



**İNŞAAT YIKINTI ATIKLARININ KÖPÜK BETON ÜRETİMİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Yusuf ÖZÇELİK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Yusuf ÖZÇELİK

24/06/2022

İNŞAAT YIKINTI ATIKLARININ KÖPÜK BETON ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Yusuf ÖZÇELİK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Doğal kaynaklarımız, bilinçsizce tüketim nedenlerle gün geçtikçe azalmaktadır. Bununla beraber; sanayileşme, bilinçsiz kentleşme, teknolojik gelişmeler ve tüketim miktarındaki artış, aynı zamanda atıklar çevreyi ciddi anlamda tehdit etmektedir. İnşaat yıkıntı atıkları kontrolsüz şekilde artmasının çevre, insan sağlığı ve ülke ekonomisi üzerinde etkilidir. İnşaat yıkıntı atıklarının geri dönüştürülmesiyle çevresel tahribatın önüne geçilebilecek ve bununla beraber hammaddeye duyulan ihtiyaç, nakliye masrafları, zaman kaybı, iş gücü ve enerji ihtiyacı belli miktarda azaltılabilecektir. Bu çalışmada, inşaat yıkıntıları atıklarının ince (toz) halinde olan kısmı ile köpük beton üretilebilirliği araştırılmıştır. Karışımlarda agrega olarak 4 mm elekten geçen inşaat yıkıntı atığı kullanılarak farklı su/çimento oranına göre 5 ayrı seride köpük beton numuneleri üretilmiş ve optimum su/çimento oranı belirlenerek farklı değişkenlere göre yeni köpük numuneleri hazırlanmıştır. Üretilen köpük beton numunelerinin birim hacim ağırlıkları, basınç dayanımları, su emme kapasiteleri ile ısıl iletkenlik katsayıları gibi özellikleri incelenmiş, inşaat yıkıntı atığının beton dayanımını olumsuz etkilediği gözlenirse de belirli oranlardaki numunelerde dolgu duvar malzemesi olarak kullanılabilmesine engel teşkil etmeyeceği görülmüştür.

Bilim Kodu : 91127

Anahtar Kelimeler : İnşaat yıkıntı atığı, Geri dönüşüm agregası, Köpük beton, Çevre, Sürdürülebilirlik

Sayfa Adedi : 71

Danışman : Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

INVESTIGATION OF THE USAGE OF CONSTRUCTION DEMOLITION WASTE IN
PRODUCTION OF FOAM CONCRETE

(M. Sc. Thesis)

Yusuf ÖZÇELİK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2022

ABSTRACT

Our natural resources are decreasing day by day due to unconscious consumption. With this; industrialization, unconscious urbanization, technological developments and the increase in consumption, as well as wastes seriously threaten the environment. The uncontrolled increase in construction debris wastes has an impact on the environment, human health and the country's economy. Environmental destruction can be prevented by recycling construction debris wastes, and the need for raw materials, transportation costs, time loss, labor and energy needs can be reduced to a certain extent. In this study, the ability to produce foam concrete with the fine (powdered) part of construction debris waste was investigated. Foam concrete samples were produced in 5 different series according to different water/cement ratio by using construction debris passing through 4 mm sieve as aggregate in the mixtures, and new foam samples were prepared according to different variables by determining the optimum water/cement ratio. The properties such as unit volume weights, compressive strengths, water absorption capacities and thermal conductivity coefficients of the produced foam concrete samples were examined, and that although it was observed that the construction debris waste adversely affected the concrete strength, it would not hinder its use as infill wall material in certain proportions of the samples.

Science Code : 91127

Key Words : Construction demolition waste, Recycling aggregate, Foam concrete, Environment, Sustainability

Page Number : 71

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Osman ŞİMŞEK

TEŞEKKÜR

Bu araştırmada konu, deneysel çalışmalar, sonuçların değerlendirilmesi gibi birçok aşamada katkılarından ötürü tez danışmanım Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK'e, Prof. Dr. Salih YAZICIOğLU, Prof. Dr. İlhami DEMİR ve Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz ARUNTAŐ'a ayrıca her konuda yardımcı olan Prof. Dr. Mustafa ŐAHMARAN'a, deney aşamalarında yardımlarını grdğim Ender BAYRAKTAR, Ali Erhan YILMAZ, Ahmet DADA, Ömer Faruk ÇINAR, Evren ALP, Emrah BAĐŐI, Onur COŐKUN, Emre GÜVENİR, Emrah SME ile diğer mesai arkadaşlarım ve yöneticilerime, her zaman yanımda olarak bana destek olan aileme, eşime ve kızıma teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Beton	3
2.2. Hafif Betonlar.....	4
2.3. Köpük Betonun Yeri ve Önemi.....	6
2.4. İnşaat Sektöründe Sürdürülebilirlik	12
2.5. Atık Yönetimi, Geri Dönüşüm ve Kazanım.....	13
2.6. İnşaat Yıkıntı Atığının Yeri ve Önemi.....	15
2.7. İnşaat Yıkıntı Atıklarıyla İlgili Yapılmış Çalışmalar	19
3. MATERYAL ve METOT	23
3.1. Materyal	23
3.1.1. Agrega.....	23
3.1.2. Köpük ajanı	23
3.1.3. Çimento ve karışım suyu.....	25
3.1.4. Köpük tasarımı	26
3.1.6. Harç tasarımı	27

Sayfa

3.1.5. Köpük beton akışı	27
3.2. Metot	28
3.2.1 Temin edilen malzemelerin hazırlanışı	28
3.2.2 Köpük üretimi	29
3.2.3 Karışım oranları ve deney numunelerinin elde edilmesi.....	29
3.2.4 Deneysel uygulamalar ve yöntemler	32
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	43
4.1. Taze Harç Özellikleri	43
4.2. Sertleşmiş Köpük Beton Özellikleri.....	43
4.2.1. 1. grup numunelerin mekanik, fiziksel ve termik özellikleri	43
4.2.2. 2. grup numunelerin mekanik, fiziksel ve termik özellikleri	48
4.2.3. 3. grup numunelerin mekanik, fiziksel ve termik özellikleri	52
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
5.1. Sonuçlar.....	61
5.2. Öneriler	62
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	71

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. TS EN 206-A2’de hafif betonların birim hacim ağırlıklarına göre sınıflandırılması.....	5
Çizelge 2.2. Hafif betonların sınıflandırılması	5
Çizelge 2.3. Ülkelere göre inşaat yıkıntı atıkları ve dönüşüm miktarları	18
Çizelge 3.1. Köpük ajanı özellikleri	24
Çizelge 3.2. CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	25
Çizelge 3.3. Köpük püskürtme pompası özellikleri.....	26
Çizelge 3.4. Belirlenen köpük beton karışım oranları	30
Çizelge 3.5. GDA yoğunluk ve su emme verileri.....	33
Çizelge 3.6. Köpük beton harcının sınıflandırması.	34
Çizelge 3.7. Beton mikroskobu özellikleri	42
Çizelge 4.1. Marsh hunisi akış süreleri.....	43
Çizelge 4.2. 1. grup sertleşmiş köpük beton numunelere ait veriler.....	44
Çizelge 4.3. 2. grup sertleşmiş köpük beton numunelerine (köpüğün değişken olduğu) ait veriler.....	48
Çizelge 4.4. 3. grup numunelerine ait veriler.....	52
Çizelge 4.5. TS 825’te yer alan gaz beton ve yatay delikli tuğla ile numunelerin kıyaslanması.	55

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. GDA elek analizi sonuçları.....	34
Şekil 4.1. 1. grup 7. ve 28. gün basınç dayanımı-birim hacim ağırlık ilişkisi	45
Şekil 4.2. 1. grupta ultrases geçiş hızı-porozite-su emme oranı ilişkisi.....	46
Şekil 4.3. 1. grupta ısı iletkenlik-birim hacim ağırlık-basınç dayanımı ilişkisi.....	47
Şekil 4.4. 2. grupta 7. ve 28. gün basınç dayanımı-birim hacim ağırlık ilişkisi	49
Şekil 4.5. 2. grupta ultrases geçiş hızı-porozite-su emme oranı ilişkisi.....	50
Şekil 4.6. 2. grupta ısı iletkenlik-birim hacim ağırlık-basınç dayanımı ilişkisi.....	51
Şekil 4.7. 3. grupta 7. ve 28. gün basınç dayanımı-birim hacim ağırlık ilişkisi	53
Şekil 4.8. 3. grupta ultrases geçiş hızı-porozite-su emme oranı ilişkisi.....	54
Şekil 4.9. 2. grupta ısı iletkenlik-birim hacim ağırlık-basınç dayanımı ilişkisi.....	55

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Köpük betonun görünümü	9
Resim 2.2. Köpük görünümü	11
Resim 2.3. Sıfır atık yaklaşımı.....	14
Resim 2.4. Elâzığ Depremi-Mustafapaşa’da bina enkazından ekonomik değere sahip ürünlerin ayıklanması	20
Resim 2.5. Elâzığ Depremi-Abdullahpaşa’da bina enkazdan ekonomik değere sahip ürünlerin ayıklanması.	20
Resim 3.1. Deneyleerde kullanılan konkasör ve geri dönüşüm agregasının elenmesi.....	23
Resim 3.2. Kullanılan köpük ajanı.....	24
Resim 3.3. Deneyleerde kullanılan çimento	25
Resim 3.4. Köpük püskürtme pompası ve hava kompresörü.....	26
Resim 3.5. Harç karışımları için kullanılan mikser	27
Resim 3.6. Marsh hunisi	27
Resim 3.7. Geri dönüşüm agregasının kırımı	28
Resim 3.8. Geri dönüşüm agregasının elenmesi	28
Resim 3.9. Eleme işleminin neticesinde hazırlanan GDA	28
Resim 3.10. Köpük üretimi	29
Resim 3.11. Üretilen harç ve köpüğün birleştirilerek karıştırılması	31
Resim 3.12. Üretilen köpük betonun yağlanmış kalıplara dökümü.....	31
Resim 3.13. Kalıba yerleştirilmiş köpük beton numuneleri	31
Resim 3.14. Geri dönüşüm agregası elek analizi deneyi	33
Resim 3.15. Birim hacim ağırlık tayini.....	35
Resim 3.16. Kırılmak üzere hazırlanmış köpük beton numuneleri	36
Resim 3.17. Köpük beton numunelerinin kırımı	36
Resim 3.18. Suyu doymuş hale getirilmiş köpük beton numuneleri	38
Resim 3.19. Suyu doymuş halde olan köpük beton numunelerinin ölçümü.....	38

Resim	Sayfa
Resim 3.20. PL Pundit 200 cihazı ve problemlerin yağlanması işlemi	39
Resim 3.21. Ultrases geçiş hızı ölçüm işlemi	39
Resim 3.22. Ultrases geçiş hızının okunması	40
Resim 3.23. Isıl iletkenlik katsayısı ölçüm işlemi	41
Resim 3.24. 30x30x5cm boyutlarında üretilen köpük beton plakaları	41
Resim 3.25. Isıl iletkenlik tayini için üretilen köpük beton numunesi	41
Resim 3.26. Beton mikroskobu.....	42
Resim 3.27. Köpük betonun boşluk yapısının ölçümü	42
Resim 4.1. Karışımdaki değişkenlerin birim hacim ağırlığına etkisi.....	56
Resim 4.2. Karışımdaki değişkenlerin dayanıma etkisi.....	57
Resim 4.3. Karışımdaki değişkenlerin ısıl iletkenliğe etkisi.....	58
Resim 4.4. Üretilen köpük betonun boşluk ve gözenek yapısı.	59
Resim 4.5. Üretilen köpük beton numunesinin suda yüzdürülmesi.....	60

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
%	Yüzde
°C	Santigrad derece
Ac	Yükleme alanı
F	Kırılma yükü
g	Gram
k	Isı iletkenlik katsayısı
kg/dm³	Kilogram / desimetreküp
l	Litre
M	Ağırlık
m	Su emme oranı
m/s	Metre / saniye
MPa	Mega paskal
MPa/s	Megapaskal / saniye
N	Newton
n	Betonun birim ağırlığı
p	Porozite
s	Saniye
V	Numune hacmi veya puls hızı
V_v	Boşluk hacmi
W/mK	Watt / metre.kelvin
λ	Isı iletim katsayısı
ρ	Yoğunluk

Kısaltmalar**AB****ABD****ASTM****DKY****GDA****ISO****İYA****KTA****ÖBA****PÇ****S/Ç****S/İM****TS EN****Açıklamalar**

Avrupa Birliği

Amerika Birleşik Devletleri

American Society For Testing And Materials

Doğun Kuru Yüzey

Geri Dönüşüm Agregası

Uluslararası Standartlar Örgütü

İnşaat Yıkım Atığı

Kırma Taş Agregası

Öğütölmüş Beton Atığı

Portland Çimentosu

Su / Çimento Oranı

Su / ince malzeme oranı

Türk Standartları Enstitüsü

1. GİRİŞ

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de doğal kaynaklar hızlı bir şekilde azalmakta veya tahrip edilmektedir. Bunun nedenleri olarak nüfusta meydana gelen artış, sanayileşme, küresel ısınma, göç hareketleri ve bilinçsizce tüketim gibi faktörleri saymak mümkündür. Doğal kaynakların hızla azalmasına neden olan faktörleri azaltabilmek adına, atıkların yönetiminin ve sürdürülebilirliğin sağlanarak çevre kirliliğinin önüne geçilmesi, en aza indirilmesi gerektiği düşünülmektedir. Böylece doğal kaynakların korunmasına katkı sağlanabilecektir. Doğal kaymakların azalmasına ve çevre kirliliğine etki eden iş kollarının başında inşaat sektörü gelmektedir. Çünkü inşaat sektöründe kullanılan bütün malzemeler doğal kaynakları tüketmeye yönelik olduğu gibi atıkları da çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bilindiği üzere bu sektörde kullanılan beton ve beton bileşenleri, duvar malzemeleri (tuğla, taş, briket, gaz beton), çatı örtü malzemeleri gibi birçok malzeme sayılabilir. Bu malzemelerin kontrolsüz bir şekilde kullanılması ve atıklarının kontrolsüz şekilde doğaya bırakılması, küresel ısınma, çevre kirliliği, insan sağlığı ve ülkelerin ekonomileri üzerindeki olumsuz etkisi uluslararası bir sorun olarak görülmektedir. Ayrıca günümüzdeki önemli sorunlardan bir diğeri ise kaliteli hammaddeye ulaşımın sınırlı olmasıdır.

Beton ve diğer inşaat atıkları, toplam katı atıkların yüksek bir bölümünü oluşturmaktadır. Ne yazık ki, ülkemizde belediyelerden herhangi bir izin alınmaksızın, çevreye gelişigüzel bırakılmış yıkıntı atıkları ile de karşılaşmaktadır. Bu sebepler ve ayrıca hammadde açısından Ülke ekonomisi göz önünde bulundurulduğunda inşaat yıkıntı atıklarının değerlendirilmesi gerektiği düşünülmektedir.

Ülkemiz inşaat sektöründe geri dönüşüm oranı gelişmiş ülkelere kıyasla yok denecek seviyelerdedir. Diğer ülkelerde inşaat yıkıntı atıkları yeniden hammadde olarak kullanılmakta olup bu sayede hem iktisadi anlamda ekonomiye katkı sağlanmakta hem de çevreye olan olumsuz etkisi en aza indirgenmektedir. Bu atıkların geri dönüşümü ile tekrar kullanılması sayesinde çevresel anlamda meydana gelen tahribatın azaltılmasının yanı sıra doğal agrega kaynakların şehir merkezlerinden uzak olması sebebiyle nakliye masrafları, bunun için sarf edilen iş gücü ve zaman kaybı da azalacağı bilinmekte ve bu konuda birçok bilimsel araştırmalar yapılmaktadır [1]. Yapılan araştırmalarda çoğunlukla sadece atık betonlar, agrega boyutuna getirilerek geri dönüşüm agregası (GDA) olarak beton üretiminde kullanılması hedeflenmiştir. Elde edilen GDA'sı kırma taş agrega (KTA) ile azaltılarak

ikame olarak kullanılmıştır. Genellikle bu çalışmalarda sadece iri agrega olarak GDA olarak belirli oranlarda KTA ile ikame edilmiş bu gibi birçok çalışma yapılmıştır. Bazı bilim insanları ise inşaat molozları GDA olarak beton üretiminde kullanarak betonun teknik özellikleri araştırmışlardır. Yapılan literatür taramasında inşaat yıkıntı atıklarının ince agrega (0-4 mm) olarak köpük beton üretiminde kullanımına rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada inşaat yıkıntı atığından elde edilen ince agrega ile köpük beton retilbilirliği ve optimum karışım oranların belirlenerek üretilen köpük betonun fiziksel, mekanik ve termik özeliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Beton

Beton; agregâ, çimento, su ve ihtiyaç duyulması halinde katkı maddelerinin bir araya gelmesiyle elde edilebilen bir yapı malzemesidir.

Taze beton, kolaylıkla karıştırılmalı, sıkıştırılmalı, taşınabilmeli, yerleştirilebilmeli ve perdelanabilmelidir. Ayrıca, terlemesi mümkün olduğunca az, priz alma süresi ise kontrol edilebilir seviyede olmalıdır [2].

Betonun içeriğinin %75-80'ini agregalar oluşturmaktadır. Bu agregalar, çakıl, kırmataş, kum gibi daneli malzemelerdir. Betonun içeriğindeki malzemelerden (çimento, agregâ ve su) en maliyeti en yüksek olanı çimentodur. Agreganın maliyeti ise daha düşüktür. İstenilen betonu elde etmek suretiyle, betonun içeriğinde olabildiğince yüksek miktarda agregâ kullanılması, betonun maliyetini azaltmaktadır. Agregâ kullanımını sadece ekonomik anlamda katkı sağlamamaktadır. Betonda çatlak oluşumunun önüne geçilmesine fayda sağlamakta ve beton dayanımına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, betonun aşınmaya ve çevresel etmenlere karşı daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır [2].

Beton harcının içeriğinde bağlayıcı özellik sergileyen çimentonun kullanım amacına göre özelliklerinin detaylı olarak incelenmesiyle karar verilmelidir [3].

Beton karışım suyunun beton özellikleri üstünde önemli etkisi vardır. Karışım suyu, kirli olmamalıdır. Fazla miktarda organik madde, yağ, şeker, alkol, tuz içeren sular karışım suyu olarak kullanılamaz [4]. Beton üretimde şebeke suları istenilen özelliktedir. Karışımlarda su miktarı artırıldıkça dayanımında düşüşler meydana gelmektedir. Bu nedenle, tasarımda s/ç oranı seçimine özen gösterilmelidir.

Beton katkı maddeleri, betonun sahip olduğu dayanım, durabilite, işlenebilirlik gibi özelliklerini olumlu yönde etkilemek ve ekonomik anlamda katkı sağlamak amacıyla kullanılmaktadır [5].

Betonlar, kullanım alanlarına göre çeşitlilik göstermektedirler. Örneğin, radyoaktif ışınlarla maruz kalınan alanlarda ağır betonlar tercih edilirken. Yapılarda ölü yükü azaltmak amacı ile hafif betonlar kullanılmaktadır.

2.2. Hafif Betonlar

Betonun kuru birim hacim ağırlığındaki değişim sahip olduğu diğer özellikleri etkiler. Bu özelliklerin başında dayanım ve ısı iletkenlik gelmektedir. Kuru birim hacim ağırlığın artması ile basınç dayanımı ve ısı iletkenlik artar ısı iletkenliğin artması ile de yalıtım özelliği azalır [6].

Normal betonun mukavemeti, yapıların taşıyıcı elemanlarında kullanılacak seviyede yüksektir. Ancak bunun yanı sıra birim hacim ağırlığı ve ısı iletkenliği de yüksektir. Özellikle uygun şekilde taşıyıcı hafif betonların kullanılmasıyla yapının ağırlığının azaltılması mümkündür. Bununla beraber betonun birim hacim ağırlığının azaltılması ile boşluk oranı artacak yapının yangına dayanımına, yalıtımına, inşasında ekonomikliğe katkı sağlanacaktır. Ayrıca, akıcı kıvamda olmaları sebebiyle kalıba yerleşmeleri istenilen düzeyde olacaktır.

Depremler sırasında binalara gelen yükler bu binaların ağırlıkları ile orantılıdır. Hafif beton kullanılması halinde yapının zeminine gelen yükler de azalır. Deprem esnasında ağırlığı çok olan bir yapı daha fazla salınım yapmaktadır. Ayrıca, hafif malzemelerle yapılan yapılarda deprem esnasında meydana gelen eylemsizlik kuvvetleri de azalacak, böylelikle sarsıntıların bina üzerindeki yıkıcı etkisi azalacaktır [7].

Hafif betonların olumlu özelliklerinin yanı sıra dayanım ve aşınmaya karşı direnç gibi boşluklu yapıda olmaları sebebiyle olumsuz özellikleri de vardır. Bu sebepten, uygulama amacına yönelik olarak uygun bir seçim yapılması gerekmektedir. Hafif betonların dayanımı ve birim hacim ağırlığı daha düşük olanları yalıtım işlerinde, orta derecede dayanıma sahip olanları ise duvar yapım işlerinde kullanılmaktadır.

Ülkemizde hafif betonlar TS EN 206-A2 (2021) standardı ile tanımlanmıştır. Bu standarda göre hafif betonun etüv kurusu yoğunluğu 800 kg/m³ ile 2000 kg/m³ arasındadır [8].

Çizelge 2.1. TS EN 206-A2’de hafif betonların birim hacim ağırlıklarına göre sınıflandırılması.

Birim Hacim Kütle Sınıfı	TS En 12390-7’ye Göre Belirlenen Birim Hacim Kütle Ağırlığı (kg/m ³)
D 1,0	≥ 800 ve ≤ 1000
D 1,2	> 1000 ve ≤ 1200
D 1,4	> 1200 ve ≤ 1400
D 1,6	> 1400 ve ≤ 1600
D 1,8	> 1600 ve ≤ 1800
D 2,0	> 1800 ve ≤ 2000

Taşdemir (2003), hafif betonları birim hacim ağırlıklarına ve işlevlerine göre aşağıda verilen şekilde sınıflandırmıştır.

- Yalıtım Esaslı Hafif Betonlar: 250 ile 800 kg/m³ arası birim hacim ağırlığa,
- Orta Dayanımlı Hafif Betonlar: 800 ile 1400 kg/m³ arası birim hacim ağırlığa,
- Taşıyıcı Hafif Betonlar: 1400 ile 2000 kg/m³ fazla birim hacim ağırlığa sahip betonlardır [9].

Çizelge 2.2. Hafif betonların sınıflandırılması [9].

Hafif Beton Sınıfı	Yalıtım Betonlar	Orta Dayanımlı Betonlar	Taşıyıcı Hafif Betonlar
BHA (kg/m ³)	250-800	800-1400	1400-2000
Basınç Dayanımı (MPa)	0,7-2	7-14	17-41
Agrega tipi	Vermikulit, perlit	Ponza volkan tüfü	Sinterlenmiş UK Genleştirilmiş kil veya şist Genleştirilmiş çüruf
Diğer Hafif Betonlar	Gaz ve Köpük Beton	Gaz ve Köpük Beton Kumsuz Beton (Hafif Beton)	Gaz ve Köpük Beton

Konuk (2003) tarafından yapılan çalışmada, birim ağırlığı 800 kg/m³’den küçük olan hafif betonların basınç dayanımları genellikle 1-7 MPa olduğunu ve yalıtım amacı ile kullanılabileceğini belirtmiştir [10].

Hafif betonlar üretim yöntemine göre şu şekilde sınıflandırılabilir.

- Doğal ve yapay hafif agrega ile üretilen hafif betonlar
- Kimyasal katkı maddeleri ile üretilen hafif betonlar

Perlitli hafif beton, taşıyıcı olacak şekilde yapı elemanı yapımını sunamayan, çimento, alçı agrega olarak sadece geliştirilmiş perlit veya doğal agrega ikame edilerek üretilen ve ısı yalıtımı imkânı sunan hafif betondur. Genleştirilmiş perlit, tuf, uçucu kül ve sünger taşı (ponza veya bims taşı) betonu, yüksek fırın cürufu gibi agregalarla üretilen betonlar genellikle ısı ve ses yalıtım amaçlıdır. Vennikulit, geliştirilmiş kil ve şist gibi agregalarla üretilen betonlar, taşıyıcı beton olarak kullanıldığı gibi yaygın olarak da ısı ve ses yalıtım amaçlı yerlerde kullanılmaktadır. Kimyasal katkı maddeleri ile üretilen hafif betonlarda, hava sürükleyici kimyasal katkı maddesi, alüminyum tozu, hidrojen peroksil ve beyazlatma tozu ile betonun birim hacim ağırlığı azaltılmaktadır [11].

2.3. Köpük Betonun Yeri ve Önemi

Hafif betonun bir çeşidi olan ve öncelikle boşluk doldurma ve izolasyon malzemesi olarak tasarlanan köpük beton; köpük ajanına su ikame edilerek elde edilen köpük ile su, çimento ve agregadan oluşan harcın karıştırılmasıyla elde edilir. Köpük beton hakkında ilk olarak 1923'te patent alınmış olup bu ürün yarı taşıyıcı veya taşıyıcı olmayan inşaat uygulamalarında kullanılmıştır. Kararlı bir köpük beton üretimi; köpük ajanının niteliğine, oranına, köpüğün üretimin biçimine, boşluk yapısına, boşluk yapısının dağılımına ve birçok etmene bağlı olmakla beraber belirli bir oranda karışım hesabı bulunmamaktadır [12]. 1954 yılında Valore tarafından köpük betona ilişkin ilk kapsamlı inceleme yapılmış, 1963 yılında ise Rudnai, Short ve Kinniburgh tarafından daha detaylı çalışmalar yürütülmüştür [13]. Köpük betonun yangın dayanımı ve ısıl iletkenlik gibi özelliklerini incelemiş ve bazı inşaat uygulamalarında kullanımını değerlendirmiştir. Köpük beton hakkında daha detaylı çalışma ise Ramamurthy vd. (2009) tarafından gerçekleştirilmiş ve köpük betona ilişkin karışım tasarımı, basınç dayanımı, yoğunluğu gibi taze ve sertleşmiş beton özellikleri hakkında bilimsel sınıflandırmalar yapılmıştır [14].

Köpük betonun patenti 1923 senesine dayansa da kararlı bir köpük beton üretimi; köpük ajanının niteliğine, oranına, köpüğün üretimin biçimine, boşluk yapısına, boşluk yapısının dağılımına ve birçok etmene bağlı olduğundan belirli bir oranda karışım hesabı bulunmamaktadır [12].

Beton hakkında yapılan çalışmalarda; yüksek dayanıma sahip, maliyeti az ve bina yükünü azaltacak daha hafif betonlar üretilmeye çalışılmaktadır. Yapılan çalışmalar neticesinde

köpük betonun bu malzemelerin önemli üyelerinden biri olduğu düşünülmektedir [14]. Meydana gelecek olan bu hafifleme betonun boşluklu yapıda olması ile mümkündür. Söz konusu boşluklu yapının bir diğer avantajı da ısı yalıtımını olumlu yönde etkilemesidir.

İçeriğinde, hacimce %75- %80 oranda birbirinden bağımsız kapalı gözenekler barındıran köpük beton, taze haldeyken düşük viskoziteye, yoğunluğa ve ısıl iletkenliğine sahiptir. Genel olarak kuru yoğunluğu 400-1600 kg/m³, basınç dayanımı 1-15 MPa aralığındadır. Köpük beton kolayca pompalanabilir ve yerleştirilebilir. Vibrasyon işlemi gerektirmeyen köpük betonun suya ve dona karşı direnci oldukça yüksektir. Köpük beton harcı, kalıplanmak suretiyle işlemlerde bloklar halinde veya gerektiğinde uygulama sahasında hazırlanabilir ve pompa yardımı ile kolaylıkla taşınabilir. Duvar blokları, asmolen, panel, yalıtım tesviye betonu, prefabrik yapı elemanları üretiminde yoğunluğuna bağlı olacak şekilde kullanılabilir [15].

Köpük beton uygulamaların artmasında ve çeşitlenmesinde, son 20 yılda köpük kimyasalı üretiminde meydana gelen gelişmeler etkili olmuştur. Protein veya sentetik kökenli köpük ajanı kullanımı ve basınçlı hava ile reaksiyonlar meydana gelmesi sonucu hava boşluğu (kabarcıklar) meydana gelir. Böylelikle, %10 ile %70 oranında boşluğa sahip olan hafif bir köpük beton elde edilir. Elde edilen köpük betonunda hafifliğin aksine basınç dayanımı olumsuz olarak etkilenir [12-16].

Köpük betonun kararlılığı; yüksek akışkanlığa sahip olması, kendiliğinden yerleşmesi ve betonda gereği kadar gözenekli bir yapı elde edilmesi açısından üst düzeyde önem arz etmektedir. Khayat vd (2002), Nambiar ve Ramamurthy (2009) yaptıkları çalışmada köpük betonun kararlılığında; karışımın su miktarı, ilave edilen köpük miktarı ve karışımındaki diğer katı bileşenlerinin etkili olduğunu ortaya koymuşlardır [17-18].

Katı kıvamlı bir harç karışımı hava kabarcıklarının patlamasına, akışkan kıvamlı bir harç karışımı ise bünyesindeki hava kabarcıklarının tutma yeteneğini yitirmesinden ayrılmaya neden olacaktır [12].

Karışım harcındaki ince malzeme oranının yüksek olması, yüzey alanının artması ile büzülmenin artmasına sebep olacaktır. Köpük betonun dayanımı, normal betona kıyasla birim ağırlığına bağlı olarak daha düşüktür. Yüksek miktarda ince malzemenin kullanılması

ile büzülme değerlerinin artmasından meydana gelen iç gerilmeler, bünyesinin mukavemet değerlerini aşması halinde büzülme çatlakları meydana gelmektedir [19].

Karışımındaki çimento oranının artması, rötre oluşumunun artmasına sebep olacağından bu durum göz önünde bulundurulmalıdır. Belirtilen sebeple, çimento dozajının 300 kg/m^3 'ten fazla olamaması, su/çimento oranının mümkün olduğunca düşük tutulması ve su azaltıcı yapı kimyasalların kullanılması uygun olacaktır. Bu durumda su miktarının az olmasına bağlı olarak rötre oluşumu kontrol altında tutulacaktır. Diğer taraftan, köpük yoğunluğunun $45-50 \text{ g/dm}^3$ 'ten daha az oranda kullanılması rötre oluşumunda artırdığından, köpük yoğunluğunun belirtilen değerlerden fazla ($60-70 \text{ g/dm}^3$) olması uygun olacaktır. Ayrıca, köpük yoğunluğunu artırmanın rötre oluşumuna herhangi bir olumsuz etkiye bulunmadığı literatürdeki verilerde belirtildiği gibi deneysel çalışmalarla da saptanmıştır [19].

Karışımında uçucu kül kullanımı, gereken karışım suyu ihtiyacının artmasına sebep olacağından rötre oluşumuna artırıcı etkisi bulunmaktadır. Bunun yanı sıra puzolanik özelliği sahip olmasından ötürü dayanıma önemli katkı sağlamaktadır. Uçucu kül, çimentoya göre %20-%30'u oranında kullanıldığında mukavemet değerlerinde artış gözlemlenmektedir. Köpük betonda iri taneli agrega kullanılmadığından ince taneli malzeme ile üretilen köpük betonun birim ağırlık değerlerinin düşük olması durumunda rötre oluşumu artmaktadır. Bu sebeple, karışımında belli oranda iri taneli malzeme kullanılması rötre çatlaklarını önlemede oldukça etkilidir. İri taneli malzeme için $1 \text{ mm} - 2 \text{ mm}$ aralıkta olacak şekilde hafif agrega kullanımı uygun olacaktır. Rötre çatlaklarını önlemede, 1 m^3 köpük beton karışımı içeriğinde 50 dm^3 hafif agrega (genleşmiş perlit, diatomit vb.) kullanımı etkili olmuştur. Rötre çatlaklarını sınırlamak için lif kullanımı da etkili olmaktadır. Karışımında çimentoya oranla %0,5-%1 arasında polipropilen veya cam elyaf kullanımı rötreyi engellemede etkili olmaktadır [19].

Hafif beton ailesinin bir üyesi olan köpük beton hücreli beton veya gözenekli beton adıyla da bilinmektedir. Yapıların iç ve dış duvarlarında kullanılacaklardır. Bünyelerinde doğal agrega ve çimento haricinde bir malzeme barındırmadığından insan sağlığına zararı bulunmamaktadır. Yapı malzemelerinin ısı iletkenlikleri üretim ve tüketim anlamında günden güne bir hayli önem kazanmıştır. Hafif olan ve ses/ısı yalıtımı sağlayan köpük beton, yapılarda alternatif bir yalıtım malzemesi olmaktadır. [20-21].



Resim 2.1. Köpük betonun görünümü [21].

Ülkemizde köpük beton kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Yapılarda tesviye betonları, yalıtım şapları ve duvar blokları şeklinde kullanımı söz konusudur. Köpük betonun üretimde yerli sanayimiz yeteri seviyelerde olmasına karşın standartsızlık üretimde olumsuz bir etki oluşturmaktadır. Binaların ısı yalıtım kurallarının belirtildiği TS 825'te standardı olmadığından ötürü tanımlanamamıştır. Bu sebeptendir ki projelendirmede yapı malzemesi olarak belirtilememektedir. Ülkemizde de diğer ülkelerdeki gibi köpük betonun kullanımının yaygınlaşması standardının oluşturularak TS 825'te tanımlanması akabinde gerçekleşebilecektir. Bunun neticesinde de köpük beton üretimine ilişkin çeşitli tesisler kurulmaya başlanacaktır [21].

Köpük betonda birim hacim ağırlığı betonun basınç mukavemetine büyük ölçüde etki eder. Köpük betonun birim hacim ağırlığı azaldıkça basınç mukavemeti de katlanarak azalır. Elde edilen betonun dayanımı 0,34 ile 20 MPa arasında olabilmektedir. Uçucu külün yoğunluğu yüksek (1500 ile 500 kg/m³) olan köpük betona uygulanması ile uygulanmasıyla 50 MPa'a kadar basınç dayanımı elde edilebilmektedir [22].

Ezici (2016), yaptığı çalışmalar neticesinde, uygun sıcaklık ve nem ortamında betonun yaşının arttıkça basınç mukavemetinin de bu oranda arttığı ve yapılan hesaplamalarda betonun 28 günlük basınç mukavemetinin kullanılmasının sebebi olarak betonun ulaşabileceği maksimum dayanımın %70'ine ilk 28 gün içinde ulaşılması sonucuna ulaşmıştır [23].

Köpük beton harcının akış özelliği geleneksel harçlara nazaran akma sınırları çok düşük olduğundan kendiliğinden akış özelliği gösterir. Köpük betonun akışkanlık özelliğine birçok faktör etki eder. Bunların başında; su/çimento oranı, su/toz oranı, köpük ajanının ve

çimentonun tipi, köpük yoğunluğu, dolgu malzemesinin tipi ve oranı, seçilen harcın yoğunluğu gelmektedir [24].

Köpük betonların mukavemetleri diğer beton türlerine göre daha zayıftır. Bu sebeptendir ki, genellikle taşıyıcı eleman olarak kullanılmazlar. Ancak, hafif olmasının yanı sıra yalıtım değerlerinin iyi olması sebebiyle dolgu duvar malzemesi olarak veyahut direkt olarak yalıtım malzemesi yerine tercih edilmeleri mümkündür.

Köpük betonda iki temel üretim çeşidi vardır. İlk yöntem harç karışımından bağımsız olarak elde edilmiş köpük ile bu harcın karıştırılmasıdır. İkincisi ise beton harcı karışımı esnasında köpük elde edilmesi yöntemidir. Köpük beton üretiminde kullanılacak olan köpükler protein ya da sentetik bazlı olmakla birlikte tescilli üreticilerden temin edilebilmektedirler [25].

Protein esaslı köpükler hayvansal ürünler elde edilmektedir. Sentetik esaslı köpükler ise aminoksit, amin, formaldehit, naftalin sülfonat gibi maddelerden meydana gelmektedir. Söz konusu maddelere bakıldığında bu maddelerin çevresel anlamda tehlike oluşturabilmeleri mümkündür. Belirtilen sebeple, bünyesinde bilhassa formaldehit kondensatları barındırması halinde kullanımda hassasiyet gösterilmesi gerekmektedir. Protein esaslı olan köpük ajanları ile elde edilen köpükler sentetik olanlara kıyasla dayanımı yüksek ve daha güçlü yapıya sahiptir. Bununla birlikte, sentetikler olanlar daha çok genleşebildiğinden yoğunluğu azaltıcı yönünde etki göstermektedir. Ayrıca protein bazlı olanlar bünyesine daha çok havanın karışmasına müsaade ederler ve daha kararlı bir boşluk yapısı oluştururlar. Sentetik bazlı ajanlarda raf ömrü 1 yıla kadar ulaşabilirken protein bazlı köpük ajanlarında bu süre 6 aya kadardır [22].



Resim 2.2. Köpük görünümü [21].

Köpük betonda harcın işlenebilirliği, kendiliğinden yerleşebilme özelliği, akışı bileşenlerin birbirleriyle uyumuna ve bünyesindeki suya bağlıdır. Köpük beton harcının kıvamını; agreganın boyutu, adezyon kuvveti, gözeneklilik, şekil ve yüzey alanı, köpük ajanı cinsi ve hacmi ile karışımdaki su/katı oranı önemli ölçüde etkilemektedir [12].

Amran vd. (2015) tarafından köpük betonunda taze birim hacim ağırlığı ile kuru birim hacim ağırlığı arasındaki farkın 100 kg/m^3 ile 120 kg/m^3 'ü geçmemesi tavsiye edilirken, Bing vd. (2012) tarafından kuru birim hacim ağırlığında gerçek ve teorik birim hacim ağırlık arasındaki farkın $\pm 50 \text{ kg/m}^3$ olması gerektiği, Mydin vd. (2012) tarafından da birim hacim ağırlığının azalmasının, köpük betonun dayanımının ve sertliğinin düşmesi yönünde etki ettiği belirtilmiştir [26-27].

Köpük betonda gözenek yapısı; betonun mekanik, fiziksel ve fonksiyonel özelliklerine etki göstermektedir. Gözenelerin boyutu, miktarı, dağılımı, aralarındaki bağlar yüke ve diğer etkilere gösterilen davranış biçimini etkileyen en önemli unsurlardır. Gözenekleri makro, kılcal ve jel gözenekler olarak sınıflara ayırmak mümkündür. Kılcal gözenekler, su emme oranını artırmaktadır. Bu sebeple, uygulanan kür işlemi neticesinde elde edilecek sonuca etki edebilmektedir [18]. Karışımdaki bileşenlerin türü, özelliği ve oranı ile köpük betondaki gözenek yapısı şekillenecek olsa da temel olarak en belirleyici husus köpük ajanının sahip olduğu özelliklerdir [29].

Köpük betonun mukavemetine etki eden en temel etmenler; ajanın oranı, türü, çimento miktarı, s/ç oranı, agrega, uygulanan kür ve yoğunluktur [29]. Bu hususta Bing vd. (2012), yaptıkları çalışmada, mukavemetin yoğunluk ile üstel olarak arttığı gibi köpüğün hacminde meydana gelen azalmayla da arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, karışımdaki köpük hacminin %50 oranında olması halinde basınç mukavemetinde büyük bir azalma olduğunu, basınç mukavemetinde değişime sebebiyet vermeyen oranın %30 olduğunu ortaya koymuşlardır [27].

Köpük beton üzerine daha evvel yapılmış bir çalışmada köpük beton karışım oranları aşağıda belirtilen şekilde ve buna yakın oranlarda kullanılmıştır.

Çizelge 2.3. Evvelce yapılan bir çalışmada kullanılan köpük beton karışım oranı [21].

D_{kuru} (kg/m ³)	Çimento (kg)	Kalker (kg)	Su (l)	Katkı (kg)	Lif (kg)	Köpük (kg)
500	300	196	149	2,48	3	63,85

2.4. İnşaat Sektöründe Sürdürülebilirlik

Sürdürülebilirlik, atık yönetimi, katı atık ve geri kazanım ile ilgili ilerleme kaydetmek adına öncelikli olarak bu kavramların ne olduğunun bilinmesi ve bu alanlarda hangi aşamalarda olduğunun tespit edilmesi, sonrasında ise bu alanda neler yapılabileceğine dair çalışmaların yürütülmesi gerekmektedir.

Birleşmiş Milletler Dünya Çevre ve Gelişme Komisyonu'na sürdürülebilirlik, gelecek kuşakların ihtiyaçlarının karşılanma olanağından taviz verilmeden bugünün ihtiyaçlarının karşılanabilmesi şeklinde ifade edilmiştir [30].

Geçmişten beri, insanların barınma, korunma ve medeniyetler kurarak miraslarını geleceğe taşıma gerekliliğinin neticesinde ortaya çıkan bir alan olan "inşaat" insanlığın her zaman ehemmiyet gösterdiği alanlardan biri olmuştur. Bugün de inşaat sektörü ülkelerin kalkınması hususunda ve sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi adına bir hayli önem arz etmektedir [31].

İnşaat sektörü çevresel anlamda çeşitli sorunlara yol açmasına karşın sosyal, iktisadi ve çevresel olarak da vazgeçilmesi mümkün değildir. Bununla beraber, söz konusu husus bu sektörün çevreyle uyum içerisinde gelişimine devam edebilmesi konusunda çeşitli görüşler doğmasına sebep olmuştur. Sürdürülebilir yapım görüşü adı altında bir araya gelen bu düşünceler esas itibarıyla enerji tüketiminin düşük seviyelere indirilmesine yönelik malzeme kullanılması suretiyle kaynak sarfiyatını azaltarak daha az atık oluşumuna sebebiyet vermeyi hedeflemektedir. Bu hedef doğrultusunda da doğal olarak belirli bir maliyet artışı göze alınmaktadır [32].

Yenilenemeyen doğal kaynak sarfiyatının çoğalması, sonraki kuşaklara kaynak sağlama ihtiyacı ve benzeri sorunlar bu sektörde planlamalar yapılarak çeşitli yöntemler ortaya konulmasına sebebiyet vermiştir. Bu bağlamda, sürdürülebilirliğin inşaat sektöründe hayata geçirilebilmesi için projelendirme sürecinden itibaren bu yöntemler tercih edilmeye başlanmıştır. Bir yapının tam anlamıyla sürdürülebilir olması için planlama, yapım ve yıkım süreçlerinde öncelikle çevresel hususlar göz önünde bulundurularak; sosyal, erişilebilir, ekonomik, çevresel konularda hassasiyete ve uyuma sahip olması gerekmektedir. Sürdürülebilir anlamda yapım alanında yapılan çalışmalar neticesinde klasik tasarımlarda ve yapılarda zaman, maliyet ve kalite hususları amaç olarak önemliken sürdürülebilir yapımda, bunların ilave olarak kaynak tükenmesinin ve çevre tahribatının azaltılması, doğru ve sağlıklı yapılaşma ile bir çevre oluşturulması hususları da amaçlar arasındadır [33].

2.5. Atık Yönetimi, Geri Dönüşüm ve Kazanım

Ülkemizde atık yönetimi, Atık Yönetimi Yönetmeliği'nin 4'üncü maddesinde, "*Atığın oluşumunun önlenmesi, kaynağında azaltılması, yeniden kullanılması, özelliğine ve türüne göre ayrılması, biriktirilmesi, toplanması, geçici depolanması, taşınması, ara depolanması, geri dönüşümü, enerji geri kazanımı dâhil geri kazanılması, bertarafı, bertaraf işlemleri sonrası izlenmesi, kontrolü ve denetimi*" olarak ifade edilmektedir [34].

Ayrıca, 12/07/2019 tarihli ve 30829 sayılı Resmî Gazetede Sıfır Atık Yönetmeliği yayımlanmıştır. Bu yönetmelikte; sıfır atık, "*Üretim, tüketim ve hizmet süreçlerinde atık oluşumunun önlenmesi/azaltılması, yeniden kullanıma öncelik verilmesi, oluşan atıkların ise kaynağında ayrı biriktirilerek toplanması ve geri dönüşüm ve/veya geri kazanımının*

sağlanarak bertarafa gönderilecek atık miktarının azaltılması suretiyle çevre ve insan sağlığının ve tüm kaynakların korunmasını hedefleyen yaklaşım” olarak tanımlanmıştır [35].

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nca 26/09/2017 tarihinde Sıfır Atık Projesinin tanıtım toplantısı yapılmış ve “sıfır atık” konusunda kapsamlı çalışmalara başlanılmıştır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan Sıfır Atık Projesi 2017 Faaliyet Raporu'nda “Sıfır Atık”; israfın önlenerek, hammadde kaynaklarının daha verimli kullanılmasını, atık miktarının azaltılmasını, toplama sistemlerinin kurulmasını ve atıkların geri dönüştürülmesini hedefleyen atık önleme yaklaşımı, atık stratejisi olarak tanımlanmıştır. Bakanlıkça, öncelikli olarak kamu kurum ve kuruluşlarında, alışveriş merkezlerinde, havaalanlarında, okullarda ve bu gibi yerlerde bireylerin bu proje hakkında bilinçlendirilmeleri ve “Sıfır Atık” uygulamasına destek vermeleri adına kılavuzlar hazırlanmış ve atıkların ayrı toplanmasına ilişkin şekilde uygulamalar yapılmıştır [36].



Resim 2.3. Sıfır atık yaklaşımı [37].

Gül ve Yaman (2021), Ülkemizde atık yönetiminin hâlihazırdaki uygulamaların atığın bertarafına yönelik olduğunu, son zamanlarda atığın geri dönüşümüne de ağırlık verildiğini, bu çerçevede Sıfır Atık Projesinin önemli olduğunu, yapılan çalışmalar neticesinde bireylerin atık hakkında yeterli bilgi düzeyinde olmadığını; tüm bireylerin, kurumların ve işletmelerin atık üreticisi olduğu göz önünde bulundurulduğunda atıkların geri dönüşümüne Ülkece destek verilmesi gerektiğini, Sıfır Atık Projesinin bir tercih değil zorunluluk olduğunu belirtmektedir [38].

Geri dönüşüm, kullanılmış ürünlerin, atıkların tekrar işlenmesidir. Geri dönüşümün ile atıklar ana bileşenine ayrılır ve yeni malzemeler elde edilir. Elektronik, metal, cam, plastik vb. işlem görmemiş maddelerden üretimi daha külfetli olan ürünlerde geri dönüşüm işlemi daha fazladır [39].

Geri dönüşüm ile depolama bölgelerindeki atık miktarının azaltılmasının yanı sıra kaynak madde kullanımı da bu paralel olarak azaltılmaktadır. Bilhassa AB mensubu olan ülkeler geri dönüşüme özen göstermektedir. Çünkü bu ülkelerde hammadde, ihtiyaca karşı yetersiz olduğundan bu ülkeler dış alıma mecburdur. AB atık politikasının hedeflerinden biri de atıkların mümkün mertebe yeni malzemeler elde etmek üzere değerlendirilmesidir. AB çoğu atık çeşidi hakkında geri dönüşüm hedefleri tayin etmiştir. Bu hususta üreticilerin de kullanıcıların da önemli vazifeleri bulunmaktadır. Atıkların ayrı toplanması suretiyle bu sürece hizmet edilmelidir. Bu tutum, olabildiğince yüksek vasıfta ürünün geri dönüştürülmesi ile bunların tekrar kazanımına destek olmaktadır. Buna ek olarak ürünlerin değerini en üst düzeye taşıyarak elde edilebilecek malzeme sayısını da artırır [40].

Geri dönüşüm ile tekrar kullanımı kapsayan geri kazanım, atıkların niteliklerinden faydalanılması suretiyle içindeki bileşenlerin fiziksel/kimyasal metotlarla başka ürünlere veya enerjiye dönüştürülmesidir [41].

2.6. İnşaat Yıkıntı Atığının Yeri ve Önemi

Katı atıkların önemli bir kısmını inşaat yıkıntı atıkları oluşturmaktadır. İnşaat yıkıntı atıklarına dair çalışmalar kapsamında Devlet Planlama Teşkilatı'nın VIII. 5 Yıllık Kalkınma Planında; 17 Ağustos ile 12 Kasım 1999 tarihlerinde yaşanan iki büyük depremin hasar tespitine dair yapılan çalışmalar ile yaklaşık olarak 43 000 yapının yıkıldığı ve ciddi anlamda inşaat yıkıntı atığına sebep olduğu tespit edilmiş olup yaklaşık olarak 13 milyon ton molozun meydana geldiği belirtilmektedir. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve İl Müdürlüklerinin belirlediği yerlerde bu atıkların bir bölümü depolanmış, bir bölümü de denize bırakılmıştır. Bu raporun "Karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri" kısmında yer alan önerilerden biri doğal afetlerle ilgili yasal düzenlemeler olup, yıkıntı atıkların yönetiminin de dikkate alınarak yeniden düzenlenmesi hakkında olup, bir diğeri ise bölgesel moloz yönetimine dair bir plan hazırlanmasına yöneliktir. Bu program kapsamında yıkıntı

atıklarının geri dönüşümüne ilişkin çalışmaların önemi ve söz konusu raporda “molozlardan demir, çimento ve çakıl geri kazanılması” gerektiği vurgulanmıştır [42].

Elias Özkan (2001), Türkiye’de belediyelerden izinsiz şekilde ve uygun olmayan yerlere yıkılmış olan yapıların moloz yığınlarının bırakılmasına çözüm olarak moloz yığınlarının bırakıldığı alanlara tesisler kurulması gerektiğini ve böylece kullanılmayan atığın geri dönüşümünün sağlanacağını belirtilmiştir [43].

İnşaat ve yıkıntı atıklarının taşınmasına, geçici olarak biriktirilmesine, bertaraf edilmesine ve geri kazanılmasına ilişkin 2004 yılında Hafriyat Toprağı, İnşaat Yıkıntı Atıkları Kontrolü Yönetmeliği yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmelik ile atık miktarı ve çevreye olan olumsuz etkisinin azaltılması hususunda gerekli tedbirlerin alınması, hafriyat toprağı ile inşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüştürülerek değerlendirilmesi, geri dönüşümü imkânsız olan maddelerin atık içerisinde ayıklanarak yıkım işleminin belirli ölçülerde ve kontrollü şekilde yapılması amaçlanmaktadır [44].

İnşaat yıkıntı atıklarının miktarlarına ilişkin olarak 1999 yılına ait Avrupa Birliği komisyonu raporunda; Toplamda 350 milyon nüfus ile 15 üye ülkede yılda ortalama olarak 180 milyon ton inşaat yıkıntı atığı olduğu, bu atığın yaklaşık %28’inin geri dönüşümünün sağlandığı ve %78’inin depolandığı belirtilmektedir. Ayrıca, bu atığın yaklaşık %80’ini Almanya, Birleşik Krallık, Fransa, İtalya ve İspanya oluşturduğu, bunun yanı sıra inşaat yıkıntı atıklarının dönüştürülmesinde; Hollanda, Belçika ve Danimarka üstün başarı elde etmiş ülkeler olduğu belirtilmektedir [45].

İnşaat yıkıntı atıklarının miktarlarına ilişkin olarak, Süme E. (2016) tarafından yapılan diğer bir çalışmada; Avrupa ülkelerinde yılda 180 milyon ton, ABD’de ise 136 milyon ton inşaat ve yıkıntı atığı olduğu, ABD’de inşaat ve yıkıntı atıklarının %43’ünün konutlardan (58 milyon ton) ve %57’sinin (78 milyon ton) ise diğer kaynaklardan olduğu; Avustralya-Sydney şehrinde inşaat ve yıkıntı atığı miktarının toplam katı atığın %60’nı oluşturduğu, İngiltere’de ise yılda 53,5 milyon ton inşaat ve yıkıntı atığı olduğu, bu atıkların 27,4 milyon tonunun (%51,2) depolanmakta, 21,2 milyon tonunun (%39,6) inşaat esnasında arazi kazanımında kullanılmakta ve 5 milyon tonunun (%9,2) yeni ürün kazanmak üzere değerlendirilmekte olduğu belirtilmektedir [46].

Yine bu çalışmada, Hollanda ve Belçika'da, inşaat yıkıntı atıklarının depolanmasının yasak olduğu ve %90 oranında geri kazanım yapıldığı, İngiltere'de inşaat yıkıntı atıklarının bedel karşılığında bertaraf edilmesi işlemi uygulandığından dolayı bu alanda tesisler kurulduğu ve bu ülkede inşaat yıkıntı atıklarının yol ve kaldırım yapımında nasıl kullanılacağına dair BS 6543 standardı oluşturulduğuna değinilmektedir. Ayrıca, Danimarka'da inşaat yıkıntı atıklarının ayrı toplandığı ve %82'sinin geri dönüştürüldüğü, Almanya'da ise depolama sahasına gidecek inşaat yıkıntı atıklarının %50 oranında azaltılmasının planlandığı belirtilmektedir. Avustralya'da inşaat yıkıntı atıklarının %30'unun geri kazanılmakta veya tekrar kullanılmakta olduğu, ABD'de ise 1800 adet inşaat yıkıntı atıklarının depolama tesisi, 3500 adet inşaat kazanım tesisi bulunduğu ve %30 oranında geri kazanım sağlandığı belirtilmiştir. Diğer taraftan; İspanya, İtalya, Portekiz, Yunanistan gibi ülkelerde ise geri dönüşüm oranının daha az olduğu, sebebinin ise bu ülkelerde yeteri kadar doğal agrega bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır [46].

Çizelge 2.3. Ülkelere göre inşaat yıkıntı atıkları ve dönüşüm miktarları [47].

Ülke	Toplam İnşaat ve Yıkıntı Atık Miktarı (Milyon Ton/Yıl)	Toplam Kurtarılan (Milyon Ton)	Kurtarıma Yüzdesi (%)	Nüfus (Milyon)	Kişi Başı Yıllık İnşaat ve Yıkıntı Atık Miktarı (kg)
Almanya	201	179	89	90	2510
ABD	317 (Toplam)	127 (Beton)	82 (Beton)	318	1000 (Toplam)
	155 (Beton)				490 (Beton)
Avustralya	14	8	57	23	610
Belçika	14	12	86	11	1270
Çek Cumhuriyeti	9 (Toplam)	1 (Beton)	33 (Beton)	10	900 (Toplam)
	3 (Beton)				300 (Beton)
Fransa	309	195	63	66	4680
Hollanda	26	25	96	17	1530
İngiltere	90	46	51	64	1400
İrlanda	17	13	76	5	3400
İspanya	39	4	10	47	830
İsviçre	7 (Toplam)	2 (Beton)	95 (Beton)	8	875 (Toplam)
	2 (Beton)				250 (Beton)
Japonya	77	62	81	127	610
Tayvan	63	58	92	23	2750
Türkiye	125 (Hafriyat)	-	-	75	1600
	10 (Yıkıntı)	6 (Hedeflenen)	60 (Hedeflenen)	75	135

Ülkemizde geri dönüşüm oranı inşaat sektöründe gelişmiş ülkelere nazaran yok denecek seviyelerdedir. Diğer ülkelerde inşaat yıkıntı atıklarının geri dönüşümü sayesinde bu atıklar yeniden hammadde olarak kullanılmaktadır. Böylelikle ülke ekonomilerine hem iktisadi anlamda katkı sağlanmakta hem de çevre tahribatı en aza indirilmektedir [1].

2.7. İnşaat Yıkıntı Atıklarıyla İlgili Yapılmış Çalışmalar

Yapıların yıkımı, yenilenmesi ve doğal afetler sonucu oluşan yıkıntı atıklarına ilişkin yapılmış bir çalışmada yıkıntı atıklarının; beton, sıva, tuğla, briket, tahta, cam, alçı, kiremit, plastik, donatı ve metal parçaları gibi malzemeleri içerdiği belirtilmiştir. Ayrıca, yıkıntı atıklarının yerel farklılıklar gösterdiği sonucuna ulaşılmış ve Danimarka ile Hollanda gibi ülkelerde inşaat atığının %80-85 kadarının beton ile duvar malzemesi olduğu belirtilmiştir [45].

Maçin ve Demir (2018) inşaat ve yıkıntı atıklarının yönetimine dair çalışmalarında; şehir merkezinden uzak alanlarda yıkıntı atıklarının halen kaçak şekilde doğaya bırakıldığını, herhangi bir ülkede oluşan toplam katı atığın ortalama %30-50'sinin inşaat yıkıntı atığından meydana geldiğini ve yıkıntı atığının da yaklaşık %60'nın betondan oluştuğunun tahmin edildiğini; coğrafi koşulların, hayvancılık, tarım, sanayi gibi faktörlerin bu durumu etkilediğini dile getirmişlerdir. Ayrıca, ülkelerin gelişmişliklerine göre bu oranın arttığını belirtmişlerdir. Yaptıkları araştırmalar neticesinde İstanbul'da yıkıntı atıklarının geri dönüşüm oranının %5 ila %20 arasında olduğunu dile getirmişler ve kentsel dönüşüm çalışmalarından dolayı İstanbul'da 55-65 milyon ton yıkıntı atığı oluşmasını ön görmüşlerdir [48].

Yapılan gözlem ve incelemelerde betonarme bir yapının inşaat yıkıntı atığını meydana getiren malzemelerin oranları yaklaşık olarak hacimce; %75 beton atığı, %20 duvar malzemesi (tuğla, briket) atığı, %3 sıva ve %2 seramik civarındadır. Bu oranların bölgesel/yöresel olarak yapı tipine göre farklılıklar gösterdiği bilinmektedir. Ayrıca, yıkılan yapının yapıldığı yıla göre de bu oranlarda farklılıklar olması söz konusudur [49].

Elâzığ Depremi'nin ardından Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Altyapı ve kentsel Dönüşüm Hizmetleri Genel Müdürlüğü'nce yürütülen çalışmalarda da gözlemlendiği üzere inşaat yıkıntı atıklarının günümüzde ekonomik değere sahip olduğu düşünülen ürünleri (donatı, metal gibi) yıkıntı alanında ayıklanarak alınmaktadır. Geride kalan İYA (moloz) olarak vahşi depolama alanlarına sevk edilmektedir.



Resim 2.4. Elâzığ Depremi-Mustafapaşa'da bina enkazından ekonomik değere sahip ürünlerin ayıklanması [49].



Resim 2.5. Elâzığ Depremi-Abdullahpaşa'da bina enkazından ekonomik değere sahip ürünlerin ayıklanması [49].

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Altyapı ve Kentsel Dönüşüm Hizmetleri Genel Müdürlüğü'nce yürütülen 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun kapsamında 20 yılda içerisinde 6 500 000 adet bağımsız birimin yıkılması suretiyle güvenli binalara dönüştürülmesi planlanmakta ve 500.000.000 ton inşaat ve yıkıntı

atığının ortaya çıkacağı beklenmektedir. Bu çalışmaların neticesinde de Ülkemiz ekonomik olarak ciddi bir katkı sağlaması hedeflenmektedir [50].

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Altyapı ve Kentsel Dönüşüm Hizmetleri Genel Müdürlüğü ile Tübitak Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü tarafından “İnşaat ve Yıkıntı Atıklarından Geri Kazanılan Ürünlerin Kullanım Kriterlerinin Belirlenmesi Projesi” yürütülmüş, protokol kapsamında inşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüşümüne ilişkin usul ve esasların belirlenmesi, atık yönetim planlaması ve seçici yıkım gibi konularla beraber mevzuatın geliştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, protokol kapsamında inşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüştürülmesi suretiyle tuğla, çimento, beton ürünleri ve asfalt üretimine dair çalışmalar yürütülmüştür. 12.05.2014 tarihinde inşaat ve yıkıntı atıklarından tuğla üretimi sağlanmıştır. Farklı tiplerde üretilen tuğlalar doğal kurumaya bırakılmış akabinde fırınlanmış ve “Yeşil Tuğlalar” elde edilmiştir. Tuğlaların performans kriterlerinin düzenlendiği TS EN 771-1 Standardında yer alan parametrelere uyumlu olduğu gözlenmiştir [50].

İnşaat yıkıntı atığı ile ilgili Köken, Köroğlu ve Yonar (2008) atık betonların beton agregası olarak kullanılabilirliğine ilişkin araştırmalar yapmışlar, 20 MPa basınç dayanımına sahip atık betonlardan sağlanan agregaların mekanik ve fiziksel özelliklerini incelemişler ve farklı karışımlarda beton elde etmişlerdir. Bu çalışmalar neticesinde, kullanılan malzeme üzerinde harç kalıntıları bulunmasından birim ağırlığının normal agregaya nazaran daha düşük olduğu, geri dönüştürülmüş ince agreganın su emme kapasitesinin de bir hayli fazla olduğu kanaatine varmışlardır [51].

Demirel ve Şimşek (2014) yaptıkları çalışmada, C25 sınıfı olan atık betonlardan elde edilen agregayı iri ve ince olarak iki gruba ayırmışlardır. Beton harcında çimento yerine %20 oranında uçucu kül ile çimento kütlelerinin %1,2’ si kadar süper akışkanlaştırıcı ilave ederek bu agrega ile beton üretilbileceği sonucuna ulaşmışlardır [52].

Şimşek ve Demirel (2015) erken yaştaki atık betonların beton içerisinde yeniden kullanılabilirliği konusunda çalışmalar yürütmüşler ve neticesinde de tüketiciler tarafından sürdürülebilir ürünlere talep gösterilmesi, geri dönüşümde ilerlemek adına daha çok yatırım ve teşviklerin ortaya konulması; ayrıca üretim sürecinde sarf edilen enerji miktarının

azaltılmasını öngören tasarım ve yapım tekniklerine yönelik çalışmalar yürütülmesi gerektiği kanaatine varmışlardır [53].

Yürütülen çalışmalarda, atık betonun kalitesini geri dönüştürülmüş agreganın kalitesinin doğrudan etkilediği, bu bağlamda su emme kapasitesinin ve aşınmanın daha yüksek, yoğunluğun ise daha düşük olduğu belirtilmiştir. Elde edilen betonun mukavemetinin alt beton sınıfını yerine kullanılabileceği belirtilmiştir [54-55-56].

İnşaat yıkıntı atıklarına ilişkin yapılan çalışmalarda, geri dönüşüm neticesinde bu atıklar ekseriyetle iri agregada olarak kullanılmış ve genelde de taşıyıcı beton elde edilebilmesi için deneylere konu olmuştur. Belirtilen sebeple, ince agregada olarak kullanılmak suretiyle köpük beton üretimi araştırılmıştır.

3. MATERYAL ve METOT

3.1. Materyal

Bu çalışmada, Ankara İli sınırları içerisinde bulunan bir yapının 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun kapsamında değerlendirilerek yıkım işlemi gerçekleştirilen ve ekonomik değeri olması sebebiyle donatısından ayrılmış durumda olan bir yapıdan elde edilen inşaat yıkıntısını oluşturan (beton, tuğla, kiremit, seramik ve geleneksel sıva) atıklardan yeterli miktarda ayrı ayrı olarak alınarak laboratuvar ortamında istenilen boyutlara getirilmiştir.

3.1.1 Agrega

Literatür bilgilerinden faydalanılarak ve deprem yıkıntıları üzerinde yapılan gözlemlerden, yıkıntı atığı oranları yaklaşık olarak hacimce %75 beton atığı, %20 tuğla atığı, %3 sıva ve %2 seramikten oluştuğu tahmin edilmiştir. Bu oranlar esas alınarak inşaat yıkıntı atığından elde edilen malzeme konkasör yardımı ile kırılmış ve TS EN 933-1'e göre ayrıştırılarak 0-4 mm aralığındaki malzeme yapılan deneylerde agrega olarak kullanılmıştır [57].



Resim 3.1. Deneylerde kullanılan konkasör ve geri dönüşüm agregasının elenmesi

3.1.2. Köpük ajanı

Tez çalışmasında yapılan deneylerde; boşluklu hafif beton ve hafif yapı elemanları elde edebilmek adına inşaat sektörü için geliştirilmiş olan organik reçine esaslı köpük ajanı kullanılmıştır. Temiz suya %2 ile %2,5 oranında konsantre halde bulunan köpük ajanı ikame edilerek solüsyon oluşturulmuştur. Köpük ajanının kullanımı ile elde edilen köpüğün birim

hacim ağırlığının 80-85 g/dm³ olması gerektiği yapılan testler neticesinde üretici firma tarafından önerilmektedir. Konsantre halde bulunan ajan ile üretilen köpük, çimento şerbeti ile birleştiğinde bağ yaparak hızla homojen bir karışım sağlamakta ve karışım ile oluşan sürtünmelere karşı köpük taneleri bölünme yaparak yeni bir kabarcık katmanı oluşturarak betonda bağımsız şekilde kapalı hücreler oluşturmaktadır. Köpüğün içeriğinde yer alan aktif protein ve enzimlerin dayanıma katkı sağlayacağı öngörülmektedir [58].



Resim 3.2. Kullanılan köpük ajanı

Çizelge 3.1. Köpük ajanı özellikleri [58]

Köpük Ajanı Özellikleri	
İçerik	Organik
Konsantre haldeki yoğunluk (kg/lt)	1,05
Köpük yoğunluğu (gr/l)	80-85
Köpük yüzey suyunu bırakma süresi (saat)	5
Raf Ömrü (ay)	24
Betonda priz başlangıcı	2 (20 °C için)
Saklama koşulu	Ağız kapalı şekilde ve serin ortamda

Köpük ajanı özellikleri [58].

- Doğal bir yapıya sahip olması, insan sağlığına zararlı değildir.
- Köpük yüzey zarının etkin dayanımı yüzey yükünü taşımaya yeterlidir.
- Yüzey yükün artması durumunda bölünme yeteneğine sahiptir.
- Anti bakteriyeldir, betonda küflenmeye karşı etkilidir.
- Köpük yoğunluğu 40-120 g/dm³ olarak ayarlanabilmektedir.
- Beton kuru yoğunluğu 150 ile 1600 kg/m³ arasında ayarlanabilmektedir.
- Beton içerisinde mikro gözenekler sayesinde iyi bir yalıtım sağlamaktadır.
- Beton karışım süresinin uzaması durumunda hacim kayıpları olmamaktadır.
- Bütün Çimentolarda R- N kullanılabilir. 32,5-42,5-52,5

3.1.3. Çimento ve karışım suyu

Bağlayıcı malzeme olarak TS EN 197-1 (2012) standardına uygun olarak üretilen CEM I 42,5 R Tipi Portland Çimentosu tercih edilmiştir [59]. Priz süresini daha az tutmak ve erken mukavemeti artırmak için hızlı sertleşen tipteki çimentolar, yüksek alüminalı çimentolar ve kalsiyum alüminalı çimentolar kullanılmış ve seçilen bu malzemelerin köpük beton bünyesindeki köpük yapısı ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Aşağıda yer alan çizelgelerde fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal İçerik		Fiziksel Özellikler	
Bileşen	%	Hacimsel Genleşme (mm)	<1
SiO ₂	20,63	İncelik (90mm, %)	0,1
Al ₂ O ₃	4,71	İncelik (200mm, %)	1,1
Fe ₂ O ₃	3,41	Özgül Yüzey Alanı (cm ² /g)	3340
CaO	63,64	Priz Başlangıcı (dak)	185
MgO	1,24	Priz Sonu (dak)	120
SO ₃	2,2	Özkütle (g/cm ³)	3,12
Na ₂ O	0,23	Mekanik Özellikler	
K ₂ O	0,91	7 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)	5,8
Cl-	0,0357	28 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)	7,2
Serbest CaO	1,26	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	39,3
Kızdırma Kaybı	2,63	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	51



Resim 3.3. Deneylerde kullanılan çimento

İnşaat yıkıntı atığından köpük beton elde edilmesine ilişkin yapılan çalışmada Ankara şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.4. Köpük tasarımı

Köpük üretimi için Rotowash Köpük Püskürtme Pompası (30 l) ve hava kompresörü kullanılmıştır. Hava kompresörü ile köpük makinesine basınçlı hava temin edilerek cihaz tankı içerisinde su ve konsantre köpük ajanının karıştırılması suretiyle köpük elde edilmektedir.

Regülâtör kontrollü 3-6 bar arası çalışma özelliği olan köpük püskürtme pompasında, hava regülâtörü yeterli hava dolduktan sonra hava akışını kesecektir. Manometrede çalışma basıncı 3-6 bar aralığında makine kullanıma hazırdır [60].

Çizelge 3.3. Köpük püskürtme pompası özellikleri [60]

Köpük püskürtme pompası özellikleri	
Basınç (bar)	3-6
Depo hacmi (l)	30
Köpük hortumu uzunluğu (m)	7
En x Boy x Yükseklik (cm)	40 x 34 x 88
Ağırlık (kg)	14



Resim 3.4. Köpük püskürtme pompası ve hava kompresörü

3.1.6. Harç tasarımı

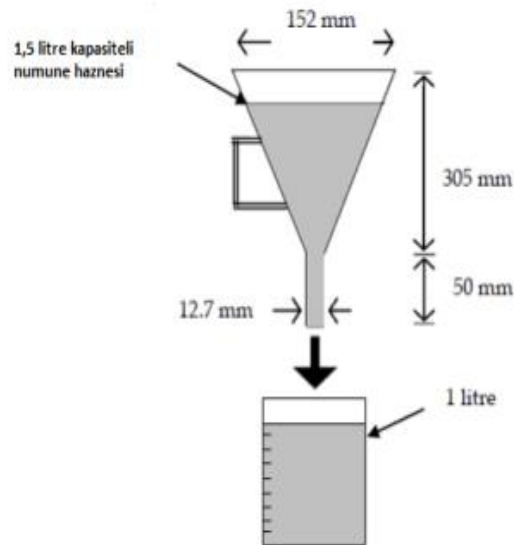
Çimento, su, köpük ve 0-4 mm aralığındaki geri dönüşüm agregasının bir araya gelmesinden elde edilen harç karışımı için elektrikli el mikseri (boya mikseri) kullanılmıştır.



Resim 3.5. Harç karışımları için kullanılan mikser

3.1.5. Köpük beton akışı

Köpük beton harcının akışkanlığının belirlenebilmesi adına etkin ve pratik bir deney aleti olan Marsh hunisi kullanılmıştır.



Resim 3.6. Marsh hunisi

3.2. Metot

3.2.1 Temin edilen malzemelerin hazırlanışı

İnşaat yıkıntısından ekonomik değeri olan malzemelerin ayıklanmasından sonra temin edilen arta kalan moloz laboratuvar ortamında suda yüzdürülerek mukavemeti düşük atıklardan arındırılmış (plastik, ahşap vs), akabinde de konkasör vasıtasıyla kırılmış ve 4 mm gözenekli elekten geçirilmiş olup elde edilen ince malzeme deneylerde esas olarak kullanılmıştır.



Resim 3.7. Geri dönüşüm agregasının kırılması



Resim 3.8. Geri dönüşüm agregasının elenmesi



Resim 3.9. Eleme işlemi neticesinde hazırlanan GDA

3.2.2 Köpük üretimi

Köpük beton üretimi için önce hava kompresörü ile köpük püskürtme pompası bağlantıları yapılarak cihaz tankı içerisine temiz su ve bu suya %2 oranında konsantre halde bulunan köpük ajanı ikame edilmiştir. Köpük çözeltisinin basınç ile genişmesi neticesinde 80-90 g/dm³ arasında köpük üretilmiştir. Yapılan ön denemelerde üretilen köpüğün harç içerisine katılmadan bekletilmesi halinde hacminin azaldığı gözlenmiştir. Köpüğün hacminin azalması halinde dökülen numunelerde ise hacim değişimi gözlenmiştir. Yapılan gözlemler neticesinde de yukarıda tarif edildiği şekilde 85 g/dm³ yoğunluğa sahip köpük üretilerek numunelerde kullanılmıştır.



Resim 3.10. Köpük üretimi

Üretilen köpük ile yapılan denemelerde geleneksel beton harcına kıyasla daha akışkan bir harç elde edilmiştir. Elde edilen harç kendiliğinden akış özelliği göstermiştir. Elde edilen bu akıcı özelliğe s/im ile s/ç oranı, kullanılan köpüğün yoğunluğu doğrudan etkilidir. Yapılan ön denemelerde, harcın düşük kıvamlı (katı) üretilmesi halinde gözeneklerin zarar gördüğü sonucuna ulaşılmıştır. Deneylede herhangi bir akışkanlaştırıcı malzeme kullanılmamıştır.

3.2.3 Karışım oranları ve deney numunelerinin elde edilmesi

Karışım oranları ön denemelere göre belirlenmiş olan gruplara ve serilere göre tayin edilmiştir. Bu oranlarda köpük betonun harcı hazırlanmış ve köpük bünyesine yine belirlenen oranlarda ilave edilmiştir. Karışım harcı hazırlanırken çimento, yıkıntı atığı eldesi ve su; helezonik uca sahip mikser yardımı ile yüksek devirlere çıkılmak suretiyle homojen hale gelene kadar karıştırılmıştır. Harcın içerisine köpük ikame edildikten sonra elde edilen

köpüklerin kesilerek zarar görmemesi için mikser yüksek devirde kullanılmamıştır. Harç ve köpük homojen hale gelene kadar karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen harç karışımı Marsh hunisinden geçirilmiş ve huniden 1 dakikadan daha az sürede 1 litre harcın geçtiği gözlenmiştir. Bu işlem neticesinde daha kolay sökülebilmesi için makine yağı ile yağlanan kalıplar yarısına kadar doldurulmuş ve tokmak yardımı ile sıkıştırılmıştır. Sonrasında ise kalıpların diğer yarısı doldurulmuş ve yine aynı yöntem ile sıkıştırılarak köpük beton harcının kalıba yerleşmesi sağlanmıştır.

Yapılan ön denemelerde köpük beton harcı olası bir çökmeye karşı çok az bir seviyede yüksek dökülmüş ancak herhangi bir çökme gözlenmemiştir. Ayrıca, yapılan bu denemelerde bir gün sonra sökülen kalıplardaki numunelerin dış etkilere karşı olumsuz davranış sergilemesi ve köpük beton harcı prizini geç alması sebebiyle kalıp sökme süresi olarak 3 gün belirlenmiştir. Kalıplardan çıkarılan numuneler kür uygulamasına tabi tutulmuştur.

Yapılan denemeler neticesinde belirlenen optimum karışım oranları aşağıda yer alan çizelgede verilmiştir. Deneysel çalışmalar üç gruptan oluşmaktadır. İlk grupta beş seri, diğer gruplarda ise sırası ile 6 ve 4'er seri bulunmaktadır. Her bir seride 10×10×10 cm boyutunda 3'er adet küp numuneler ve 3'er adet 30x30x5 cm boyutunda plaka numuneler yer almaktadır.

Çizelge 3.4. Belirlenen köpük beton karışım oranları

Grup No	Seri No	Atık (kg/m ³)	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	S/Ç	Köpük (kg/m ³)
1	S1	210	349,4	138	0,39	55,25
	S2	210	349,4	148	0,42	55,25
	S3	210	349,4	158	0,45	55,25
	S4	210	349,4	168	0,48	55,25
	S5	210	349,4	179	0,51	55,25
2	S6	210	349,4	158	0,45	68
	S7	210	349,4	158	0,45	63,75
	S8	210	349,4	158	0,45	59,5
	S9	210	349,4	158	0,45	51
	S10	210	349,4	158	0,45	48,875
	S11	210	349,4	158	0,45	46,75
3	S12	170	349,4	158	0,45	46,75
	S13	190	349,4	158	0,45	46,75
	S14	230	349,4	158	0,45	46,75
	S15	250	349,4	158	0,45	46,75



Resim 3.11. Üretilen harç ve köpüğün birleştirilerek karıştırılması



Resim 3.12. Üretilen köpük betonun yağlanmış kalıplara dökümü



Resim 3.13. Kalıba yerleştirilmiş köpük beton numuneleri

Yapılan deneyler ile minimum birim hacim ağırlık, maksimum dayanım elde edebilmek adına;

- 1. grupta numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerine göre optimum s/ç oranı belirlenmiştir.
- 2. grupta optimum s/ç oranı sabit tutularak köpük miktarı değiştirilmiş ve köpük betonun fiziksel ve mekanik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda optimum köpük hacmi belirlenmiştir.
- 3. grupta ise optimum köpük miktarı ve s/ç oranı sabit tutularak değişken olarak İYA kullanılmıştır.

Optimum s/ç oranı, köpük miktarı ve İYA oranları ile en uygun fiziksel ve mekanik özellikleri veren ve birim hacim ağılık başına en yüksek dayanımı sağlayan karışım oranlarının elde edilmesi amaçlanmıştır.

3.2.4 Deneysel uygulamalar ve yöntemler

Ultrases geçiş hızının belirlenmesi haricindeki tüm deneyler Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği laboratuvarlarında; geçiş hızı deneyi ise Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Yapı İşleri Genel Müdürlüğü mobil laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Yıkıntı atığı üzerinde yapılan çalışmalar

GDA'nın yoğunluk ve su emme oranı tayini

TS EN 1097-6 standardında yer alan piknometre metodu ile inşaat yıkıntı atığından elde edilmiş ve 4 mm'lik elekten geçirilmiş agregalarının tane yoğunluğu ve su emme oranı belirlenmiştir. Tane yoğunluğu ve su emme oranı aşağıdaki bağıntılar ile hesaplanmıştır [58].

Görünür tane yoğunluğu: $\rho_a = \rho_w M_4 / (M_4 - (M_2 - M_3))$

Etüvde kurutulmuş haldeki tane yoğunluğu: $\rho_{rd} = \rho_w M_4 / (M_1 - (M_2 - M_3))$

Doygun ve yüzeyi kuru haldeki tane yoğunluğu: $\rho_{ssd} = \rho_w M_1 / (M_1 - (M_2 - M_3))$

24 saat suda bekletilen agregaların su emme oranı (WA24), aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır;

$$WA24 = \rho_w 100x(M_1 - M_4) / M_4$$

ρ_w : Deney sıcaklığındaki su yoğunluğu (mega gram/metreküp)

M_1 : Doygun ve havada yüzeyi kurutulmuş agreganın kütlesi (g),

M2: Doygun agrega numunelerini ve su içeren piknometrenin kütlesi (g),

M3: Yalnızca su ile doldurulmuş piknometrenin kütlesi (g),

M4: Etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının havadaki kütlesi (g)'dir.

Yapılan hesaplamalar neticesinde İnce agreganın teknik özellikleri, yoğunluğu 2,1 kg/dm³, su emme oranı %12 ve çok ince malzeme miktarı (metilen mavisi). 0, 75 g/kg olarak bulunmuştur. Elde edilen veriler aşağıda yer alan çizelgede sunulmuştur.

Çizelge 3.5. GDA yoğunluk ve su emme verileri

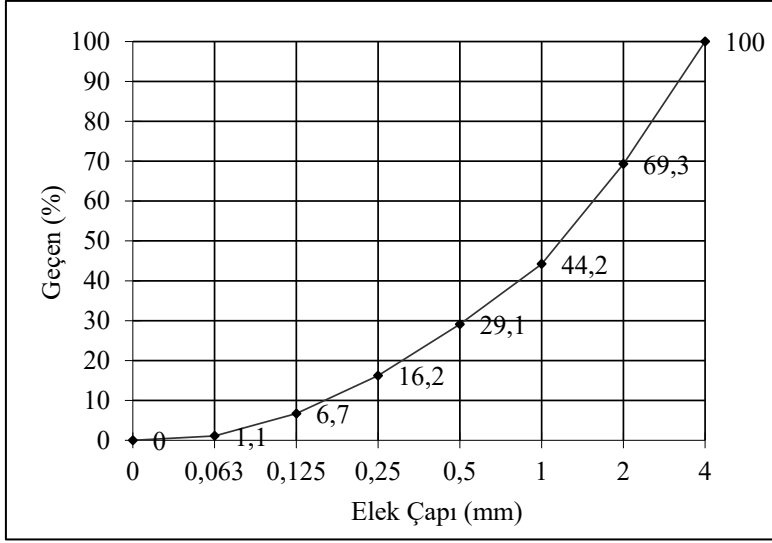
	GDA	Literatür değeri [53].			
		Mükemmel	İyi	Orta	Zayıf
Elek	(0-4 mm)				
Yoğunluk (g/cm ³)	2,1	>2,9	2,6-2,9	2,5-2,6	<2,5
Su emme (%)	12	<0,5	0,5-2,0	2,0-6,0	>6,0

GDA'nın elek analizi

İnşaat yıkıntı atıklarından elde edilen ve 4 mm'lik elekten geçen ince agrega hakkında TS EN 933-1'e göre elek analizi yapılmıştır. Yapılan elek analizine ilişkin veriler aşağıda yer almaktadır [57].



Resim 3.14. Geri dönüşüm agregası elek analizi deneyi



Şekil 3.1. GDA elek analizi sonuçları

Taze köpük beton üzerinde yapılan deneyler

Marsh hunisi ile kıvam tayini

Köpük beton normal betona kıyasla daha akıcıdır. Akmaya karşı dayanımının düşük olması sebebiyle kendiliğinden akış özelliği sergilemektedir. Marsh hunisi, edilen harcın akışkanlığının belirlenmesinde kullanılan etkin ve pratik bir deney aletidir. Marsh hunisi deneyi ise kalıba yerleşmeye hazır 1,5 litre hacmindeki harcın 1 litresinin bu huniden geçirilerek akma süresinin hesaplanması şeklinde yapılmaktadır. Bu sayede harç kalıba yerleştirilmeden önce harcın kıvamı gözlenmekte ve bir anlamda elde edilen harcın hızlı bir şekilde kontrolü sağlanmaktadır. Deney neticesinde elde edilen süre 1 dakikanın altında olması halinde deneye tabi tutulan harcın sabit ve düzenli bir akış sergilediği anlaşılmaktadır. Elde edilen sürenin 1 dakikanın üzerinde olması durumunda ise engelli veya zor akış meydana gelmektedir [62].

Çizelge 3.6. Köpük beton harcının sınıflandırması [63].

Ana sınıf	Tanımlama	Alt sınıf	Açıklama
1	1 l < 1 dk	A	Sabit/düzenli akış
2	1 dk < Akış < 2 dk	B	Kesikli akış
3	0,5 l < Akış < 1 l	C	Hafifçe sıkıştırma ile akış tamamlanması
4	Akış < 0,5 l	-	Yalnızca 1. ve 2. sınıflar kullanılabilir
5	Akış yok	-	

Sertleşmiş köpük beton üzerinde yapılan deneyler

Birim hacim ağırlık tayini

TS EN 12390-7 standardına uygun olarak küp numunelerin (10x10x10 cm) ağırlıkları ölçülmüş ve hacimlerine oranlanarak birim hacim ağırlıkları tespit edilmek suretiyle her serinin birim hacim ağırlık ortalamaları elde edilmiştir [64].

$$D(g/cm^3) = m / V$$

D: Numunenin nem durumu ve hacim tayini metoduna bağlı olarak yoğunluğu (kg/m³).

m: Numunenin, deney esnasındaki durumuna bağlı kütlesi (kg).

v: Numunenin özel metotla tayin edilen hacmi (m³).



Resim 3.15. Birim hacim ağırlık tayini

Basınç dayanımının tayini

Küp numuneler yükleme yapılacak yüzeyin düzgün olmasına ve pres bölümünde tam ortalı şekilde bulunmasına dikkat edilerek test cihazına yerleştirilmiştir. Numunelere ait yüzeylerin düzgün olması sebebiyle başlık işlemi yapılmasına gerek kalmamıştır. Test cihazı 0,6 MPa/s yükleme hızına ayarlanmış ve numunelerin basınç dayanımları TS EN 12390-3'e

göre tespit edilmiştir [65]. Deneyler neticesinde elde edilen numuneler 7. ve 28. günde aşağıda yer alan bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$f_c = F/A_c \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Burada;

$$f_c = F/A_c \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

f_c : Deney numunesinin basınç dayanımı (N/mm²).

F: Kırılma yükü (N)

A_c : Uygulama yönüne dik kesit alanı (mm²)



Resim 3.16. Kırılmak üzere hazırlanmış köpük beton numuneleri



Resim 3.17. Köpük beton numunelerinin kırımı

Su emme oranı ve porozitenin belirlenmesi

Deney numuneleri etüvde bekletilmiş ve bunların kuru ağırlıkları tartılmıştır. Sonrasında ise 24 saat kür havuzuna bırakılarak suya doymun hale gelmeleri sağlanmıştır. Akabinde numuneler tekrar tartılarak kuru ve suya doymun halleri arasındaki ağırlıkları bulunmuş ve aşağıdaki bağıntı ile su emme oranları hesaplanmıştır. Sertleşmiş betonda hava boşluğu özelliklerinin tayini TS EN 480-11'e göre yapılmıştır [66].

$$m = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100$$

Burada:

m: Köpük betonun su emme oranı (%)

M₁: Kuru ağırlığı (g)

M₂: Suyu doymun ağırlık (g)'dir.

Bu bağıntı ile porozitenin hesaplanması ise:

$$p = Vv / V (\%)$$

Burada:

p: Porozite değeri (%)

Vv: Boşuk hacmi (cm³)

V: Numune hacmi (1000 cm³)' dir.

Boşklara dolan suyun birim hacim ağırlığı $\rho = 1,00 \text{ g/cm}^3$ tür.

$$Vv = [(M_2 - M_1) / \rho]$$

$$p = Vv / V$$

Deney numunelerinin su emme ve porozite değerleri yukarıdaki bağıntılar ile hesaplanmıştır.



Resim 3.18. Suya doğun hale getirilmiş köpük beton numuneleri



Resim 3.19. Suya doğun halde olan köpük beton numunelerinin lm

Ultrases geçiş hızının belirlenmesi

Ultrasonik deneyler, esas olarak mekanik dalgaların piezoelektrik vericiler vasıtasıyla elektrik titreşimlerine dönüşümü prensibine dayanmaktadır. Betonda, verici sayesinde dalga titreşimleri oluşturulur, alıcı ile de oluşan bu titreşimin ulaşıp ulaşmadığı ve ne zaman ulaştığı algılanır. Bu sayede, titreşimin geçiş hızı hesaplanır [67].

TS EN 12504-4 (2021) esas alınarak numunelerin dalga geçiş hızları tespit edilmiştir [68]. Böylece, boşluk yapıları ile basınç dayanımlarına ilişkin yorum yapılabilmiştir. Ancak, şu husus da belirtilmelidir ki bu yöntemin tek başına kullanılması ile çok sağlıklı ve geçerli sonuçlar elde edilememektedir. Deneylerde PL Pundit 200 Cihazı kullanılmıştır.



Resim 3.20. PL Pundit 200 cihazı ve problemin yağlanması işlemi

Öncelikle cihazın problemlerine yağ sürülerek boşluksuz bir şekilde temas etmesi sağlanmış ve numunelerin ölçümünde problemlerin eş doğrultuda olmalarına dikkat edilmiştir. Bu sayede daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilmiştir. Aşağıda verilen bağıntı ile ölçüm yapan PL Pundit 200 cihazından deney numunelerinin geçiş hızları okunmuş ve kaydedilmiştir.

$$V = (S/t) \times (10^6)$$

Burada:

V = puls hızı, m/s;

S = gönderici ve alıcı başlıklar arasındaki mesafe, m

t = pulsun geçiş süresi, mikrosaniyedir.



Resim 3.21. Ultrases geçiş hızı ölçüm işlemi



Resim 3.22. Ultrases geçiş hızının okunması

Isıl iletkenlik kapasitesin belirlenmesi

Yapı malzemelerinin ısı iletkenliği; malzemenin boşluk yapısına, bu boşlukların dağılımına ve derecesine, gözeneklerin büyüklüğüne malzemenin türüne içindeki nem miktarına ve birim hacim ağırlığa bağlıdır.

Köpük betonun sağladığı düşük ısı iletkenliği ile enerji tasarrufu sağlayan yapılar elde edebilmek adına yalıtım sağlanması açısından alternatif bir yapı malzemesidir. Köpük betonun kullanımının yaygınlaşabilmesi için ısı iletkenlik katsayısının doğru bir biçimde hesap edilerek yalıtımı daha yüksek olan ürünler elde edilmesi önem arz etmektedir. Hesaplanacak olan (k) değeri; boşluk yapısı, birim ağırlık, gözenek büyüklüğü gibi etmenlerin yanı sıra nem faktörü ve sıcaklık farkı gibi parametre de bağlıdır. Isıl iletkenlik katsayısı (k) laboratuvar ortamında ortamdaki nem ve sıcaklık değerine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Binaların ısı direncinin hesaplanmasında ise iklim koşullarına bağlı olarak ortamdaki sıcaklık ve nem rol oynamaktadır [69].

ASTM C518, ISO 8301'de belirtilen şartlara uygun olarak ölçüm yapan LINSEIS HFM300 cihazı ile plaka (30x30x5cm) şeklinde üretilen köpük beton numuneleri 24 saat etüvde bekletilerek ısı iletim katsayıları tespit edilmiştir. Söz konusu ısı iletkenlik deneyleri TS EN 12664 (2009) standardı esas alınarak yapılmıştır [70].



Resim 3.23. Isıl iletkenlik katsayısı ölçüm işlemi



Resim 3.24. 30x30x5cm boyutlarında üretilen köpük beton plakaları



Resim 3.25. Isıl iletkenlik tayini için üretilen köpük beton numunesi

Boşluk ve gözenek yapısının belirlenmesi

Boşluk ve gözenek yapısının belirlenmesi için yüksek çözünürlüklü beton çatlak mikroskobundan faydalanılmıştır. Ele marka beton mikroskobu ile 40x optik yakınlaştırma yapılmak suretiyle 0.02 mm aralıklarla köpük beton numunesinin 4 mm'lik boyutunun ölçümleri yapılmıştır.

Çizelge 3.7. Beton mikroskobu özellikleri

Beton Mikroskobu Özellikleri	
Büyütme (x)	40
Ölçüm aralığı (mm)	4
Bölümler (mm)	0,02
Boyutlar (")	1.5 x 3.5 x 6
Ağırlık (gr)	550



Resim 3.26. Beton mikroskobu



Resim 3.27. Köpük betonun boşluk yapısının ölçümü

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Taze Harç Özellikleri

Üretilen harç karışımı Marsh hunisinden geçirilmiş ve 0.45, 0.48 ve 0.51 s/ç oranlı karışımların huniden geçiş süresi 1 dakikadan daha az iken 0.39 ve 0.42 s/ç oranlı harçların huniden geçiş süresi 1 dakikadan daha uzun süre almıştır. Köpük betonda karışımında karışım suyu oranı artıkça huniden geçiş süresi azalmış fakat homojenliği bozulmuştur.

Taze köpük betonlarda en büyük sorunlardan birisi köpüklerin forumlarını yani karalılığı korumasıdır. Kalıplanan taze köpük betonunun, köpük çapının ve dağılımının numunenin her noktasında eşit olması arzu edilir. Hazırlanan taze köpük betonun üst kısmından uygun şekilde alınarak kalıplara yerleştirilmiştir. Köpük beton kalıba yerleştikten sonra üstü hafifçe masterlanarak düzeltilmiştir. Taze köpük beton prizini tam alabilmesi için nem kaybını önleyecek şekilde kalıp içinde 3 gün belirlenmiştir. Kalıplardan çıkarılan numuneler %75 nemli laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

Çizelge 4.1. Marsh hunisi akış süreleri

Seri No	S/Ç	Akış Süresi (sn)	Akış Sınıfı
S1	0,39	98	Kesintili akış
S2	0,42	72	Kesintili akış
S3	0,45	57	Sürekli akış
S4	0,48	50	Sürekli akış
S5	0,51	44	Sürekli akış

4.2. Sertleşmiş Köpük Beton Özellikleri

4.2.1. 1. grup numunelerin mekanik, fiziksel ve termik özellikleri

Kalıptan alındıktan sonra kür işlemi uygulanan 1. gruba ait ilk 5 seri numunelerin birim hacim ağırlıkları belirlenmiş ve bu numuneler basınç dayanımları tespit edilmek üzere 7. ve 28. günde kırılmışlardır. Sonrasında bu gruba ait diğer numuneler ile su emme oranları, poroziteleri, ultrases geçiş hızları, ısıl iletkenlikleri hesaplanmıştır. Aşağıda 1. gruba ait numunelerin birim hacim ağırlıkları, su emme oranları, poroziteleri, 7. ve 28. günlere ait basınç dayanımları, ultrases geçiş hızları ve ısıl iletkenlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. 1. grup sertleşmiş köpük beton numunelere ait veriler

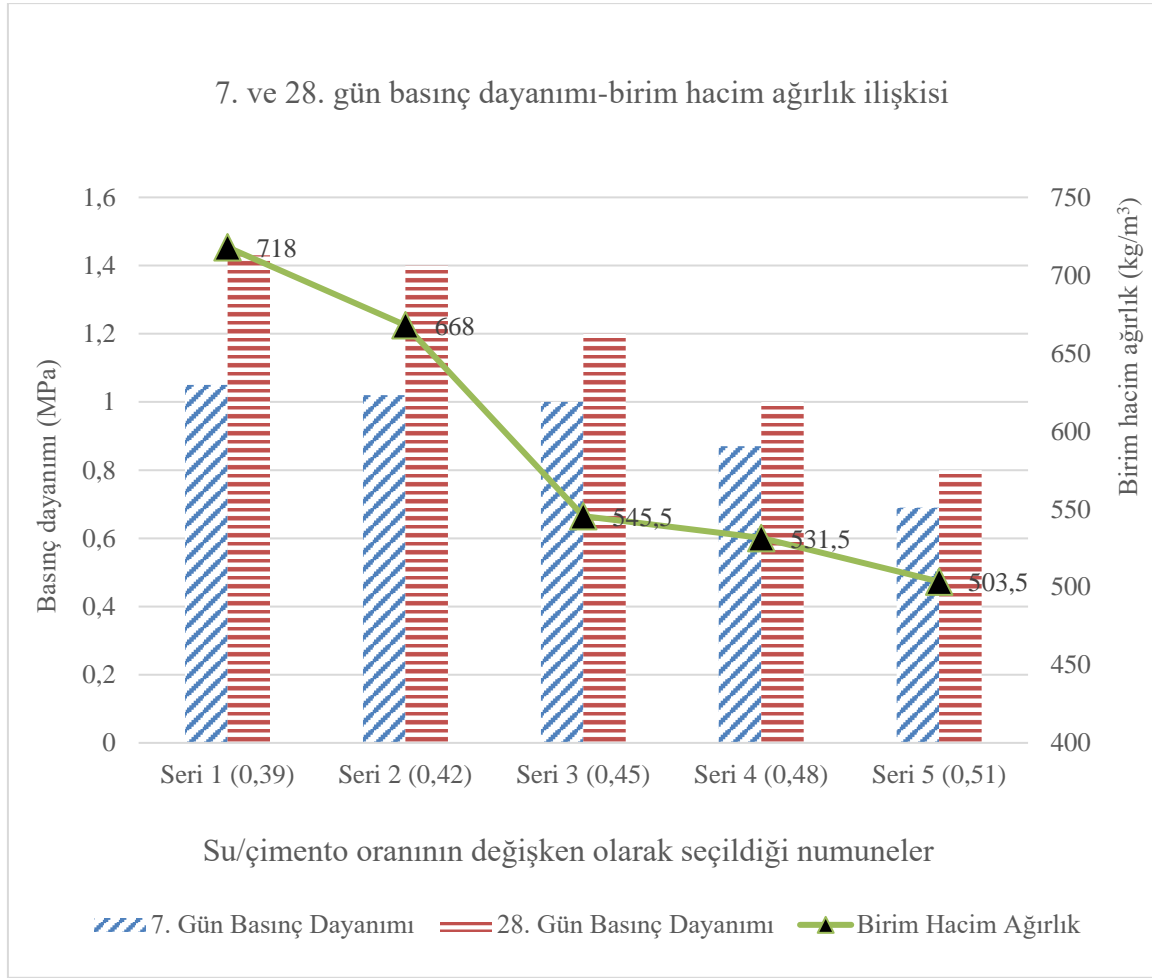
Seri No	BHA (kg/m ³)	7. Gün Dayanım (MPa)	28. Gün Dayanım (MPa)	D28/BHA*	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Su Emme %	Porozite %	Isıl İletkenlik (W/mK)
S1	718	1,05	1,45	0,0020	1777	31,9	23	0,37
S2	668	1,02	1,4	0,0021	1702	41,8	27	0,33
S3	545,5	1	1,2	0,0022	1669	57,4	28	0,25
S4	531,5	0,87	1	0,0019	1631	71,5	36	0,24
S5	503,5	0,69	0,8	0,0016	1507	71,6	39	0,19

* Minimum birim hacim ağırlık ve maksimum dayanımı elde etmek adına 28 günlük basınç dayanımı, birim hacim ağırlığa oranlanmış ve birim hacim ağırlık başına düşen maksimum dayanım sağlayan köpük beton serisi bulunmuştur.

Su/çimento oranı 0,39 olan 1 numaralı seride köpükler yüzey gerilmelerine yenik düşerek sönmüş ve neticesinde de çökmeler meydana gelmiştir. Belirtilen sebeple, bu serinin sonuçları seçilecek olan su/çimento oranı için yapılan değerlendirmeye dâhil edilmemiştir.

Diğer numunelerde ise su/çimento oranı arttıkça numunelerin birim hacim ağırlıklarında da azalmalar gözlenmiş ve daha hafif bir beton elde edilmiştir. (1 numaralı seride meydana gelen çökmelerden ötürü bu seride tam olarak gerçeği yansıtan sonuçlar elde edilememiştir.)

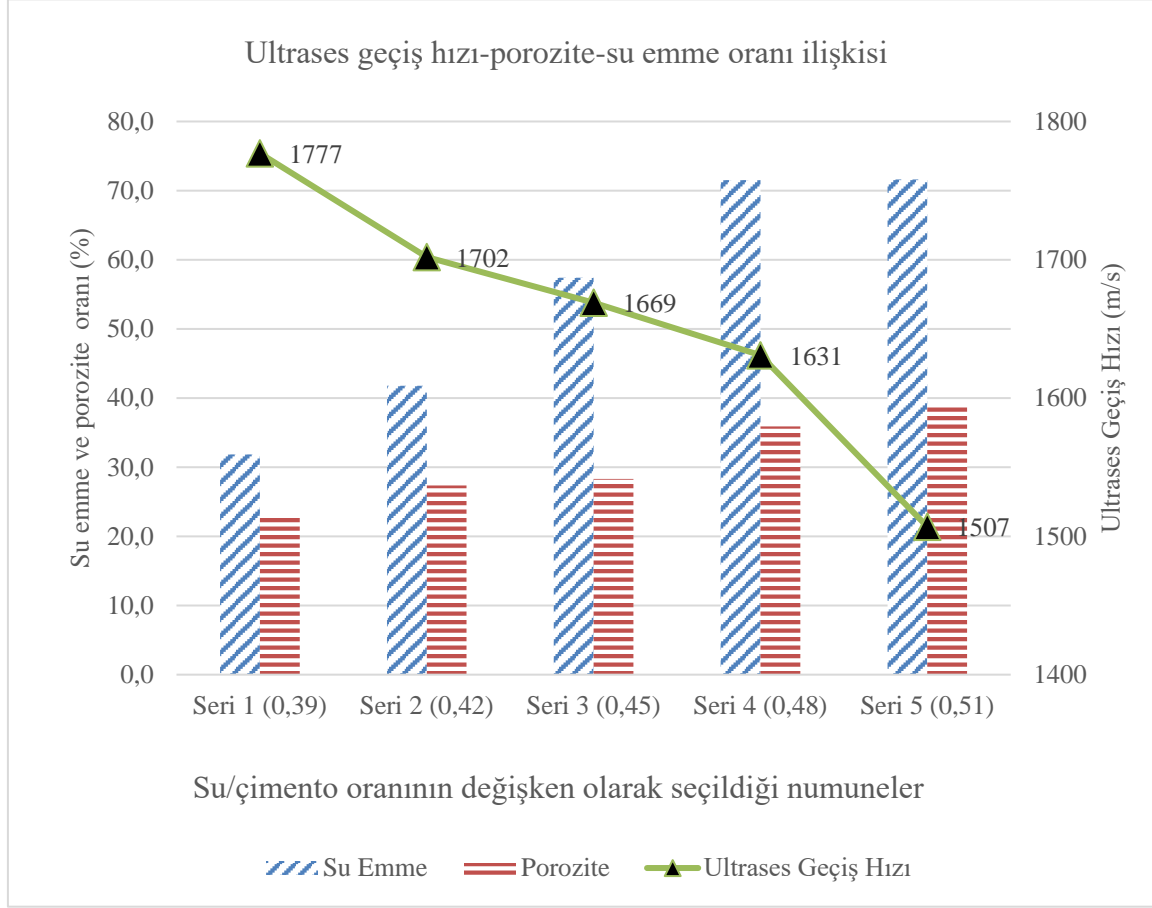
1. gruba ait numunelerin basınç dayanımları ile birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişki



Şekil 4.1. 1. grup 7. ve 28. gün basınç dayanımı-birim hacim ağırlık ilişkisi

Su/çimento oranı ve beton basınç dayanımının ters orantılı olduğu gözlenmiş olup su/çimento oranı arttıkça numunelerin birim hacim ağırlıklarında da azalmalar görülmüştür. Su/çimento oranının artması ile daha hafif bir beton elde edilmiş olsa da basınç dayanımlarında önemli ölçüde düşüşler gözlenmiştir.

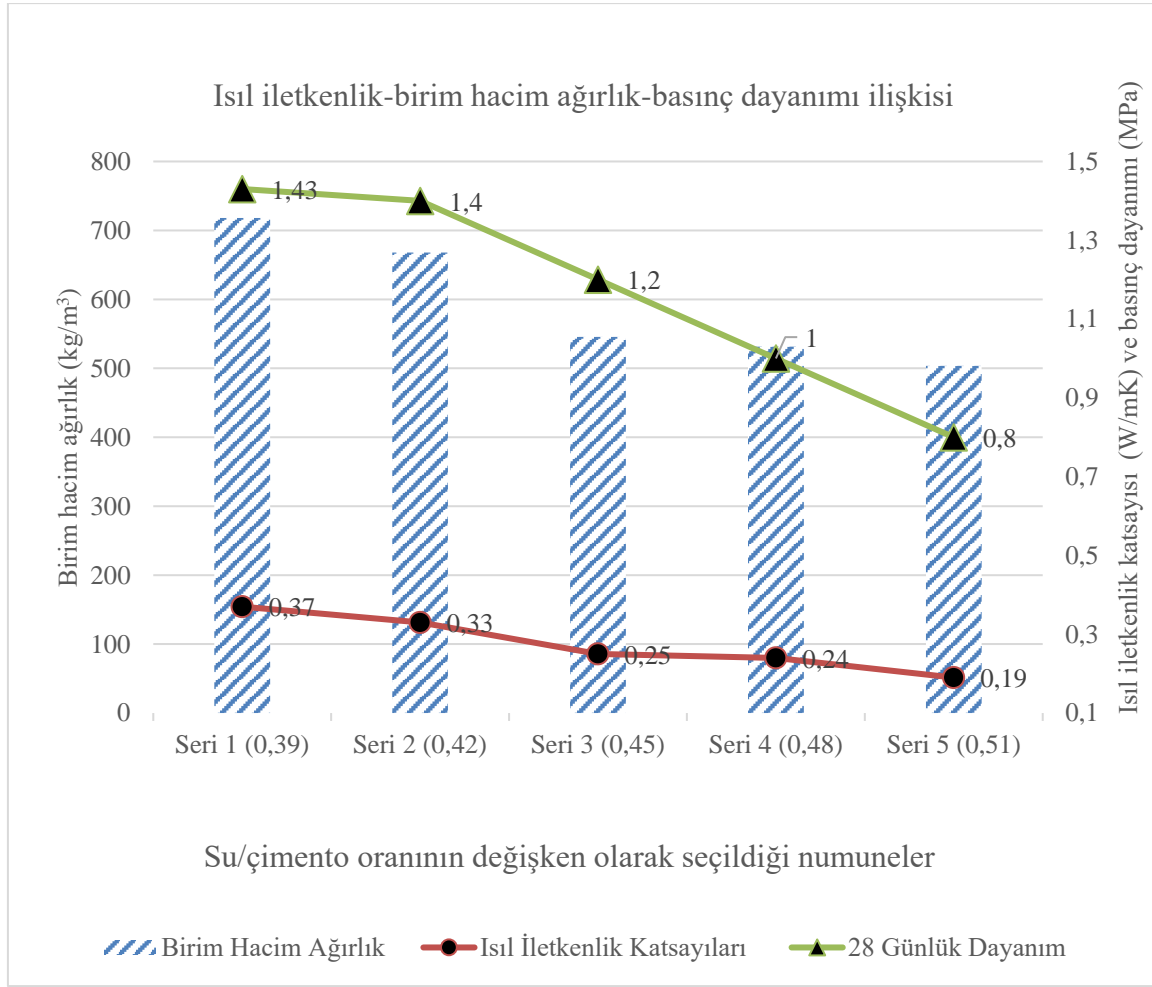
1. gruba ait numunelerin ultrases geçiş hızları ile su emme ve porozite oranları arasındaki ilişki



Şekil 4.2. 1. grupta ultrases geçiş hızı-porozite-su emme oranı ilişkisi

Deney numunelerinin su emmeleri ve poroziteleri üzerinde boşluklu yapının etkili olduğu gözlenmiştir. Daha boşluklu ve birim hacim ağırlıkça hafif numunelerde su emme ve porozitelerin diğerlerine kıyasla daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ultrases geçiş hızında da betonun boşluk yapısının doğrudan etkili olduğu ve boşluk yapısı fazla, birim hacim ağırlığı daha az olan numunelerin geçiş hızlarının daha yavaş olduğu gözlenmiştir.

1. gruba ait numunelerin ısı iletkenlikleri ile birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişki



Şekil 4.3. 1. grupta ısı iletkenlik-birim hacim ağırlık-basınç dayanımı ilişkisi

Deney numunelerinin ısı iletkenliklerinin daha boşluklu yapıda olan ve ağırlıkça hafif olan numunelerde daha az olduğu gözlenmiştir.

*Elde edilen bu veriler doğrultusunda, inşaat yıkıntı atığından üretilen köpük betonlar için su/çimento oranı 0,45 olarak seçilen 3 numaralı seride, diğer serilere göre birim ağırlık başına daha iyi dayanım sağlandığı sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmanın bu aşamasından sonra üretilecek numunelerde s/ç oranı 0,45 olarak belirlenmiş ve bu doğrultuda 2. grup numuneler elde edilmiştir.

4.2.2. 2. grup numunelerin mekanik, fiziksel ve termik özellikleri

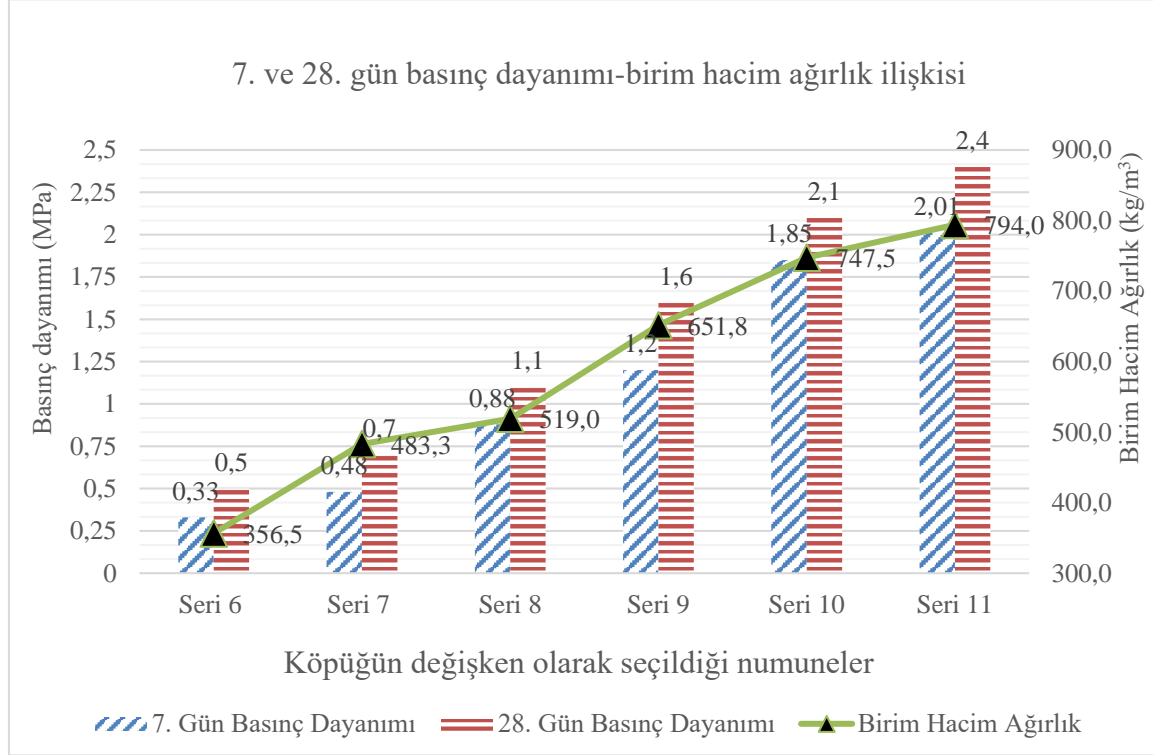
S/ç oranı 0,45 olarak belirlenen ve köpük miktarının değişken olduğu 2. gruba ait numuneler kalıptan alındıktan sonra bu numunelere kür işlemi uygulanmış, birim hacim ağırlıkları belirlenmiş ve bu numuneler basınç dayanımları tespit edilmek üzere 7. ve 28. günde kırılmışlardır. Sonrasında bu gruba ait diğer numuneler ile su emme oranları, poroziteleri, ultrases geçiş hızları, ısı iletkenlikleri hesaplanmıştır. Aşağıda 1. gruba ait numunelerin birim hacim ağırlıkları, su emme oranları, poroziteleri, 7. ve 28. günlere ait basınç dayanımları, ultrases geçiş hızları ve ısı iletkenlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.3. 2. grup sertleşmiş köpük beton numunelerine (köpüğün değişken olduğu) ait veriler.

Seri No	BHA (kg/m ³)	7. Gün Dayanım (MPa)	28. Gün Dayanım (MPa)	*TS 13655 Sınır Değeri (MPa)	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Su Emme %	Porozite %	Isıl İletkenlik (W/mK)
S6	356,5	0,33	0,5	1,5	1346	84,0	31,5	0,15
S7	483,25	0,48	0,7	1,5	1452	61,0	30,3	0,21
S8	519	0,88	1,1	1,5	1537	54,6	28,8	0,24
S9	651,75	1,20	1,6	1,5	1679	31,0	20,1	0,32
S10	747,5	1,85	2,1	1,5	1763	18,9	14	0,37
S11	794	2,01	2,4	1,5	1816	12,9	10,6	0,39

*TS 13655- Köpükbeton kâgir birimler, minimum basınç dayanımı 1,5 Mpa olarak belirtilmiştir [71].

2. gruba ait numunelerin (köpüğün değişken olduğu) basınç dayanımları ile birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişki

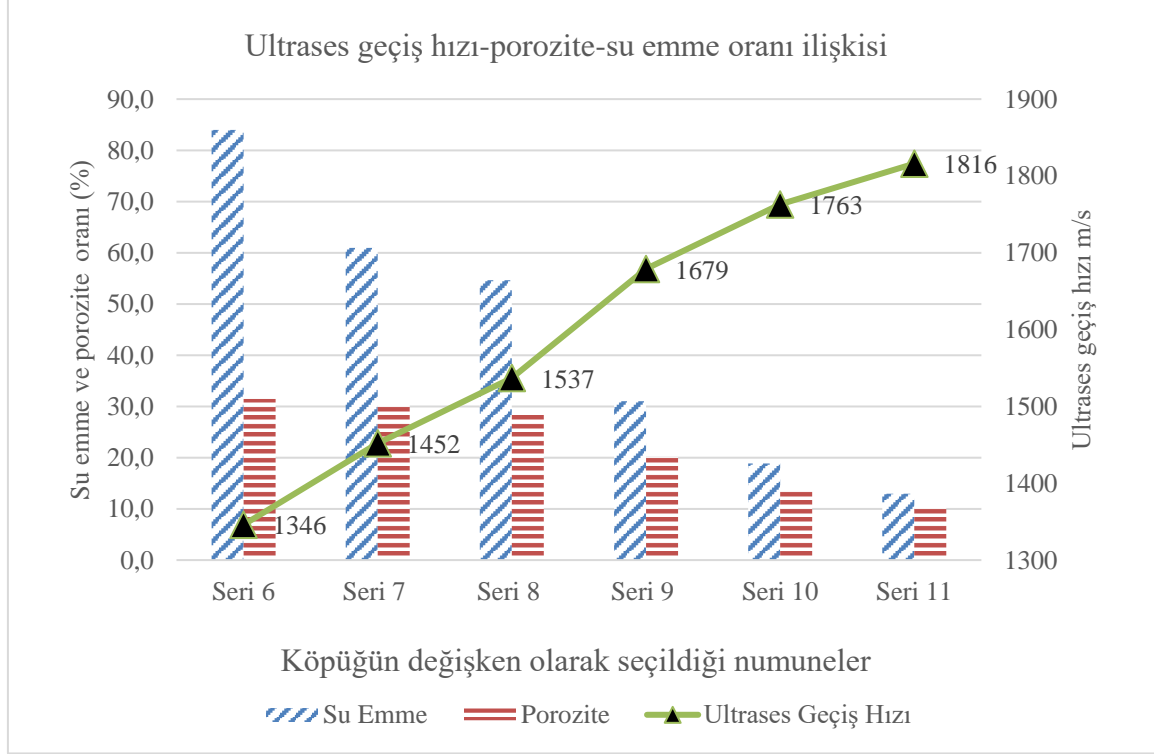


Şekil 4.4. 2. grupta 7. ve 28. gün basınç dayanımı-birim hacim ağırlık ilişkisi

2. gruba ait karışım oranları ile elde edilen deney numunelerinden birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ile köpük miktarı arasında ters orantı söz konusu olduğu gözlemlenmiştir. Karışım oranlarında köpük miktarının azaltılması birim hacim ağırlık ve dayanımı artırmaktadır. Köpük miktarının en az kullanıldığı 11 numaralı seride birim hacim ağırlıkta artış gözlemlense de beton basınç dayanımı 2,4 MPa olarak elde edilmiştir.

2. gruba ait numunelerden S9, S10 ve S11 serilerinde TS 13655- Köpük beton kâgir birimler 'de belirtilen taşıyıcı olmayan duvarlarda basınç dayanımı 1,5 MPa şartı sağlanmıştır.

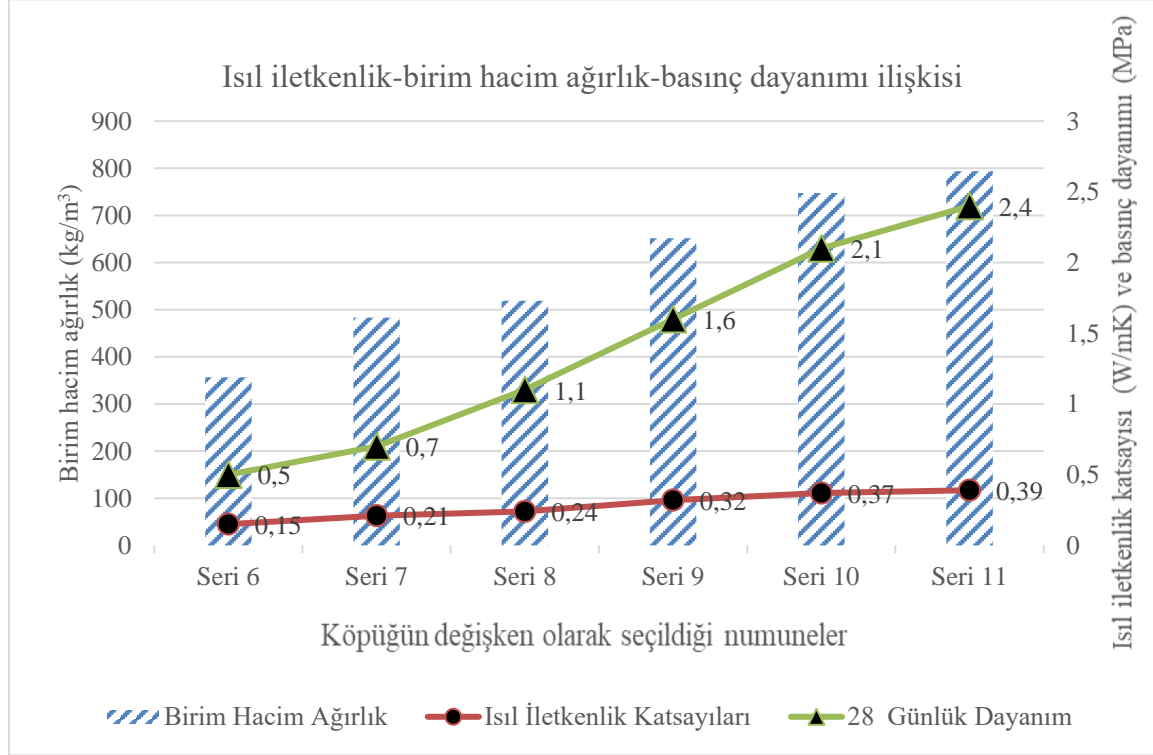
2. gruba ait numunelerin (köpüğün değişken olduğu) ultrases geçiş hızları ile su emme ve porozite oranları arasındaki ilişki



Şekil 4.5. 2. grupta ultrases geçiş hızı-porozite-su emme oranı ilişkisi

Deney numunelerinin su emme ve porozite oranları üzerinde boşluklu yapı etkili olduğundan köpük miktarının azaltıldığı yani dolayısı ile birim hacim ağırlığın artırıldığı numunelerin su emme ve porozite oranlarının bu doğrultuda azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, köpük miktarının azaltılması suretiyle birim hacim ağırlığın arttığı dolayısıyla da porozite oranlarının azaldığı numunelerde ultrases geçiş hızları diğerlerine kıyasla daha fazla olmaktadır.

2. gruba ait numunelerin (köpüğün değişken olduğu) ısı iletkenlikleri ile birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişki



Şekil 4.6. 2. grupta ısı iletkenlik-birim hacim ağırlık-basınç dayanımı ilişkisi

Beton numunelerinin elde edilen veriler doğrultusunda ısı iletkenlikte de boşluk yapısının bir hayli etkili olduğu gözlemlenmiştir. İçeriğindeki köpük miktarı azaltılarak boşluklu yapının bir miktar azaltılması ve birim hacim ağırlığın artması ile yeterli dayanıma ulaşılan numunelerin ısı iletkenliklerinde bir miktar artış gözlenmiştir.

2. gruba ait numunelerde birim hacim ağırlık başına en yüksek dayanım 11 numaralı seride elde edilmiştir. Deney çalışmalarında bu aşamadan sonra atık miktarı değişimi ile çevre faktörleri ve ekonomik anlamda katkı sağlaması adına kullanılabilir atık yüzdesinin artırılması için 11 numaralı serinin köpük oranı esas alınarak bu köpük oranında atık miktarları değişiminin köpük beton üzerindeki mekanik, fiziksel ve termik özelliklerin etkisinin belirlenmesi adına 3. grup yeni beton numuneleri dökülmüştür.

4.2.3. 3. grup numunelerin mekanik, fiziksel ve termik özellikleri

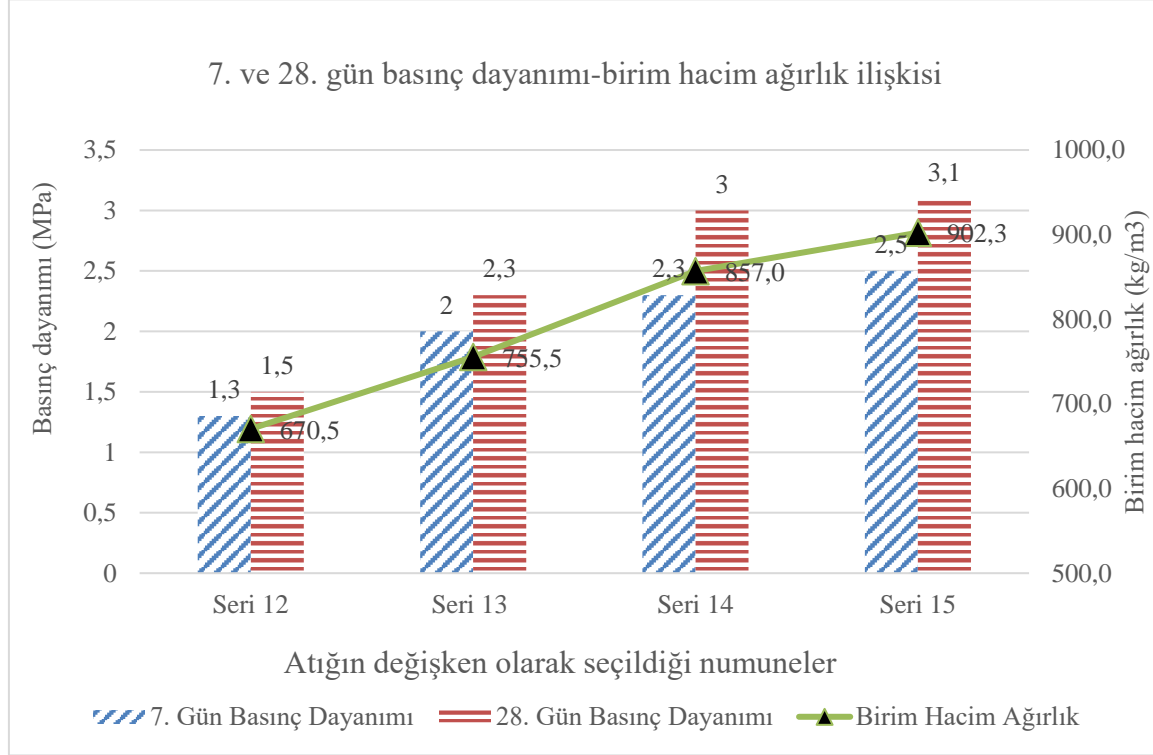
Atık miktarının değişken olduğu 3. gruba ait numuneler kalıptan alındıktan sonra bu numunelere kür işlemi uygulanmış, birim hacim ağırlıkları belirlenmiş ve bu numuneler basınç dayanımları tespit edilmek üzere 7. ve 28. günde kırılmışlardır. Sonrasında bu gruba ait diğer numuneler ile su emme oranları, poroziteleri, ultrases geçiş hızları, ısı iletkenlikleri hesaplanmıştır. Aşağıda 1. gruba ait numunelerin birim hacim ağırlıkları, su emme oranları, poroziteleri, 7. ve 28. günlere ait basınç dayanımları, ultrases geçiş hızları ve ısı iletkenlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.4. 3. grup numunelerine ait veriler.

Seri No	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	7. Gün Dayanım (MPa)	28. Gün Dayanım (MPa)	*TS 13655 Sınır Değeri (MPa)	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Su Emme %	Porozite %	Isıl İletkenlik (W/mK)
S12	670,5	1,3	1,5	1,5	1633	31,3	21,4	0,33
S13	755,5	2	2,3	1,5	1724	20,5	15,4	0,38
S14	857	2,3	3	1,5	1871	14,1	12,0	0,53
S15	902,25	2,5	3,1	1,5	1934	11,0	10,3	0,59

*TS 13655-Köpükbeton kâgir birimler, minimum basınç dayanımı 1,5 Mpa olarak belirtilmiştir [71].

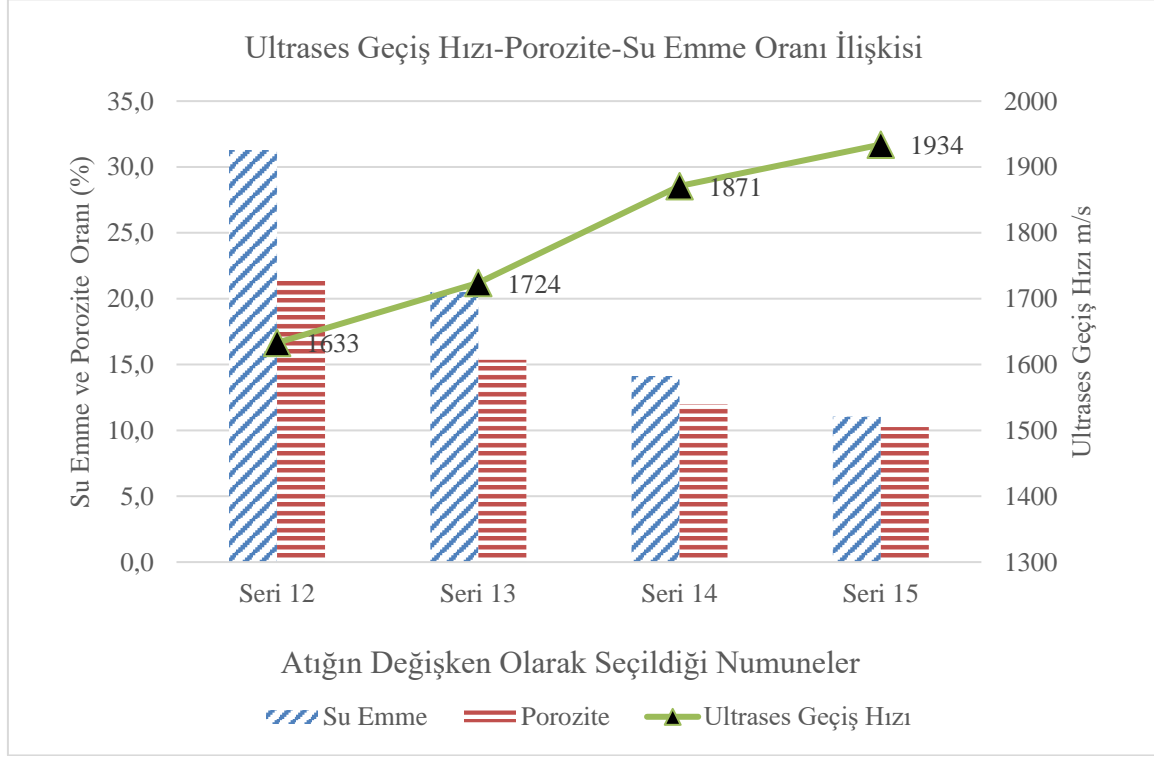
3. gruba ait numunelerin (atığın değişken olduğu) basınç dayanımları ile birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişki



şekil 4.7. 3. grupta 7. ve 28. gün basınç dayanımı-birim hacim ağırlık ilişkisi

Karışımlarda inşaat yıkıntı atığı miktarından elde edilen ince agreganın artırılmasının köpük beton üzerinde birim hacim ağırlığı ve dayanımı artırdığı gözlenmiştir. Bu grupta dökülen numunelere ait tüm serilerin 28 günlük basınç dayanımlarının TS 13655'te belirtilen taşıyıcı olmayan duvar elemanlarının basınç dayanım değerini sağladığı tespit edilmiştir. En yüksek dayanıma 15 numaralı seride ulaşılmıştır. Ancak, 12 numaralı seride de bu grubun en hafif köpük betonu olma özelliğini sağlamıştır.

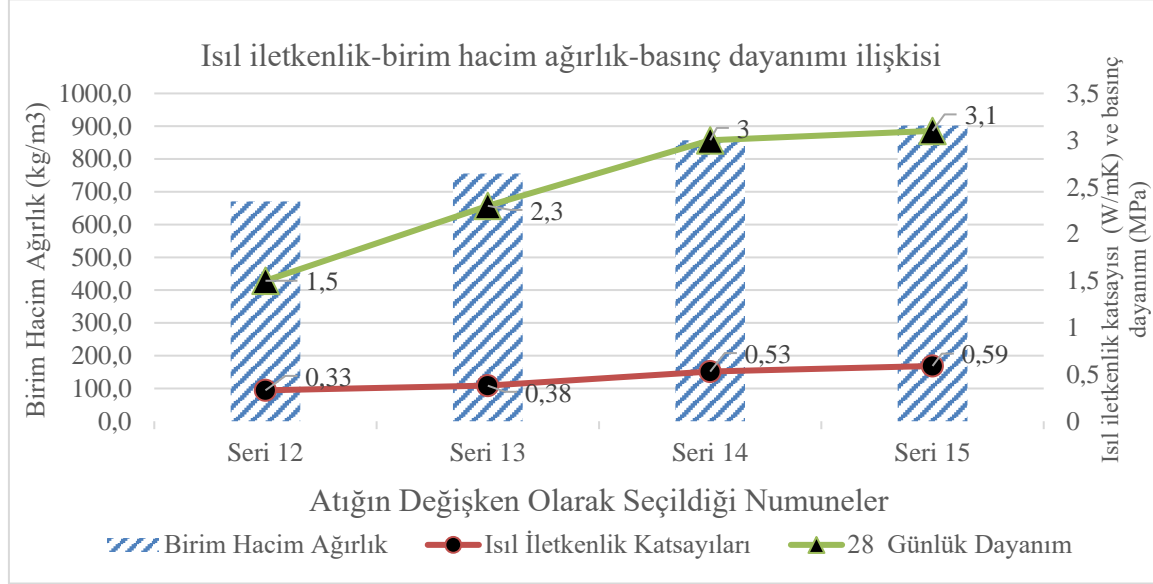
3. gruba ait numunelerin (atığın değişken olduğu) ultrases geçiş hızları ile su emme ve porozite oranları arasındaki ilişki



şekil 4.8. 3. grupta ultrases geçiş hızı-porozite-su emme oranı ilişkisi

3. gruba ait numunelerin poroziteleri ve su emme oranlarında inşaat yıkıntı atığı kullanımının artırılmasının düşürücü yönde etki ettiği; atık miktarının artırılması ile birim hacim ağırlığı daha fazla ve basınç dayanımı daha yüksek köpük beton elde edilmesi boşluklu yapının ters orantılı şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Bununla beraber, ultrases geçiş hızını ise kullanılan atık miktarı ile doğru orantılı şekilde artırmaktadır.

3. gruba ait numunelerin (atığın değişken olduğu) ısı iletkenlikleri ile birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişki



Şekil 4.9. 2. grupta ısı iletkenlik-birim hacim ağırlık-basınç dayanımı ilişkisi

3. gruba ait numunelerde yıkıntı atığı miktarının artırılmasının geçiş hızını artırdığı dolayısıyla da ısı iletkenin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, yıkıntı atığının artırılması basınç dayanımına da etki etmiştir. Yıkıntı atığı kullanımı arttıkça numunelerin basınç dayanımları artmıştır.

Çizelge 4.5. TS 825'te yer alan gaz beton ve yatay delikli tuğla ile numunelerin kıyaslanması.

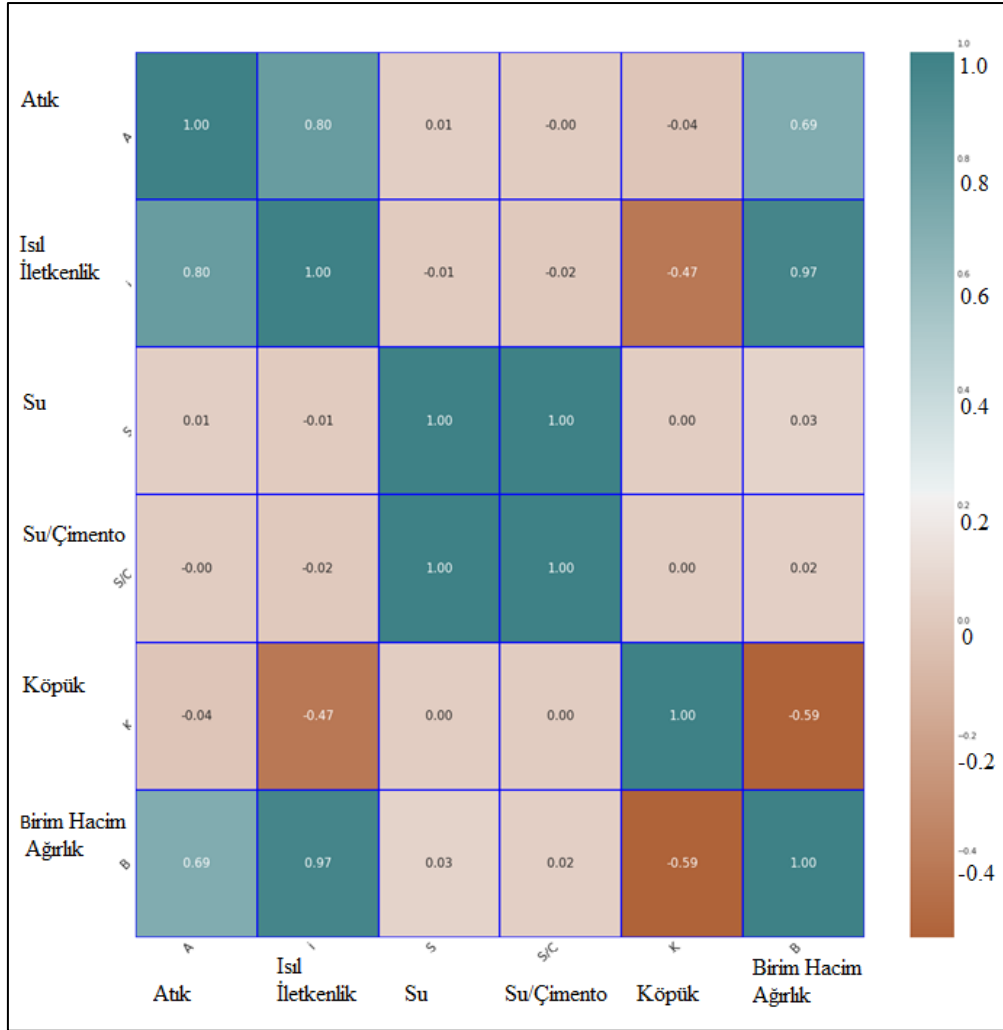
Gaz Beton, Yatay Delikli Tuğla ve Deney Numuneleri	Gaz Beton Duvar Blokları (400-800 kg/m³ BHA Aralığındaki) *TS 825	Yatay Delikli Tuğlalar (600-1000 kg/m³ BHA Aralığındaki) *TS 825	S9 (BHA 651,75 kg/m³)	S10 (BHA 747,5 kg/m³)	S11 (BHA 794 kg/m³)	S12 (BHA 670,5 kg/m³)	S13 (BHA 755,5 kg/m³)	S14 (BHA 857 kg/m³)	S15 (BHA 902,25 kg/m³)
Isıl İletkenlik Değeri (W/mK)	0,20-0,29	0,33-0,45	0,32	0,37	0,39	0,33	0,38	0,53	0,59

*TS 825-Gaz beton duvar bloklar ve yatay delikli tuğlalarla yapılan duvarların ısı iletkenlik değerleri [72].

TS 13655'te belirtilen taşıyıcı olmayan duvar elemanlarının basınç dayanımını sağlayan numuneler ile TS 825'te belirtilen gaz beton duvar blokları ve yatay delikli tuğlanın ısı

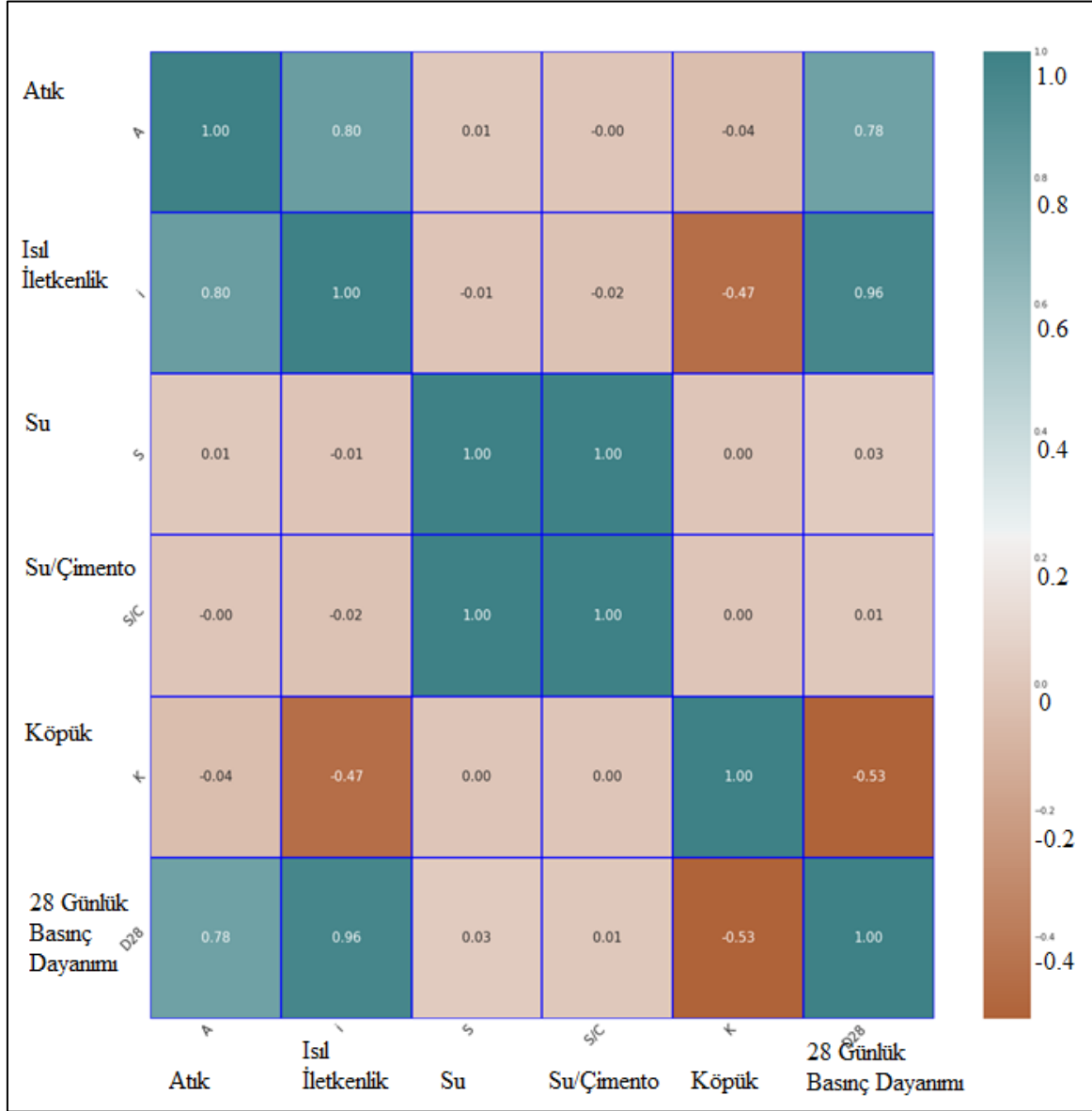
iletkenlik değeri yukarıda yer alan çizelgede verilmiştir. Burada anlaşılacağı üzere, 9 numaralı seride TS 825'te belirtilen gaz beton duvar blokların ısı iletkenlik değerlerine çok yakın bir değeri elde edilmiştir. Ancak, bu değeri den daha iyi bir değeri elde edilememiştir. Bunun kullanılmış malzeme kullanımı ile doğrudan ilişkili olduğu dūřünölmektedir. Ayrıca, TS 825'te belirtilen yatay delikli tuğlarla yapılan duvarların ısı iletkenlik performanslarından daha iyi değeri elde edilmiştir.

Deney numunelerinin detaylı veri analizlerini yapabilmek, birden çok değişken arasındaki ilişkiyi görebilmek, herhangi bir değişkenin birbirine benzer olup olmadığını tespit edebilmek adına Python Uygulaması kullanılmış ve elde edilen ısı haritası (heat map) sonuçları aşağıda sunulmuştur.



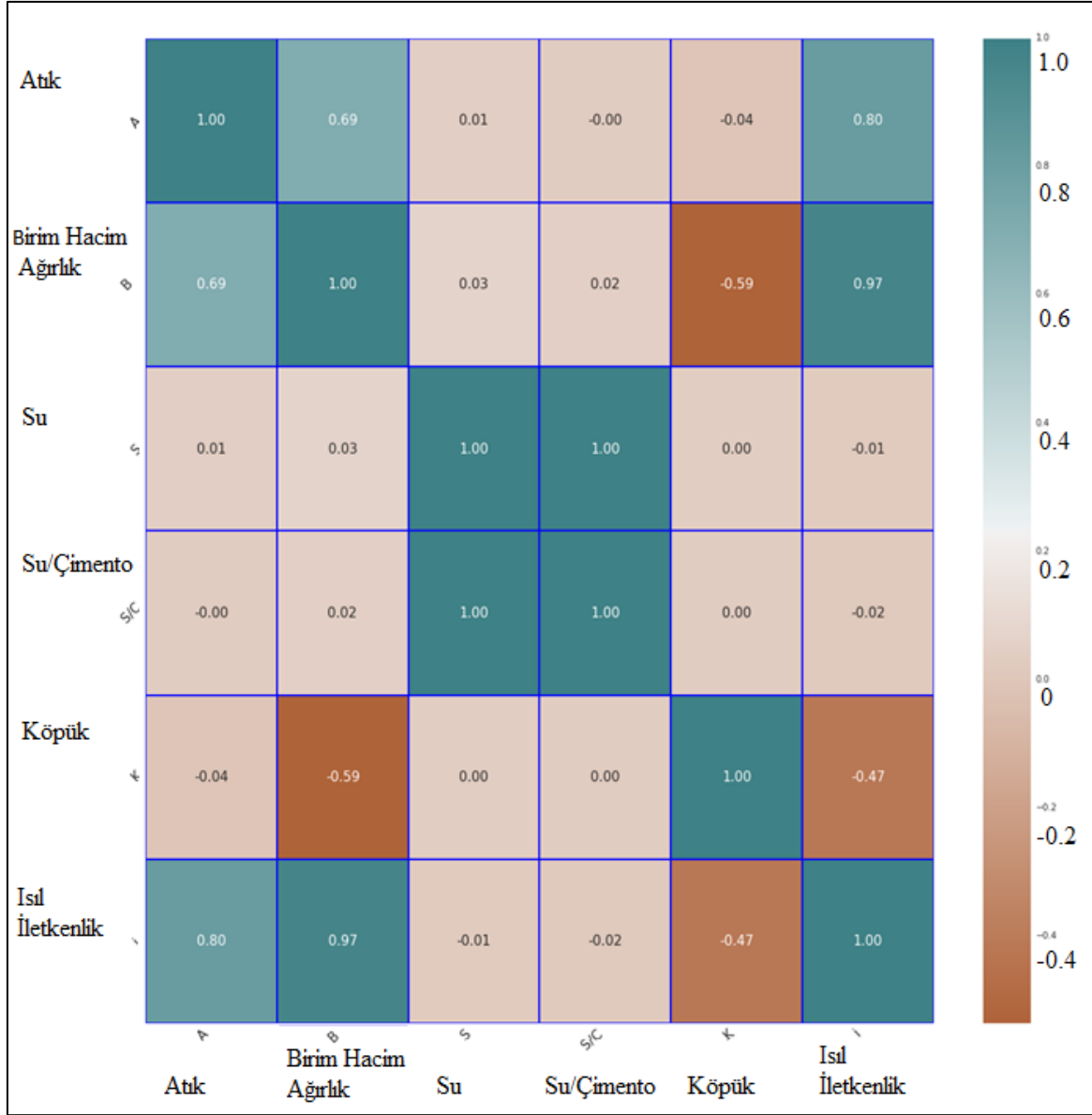
Resim 4.1. Karışımdaki değişkenlerin birim hacim ağırlığına etkisi.

Burada birim hacim ağırlığında; köpük ve atık miktarının doğrudan etkili olduğu, atık miktarının artması ile birim hacim ağırlığının arttığı, köpük miktarının artması ile de azaldığı görülmektedir.



Resim 4.2. Karışımdaki değişkenlerin dayanıma etkisi.

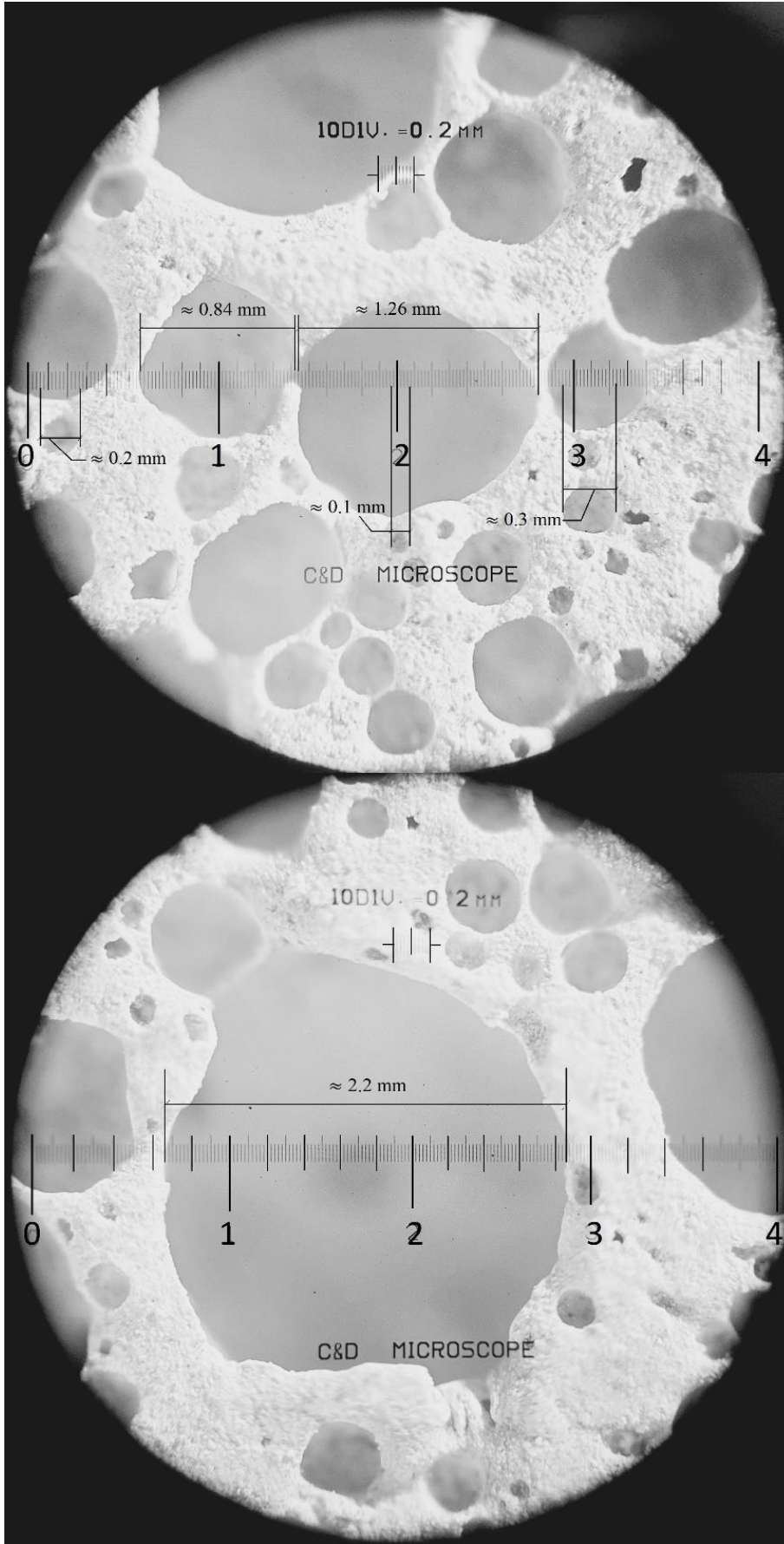
Burada, dayanımın iletkenliğe doğrudan etkisi olduğu, dayanıma ise köpük ve atık miktarının etki ettiği görülmektedir. Atık miktarının artması ile dayanımın arttığı, köpük miktarının artması ile de azaldığı görülmektedir. Ayrıca yukarıdaki veriler ile birden değerlendirdiğinde dayanım ile birim hacim ağırlığın orantılı olduğu anlaşılmaktadır.



Resim 4.3. Karışımdaki değişkenlerin ııl iletkenliğe etkisi.

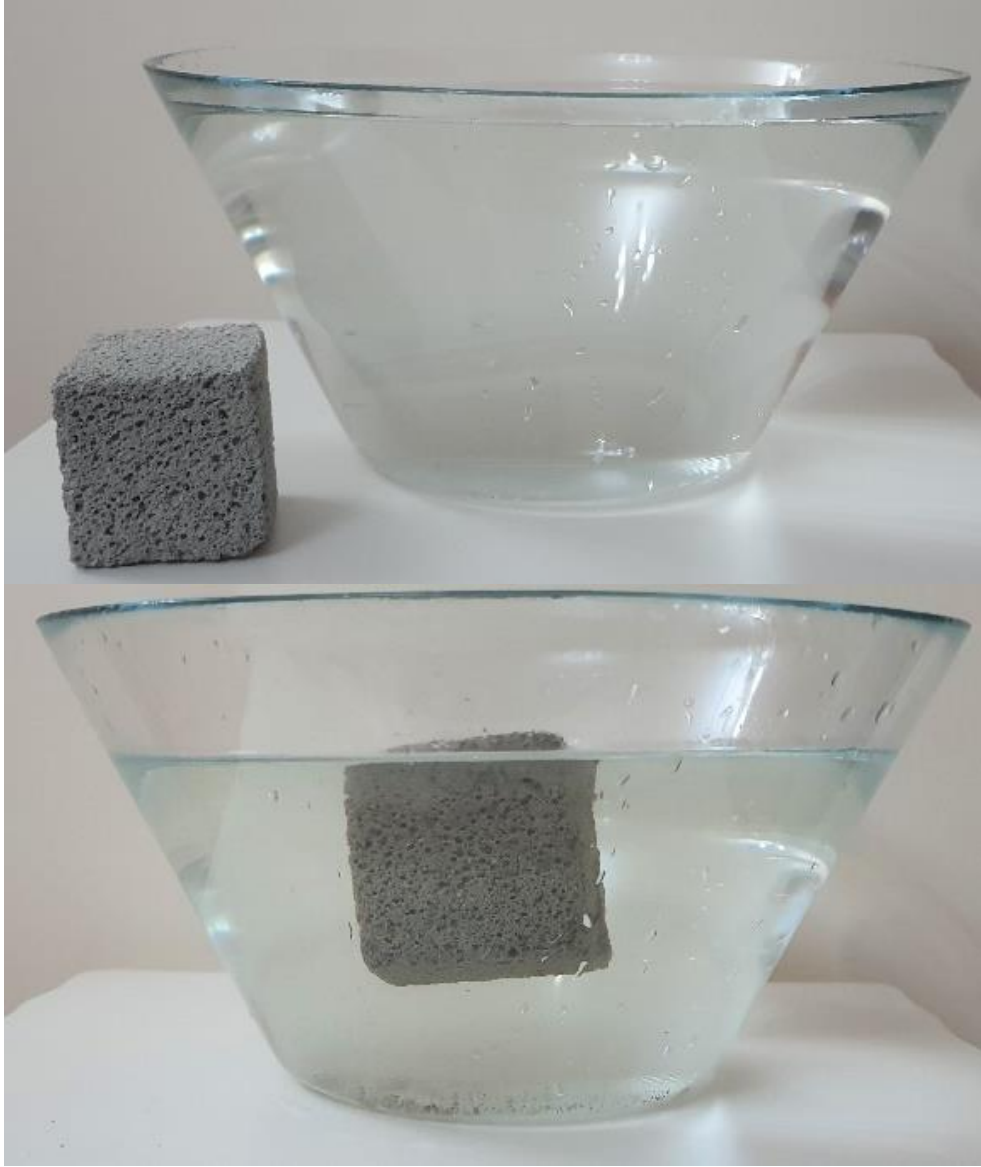
Burada, birim hacim ağırlığın ve dolaysı ile dayanımın ııl iletkenlik üzerinde en etkili faktör olduğu görölmektedir. Ayrıca, köpük miktarının ııl iletkenlik ile ters orantılı olduğu ve atık miktarı artırıldığında dayanımın da artma eğiliminde olduğu görölmektedir.

Beton mikroskobu ile köpük ajanı sayesinde beton içerisinde genişliği 2 mm'yi aşabilen düzensiz biçimde irili ufaklı ve farklı boyutlarda oluşan bağımsız kapalı gözeneklerin fotoğrafları çekilmiş olup aşığıda gözeneklerin yapısına yer verilmiştir.



Resim 4.4. Üretilen köpük betonun boşluk ve gözenek yapısı.

İnşaat yıkıntı atıklarından elde edilen ince malzemeden üretilen köpük betonun hafifliğini gösterebilmek adına, suda yüzdürülmüş olan 4 numaralı seriye ait köpük beton numunesinin görseli aşağıda paylaşılmıştır.



Resim 4.5. Üretilen köpük beton numunesinin suda yüzdürülmesi.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

İnşaat yıkıntı atıklarının köpük beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılmasına ilişkin yapılan bu çalışma ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

Deneyleerde, su/çimento miktarının düşük seçilmesi harcın daha yoğun olmasına, buna bağlı olarak bünyesindeki boşluklu yapının azalmasına yol açmaktadır. Ayrıca, su miktarı daha az olduğundan hidrasyon için gerekli olan su miktarı da azalmaktadır. Dolayısı ile bu husus da dayanımı olumsuz etkilemektedir.

Yapılan deneyler neticesinde elde veriler doğrultusunda; 1 numaralı seride; köpüklerin sönmesi ile meydana gelen çökmeler sebebiyle 0,39 s/ç oranında inşaat yıkıntı atıkları ile köpük beton üretimi uygun görülmemektedir.

Yapılan ön denemelerde köpük beton üretiminde dikkat edilmesi gereken bir diğer hususun da dökülen numunelerin bir gün içerisinde sökülmesi halinde kalıplardaki numunelerin dış etkilere karşı olumsuz davranış sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Köpük beton harcı prizini geç alması sebebiyle kalıp sökme süresi olarak 3 gün belirlenmiştir.

Karışım oranlarında köpük miktarını artmak köpük betonun birim hacim ağırlığını azaltmaktadır. Birim hacim ağırlığı ile köpük miktarı arasında ters ilişki bulunmaktadır. Ancak, şu husus da göz önünde bulundurulmalıdır ki köpük miktarının artmasıyla beton basınç dayanım da bir hayli azalmaktadır. Üretilecek betonun kullanım amacı doğrultusunda uygun olan karışım oranının seçilmesi gerekmektedir. Köpük betonun en azından dolgu duvar malzemesi olarak kullanılması düşünülüyor ise TS 13655'te belirtilen 1,50 MPa olan sınır değerini aşabilecek karışım oranının seçilmesi gerekmektedir. Şayet, ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılacak ise daha boşluklu yapıya sahip köpük beton elde edilecek bir karışım oranı seçilerek ısı iletkenliğinin de bu doğrultuda azaltılmasının sağlanması gerekmektedir. Köpük miktarının değiştirilerek uygun yoğunluk ile kullanım amacına hizmet edecek şekilde karışım oranının ayarlanması gerekmektedir.

Dökülen küp numunelerden S9 ile S15 arasındaki serilerin 28. gün basınç dayanım sonuçları TS 13655'te belirtilen 1,50 MPa olan sınır değerini sağlamaktadır. Yıkıntı atığından köpük beton üretimi için yapılmış olan bu deneylerde 14 numaralı seri, diğer bütün serilere nazaran birim ağırlığa oranla en iyi dayanımı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Bununla beraber hem üretilen betonun daha hafif olması hem de TS 13655'te belirtilen 1,50 MPa olan sınır değerinin sağlanması açısından 9 numaralı seride optimum sonuca ulaşılmıştır. TS 825'te belirtilen gaz beton duvar blokların ısı iletkenlik değerlerine 9 numaralı seride bir hayli yakın bir değer elde edilmişse de bundan daha iyi bir değer elde edilememiştir. Atık malzeme kullanımının bu değeri doğrudan etkilediği düşünülmektedir. Ancak şu husus göz ardı edilmemelidir ki burada atık bir malzeme değerlendirilmiş hem ekonomik hem de çevresel anlamda katkı sağlanmıştır. Diğer taraftan, atık malzemenin daha fazla hammadde olarak kullanılması hususu göz önünde bulundurulduğunda diğerlerine nazaran bir miktar daha ağır olsa da yine de TS EN 206-1 standardında 800 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 olarak belirtilen hafif beton yoğunluk sınırları arasında kalınmış olan 15 numaralı seride daha iyi bir sonuç elde edilmiştir.

5.2. Öneriler

İnşaat yıkıntı atıklarının köpük beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılmasına ilişkin yapılan bu çalışma neticesinde şu hususlar önerilebilir:

İnşaat sektörü hammaddenin en çok kullanıldığı alanlardan biri olduğundan, bu sektörde kullanılan hammaddenin azaltılması, ekonomik anlamda kazanç ve doğal kaynakların korunması ile çevreye verilen tahribatın mümkünse ortadan kaldırılmasına ya da en aza indirilmesine ilişkin sıfır atık projesi göze alındığında, inşaat yıkıntı atıklarının yeniden değerlendirilmesi hayati bir önem taşımaktadır. Bu bağlamda, inşaat yıkıntı atıklarının değerlendirilmesi üzerine çalışmalar yapılarak geliştirilmesi gereken bir konudur.

Köpük betonda karışım oranının belirlenmesi için üretimden önce bu konuda gerekli hesaplamalar yapılması ve çalışılması gerekmektedir.

İnşaat yıkıntı atıklarından elde edilen köpük betonun yalıtım malzemesi olarak kullanılması da mümkündür. Ayrıca, geleneksel tuğlaya kıyasla hiçbir fırınlama maliyeti bulunmayan köpük betonun, yıkıntı atıklarından üretimi sayesinde dolgu duvar malzemesi olarak

kullanılması ile enerjiden tasarruf edilmek suretiyle ekonomik anlamda ciddi bir kazanç sağlanması mümkündür. Bu doğrultuda, devlet desteği görmesi gerektiği düşünülmektedir. Yapının inşası aşamasında en azından dolgu duvar malzemesi olarak geri dönüştürülmüş ürünler kullanılması halinde, belediyelerce alınan bazı harçlardan muaf tutulması ya da bu harçların daha az alınması hususunda desteklenmesi halinde dahi yıkıntı atıklarının değerlendirilmesinin sağlanacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Gürer, C., Akbulut, H., & Kürklü, G. (2004). *İnşaat endüstrisinde geri dönüşüm ve bir hammadde kaynağı olarak farklı yapı malzemelerinin yeniden değerlendirilmesi*. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, 28-36.
2. Erdoğan, T. Y. (2013) *Beton*. (2). Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık (Akademik Kitaplar).
3. Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S. (2012). *Beton*. (1). İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları.
4. İstanbulluoğlu, S. (1988). Betonun Basınç Dayanımını Etkileyen Faktörler ve Ramble Betonun Seçimi ile İlgili Bir Çalışma. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 27(3), 19-31.
5. Topçu, İ. B., Canbaz, M. & Karakurt, C. (2006). Beton üretiminde kimyasal katkı kullanımını. *Politeknik Dergisi*, 9(1), 59-63.
6. Urhan, S. (1993). Hafif ve çok hafif betonların karakteristik özellikleri ve teknik kapasiteleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, (369), 34-40.
7. Gönen, T., & Yazıcıoğlu, S. (2010). Kendiliğinden yerleşen hafif betonun mekanik özelliklerine kür ortamı ve agrega tipinin etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(3), 459-467.
8. Türk Standartları Enstitüsü (2021). *Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk*. TS EN 206-A2, Ankara.
9. Taşdemir, C. (2003). Hafif betonların ısı yalıtım ve taşıyıcılık özellikleri, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 5(427), 57-61.
10. Konuk, H. (2003). *Hafif Agregalı Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
11. Şimşek, O. (2013) *Beton ve Beton Teknolojisi*. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
12. Ramamurthy, K., Nambiar, E. K., & Ranjani, G. I. S. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and concrete composites*, 31(6), 388-396.
13. Jones, M. R., & McCarthy, A. (2005). Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete. *Fuel*, 84(11), 1398-1409.
14. Kılıçer, A. (2018). Pomza ve Genleştirilmiş Perlit Madenlerinin Köpük Betonda Agregada Olarak Kullanılması. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(3), 268-285.
15. Davraz, M., Kılınçarslan, Ş., & Kuru, M. (2015). *Farklı Yoğunluktaki Köpük Betonların Dayanım ve Isıl İletkenlik Özellikleri*. Ulusal Beton Kongresi, 16(18), 93-102.

16. Uddin, N., Fouad, F., Vaidya, U. K., Khotpal, A., & Serrano-Perez, J. C. (2006). Structural characterization of hybrid fiber reinforced polymer (FRP)-autoclave aerated concrete (AAC) panels. *Journal Of Reinforced Plastics And Composites*, 25(9), 981-999.
17. Khayat, K. H., & Assaad, J. (2002). Air-void stability in self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, 99(4), 408-416.
18. Nambiar, E. K., & Ramamurthy, K. (2007). Air-void characterisation of foam concrete. *Cement and concrete research*, 37(2), 221-230.
19. Atabey, V. (2020). *Mermer Atıklarından Köpük Beton Blok Üretimi: Köpük Beton*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
20. Ekinci, D. (2014). Türkiye’de Köpük Beton. *Yapı Teknolojisi ve Malzeme, Mimarlık Dergisi*, (376).
21. Davraz, M. E. T. İ. N., Kiliçarslan, Ş., Koru, M. U. R. A. T., & Tuzlak, F. (2016). Investigation of relationships between ultrasonic pulse velocity and thermal conductivity coefficient in foam concretes. *Acta Physica Polonica A*, 130(1), 469-470.
22. Ören, O. H. (2017). *Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Köpük Beton Özelliklerine Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.
23. Ezici, M. (2016). *Farklı Koşullarda Dökülen Kolonlarda Vibrasyon ve Kür Koşullarının Değişiminin Beton Dayanıma Etkisi*. Doktora Tezi, Adıyaman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adıyaman.
24. Banfill, P.F.G. (2006) *Rheology Of Fresh Cement And Concrete*, Liverpool, 61-130.
25. Oğuz, M. (2019). *Geri Dönüştürülmüş Betonların Köpük Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.
26. Amran, Y. M., Farzadnia, N., & Ali, A. A. (2015). Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*, 101(1), 990-1005.
27. Bing, C., Zhen, W., & Ning, L. (2012). Experimental research on properties of high-strength foamed concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 24(1), 113-118.
28. Mydin, M. A. O., & Wang, Y. C. (2012). Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 26(1), 638-654.
29. Bodur, B., Bayraktar, Ö. Ü. O. Y., & Kaplan, Ö. Ü. G. *Kalsiyum alüminat çimentolarının köpük beton üretiminde kullanımının incelenmesi*. 1.Uluslararası Mühendislik ve Mimarlık Kongresi, İstanbul, 338-361.
30. Bozlağan, R. (2005). *Sürdürülebilir gelişme düşüncesinin tarihsel arka planı*. In Journal of Social Policy Conferences (50), 1011-1028.
31. Tekin, Ö. F., Eşit, M., Kamil, B., & Varınca, K. B. (2014, October). *Proposed solutions to environmental concerns in the construction industry: sustainability and green building*. In Proc 2nd International Symposium on Environment and Morality (24-26).

32. Hoşkara, E. (2007). *Ülkesel Koşullara Uygun Sürdürülebilir Yapım İçin Stratejik Yönetim Modeli*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
33. Kibert, C. J., & Dierdorf, D. (1994). Solid particulate aerosol fire suppressants. *Fire Technology*, 30(4), 387-399.
34. İnternet: Atık Yönetimi Yönetmeliği. (2015). Web: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=20644&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>. Son Erişim Tarihi:01.03.2022.
35. İnternet: Sıfır Atık Yönetmeliği. (2019) Web: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=32659&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>. Son Erişim Tarihi:01.03.2022
36. İnternet: Sıfır Atık Projesi 2017 Yılı Faaliyet Raporu. (2018) Web: https://webdosya.csb.gov.tr/db/kirklareli/menu/sifir-atik-projesi-2017-faaliyet-raporu_20181009033422.pdf. Son Erişim Tarihi:06.03.2022
37. İnternet: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Sıfır Atık Sunumu. Web: <https://csb.gov.tr/arama?ara=s%C4%B1f%C4%B1r+at%C4%B1k>. Son Erişim Tarihi:06.03.2022
38. Murat, G. Ü. L., & Yaman, K. (2020). Türkiye’de atık yönetimi ve sıfır atık projesinin değerlendirilmesi: Ankara örneği. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 35(4), 1267-1296.
39. Çetin, T. (2011). *Balıkesir ili ambalaj atıkları geri kazanım potansiyelinin değerlendirilmesi ve toplum bilinçlendirme çalışmalarının etkisinin belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
40. European Commission Environment Directorate-General. (2010). Being wise with waste: the EU's approach to waste management. *Publication Office of the European Union*.
41. Solak, S. G., & Pekçüçükşen, S. (2018). Türkiye'de kentsel katı atık yönetimi: karşılaştırmalı bir analiz. *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 7(3), 653-683.
42. Korkut, M. K., & Şimşek, O. (2021). İri Agrega Olarak İnşaat Yıkıntı Atığı, İnce Agrega Olarak Doğal ve Kırmı Kum Kullanılan Betonun Bazı Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(2), 508-520.
43. Elias-Özkan, ST (2001). Recycling rubble into aggregates: a model for local governments. *Habitat International*, 25(4), 493-502.
44. İnternet: Hafriyat Toprağı, İnşaat Yıkıntı Atıkları Kontrolü Yönetmeliği. (2014) Web: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=5401&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>. Son Erişim Tarihi:06.03.2022

45. Ölmez, E., & Yıldız, Ş. (2008). *İnşaat ve yıkıntı atıklarının yönetimi ve planlanan İstanbul modeli*. Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu, İstanbul, 8, 02-06.
46. Süme, E. (2016). *Geri dönüşüm agregasının beton yol kaplamasında kullanılabilirliği*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
47. Poyraz, Ü. (2016). *Türkiye İnşaat Yıkıntı Atık Yönetim Sisteminin Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
48. Maçın, K. E., & Demir, İ. (2018). Kentsel dönüşüm sürecinde İstanbul'da inşaat ve yıkıntı atıkları yönetimi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(9), 188-201.
49. Özçelik, Y., & Şimşek, O. (2022). *İnşaat yıkıntı atıklarının köpük beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması*. 8. Uluslararası İstanbul Bilimsel Araştırmalar Kongresi, 41-42.
50. İnternet: İnşaat ve Yıkıntı Atıklarından İlk Endüstriyel Uygulama Tamamlanarak "Yeşil Tuğla" Ve "Yeşil Çimento" Üretildi. (2014) Web: <https://altyapi.csb.gov.tr/insaat-ve-yikinti-atiklarindan-ilk-endustriyel-uygulama-tamamlanarak-yesil-tugla-ve-yesil-cimento-uretildi-.haber-13871>. Son Erişim Tarihi: 01.03.2022.
51. Köken, A., Köroğlu, M. A., & Yonar, F. (2008). Atık Betonların Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliği. *Selçuk University Journal of Engineering Sciences*, 7(1), 86-97.
52. Demirel, C., & Şimşek, O. (2014). C30 sınıfı atık betonun geridönüşüm agregası olarak beton üretiminde kullanılabilirliği. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2(2), 45-54.
53. Demirel, C., & Şimşek, O. (2015). Erken yaşdaki atık betonların geri dönüşüm agregası olarak beton üretiminde kullanılabilirliği ve sürdürülebilirlik açısından incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3(1), 226-235.
54. Demirel, C., Toklu, K., & Şimşek, O. (2015). The Usability of Recycle Aggregate in the Concrete Production and Its Evaluation in Terms of Sustainability.
55. Sonawane, T. R., & Pimplikar, S. S. (2013). Use of recycled aggregate concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 52-59.
56. Qassab, H. F. S. *Bina yıkıntı atıklarının harç karışımında agrega olarak kullanılabilirliği*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
57. Türk Standartları Enstitüsü (2012). *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler- bölüm 1: tane büyüklüğü dağılımının tayini- eleme yöntemi*, TS EN 933-1, Ankara.
58. İnternet: Genfil Köpük Ajanı. Web: <https://sites.google.com/site/yuzeykoruyucu/>. Son Erişim Tarihi:01.03.2022.
59. Türk Standartları Enstitüsü (2012). *Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*, TS EN 197-1, Ankara.

60. İnternet: Rotowash. (2021) Web: <https://www.rotowash.com.tr/kopuk-puskurtme-pompalari-2/88645---30-It-kopuk-puskurtme-pompasi-88645.html>. Son Erişim Tarihi:01.03.2022.
61. Türk Standartları Enstitüsü (2022). *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini*, TS EN 1097-6, Ankara.
62. Demir, İ., Başpınar, M. S., & Kahraman, E. (2019). Köpük Beton Üretiminde Uygun Akışkanlaştırıcı/Priz Hızlandırıcı Katkı Türünün Araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(2), 390-400.
63. Jones, M. R., McCarthy, M. J., & McCarthy, A. (2003). *Moving fly ash utilisation in concrete forward: A UK perspective*. In Proceedings of the 2003 International Ash Utilization Symposium, Lexington, 20-22.
64. Türk Standartları Enstitüsü (2019). *Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 7: Sertleşmiş betonun birim hacim kütlelerinin tayini*, TS EN 12390-7, Ankara.
65. Türk Standartları Enstitüsü (2019). *Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini*, TS EN 12390-3, Ankara.
66. Türk Standartları Enstitüsü (2008). *Kimyasal katkılar- Beton, harç ve şerbet için- deney metotları- Bölüm 11: Sertleşmiş betonda hava boşluğu özelliklerinin tayini*, TS EN 480-11, Ankara.
67. Özçep, F., Karabulut, S., Özgüven, B., & Sanlı, O. (2012). Tahribatsız Test Yöntemleri ve Ultrasonik Hız Ölçümleri. *Jeofizik Bülteni*, 22, 11-24.
68. Türk Standartları Enstitüsü (2021). *Yapılarda beton deneyleri- Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini*, TS EN 12504-4, Ankara.
69. Murat, K. O. R. U. (2017). Köpük Betonun Yoğunluk ve Sıcaklığa Bağlı Isıl İletkenlik Katsayısının Isı Akış Ölçer Yöntemiyle Belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 614-622.
70. Türk Standartları Enstitüsü (2009). *Yapı malzemeleri ve mamulleri- Isıl direncin, korumalı tablalı ısıtıcı ve ısı akı ölçerin kullanıldığı metotlarla tayini- Isıl direnci orta ve düşük seviyede olan kuru ve rutubetli mamuller*, TS EN 12664, Ankara.
71. Türk Standartları Enstitüsü (2015). *Kâgir birimler- Özellikler- Köpükbeton kâgir birimler*, TSE 13655, Ankara.
72. Türk Standartları Enstitüsü (2013). *Binalarda ısı yalıtım kuralları*, TSE 825, Ankara.



GAZİ GELECEKTİR..