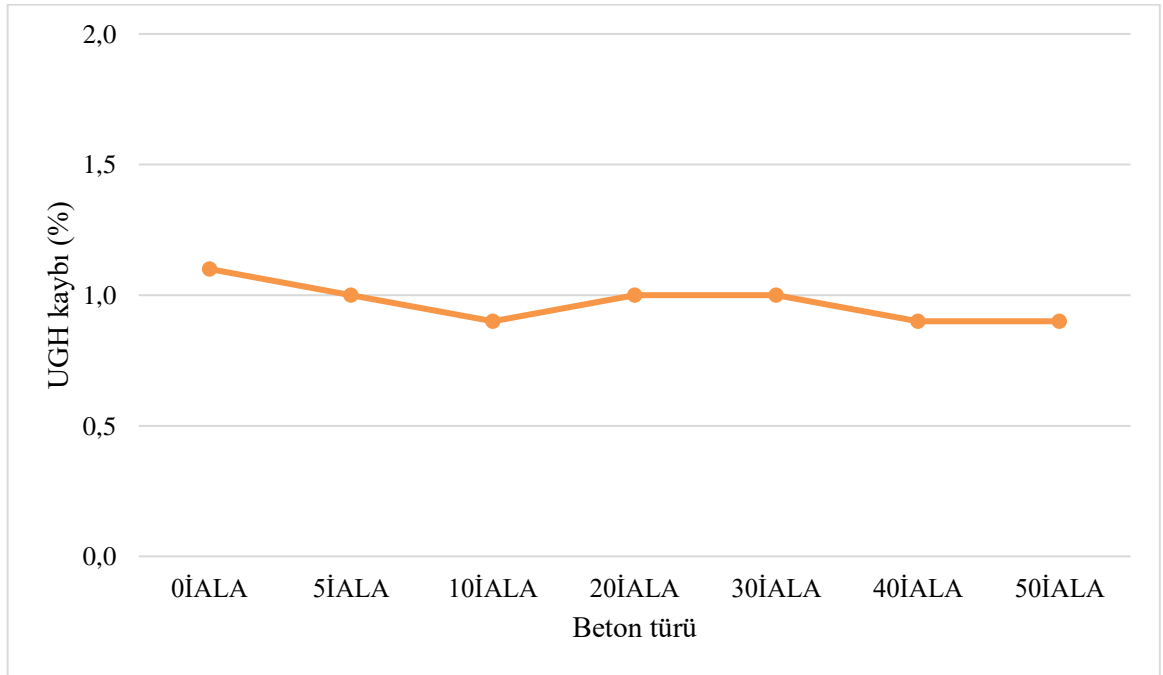


Şekil 5.11. 300 donma-çözülme döngüsü sonrası ÇALA içeren hafif betonların basınç dayanımı kayıpları

Şekil 5.11’de ÇALA ikame oranı artışı ile hafif betonlardaki basınç dayanımı kayıplarının azaldığı görülmüştür. 300 donma-çözülme döngüsü sonunda, 0ALA betonunda basınç dayanımında %9,7 oranında bir azalma görülürken, 5ALA betonunda bu oran %9,3 ve 50ALA betonunda ise %4,9 olarak bulunmuştur. 50ALA betonunun basınç dayanımı kaybındaki azalma 0ALA betonuna kıyasla %50 düzeyindedir. Yani basınç dayanımı kaybı açısından bakıldığında 50ALA betonu donma çözülme deneyinden yaklaşık %50 oranında daha az etkilenmiştir sonucuna varılabilir. Literatürde atık lastik agregası içeren betonların donma-çözülme dirençlerinin arttığını gösteren çalışmalar bulunmaktadır (Richardson vd., 2016; Li vd., 2019). Bu durumun nedenleri, lastik agregası kullanımı ile betonların tokluğunun artması ve lastik parçacıklarının elastik yapıları sayesinde çatlak ilerlemesini sınırlandırarak donma-çözülme hasarlarını azaltması şeklinde sıralanabilir (Siddique ve Naik, 2004). Her ne kadar ÇALA kullanımı üretilen hafif betonların dayanımı üzerinde olumsuz bir etki meydana getirirse de donma çözülme sonrasında basınç dayanımı kayıplarını azaltması bakımından ÇALA’nın betonda agregası olarak kullanımı pozitif bir etki meydana getirmiştir.

5.8.3. Donma-çözülme sonrası ultrases geçiş hızı kayıpları

Silindir numuneler donma-çözülme deneyine maruz bırakılmadan hemen önce ve 300 kere donma-çözülme döngüsüne maruz bırakıldıktan sonra ultrases geçiş hızı (UGH) değerleri ölçülmüş ve her bir beton için donma-çözülme deneyi öncesi sonuca göre meydana gelen kayıp Şekil 5.12’de verilmiştir. Şekil 5.12’de İALA ikame oranı artışına bağlı olarak UGH kayıplarının çok fazla etkilenmediği fakat az da olsa genel olarak azalma eğiliminin olduğu görülmektedir. Betonların UGH kayıpları %0,9 (10İALA, 40İALA ve 50İALA betonlarında) ile %1,1 (0İALA betonunda) arasında değişkenlik göstermektedir. 0İALA betonuna kıyasla UGH kaybı 5İALA betonunda %9, 50İALA betonunda ise %18 oranında bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Atık lastiğin betonda kullanım oranının artması ile UGH’deki kayıpların azaldığını ortaya koyan çalışmalar olup, bu veriler çalışmamızdan elde edilen verileri desteklenmektedir (Kumar ve Dev, 2022). İALA’nın beton üretiminde kullanılması ile betonların donma çözülme dirençlerinin artması (Li vd., 2019) yüksek İALA ikame oranlarında UGH kaybının azalmasını açıklamaktadır.



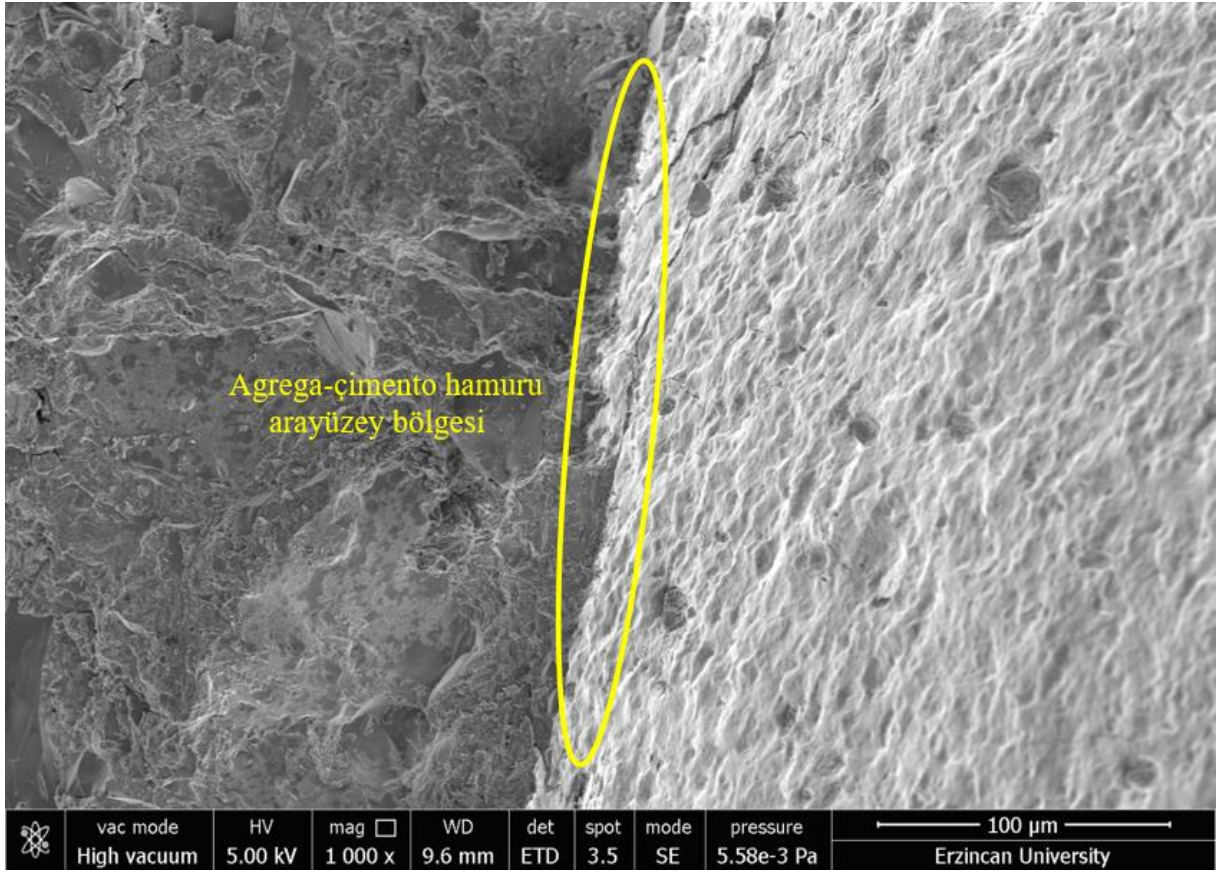
Şekil 5.12. 300 donma-çözülme döngüsü sonrası İALA içeren hafif betonların UGH kayıpları

Betonda atık lastik agregası kullanımının betonun ömrü ve dayanıklılığı üzerine yapılmış bazı çalışmalarda, UGH deneyinin ağırlık kaybı deneyine kıyasla daha doğru ve daha hassas bir yöntem olduğu belirtilmiş olup yine de bu konuda daha fazla araştırma yapılması gerektiği

belirtilmiştir (Medina vd., 2023). Bu durum donma-çözülme direncinin yorumlanmasında, UGH deneyinde çıkan sonuçların ağırlık kaybı deneyinde çıkan sonuçlardan daha çok doğruya yakın olduğunu gösterebilir.

5.8.4. Donma-çözülme sonrası SEM incelemesi

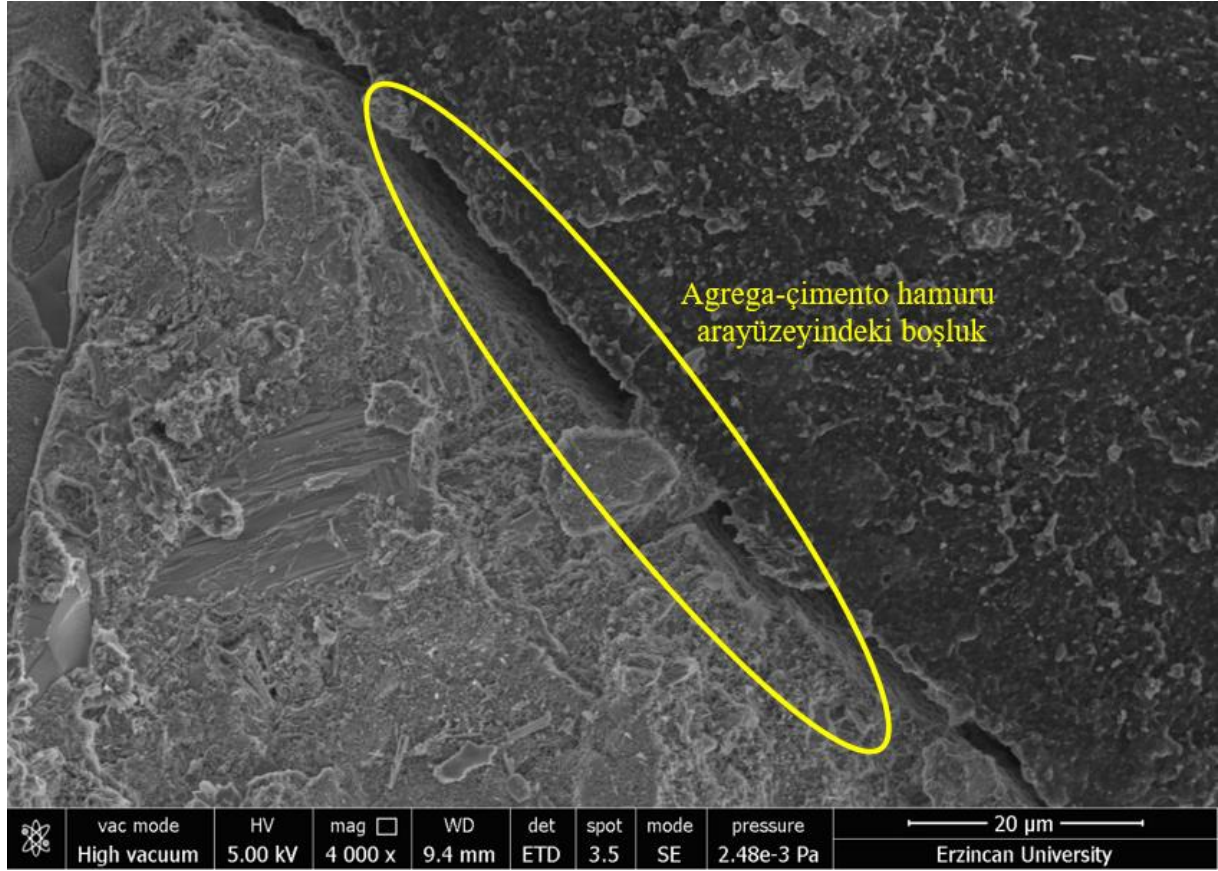
Donma-çözülme deneyi sonrası SEM incelemesi 0İALA ve 50İALA betonlarında gerçekleştirilmiştir. Bu görüntüler ile sadece donma-çözülme etkisi incelenmemiş, İALA'nında beton iç yapısında meydana getirdiği değişimde incelenmeye çalışılmıştır. SEM görüntüleri basınç dayanımı deneyinde kırılan parçalar üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.13. 0İALA betonu için 300 donma-çözülme döngüsü sonundaki SEM görüntüsü

Şekil 5.13'te İALA içermeyen betona ait 300 donma-çözülme döngüsü sonunda çekilmiş taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüsü verilmiştir. Görüntüde ham perlit agregası ve sertleşmiş çimento hamuru fazının birleştiği bölge gösterilmiştir. Şekil 5.13 dikkatlice incelendiğinde donma-çözülme etkisi sonucunda ciddi düzeyde mikro çatlaklar ve tahribatlar oluşmadığı görülmektedir. Ham perlit agregasının boşluklu bir yapıya sahip olmasının bu

sonucun ortaya çıkmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, İALA içermeyen betonda 300 döngü donma-çözülme sonucunda meydana gelen ağırlık kaybının %1,1 gibi küçük bir değer bulunması da bu sonucu desteklemektedir.



Şekil 5.14. 50İALA betonu için 300 donma-çözülme döngüsü sonundaki SEM görüntüsü

Şekil 5.14'te 300 kez donma çözülme etkisine maruz kalmış 50İALA betonundan çekilen SEM görüntüsü sunulmuştur. Görüntüde İALA ve çimento hamuru arasındaki arayüzeyin boşluklu yapısı görülmektedir. Agreg-a-çimento hamuru arayüzey fazının ham perlit agregasında daha boşluksuz bir yapı sergilediği, buna karşılık İALA'da arayüzey boşluklarının daha büyük ve belirgin olduğu Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'ten açıkça gözlemlenmektedir. Şekil 5.15'teki SEM görüntüsünde, gerek İALA ile çimento hamuru arasındaki, gerek çimento hamuru fazındaki (İALA kullanımı ile çimento hamuru içine sürüklenmiş) mikroçatlaklı ve boşluklu yapılar betonun mekanik ve durabilite özelliklerini azaltmasına karşın, betonların donma-çözülme direncinin artmasında olumlu bir etki meydana getirmiştir. Beton içindeki su donduğunda genişler. Genleşme ile oluşan gerilmeleri karşılamak için betonlarda hava sürükleyici katkı kullanılabilir. Atık lastiğin betonda agrega olarak kullanılması da betonun donma çözülme direncini artıran bir etkendir. Bunun nedenleri; kauçuk esaslı agreganın belirli bir esnekliğe

sahip olması dolayısıyla donma esnasındaki gerilmeleri absorbe edebilme yeteneği, kauçuk agreganın özellikle daha küçük boyutlarda hava sürükleme yeteneğine sahip olması şeklinde açıklanabilir (Zhu vd., 2012).

Donma-çözülme deneyleri genel olarak değerlendirildiğinde, İALA kullanım oranı yüksek olan betonların donma-çözülme etkisine daha dirençli oldukları tespit edilmiştir. Bu durumun nedeni olan, porozitesi yüksek olan beton donma-çözülmede daha iyi bir dayanıklılık gösterir, düşüncesi SEM fotoğrafları ile de doğrulanmıştır. İALA içeren betonlarda derinlemesine mikroçatlaklar hem agrega-çimento hamuru arayüzeyinde hem de çimento hamurunda gözlemlenmiştir. Fakat burada dikkat edilmesi gereken çok önemli bir nokta, İALA ikame oranının artması ile hafif betonların hem mekanik özelliklerinde hem de durabilite özelliklerinde ciddi bir bozulma meydana gelmesidir. Yani kısaca İALA içeriği yüksek olan betonların her ne kadar donma-çözülme dirençleri daha yüksek bulunsa bile diğer mekanik ve durabilite özelliklerinde ciddi azalmalar söz konusu olduğundan İALA kullanımının sınırlandırılması önemlidir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm deneyler göz önüne alındığında %10'dan fazla İALA kullanımı betonların ciddi düzeyde özelliklerinde kayıp meydana getirdiğinden %10'dan fazla İALA kullanımı önerilmemektedir. Özellikle %5 İALA ikameli hafif betonlar sürdürülebilir hafif beton üretimi açısından tavsiye edilen bir orandır.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, ham perlit agregası içeren hafif betonlarda ince ham perlit agregasının, ince atık lastik agregası (İALA) ile farklı oranlarda (%0, %5, %10, %20, %30 ve %40) ikamesinin betonun mekanik, durabilite ve donma-çözülme direnci özelliklerine etkisi deneysel yöntemlerle araştırılmıştır.

Çalışmadan elde edilen başlıca bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- İALA ikame oranının artışı ile hafif betonların birim hacim kütlesi azalmıştır. Bu azalma hafif betonun ısı ve ses geçirimsizliği daha da çok düşürecek ve konfor artacaktır ayrıca yapının ölü yükünün azalmasının sağladığı avantajları ortaya çıkaracaktır. En yüksek birim hacim kütleye sahip İALA içermeyen betonun birim kütlesi $1,78\text{g/cm}^3$ olup, tüm betonlar standartlar kapsamında hafif beton sınıfında yer almıştır.
- İALA oranı arttıkça basınç ve çekme dayanımı değerlerinde belirgin düşüşler gözlemlenmiştir. Özellikle %40 ve üzerindeki oranlarda mekanik dayanım kayıpları dikkat çekici seviyelere ulaşmıştır. Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması basınç dayanımında ortalama yaklaşık %11, çekme dayanımında ise ortalama yaklaşık %15 oranında bir artış sağlamıştır. Bu durum düşük oranlarda İALA kullanımından kaynaklanan mekanik kayıpları kısmen telafi etmiştir.
- İALA içermeyen ve sadece ham perlit agregası ile üretilen hafif betondan 50 MPa üzerinde bir dayanım elde edilmiş olup ham perlit agregası ile yüksek dayanımlı betonların üretilebileceği görülmüştür.
- İALA ikame oranı artışı ile birlikte betonların ultrases geçiş hızı değerleri azalmıştır. %10 İALA kullanımına kadar olan ultrases geçiş hızında meydana gelen azalmanın ciddi bir azalma olmadığı yorumlanmıştır.

- İALA ikame oranının artması ile hafif betonların boşluk yapısını artırarak su emme ve kılcallık değerlerini olumsuz yönde etkilemiştir. Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması bu deneylerin sonuçlarını pozitif yönde etkilemiştir.
- Düşük oranlarda (%5 ve %10) İALA ikamesi gözeneklilik yapısını artırdığı için elektriksel özdirenci düşürmüştür, fakat daha yüksek oranlardaki İALA ikamesi kauçuğun yalıtkan ve hidrofobik özelliğini baskın hale getirerek elektriksel özdirenç değerlerinin artmasına neden olmuştur. En yüksek elektriksel özdirenç değeri 50İALA betonunda ölçülmüştür.
- İALA ikamesinin donma-çözülme direncini artırdığı görülmüştür. 300 döngü donma-çözülme deneyi sonunda en yüksek ağırlık kayıpları 30İALA betonunda tespit edilmiştir. 50İALA betonunun ağırlık kaybı 0İALA betonuna yakındır. İALA ikame oranının artması donma-çözülme deneyine maruz kalmayanlara kıyasla basınç dayanımı kaybını azaltmıştır.
- Donma-çözülme deneyine maruz kalan numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde İALA içeren betonların çimento hamuru-agrega arayüzeyinin daha boşluklu ve mikro çatlaklı bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Bu yapı betonun mekanik ve durabilite özelliklerinde İALA kullanım artışı ile meydana gelen olumsuz sonuçları açıklamakla beraber donma-çözülme direncinde olumlu bir katkı meydana getirmiştir.
- Atık lastiğin betonda agrega olarak kullanılması ile hem kullanılmış araç lastiklerinin atık olarak çevreye atılmasının önüne geçilmiş olacak hem de daha hafif ve donma-çözölmeye daha dayanıklı bir beton üreterek daha sürdürülebilir bir hafif beton geliştirilmiş olacaktır. Gerçekleştirilen bu deneysel çalışma sonucunda tüm deneyler göz önüne alındığında İALA ikame oranının %5 olmasının optimum kullanım oranı olduğu düşünülmektedir. Bu oran betonun incelenen tüm özelliklerinde ciddi bir değişim veya kayıp meydana getirmemiştir. Özellikle %10 üzerindeki İALA ikame oranlarında betonların gerek mekanik gerek durabilite özelliklerinin ciddi ölçüde olumsuz etkilendiği görülmüştür. Atık lastiklerin hafif beton üretimlerinde kontrollü bir şekilde kullanılması pratikte fayda sağlayan, ekonomik ve çevre dostu hafif beton üretimine imkan tanıyacaktır.

6.2. Öneriler

Aşağıdaki çalışmaların yapılması ile atık lastiğin hafif beton üretiminde kullanılma potansiyelinin artabileceği düşünülmektedir.

- Yüksek sıcaklığa karşı direnç deneyleri gibi farklı türde deneyler gerçekleştirerek atık lastik agregasının hafif betonlar üzerindeki çok yönlü etkilerinin ortaya konulması,
- İri taneli atık lastik agregasının perlit agregalı hafif betonların performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi,
- Asit ve sülfat gibi agresif ortamlara karşı dayanıklılıklarının incelenmesi,
- Çeşitli teknikler kullanılarak iyileştirme yapılmış atık lastik agregalarının hafif betonların performansı üzerindeki etkisini incelemek.

KAYNAKÇA

- ACI Committe 213. (1999). Guide for structural lightweight aggregate concrete (ACI 213R-87). *American Concrete Institute*.
- Agrawal, Y., Gupta, T., Sharma, R., Panwar, N.L., Siddique, S.(2021). A comprehensive review on the performance of structural lightweight aggregate concrete for sustainable construction. *Construction Materials*, 1(1), 39-62.
- Akkaş, A. (2011). *Pomza agregalı taşıyıcı hafif betonun taşıyıcılık özelliklerinin araştırılması*. (Doktora tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 309698)
- Anadolu Ajansı. (2019). *Hurda 178 bin 133 ton lastik geri kazandırıldı*. <https://www.aa.com.tr/ekonomi/hurda-178-bin-133-ton-lastik-geri-kazandirildi/1410346>. adresinden 09 Ocak 2025 tarihinde edinilmiştir.
- Arescimento (2017). *Uçucu kül tenkik veri raporu*. https://www.arescimento.com.tr/wp-content/uploads/2017/05/ucucu_kul.pdf adresinden 14 Mart 2025 tarihinde edinilmiştir.
- Argunhan, Z. (2017). Yapı elemanlarında kullanılan atık lastiklerin ısı performansının incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(3), 621-630.
- Aslani, F., Ma, G., Yim Wan, D.L., Tran Le, V.X. (2018). Experimental investigation into rubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of self compacting concrete. *Journal Of Cleaner Production*, Volume: 172, 1835–1847.
- ASTM C 1760 (2012). Standard test method for bulk electrical conductivity of hardened concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM C 1585 (2013). Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic cement concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM C 666 (2015). Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, United States.
- Atık Yönetimi Yönetmeliği (2006). Resmî Gazete, 02 Nisan 2015, Sayı: 29314.
- Babu, K. G. and Babu, D.S. (2004). Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates. *Cement And Concrete Composites*, 26, 605-611.
- Bala, A. and Gupta, S. (2021). Thermal resistivity, sound absorption and vibration damping of concrete composite doped with waste tire rubber: a review. *Construction and Building Materials*, 299, 123939.

- Başıyigit, C., Elyigit, A., Alkayış, M. H. (2023). Lastik agregalı betonun darbe dayanımının araştırılması. *Türk Bilim ve Mühendislik Dergisi*, 5 (2), 138- 145.
- Batayneh, M.K., Marie, I., Asi, I. (2008). Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries. *Waste Management*, 28(11), 2171-2176.
- Bignozzi, M. C., Sandrolini, F. (2006). Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 36(4), 735-739.
- Bogas, J.A. and Gomes, M. G. (2013). Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non- destructive methods. *Ultrasonics*, 53(5), 962-972.
- Borat, M. (1992). *Türkiye diyatomitlerinin özellikleri ve filtrasyon karakteristikleri*. (Doktora tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 39365)
- Bulut, H. A. ve Kandil, U. (2024). Mechanical properties of cement-based composites incorporating eco-friendly aggregate of waste rubber. *Revista De La Construcción. Journal of Construction*, 23(2), 246–270.
- Chandra, S. and Berntsson, L. (2002). Lightweight aggregate concrete: science, technology and applications. *Noyes Publications*, 430, U.S.A.
- ChemRisk LLC. (2009). Tyre Generic Exposure Scenario: End of Life Tyre Guidance (Version 1.0) [Report prepared for the European Tyre & Rubber Manufacturers' Association]. ETRMA.
- Chen, F., Zou, C., Zhou, Y., Hu, S., Mao, J. (2025). Correlation analysis of abrasion resistance of rubber concrete with microstructure and pore structure. *Construction and Building Materials*, 475, 141211.
- Chen, Z.M., Li, L.J., Xiong, Z. (2019). Investigation on the interfacial behaviour between the rubber- cement matrix of the rubberized concrete. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1354-1364.
- Demirboğa, R. Ve Gül, R. (2004). Durability of mineral admixed lightweight aggregate concrete. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 11, 201-206.
- Demirboğa, R., Örüng, İ. ve Gül, R. (2001). Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes. *Cement and Concrete Research*, 31(11), 1627-1632.
- De Weerd, K., Wilson, W., Machner, A., Georget, F. (2023). Chloride profiles – what do they tell us and how should they be used?. *Cement And Concrete Research*, 173, 107287.
- Di Mundo, R., Petrella, A., Notarnicola, M. (2018). Surface and bulk hydrophobic cement composites by tyre rubber addition. *Construction and Building Materials*, 172, 176-184.

- Doğan, Ö. (2005). *Lastik agregalı betonların özelliklerinin deneysel irdelenmesi*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 196588)
- Domagala, L. (2020). Durability of structural lightweight concrete with sintered fly ash aggregate. *Materials*, 13(20), 4565.
- DPT (2001). *Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu - Endüstriyel hammaddeler alt komisyonu yapı malzemeleri III (pomza-perlit-vermikülit-flogopit-genleşen killer) çalışma grubu raporu*. <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/08/Sekizinci-Bes-Yillik-Kalkinma-Plani-Madencilik-OIK-Raporu-EndustriyelHammaddelerAltKomisyonu-YapiMalzemeleri-III-CalismaGrubuRaporu.pdf> adresinden 2 Mart 2025 tarihinde edinilmiştir.
- Duaj, J. A. A., El-Laithy K. And Payappilly R. J. (1997). A value engineering approach to determine quality lightweight concrete aggregate. *Cost Engineering*, 39, 21-26.
- EAPA (2022). *“Asphalt in figures 2022”*, <https://eapa.org/asphalt-in-figures-2022-view/> adresinden 29 Kasım 2024 tarihinde edinilmiştir.
- Eldin, N. N. and Senouci, A. B. (1993). Rubber-tire particles as concrete aggregate. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 5(4), 478-496.
- Emiroğlu, M. (2012). *Lastik agregalı kendiliğinden yerleşen betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. (Doktora tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 310367)
- Eryılmaz, H. ve Demirarslan K.O. (2019). Ömrünü tamamlamış lastiklerin (ÖTL) sıvılaştırılarak geri dönüşümünün araştırılması. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları Ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 2 (1), 50-56.
- Eser, H. (2014). *High performance structural lightweight concrete utilizing natural perlite aggregate and perlite powder*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 365605)
- European Commission (2020). A new circular economy action plan : For a cleaner and more competitive Europe. Brussels.
- Gesoğlu, M. Ve Güneyisi, E. (2011). Permeability properties of self-compacting rubberized concretes. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3319-3326.
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G., İpek, S.(2014). Abrasion and freezing–thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers. *Construction and Building Materials*, 73, 19-24.

- Gökçe, H.S. (2010). *Hafif beton üretiminde ham ve geliştirilmiş perlitin kullanılabilirliğinin araştırılması*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 269772)
- Gökçe, H. S., Şimşek, O., Durmuş, G. ve Demir, İ. (2010). Ham Perlit Agregalı Hafif Beton Özelliklerine Alternatif Genleştirilmiş Perlit Kullanımının Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 13(2), 159-163.
- Gönen, T. (2009). *Kendiliğinden yerleşen taşıyıcı hafif betonun mekaniksel ve durabilite özelliklerinin araştırılması*, (Doktora tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 237816)
- Gül, D. (2016). Characterization and expansion behavior of perlite. (Master of science), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 447139)
- Gündüz, L., Rota, A. Ve Hüseyin, A. (2001). *Türkiye ve dünyadaki pomza oluşumlarının malzeme karakteristiği analizi*. 4.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 118, İzmir.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M. ve Özturan, T. (2004). Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement And Concrete Research*, 34(12), 2309-2317.
- Hisbani, N., Shafiq, N., Shams, M. A., Farhan, S. A., Zahid, M.(2015). Properties of concrete containing crumb rubber as partial replacement of fine aggregate—a review. *Hybrid Advances*, 10, 100481.
- Hunag, L.- J., Wang, H.- Y., Wu, Y- W. (2016). Properties of the mechanical in controlled low-strength rubber lightweight aggregate concrete (CLSRLC). *Construction and Building Materials*, 112, 1054- 1058.
- IS 13311. (1992). Part 1, Non-destructive testing of concrete – Methods of test – Ultrasonic pulse velocity. Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- Ismail, M.K., Hassan, A. A. A. (2016). Use of metakaolin on enhancing the mechanical properties of self-consolidating concrete containing high percentages of crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, 125, 282-295.
- İpek, S., Mermerdaş, K., Ulusoy, A., Işıker, Y. (2022). Atık lastiklerin, beton üretiminde agrega olarak kullanımının betonun taze ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12 (3), 982-999.
- Kaldı, C. (2011). *Taşıyıcı hafif beton tasarımı ve çok katlı binalarda kullanımı*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 291187)
- Kumar, R., Dev, N. (2022). Effect of acids and freeze–thaw on the durability of modified rubberized concrete with optimum rubber crumb content. *Journal Of Applied Polymer Science*, 139(21).

- LASDER (2020). *Ömrünü tamamlamış lastiklerin geri kazanımı faaliyet raporu*. <https://lasder.org.tr/turkiyede-otl> adresinden 14 Mart 2025 tarihinde edinilmiştir.
- Laftah, W. A., Rahman, W. A. W. A. (2025). A comprehensive review of tire recycling technologies and applications. *Materials Advances*, 6(15), 4992-5010.
- Li, Y., Zhang, S., Wang, R., Dang, F. (2019). Potential use of waste tire rubber as aggregate in cement concrete – a comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 225, 1183-1201.
- Li, S., Yu, D., Jiang, C., Feng, Z., Zhao, M. and Li, Z. (2025). Influence of waste rubber powder on the mechanical and abrasion resistance properties of concrete. *Materials*, 18(22), 5157.
- Ma, Q., Mao, Z., Lei, M., Zhang, J., Luo, Z., Li, S., Du, G., Li, Y. (2023). Experimental investigation of concrete prepared with waste rubber and waste glass. *Ceramics International*, 49(11), 16951-16970.
- Mao, Z., Zhang, J., Luo, Z., Ma, Q., Duan, Y., Li, S., Miao, Y. (2021). Behavior evaluation of hybrid fibre-reinforced reactive powder concrete after elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 306, 124917.
- Medina, D. F., Martínez M. C. H., Medina, N. F., Hernández-Olivares, F. (2023). Durability of rubberized concrete with recycled steel fibers from tyre recycling in aggressive environments. *Construction and Building Materials*, 400, 132619 .
- Meisinger, A.C. (1985). Diatomite, minerals facts and problem. *United States Department of The Interior*.
- Memon, R.P., Huseien, G.F., Saleh, A.T., K. Ghoshal, S., Memon, U., Alwetaishi, M., Benjeddou, O., Sam, A.R.M. (2022). Microstructure and strength properties of sustainable concrete using effective microorganisms as a self-curing agent. *Sustainability*, 14(16), 10443.
- Mohammed, B.S., Hossain, K. M. A., Eng Swee, J. T., Wong, G. and Abdullahi, M. (2012). Properties of crumb rubber hollow concrete block. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), 57-67.
- Najim, K.B. and Hall, M. R. (2010). A review of the fresh/hardened properties and applications for plain- (PRC) and Self- Compacting rubberised concrete(SCRC). *Construction And Building Materials*, 24(11), 2043-2051.
- Nayır, S. (2021). *Pomza ve perlit agregası içeren mineral katkı taşıyıcı hafif betonların enerji performansı açısından değerlendirilmesi*. (Doktora tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 705257)

- Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği (2006). Resmî Gazete, 25 Kasım 2006, Sayı: 26357.
- Pham, T. M., Elchalakani, M., Hao, H., Lai, Jeffrey, L., Ameduri, S., Tran, T. M. (2019). Durability characteristics of lightweight rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 224, 584-599.
- Pötzl, C., Siegesmund, S., López-Doncel, R. and Dohrmann, R. (2022). Key parameters of volcanic tuffs used as building stone: a statistical approach. *Environmental Earth Sciences*, 81(10).
- Raffoul, S., Garcia, R., Pilakoutas, K., Guadagnini, M., Medina, N. F. (2016). Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: an experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 124, 391-404.
- Richardson, A., Coventry, K., Edmondson, V., Dias, E. (2016). Crumb rubber used in concrete to provide freeze-thaw protection (Optimal Particle Size). *Journal Of Cleaner Production*, 112(1), 599-606.
- Sancak, E., Sari, Y. D. ve Simsek, O. (2008). Effects of elevated temperature on compressive strength and weight loss of the light-weight concrete with silica fume and superplasticizer. *Cement and Concrete Composites*, 30(8), 715-721.
- Siddique, R. and Naik, T.R. (2004). Properties of concrete containing scrap- tire rubber- an overview. *Waste Management*, 24(6), 563-569.
- Sidhu, A. S. And Siddique, R. (2023). Durability assessment of sustainable metakaolin based high strength concrete incorporating crumb tire rubber. *Journal Of Building Engineering*, 72.
- Şimşek, B., Polat, R., Gül, R. (2022). Atık lastik katkılı betonlarda uçucu kül kullanımının aderans ve basınç dayanımına etkisi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12 (4), 2290-2301.
- Tapan, M. ve Engin, C. (2019). Effect of expanded perlite aggregate size on physical and mechanical properties of ultra lightweight concrete produced with expanded perlite aggregate. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(3), 845-855.
- TÇÜD (2015). *Demir çelik cüruf raporu*. https://celik.org.tr/wp-content/uploads/2016/12/4-TCUD-Curuf_Rapor.pdf adresinden 14 Mart 2025 tarihinde edinilmiştir.
- THBB (2023). “Türkiye hazır beton sektörü istatistikleri 2023”, <https://www.thbb.org/media/788915/thbb-sekt%C3%B6r-%C4%B0statistikleri-2023.pdf> adresinden 29 Kasım 2024 tarihinde edinilmiştir.

- Thomas, B. S., Gupta, R. C. (2016). Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. *Journal Of Cleaner Production*, 113, 86-92.
- Toksoy, F. (1997). Vermikülit mineraloji jeolojik oluşum endüstriyel kullanım ve Türkiye'deki durumu. *2.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 123-139.
- Topçu, İ.B. ve Işıkdag, B. (2008). Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete. *Journal Of Materials Processing Technology*, 204 (1-3), 34-38.
- Topçu, İ. B., Türeyen, A.C., Uygunoğlu, T. (2021). Atık lastik katılmış betonun süspansiyon teorisi ile incelenmesi. *El- Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9 (2), 925-935.
- TS 2511. (1977). Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- TS 802. (1985). Beton karışımı hesap esasları. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12350-2. (2010). Beton- taze beton deneyleri- Bölüm 2: Çökme (Slump) deneyi. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12350-6. (2019). Beton- taze beton deneyleri- Bölüm 6: Birim hacim kütlesi. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-3. (2019). Beton- sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-6. (2010). Beton- sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-7. (2019). Beton- sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- TS EN 206-1. (2002). Beton-Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- Ulusoy, A. (2021). *Atık lastik agregası içeren normal ve yüksek dayanımlı betonların aşınma ve termal iletkenlik davranışlarının incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 689793)
- UNEP-United Nations Environment Programme (2024). Technical guidelines for the environmentally sound management of used and waste pneumatic tyres. *Basel Convention*.
- US Geological Survey (2009). Mineral commodity summaries 2009. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/mcs/mcs2009.pdf> adresinden 14 Nisan 2025 tarihinde edinilmiştir.

- US Geological Survey (2020). Mineral Commodity Summaries 2020 .
<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf> adresinden 18 Nisan 2025 tarihinde edinilmiştir.
- Uyanık, T. (2005). *Maden ve Mineraller -T.C. Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı İhracatı Geliştirme Etüd Merkezi Raporu*. <https://madencilikrehberi.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/02/maden-ve-mineraller.pdf> adresinden 15 Aralık 2025 tarihinde edinilmiştir.
- Uygun, A. (1976). Diatomit jeolojisi ve yararlanma olanakları. *Madencilik, Maden Mühendisleri Odası Dergisi*, 15(5), 31-38.
- Uysal, F. F. ve Bahar, S. (2018). Cüruf çeşitleri ve kullanım alanları. *Trakya University Journal of Engineering Sciences*, 19(1), 37-52.
- Wang, H., Li, X., Gong, H., Xu, Y., Wang, P., Liu, M. (2025). Thermal and mechanical properties of 3D-printed fiber-reinforced lightweight concrete based on air entrainment and hollow glass microspheres. *Journal of Building Engineering*, 114, 114408.
- Wang, J., Dai, Q., Si, R. Guo, S. (2018). Investigation of properties and performances of Polyvinyl Alcohol (PVA) fiber-reinforced rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 193, 631-642.
- Yazıcıoğlu, S. ve Bozkurt, N. (2006). Pomza ve mineral katkılı taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(4), 675-680.
- Yılmaz, H., Sallı Bideci, Ö. ve Bideci, A.(2018). Pomza agregalı hafif beton özelliklerine kalsiyum alüminat çimentosunun etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(1), 154-160.
- Zhu, X., Miao, C., Liu, J., Hong, J. (2012). Influence of crumb rubber on frost resistance of concrete and effect mechanism, *Procedia Engineering*, 27, 206-213.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa KEKLİK, 05.05.1992 yılında Erzincan İli İliç İlçesinde doğdu. İlköğretimini İliç İlçesinde 23 Nisan İlköğretim okulunda, liseyi Erzincan Ertuğrulgazi Anadolu Lisesinde tamamladı. 2015 yılında Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği'ni, 2021 yılında Anadolu Üniversitesi Adalet Bölümü'nü ve 2022 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İş Sağlığı ve Güvenliği Tezsiz Yüksek Lisans eğitimini tamamladı.