

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**FARKLI AGREGALARLA ÜRETİLEN ÇİMENTO ESASLI
KOMPOZİTLERİN AKUSTİK VE ISIL
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

ELİF TUĞÇE KOCABEYOĞLU

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

YOZGAT - 2022

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

FARKLI AGREGALARLA ÜRETİLEN ÇİMENTO ESASLI
KOMPOZİTLERİN AKUSTİK VE ISIL
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ELİF TUĞÇE KOCABEYOĞLU

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

Bu çalışma Yozgat Bozok Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Birimi tarafından 6602c-MÜH/20-368 kodu ile desteklenmiştir.

YOZGAT - 2022

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan eder, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İMZA

Elif Tuğçe KOCABEYOĞLU

29/06/2022

ÖZET

DOKTORA TEZİ

FARKLI AGREGALARLA ÜRETİLEN ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN AKUSTİK VE ISIL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ELİF TUĞÇE KOCABEYOĞLU

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI: PROF DR. FUAT KÖKSAL

Bu çalışmada keten lif takviye edilerek beş farklı agrega ile üretilen çimento esaslı kompozitlerin ısı ve ses özellikleri incelenmiştir. Agrega olarak kırma kum, genişletilmiş kil, pomza, genişletilmiş vermikülit ve atık kauçuk kullanılmıştır. Karışımlara 0 ve 15 kg/m³ miktarlarında keten lifler takviye edilerek normal harç ve köpük beton numuneler üretilmiştir. Standart küre tabi tutulan numuneler üzerinde fiziksel özelliklerin belirlenmesi amacıyla kuru birim ağırlık, porozite, su emme, kılcal su emme, ultrases geçiş hızı, ısı iletkenlik ve ses yutum katsayısı tayini deneyleri yapılmıştır. Mekanik dayanımların tayini için ise elastisite modülü, eğilme, basınç ve yarmada çekme dayanımı tayini deneyleri yapılmıştır.

Keten lif takviyesi ile numunelerin kuru birim ağırlıklarında azalma gözlenirken, buna karşılık porozite ve su emme değerlerinde artma tespit edilmiştir. Keten lif takviyeli numunelerin ultrases geçiş hızlarında lifsiz olanlara kıyasla daha fazla azalma gözlenmiştir. Harçların birim ağırlıklarının azalması buna bağlı olarak gözenek miktarının artması ile eğilme, basınç elastisite modülü ve yarmada çekme dayanımlarında azalma olmuştur. Diğer taraftan bu durum ısı ve ses yalıtımı bakımından daha verimli sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Kauçuk agregalı keten lif takviyeli köpük beton numunelerde ses yutum katsayısı en iyi değerlerini almasına rağmen basınç ve eğilme dayanımında oldukça düşük değerler elde edilmiştir. Numunelerin kalınlığının artması ile ses yutum katsayısında artış tespit edilmiştir. Keten lif içeren vermikülit agregalı harçların ısı iletkenlik değerlerinin kırma kum agregalı harçlara kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Keten lif takviyesinin ısı iletkenlik katsayısını önemli ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

2022, 237 SAYFA

ANAHTAR KELİMELER: Harç, Keten Lif, Köpük Beton, Ses Yalıtımı, Isı Yalıtımı.

ABSTRACT

DOCTORATE THESIS

INVESTIGATION OF ACOUSTIC AND THERMAL PROPERTIES OF CEMENT BASED COMPOSITES PRODUCED BY DIFFERENT AGGREGATES

ELİF TUĞÇE KOCABEYOĞLU

**YOZGAT BOZOK UNIVERSITY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT

SUPERVISOR: PROF. DR. FUAT KÖKSAL

In this study, thermal and sound behavior of mortars produced with different aggregates by adding flax fiber were investigated. Crushed sand, expanded clay, pumice, expanded vermiculite and waste rubber were used as aggregates. Normal mortar and foam concrete samples were produced by additions of 0 and 15 kg/m³ amounts of chopped flax fibers to the mixtures. Dry unit weight, void ratio, water absorption, capillary water absorption, ultrasound transmission velocity, thermal conductivity and sound absorption coefficient tests were carried out on the samples subjected to standard curing in order to obtain the physical properties. Bending, compression, modulus of elasticity and splitting tensile strength tests were also carried out to determine the mechanical properties.

While a decrease was observed in the dry unit weights of the samples with the flax fiber reinforcement, an increase was observed in the porosity and water absorption values. It was observed that the ultrasound transmission rates of the flax fiber reinforced samples were more reduced than the ones without fiber. The decrease in the unit weight of the mortars and the corresponding increase in the amount of pores resulted in a decrease in the flexural, compressive elasticity modulus and splitting tensile strengths. On the other hand, this situation provided more efficient results in terms of heat and sound insulation. Although the sound absorption coefficient was the best in the rubber aggregate, flax fiber reinforced foam concrete samples, very low values were obtained in compressive and flexural strength. It was determined that the sound absorption coefficient increased with the increase in the thickness of the samples. It was determined that the thermal conductivity values of vermiculite aggregate mortars containing flax fiber were lower than mortars with crushed sand aggregate. It was observed that the flax fiber reinforcement significantly improved the thermal conductivity coefficient.

2022, 237 PAGE

KEYWORDS: Flax Fiber, Foam Concrete, Mortar, Sound Isolation, Thermal Isolation.

ÖNSÖZ

Öncelikle çalışmalarım boyunca engin bilgi ve tecrübesi ile yoluma ışık tutan çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Fuat KÖKSAL'a en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Doktora tezimin tamamlanmasına kadar geçen süre içerisinde destek ve önerilerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Fatih ALTUN ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYA hocalarıma, deneysel olanak ve değerli bilgileri ile tezime destek veren Sayın Prof. Dr. Osman GENÇEL hocama, her aşamada bana yardımcı olan değerli arkadaşım Halis KILINÇASLAN'a teşekkür ederim.

Hayatımda ve çalışmalarımnda başarabileceğime her zaman inanan, güvenen ve beni yüreklendiren sevgili annem Zekiye KOCABEYOĞLU'na, desteklerini benden esirgemeyen ve hiçbir konuda beni yalnız bırakmayan sevgili babam Taylan KOCABEYOĞLU'na, her zaman ve her konuda en büyük destekçim olan canım kardeşim Batuhan KOCABEYOĞLU'na teşekkür ederim.

Bu tez çalışması;

Yozgat Bozok Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 6602c-MÜH/20-368 nolu proje ile desteklenmiştir.

İMZA

Elif Tuğçe KOCABEYOĞLU

29/06/2022

İÇİNDEKİLER

Tez Onay Sayfası.....	ii
Tez Beyanı	iii
Özet.....	iv
Abstract.....	v
Önsöz.....	vi
İçindekiler.....	vii
Tablolar Listesi.....	x
Şekiller Listesi.....	xi
Resimler Listesi.....	viii
Simgeler ve Kısaltmalar Listesi.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	4
2.1. Çimento Esaslı Kompozitler ve Özellikleri.....	5
2.1.1. Çimento Esaslı Kompozitlerin Kullanım Alanları.....	7
2.2. Hafif Betonlar ve Özellikleri.....	7
2.2.1. Hafif Beton Türleri.....	10
2.2.2. Hafif Betonların Kullanım Alanları.....	13
2.3. Hafif Agregalar.....	14
2.3.1. Genleştirilmiş Kil.....	14
2.3.2. Pomza.....	16
2.3.3. Genleştirilmiş Vermikülit.....	18
2.3.4. Kauçuk Atığı.....	21
2.4. Köpük Beton.....	23
2.4.1. Köpük Ajanı ve Köpük Beton Üretimi.....	23
2.4.2. Köpük Beton Özellikleri.....	26
2.4.3. Köpük Beton Kullanım Alanı.....	34
2.5. Isı Yalıtımı.....	36
2.6. Ses Yalıtımı	39
2.6.1. Temel Ses Bilgileri.....	39
2.6.2. Ses Emiliminin Derecelendirilmesi.....	46
2.6.2.1. Gürültü Azaltım Katsayısı (NRC).....	48
2.6.2.1. Ses Emilim Ortalaması (SAA).....	48
2.6.2.3. Ağırlıklı Ses Yutum Katsayı Değeri (α_w).....	49

2.6.3. Ses Yutumunun Ölçülmesi ve İlgili Standartlar.....	51
2.6.3.1. Empedans Tüpü Ölçüm Yöntemi İle Ses Yutumunun Ölçülmesi.....	51
2.6.3.1.1. Duran Dalga Yöntemi.....	52
2.6.3.1.2. Transfer Fonksiyonu Yöntemi.....	53
2.6.3.2 Çınlama Odası Ölçüm Yöntemi.....	55
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	80
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	80
3.1.1. Çimento.....	80
3.1.2. Agrega.....	80
3.1.2.1. Kırma Kum.....	81
3.1.2.2. Genleştirilmiş Kil.....	82
3.1.2.3. Pomza.....	83
3.1.2.4. Genleştirilmiş Vermikülit.....	84
3.1.2.5. Kauçuk.....	85
3.1.3. Keten Lif.....	86
3.1.4. Köpük Ajanı.....	86
3.1.5. Karışım Suyu.....	87
3.2. Karışım Oranları ve Üretim.....	87
3.2.1. Normal Harç Numunelerinin Üretimi.....	87
3.2.2. Köpük Beton Numunelerinin Üretimi.....	90
3.3. Deneyler.....	92
3.3.1. Taze Harç Deneyleri.....	92
3.3.1.1. Birim Hacim Ağırlık Deneyi.....	92
3.3.1.2. Yayılma Tablası Deneyi.....	93
3.3.1.3. Marsh Konisi – Akışkanlık Deneyi.....	94
3.3.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri.....	95
3.3.2.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık, Su Emme ve Porozite Deneyi.....	95
3.3.2.2. Kılcal Su Emme Deneyi.....	97
3.3.2.3. Ultrases Geçiş Hızlarının Belirlenmesi.....	98
3.3.2.4. Eğilme Dayanımı.....	100
3.3.2.5. Basınç Dayanımı.....	101
3.3.2.6. Yarmada Dayanımı.....	102
3.3.2.7. Elastisite Modülü.....	105
3.3.2.8. Isıl İletkenlik Katsayısının Belirlenmesi.....	106

3.3.2.9. Ses Yutum Katsayısının Belirlenmesi.....	108
3.3.3. Numunelerin Elementel Analizleri.....	111
3.3.3.1. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) Analizi.....	111
3.3.3.2. X-Işını Difraktometresi (XRD) Analizi.....	113
4. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	115
4.1. Taze Harç Deney Bulguları.....	115
4.1.1. Taze Birim Hacim Ağırlık.....	115
4.2. Sertleşmiş Harç Deney Bulguları.....	117
4.2.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık.....	117
4.2.2. Su Emme.....	119
4.2.3. Kılcal Su Emme.....	122
4.2.4. Porozite.....	125
4.2.5. Ultrases Geçiş Hızı.....	127
4.2.6. Eğilme Dayanımı.....	130
4.2.7. Basınç Dayanımı.....	133
4.2.8. Yarma Dayanımı.....	136
4.2.9. Elastisite Modülü.....	139
4.2.10. Isıl İletkenlik.....	142
4.2.11. Ses Yutum Katsayısı.....	148
4.3. Numunelerin Elementel Analizleri.....	198
4.3.1. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) Analizi.....	198
4.3.2. X-Işını Difraktometresi (XRD) Analizi.....	203
5. TARTIŞMA.....	207
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	211
KAYNAKLAR.....	218
ÖZGEÇMİŞ	

TABLolar LİSTESİ

<u>Tablo</u>		<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1.	Hafif betonların basınç dayanımlarına göre sınıflandırılması.....	11
Tablo 2.2.	Hafif betonların yoğunluklarına göre sınıflandırılması.....	12
Tablo 2.3.	Hafif betonların sınıflandırılması.....	12
Tablo 2.4.	Köpük betonun elastisite modülünü hesaplamak için denklemler.....	33
Tablo 2.5.	Isı yalıtımı malzemelerinin genel fiziksel özellikleri.....	37
Tablo 2.6.	Frekans aralıklarına göre sesin algılanması.....	44
Tablo 2.7.	Ses yutum özelliklerinin değerlendirilmesi için kullanılan yöntemlerin listesi.....	47
Tablo 2.8.	Ses yalıtımının değerlendirilmesi ile ilgili standartlar	47
Tablo 2.9.	Ses absorpsiyon sınıfları.....	50
Tablo 2.10.	Maksimum eşdeğer ses emme alanları, $V= 200 \text{ m}^3$ için.....	56
Tablo 2.11.	Bazı malzemelerin 500 Hz için ses yutum (α) katsayıları.....	59
Tablo 2.12.	Bazı malzemelerin frekansa bağlı ses yutum katsayılarının değişimi.....	60
Tablo 3.1.	CEM I 42,5 R Portland çimentosunun özellikleri	80
Tablo 3.2.	Çalışmada kullanılan keten lifin özellikleri.....	86
Tablo 3.3.	Normal harç karışımında kullanılan malzeme miktarları (kg/m^3)...	88
Tablo 3.4.	Köpük beton karışımında kullanılan malzeme miktarları (kg/m^3)...	90
Tablo 3.5.	Köpük beton harcının akma süresine göre yapılan sınıflandırma....	94
Tablo 4.1.	Numunelerin taze birim hacim ağırlık değerleri.....	115
Tablo 4.2.	Numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerleri.....	117
Tablo 4.3.	Numunelerin su emme değerleri.....	120
Tablo 4.4.	Numunelerin kılcal su emme değerleri.....	123
Tablo 4.5.	Numunelerin porozite değerleri	125
Tablo 4.6.	Numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri.....	128
Tablo 4.7.	Numunelerin eğilme dayanım değerleri.....	131
Tablo 4.8.	Numunelerin basınç dayanım değerleri.....	134
Tablo 4.9.	Numunelerin yarma dayanımı değerleri.....	137
Tablo 4.10.	Numunelerin elastisite modülü değerleri.....	140
Tablo 4.11.	Numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri.....	143
Tablo 4.12.	Normal harç numunelerin ses yutum katsayı değerleri.....	149
Tablo 4.13.	Köpük beton numunelerin ses yutum katsayı değerleri.....	150

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1.	Üretim metotlarına göre hafif beton türlerinin iç yapı şekilleri.....	10
Şekil 2.2.	Gaz beton ve köpük birim ağırlık- basınç dayanımı ilişkisi.....	31
Şekil 2.3.	Ses dalgasının hareketi.....	40
Şekil 2.4.	Sinüs dalgasının şematik gösterimi.....	41
Şekil 2.5.	Ses yutum mekanizması.....	45
Şekil 2.6.	Ağırlıklı ses yutum katsayısının değerlendirilmesi için referans eğri.....	50
Şekil 2.7.	Farklı ses emilim sınıflarını belirleyen örnek referans eğriler.....	51
Şekil 2.8.	ISO 10534-1:2001 standardına göre ölçüm yapan empedans tüpü sistemi.....	53
Şekil 2.9.	EN ISO 10534-2:2001 standardına göre empedans tüpü kesiti içerisindeki mikrofona konumları ve uzaklık kodlamaları.....	54
Şekil 2.10.	EN ISO 10534-2:2001 standardına göre ölçüm yapan empedans tüpü sistemi.....	55
Şekil 2.11.	Gözenekli malzeme kesit görüntüsü.....	61
Şekil 2.12.	Malzeme kesitindeki bağlanmış gözenek ağı ve kapalı gözeneklerin tanımlanması.....	61
Şekil 2.13.	Malzeme içerisindeki açık ve kapalı gözenek sistemi farkı.....	62
Şekil 2.14.	Tüm gözeneklerin polimer matris duvarları ile sınırlandırıldığı kapalı hücreli bir yapı modeli.....	62
Şekil 2.15.	Sürekli bir ağ oluşturan açık hücre yapısı.....	63
Şekil 2.16.	Ses emiliminde etkili gözeneklerin tanımlanması.....	64
Şekil 2.17.	Dalganın havada yayılımı ile gözenekli malzemedeki yayılımının tanımlanması.....	65
Şekil 2.18.	Malzeme bükümlülük özelliğinin gösterimi.....	66
Şekil 2.19.	Ses dalgasının gözenekli malzemede izlediği yol.....	67
Şekil 2.20.	Keten liflerin akustik enerji dağılım mekanizması.....	76
Şekil 2.21.	Keten Lifin (a) Boyuna ve (b) Enine Kesiti.....	76

Şekil 3.1.	Kırma kum agregasına ait tane boyut dağılım eğrisi.....	81
Şekil 3.2.	Genleştirilmiş kil agregasına ait tane boyut dağılım eğrisi.....	82
Şekil 3.3.	Pomza agregasına ait tane boyut dağılım eğrisi.....	83
Şekil 3.4.	Genleştirilmiş vermikülit agregasına ait tane boyut dağılım eğrisi.....	84
Şekil 3.5.	Kauçuk agregasına ait tane boyut dağılım eğrisi.....	85
Şekil 3.6.	Marsh konisi – akışkanlık deney düzeneği.....	94
Şekil 3.7.	Kılcal su emme deney düzeneği.....	97
Şekil 3.8.	Ultras ses geçiş hızı deney düzeneği.....	99
Şekil 3.9.	Eğilme dayanımı deney düzeneği.....	100
Şekil 3.10.	Basınç dayanımı deney düzeneği.....	101
Şekil 3.11.	Yarma dayanımı deney düzeneği.....	104
Şekil 3.12.	Isıl iletkenlik deney düzeneği.....	107
Şekil 3.13.	Empedans tüpünün şematik çalışma prensibi.....	109
Şekil 3.14.	Ses yutumu katsayısı deney düzeneği.....	109
Şekil 3.15.	Farklı birim ağırlıktaki köpük betonlarda hava boşluk yapısının karşılaştırılması.....	112
Şekil 3.16.	Birim ağırlığa bağlı gözenek yapısı a)1300 kg/m ³ , b)1600 kg/m ³ , c)1900 kg/m ³	112
Şekil 4.1.	Normal harçların taze birim hacim ağırlıklarının değişimi.....	116
Şekil 4.2.	Köpük betonların taze birim hacim ağırlıklarının değişimi.....	116
Şekil 4.3.	Normal harçların kuru birim hacim ağırlıklarının değişimi.....	118
Şekil 4.4.	Köpük betonların kuru birim hacim ağırlıklarının değişimi.....	119
Şekil 4.5.	Normal harçların su emme değerlerinin değişimi.....	121
Şekil 4.6.	Köpük betonların su emme değerlerinin değişimi.....	122
Şekil 4.7.	Normal harçların kılcal su emme değerlerinin değişimi.....	124
Şekil 4.8.	Köpük betonların kılcal su emme değerlerinin değişimi.....	124
Şekil 4.9.	Normal harçların porozite değerlerinin değişimi.....	126
Şekil 4.10.	Köpük betonların porozite değerlerinin değişimi.....	127
Şekil 4.11.	Normal harçların ultras ses geçiş hızı değerlerinin değişimi.....	129

Şekil 4.12.	Köpük betonların ultrases geçiş hızı değerlerinin değişimi.....	130
Şekil 4.13.	Normal harçların eğilme dayanım değerlerinin değişimi.....	132
Şekil 4.14.	Köpük betonların eğilme dayanım değerlerinin değişimi.....	133
Şekil 4.12.	Köpük betonların ultrases geçiş hızı değerlerinin değişimi.....	130
Şekil 4.13.	Normal harçların eğilme dayanım değerlerinin değişimi.....	132
Şekil 4.14.	Köpük betonların eğilme dayanım değerlerinin değişimi.....	133
Şekil 4.15.	Normal harçların basınç dayanım değerlerinin değişimi.....	135
Şekil 4.16.	Köpük betonların basınç dayanım değerlerinin değişimi.....	136
Şekil 4.17.	Normal harçların yarmada çekme dayanım değerlerinin değişimi.....	138
Şekil 4.18.	Köpük betonların yarmada çekme dayanım değerlerinin değişimi.....	139
Şekil 4.19.	Normal harçların elastisite modülü değerlerinin değişimi.....	141
Şekil 4.20.	Köpük betonların elastisite modülü değerlerinin değişimi.....	142
Şekil 4.21.	Normal harçların ısı iletkenlik katsayı değerlerinin değişimi.....	144
Şekil 4.22.	Köpük betonların ısı iletkenlik katsayı değerlerinin değişimi.....	145
Şekil 4.23.	Normal harçların kuru birim hacim ağırlık - ısı iletkenlik katsayı ilişkisi.....	146
Şekil 4.24.	Köpük betonların kuru birim hacim ağırlık - ısı iletkenlik katsayı ilişkisi.....	146
Şekil 4.25.	Normal harçların porozite - ısı iletkenlik katsayı ilişkisi.....	147
Şekil 4.26.	Köpük betonların porozite - ısı iletkenlik katsayı ilişkisi.....	147
Şekil 4.27.	Kırma kum agregası kullanılarak üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	151
Şekil 4.28.	Kırma kum agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	152
Şekil 4.29.	Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	153
Şekil 4.30.	Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	154

Şekil 4.31.	Pomza agregası kullanılarak üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	155
Şekil 4.32.	Pomza agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	156
Şekil 4.33.	Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	157
Şekil 4.34.	Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	158
Şekil 4.35.	Kauçuk agregası kullanılarak üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	159
Şekil 4.36.	Kauçuk agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	160
Şekil 4.37.	Kırma kum agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	161
Şekil 4.38.	Kırma kum agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	162
Şekil 4.39.	Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	163
Şekil 4.40.	Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	164
Şekil 4.41.	Pomza agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	165
Şekil 4.42.	Pomza agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	166
Şekil 4.43.	Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	167

Şekil 4.44.	Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	168
Şekil 4.45.	Kauçuk agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	169
Şekil 4.46.	Kauçuk agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	170
Şekil 4.47.	Kırma kum agregası kullanılarak üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	170
Şekil 4.48.	Kırma kum agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	171
Şekil 4.49.	Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	171
Şekil 4.50.	Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	172
Şekil 4.51.	Pomza agregası kullanılarak üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	172
Şekil 4.52.	Pomza agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	173
Şekil 4.53.	Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	173
Şekil 4.54.	Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	174
Şekil 4.55.	Kauçuk agregası kullanılarak üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	174
Şekil 4.56.	Kauçuk agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	175

Şekil 4.57.	Kırma kum agregası kullanılarak üretilen köpük betonların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	175
Şekil 4.58.	Kırma kum agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerin kalınlığa bağlı değişimi.....	176
Şekil 4.59.	Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak üretilen harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	176
Şekil 4.60.	Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerin kalınlığa bağlı değişimi.....	177
Şekil 4.61.	Pomza agregası kullanılarak üretilen köpük betonların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	177
Şekil 4.62.	Pomza agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	178
Şekil 4.63.	Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak üretilen köpük betonların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	178
Şekil 4.64.	Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerin kalınlığa bağlı değişimi.....	179
Şekil 4.65.	Kauçuk agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	179
Şekil 4.66.	Kauçuk agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	180
Şekil 4.67.	Numunelere ait NRC değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	181
Şekil 4.68.	Normal harç numunelere ait NRC değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	182
Şekil 4.69.	Köpük beton numunelere ait NRC değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi.....	183
Şekil 4.70.	Agrega türüne göre kalınlığı 1 cm olan numunelere ait NRC değerlerinin değişimi.....	184
Şekil 4.71.	Agrega türüne göre kalınlığı 3 cm olan numunelere ait NRC değerlerinin değişimi.....	184

Şekil 4.72. Agrega türüne göre kalınlığı 5 cm olan numunelere ait NRC değerlerinin değişimi.....	185
Şekil 4.73. Kalınlığı 1 cm olan numunelere ait NRC değerlerinin değişimi.....	185
Şekil 4.74. Kalınlığı 1 cm olan normal harç numunelere ait NRC değerlerinin değişimi.....	186
Şekil 4.75. Kalınlığı 1 cm olan köpük beton numunelere ait NRC değerlerinin değişimi.....	187
Şekil 4.76. Kalınlığı 3 cm olan numunelere ait NRC değerlerinin değişimi.....	187
Şekil 4.77. Kalınlığı 3 cm olan normal harç numunelere ait NRC değerlerinin değişimi.....	188
Şekil 4.78. Kalınlığı 3 cm olan köpük beton numunelere ait NRC değerlerinin değişimi.....	189
Şekil 4.79. Kalınlığı 5 cm olan numunelere ait NRC değerlerinin değişimi.....	189
Şekil 4.80. Kalınlığı 5 cm olan normal harç numunelere ait NRC değerlerinin değişimi.....	190
Şekil 4.81. Kalınlığı 5 cm olan köpük beton numunelere ait NRC değerlerinin değişimi.....	191
Şekil 4.82. Kalınlığı 1 cm olan normal harçların kuru birim hacim ağırlık – NRC ilişkisi.....	192
Şekil 4.83. Kalınlığı 1 cm olan köpük betonların kuru birim hacim ağırlık – NRC ilişkisi.....	193
Şekil 4.84. Kalınlığı 3 cm olan normal harçların kuru birim hacim ağırlık – NRC ilişkisi.....	193
Şekil 4.85. Kalınlığı 3 cm olan köpük betonların kuru birim hacim ağırlık – NRC ilişkisi.....	194
Şekil 4.86. Kalınlığı 5 cm olan normal harçların kuru birim hacim ağırlık – NRC ilişkisi.....	194
Şekil 4.87. Kalınlığı 5 cm olan köpük betonların kuru birim hacim ağırlık – NRC ilişkisi.....	195
Şekil 4.88. Kalınlığı 1 cm olan normal harçların porozite - NRC ilişkisi	195
Şekil 4.89. Kalınlığı 1 cm olan köpük betonların porozite - NRC ilişkisi	196
Şekil 4.90. Kalınlığı 3 cm olan normal harçların porozite - NRC ilişkisi	196
Şekil 4.91. Kalınlığı 3 cm olan köpük betonların porozite - NRC ilişkisi	197

Şekil 4.92. Kalınlığı 5 cm olan normal harçların porozite - NRC ilişkisi	197
Şekil 4.93. Kalınlığı 5 cm olan köpük betonların porozite - NRC ilişkisi	198
Şekil 4.94. H-K-R karışım kodlu numunenin SEM analizi (a)1000× büyütme, (b) 2000× büyütme, (c) 5000× büyütme.....	199
Şekil 4.95. H-K-KL karışım kodlu numunenin SEM analizi (a)1000× büyütme, (b) 2500× büyütme, (c) 5000× büyütme.....	199
Şekil 4.96. F-K-R karışım kodlu numunenin SEM analizi (a)1000× büyütme, (b) 2500× büyütme, (c) 5000× büyütme.....	200
Şekil 4.97. F-KAU karışım kodlu numunenin SEM analizi(a)120× büyütme, (b) 250× büyütme.....	201
Şekil 4.98. F-KAU karışım kodlu numunenin SEM analizi (c) 2500× büyütme, (d) 5000× büyütme.....	201
Şekil 4.99. F-KAU-KL karışım kodlu numunenin SEM analizi (a)120x büyütme, (b) 500× büyütme.....	202
Şekil 4.100. F-KAU-KL karışım kodlu numunenin SEM analizi (c) 2500x büyütme, (d) 5000× büyütme.....	203
Şekil 4.101. Çimentonun X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi.....	204
Şekil 4.102. Kırma kum agregasının X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi.....	204
Şekil 4.103. Genleştirilmiş kil agregasının X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi.....	205
Şekil 4.104. Pomza agregasının X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi.....	205
Şekil 4.105. Genleştirilmiş vermikülit agregasının X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi.....	206
Şekil 4.106. Kauçuk atığı agregasının X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi.....	206

RESİMLER LİSTESİ

<u>Resim</u>	<u>Sayfa</u>
Resim 3.1. Kırma kum agregası.....	81
Resim 3.2. Genleştirilmiş kil agregası.....	82
Resim 3.3. Pomza agregası.....	83
Resim 3.4. Genleştirilmiş vermikülit agregası.....	84
Resim 3.5. Kauçuk agregası.....	85
Resim 3.6. Çalışmada kullanılan keten lif.....	86
Resim 3.7. Normal harç numunelerinin üretim aşaması.....	88
Resim 3.8. Taze harcın kalıplara yerleştirilmesi.....	89
Resim 3.9. Normal harç numunelerin kalıptan çıkarıldıktan sonraki durumu.....	89
Resim 3.10. Numunelerin standart küre bırakılması.....	90
Resim 3.11. Köpük solüsyonu.....	91
Resim 3.12. Köpük beton numunelerin üretim aşaması.....	91
Resim 3.13. Taze birim hacim ağırlık deney.....	92
Resim 3.14. Yayılma tablası deney aşaması.....	93
Resim 3.15. Yayılma tablası deneyi.....	93
Resim 3.16. Marsh konisi – akışkanlık deneyi.....	95
Resim 3.17. Arşimet, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri için üretilen numuneler.....	96
Resim 3.18. Arşimet deneyi.....	96
Resim 3.19. Numunelerin etüvdeki durumu.....	97
Resim 3.20. Kılcal su emme deneyi için üretilen numunelerin hazırlanması ve kılcal su emme deneyinin yapılması.....	98
Resim 3.21. Ultrases geçiş hızı deneyi.....	99
Resim 3.22. Eğilme dayanımı deneyi.....	101
Resim 3.23. Basınç dayanımı deneyi.....	102
Resim 3.24. Yarmada çekme dayanımı deneyi için üretilen numuneler.....	104
Resim 3.25. Yarmada çekme dayanımı deneyi.....	105
Resim 3.26. Yarma dayanımı deneyi sonrası numunenin görünümü.....	105

Sayfa

Resim 3.27. Elastisite modülü deneyi için üretilen numuneler.....	106
Resim 3.28. Elastisite modülü deneyi.....	106
Resim 3.29. Isıl iletkenlik deneyi için üretilen numuneler.....	107
Resim 3.30. Isıl iletkenlik deneyi.....	108
Resim 3.31. Çalışmada kullanılan yüksek ve düşük frekans için ses yutum katsayısı ölçüm tüpleri.....	108
Resim 3.32. Yüksek ve düşük frekans için farklı kalınlıklarda numuneler.....	109
Resim 3.33. Yüksek ve düşük frekans için numune çapları.....	110
Resim 3.34. Ses yutum katsayısı deneyi için numunelerin hazırlanması.....	110
Resim 3.35. Numunelerin empedans tüpü içerisine yerleştirilmesi ve ses yutum katsayısı deneyi.....	111
Resim 3.36. SEM analizi deneyi için numunelerin hazırlanma aşaması ve SEM analizi deneyinin yapılması.....	113

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklamalar
C	: Sesin Hızı
cm³	: Santimetreküp
d	: Lif Çapı
db	: Desibel
E	: Elastisite Modülü
f	: Frekansı
f_{ct}	: Yarmada Çekme Dayanımı
GPa	: Gigapascal
gr	: Gram
Hz	: Hertz
kg	: Kilogram
L	: Lif Boyu
MPa	: Megapascal
N	: Newton
m²	: Metrekare
m³	: Metreküp
T	: Periyot
W	: Kuru Birim Hacim Ağırlık
μs	: Mikro saniye
α	: Ses Yutum Katsayısı
α_w	: Ağırlıklı Ses Yutum Katsayısı
σ_b	: Basınç Dayanımı
σ_e	: Eğilme Dayanımı
λ	: Dalga Boyu
Kısaltmalar	Açıklamalar
ASTM	: Amerikan Malzeme Testleri Birliği
CRC	: Kırıntı Kauçuklu Betonun
ECC	: Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozit
EN	: Avrupa Normu
EPS	: Genleştirilmiş Polistren
F	: Köpük Beton

GK	: Genleştirilmiş Kil
GV	: Genleştirilmiş Vermikülit
H	: Normal Harç
KAU	: Kauçuk
K	: Kırma Kum
KL	: Keten Lif
LC	: Hafif Beton
LVDT	: Deplasman Ölçer, Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatörü
NRC	: Gürültü Azaltım Katsayısı
P	: Pomza
PP	: Polipropilen
P	: Polivinilalkol
R	: Referans
SAA	: Ses Emilim Ortalaması
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
S/Ç	: Su/Çimento
TS	: Türk Standartları
V/Ç	: Vermikülit/Çimento
W	: Kuru Birim Ağırlık
XRD	: X-Işını Kırınım Yöntemi

1. GİRİŞ

İnsan varlığıyla beraber atık oluşmaya ve zamanla atık oluşumu hız kazanmaya başlamıştır (Üçgül, 2015). Doğal ve yapay birçok atık oluşumu vardır. Atıklardan doğal olanları çevre açısından önemli bir sorun oluşturmamasına rağmen ekonomik yönden büyük kayıplara neden olmaktadır. Yapay esaslı olan atıklar ise doğada uzun süre ayrışamamaları ve giderek azalan petrol kaynaklarından üretilmeleri sebebi ile çevre açısından da ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Altun, 2010). Ülkelerin genelinde doğal çevrenin korunması ile ilgili yasal düzenlemeler ve denetimler yapılmaktadır (Demir, 2010). Bu sebeple günümüzün en büyük sorunlarından biri atığın kontrolü ve yönetimi oluşturmaktır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2005).

İnşaat sektörü doğal kaynakların genellikle kullanıldığı sektörlerin başında gelmektedir. Elde edilen verilere göre, inşaat sektöründe kullanılan ham maddenin %50'si doğadan sağlandığından bu tüketimin doğaya ciddi boyutta zararı olmaktadır. Bununla birlikte hem ülkemizde hem de Dünya'da enerji kaynaklarının ve doğal kaynakların hızla tüketilmesinden dolayı inşaat sektöründen geriye kalan atıkların geri kazanımı hem çevre sağlığı hem de ülke ekonomisinde önemli bir rol oynamaktadır (Oikonomou, 2005).

Kompozit bir yapı malzemesi olan betonun üretiminde kullanılan malzemenin büyük çoğunluğunu agregalar oluşturmaktadır. Taşıyıcı betonlarda en gerekli ve en önemli bileşen agregalardır. Agregaların rezervlerinde yaşanacak bir kıtlık beton üretimini daha maliyetli ve daha zahmetli hale gelmesine sağlamaktadır. Bu durum alternatif arayışların olmasına neden olmuştur. Sürdürülebilir bir dünya için gerek çevresel gerek de ülke ekonomisi açısından oldukça önemli bir kazanım olduğundan geri dönüşüm agregalarının değerlendirilmesi günümüzde ön plana çıkmaktadır (Jordeva vd., 2015; Demirel vd., 2015, Briga-Sa vd., 2013; Konuk, 2003).

Atıkların değerlendirilmesi konusunda dikkat çeken diğer bir önemli husus ise ülkemizde genellikle atıkların katma değeri düşük ürünlerde kullanılması ve önemli bir bölümünün de değerlendirilmeden atılmasıdır (Altun, 2010).

Ülkemiz, otomotiv ve yan sanayi sektörlerinde dünyada önde gelen ülkelerdendir.

Uluslararası lastik markaları, araştırma, geliştirme ve imalat faaliyetlerini ülkemizde de sürdürmektedir. Dünya genelinde karayolu ulaşımının ana sarf malzemelerinden olan tonlarca araç lastiği hizmet ömürlerini tamamlayarak doğaya atık malzeme olarak bırakılmaktadır. Bu durum otomotiv endüstrisinin dünya ekonomisindeki yerinin her geçen yıl artmasının dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır (MEB, 2011; Yeşilata vd., 2007).

Taşıtlardan ortaya çıkan büyük miktardaki hizmet ömrünü tamamlamış taşıt lastikleri çevreyi ve insan sağlığını tehdit etmektedir. Ayrıca lastiklerin kimyasal yapısının karmaşık olmasından dolayı doğada geri dönüşümleri çok uzun zaman almaktadır. Atık lastikleri geri dönüştürmenin en etkili yöntemlerinden biri beton ve çimento sektöründe tekrar kullanmaktır. Atık lastiklerin birim hacim ağırlığının düşük olması, yüksek tokluk, yalıtım gibi üstün özellikleri sayesinde beton ve asfalt içerisinde agrega olarak da kullanılabilir. Bunun yanı sıra atık lastikler; erozyon kontrolü, bataklık ıslahı, anayollarda gürültü bariyeri, sıcak karışım asfalt kaplamalarında modifiye malzeme, yol dolgularında kaplama alt malzemesi, binalarda sismik izolatör ve yürüyüş yollarında gibi kullanım olanakları bulunmaktadır. Atık malzemelerin geri kullanımı açısından çok büyük bir potansiyele sahip olan inşaat sektöründe atık lastiğin kullanım alanlarının artırılıp yaygınlaştırılmasıyla; çevrenin korunması, ekonomi alanında verimlilik ve sürdürülebilirlik gibi faydalar sağlanmaktadır (Koçak ve Alparslan, 2011).

Yapı sektöründe son yıllarda fosil kaynakların hızlı tükenmesiyle enerjinin verimli kullanılmasının önemi artmıştır. Enerji verimliliğini inşaat sektöründe sağlamak amacıyla yalıtım malzemelerinin kullanımı gerekli hale gelmiştir. Ancak yalıtım malzemelerinin üretimi ve kullanımı sonrasında çevreye olan olumsuz etkileri ve üretimi sırasında kullanılan enerjinin verimliliği araştırılmalıdır. Çünkü yalıtımın diğer dolaylı hedefi de daha az enerji kullanarak daha iyi konfor koşulları oluşturmak ve çevreye salınan emisyonları da en aza indirerek ekolojik dengenin korunmasına katkıda bulunmaktır (Balo, 2017).

Gözenekli ve hafif malzemelerin farklı alanlarda kullanımı giderek yaygınlaşmaya başlamıştır. Kimyasal bileşimleri ve yapısal formları sebebiyle genellikle inşaat yapı sektöründe, hafif yapı elemanların imalinde kullanım alanı bulmuştur. (Gündüz vd., 2006). Isı, ses ve elektriksel yalıtım özelliklerine sahip olan malzemelerin pazardaki yeri gittikçe artmaktadır. Beton içerisinde hava sürüklenmesi yoluyla elde edilen hafif ve yalıtım özelliğine

sahip köpük betonlara duyulan ihtiyaç, yapı etkiyen yüklerin azaltılması ve daha yalıtımlı binaların inşası için giderek artmaktadır (Konuk, 2003).

Teknolojinin gelişmesi sonucunda çeşitli amaçlara yönelik birçok malzemenin üretimi hız kazanmıştır. Üretimin artması doğal kaynakların gittikçe azalmasına sebep olurken bazı endüstriyel atıkların değerlendirilmesini ve bunların doğal hammaddelere alternatif olmasında yeni fikirlerin ortaya çıkmasını da sağlamıştır. Avrupa ve ABD’de kompozit malzeme üretiminde endüstriyel, organik ve inorganik atıkların inşaat sektöründe kullanılmasıyla ilgili birçok çalışma yapıyorken ülkemizde bu alandaki çalışmalar oldukça yetersizdir. Bu çalışma ile doğal ve atık malzemelerin birlikte kullanılmasının çimento esaslı kompozitlerin ses yutum ve ısıl iletkenlik özelliklerine etkisi konusu ile özgün bir çalışma literatüre kazandırılacak, sürdürülebilir çevre dostu malzemelerin kullanımını teşvik ederek yeni çalışmalara ışık tutacaktır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Çimento esaslı kompozitler 2000’li yılların başında Michigan Üniversitesi’nde bulunmuştur. “Engineered Cementitious Composites” (tasarlanmış çimento bazlı kompozitler – ECC) ismiyle patenti alınmıştır.

Çimento esaslı kompozitler tüm dünyada sıklıkla kullanılan bir yapı malzemesidir. Bununla birlikte, yapının hizmet ömrünün başlangıcından itibaren bu malzemelerde bozulmaların olması kaçınılmazdır. Dolayısıyla çevresel etkiler sonucunda bozulan çimento esaslı kompozitlerin kendiliğinden iyileşmesi önemlidir. Çimento esaslı kompozitlerde kendiliğinden iyileşmesi birçok araştırmacı tarafından uzun süredir incelenen bir durumdur (Kına ve Türk, 2017).

Beton; agrega, çimento, su ve gerekli olması halinde katkı malzemesinden meydana gelen, belirli karışım oranlarına göre düzenlenen, belirlenen karışım oranında ve belirlenen boyutta kalıplar içerisine gözeneksiz olacak şekilde yerleştirme ve uygun kütleme ile sertleştirilerek elde edilen kompozit malzeme olarak tanımlanabilir. (Kocataşkın, 1991).

Beton ve harçların yapı malzemesi olarak kullanılması eski yıllara dayanmaktadır. Bağlayıcı malzeme kullanılarak hazırlanan ilk yapı malzemelerinden olan kerpiç dünyada pek çok ülkede ve ülkemizde de halihazırda kullanımı olan bir yapı malzemesidir. Kerpiçin kullanılmasından sonra alçı ve kireç gibi bağlayıcı malzemelerin üretilmesi ile birlikte, Eski Mısır’da alçının, Eski Roma’da kireç ve puzolanların, ilerleyen süreçlerde ise Avrupa’da grapye ve su kirecinin harç yapımında kullanıldığı görülmüştür. Anadolu ve çevresinde kullanılan kireç esaslı ve taneli bir kompozit malzeme olan Horasan harcı da yüzyıllar boyu kullanılmıştır. Betonun tarihçesi Eski Roma Dönemi’ne kadar uzanmaktadır. Romalılar tarafından volkanik küller, kireç ve tüfler kullanarak, havada ve suda katılaşabilen hidrolik kireç ve agregayla beton diye tanımlanan malzemeler yapılmıştır. “Opus caementicium” adı verilen ve puzolanik ile kireç malzemelerinin karışımının bağlayıcı olarak kullanıldığı malzeme, yapıların ve yolların inşasında kullanılmıştır.

Gerçek anlamda betonla ilgili çalışmalar 19. yüzyılın başlarında yapılmıştır. Çimento ile ilgili çalışmaların araştırılıp, geliştirilmesi ve 1824’te Portland Çimentosunun imal edilip, patentinin alınması bu alandaki çalışmaların dönüm noktasını oluşturmaktadır. Beton teknolojisinin gelişmesiyle, yüksek dayanımlı hafif agregalar üretilmeye başlanmış olup, bu

hafif agregalar kullanılarak üretilen malzemeler hafifleştirilmiştir. Bunun sonucunda hafif betonarme yapıların yapılmasına olanak sağlanmıştır.

İlk zamanlardan beri insanlar hassas olan gevrek malzemelerin içine hayvansal veya bitkisel esaslı lifler ilave ederek gevrek özelliklerini iyileştirmeye çalışmışlardır. Bu konudaki en iyi örneklerden biri kerpiçtir. Kerpicin üretim aşamasında killi çamur içerisine ilave edilen saman gibi bitkisel esaslı lifler malzemenin hem üretim hem de kullanımı esnasındaki dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Liflerle donatılı kompozit malzemelerden en yaygın kullanım cam lifleri ile donatılı polyester ve asbest lifleri ile donatılı çimento kompozitler olmuştur.

M.Ö. 90-20 yılları arasında yaşadığı öngörülen Vitruvius “Mimarlık Üzerine On Kitap” adlı eserinden ve 18. Hanedan Devri’nden kalan, değişik kalınlıklarda ve renklerde cam lifleri ile donatılan amforaların mevcut olmasından M.Ö. 1600 yıllarında Mısır’da narin formda cam liflerinin üretiminin bilinmesiyle, kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan liflere ilişkin uygulamaların da yeni olmadığı görülmüştür.

İlk zamanlardan beri insanlar hassas olan gevrek malzemelerin içine hayvansal veya bitkisel esaslı lifler ilave ederek gevrek özelliklerini iyileştirmeye çalışmışlardır. Bu konudaki en iyi örneklerden biri kerpiçtir. Kerpicin üretim aşamasında killi çamur içerisine ilave edilen saman gibi bitkisel esaslı lifler malzemenin hem üretim hem de kullanımı esnasındaki dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Liflerle donatılı kompozit malzemelerden en yaygın kullanım cam lifleri ile donatılı polyester ve asbest lifleri ile donatılı çimento kompozitler olmuştur.

Lif takviyeli çimento esaslı kompozitler, kompozit malzemelerin büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. Her malzeme olumlu ve olumsuz birçok özelliğe sahiptir. Kompozit malzeme imali, malzemelerin olumsuz yanlarının geliştirilmesi ve bununla birlikte kullanım alanlarının yaygınlaştırılması, çok yönlü kullanımın sağlanması açısından önemli bir aşamayı oluşturmaktadır (Ersoy, 2001).

2.1. Çimento Esaslı Kompozitler ve Özellikleri

Çimento esaslı kompozit malzemelerin toklukları ve çekme dayanımları düşüktür. Günümüzde çimento matrisini lifler ile güçlendirmek bu özellikleri iyileştirmek için yaygın

olarak kullanılan bir uygulamadır. Liflerin çimento matrisi içindeki görevi, çatlak gelişimini engellemek veya geciktirmektir. Çatlağın kontrolsüz ve hızlı ilerleyişinin kontrollü ve yavaş olması ile çelik lif takviyeli betonlarda gevrek kırılma davranışı gösteren normal betonlardaki ani göçme riski azalmaktadır. Bununla birlikte lif takviyesi malzemenin hizmet ömrünü uzatır, termal şok dayanımı iyileşir ve daha küçük kesitler ile daha fazla üretim elde edilebilir (Özyurt, 2000).

Şekil değiştirme sertleşmesi gösteren lif donatılı çimento esaslı kompozitler, birçok özellik açısından orta ve yüksek dayanımlı betonlara benzer özellikler göstermektedir. Fakat bu kompozit malzemenin çekme şekil değiştirme kapasitesi %3 ile %5 aralığında değişmekte olup, bu oran çimento esaslı bir malzeme için oldukça yüksek bir değerdir (Mondal vd., 2010). Bu değer, normal ve lif donatılı betonun çekme-şekil değiştirme kapasitesinin yaklaşık olarak 300 ile 500 katına denk gelmektedir (Gaitero vd., 2010).

Lifler uzunluğu, esnekliği, dayanıklılığı ve bükülebilirliği olan doğal kaynaklardan veya yapay yollardan elde edilen malzemelerdir. Diğer bir deyişle lif, bir kesiti, bu kesitine dik olan diğer kesitine oranla çok daha büyük olan her türlü malzemedir. Hayvan, bitki ve mineral gibi doğal kaynaklardan elde edildiği şekliyle kullanılabilir olan liflere ‘doğal lifler’ denir. ‘Yapay lifler’ ise beklenen belli özellikleri taşıyacak şekilde dizayn edilen ve bu amaçla üretilen malzemelerdir. (Acun, 2000). Lifler malzemelerin en geliştirilmiş formudur; elastisite modülleri ve dayanımları genellikle aynı malzemenin büyük hacimli formlarına kıyasla çok daha fazladır. Kerpiç yapımında, kil hamuruyla birlikte samanın; alçı sıva ve kartonpiyer işlerinde, keten ve kenevir liflerinin ve hayvansal liflerden keçi kılı, kıtık ve at kuyruğu kullanıldığı görülmüştür (Ersoy, 2001). Portland çimentosu ile ahşap, akwara, hindistan cevizi, flax, jüt, bambu gibi diğer doğal lifler de kullanılmaktadır (Shah ve Balaguru, 1992). İnsanlar tarafından üretilen lifler ilk defa 19. yüzyılın sonunda ortaya çıkmasına rağmen, yapay liflerin geçmişi altmış yıl kadardır. Bunun yanı sıra özellikleri nedeniyle kısa zamanda vazgeçilmez bir malzeme haline gelmişlerdir (Chawla, 1998).

Lifler betonun eğilme dayanımını ve tokluğunu artırabilmektedir. Polipropilen lifler betonun tokluğunu önemli derecede artırırken çekme dayanımına çok az etki etmektedir. Bunun yanı sıra cam ve polipropilen lifleri birlikte kullanarak yüksek tokluk ve çekme dayanımı özelliğine sahip olan betonlar üretilebilmektedir. Cyr (2004), karma lif takviyeli kompozit malzemeler üzerine yaptığı bir çalışmada polipropilen, polivinilalkol (PVA) ve cam

lifleri birlikte kullanarak daha yüksek tokluk, çekme ve eğilme dayanımı özelliğine sahip olan betonlar üretmiştir.

2.1.2. Çimento Esaslı Kompozitlerin Kullanım Alanları

Genellikle depreme dayanıklı yapılar, yangına dayanıklı yapılar, askeri güvenlik yapıları, beton yol üst yapıları, su yapıları, endüstriyel döşemeler, püskürtme beton uygulamaları, tünel kaplamaları ve şev stabilitesi, hava alanı kaplama betonları, liman kaplamaları, beton borular, prekast elemanlarda kullanılmaktadır (Vural, 1998).

2.2. Hafif Betonlar ve Özellikleri

20. yüzyılda hafif agreganın betonda kullanımı, yük gemileri ile başlamıştır. N. K. Fougner (1917) tarafından tasarlanan 25 m boyundaki ilk beton tekne 1917 yılında Norveç’de denize indirilmiştir. ABD’de de savaş koşullarında çelik yokluğu nedeni ile ticaret gemilerini donatılı betondan üretme fikrini benimsenmiş ve Fougner ile yirmidört gemilik anlaşma yapmıştır. J. Hayde (1918) I. Dünya Savaşı devam ederken, yaptığı araştırmaların neticesinde 1918’de geliştirilmiş şist türü hafif agreganın patentini almıştır. Bu gelişme, doğal hafif agregalara göre istenen üretimde, dane biçiminde ve boyutunda, daha yüksek dayanım elde edilebilen yapay agreganın kullanılması açısından önemli bir dönüm noktası olmuştur. 1917-1920 yılları arasında normal agregalı yapılarda beton basınç dayanımı 17 MPa çıkarken, üretilen donatılı beton gemiler 1760 kg/m^3 yoğunluğa, 38 MPa basınç dayanımına (Ries et.al., 2010) ve 23 GPa elastisite modülüne sahiptir. Daha sonra betondan alınan karotlarda dayanımın 60 MPa’a kadar ulaştığı görülmüştür. Bu gemiler ile sadece yük değil aynı zamanda petrol taşımacılığı da yapılmış ve betona herhangi bir zararı görülmemiştir (Fiorato, 1981). Bununla birlikte savaş döneminde, bir geminin uç kısmına isabet eden bombanın betonun kompakt iç yapısı sebebiyle kalıcı bir hasara neden olmadığı görülmüştür. Sonrasında bazı gemilerden dalgakıran olarak da yararlanılmıştır.

1920’lerden günümüze ABD, 1960’lardan itibaren SSCB ve Polonya’da çok sayıda köprü tabliyesinde yapay hafif agregalı beton kullanılmıştır (Castrodale, 2006).

ACI 213-03’ e göre geliştirilmiş kil, cüruf, uçucu kül, şist, arduvaz yapay hafif agrega olarak taşıyıcı hafif beton uygulamalarında kullanılabilir. ASTM C 330’a göre taşıyıcı sistem hafif betonlarda iri hafif agregalar için gevşek kuru birim ağırlık, en fazla 880 kg/m^3 ,

ince hafif agregalar için ise en fazla 1120 kg/m^3 olmalıdır. İri agrega olarak gevşek birim ağırlık; genişletilmiş kil agregası için $700-1050 \text{ kg/m}^3$; genişletilmiş çüruf, şist ve arduvaz agregası için $800-950 \text{ kg/m}^3$ olmaktadır. Maksimum tane boyutu 10-12 mm arasında, çökme değeri 15 cm olarak önerilmektedir (ACI 301-05), ancak çökmenin daha yüksek olduğu uygulamalar da vardır. Nitelikli hafif agregalarda su emme genellikle %15'in altında, (Neville ve Brooks, 2010), genişletilmiş şist ve arduvaz tipi yapay hafif agregalarda ise bu oran %10'un altında çıkmaktadır. Türkiye'de çıkarılan doğal bims iri agregalarında ise, genellikle 24 saatlik bir dilimde su emme % 15'in üzerindedir, bu durum da yüksek basınç dayanımı elde etmeyi zorlaştırır.

Günümüzde insan nüfusunun hızlı artışı ve inşaat alanlarının azalması sebebiyle yüksek katlı yapılara ihtiyaç artmaktadır. Ancak artan betonarme yapılar ve yapıların kat sayılarının yükselmesi başka sorunları da beraberinde getirmektedir. Hafif agregalardan daha ağır olan normal agregalı betonlar ile inşa edilen binalarda, artan ölü yük hem temel için hem de deprem durumlarında bina için ciddi risk oluşturmaktadır. Betonarme yapılarda yapıya etkileyen yükleri azaltmak için ölü yükün çoğunluğunu oluşturan betonun yoğunluğu azaltılmaya çalışılır. Hafif betonun kullanımı yapıdaki bu ölü yükleri azaltılır, taşıyıcı elemanların boyutları küçülerek ve kullanılan donatılar azaltılarak inşaat ve nakliye maliyetleri açısından tasarruf sağlanabilir (Demirel ve Yazıcıoğlu 2010; Serin, vd., 2007; Neville ve Brooks, 1987). Ayrıca daha uzun açıklıklı alanlar oluşturulması ve daha küçük elemanlar gibi yapısal tasarımlarda daha fazla esneklik sağlanmasına izin veren uygulamalara olanak sağlanmış olur (Mo vd., 2016).

Hafif beton üretiminin birçok yöntemi vardır ve bu yöntemlerden biri betonu oluşturan ince malzemeyi çıkarmak, diğeri ise kimyasal karışımlar kullanarak betonun içerisine hava kabarcıkları katmaktır. Beton içinde kontrollü hava kabarcıklarının olduğu betonlar gözenekli veya gaz beton olarak da bilinmektedir. Hafif beton üretiminin en güncel kullanılan yöntemi ise gözenekli olan yapay veya doğal hafif agregalar kullanmaktır (Serin, vd., 2007; Demirboğa vd., 2001; Neville, 1995).

TS EN 206-1 (2002) standardına göre etüvde kuru halde olan hafif betonunun birim hacim ağırlığı 800 kg/m^3 'ten büyük, 2000 kg/m^3 'ten küçük olan beton olarak tanımlanmaktadır (TS EN 206-1, 2002). Amerikan Beton Enstitüsü tarafından yayınlanan ACI 213R-03 standardına göre hava kuru durumda $1120-1960 \text{ kg/m}^3$ arasında birim hacim

ağırlığına sahip olan 28 günlük basınç dayanımı 17 MPa'dan fazla olan betonlara taşıyıcı hafif betonlar denilir (ACI 213R-03, 2003). Alman standardı DIN 1045'e göre ise betonlar birim ağırlıklarına göre üçe ayrılır;

- Hafif betonlar: Birim Ağırlık $<2000 \text{ kg/m}^3$,
- Normal Betonlar: $2000 \text{ kg/m}^3 < \text{Birim Ağırlık} < 2800 \text{ kg/m}^3$,
- Ağır betonlar: Birim Ağırlık $> 2800 \text{ kg/m}^3$

Hafif beton, çimento, su, hafif agreganın karıştırılmasıyla veya direkt olarak katkı olarak gaz veya köpük solüsyonunun katılması ile üretilmektedir. Hafif betonun geleneksel portland çimentosu betonuna göre en önemli avantajı ağırlık azaltmasıdır. Bunun yanı sıra geleneksel betona kıyasla vibratöre gerek duymadan kendi kendine sıkışabilmesi, hafifliği, ısı yalıtım özelliği, düşük maliyet, üretim kolaylığı gibi özelliklerinden dolayı yapı sektöründe tercih edilen önemli beton çeşitlerinden biridir. Normal betonlarda yoğunluğun artması ile ısı iletkenlik kat sayısı ve öz ağırlık da artar. Normal betonun birim ağırlığı azaltılarak betonarme elemanın da ağırlığı azaltılabilir. Betonarme elemanın ağırlığı azaltılınca taşıyıcı sistem elemanlarının kesiti küçültülerek ekonomiklik sağlanabilir. Bununla birlikte betonda birim hacim ağırlığın azalması ile ısı iletkenlik katsayısı düşer. Hafif betonun ısı iletkenliği üretiminde kullanılan agreganın cinsine ve birim ağırlığına bağlıdır (Chica ve Alzate, 2019; Wei, vd., 2014; Taşdemir, 2003).

Badu (2003), farklı boyutta agrega, kum ve silis dumanı kullanarak hafif betonun dayanımını arttırmayı amaçlamıştır. Hafif betona katılan silis dumanı miktarı arttıkça betondaki akışkanlığın, işlenebilirliğin ve basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda hafif betonun yaşı ilerledikçe basınç dayanımının arttığı ve su emmenin oranında ise azalma görülmüştür. Normal agrega çapı büyüdükçe betonun basınç dayanımının arttığı ise basınç dayanımına bir etkisinin olmadığı, işlenebilirliğin azaldığı gözlemlenmiştir.

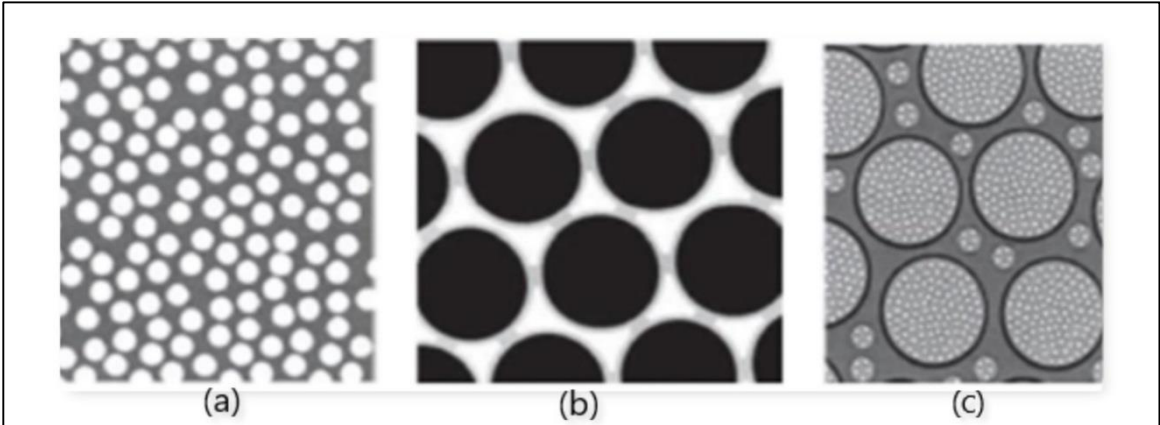
Chi vd., (2003), farklı agrega türü ve çapının hafif betonun dayanımına etkisini araştırmıştır. Çalışmaya göre tüm numunelerde su/çimento arttıkça elastisite modülü ve basınç dayanımında düşüşler ve uçucu kül miktarı arttıkça elastisite modülü ve basınç dayanımında artma elde edilmiştir. Tüm numunelerde agrega çapı arttıkça elastisite modülü ve basınç dayanımında artma meydana geldiği görülmüştür.

Demirboğa ve Gül (2003), tarafından yapılan bir çalışmada pomza ve perlit agregalarının, silis dumanı ve uçucu kül katılması ile hafif betonun ısı iletkenliğine etkisi araştırılmıştır. Kontrol numunelerinde ısı iletkenliği 0.3178 W/m.K elde edilmiştir. Hafif betonda pomza, silis dumanı ve uçucu külün eklenmesi ve miktarının artırılması ile ısı iletkenlik katsayısının yaklaşık %50 düşmesine sebep olduğu ifade edilmiştir.

2.2.1. Hafif Beton Türleri

Hafif betonların çok çeşitli olmasından dolayı farklı birçok sınıflandırma yapılmıştır. Hafif betonlar üretim metotlarına, basınç dayanımlarına ve birim hacim ağırlığına göre sınıflandırılmışlardır (Uygunoğlu, 2008). Hafif betonların üretim metotlarına göre sınıflandırılması;

- Beton veya harç içerisinde hava sürüklenmiş gözenekler oluşturarak, hücreli, köpürtülmüş veya gaz betonu olarak bilinmektedir.
- Karışımdan ince agrega çıkarılarak normal ağırlığa sahip kaba agrega kullanılarak üretilen ince agregasız beton olarak da bilinmektedir.
- Normal ağırlığa sahip agregalar yerine düşük özgül ağırlığı olan hafif agrega kullanarak üretilen beton hafif agrega betonu olarak bilinmektedir.



Şekil 2.1. Üretim metotlarına göre hafif beton türlerinin iç yapı şekilleri, (a) havalandırılmış beton, (b) ince agregasız beton, (c) hafif agregalı beton (Hamad Mohammed ve Hamad, 2014)

Hafif agregalı beton imalinde dayanımları birbirinden farklı olan hafif agregaların kullanılmasından dolayı hafif betonların basınç dayanımları bakımından birçok sınıflandırılması yapılmıştır. Hafif betonlar, yalıtım amacı ile kullanılan düşük dayanımlı betonlar, dolgu amacı ile kullanılan orta dayanımlı hafif betonlar ve betonarme betonu olarak

kullanılan yapısal hafif betonlar olarak üç gruba ayrılmıştır. TS EN 206-1 (2002)'de de hafif betonlar basınç dayanımlarına göre Tablo 2.1'de de görüldüğü gibi 8 MPa'dan 80 MPa'a kadar gruplandırılmışlardır.

Günümüzde teknolojik gelişmelere paralel olarak farklı kimyasal katkıların elde edilmesinde yaşanan önemli gelişmelerle birlikte hafif agregalı yüksek dayanımlı betonlar üretilebilir hale gelmiştir.

TS EN - 206 (2002)'ya göre hafif betonların birim hacim ağırlıklarına göre sınıflandırılması Tablo 2.2'de gösterilmiştir. Bu standarda göre bir betonun birim hacim ağırlığı açısından hafif beton sınıfında olabilmesi için birim hacim ağırlık değerinin 800 kg/m^3 'ten az ve 2000 kg/m^3 'ten fazla olmaması gerekmektedir.

Tablo 2.1. Hafif betonların basınç dayanımlarına göre sınıflandırılması (TS EN 206-1, 2002)

Basınç Dayanımı Sınıfı	En Düşük Karakteristik Dayanımı	
	Silindir, MPa	Küp, MPa
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

Tablo 2.2. Hafif betonların yoğunluklarına göre sınıflandırılması (TS EN 206, 2002)

Hafif Beton	Birim Ağırlık (kg/m ³)
Yalıtım Betonları	300 kg/m ³ - 800 kg/m ³
Orta Mukavemetli Hafif Betonlar	800 kg/m ³ - 1400 kg/m ³
Taşıyıcı Hafif Betonlar	> 1400 kg/m ³

Tablo 2.3. Hafif betonların sınıflandırılması (Mindess ve Young, 1981)

	Yalıtım Betonları			Orta Dayanımlı Betonlar		Taşıyıcı Hafif Betonlar		
Birim Ağırlık (kg/m ³)	250	500	750	1000	1250	1250	1750	2000
Dayanım Aralığı	0.7 - 2.0 MPa			7 - 14 MPa		17 - 41 MPa		
Agrega Tipi	Vermikülit			Pomza		Sinterleşmiş uçucu kül		
	Perlit			Volkanik cüruf		Genleştirilmiş kil veya şist		
	Gaz ve köpük betonlar					Genleştirilmiş cüruf		
Diğer Hafif Betonlar				Kumsuz beton (hafif beton)		Kumsuz beton (Normal beton)		

800 ile 1400 kg/m³ arasında birim hacim ağırlığına sahip, basınç dayanımları 10 MPa'dan düşük olan hafif betonlar, yalıtım betonu; 1400 ile 1600 kg/m³ arasında birim hacim ağırlığı ve basınç dayanımları 16 MPa'a kadar olan yarı taşıyıcı hafif beton; birim hacim ağırlığı 1600 ile 1900 kg/m³ arasında ve basınç dayanımları da 17 MPa'dan daha fazla olan taşıyıcı hafif betonlar veya yapısal hafif beton olarak sınıflandırılmaktadır (Şimşek, 2004).

Hafif betonun gözeneklerinde havadaki ses enerjisinin ısıya dönüşmesi ile ses absorblama özelliğinin normal betona kıyasla iki kat daha iyi olduğu ifade edilmiştir. Betonun birim ağırlığının azalması ile ses yutum özelliğinin geliştiği ifade edilmiştir (Neville, 1975).

2.2.2. Hafif Betonların Kullanım Alanları

Hafif betonun standart betona kıyasla birim ağırlığının ve ısıl iletkenlik katsayısının daha düşük olması ve ses yalıtımı sağlaması öne çıkan özelliklerindedir (Türkel ve Kadiroğlu, 2007). Hafif agregalı betonla hazırlanan blok elemanlar, üstün özellikleri nedeniyle geleneksel betonların yerine alternatif bir malzeme olarak birçok mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır (Cavaleri vd., 2003).

Hafif betonun kullanımıyla prefabrik bölümlerin taşınması ve daha hızlı montajı yapılabilmektedir. Bunun yanı sıra kullanılan kalıp miktarı azaltılabilmektedir. Genellikle yüksek performanslı ve ağır olan geleneksel betonlara kıyasla daha iyi kesme ve zımbalama mukavemeti özelliklerine sahip olması ayrıca ekonomik olmasının yanı sıra daha az iş gücüne ile elde kolayca elde edilmesi de diğer avantajlarından (Anonim, 2018d; İsmail vd., 2004).

Hafif betonda kullanılan karma su miktarı önemlidir. Harç karışımlarındaki agregaların çimento hamurundan sıyrılarak segregasyon olayının yaşanması ve homojen karışmanın sağlanabilmesi için geleneksel betona göre karışım süresinin daha fazla zaman alması gibi olumsuz etkileri de bulunmaktadır (İsmail vd., 2004). Taşıyıcı hafif beton üretiminde doğal hafif agregaların kullanımı yüksek oranda çimento gerektirir. Bu durum da maliyetini artırırken ve beton içerisinde ayrışma problemlerine de sebebiyet verir (Al-Khaiat ve Haque, 1998).

2.3. Hafif Agregalar

2.3.1. Genleştirilmiş Kil

Genleştirilmiş kil agregası çok az kireç içeren veya hiç kireç içermeyen özel plastik kilden üretilir. Elde edilme sürecinde önce kil kurutulur, ısıtılır ve ani olarak döner fırınlarda 1000°C - 1300°C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmalarıyla, kimyasal yapılarında mevcut olan gazlar açığa çıkarak içi gaz dolu gözenekler oluşmaktadır (Rashad, 2018). Bu nedenle hacimleri 1.5 kattan 6 kata kadar artabilmektedir. Ani sıcaklık etkisi ile sinterlenmiş sert bir dış kabuk oluşmaktadır. Kil çamuruna kok kömürü, kireç ve mazot gibi maddeler eklenerek genleştirme artırılabilir (Devecioğlu, 2012).

Genleştirilmiş kil agregası yüksek sıcaklık fırınının dairesel hareketi nedeniyle yuvarlak şekilli düzgün bir gözenek yapısına sahip gözenekli seramik bir üründür. Genleştirilmiş kil agregasındaki çok sayıda küçük, hava dolu boşluk, hafif, ısı ve ses izolasyonunu sağlar. Yapılan çalışmada, geleneksel çimentolu malzemelerde ve inorganik polimerlerde (jeopolimerler) Genleştirilmiş kil agregasının yapı malzemelerinin bir parçası olarak kullanılması incelenmiştir. Genleştirilmiş kil agregasının matrise katılması, işlenebilirliğini arttırmış, yoğunluğu azaltmış, mekanik mukavemeti azaltmış, donma / çözülme direncini arttırmış, su emilimini arttırmış, klorür penetrasyon direncini düşürmüştür, ancak ısı yalıtımını ve yangın yalıtımını arttırmıştır (Rashad, 2018).

Agrega olarak kullanılan genleştirilmiş kil agregasının tane çapı ve betondaki miktarının artmasıyla üretilen numunelerin yoğunluk ve ısı iletkenlik katsayısı değerlerinin azaldığı ve özgül ısı değerlerinin ise arttığı gözlemlenmiştir. Isı iletkenlik katsayısı 0.459 W/m.K – 0.222 W/m.K, özgül ısı kapasiteleri 867 J/kg.K - 2254 J/kg.K, yoğunluk 1810 kg/m³ - 531 kg/m³ ve ısı yayılma katsayıları ise 2.92×10^{-7} – 1.86×10^{-7} m²/s olarak elde edilmiştir. Birçok yapı malzemesi ile karşılaştırıldıklarında, genleştirilmiş kil agregası kullanılarak üretilen betonların ısı iletim katsayılarının çok düşük olduğu ifade edilmiştir (Devecioğlu ve Biçer; 2012).

Ruiperez vd. (2018), yaptıkları bir araştırmada hafif duvar harçları elde etmek için genleştirilmiş kil ile birlikte farklı oranlarda geri dönüştürülmüş agregaları kullanarak

dayanıklılık üzerindeki etkisi incelenmiştir. Termal şok, salin çözeltisi, donma ve çözülme, SO₂ direnci ve karbonatlaşma gibi hızlandırılmış yaşlanma testlerinden sonra dış görünüşte önemli değişikliklerin olmadığı görülmüştür. Numunenin dış yüzeylerinde pullanma, çatlama, yarıma veya kırılma gözlenmemiştir. Bu nedenle, test edilen duvar harçlarının, uluslararası standartlara göre dış iklim ortamlarına maruz kaldığında tüm durumlarda iyi performans gösterdiği teyit edilmiştir. Atık agregalarının kullanılmanın daha sürdürülebilir bir çevre için iyi bir yöntem olduğu ifade edilmiştir.

Borges vd. (2018), Son yıllarda, daha yüksek termal verimliliğe sahip yeni kaplama türlerine ihtiyaç duyulduğunu ifade etmişlerdir. Farklı içeriklere sahip uçucu kül ve geliştirilmiş kil agregası kullanarak üretilen çimento esaslı kaplama harcının (sıva) fiziksel ve mekanik performansını incelemişlerdir. Çimento ve agrega içeriğinin azalması ısı iletkenliğinin ve mekanik özelliklerin azalmasına yol açmıştır. Isı iletkenlik özelliğinin iyileştiği gözlemlenmiştir.

Serin vd. (2012), tarafından yapılan çalışmada agrega kırma taş kullanılarak üretilen asfalt beton ve yapay geliştirilmiş kil agregası ile üretilen hafif asfalt beton numuneler karşılaştırılmıştır. Geliştirilmiş kil agregasının bisiklet yolları, park, bahçe, gezi yolları gibi hafif kaplamanın ihtiyaç duyulduğu motorlu taşıt trafiğinin çok daha az olduğu alanlarda kullanılabilmesi görülmüştür. Ayrıca geliştirilmiş kil agregasının dolgu malzemesi olarak kullanıldığında stabilitenin daha fazla olacağı ifade edilmiştir.

Genleştirilmiş kil agregası kullanarak yoğunluğu 1.7 kg/m³, basınç dayanımı 41,27 MPa olan taşıyıcı hafif betonla yapı ağırlığı azaltılmış buna bağlı olarak da yapıda depremden dolayı oluşacak hasarın da azaltılabileceği ifade edilmiştir (Subaşı, 2009).

Genleştirilmiş kil agregasının 350, 400, 450 kg/m³ olan üç farklı çimento dozajında üretilen taşıyıcı hafif betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. En yüksek basınç ve yarmada çekme dayanımı değeri 450 kg/m³ çimento dozlu hafif beton karışımlarından elde edilmiştir (Subaşı, 2009).

Genleştirilmiş kil agregası, yapay agrega olarak birçok ülkede imal edilerek piyasaya sunulmaktadır. Genleştirilmiş kil agregasının dayanımı pomza, volkanik tüf ve cüruf gibi doğal agregalara kıyasla daha yüksektir (Lo vd., 2007; Subaşı ve Kap 2009).

2.3.2. Pomza

Pomza, İngilizce’de pumice veya pumicite; İtalyanca’da ponza, olarak isimlendirilmektedir. Türkçe’de ise gözenekli yapısından dolayı sünger taşı, topuk taşı ve hışır taşı gibi yerelde kullanılan isimlerle anılmaktadır (Güner, 1999). Volkanik kökenli bir malzeme olan pomza çok eski yapı malzemelerindedir. Antik Yunan ve Roma dönemlerinde pomza konut inşasında ve amfi tiyatro ve tapınak gibi sanat yapılarında kullanılmıştır (Gündüz ve Şapçı, 2005).

Ham pomza üretiminde ABD, Almanya, Fransa ve İzlanda önde gelen önemli ülkelerdir. Son yıllarda pomza üretimine uzak doğu ülkesi Çin, Endonezya ve Yeni Zelanda, da eklenmiştir (Aslan, 2018). Ülkemiz pomzanın rezervi bakımından; Orta Anadolu ve Doğu Anadolu bölgesinde oldukça fazla rezervleri bulunduğundan (Mouli vd., 2008; Türker ve Kadiroğlu, 2007) değerlendirilebilirlik açısından dünyada önemli bir yere sahiptir (Gündüz ve vd., 2001).

Pomza, Tüm dünyada ve Türkiye’de teknolojik ve farklı endüstri dallarında birçok alanda özellikle inşaat endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir hammadde kaynağı olma özelliği taşımaktadır. Türkiye’de çıkarılan pomzanın neredeyse hepsi ülke içinde inşaat sektöründe kullanılmaktadır (Ceylan, 2019; Koçyiğit, 2016; Öztürk, 2012, Ceylan, 2005).

Pomza volkanik olayların sonucunda ani ve yüksek sıcaklık değişimlerinin etkisi ile iç yapısında hapsolan gazların ani olarak dışarı çıkıp, hızla soğumasından dolayı, makro ve mikro boyutlarda gözeneğe sahip, silikat esaslı amorf yapıda, camsı, süngerimsi görünümü olan, hafif ve doğal bir volkanik kayadır. (Yılmaz, 2017; Türker ve Kadiroğlu, 2007; Özkan ve Twicer, 2011; Uygunoğlu, 2008; Uygunoğlu ve Ünal, 2007, Gündüz, 1998; Sariiz ve Nuhoğlu, 1992). 5-6 Mohrs sertliğe sahip olup, Silis (SiO₂) içeriği %75’in üzerindedir (Yanık, 2007) Pomza %85 oranında boşluklu yapıya sahiptir. Diğer bir deyişle pomza agrega tanesinin %85’ i gözenek, %15’i katı maddeden meydana gelmektedir (Schutter, 2008). Pomzanın tane boyutu arttıkça gözenek oranında artar (Ceylan, 2019).

Pomza, birim hacim ağırlığı 1 g/cm³’ten küçük, bağlantısız birçok gözeneğe sahip, fiziksel ve kimyasal etkilere karşı dayanıklı olan bir kayaç türüdür. Birbiriyle ve bağlantısız kapalı ve yarı kapalı farklı şekillerde gözeneklere sahip olması pomzayı permeabilitesi düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksek kayaçlar yapar (Koçyiğit, 2016; Sariiz ve Nuhoğlu, 1992).

Pomza TS 10088 EN 932-3 standardına göre ise; riyolitik bileşenli, çok fazla boşluğa sahip, camsı lav ve çoğunlukla su yüzeyinde yüzebilecek kadar hafif bir kayaç türü olarak tanımlanmaktadır (TS 10088 EN 9323, 1997). Pomza, volkanik olayların sonucunda asidik karakterli pomza ve bazik karakterli pomza olmak üzere iki guruba ayrılmaktadır (Toklu, 2009). Dünyada Dünyada yaygın olarak asidik karakterli pomzalar kullanılmaktadır. Asidik karakterli pomzanın yoğunluğu yaklaşık 0.5-1 gr/cm³'tür. Si, Al, K ve Na elementlerini içermesinden kaynaklı kirlili ve beyaz bir renge sahiptir. İnşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan asidik karakterli pomzanın silis oranı bazik karakterli pomzaya göre daha fazladır. Bazik karakterli pomza; özgül ağırlığı 1 - 2 gr/cm³, koyu renkte olan pomza türüdür (Gündüz ve Uğur, 2000). Bünyesinde fazlaca alüminyum, kalsiyum, demir ve magnezyum mineralleri bulunması nedeniyle endüstrinin diğer alanlarında da kullanılmaktadır (DPT, 2001; Yılmaz, 2017; Ceylan, 2019).

İnce taneli olan pumisit pomza çimentoda tras malzemesi olarak, iri taneli olan, pumis pomza ise briket üretiminde kullanılmaktadır (Sarıöz ve Nuhoglu, 1992).

Taş unu, tuf veya pomza agregalar katkı malzemesi olarak kullanıldığında diğer hafif agregalar ile üretilen blokların teknik özelliklerini sağladığı ve blok elemanlarından hafif ve daha yüksek dayanıma sahip blok elemanlarının üretilebileceği görülmüştür (Gündüz vd., 2006).

Sancak ve Şimşek (2006), tarafından yapılan bir çalışmada normal ve hafif beton üretilerek karşılaştırılmıştır. Pomza agregası kullanarak üretilen 1,87 g/cm³ yoğunluğuna sahip olan hafif betonlarda 18.51 MPa, 2.44 g/cm³ yoğunluğuna sahip olan normal betonlarda ise 36 MPa basınç dayanım değeri belirlenmiştir. Genleştirilmiş kil agregasıyla (GKA) üretilen hafif betonlar ise pomza agregasıyla üretilen hafif betonlara kıyasla yoğunluk değerinin %10 daha az elde edilmesine karşın basınç dayanımı değerinin %56 daha fazla elde edilmiştir. Normal betonla GKA ile elde edilen hafif beton kıyaslandığında ise %30 daha düşük yoğunluklu benzer dayanım değerine sahip olduğundan GKA ile taşıyıcı hafif beton üretilebileceği ifade edilmiştir.

Kale (2020), tarafından yapılan çalışmada endüstriyel atık olan uçucu kül farklı oranlarda (%1, %3 ve %5) karışıma katılarak hafif beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Uçucu kül oranının artmasıyla betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileşme olmuştur. En iyi sonuçlar %5 uçucu kül oranına sahip olan numunelerde gözlemlenmiştir. İnşaat gibi büyük

bir sektörde ekolojik dengeyi olumsuz etkileyen endüstriyel atıkların kullanılmasının, atıkları sorununu çözmek için iyi bir fırsat olabileceği söylemiştir.

Kılınçarslan vd. tarafından yapılan çalışmada, pomza kökenine göre köpük betonların özellikleri incelenmiştir. Çalışmada Kayseri yöresinden alınan pomzanın, Nevşehir yöresinden alınan pomzaya göre daha iyi ısı iletkenlik ve ses yutumu özelliği gösterdiği ifade edilmiştir (Kılınçarslan vd., 2018).

Pomzanın bünyesinde barındırdığı mineraller ve mikro gözenekler sayesinde karışımda pomza oranının artışının ısı iletim katsayısı değerini azalttığı görülmüştür. Pomza miktarının artışı ile katmanlı yapıda bulunan ufak boyuttaki gözenek miktarı ve silisyum dioksit, demir oksit ve alüminyum oksit, kalsiyum oksit miktarı artmış sonuç olarak katmanlı yapının ısı iletim katsayısı değeri düşmüş ve yapının ısı izolasyonu özelliği iyileşmiştir. Pomzanın boyutunun azalması ile birlikte, katmanlı yapının ısı iletim katsayısı değerinde düşme elde edilmiştir. Bu durumun nedeni olarak katmanlı yapının birim alanındaki pomzanın partikül sayısının artışı olduğu düşünülmektedir. Birim alandaki pomzanın partikül sayısının artması ile birlikte yüzeyin pürüzlülüğünün artmasının numunelerin ısı iletim katsayısının azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca 150 µm boyutunda pomza kullanılan numunelerin hava geçirgenliği 250 µm boyutunda pomza kullanılan numunelerin hava geçirgenliğinden daha fazladır. Hava geçirgenliğinin artışı numune içinde bulunan hava miktarının artmasına neden olduğu ve sonuç olarak numunelerin ısı iletim katsayılarının azaldığı düşünülmektedir. Katmanlı yapılardan ısı iletim katsayısı en küçük olan numunenin ısı izolasyonu özelliğinin en iyi olduğu ifade edilmiştir (Canbolat, 2013).

2.3.3. Genleştirilmiş Vermikülit

Vermikülit genişleme özelliğine sahip, mikanın doğal aşınması ile oluşmuş magnezyum alüminosilikat kil mineralidir. Sulu magnezyum, alüminyum, demir silikat olarak da vermikülitli tarif edilebilmektedir. Vermikülitler yüksek sıcaklıklarda çok hızlı bir ısıtma sistemiyle ısıtıldığında yapısındaki tabakalar arasında bulunan su, buharlaşır tabakalar arasındaki mesafe artarak genişleme olayı ortaya çıkmaktadır. Genleşmiş vermikülit, düşük ısı iletkenlik, yüksek su emme, inertlik, düşük birim ağırlık, iyon değişimi gibi özelliklerinden dolayı yapı ve tarım sektörleri başta olmak üzere birçok alanda kullanılabilir (Ehsani, 2015; Kaya, 2011; Toksoy, 1997).

Vermikülit rezervlerinin büyük bir kısmı Güney Afrika Cumhuriyeti, ABD, Rusya ve Avustralya'da bulunmaktadır. Dünya vermikülit rezervlerinin %50'si ABD'dedir. ABD'den sonra %40'lık oranla Güney Afrika Cumhuriyeti gelmektedir. Bu mineralin endüstride kullanımının artmasıyla birlikte son yıllarda vermikülit üretimi de artmıştır. Üretilen vermikülitin %55'lik kısmı tarımsal üretimde kullanılmakta, %29 kısmı ise inşaat sektöründe yalıtım malzemelerinin üretimi ve yalıtım amaçlı üretilen betonlarda agrega olarak kullanılmaktadır (IRUE; Kaya, 2011). Türkiye'deki vermikülit rezerv miktarının 6 - 7 milyon ton olabileceği öngörülmekle birlikte verimli vermikülit yataklarının yerleri net olarak bilinmemektedir. Bilinen en büyük vermikülit yatağı Sivas-Yıldızeli'nde olup Malatya-Darende-Kuluncak, Eskişehir-Sarıcakaya ve Elazığ-Harput-Arduçluk'da da vermikülit yatakları bulunmaktadır. Ülkemizde bu mineralin; etüt eksikliği, fazla bilinmemesi, araştırılması hususunda gerekli yatırımın yapılmaması nedenlerinden dolayı vermikülit yeterince değerlendirilememektedir. Sivas-Yıldızeli'nde bulunan vermikülit Türkiye'deki diğer bölgelere nazaran daha kaliteli olup iki milyon yedi yüz eli bin tonluk tahmini bir rezerv bulunmaktadır (Toksoy, 1997; Kaya, 2011; Uysal, 2012; Dal, 2014; Ehsani, 2015).

Schackow vd. (2014), yaptıkları çalışmada, hafif agrega olarak vermikülit ve genişletilmiş polistren kullanarak hafif betonun mekanik ve ısıl özellikleri üzerine etkilerini karşılaştırmışlardır. Ürettikleri karışımlara aynı zamanda hava sürükleyici ajan ve süper akışkanlaştırıcı da eklemişlerdir. Vermikülit ve polistren %55 ve %65 oranında hava sürükleyici ajan ve süper akışkanlaştırıcıyı ise sırasıyla %0,5 ve %1,0 oranında kullanarak hafif beton elde etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda hava sürükleyici ajanların eklenmesiyle beton daha da hafif olmuş ancak bununla birlikte daha da az dayanım özelliği sergilemiştir. Genişletilmiş polistrenli numuneler, vermikülit kullanılan numunelere göre daha yüksek dayanım göstermekle beraber daha hafif betonlar elde edilmiştir. Vermikülit bulunan numuneler ise polistren bulunduranlara göre daha düşük termal iletkenlik değerlerine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. En iyi agrega karışım oranı ise %55 olduğunu ortaya koymuşlardır.

Sütçü (2015), genişletilmiş vermikülitin tuğlaların fiziksel ve termal özellikleri üzerine etkisini araştırmıştır. Vermikülit tuğla karışımına ağırlıkça % 2, % 2,5, % 5 ve % 10 oranında eklenerek numuneler 900 ve 1000 °C sıcaklıkta 2 saat pişirme rejimiyle üretilmiştir. Tuğla numunelerinin kimyasal kompozisyonunu, mekanik ve fiziksel özelliklerini incelemiştir. Yaptığı çalışma sonucunda ağırlıkça %10 genişletilmiş vermikülit ilavesinin, numunelerin

kütle yoğunluğunu 1.76'dan 1.34 g/cm³'e düşürdüğünü ifade etmiştir. İlave edilen vermikülit oranının artmasıyla porozite %45'e kadar yükselirken basınç dayanımı 14 MPa'ya kadar düştüğünü gözlemlemiştir. Sütçü vermikülit kullanılmasıyla elde edilen tuğlaların genel standartların altında kalmadan ısı iletkenliği 0.96'dan 0.65 W/m.K düşürdüğünü ifade ederek bu mineralin tuğla üretiminde ısı iletkenliği azaltmak için kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Köksal vd. (2015), silis dumanının ve genişletilmiş vermikülitin beraber kullanılmasının harçlar üzerindeki etkilerini oda koşullarında ve yüksek sıcaklıkta incelemiştir. Vermikülit/çimento oranı (V/Ç) 2, 4, 6 ve 8 olan ve her V/Ç oranı için %0, %5, %10, %15 oranlarında silika dumanını harca ekleyerek numuneler üzerinde araştırma yapmışlardır. Numuneleri 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklıkta 6 saat boyunca ısıya tabi tutmuşlardır. Yaptıkları bu geniş kapsamlı çalışma sonucunda; silika dumanlı karışımların yüksek sıcaklıkta vermikülit ile birlikte kullanılmasıyla hem dayanım hem de durabilite artmıştır. Sertleşmiş haldeki harçların birim ağırlıkları 780 kg/m³ ile 1200 kg/m³ arasında değişmektedir. Numunelerin su emme değerleri % 24.2 ile % 40.6 arasında değişmektedir. Basınç dayanımları ortam sıcaklığında 3.9 MPa 16.4 MPa değişmekte olup termal iletkenlik katsayısının V/Ç oranına bağlı olarak 0.257 W/m.K'e kadar düştüğünü bulmuşlardır. Bu çalışmaları sonucunda genişletilmiş vermikülitin ısı yalıtımını artırmak için iyi bir tercih olabileceğini ifade etmişlerdir.

Hung Mo vd. (2018), çimento harçlarında kum yerine %30 ve %60 oranında genişletilmiş vermikülit ile yer değiştirerek harç özelliklerinin değişimi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çimento harcında vermikülit kullanılmasıyla harcın akışkanlığı arttığını gözlemlemiştir. Vermikülitin gözenek oluşturan yapısıyla çimento harcının porozitesi ve su emme özellikleri artarken yoğunluğu ve basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir. Araştırmacılar harçta vermikülit kullanılmasının her ne kadar ağırlık kaybına ve dayanımı düşürmesine sebep olsa da yangına dayanıklılığı ve ısı iletkenliği olumlu yönde etkilediği sonucuna varmışlardır.

Genleştirilmiş vermikülit, hafif yapı gereçlerinde agrega olarak, binalarda ısı ve ses yalıtımında, soğuk hava depolarının yalıtımında, dekorasyon işlerinde, tavan kubbe kaplamalarında, dökümhane ve benzeri yüksek ısı ile çalışan yerlerde ateşe dayanıklı sıva ve kaplama malzemeleri üretiminde kullanılmaktadır. Ziraat alanında ise toprağın özelliklerini iyileştirmek amacıyla, zirai ilaçlarda ve gübrelerde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Bu kullanım alanlarına göre vermikülit, perlit, pomza, genişlen killer, camyünü, ytong, strafor beton ve köpüklü beton gibi malzemelere bir alternatiftir (Uysal, 2016).

2.3.4. Kauçuk Atığı

Son yıllarda katı atıklar, dünyanın en önemli çevresel sorunlardan biri olarak görülmektedir. Plastik, ucuz, kolay elde edilebilen ve çok yaygın bir kullanım alanı olması sebebiyle, insanlar tarafından en çok tüketilen malzemelerden biridir. Günlük yaşantımızda kullandığımız taşıt lastikleri, su şişeleri, ambalaj malzemeleri, poşetler, ev aletleri gibi birçok malzeme plastikten imal edilmektedir. Plastikler kullanım ömrü sonunda atık olarak doğaya atılmaktadır. Bu atıklar malzemelerden taşıt lastiği önemli bir yere sahiptir. Diğer plastik malzemelerde olduğu gibi taşıt lastiğinin de yok olmasının uzun zamanlarda gerçekleşmesi nedeniyle çevre kirliliği ve insan sağlığı bakımından önemli sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Bu amaçla bu atık malzemenin ekonomiye tekrardan kazandırılması ve yeni kullanım alanlarında değerlendirilmesinin etkili bir yöntem olabileceği düşünülmektedir. Bunun için çimento esaslı malzemelerde katkı olarak kullanılmasının etkili bir yol olduğu düşünülmektedir. Beton yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesine rağmen düşük çekme dayanımı, süneklik, enerji yutma, rötre ve küre bağlı bazı eksik yönleri vardır. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalar betonun bu eksik yönlerinin atık kauçuk kullanımı ile iyileştirilebileceğini göstermiştir (Duygun, 2010; Emiroğlu, 2006).

Matriks yapı içindeki polimer zincirleri ses dalgalarının ısı enerjisine dönüştürebilmek için uygun yapıda olmasından dolayı lastik çok iyi sönümleme özelliğe sahip malzeme olarak bilinmektedir. Lastik içeren kompozitler uçak kabinlerinde, otomotiv döşemeliği için zamb hazırlamada, akustik sönümleme materyallerinde ve denizaltılarında kullanılmaktadır (Sukontasukkul, 2009).

Elektrik kablo atığını geri dönüştürebilmek için beton içerisine hacimsel olarak %5, %10 ve %15 oranlarında atık malzeme agrega ile yer değiştirilerek numuneler üretilmiştir. Beton içerisindeki atık kauçuk agrega oranı arttıkça beton kıvamı, su emme ve aşınma dayanımı artarken, birim ağırlık, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, elastisite modülü ve ultrases geçiş hızı değerlerinde azalma gözlemlenmiştir (Duygun, 2010).

Kurniawan ve Permana (2020), ses emici akustik malzemelerin genellikle pahalı ve yeterli dayanıma sahip olmayan malzemelerden yapıldığını ve boşa harcanan lastikler ve

plastikler kullanılarak üretilen kırıntı kauçuk betondan geliştirilen gözenekli betonun yeni alternatif inşaat malzemelerinden biri olacağını ileri sürmüşlerdir.

Kaewunren ve Meesit (2020), mikro kırıntı kauçuklarının betonun mekanik özelliklerini geliştirme konusu üzerinde çalışmışlardır. İnce agreganın mikro kauçuk parçacıkları ile yer değiştirilmesinin betonun mekanik özelliklerinde bir azalmaya neden olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, kauçuk içeriğinin ve silis dumanının mikro boyutu nedeniyle, kırıntı kauçuklu betonun (CRC) basınç dayanımı 55 MPa üzerinde elde edilmiştir. CRC'nin yarma dayanımı normal betondan yüksek, ancak yine de silis dumanlı betondan daha düşük çıkmıştır. Ayrıca, CRC'ler betonun çatlamasına karşı dayanım sağlamıştır.

Benazzouk ve Douzane (2007, 2008), yaptıkları çalışmada, çimento matrisi içerisine atık lastik ilave ederek hafif inşaat malzemelerinin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmaya göre katkı oranı arttıkça birim ağırlığında ve basınç dayanımında azalma görülmüştür. %50 kırıntı kauçuk ilave edilen numunelerin eğilme dayanımında ise bir azalma görülmüştür.

Baylavlı tarafından yapılan araştırmada, öğütülmüş atık otomobil lastikleri kendiliğinden yerleşen beton karışımına eklenmiştir. Betonun işlenebilirliğini arttırdığı bunun yanı sıra yüksek sıcaklık etkisindeki ve donma-çözülme etkisindeki basınç dayanımlarını düşürdüğü ifade edilmiştir (Bavlavlı, 2008).

Yılmaz ve Değirmenci tarafından 0-0,25, 0,25-0,50 ve 0,50-1,00 mm olarak üç değişik boyutta %10 PÇ (Portland Çimentosu), %70 uçucu kül ve %20 oranlarında atık lastik ile %10 PÇ, %60 uçucu kül ve %30 oranlarında atık lastik kullanılarak üretilen numunelerin 28 ve 56 gün sonundaki eğilme ve basınç dayanım özellikleri incelenmiştir. Elde edilen verilere göre atık lastik oranının artması ile eğilme ve basınç dayanımı değerlerinin azaldığı; tane boyutlarının artması ile doğru orantılı olarak eğilme ve basınç dayanımı değerlerinin arttığı görülmüştür (Yılmaz vd., 2009).

Sanz vd. (2012) lastik artıklarından 20-30 µm çapında lifler elde etmişler ve bu lifleri zeminde yer alan lastiği takviyelendirmek için kullanılmışlardır. Ayrıca bazı numunelerde reçine de kullanılarak lastik liflerin birbirine bağlanması amaçlanmış ve reçinenin ses absorblama üzerine etkisi araştırılmıştır. Reçine kullanımı ile gözeneklilik azalmış, hava

direnci artmış ve titreşim azalmış sonuç olarak ses absorpsiyon katsayısı azalmıştır. Basınç ve kalınlık artışı ile ses absorpsiyon katsayısında azalma görülmüştür. Kalınlığı 2.28 cm, yoğunluğu 441 kg/m³, gözenekliliği 0.0630 ve hava direnci 14543 Pasm² olan örneğin 2000 Hz'de ses absorpsiyon katsayısı 0.99 olarak ölçülmüştür.

Corinaldesi vd. (2011), çalışmasında hem atık kauçuk hem de poliüretan içeren hafif betonun mekanik ve ısı iletkenlik özelliklerini incelemiştir. Farklı harç karışımları kuvars kumu yerine %0, %10 ve %30 oranlarında atık kauçuk ve poliüretanla yer değiştirilerek hazırlanmıştır. Kauçuk parçası ilavesinin taze harç davranışı üzerindeki basınç ve eğilme mukavemeti ile ısı iletkenlik üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Harç karışım oranlarının optimizasyonu dolgu maddesi olarak kireçtaşı tozu eklenerek oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalar, kauçuk parçacıklarının eklenmesinin malzemenin hem birim ağırlığını hem de ısı iletkenliği azalttığı, kireç taşı tozu ilavesi ile daha yüksek ısı iletkenlik, daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı elde edilmiştir.

2.4. Köpük Beton

2.4.1. Köpük Ajanı ve Köpük Beton Üretimi

Köpük betonların ilk patenli ve resmi kullanımı 1920'lerin başlarında olurken Hollanda'da 1970'lerin sonlarına kadar zemin mühendisliği uygulamalarında boşluk doldurmak amacıyla kullanılmıştır (Brady vd., 2001).

Köpük ajanı; düşük yoğunluğa sahip olan hafif beton üretmek amacı ile, vinillik reçeli ve surfaktan maddelerden oluşan koyu ren bir katkı maddesidir. (Akman ve Akçay, 2005). Köpük ajanı, kalsiyum, sodyum ve alkali sülfonatlardan oluşur. Bir sıvının yüzey gerilimini düşüren ve surfaktan moleküllerinden oluşan maddelere sülfonatlar adı verilir. Surfaktan molekülleri hidrofilik baş ve hidrofobik kuyruktan oluşan hava ile suyun birleştiği yerde yoğunlaşırlar. Hava kabarcığı tarafından hidrofilik kısımlar suyun içersindeyken çekilir, hava kabarcığının etrafını sarar ve hava kabarcığını suyun içinde tutar. Ancak suyun dışında bunun tam tersi bir durum olmaktadır. Suyun yüzeyine çıkan kabarcıklar, surfaktan maddeler yüzey gerilimini azalttığı için uzun süre patlamadan kalırlar (Can, 2017).

Köpük ajanı beton karma suyuna ilave edip kuvvetli bir şekilde yüksek hızda karıştırarak köpük solüsyonu üretilmektedir. Karışıma ilave edilen köpük ajanı, betonda birbirinden bağımsız mikro gözenekli hava boşluklarının oluşmasını sağlamaktadır. Bu hava

kabarcıkları, prizini tamamlamış elemanlarda, yaklaşık olarak küresel olan 0.1 ile 1 mm arasında bir çapa sahiptir. Meydana gelen hava boşluklarının harç basıncına karşı çökme eğilimine dayanabilmesi için köpüğün stabil ve kararlı olması gereklidir. Üretilen köpük solüsyonu, çimento, ince agrega ve su ile karıştırılarak birim ağırlığı 400 kg/m^3 - 1800 kg/m^3 olan hafif boşluklu betona köpük beton adı verilir (Chica ve Alzate 2019; Amran vd., 2015; TS EN K 134, 2014; Panesar 2013; Hills vd.,1998).

Köpük beton üretmek için temel malzemeler önceden oluşturulmuş köpük ile karıştırılır. Önceden hazırlanan köpük solüsyonu, ıslak köpük ve kuru köpük olarak iki gruba ayrılmaktadır. Islak köpük, köpük ajanı çözeltilisinin su ile sprey gibi püskürtülerek 2 - 5 mm arasında değişen kabarcık ağının oluşması ile üretilmektedir. Islak köpük geniş gözenek boyutuna ve oldukça kararlı bir yapıya sahiptir. Ancak uzun mesafeli pompalama ve derinlik gerektiren yerlerde dökmek için uygun değildir. Kuru köpük ise tıraş köpüğü görüntüsüne benzerdir ve ıslak köpükten daha küçük 1 mm çapından daha az gözenek boyutu dağılımına sahip ve oldukça kararlı bir yapıya sahiptir (Bindiganvile, 2008).

Köpük beton üretiminde başlıca iki ana üretim yöntemi vardır. Birinci yöntem önceden hazırlanmış köpüğün üretilmiş harç içerisine ilave edilip karıştırılmasıyla yapılmaktadır. İkinci yöntemde ise betonun karışım esnasında harç içerisine toz köpük ajanın katılarak köpük kabarcıkları oluşturulmaktadır. Genellikle kullanılan köpük ajanları protein esaslı veya sentetik esaslı olan köpük ajanlarıdır. Protein esaslı köpük ajanları hayvanların boynuz, tırnak, kan, kemik gibi hayvanların kalıntılarından elde edilmektedir. Sıcaklığa karşı daha az duyarlı olan sentetik esaslı köpük ajanları ise şampuan ve sabun tozu üretiminde kullanılan kimyasal maddelerden üretilmektedir. Protein esaslı köpük ajanları daha fazla kapalı boşluklu ve yüksek dayanımlı köpük beton üretimini sağlarken sentetik esaslı köpük ajanları daha fazla genleşme böylelikle daha düşük yoğunluklu ve daha fazla gözenekli köpük beton üretimine olanak sağlamaktadır. Ayrıca sentetik esaslı köpük ajanlarının depolanması ve saklanması protein esaslı köpük ajalarına kıyasla daha kolay ve daha az maliyetlidir (Aldrige, 2005).

Kararlı hücreli bir yapıya sahip olan betonun üretilmesi köpük ajanı, köpük üretim metodu ve karışım tasarımı gibi etkenlere bağlıdır. Hazırlanan köpük solüsyonunun, bozulmaması için çok kararlı bir yapısının olması gereklidir. Karıştırma işlemi sırasında katkı maddesi havayı hapsetmeli ve havanın homojen bir şekilde dağılmasını sağlanmalıdır. (Chica ve Alzate 2019; Wang vd., 2016). Köpük kalitesi köpük ajanının seyretme oranına,

şekillendirme işlemine, sıkıştırılmış hava basıncına, köpüğün yoğunluğuna, harçla birlikte ekleme ve karıştırılma işlemine bağlı olduğu belirtilmiştir (Taylor, 1965).

Köpük hacminin karışım sırasında önemli bir etken olduğu ve hacmin fazla olmasının akışkanlığı düşürdüğü yapılan çalışmalarda belirtilmiştir. Karıştırma süresi ne kadar uzun ve içeri giren hava ne kadar fazla olursa hava içeriğinin düşmesine bağlı olarak sürüklenen hava miktarın da kayıp olabileceği ifade edilmiştir (Bindiganvile, 2008).

Köpük betonun akışkanlık olması yapısına katılan köpük ajanı dozajı ve su/çimento oranına bağlıdır (Nambiar ve Ramamurthy, 2008). Köpük betonun içerisinde hafif agrega olmasından dolayı kuruma rötresi normal betona kıyasla on kat daha fazladır ve kuruma rötresi birim ağırlığı artıkça azalmaktadır (Jones, vd., 2003). Köpük betonun jel gözenekleri, kılcal gözenekler, hava boşlukları ve köpük solüsyonundan kaynaklı mikro gözenekli yapısı, dayanımını ve dayanıklılığını etkilemektedir. (Visagie ve Kearsely, 2002). Daha küçük hava boşluk yapısına sahip köpük betonlar daha yüksek dayanım göstermektedir (Nambiar ve Ramamurthy, 2007). Köpük betonun üretimde kullanılan malzeme tipleri, su-çimento oranı, kür süresi köpük ajanı dozajı beton özelliklerine önemli etkisi vardır (Ramamurthy, vd., 2008).

Köpük betonlarda uçucu kül kullanılması gözeneklerin homojen bir şekilde dağılmasını sağlar ve gözeneklerin birleşmelerini önler. Yüksek oranda köpük solüsyonu kullanmak gözeneklerin birleşmesine ve dayanımın düşük olmasına neden olur (Nambiar ve Ramamurthy, 2007: Visagie ve Kearsely, 2002). Köpük betonun basınç dayanımı çimento miktarına, gözenekler arası mesafe, gözenek sayısına bağlıdır (Wee, vd., 2006: Kearsley ve Visagie, 1999: Nambiar ve Ramamurthy, 2007). Köpük beton yapısındaki gözenekler küresel şekilde ve 50 µm çapında olduğundan normal betona kıyasla daha az su geçirgenliğine sahiptir (Neville, 1995).

Köpük betondaki gözeneklerin çapı 0.1 – 1.5 mm, birim ağırlığı 400 kg/m³ - 1800 kg/m³, 28 günlük basınç dayanımı ise normal betonun yarısı kadar olmaktadır (Brady vd., 2001).

Yaygın olarak kullanılan köpük beton uygulamalarında gözeneklerin toplam karışım hacminin % 6 - % 35 arasında olması tavsiye edilmektedir (Panesar, 2013).

2.4.2. Köpük Betonların Özellikleri

Köpük betonu geleneksel betondan ayıran en önemli özellikleri birim ağırlık, su emme, porozite, kılcal geçirimsizliği ve boşluk yapısıdır.

Malzemenin fiziksel özelliklerini, hafifliği, düşük ısı iletkenliğini, basınç dayanımı ve gözeneklerin büyüklüğü ve dağılımı nedeniyle donmaya karşı düşük direnci belirler (Chica ve Alzate, 2019). Isı ve ses iletim katsayıları düşük olduğu için günümüzde yalıtım malzemesi ve dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır (Brady vd., 2001). Malzemenin fiziksel özelliklerini, hafifliği, düşük ısı iletkenliğini, basınç dayanımı ve gözeneklerin büyüklüğü ve dağılımı nedeniyle donmaya karşı düşük direnci belirler (Chica ve Alzate, 2019).

Thanoon vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada ölçülen taze ve kuru birim ağırlıkları arasındaki farkın $100 - 120 \text{ kg/m}^3$ olması gerektiği ifade edilmiştir.

Bing vd. (2011) yaptıkları bir çalışmada, köpük betonun taze birim ağırlığının köpük hacminin artması ile birlikte genellikle azaldığını ve köpük betonun taze birim ağırlığının normal betonun birim ağırlığının yaklaşık %65'i kadar olması durumunda köpük beton basınç dayanımının 50 MPa'ya kadar ulaşabileceğini ifade etmişlerdir.

McCormick (1967), birim ağırlığın ince agreganın tipi ve agrega granülometrisinden etkilenebileceğini ve agrega oranı arttıkça birim ağırlığın daha yüksek olabileceğini belirtmiştir.

Nambiar ve Ramamurthy (2007a), köpük betonun hava boşluklarının tanımlanmasında porozite, geçirimsizlik ve gözenek boyut dağılımının etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Hilal vd. (2015a), köpük betonun gözenek boyutu dağılımının dayanım ve kalıcılık gibi özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu özelliklerini belirlemek için toplam hava boşluğu yerine daha çok boşluğun şekli, boyutu ve dağılımı üzerine araştırmalarını yoğunlaştırmışlardır. Köpük beton sertleştikten sonra boşluğun şeklini belirlemek için köpüğün kabarcık boyutu dağılımını (karışıma ilave edilmeden önce) ve köpük beton içerisindeki gözenek boyutu dağılımını (sertleştikten sonra) bu çalışmanın içeriğini oluşturmuştur. Köpük kabarcıklarının boyut dağılımı ve köpük beton içerisindeki hava boşlukları arasında önemli bir farklılık olduğu görülmüştür. Boşluğun küreselleşmesi arttıkça eklenen köpük hacmine bağlı olarak kabarcıkların birleşimlerinin de arttırdığı ifade edilmiştir. Kabarcık birleşimlerinin gözenek boyutu için oldukça önemli olduğu ifade edilmiştir.

Kuzielová vd. (2016), sıvı köpüğün farklı hacimlerde ve su/ çimento oranı 0,55 olan köpük betonların özelliklerine köpük ajanının etkisini araştırmışlardır. Protein esaslı köpük ajanı düşük yoğunluğuna sahip numunelerde; gözenek boyutu daha az olurken, buna karşılık daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Hidratasyon reaksiyonu üzerindeki gecikmeyi engelleyen ve aynı zamanda hidratasyonu hızlandıran protein esaslı köpük ajanın düşük yoğunluğunun köpük kararlılığını artırdığı ifade edilmiştir.

Jiang vd. (2016), normal Portland çimentosu esaslı yüksek poroziteli köpük betonun özellikleri üzerine bir araştırma yapmışlardır. Çalışmada hava boşluk yapısı, sertleşme özellikleri, kür metodu ve taze köpük betonun kararlılığı incelenmiştir. Önceden hazırlanmış köpük kullanılarak %88.5 – 95.4 poroziteye sahip köpük beton elde edileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte üretilen köpük betonların basınç dayanımlarının 0.12 – 0.75 MPa ve ısı iletkenliklerinin ise 0.036-0.063 W/m.K arasında değiştiğini araştırma sonucu olarak ifade etmişlerdir.

Xie vd. (2018) yaptıkları bir çalışmada bentonit harcı ile üretilen köpük betonun içerisindeki nano boyuta sahip boşluk miktarı artmıştır. Bu da bentonit harcı ile üretilmiş köpük beton daha düşük ısı iletkenliğe sahip olabileceğini göstermiştir.

Chung vd. (2017), köpük beton içerisinde sayısız gözenek bulunduğu ve bu gözeneklerin malzemenin özelliklerini önemli derecede etkilediği ifade edilmiştir. Özellikle köpük betonun özelliklerini, ısı ve mekanik özelliklerini gözenek dağılımı önemli derecede etkilediği vurgulanmıştır.

Hilal vd. (2015b), silis dumanı, uçucu kül ve akışkanlaştırıcı katkıların köpük betonun boşluk yapısına ve dayanımına etkisini araştırmışlardır. Akışkanlaştırıcı katkıların hem çimento hamurunun mikro yapısını hem de köpük betonun hava boşluğu yapısını geliştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, akışkanlaştırıcıların tek başına kullanıldıklarında hava boşlukları üzerinde en iyi bir etkiye sahip oldukları belirtilmiştir. Akışkanlaştırıcıların silisi dumanı ve uçucu kül ile kullanılmasıyla hem boşluk sayısını arttığı, aynı zamanda çimento hamurunun yapısının da güçlendiği buna bağlı olarak köpük betonun dayanımında artış meydana geldiği söylenmiştir.

Kearsley ve Wainwright (2001a), köpük betonun porozitesi ve geçirimsizliği uçucu külün ağırlıkça %75 oranında çimentonun ağırlığının ile yer değiştirmesi durumunda üretilen köpük betonların porozite ve geçirimsizliklerini araştırmışlardır. Köpük beton tarafından

emilen su miktarının aynı su/bağlayıcı oranına sahip çimento hamurunun tarafından emilen miktarın yaklaşık iki katından fazla olduğunu ifade etmişlerdir. Uçucu kül tipi ve kül içeriğinin köpük betonun su emmesi üzerinde bir etkiye sahip olmadığını belirtmişlerdir. Çimento hamurunun su emme oranının ve su buharı geçirimsizliğinin porozitenin artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Köpük beton karışımlarının su buharı geçirimsizliği kül/çimento oranının artışıyla arttığı ve daha düşük birim ağırlıklarda daha etkili olduğunu söylemişlerdir.

Nambiar ve Ramamurthy (2007b), köpük beton gibi yapı malzemelerinin su emme ve kılcallık gibi özelliklerinin kalıcılığı etkilediğini yaptıkları çalışmada söylemişlerdir. Köpük betonun su emmesi ve kılcal su emme miktarlarının köpük içeriğinin artışıyla düştüğü söylenmiştir. Bu durum köpük hacminin artması ile hamur içeriğindeki azalması olarak açıklanmıştır. Kılcallık yoluyla suyun taşınması hava boşluğu oranına ve kıvrım yoluna bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Su emme ince malzeme tipine, yoğunluğa ve boşluk yapısına aynı zamanda geçirimsizlik mekanizmasına da bağlı olduğu ifade edilmiştir. Belli bir yoğunluk için su-katı etkisine ek olarak azalan köpük içeriğinden dolayı artan hamur hacmi de uçucu kül karışımlarının su emme artışına katkıda bulunabileceği belirtilmiştir.

Zhihua vd. (2014), akışkanlaştırıcı katkı ve yüksek fırın cürufu kullanılarak çok düşük yoğunluğa sahip köpük betonun özelliklerini araştırmışlardır. Köpük beton hazırlanırken, hammaddenin eklenme sırası ve karışım hızı seçimi dâhil, doğru karışım oranının kontrolü süper düşük yoğunluklu köpük betonun başarılı şekilde hazırlanması için gerekli olduğu ifade edilmiştir. Çalışma sonucunda köpük betonların su emme oranlarının %6.6 ve %8.3, basınç dayanımlarının 0.33 ve 1.1 MPa, ısı iletkenliklerinin ise 0.05 ve 0.07 W/m.K arasında değişen değerler elde edilmiştir.

Köpük betonun düşük ısı iletkenliği ve enerji tasarrufu sağlamasından dolayı daha az enerji harcayan yapılarda kullanılan alternatif bir yapı ve ısı izolasyon malzemesidir. Köpük betonların ısı iletkenlik (k) değeri, köpüğün yoğunluğuna, köpük ajanına, gözenek ve hücre yapısına, malzemenin birim ağırlığına, karışım oranlarına, bağlayıcı cinsine, nem faktörü ve sıcaklık farkı gibi birçok etkene bağlıdır (Koru, 2017).

Köpük beton geleneksel betonlardan %10-50'ye kadar daha az ısı iletkenlik katsayısı değerlerine sahip olan hafif beton türüdür. Köpük beton, çimento, agrega, su ve bu karışıma köpük solüsyonunun ilave edilmesiyle oluşturulan ve hacminin %75-80'i oranında bağlantısız kapalı gözenek içeren alternatif bir yapı ve yalıtım malzemesidir (Ekinci, 2014).

Mydin (2011), farklı birim ağırlıklara sahip köpük betonların ısı iletkenliklerini araştırmıştır. Çalışmada değişen sabit imento/kum oranı ve su/imento oranı kullanılarak üretilen birim ağırlıkları $650 - 1200 \text{ kg/m}^3$ arasında değişen köpük beton numuneleri kullanılmıştır. Birim ağırlık, porozite ve boşluk boyutunun köpük betonun ısı iletkenliği üzerine etkileri incelemiştir. Köpük beton bir imento esaslı karışım içerisine hava enjekte ederek üretildiği için köpük betonun yoğunluğu doğrudan köpük betonun içerisindeki havanın (porozitenin) bir işlevi olduğu söylenmiştir. Bu yüzden köpük betonun birim ağırlığı ısı iletkenliğini belirlemede önemli rol oynadığını, daha düşük birim ağırlıklarda daha büyük poroziteler elde edileceğini ifade etmiştir. Isı iletkenlik katsayısının köpük betonun porozitesine belirgin şekilde bağlı olduğunu belirtmiştir.

Sayadi vd. (2016), genleştirilmiş polistren tozu (EPS) katkısının köpük betonların yangın dayanımı, ısı iletkenliği ve basınç dayanımı gibi özelliklerine etkilerini ele almışlardır. Çalışmada su/imento oranı 0.33 olan ve karışım içerisindeki %0 – 82.22 aralığında EPS hacmine sahip birim ağırlıkları $1200\text{kg/m}^3 - 150 \text{ kg/m}^3$ arasında değişen köpük betonlar üzerinde yapılmıştır. Köpük betonun dayanımı EPS agregasının su iten doğasının bir sonucu olarak hemen hemen sıfır dayanım ve matris temas bölgesinde daha düşük bağ dayanımı oluşturmasından dolayı EPS'nin hacminin artışıyla azalmıştır. Bununla birlikte EPS agregasının sıkışabilir davranışı matrisin ara yüzey bölgesindeki hamurun kırılmasını hızlandırdığı belirtilmiştir. EPS hacmindeki bir artış EPS hacminin (98'i hava %2'si polistren) özelliklerinden dolayı düşük ısı iletkenlik sağladığı ve en düşük ısı iletkenlik değerinin %82 EPS hacmine sahip olan numunelerde 0.084 W/m.K olarak görüldüğünü ve bu değerin %28 EPS hacmine sahip olan numunelerde ise yaklaşık 2.5 kat daha fazla olduğunu söylenmişlerdir.

Kumar vd. (2018), köpük betonun mekanik ve ısı davranışı üzerine deneysel araştırma yapmışlardır. Köpük beton %15, %17 ve %20 değişen oranlardaki hava içeriklerinde hazırlanmıştır. Hazırlanan köpük beton küp ve levhalar basınç ve ısı testler için kullanılmıştır. Köpük beton kuru birim ağırlığı 860 kg/m^3 'den 1245 kg/m^3 'e kadar, basınç dayanımı ise $2.5 - 6.5 \text{ MPa}$ arasında değişmiştir. Bu çalışmada köpük betonun kuru birim ağırlığı, basınç dayanımını ve ısı iletkenliği kil tuğlasıyla kıyaslanmıştır. Yaygın bir şekilde kullanılan bina tuğlalarının basınç dayanımı 3.5 N/mm^2 , ikinci sınıf tuğlalarinki 7.5 N/mm^2 ve birinci sınıf tuğlaların ise 10 N/mm^2 olduğunu, üretilen köpük betonun dayanımlarının yaklaşık olarak ikinci sınıf tuğla dayanımına eşit olduğunu belirtmişlerdir. Buna bağlı olarak iki katlı bir yapı

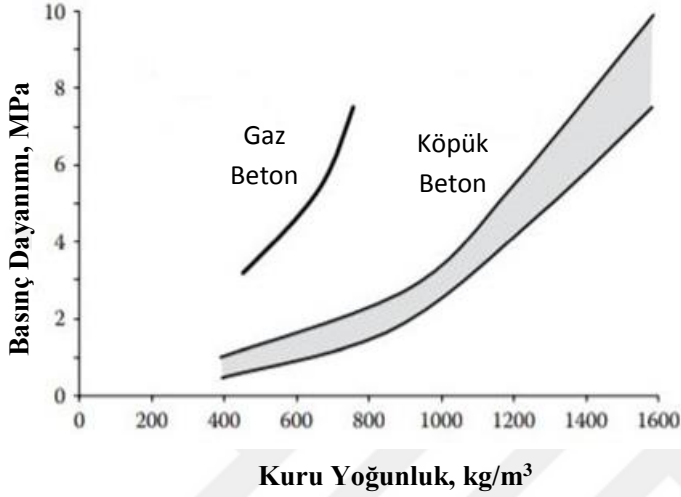
ürettikleri köpük betonun taşıyıcı bir duvar olarak kullanılabilceği söylemişlerdir. Köpük betonların ısı iletkenlikleri 0.021 – 0.035 W/m.K arasında değışirken, kil tuğlalarının ısı iletkenlik değerlerinin ise 0.6 - 1 W/m.K olduğunu ifade ederek, köpük betonun kil tuğlasına kıyasla daha az iletken olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca çalışmanın sonucunda köpük beton kullanımıyla ısınma maliyetlerini azaltabileceğini ve yapı ölü yüklerinin %50 oranlarında azaltabileceği belirtilmiştir.

Kearsly ve Mostert (2005), refrakter açısından köpük betonun kullanımını araştırmıştır. Köpük betonun yüksek hava içeriğinden dolayı yangına dayanıklı duvar uygulamalarında kullanılmasının uygun olduğunu söylenmiştir. Bu çalışma da yüksek alüminatlı çimentonun köpük betonda kullanımını ve yüksek sıcaklıkta köpük betonun davranışını üzerine etkisini incelenmiştir. Refraktör endüstrisi için ihtiyaç duyulan belirli dayanım ve gerekli hacim kararlılığına sahip olan köpük betonların özellikleri araştırılmıştır. Köpük betonun birim ağırlığının dayanım ve hacim kararlılığı üzerine etkisi tartışılmıştır. Köpük betonda kullanılan dolomit kumu ve çimento tipinin yüksek sıcaklığa karşı malzemenin kalıcılığı hakkında bir etkiye sahip oldukları söylenmiştir. Kuruma ve ısınma esnasında köpük beton kendi ağırlığını %25'e kadar kaybetmiştir. 400°C sıcak civarında dolomit kumu içeren harçlar ufalanmaya başladıklarını, hidrolik çimento ve kül içeren harçlarda ise 800°C sıcaklığa kadar dayandıkları ifade edilmiştir. Köpük betonun ısı yalıtım özellikleri birim ağırlığının bir fonksiyonu olduğu ayrıca ifade edilmiştir.

Vilches vd. (2012), ultra hafif köpük betonun yangın dayanımını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında akışkanlaştırıcılar, hafif agregalar, köpük ajanları ve mineral katkılar gibi çeşitli karışım bileşenleri kullanılarak üretilen ultra hafif köpük betonları incelemiştir. Köpük betonun yangın dayanımı kullanılan malzemelerin oranına ve bileşenlerine bağlı olduğu söylenmiştir. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak köpük betonun birim ağırlığı arttıkça ısı iletkenlik ve yangın direnci arttığını belirtmişlerdir. 400 kg/m³ birim ağırlığa sahip ultra hafif köpük betonun yangın direncinin birim ağırlığı 150 kg/m³ sahip olana kıyasla üç kat daha fazla olduğunu belirtmişler ve yeterli yangın dayanımına sahip olmak köpük beton elde etmek için birim ağırlığın 250 kg/m³'den daha fazla olması gerektiği önerisinde bulunmuşlardır.

Yapılan çalışmalarda basınç dayanımının yoğunluğun azalması ile birlikte basınç dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Gaz beton ve köpük betonun kuru birim ağırlık ile basınç dayanımı arasındaki bağıntı Şekil 2.2'de gösterilmiştir (Valore, 1954).

Kearsley ve Wainwright (2001b), uçucu kül tipinin köpük betonun basınç dayanımı üzerine etkisini araştırmıştır. Uçucu külün %67'ye kadar çimento ile yer değiştirmesi durumunda basınç dayanımlarının önemli değişiklik olmayacağını ifade etmiştir. Hem 28 günlük hem de bir yıllık sonuçlar köpük betonun basınç dayanımının kuru yoğunluğunun başlıca bir fonksiyonu olduğunu ve kütle yüzdece yer değiştiren çimentodan çok az etkilendiğini söylemişlerdir.



Şekil 2.2. Gaz beton ve köpük birim ağırlık- basınç dayanımı ilişkisi (Valore, 1954)

Kearsley (1996)'a göre köpük betonun birim ağırlığı azaldıkça basınç dayanımı da azalmaktadır. Valore (1954)' a göre de numunenin boyutu ve şekli, gözenek oluşturma yöntemi, yükleme doğrultusu, betonun yaşı, su içeriği, kullanılan malzeme özellikleri, kür yöntemi basınç dayanımını etkileyen parametrelerdir.

İbrahim vd. (2014), %0, %0.2, %0.4 ve %0.6 polyoelfin lif içeren köpük betonun basınç ve eğilme dayanımlarını araştırmışlardır. Polyoelfin liflerin köpük betonun basınç ve eğilme dayanımını küçük ölçüde artırdığını, polyoelfin liflerin ilave edilmesinin basınç ve eğilme dayanımını artırmaktan ziyade çatlak ilerlemesini geciktirdiğini söylemiştir.

Tan vd. (2014), ultra hafif köpük betonların (<300 kg/m³) basınç dayanımına su/çimento oranı, uçucu kül, uçucu kül etkinleştirici ve köpük ajanının etkisini incelemişlerdir. Uçucu kül içeriğinin %45'den daha az olduğunda basınç dayanımının kısmen azaldığı fakat uçucu kül içeriğinin %45 den daha fazla olması halinde dayanımın hızla azaldığı belirtilmiştir. Basınç dayanımı için en iyi sonuçlar uçucu kül içeriğinin %45'i aşmadığı durumlarda elde

edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca yapılan deneysel çalışma da en uygun su/çimento oranının 0,45 olduğu ifade edilmiştir. Köpük ajanının miktarının artması ile köpük betonun basınç dayanımı önemli bir şekilde azaldığı, uçucu kül etkinleştiricinin miktarının artması ile de köpük beton numunelerinin basınç dayanımı belirgin şekilde arttığını gözlemlediklerini belirtmişlerdir.

Cong ve Bing (2015), yumuşak kil ve silis dumanı içeren köpük betonların özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada aynı su/çimento oranı için farklı birim ağırlıklara sahip kil esaslı ve silis dumanı içeren köpük betonlar üretilmiştir. Karışımlarda köpük oranı arttıkça ısı iletkenlik ve basınç dayanımının düştüğünü söylemişlerdir. Köpük beton içerisine silis dumanı eklenmesiyle büyük oranda basınç dayanımının arttığı ve ısı yalıtım performansını iyileştirdiğini ifade edilmiştir. İç yapıdaki boşluk yapısının incelenmesine bağlı olarak silis dumanının yalıtım performansını ve dayanımı arttırdığı, ayrıca boşluk dağılımını, boşluk oluşumunu daha uniform ve kapalı boşluklu olarak geliştirdiği gözlenmiştir. Sönmemiş kirecin kil esaslı köpük betonun içerisine eklenmesiyle köpüğün kararlılığını azalttığından basınç dayanımı ve yoğunluğunun artabileceği tespit edilmiştir.

Ma ve Chen (2017), Magnezyum fosfat çimento kullanılarak üretilen yeni bir köpük betonun özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada 3 saatlik ve 28 günlük basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ısı iletkenlik ve su direnci ölçülmüştür. Deneylelerden elde edilen sonuçlara göre köpük içeriği arttıkça kuru birim ağırlık, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ısı iletkenlik ve su direncinin azaldığı belirtilmiştir. Magnezyum fosfat esaslı köpük betonun 3 saatlik basınç dayanımı 28 günlük basınç dayanımının yaklaşık %70'i olarak elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Kuru birim ağırlık azaldıkça basınç dayanımı azaldığı, kuru birim ağırlığı 1565 ve 544 kg/m³ olan numunelerin basınç dayanımı sırasıyla 43.3 MPa ve 1,9 MPa olarak belirlendiğini belirtmişlerdir. Bu gözlem doğrultusunda magnezyum fosfat esaslı köpük betonun kuru birim ağırlığı ile basınç dayanımı ile bağlantılı olduğu söylenmiştir.

Elastisite modülü köpük betonun kuru birim ağırlığı ile ilişkilendirilmiştir. Kuru birim ağırlığı 500 - 1600 kg/m³ arasında değişen köpük beton için elastisite modülü değeri 1-12 kN/mm² arasında değiştiği yapılan çalışmalarda ifade edilmektedir. Basınç dayanımı 40 N/mm² olan yapısal bir köpük betonun elastisite modülü yaklaşık 28 kN/mm² olduğu ve önceki çalışmalar ile bu değerler arasındaki büyük farklılığın sebebi iri agreganın eksikliği olarak yorumlamışlardır.

Köpük betonun eğilme dayanımının basınç dayanımına oranı 0.25 – 0.35 MPa, normal ve hafif betona kıyasla çekme ve eğilme dayanımı daha az çıkmıştır. Kumun çimento harcı ile daha iyi aderans göstermesinden dolayı kum ile hazırlanan köpük betonlarda uçucu kül ile hazırlanan köpük betonlara göre daha yüksek eğilme dayanımı (Jones ve McCarthy, 2005 a), 500-1500 kg/m³ birim ağırlıktaki köpük betonlar için 1 - 8 MPa daha düşük elastisite modülü elde edilmiştir (Jones ve McCarthy, 2005b).

Araştırmacılar kuru birim ağırlık, basınç dayanımı ve elastisite modülü arasında köpük betonun elastisite modülünü hesaplamak için bazı denklemler önermişlerdir (Ramamurthy vd., 2009). Bu denklemler Tablo 2.4’de gösterilmiştir.

Tablo 2.4. Köpük betonun elastisite modülünü hesaplamak için denklemler (Ramamurthy vd., 2009)

Yazar	Denklemler	Açıklama
Tada	$E = 5,31 * W - 853$	Kuru birim Ağırlığı 200-800 kg/m ³ arasında değişen numuneler için
McCormick	$E = 33 * W^{1,5} \sqrt{f_c}$	Pauw Denklemi
Jones ve McCarthy	$E = 0,42f_c^{1,18}$ $E = 0,99f_c^{0,67}$	İnce agregası olarak kum kullanıldığında İnce agregası olarak uçucu kül kullanıldığında

Burada;

E = Elastisite Modülü (kN/mm²)

f_c = Basınç Dayanımı (N/mm²)

W = Kuru birim ağırlık (kg/m³)

Köpük betonun ısı ve ses yalıtımı özelliği nedeni ile yapılarda yaygın kullanım alanı vardır. Ancak mekanik özellikleri normal betona kıyasla daha düşüktür. Hafif agregalı köpük betonda yüksek sıcaklık etkisiyle ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır. Mydin ve Wang (2011 b) tarafından yapılan çalışmada; köpük betonu yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakıldığında,

çimento harcının fiziksel yapısı ve kimyasal bileşeninde önemli değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Köpük beton yapısında bu değişimler bozulmalara sebep olarak mekanik özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Hafif betonlarda birim ağırlık ve basınç dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde; 2000 kg/m³ birim ağırlığına sahip olan betonlarda silindirik basınç dayanımı 17 MPa'dan, 800-1800 kg/m³ birim ağırlığında ise 0.7 - 7 MPa'dan az olmaması istenmektedir (Çankıran, 1998).

Köpük betonun gözenekli yapısından kaynaklı çok iyi derecede ısı yalıtım özelliğine sahip olduğu ifade edilmiştir. 1000 kg/m³ birim ağırlığındaki köpük betonun aynı birim ağırlıktaki normal betona kıyasla ısı iletkenlik katsayısı % 5 - 30 arasında daha düşük olarak elde edilmiştir. Birim ağırlığı 600-1600 kg/m³ olan köpük betonlarda ısı iletkenlik katsayısı 1 - 7 W/m.K arasında değişmektedir ve birim ağırlık azaldıkça ısı iletkenlik katsayısının da azaldığı ifade edilmiştir (Jones ve McCarthy, 2005 a). Birim ağırlığın 100 kg/m³ azalması ile 0.04 W/m.K oranında ısı iletkenlik katsayısının azaldığı gözlemlenmiştir (Weigler ve Karl, 1980).

Son yıllarda yapılan çalışmalarda köpük beton normal betona kıyasla hücreli mikro yapısından dolayı daha yüksek ses yalıtım gösterdiği belirtilmiştir (Vilches, 2012). Hücreli boşluklu yapısından dolayı bir köpük beton duvar normal beton duvara kıyasla ses frekansını %3 daha fazla bir değerle iletir. Köpük betonun normal betona kıyasla 10 kat daha fazla ses emilimi oranına sahip olduğu çalışmalarda vurgulanmıştır (Jones ve McCarthy, 2005; Narayanan ve Ramamurthy, 2000).

Köpük betonun ses yalıtımı, köpük içeriği, boşluk boyutu, boşluk dağılımı ve boşluğun uniformluğunun etkili olduğu ifade edilmektedir (Jones ve McCarthy; 2003, Vilches, 2012; Schackow vd., 2014).

2.4.3. Köpük Betonların Kullanım Alanları

Köpük betonun birim ağırlığının normal betona göre hafif olması, düşük ısı iletkenlik, yüksek akışkanlık ve kendiliğinden yerleşmesi aynı zamanda nispeten ucuz maliyetli olması nedeniyle birçok inşaat uygulamalarında rastlamamız mümkündür.

Köpük beton; yalıtım harcı, oda bölmesi, taşıyıcı ve dolgu duvar gibi amaçlarla kullanılmaktadır. (Valore, 1954; Ramamurthy, vd., 2009).

Düşük birim ağırlıklı köpük beton boşluk doldurma ve yalıtım amacıyla kullanırken yüksek birim ağırlıklı olanları yapısal uygulamalarda kullanılır. Köpük betonun yaygın uygulama alanları aşağıda verilmiştir:

- Yol kenarı kazılarında oluşan boşlukları doldurmada
- Kendiliğinden yerleşen ve tesviye eden özelliklerinden dolayı boşlukları doldurma da hızlı ve etkili bir çözüm olarak
- Zayıf olan toprak tabakasının yerine ve yol alt temeli olarak
- Liman rıhtımlarına gelen yanal ölü yükleri azaltmak için
- Zemin ıslahı sağlamak için
- Yangın yalıtımında
- Isı ve ses yalıtımında
- Yer altındaki yakıt tanklarının, boruların kanalizasyonların yangın ve çökme durumlarından uzak tutmak için
- Prekast panellerde ve hafif tuğla üretiminde
- Havaalanlarında darbe emici bariyerlerde

Köpük beton sıkıştırma gerektirmemesi, kendiliğinden yerleşmesi ve yerleştikten bir sonraki gün üzerinde kaplama yapılabilme özelliklerinden dolayı yol kenarlarındaki kazıları doldurmak için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Üretimlerinde ince taneli malzemeler kullanılmasından dolayı daha kararlı bir yapıya sahip olan köpük betonlar yol alt temel malzemesi olarak uygulanmaktadır. Yeraltı tankları, boruları ve kanalizasyonları yangın tehlikesini ve çökmeyi engellemek için önce dolgu malzemeleri ile desteklenir daha sonra $600 - 1000 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğa sahip köpük beton tarafından kapatılır.

Isı yalıtımı ve hafif özelliği gibi köpük betonun üstün özellikleri depremin olumsuz etkilerini azaltmak ve sıcaklık değişiklerinin negatif etkisini çözmek için hafif tuğla ve prekast panel olarak da kullanılır.

Akışkan, kolay işlenebilir ve sıkıştırma gerektirmeyen doğası gereği ayrıca hafif olmasından dolayı köpük beton ısı yalıtım amaçlı ve çatı sızıntılarından gelen suyu tahliye etmek için binalarda şap betonu olarak kullanılmaktadır.

2.5. Isı Yalıtımı

Maddelere özgü olan ısıyı iletme kabiliyetine ısı iletkenlik adı verilmektedir. Isı iletkenlik; birim sıcaklık değişiminde birim alandan gerçekleşen ısı transferi olarak da tanımlanabileceği gibi aynı zamanda malzeme içinden ısının ne kadar hızla akacağına da bir ölçüsüdür. Yüksek bir ısı iletim katsayısı değerine sahip malzemenin iyi bir iletken, düşük ısı iletim katsayısına sahip malzemenin ise zayıf bir iletken ya da yalıtkan olduğu ifade edilmiştir (Neville, 1995; Özbey, 2009).

$$q_y = -k \frac{dT}{dy} \quad (2.1)$$

Isı iletim katsayısının değeri enerjinin üzerinden transfer edildiği maddenin özellikleri ile ilişkilidir. Saf metaller sahip oldukları kristal kafeslerin titreşimleri sebebiyle diğer malzemelere oranla ısının daha hızlı iletilmesini sağlarlar. Dolayısıyla saf haldeki bir metalin maksimum ısı iletim katsayısı değerine sahip olduğu ve iyi bir iletken olduğu söylenebilir. Metalin içerdiği safsızlıkların artmasıyla ısı iletim performansı da düşecektir. Gazlar, daha hızlı moleküler hareketlerinden dolayı enerjiyi daha hızlı iletirler. Gazlarda ısı iletkenlik mutlak sıcaklığın karesiyle orantılı olmaktadır. Sıvılarda ısı iletim mekanizması da gazlardaki mekanizma ile benzerdir. Ancak, sıvı moleküllerinin gazlara oranla birbirine daha yakın olması ve moleküllerin birbirleriyle etkileşimleri ve çarpışma olasılıklarının enerji değişimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olması sıvılardaki mekanizmanın nispeten daha kompleks olmasına yol açmaktadır. Genellikle sıvıların ısı iletkenlikleri katılar ile gazlar arasında değişen bir aralıkta olmaktadır.

Betonun ısı iletkenlik katsayısı, genel anlamda çimento hamuru ve agreganın geçirgenliğine bağlıdır. Bazalt ve trakit düşük bir geçirgenliğe, dolomit ve kireçtaşı ise orta seviyede bir geçirgenliğe, kuvars ise en fazla iletkenliğe sahiptir (Neville, 1995; Özbey, 2009).

Betonda kalker ve dolomit esaslı agregalar ile kullanıldığında lamdada büyük değerler elde edilirken silis esaslı agregaların kullanıldığında lamdanın %15-20 daha büyük olarak tespit edilmiştir. Isı iletim katsayısına etki eden diğer önemli faktörler, gözenek miktarı ile gözenek yapısı ve su içeriğidir. Suyun ısıyı havaya göre daha fazla iletmesinden dolayı kuru haldeki bir cisimde, gözeneklerin fazla olması lamdayı düşürmektedir. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan beton, gözeneklerinden su kaybederek çimentonun dehidratasyonu ile gözenekli bir yapıya dönüşür ve ısı iletim katsayısını azalmaktadır (Aköz ve Yüzer, 1994).

Isı yalıtımında ısı kayıp ve kazançlarının azaltılması kısaca enerji tasarrufu hedeflenmektedir. Isı iletkenlik katsayısı, birim kalınlıktaki bir malzemenin birbirine paralel iki yüzeyindeki sıcaklık farkının 1°C olması durumunda, iletim yolu ile transfer edilen enerji miktarını ifade etmektedir. Isıl iletkenlik katsayısının birimi “W/m.K” dir. Isıl iletkenlik katsayısı düşük olması durumunda malzemenin gözenekliliği ve yalıtım özelliği artmaktadır. Isı yalıtım malzemelerinin diğer malzemelerden farkı ısı iletim katsayılarının düşük olmasıdır. Alman DIN 4108 normu ve TS 825 Türk standartlarına göre ısı iletim katsayısı 0.060 W/m.K altında olan malzemeler ısı yalıtım malzemesi, bu değer in üstünde kalan malzemeler ise yapı malzemesi olarak adlandırılmaktadır. Düşük kalınlıklarda yüksek ısıl dirence sahip hafif malzemelerdir. (İzocam, 2019; İzoder, 2013).

Tablo 2.5. Isı yalıtım malzemelerinin genel fiziksel özellikleri (Uzun, 2011)

Malzeme	Isıl İletkenlik	Sıcaklık °C	Yoğunluk kg/m ³	Buhar Difüzyonu	Dayanım ton/m ³
Cam yünü	0.04	250	14 - 100	1	1.5 - 6.5
Taş yünü	0.04	750	30 - 200	1	1.5 - 6.5
Ekspande Polistren (EPS)	0.028 - 0.031	-180 +75	15 - 30	20 - 80	5 - 15
Ekstrude Polistren (XPS)	0.04	-50 +80	25 - 45	80 - 250	10 - 50
Poliüretan (PUR)	0.035	-200 +110	30 - 40	30-300	10 - 40
Fenol Köpüğü	0.04	-180 +120	30 - 35	10 - 50	100 - 150
Cam Köpüğü	0.052	-260 +430	100 - 200	10000	48 - 880
Ahşap Yünü Levhalar	0.09 - 0.015	+110	360 - 570	2 - 5	20
Genleştirilmiş Mantar (ICB)	0.04 - 0.055	-180 +100	80-500	10 - 35	-

Kalsiyum silikat, fenol köpük, cam yünü, taş yünü, genişletilmiş polistiren ve poliüretan gibi malzemeler ısı yalıtım malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle düşük ısı iletkenliği, düşük yoğunluğu, uzun ömürlü olması nedeniyle poliüretan köpük malzemeler yaygın olarak kullanım alanı bulmuştur (Nazeran ve Moghaddas, 2017). Poliüretan köpük malzemeler diğer yalıtım malzemelerine göre en düşük kalınlıkta en verimli ısı yalıtım malzemesi olduğu ifade edilmiştir (Akdoğan vd. 2015). Piyasada yaygın olarak kullanılan ısı yalıtım malzemeleri Tablo 2.5’de verilmiştir.

Mahlia vd. (2007), bir binanın duvarındaki ısı iletkenlik ile yalıtım kalınlığı arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. İzolasyon malzemesinin ısı iletkenliğini göz önünde bulundurarak optimum kalınlığı tahmin etmek için bir korelasyon önermişlerdir.

Liu vd. (2015), dış duvarlardaki nem transferinin ve birikimlerinin iletim yükü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğundan yalıtım kalınlığının etkilendiği görülmüştür. Ekstrüde polistiren (XPS)'nin optimum kalınlığının 0.53 – 0.069 m aralığında ve genişletilmiş polistiren (EPS)'nin 0.081 – 0.105 aralığında olduğunu göstermiştir.

Zhou vd. (2010), pamuk sapı liflerinden yapılmış olan çevre dostu yalıtım malzemesinin enerji tasarrufu için duvara uygulanabileceğini ifade etmişlerdir.

Khalid ve Kodur (2011), kendinden konsolidasyonlu betonda ve lif takviyeli kendinden konsolidasyonlu betonda termal ve mekanik özellikler üzerindeki ısı etkisini araştırmışlardır. Isı iletkenliğinin sıcaklığın yükselmesi ile azaldığı, çelik ve polipropilen liflerin ısı iletkenlik üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.

Ozger vd. (2013), geri dönüştürülmüş malzemelerin beton üretiminde kullanılmasının önemli olduğunu vurgulamıştır. Betona poliamid liflerin eklenmesi ile çekme dayanımı, maksimum yük taşıma kapasitesi ve elastisite modülü katsayılarının azaldığı gözlemlenmiştir. Lifli beton ve geleneksel beton için ısı kapasite değerleri sırasıyla 0.63 ve 0.81 J/g.K ve ısı iletkenlik değerleri ise sırasıyla 1.16 ve 1.02 W/m.K olarak elde edilmiştir.

Köpük beton düşük ısı iletkenliğe sahip bir beton çeşitidir. Bu sebeple ısı özelliği ve enerji tasarrufu oldukça fazladır. Köpük betonun bu özelliği nedeni ile, daha az enerji tüketen, yapılar için alternatif bir yapı ve ısı izolasyon malzemesi olarak kullanılabilir. Köpük betonlardaki ısı iletkenlik katsayı değeri, köpüğün yoğunluğuna, köpük ajanına, gözenek ve yapısına, malzemenin birim ağırlığına, karışım oranlarına, bağlayıcı cinsine, nem faktörü ve sıcaklık farkı gibi birçok parametreye bağlıdır (Koru, 2017).

Yoğunluğu 452 kg/m³ olan köpük beton numunelerin ortalama basınç dayanımı 1.07 MPa, ısı iletkenlik katsayısı ise 0.097 W/m.K olarak belirlenmiştir. Hafif agrega olarak PC-külün prekast eleman ve hafif zemin şapı üretiminde başarıyla kullanılabilirliği belirlenmiştir (Davraz ve Kılınçaslan, 2020).

Isı yalıtımı malzemeleri özellikleri nedeniyle tesisat sistemlerinin yalıtılmasında ve binalarda bulunan döşeme, çatı ve duvar gibi yapı elemanlarında kullanılmaktadır (İzocam, 2019).

2.6. Ses Yalıtımı

2.6.1. Temel Ses Bilgileri

Akustik, sesin orijinini, boşlukta, borularda, kanallarda veya kapalı alanlarda yayılmasını inceleyen bir bilim dalıdır (Kuttruff, 2006). Kısaca “Ses bilimi” olarak ifade edilmektedir (Ersoy, 2007). Akustik bir bilim dalı olması nedeniyle içinde çok fazla kavram bulundurmaktadır. Bazı temel kavramlar aşağıda açıklanmıştır.

Sesin birçok farklı tanımı vardır. Beranek (2005) tarafından, ses “elastik bir ortamdaki parçacıkların basınç altında yer değiştirmesi” olarak tanımlanırken, “titreşim yapan bir kaynaktan yayılan ve hava basıncıyla oluşan dalgalanmalarla meydana gelen fiziksel bir olaydır” şeklinde veya “insanların fark ettiği basınç değişimi” olarak da tanımlanmaktadır (Gelen, 2016).

Ortamda bir sestten bahsedebilmek için birbirine bağımlı olmayan üç kavramın bir arada bulunması gereklidir. Bunlar: ses kaynağı, sesi iletici bir ortam ve kulaktır. Bu kavramlar dalga hareketi ile birbirine bağlıdır. Sesin oluşabilmesi için mutlaka bir dalga hareketinin olması gereklidir. Dalga hareketinin olması demek titreşimin olması anlamına gelmektedir. Farklı ses tiplerinin üretilmesi ses dalgasının frekansı, dalga boyu ve şiddetine (genlik) bağlıdır (Kadam ve Nayak, 2016). Ses dalgaları farklı ortamlarda farklı hızlarla yayılırlar (Canbolat, 2013). Ses dalgalarının farklı ortamlardaki yayılma hızları kıyaslandığında; sesin en yüksek hızla katılarda sonra sıvılarda ve en düşük hızla da gazlarda yayıldığı ifade edilmiştir (Karağaçlıoğlu, 2012). Ses dalgaları yayılırken ortamın sıcaklık, yoğunluk ve basıncında ani değişimler meydana gelmektedir (Kuttruff, 2006).

Ses dalgaları uzunlamasına dalgalardır. Ortam dalgası örneğin; hava, dalganın yönüne paralel olarak salınım yapmaktadır. Bir ucu sabitlenmiş olan yumuşak bir yay düşünüldüğünde, yay serbest ucundan hızla çekilip bırakılırsa; yay uygulanan kuvvet yönünde uzayarak ve kısalarak hareket eder. Uzunlamasına ses dalgasında da aynı durum gerçekleşerek hava parçacıkları ses dalgasının hareketine paralel olarak öne ve arkaya salınım hareketi

yaparlar. Bu hareketin sonucunda devamlı olarak birbirini izleyen seyrelme ve sıkışma hareketleri oluşur. Arka arkaya gelen seyrelme veya iki sıkışma hareketi arasındaki mesafe dalga boyu olarak ifade edilmektedir (Kadam ve Nayak, 2016). Şekil 2.3’de ses dalgasının hareketi şematize edilmiştir. Tam bir periyot boyunca saf tonun aldığı mesafe dalga boyu olarak tanımlanmaktadır. Dalga boyunun formülü:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

Burada;

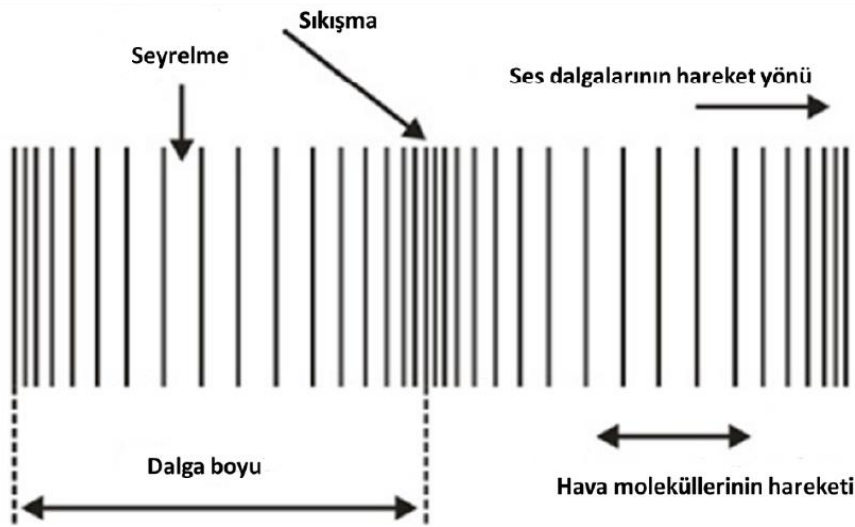
λ : dalga boyu,

T: periyot,

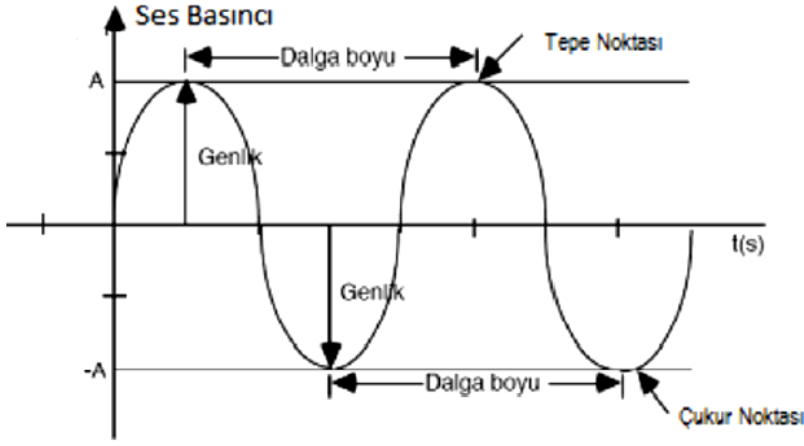
c: sesin hızı ve

f : frekansı

ifade etmektedir.



Şekil 2.3. Ses dalgasının hareketi (Embibe Institutes, 2019)



Şekil 2.4. Sinüs dalgasının şematik gösterimi (Canbolat, 2013)

Şekil 2.4’de görüldüğü gibi sinüs dalgasında, dalganın en tepe iki uç (tepe ve çukur arası) noktası arasındaki mesafenin yarısı dalganın genliği olarak ifade edilmektedir (Canbolat, 2013).

Frekans saniyedeki devir sayısı olarak tanımlanmaktadır. Sesin frekansı Hertz (Hz) ile ifade edilir ve f ile gösterilir (Beranek, 2005). Ses dalgaları bir ortamda yayılırken farklı frekanslarda veya oranlarda titreşim yaparlar ve titreşim kaynağına bağlı olarak bir veya birden fazla frekansa sahip olabilirler. Sinüs dalgalarının ise tek frekansı vardır (Kadam ve Nayak, 2016).

Zaman (t), sıfırdan $1/f$ ’ye değiştiğinde bir tam devir oluşmaktadır. Periyot T ile gösterilir ve $1/f$ ’ye eşittir. (Beranek, 2005).

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.3)$$

Denklemden T periyodu, f frekansı ifade etmektedir. Genel olarak bir noktada alternatif bir eylem tarafından bir etki oluştuğunda buna empedans denmektedir.

$$Z = \text{Hareket/Etki} \quad (2.4)$$

Z ilgili noktadaki empedansı ifade etmektedir. Ses olayında akustik empedans:

$$Z = \frac{p}{v} \quad (2.5)$$

Denklemden p , hareketi üreten ses basıncı, v ise ortam parçacık hızını ifade etmektedir. Z ses dalgasının o noktadaki akustik empedansı anlamına gelmektedir. Bir ses dalgası hiçbir kayba uğramaksızın bir alanda yayılırken akustik empedans ortam yoğunluğu (ρ) ve ses hızından (c) elde edilmektedir.

$$Z = \frac{p}{v} = \rho c \quad (2.6)$$

Denklemden Z ortama göre spesifik bir değeri olan karakteristik empedansı (veya spesifik akustik rezistans) ifade etmektedir. Örneğin standart şartlardaki havanın karakteristik empedansı $415 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'dir (Maekawa ve Lord, 1994). Bir katmanın karakteristik empedansı çarpan ses dalgalarının içeriye girmesine izin verecek şekilde havanınkinden çok farklı olmadığı sürece yüksek ses yutumu katsayıları oluşmaktadır (Kuttruff, 2006).

Tamamen rijit ve gözeneksiz bir duvar akustik açıdan "sert" olarak tanımlanmaktadır. Sert duvarın yüzeyindeki ortam parçacıkları kendisine dik gelen dalgaları taşıyamaz ve parçacık hızı sıfır olur. Duvar yüzeyinin empedansı sonsuz ($Z = \infty$) olur. Böyle bir duvar gelen dalgayı mükemmel bir şekilde yansıtır. Tüm açılar için yansıtma faktörü 1'dir. Pratikte beton veya kiremitten yapılan bir duvar insan kulağının duyabileceği frekans aralığında akustik olarak "sert" kabul edilebilir (Kuttruff, 2006).

Atmosferik basıncın altında veya üstünde olan bir basınç varyasyonu ses basıncı olarak tanımlanmaktadır. Birimi paskaldır (Pa). $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ dir. Genç bir insan kulağı $20 \mu\text{Pa}$ kadar düşük basınçları ayırt edebilmektedir (Beranek, 2005). Alçak konuşma sesinin basıncı $20 \mu\text{Pa}$, normal bir konuşmanın $20000 \mu\text{Pa}$, bir uzay mekiğinin kalkış ses basıncı ise $2000000000 \mu\text{Pa}$ 'dır. Bu rakamlar arasında çok fazla fark olduğu için kullanımda $20\text{--}2000000000$ aralığındaki rakamları ifade etmek çok pratik olmadığından ses şiddetini tanımlamak için daha basit bir yöntem olan logaritmik (10 tabanında) ifade yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu şekilde ses şiddeti Pa yerine daha iyi ifade edilebilir rakamlarla desibel (dB) cinsinden ifade edilmektedir. Referans olarak logaritmik skalada en düşük duyma eşiği olan $20 \mu\text{Pa}$, 0 dB olarak alınmaktadır (Hawkins, 2014).

A. Graham Bell ses sinyallerinin hesaplanması ile ilgili yaptığı çalışmalar sonucunda yeni bir birim olarak kendi soyadı olan "Bell" birimini ortaya çıkarmış ve bu birime 10 çarpanı eklenerek "Desibel" birimi kullanılmaya başlanmıştır (Işıkhan, 2019). Desibel "Başta basınç ve güç olmak üzere, referans değerine göre oranı alınan parametrenin logaritmik değeri"

olarak tanımlanmaktadır. Denklem 2.7 ve 2.8’de sırasıyla bell ve desibel formülleri verilmiştir.

$$\text{SBS (Bell)} = \log_{10} \frac{W}{W_0} \quad (2.7)$$

$$\text{SBS (dB)} = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0} \quad (2.8)$$

Denklemlerde W açığa çıkan gücü, W_0 referans gücü ifade etmektedir. Akustik güç, akustik basıncın karesine eşit olduğu için başka bir ifade ile desibel olarak aşağıdaki biçimde ifade edilir:

$$\text{SBS (dB)} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad (2.9)$$

Bu denklemde SBS ses basınç seviyesi anlamına gelmektedir ve dB desibeli, P açığa çıkan basıncı ve P_0 referans basıncı ifade etmektedir (Işıkhani, 2019). Referans basınç 20 μPa , açığa çıkan basınç da ilgili frekanstaki ses basıncıdır. Desibel cinsinden ifade edildiğinde konforlu bir ortamın ses basınç seviyesinin 40 - 45 desibel olması gerekir (Sever, 2016). Aynı konforun Pa cinsinden yaklaşık olarak 20000 μPa olarak ifade edilebileceği tahmin edilmektedir.

Akustik biliminde ses frekansları on standart oktav banda bölünmüştür. Her oktav bandın bir merkez frekansı (f_c) vardır ve her merkez frekans bir önceki oktav bandın merkez frekansının iki katıdır. Üst bant limiti (f_u) ve alt bant limitinin (f_L) geometrik ortalaması merkez frekansını (f_c), üst bant limit ve alt bant limit değerleri arasındaki fark bant genişliğini vermektedir. Her oktav bant, 1/3 oktav bandını elde etmek için üç alt banda bölünmüştür. 1/3 oktav bandının merkez frekansı 20 Hz ile 20000 Hz arasındadır (Kadam ve Nayak, 2016).

İnsan kulağı 16 Hz ile 20000 Hz aralığındaki frekansları duyabilir (Kuttruff, 2006). Beranek (2005)’e göre ise genç bir insanın normal duyabileceği frekans aralığı kabaca 15 Hz-16000 Hz aralığı olarak ifade edilebilir. Fakat bazı diğer canlılar bu frekanslardan farklı sesleri duyabilmektedir (Sever, 2016). Günlük konuşmalar genellikle 300-2800 Hz aralığındadır (Ersoy, 2007). Normal bir kulak 3000-6000 Hz aralığındaki frekanslara karşı çok hassastır. Sesin frekansı arttıkça kulağın algıladığı ses incelmekte, frekans azaldıkça kalınlaşmaktadır (Karaağaçlıoğlu, 2012). Frekans aralıklarına göre sesleri kalın, orta ve ince olarak Tablo 2.6’deki gibi sınıflandırmak mümkündür (Ersoy, 2007).

Tablo 2.6. Frekans aralıklarına göre sesin algılanması (Ersoy, 2007)

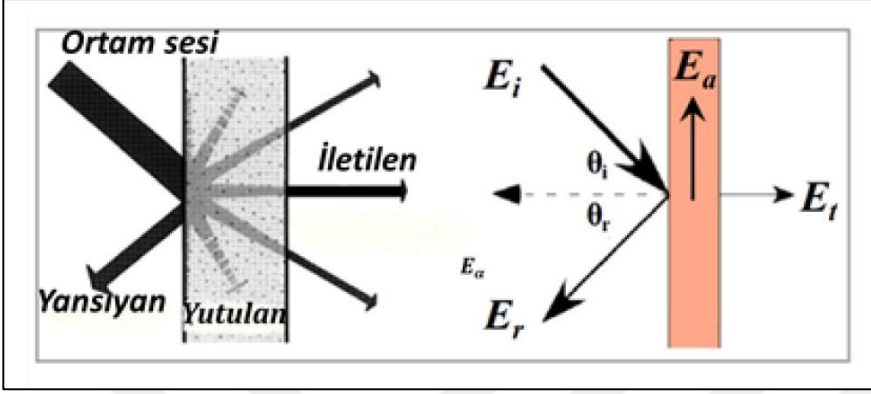
Frekans Aralığı (Hz)	Sesin Algılanması
16 - 100	çok kalın
100 - 400	kalın
400 - 1600	orta kalın
1600 - 3150	ince
3150 - 18000	çok ince

Sesin şiddeti rahatsız edici büyüklükte olduğunda “gürültü” olarak tanımlanmaktadır. Gürültünün insan sağlığı ve konforu üzerinde olumsuz etkileri bulunmasından (Del Sorbo vd., 2019) dolayı istenmeyen sesin veya seslerin ortamda azaltılması gereklidir (Ersoy, 2007). Akustik düzenleme ve ses yalıtımı ile insan sağlığını ve konforunu olumsuz etkileyen gürültü ile mücadele edilebilmektedir (Harran Üniversitesi, 2019). Gürültünün insan sağlığı ve konforu üzerinde olumsuz etkileri olması nedeniyle istenmeyen sesin ortamlarda azaltılması gereklidir. (Jordeva vd., 2015). İnsan kulağının duyabileceği çok geniş bir frekans aralığı bulunmaktadır. Bu sebeple gürültü kontrolü açısından kontrol altına alınmak istenen frekans aralığının iyi bilinmesi gereklidir (Karaağaçlıoğlu, 2012).

Bir malzemenin ses akışına karşı gösterdiği direnç ses yalıtımı olarak adlandırılmaktadır. Malzemenin ağırlığı ses yalıtımı açısından önemlidir. Akustikteki kütle kanununa göre ağır malzemeler hafif olanlara göre kendilerinden geçen daha fazla sesi durdurabilmektedir. Geçirgen olmayan bir malzeme için malzemenin ağırlığı iki katına çıktıkça gürültüyü durdurma kabiliyeti yaklaşık olarak 6 dB artmaktadır (Rabbi vd., 2013; Sengupta, 2010). Beton, kalın cam ve metal gibi çok yüksek yoğunluklu malzemeler çok sert oldukları için ortama sesi geri yansıtarak çok etkili bir şekilde ses yalıtımı sağlayabilir (Tascan ve Vaughn, 2008 a). Bu malzemeler sese karşı bariyer görevi yaparak sesin iletimine engel olabilmektedir (Nayak ve Padhye, 2016). Akustik amaçlı kullanılacak malzemenin paketlenme yoğunluğu arttıkça lifler arasındaki boşluk azalmakta ve malzemenin sesi yansıtma yeteneği artmaktadır (Tascan ve Vaughn, 2008b).

Ses enerjisi gözenekli ses yutuculardaki boşluklara girdiğinde ısı enerjisine dönüşmektedir (Cao vd., 2018). Ses yutum prensibi buna dayanmaktadır (Lee ve Joo, 2003). Ses dalgaları bir gözenekli yüzeye çarptığında yansıma, yutum ve iletim olmak üzere üç olay

gerçekleşmektedir. Ortam ses enerjisi bu üçünün toplamıdır (Cao vd., 2018). Ortam ses dalgasının basıncı yüzeyin hava akış direncini yenmeli ve ilaveten arka tarafına yayılan sesin basıncını dengelemelidir (Kuttruff, 2006). Ses yutum mekanizması Şekil 2.5’de şematize edilmiştir.



Şekil 2.5. Ses yutum mekanizması (Cao vd., 2018)

$$E_i = E_r + E_\alpha + E_t \quad (2.10)$$

$$\alpha = \frac{E_r + E_t}{E_i} = \frac{E_\alpha}{E_i} \quad (2.11)$$

Denklemlerde;

α : ses yutum katsayısını,

E_i : ortamdaki ses enerjisini,

E_r : yansıyan,

E_α : yutulmuş ve

E_t : iletilen ses enerjilerini

ifade etmektedir.

Emilen ses enerjisinin ortamdaki sesin enerjisine oranı ses yutum katsayısı olarak adlandırılmaktadır ve α ile gösterilmektedir (Gao vd., 2016; Del Sorbo vd., 2019). Bu duvardan yansımayan ses enerjisinin (duvar içinde oluşan kayıplar sebebiyle dağılması veya duvardan iletilmesi nedeniyle) oranıdır (Kuttruff, 2006). Ses yutum katsayısı uygulanan frekansa bağlı olarak 0 ile 1 arasında değişkenlik gösteren bir değerdir. Bu değer 1'e ne kadar yakınsa o kadar iyi ses yutumu sağlamaktadır (Cox ve D'Antonio, 2017). Bir malzemenin ses

yutumunun etkinliğini değerlendirmek açısından 0.5 kritik bir değerdir (Liu ve Hu, 2010). Fakat Liu ve Zuo (2019)'ya göre ses yutum katsayısı 0.2 olan bir malzeme ses yutum malzemesi olarak değerlendirilebilmektedir. Ses yutum katsayısı frekansa göre değişiklik göstermektedir. Örneğin standart ses yalıtım malzemelerinden olan mineral yünlerin (50 mm kalınlığındaki cam yünü ve taş yünü) ses yutum katsayıları 125 - 4000 hertz frekans aralığında 0.10 ile 1 arasında değişiklik göstermektedir. Her malzeme bir ses yutum katsayısına (α) sahiptir (Harran Üniversitesi, 2019).

Ses yutum katsayısını etkileyen çok sayıda parametre vardır. Bunlar arasında kalınlık (Liu ve Hu, 2010), yoğunluk, açık hücre oranı, hava parçacıklarının hızı (Bahrambeygi vd., 2013), eğrilik, gramaj, empedans, hava akış direnci (Yılmaz, 2009) gözeneklilik, sıkıştırma, lif boyutları (Qiu, 2016-b) sayılabilir. Bu parametrelerle ses yutum katsayısı arasında doğrudan basit bir ilişki kurmak kolay değildir (Qiu, 2016-b). Bu parametreler malzemenin üretim yöntemi, hammadde kompozisyonu, lif tipi, bitim işlemlerine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır ve hepsi birbiri ile bağlantılıdır (Yılmaz, 2009).

2.6.2. Ses Emiliminin Derecelendirilmesi

Ses emiliminde derecelendirme yöntemleri olarak üç farklı sistemin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan Gürültü Azaltım Katsayısı (NRC = Noise Reduction Coefficient) kıyaslama yönteminin kullanıldığı gözlemlenmektedir. Ayrıca Ses Emilim Ortalaması (SAA=Sound Absorption Average) ve ağırlıklı ses yutum katsayısının (α_w) yaygın olarak kullanıldığı anlaşılmaktadır. Arenas vd. tarafından, NRC kıyaslama yönteminin global olarak yaygın olarak kullanıldığı belirtilmiş olup, ağırlıklı ses yutum katsayısının (α_w) Avrupa'da yaygın olarak kullanıldığını söylenmiştir (Arenas vd. 2016).

Ses emiliminde tercih edilen frekans değerleri BS EN ISO 266:1997 nolu standartta belirtilmiş ve bu standartta 1/3 oktav bantlar ve temel oktav bantların hangi frekans değerleri olacağı belirlenmiştir. Ses emiliminin derecelendirmesi sürecinde, 1/3 oktav bant değerlerinin ses yutum katsayısı ölçüm sonuçları kullanılmaktadır. Ses yutum katsayısı analizlerinde, NRC ve SAA ve ağırlıklı ses yutum katsayı değerinin (α_w) artması, genel anlamda ilgili frekans aralığındaki ses yutum düzeyinin de arttığı göstermektedir. Bu çalışmada, sıva katmanlarına ait NRC, SAA ve ağırlıklı ses yutum katsayı (α_w) değerlerinin artırılması hedeflenmiştir.

Tablo 2.8. Ses yalıtımının değerlendirilmesi ile ilgili standartlar

Değişken	Ölçüm birimi	Standart	Açıklama
Ağırlıklı ses azaltma indeksi, R_w	dB	ISO 717-1	Tek sayı, çinlama odası ölçümleri, gerçek boyutlu numune
Görünür ağırlıklı ses azaltma indeksi, $R'w$	dB	ISO 717-1	Tek sayı, yerinde ölçümler, gerçek boyutlu numune
Ses Azaltma İndeksi, R	dB	ISO 10140 EN 12354-1	Çinlama odası, gerçek boyutlu numune, Tahmin
Görünür ses azaltma indeksi, R'	dB	ISO 16283-1	Yerinde ölçümler, gerçek boyutlu numune
Ses iletim kaybı, TL	dB	Standart'ı bulunmamaktadır.	Empedans tüpü, küçük numuneler
Ağırlıklı darbe sesi yalıtım iyileşmesi, ΔLW	dB	ISO 717-2 EN 12354-2	Tek sayı, çinlama odası ölçümleri, gerçek boyutlu numune, Tahmin
Darbe sesi yalıtım iyileşmesi, ΔL	dB	ISO 10140	Çinlama odası, gerçek boyutlu numune
Ağırlıklı standartlaştırılmış darbe ses basınç seviyesi, $L_{n,w}$	dB	ISO 717-2	Tek sayı, çinlama odası ölçümleri, gerçek boyutlu numune
Standartlaştırılmış darbe ses basınç seviyesi, L_n	dB	ISO 10140 EN 12354-2	Çinlama odası, gerçek boyutlu örnek, Tahmin
Ağırlıklı görünür standartlaştırılmış darbe ses basıncı seviyesi, $L'_{n,w}$	dB	ISO 717-2	Tek sayı, yerinde ölçümler, gerçek boyutlu numune
Görünür standartlaştırılmış darbe ses basıncı seviyesi, L'_n	dB	ISO 16283-2	Yerinde, gerçek boyutlu numune
Dinamik sertlik	MN/m ³	ISO 9052-1	Laboratuvar, küçük numuneler

Tablo 2.7. Ses yutum özelliklerinin değerlendirilmesi için kullanılan yöntemlerin listesi

Değişken	Standart	Açıklama
Ses yutum katsayısı, α	ISO 354	Çinlama odası, gerçek boyutlu numune
Ses yutum katsayısı, α	ASTM C423-09a	Çinlama odası, gerçek boyutlu numune
Ses yutum katsayısı, α	ISO 10534-2	Empedans tüpü, küçük numuneler
Gürültü azaltma katsayısı, NRC	ASTM C423-09a	Tek sayı, çinlama odası, gerçek boyutlu numune
Ses yutum ortalaması, SAA	ASTM C423-09a	Tek sayı, çinlama odası, gerçek boyutlu numune

2.6.2.1 Gürültü azaltım katsayısı (NRC)

Ses yutum katsayısı değerlendirmelerinde, ASTM C423 – 17 ve ASTM C634 – 13 standartlarında belirtilen gürültü azaltım katasayısı (NRC) tek sayılı derecelendirme yöntemi incelenmiş ve literatür araştırmalarının genelinde kullanıldığı görülmüştür. Literatürde genel olarak kabul gören gürültü azalım katsayısı formülü aşağıda verilmektedir (ASTM C423 – 17; ASTM C634 – 13; Barron, 2003; Metha, 1999 ve London, 2006).

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (2.12)$$

Burada;

- α_{250} : 250 Hz değerine ait ses yutum katsayısı
- α_{500} : 500 Hz değerine ait ses yutum katsayısı
- α_{1000} : 1000 Hz değerine ait ses yutum katsayısı
- α_{2000} : 2000 Hz değerine ait ses yutum katsayısı

Arenas vd. araştırmalarında, NRC değerinin küresel emilim katsayısı olarak kabul edildiğini ve en yaygın olarak kullanıldığını vurgulamışlardır (Arenas vd., 2016).

2.6.2.2. Ses emilim ortalaması (SAA)

ASTM C 423 – 17 ve ASTM C 634 – 13 standartlarında ses emilim ortalaması SAA (Sound Absorption Average) tek sayılı alternatif ses yutum katsayısı derecelendirme yöntemi olduğu belirtilmiştir. 200 Hz ile 2500 Hz değeri arasında bulunan (1/3 oktav bant frekansları, 200 Hz ve 2500 Hz dâhil) 12 adet farklı frekansın ses yutum katsayısı ölçüm sonucunun ortalamasından SAA elde edilmektedir. İlgili formüller aşağıda verilmektedir.

$$SAA = \frac{\alpha_{200} + \alpha_{250} + \alpha_{315} + \alpha_{400} + \alpha_{500} + \alpha_{630} + \alpha_{800} + \alpha_{1000} + \alpha_{1250} + \alpha_{1600} + \alpha_{2000} + \alpha_{2500}}{12} \quad (2.13)$$

Burada;

- | | |
|---|---|
| α_{200} : Ses yutum katsayısı - 200 Hz | α_{250} : Ses yutum katsayısı - 250 Hz |
| α_{315} : Ses yutum katsayısı - 315 Hz | α_{400} : Ses yutum katsayısı - 400 Hz |
| α_{500} : Ses yutum katsayısı - 500 Hz | α_{630} : Ses yutum katsayısı - 630 Hz |
| α_{800} : Ses yutum katsayısı - 800 Hz | α_{1000} : Ses yutum katsayısı - 1000 Hz |

α_{1250} : Ses yutum katsayısı - 1250 Hz α_{1600} : Ses yutum katsayısı - 1600 Hz

α_{2000} : Ses yutum katsayısı - 2000 Hz α_{2500} : Ses yutum katsayısı - 2500 Hz

2.6.2.3 Ağırlıklı Ses Yutum Katsayı Değeri (α_w)

TS EN ISO 11654:2002 standardında, “oktav bant içindeki, üç tane 1/3 oktav bant ses absorpsiyon katsayılarının (α_{i1} , α_{i2} ve α_{i3}) aritmetik ortalama değerinden her bir i oktav bant için (α_{pi}) uygulamadaki ses absorplama kat sayısı hesaplanır” denilmektedir.

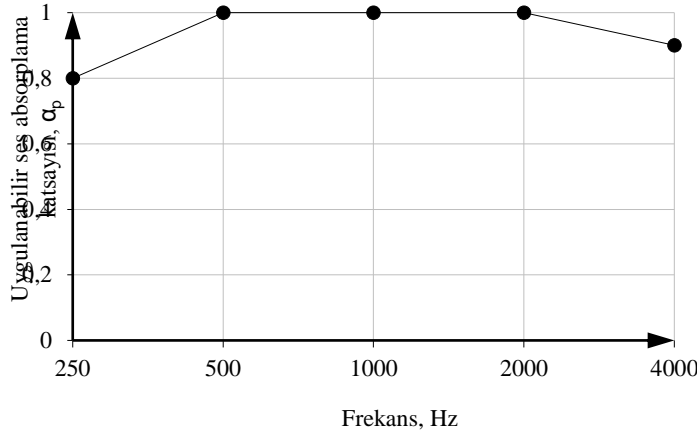
$$\alpha_{pi} = \frac{\alpha_{i1} \alpha_{i2} \alpha_{i3}}{3} \quad (2.14)$$

Burada;

α_{pi} : Her bir oktav bandı için, oktav bant içerisindeki 1/3 oktav bant ses yutum katsayılarının (α_{i1} , α_{i2} , ve α_{i3}) aritmetik ortalamasını

ifade etmektedir.

TS EN ISO 11654:2002 standardında, “referans eğriden α_w ağırlıklı ses absorpsiyon kat sayısını hesaplamak için TS EN ISO 11654:2002 standardında, “referans eğriden α_w ağırlıklı ses absorpsiyon katsayısını hesaplamak için α_{pi} değerleri kullanılır. İstenmeyen sapmaların toplamı 0.1 veya daha az oluncaya kadar ölçülen değerlere doğru 0.05 adımlar ile referans eğrisi kaydırılır. Ölçülen değer, referans eğrisinin değerinden az olduğunda belli bir frekansta istenmeyen bir sapma olur. Yalnızca istenmeyen yöndeki sapmalar sayılmalıdır. α_w ağırlıklı ses absorpsiyonu, 500 Hz’de kaydırılan referans eğrisinin değeri olarak tarif edilir” denilmektedir. Ağırlıklı ses yutum katsayısını (α_w), referans eğrinin kaydırılması sonucu elde edilen 500 Hz değerindeki emilim değeri olmaktadır. İstenmeyen sapmaların toplamı 0.1 veya daha az oluncaya kadar ölçülen değerlere doğru 0.05 adımlar ile referans eğrisi kaydırılır. Ölçülen değer, referans eğrisinin değerinden az olduğunda belli bir frekansta istenmeyen bir sapma olur. Yalnızca istenmeyen yöndeki sapmalar sayılmalıdır. α_w ağırlıklı ses absorpsiyonu, 500 Hz’de kaydırılan referans eğrisinin değeri olarak tarif edilir” denilmektedir. Ağırlıklı ses yutum katsayısını (α_w), referans eğrinin kaydırılması sonucu elde edilen 500 Hz değerindeki emilim değeri olmaktadır.



Frekans	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Değer	0,80	1,00	1,00	1,00	0,90

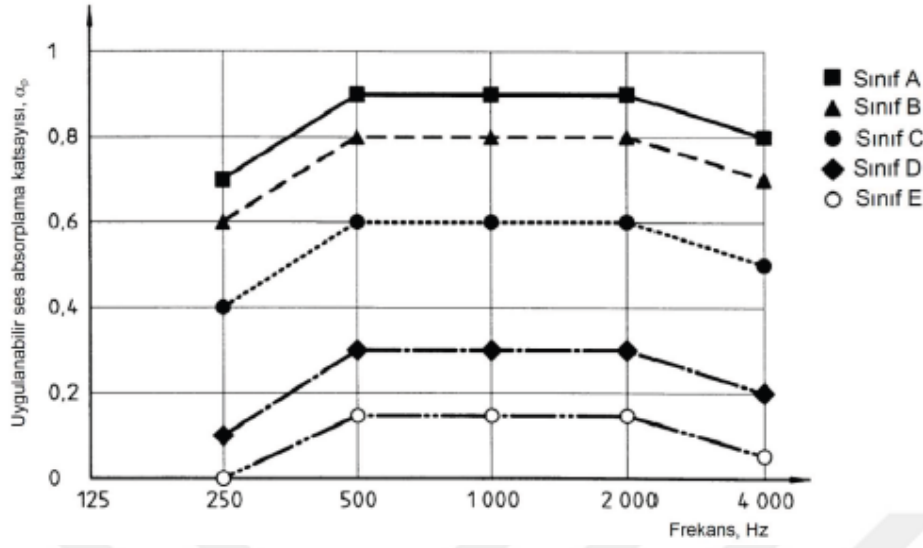
Şekil 2.6. Ağırlıklı ses yutum katsayısının değerlendirilmesi için referans eğri (TS EN ISO 11654:2002).

TS EN ISO 11654:2002 standardında şekil göstergeleri bulunmaktadır. Her α_{pi} uygulamadaki ses absorpsiyon kat sayısı kaydırılmış referans eğrisinin değerini 0.25 veya daha fazla geçtiği her durumda, bir veya daha çok şekil göstergesi, parantez içindeki α_w değerlerine eklenmektedir. 250 Hz’de aşırı emilim olursa L sembolü, 500 Hz veya 1000 Hz’de aşırı emilim olursa M sembolü ve 2000 Hz veya 4000 Hz’de aşırı emilim olursa H sembolü kullanılır.

TS EN ISO 11654:2002 standardında ayrıca ses emicilerinin sınıflandırılması α_w değerine göre tanımlanmıştır. Ses emici sınıfları ile ilgili bilgiler Tablo 2.9’da ve Şekil 2.7’de verilmektedir.

Tablo 2.9. Ses absorpsiyon sınıfları (TS EN ISO 11654:2002)

Ses Absorpsiyon Sınıfı	α_w
A	0,90; 0,95; 1,00
B	0,80; 0,85
C	0,60; 0,65; 0,70; 0,75
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55
E	0,25; 0,20; 0,15
Sınıflandırılmamış	0,10; 0,05; 0,00



Şekil 2.7. Farklı ses emilim sınıflarını belirleyen örnek referans eğriler (TS EN ISO 11654:2002)

Ağırlıklı ses yutum katsayısı (α_w) genel olarak yaygın yansımaya ses yutum katsayısı değerlendirmelerinde kullanılmaktadır (yaygın yansımaya ses yutum katsayısı ölçüm sonuçları çınlama odası ölçümleri ile elde edilmektedir). Ancak, Arenas ve diğ. tarafından gerçekleştirilen araştırmada, empedans tüpü ölçümleri doğrultusunda ağırlıklı ses yutum katsayısı (α_w) değeri hesaplanmıştır ve empedans tüpü ölçüm sonuçları doğrultusunda (dikey yansımaya durumuna göre) elde edilen ağırlıklı ses yutum katsayısı (α_w) değeri farklı karışımların kıyaslanabilmesi için verilmiştir (Arenas vd., 2016). Bu araştırma kapsamında, Arenas vd. tarafından gerçekleştirilen araştırmaya benzer bir yaklaşımla, empedans tüpü ölçüm sonuçları doğrultusunda ağırlıklı ses yutum katsayısı (dikey yansımaya tipine göre) elde edilmiş ve farklı karışımları sadece kıyaslayabilmek amacıyla ayrı bir parametre olarak verilmiştir.

2.6.3. Ses Yutumunun Ölçülmesi ve İlgili Standartlar

2.6.3.1. Empedans Tüpü Yöntemi

ASTM C384-04 nolu standartta, akustik malzemelerin empedans tüpü ile ses yutumunun ve empedansının ölçümü sırasında, numune boyutları ile ölçüm frekans aralığı arasındaki ilişki tanımlanmıştır.

$$f < 0,586 \frac{c}{d} \quad (2.15)$$

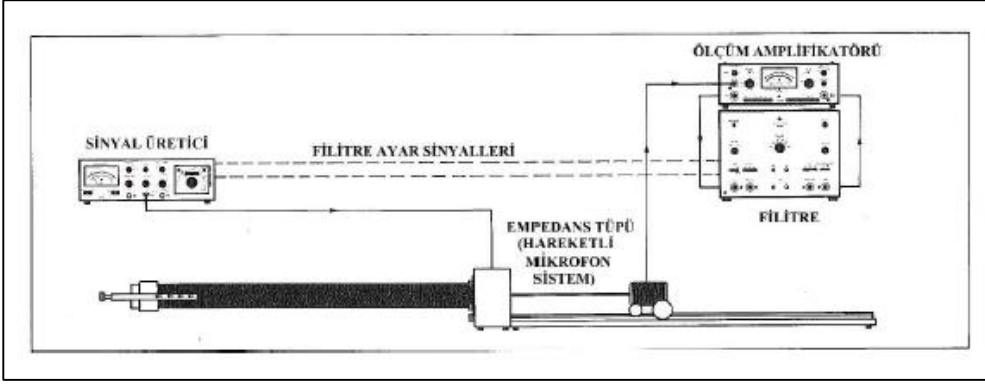
- f : Frekans (Hz)
c : Tüp içindeki sesin hızı (yaklaşık 344 km/s)
d : Empedans tüpünün çapı

Empedans tüpü çapına bağlı ölçülebilen frekans aralığı (yuvarlak numune tipine sahip sistem için) yukarıda verilmiştir. Bu doğrultuda, yüksek frekanslardaki ses yutum katsayısı ölçümleri için, düşük frekanslara oranla daha küçük numune çapına sahip numunelerin üretilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Literatürde empedans tüpü ile yapılan çalışmalara araştırmalara bakıldığında, yüksek frekansların emiliminin ölçülebilmesi için daha küçük numune çapına sahip örneklerin üretildiği görülmektedir.

EN ISO 10534-1:2001 standardı ise ses yutumunun belirlenmesi için empedans tüpü ölçümlerinde iki farklı ölçüm yöntemi kullanılmaktadır: Duran Dalga Yönteminde Hareketli Mikrofon Sistemi ve Transfer Fonksiyonu Yöntemi. Bu yöntemler ile ölçüm detayları aşağıda verilmiştir:

2.6.3.1.1. Duran Dalga Yöntemi

Empedans tüpünün içinde ilerleyen harmonik düzlemsel ses dalgaları ise tüpün başlangıç noktasına yerleştirilen bir hoparlör vasıtasıyla üretilir. Deney ortamının oluşturulması için, öncelikle sabit frekanslı harmonik sinyal üretebilecek bir sinyal üretici temin edilmelidir. Sinyal üreticinin çıkışı bir yükselteç ile (amplifikatör) empedans tüpünün içine yerleştirilen hoparlörün girişine bağlanmalıdır. Bu sayede, testi gerçekleştiren araştırmacı; genlik ve frekans değeri sinyal üreticisinde yapılacak bazı uyarlamalar ile belirlenebilen ve tüp içinde hareket eden bir “harmonik düzlemsel ses dalgası” üretebilecektir. Üretilen ses sinyalinin frekansı değiştirebilecektir. Empedans tüpünün içinde hareket ettirilen mikrofonun çıkışı ise bir bilgisayara aktarılarak; test ortamında ortaya çıkan durağan ses dalgasının (standing wave) tepe ve dip noktası değerleri kaydedilir. Elde edilen tepe ve dip noktalarının sayısal değerleri kullanılarak belirlenen frekans değeri için durağan dalga oranı hesaplanır. Bu yöntemin en büyük dezavantajı her bir frekans değeri için ölçümlerin tekrar yapılmasının gerekliliğidir (Tekerlekli sistem hareketli mikrofonla her frekans ayrı ayrı ayarlanıp ölçülmektedir). Teknolojinin ilerlemesiyle FFT (Fast Furrier Transform) tipi empedans tüpü geliştirilmiştir ve yerini yeni tip empedans tüpüne bırakmıştır.



Şekil 2.8. ISO 10534-1:2001 standardına göre ölçüm yapan empedans tüpü sistemi

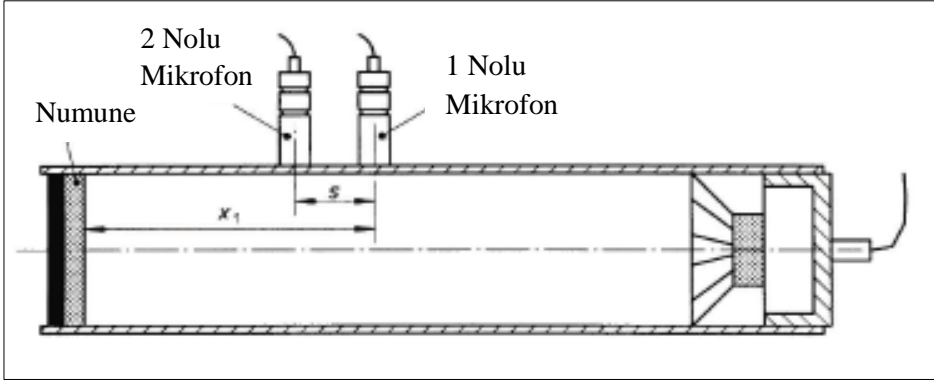
2.6.3.1.2. Transfer Fonksiyonu Yöntemi

Bu yöntemde en az iki adet mikrofon tüp içinde dikey olarak yerleştirilir. Duran dalga yönteminde yapılan her test işleminde yalnızca bir frekans için ölçümler gerçekleştirilmektedir. Fakat transfer fonksiyonu yönteminde tüm frekans aralıkları için gerekli olan ölçüm verilerinin yapılan tek bir test işleminde elde edilebilmektedir. Bunun için, tüpün içinde üretilen ses dalgaları, duran dalga yönteminden farklı olarak rastgele (random) veya periyodik rastgele (periodic pseudo random) sinyal formunda üretilir. Tüpün içinde rasgele ses dalgasının üretilmesi birbirinden farklı frekans değerlerine sahip ses dalgalarının oluşturduğu bir ses dalgası kümesinin tüpün içinde ilerlemesini sağlayacaktır. Bu sayede, çok geniş bir frekans spektrumunu kapsayan bir transfer fonksiyonu tek bir test süreci ile elde edilebilir. Test sürecinin kısaltılması, transfer fonksiyonu yöntemini empedans tüpü ölçümlerinde en çok tercih edilen yöntem yapmaktadır. Transfer fonksiyonu yönteminde, duran dalga yöntemiyle çok benzer bir test ortamı kullanılmaktadır. Ölçüm sistematığı açısından en önemli değişiklik hareket eden bir mikrofon yerine, empedans tüpüne dikey olarak sabitlenmiş iki adet mikrofon kullanılmasıdır. Bu yöntemde, sabitlenmiş iki mikrofonun üzerinde oluşan kompleks basınç farkını veya başka bir deyişle, kompleks basıncın bir mikrofondan diğer mikrofonu nasıl transfer edildiğini belirten kompleks transfer fonksiyonu H_{12} hesaplanır (EN ISO 10534-2:2001 ve Qiu, 2016).

$$H_{12} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{S_{12}}{S_{11}} \quad (2.16)$$

Burada;

- H_{12} : Mikrofon 1'den 2'ye transfer fonksiyonu
 S_{12} : Bir ve iki nolu hoparlörler arasındaki çapraz spektrum
 S_{11} : Birinci mikrofonun özerk spektrumu (Autospektrum)
 P_1 : 1 numaralı mikrofon ses basıncı
 P_2 : 2 numaralı mikrofon ses basıncı



Şekil 2.9. EN ISO 10534-2:2001 standardına göre empedans tüpü kesiti içerisindeki mikrofonun konumları ve uzaklık kodlamaları

Elde edilen transfer fonksiyonundan aşağıdaki denklem kullanılarak yansıtma katsayısı hesaplanmaktadır. Ayrıca formülden elde edilecek r değeri ile ses yutum katsayısı değeri elde edilmektedir ($\alpha = 1 - r^2$).

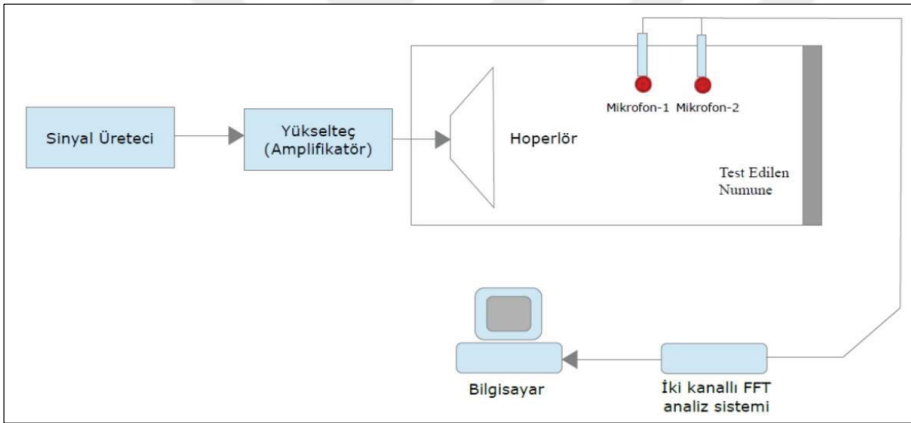
$$r = \frac{H_{12} - H_1}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \quad (2.17)$$

Burada;

- R : Kompleks yansıtma genliği oranı
 k_0 : Dalga numarası ($2\pi f/c_0$), (c_0 : sesin hızı, f : frekans)
 x_1 : Test numunesi ile ileri mikrofonun konumu arasındaki uzaklık
 H_{12} : Mikrofon 1'den 2'ye transfer fonksiyonu
 H_R : Gönderilen dalga transfer fonksiyonu ($H_R: e^{jk_0s}$)
 s : Mikrofonlar arası mesafe
 H_1 : Yansıyan dalga transfer fonksiyonu ($H_1 = e^{-jk_0s}$)

Ayrıca, transfer fonksiyonu yönteminde, ölçüm öncesinde bazı kalibrasyon ayarlarının yapılması gereklidir. Gelişen teknolojisi ile transfer fonksiyonu yöntemini esas alarak üretilen empedans tüpü deney setleri yansıtma katsayılarını, her bir frekans için otomatik olarak hesaplayabilmekte ve yansıtma katsayılarına karşılık gelen ses emilim katsayılarını veri çıktıları olarak bilgisayara aktarabilmektedir.

Transfer Fonksiyonu Yöntemi Test Ekipmanları: Duran dalga yönteminden farklı olarak, transfer fonksiyonu yönteminde iki adet dikey olarak sabitlenmiş mikrofon ve bu mikrofonlardan elde edilen verileri analiz eden iki kanallı FFT analiz sistemi (Fast Fourier Transformation Analyze System) kullanılmaktadır. Test sistemi Şekil 2.10'da betimlenmiştir. EN ISO 10534-2:2001 standartlarına uygun bir FFT analiz sistemi, iki mikrofon arasındaki ses basıncı farkı olarak tanımlanan H_{12} transfer fonksiyonunu otomatik olarak hesaplayabilmelidir.



Şekil 2.10. EN ISO 10534-2:2001 standardına göre ölçüm yapan empedans tüpü sistemi (FFT analiz)

2.6.3.2 Çınlama Odası Ölçüm Yöntemi

Bu yöntemde empedans tüpünden farklı olarak gibi dikey gelen sesin emilimi değil de, yaygın gelen sesin yutum katsayısı ölçülebilmektedir. Ölçümler çınlama odasının içerisinde gerçekleştirilmekte olup, Çınlama Odasının hacminin minimum 150 m^3 olması gerekmektedir. EN ISO 354 (2003) standardında yeni yapılarda çınlama odasının hacminin 200 m^3 den fazla olması önerilmektedir. Ayrıca standartta, çınlama odası hacminin 500 m^3 'ten büyük olması durumunda yüksek frekanslardaki ses emilim katsayısı havanın emiliminden

etkilenerak doğru sonuç vermeyebileceği belirtilmiştir. Çınlama odasının boyutları aşağıdaki formüle uymalıdır.

$$I \max < 1,9 V^{\frac{1}{3}} \quad (2.18)$$

Burada;

$I \max$: Odanın maksimum boyutu (metre)

V : Odanın hacmi (metreküp)

BS EN ISO 266 (1997) nolu standartta 1/3 oktav bant frekansları tanımlanmıştır. 1/3 oktav bantlara göre 200 m³ oda hacmi için maksimum eşdeğer ses emme alanı Tablo 2.10'da verilmektedir. Tablo 2.10'da, üretilecek numunelere ait ses emilimi alanı 200 m³ hacim için verilmiş olup diğer kullanılacak farklı boyut hacimlerde eşdeğer ses emilim alanlarını $(V/200\text{m}^3)^{2/3}$ formülü ile çarpmak gerekmektedir.

Tablo 2.10. Maksimum eşdeğer ses emme alanları, $V= 200 \text{ m}^3$ için (EN ISO 354:2003)

Frekans, Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Oda hacmi için eş değer ses emme alanı, m ²	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
Frekans, Hz	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Oda hacmi için eş değer ses emme alanı, m ²	6.5	7.0	7.5	8.0	9.5	10.5	12.0	13.0	14.0

Standartta eş değer ses yutum alanı (A_T) metrekare cinsinden aşağıda verilen formül yardımıyla hesaplanabilir.

$$A_T = A_1 - A_2 = 55,3V\left(\frac{1}{c_2T_2} - \frac{1}{c_1T_1}\right) - 4V(m_2-m_1) \quad (2.19)$$

Burada;

C_2 : Sesin lm esnasındaki sıcaklığa bağlı hızı havadaki yayılma hızı (m/s), t_2 sıcaklığına göre

A_T : Deney numunesinin eş değer ses yutum alanı (m²)

A_1 : Boş çınlama odasının eş değer ses yutum alanı (m²)

- A_2 : Deney numunesi içeren çınlama odasının eş değer ses yutum alanı (m^2)
- V : Boş çınlama odasının hacmi (m^3)
- C_1 : Sesin ölçüm esnasındaki sıcaklığa bağlı hızı havadaki yayılma hızı (m/s), t_1 sıcaklığına göre
- C_2 : Sesin ölçüm esnasındaki sıcaklığa bağlı hızı havadaki yayılma hızı (m/s), t_2 sıcaklığına göre
- T_1 : Boş çınlama odasının saniye cinsinden çınlama süresi (s)
- T_2 : Deney numunesi yerleştirildikten sonra çınlama odasının çınlama süresi (s)
- m_1 : Ölçme boyunca boş çınlama odasında mevcut olan iklim şartları kullanılarak ISO 9613 - 1' e göre hesaplanan güç azalma kat sayısıdır ($m = \alpha / 10 \lg(e)$) (1/m).
- m_2 : Ölçme boyunca deney numunesi bulunan çınlama odasında mevcut olan iklim şartları kullanılarak ISO 9613-1' e göre hesaplanan güç azalma kat sayısıdır ($m = \alpha / 10 \lg(e)$) (1/m).

Ses emilim katsayısı α_s , düz yüzey emici için Denklem 2.20 yardımıyla hesaplanır.

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (2.20)$$

Burada;

- α_s : Ses yutum katsayısı
- A_T : Deney numunesinin eş değer ses yutum alanı (m^2)
- S : Deney numunesinin kapladığı alan (m^2)

Gözenekli malzemeler iki fazdan oluşur; ilk faz katı fazdır ve iskelet olarak bilinir. İkinci fazı gözeneklerin içinde bulunan hava oluşturur. İskelet kısmı genellikle lifler, plastik köpükler ve seramik oluşturur (Lanoye, 2007). Çok sayıda gözenekli malzeme bulunmaktadır. Bu malzemelere örnek olarak; lifli malzemeler örneğin yün, kaya yününden oluşan yüzeyler, köpük, taneli yapılar ve bitkisel binderler verilebilir. Gözenekli malzemelerde ses enerjisi

gözenek içinde hareket ederken ses dalgaları hava ile sürtünür ve sürtünme sonucu ısı açığa çıkar. Yani gözenekli malzemelerde ses enerjisi kayıp ısı şeklinde depolanarak absorblanır.

Genel anlamda, ses yutum katsayıları 0.15'den düşük olan malzemeler yansıtıcı, 0,4'den büyük olan malzemeler ise sesi yutan malzemeler olarak kabul edilir. Ses yalıtımında bir malzemenin ses iletim katsayısının küçük değer alması ve ses iletim kaybı değerinin ise büyük değer alması istenmektedir. Bir malzemenin ses iletim kaybı; frekansa, malzeme özelliklerine ve özellikle yüzey yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir (Özgüven, 1986).

Bir yüzey sesin %85'ini yansıtması demek o yüzeyin ses yutum katsayısının $\alpha = 0.15$ olması demektir. Bu katsayı değeri malzemelerin iç yapısına bağlı olarak değişkenlik gösterir (Eriç, 1994). Ses yutum özelliği frekansa da bağlı olarak değişmektedir. Gözenekli olan malzemelerde, frekansın yükselmesi ses yutum katsayı değerinin de artmasına yol açar. Sesin absorblanması sadece yansıyan sesi azaltmaktadır, sesin bir yapı elemanından geçmesini azaltmamaktadır. Bu durumda yansımanın az olabilmesi için, ses yutum katsayısının büyük değer alması gerekir. Yansıma değerinin fazla çıkması yankıya yol açmaktadır ve bu durumun işitme koşullarını bozduğu görülmüştür (Onaran 1999).

Taş, sert bir yapıya sahip olmasından dolayı ses yutum katsayısı değeri düşük çıkmaktadır. Doğal taşlardan mermerin 500 Hz için ses yutum katsayı değeri 0.01 (Eriç, 1994). Agregata ve çimento hamurunun içinde bulunan bağlantısız kapalı ve içi hava dolu gözenekler, ses ve su geçirgenliğini azaltmaktadır (Olin vd., 1995). Pişmiş toprak ürünlerinin yoğunluğu, sertlik ve yüksek yoğunluklara sahip olmasından kaynaklı çok az miktarda ses yutum özelliği gösterirler (Smith ve Andres, 1988). Sıvasız tuğlanın 500 Hz için ses yutum katsayı değeri 0.02-0.05, fayans 0.01, sırlı seramikte ise 0.01- 0.02 arasındadır (Eriç, 1994; Gürdal vd., 2000).

Handisycle (1967), yaptığı bir çalışmada beton yapı elemanları ses yalıtım açısından yeterli düzeyde olmadığını ve betonun sert yapıya sahip bir malzeme olmasından kaynaklı darbe sesini büyük bir oranda iletildiğini ifade etmiştir. Bu sebeple ses yalıtımı ile ilgili problemler için çeşitli önlemler alınması gereklidir. Diğer yapı malzemelerinde olduğu gibi beton da kendi ağırlığı oranında ses yalıtımı sağlamaktadır. Betonun birim hacim ağırlığı arttıkça yoğunluğu da artmaktadır ve buna bağlı olarak ses geçirimsizliği azalmaktadır. Ancak betona sıva benzeri bir bitiş malzemesi eklenmesiyle, ağırlığının bir miktar arttırılmasından daha iyi yalıtım sağladığı ifade edilmiştir.

Tablo 2.11. Bazı malzemelerin 500 Hz için ses yutum (α) katsayıları (Eriç, 2002)

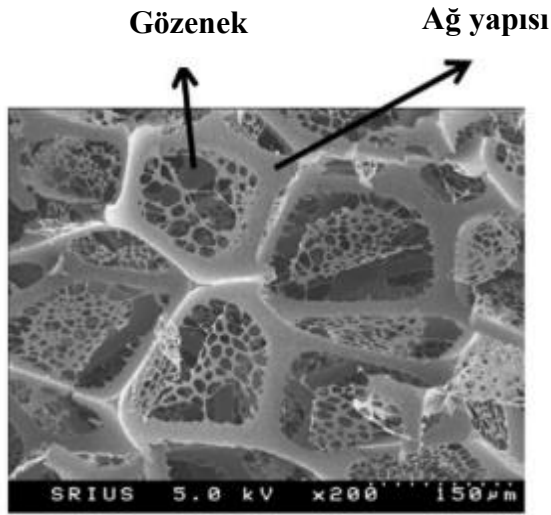
Malzeme	500 Hz için α (m/sn)
Açık pencere	1.00
Kapalı pencere	0.03
Düz sıva	0.02
Pürüzlü sıva	0.03
Beton	0.03
Mermer, fayans	0.01
Tuğla (sıvasız)	0.05
Ahşap kapı	0.06
Masif ahşap	0.06
Lata üzerine kontraplak veya elyafli plak	0.15
Taş yünü döşeme	0.08
Lastik döşeme	0.08
Ahşap döşeme	0.06
Linolyum döşeme	0.03
Halı döşeme	0.15
Boş maroken koltuk	0.20
Boş ahşap sandalye	0.05
İnce perde	0.20
Kalın perde	0.40
İnsan	0.40
Akustik plaklar	0.20 - 0.80

Betonun birim hacim ağırlığı arttıkça, sesi yansıtması da artmaktadır. Betonun 500 Hz için ses yutum katsayı değeri 0.02, çimento ve kireç ile yapılan harçta 0.02 alçı ile yapılan harçta ise 0.03 olmaktadır (Eriç, 1994).

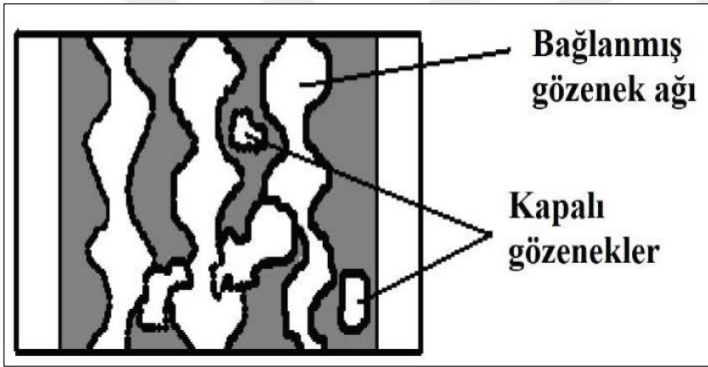
Tablo 2.12. Bazı malzemelerin frekansa bağlı ses yutum (α) katsayılarının değişimi (Asdrubali, 2011)

Malzeme	Kalınlık mm	Yoğunluk kg/m ³	Ses Yutum Katsayısı (α)				
			250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	Ortalama
Cam yünü	50	50	0.45	0.65	0.75	0.80	0.663
Kaya yünü	50	80	0.29	0.52	0.83	0.91	0.638
Polistren	50	28	0.22	0.42	0.78	0.65	0.518
Poliüretan	50	30	0.30	0.68	0.89	0.79	0.665
Poliyeten	50	32	0.25	1.00	0.40	0.70	0.588
Polyester	45	20	0.56	0.85	0.98	0.95	0.835
Kenevir lifi	40	40	0.59	0.60	0.56	0.52	0.568
Kenaf lifi	50	50	0.48	0.74	0.91	0.86	0.748
Mineral yün lifi	50	470	0.25	0.65	0.60	0.55	0.513
Keten lifi	35	43	0.66	0.84	0.79	0.53	0.705
Hindistan cevizi lifi	35	70	0.28	0.40	0.64	0.74	0.515
Kamış lifi	50	130	0.46	0.86	0.71	-	0.676
Koyun yünü	60	25	0.24	0.38	0.62	0.84	0.520
Genleştirilmiş Kil Agregası	50	460	0.66	0.94	1.00	0.81	0.853
Selüloz	50	28	0.60	0.90	0.75	0.53	0.695
Lastik Granül	5	1400	0.20	0.82	0.50	0.56	0.520

Beranek ve Ver (2006) yaptıkları çalışmada malzemelerin açık ve kapalı gözeneklilik olmak üzere iki farklı gözeneklilik tipi bulunduğunu ve porozite formülünü kullanarak açık gözeneklilik oranının hesaplanabildiğini ifade etmişlerdir. Ses emilim mekanizmasının etkili olabilmesi için, yüzey boyunca birbirine bağlı hava kanallarının ve bu nedenle açık gözenek yapısının olması gerektiği belirtilmiştir (Cox ve D'Antonio, 2005).



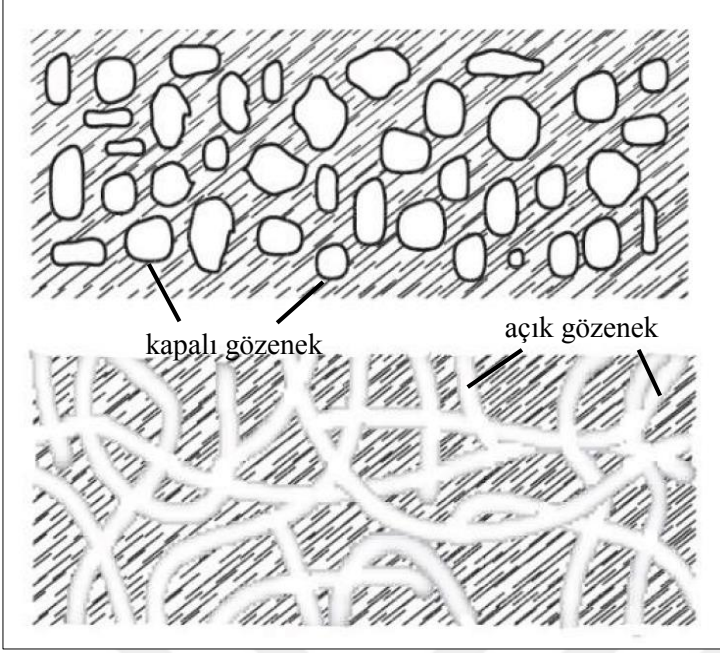
Şekil 2.11. Gözenekli malzeme kesit görüntüsü (Descheemaeker, 2011)



Şekil 2.12. Malzeme kesitindeki bağlanmış gözenek ağı ve kapalı gözeneklerin tanımlanması (Bilova ve Lumnitzer, 2011).

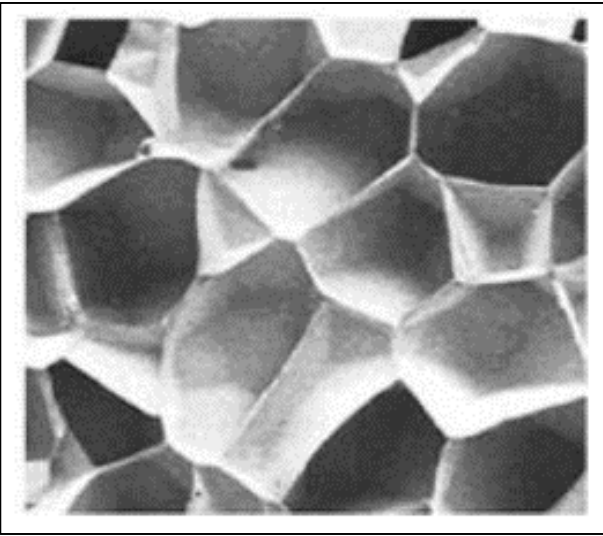
Yoğunluğu az olan malzemelerin sesi absorblaması daha fazla olmaktadır. Sesin absorblanmasında gözenek yapısı da önemlidir; içteki gözeneklerin yüzey gözenekleri ile bağlantılı olması ses yutum katsayısı artmaktadır (Addleson, 1972).

Açık hücreli köpük plastikler daha yüksek su ve nem emme kapasitesine, daha yüksek gaz ve buhar geçirgenliğine, daha az ısı veya elektrik yalıtımına ve daha iyi ses ve nem emilimine sahiptir (Ünal ve Yetgin 2008).

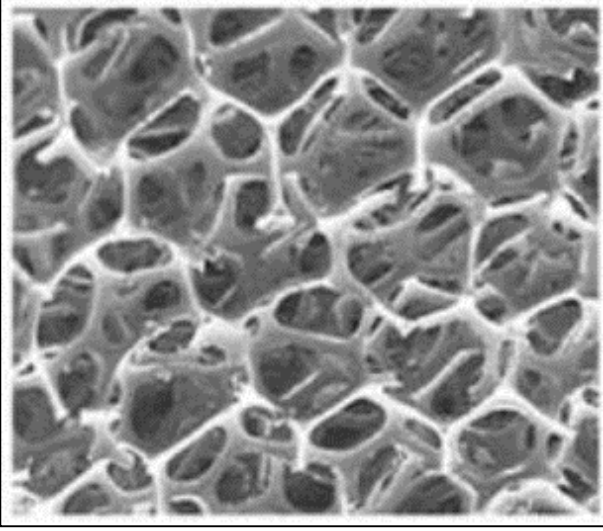


Şekil 2.13. Malzeme içerisindeki açık ve kapalı gözenek sistemi farkı (Cox ve D'Antonio, 2005).

Açık hücreli köpük, duvarlardaki oluşan delikleri nedeniyle kapalı hücre malzemelerine kıyasla daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Açık hücreli köpükler, kapalı hücreli malzemelerden daha iyi ses absorpsiyona sahiptir. Kapalı hücrelerin duvarlarında delik bulunmadığı için ve içindeki gazların kaçışına izin vermediği için basınç dayanımları yüksektir (El Khodor, 2020).



Şekil 2.14. Tüm gözeneklerin polimer matris duvarları ile sınırlandırıldığı kapalı hücreli bir yapı modeli (Anonim, 2020b).



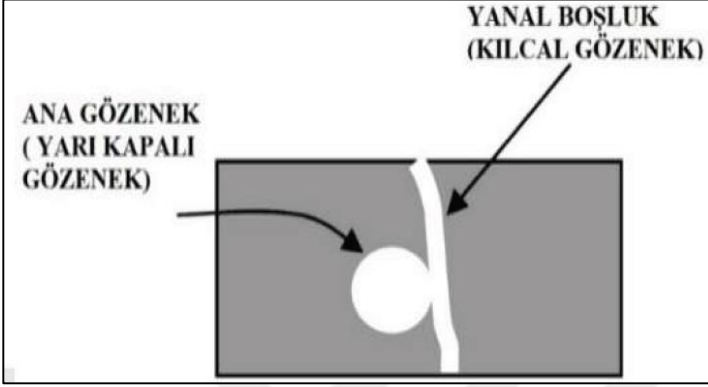
Şekil 2.15. Sürekli bir ağ oluşturan açık hücre yapısı (Anonim, 2020b).

Yapılan çalışmada, açık gözeneklilik oranı arttıkça maksimum ses yutum katsayısı değerinin arttığı gözlemlenmiştir (Knapen vd., 2003). Açık gözeneklilik arttıkça ses yutum katsayısının maksimum olduğu frekans değerinin, yüksek frekanslara doğru kaydığını ve ses yutum katsayısının tepe noktasının gözeneklilik değeri arttıkça azaldığı görülmüştür. İç gözenek çapının artmasıyla ses emiliminin tepe noktasının azaldığını ifade edilmiştir. (Neithalath, 2004). Palomar ise çalışmasında, açık gözeneklilik oranı arttıkça ses yutum katsayısına ait NRC değerinde genel anlamda düşüş gözlemlenmiştir (Palomar vd., 2015).

Yapılan literatür araştırmalarında, açık gözeneklilik oranının artışına bağlı olarak ses emiliminin her zaman artmadığı gözlemlenmiştir. Ses emilimini etkileyen diğer faktörlerin etkisiyle açık gözeneklilik oranı azaldıkça ses emilim katsayısı bazı durumlarda artabilmektedir. Neithalath ve Knapen'nin yapmış olduğu ses emilimi nümerik modeller doğrultusunda açık gözenekliliğin tek başına ses emilim katsayısını belirlemediği, gözenek tipinin, boyutunun, dağılımının ve gözenekler arası bağlantı kanallarının da malzeme içerisindeki sesin yayılımını önemli düzeyde etkilediği anlaşılmıştır. Açık gözeneklilik oranının azaldığında bile gözenek çapı ve küçük-büyük gözenek ilişkisinin ses yutumunu arttırabilen unsurlar olduğu anlaşılmaktadır (Neithalath, 2004; Knapen vd., 2003; Palomar vd., 2015; Meriç vd., 2014; Cox ve D'Antonio, 2005).

Gözenek yapısı ile ilgili olan, farklı tipteki gözeneklerin birbirleriyle ilişkisini dikkate alan diğer bir parametre ise “yapı faktörü (structure factor, ks)” dır. Gözenekli malzemelerde

açık gözeneklerin oluşturduğu kılcal boşluklara bağlanan kısmen kapalı yapıdaki bazı gözenekler ses dalgasının kılcal yollar içerisinde oluşturduğu akışta etkin bir rol oynamazlar. Yapı faktörü, açık gözeneklilik değeri için kullanılan bir düzeltme faktörüdür ve açık gözeneklilik değerinin, malzeme içindeki akışta etkin olan gözeneklerin hacmine bölünmesi ile bulunur. Malzeme içindeki akışta etkin olan gözeneklilik, “etkili gözeneklilik” veya “akustik gözeneklilik” olarak adlandırılmaktadır (Neithlah, 2004; Meriç vd., 2014).

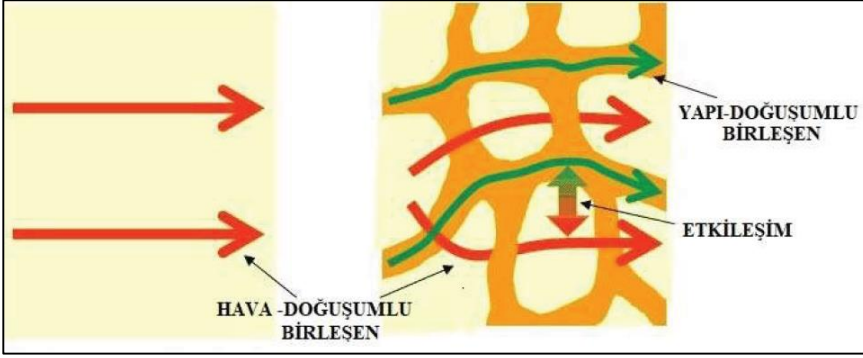


Şekil 2.16. Ses emiliminde etkili gözeneklerin tanımlanması (Meriç vd., 2014).

Gözenekli malzemeler, gözeneklerle birlikte alternatif sıralı kanallardan oluştuğu için, yapı faktörü veya yapı form faktörü (k_s), önemli gözenek yapı özelliğini temsil eder. k_s gözenek içindeki akıştan ve geometrik yapıdan bağımsız değildir. k_s değeri genel olarak 3 ve 7 değeri aralığında bulunduğu belirtilmekte ve 1 ‘den büyük değer alabilmektedir (Neithlah, 2004; Zwicker ve Kosten, 1949). Numerik model çalışmasında, yapı faktörünün artış göstermesiyle maksimum ses emilimi azalma göstermiştir, (Neithlah, 2004).

Gözeneklilik yapısını araştıran akustik modelleme çalışmalarında, açık gözeneklilik parametresinin tek başına, malzemenin ses yutum niteliklerinin tayininde belirleyici bir özellik olmadığı, gözenek boyutu ve yapısal karakteristiklerin de malzemenin ses yutuculuğunu etkilediği anlaşılmaktadır (Meriç vd., 2014).

Sesin malzeme içerisinde sergilediği yayılım ile serbest havada sergilediği yayılım birbirinden farklı olmaktadır. Malzemenin yapısal formu sesin malzeme içerisindeki yayılımında etkili olmaktadır (Bilova ve Lumntzer, 2011).



Şekil 2.17. Dalganın havada yayılımı ile gözenekli malzemedeki yayılımının tanımlanması (Bilova ve Lumnitzer, 2011).

Bükümlülük (tortuosity) malzemenin yapısal formu olan gözeneklerin kıvrımları ve iç gözenek yollarını göz önünde tutar. Bükümlülük (tortuosity), yüksek frekanslardaki sesin havadaki ve numune içerisindeki hava akışı hız farklılıkları düzeyi üzerinde etkili olmaktadır (Beranek ve Ver, 2006).

İletken akışkan ile gözenekli doymuş katı numunenin elektriksel iletkenliğini tanımlamak için kullanılan oluşum faktörü (formation factor), bükümlülük (tortuosity) ile ilgilidir. Bükümlülük (tortuosity) doymuş gözenekli numunesin iletkenlik değerinin doymuş akışkan ile karşılaştırılması sonucu elde edilen elektrik iletkenlik tekniği kullanılarak ölçülebilmektedir (Beranek ve Ver, 2006).

$$\sigma = \frac{GL}{A} \quad (2.21)$$

Burada;

- σ : Elektrik iletkenliği
- L : Numunenin uzunluğu
- A : Numune bitişinin alanı
- G : Numune üzerine uygulanan gerilim sonucu elde edilen akım oranı

$$F = \frac{\sigma_s}{\sigma_f} \quad (2.22)$$

Burada;

σ_f : Akışkanın elektrik iletkenliği

σ_s : Doymuş numunenin elektrik iletkenliği

Elektrik iletkenliği Denklem 2.23 yardımıyla edilmektedir (Beranek ve Ver, 2006).

$$T = \frac{F}{h} \quad (2.23)$$

Burada;

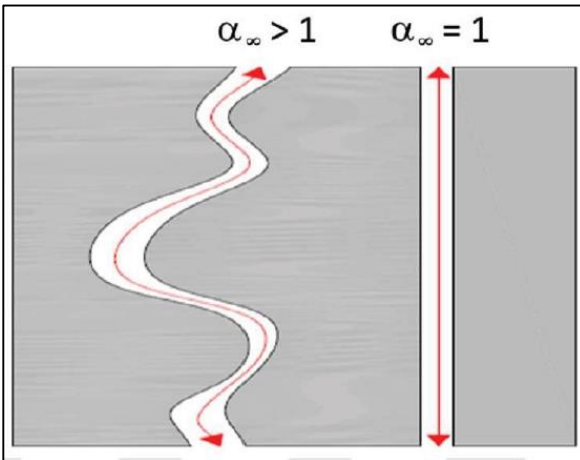
T : Bükümlülük

F : Oluşum faktörü

h : Numunenin porozitesi

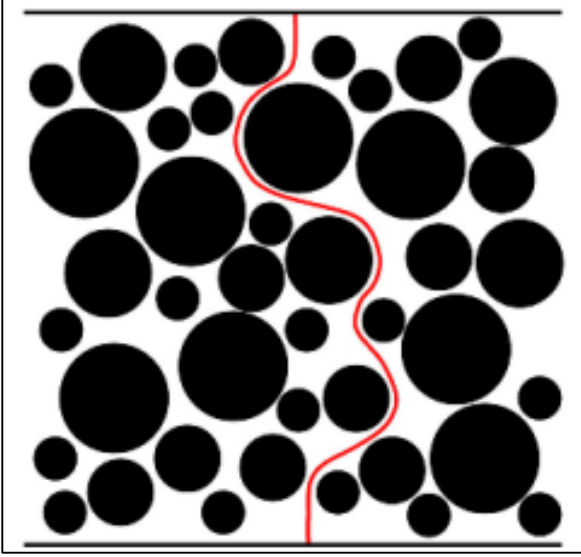
Gözeneklerin oluşturduğu kanalların malzeme içinde ne kadar kıvrımlı bir yol izlediğini gösteren bir özellik olan “bükümlülük (tortuosity)”, bazı kaynaklarda “yapı şekil faktörü (structural form factor)” olarak da adlandırılmaktadır (Cox ve D’Antonio, 2005; Meriç vd., 2014).

Bükümlülük, malzeme içindeki birbirine bağlı gözeneklerin oluşturduğu ses yayılım kanalının uzunluğunun malzemenin kalınlığına bölünmesi ile bulunur. Şekil 2.18’de geçen “ α_∞ ” simgesi bükümlülüğü ifade etmekte olup, malzemedeki ses yayılım kanalı, malzeme kalınlığına eşit olduğu durumda bükümlülük “1”e eşittir; bükümlülük arttıkça, bükümlülük değeri 1’in üzerine çıkmaktadır. Taneli yapıdaki gözenekli pek çok malzemede bu değer “1” in üzerinde olmaktadır (Meriç vd., 2014).



Şekil 2.18. Malzeme bükümlülük özelliğinin gösterimi (Meriç vd., 2014).

Bükümlülük değeri azaldığında, maksimum ses yutum katsayı değeri artmakta ve maksimum ses emilimin gerçekleştiği frekansın da daha yüksek frekanslara doğru ötelendiği ifade edilmektedir. (Knapen vd., 2003).



Şekil 2.19. Ses dalgasının gözenekli malzemede izlediği yol (Tjaden vd., 2016)

Statik hava akışı direnci, genel anlamda malzemenin öz direnci kaynaklı azalım, gözenekli numunelerin tanımlanmasında açık gözeneklilik ile birlikte kullanılan temel iki parametreden biri olmaktadır. Kısmen düşük frekanslarda visko atalet etkisi olarak karakterize edilebilir. Sesin havadaki titreşimi, materyal içerisindeki titreşiminden daha rahat olarak gerçekleşeceği ve sesin materyal içerisindeki yayılımı havadakine göre daha zor olacağı tahmin edilebilmektedir. Farklı bir değişle, akış direnci sesin materyal içerisindeki yayılım zorluğu olarak tanımlanır (Bilova ve Lumtizer, 2011).

Beranek ve Ver, ince gözenekli malzemelerin akustik davranışını tanımlarken akış direncinin en önemli parametre olduğunu belirtmiştir (Beranek ve Ver, 2006).

Gözenekli malzemelerin akış direnci olan R_1 , birim kalınlıktaki spesifik akış direnci olarak tanımlanır. BS EN 29053 (1993) ve ISO 9053 (11)'nolu standartta akış direnci aşağıda verilen formülle tanımlanmaktadır.

$$R = \frac{\Delta p}{q_v} \quad (2.24)$$

Burada;

- R : Test numunesinin hava akış direnci, saniyede m³ cinsinden (Pa)
Δp : Hava akışı basınç farkı, test düzeneği boyunca atmosfere göre basınç farkı (Pa)
q_v : Volumerik hava akışı oranı, saniyede m³ cinsinden

Test numune örneğinin içinden geçen spesifik hava akış direnci, aşağıda verilen formül ile bulunur.

$$R_s = RA \quad (2.25)$$

Burada;

- R : Hava akış direnci, saniyede m³ cinsinden
A : Kesit alanı, m², test numunesi akış yönüne dik konum

Standartta ayrıca hava akış öz direnci (air flow resistivity) tanımlanmıştır. Malzeme homojen olarak düşünülürse, Denklem aşağıdaki formül doğrultusunda hesaplanır.

$$r = \frac{R_s}{d} \quad (2.26)$$

Burada;

- r : Hava akış öz direnci, saniyede m³ cinsinden (Pa)
R_s : Spesifik Hava akış direnci, saniyede m³ cinsinden (Pa)
d : Numune kalınlığı (test numunesinin akış yönüne dik doğrultusu)

Akış direnci 25 kPa/m² değerine kadar artmasıyla ses emilimi genel olarak artış göstermiş, sonraki akış direnci değer artışlarında ses emilimi genel olarak azalmaya başlamıştır.

Genel anlamda, akış direncini artması ile ses emilimini başta arttırmış, belli bir değerden sonra akış direncinin artması ile yansıtıcılık oranının artmaya başlamasıyla emilim değeri azalmaya başlamıştır, (Vigran, 2008).

Seddeq ses emilimini etkileyen akış direnci üzerinde yapmış olduğu araştırmada kalın ve ince malzemelerin genel olarak spesifik akış direncini değerlendirmiş, (akış direnci yerine spesifik akış direncini karşılaştırmış, akış direnci/m²) Spesifik akış direnci 1000 mks. Rayls/m değerine kadar artış gösterdiği takdirde emilim katsayısı artmakta olup, spesifik akış direncinin 1000 mks. Rayls/m değerinden sonraki artışlarında emilim katsayısı azalmaktadır, (Seddeq, 2009).

40mm, 80 mm ve 120 mm olacak şekilde üç farklı kalınlıkta numuneler üretilmiş ve ses emilim değerleri karşılaştırılmıştır. 40mm kalınlıktaki numunenin düşük frekanslardaki ses yutum katsayısı etkinliğinin en az olduğu görülmüştür (Şekil 2.38). Ses emiliminin fazla olduğu değerler (tepe noktası) birbirine yakın bir değer almış olsalar da, maksimum emilimin gözlemlendiği frekans değerleri farklılaşmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda, farklı kalınlıktaki benzer içeriğe sahip numunelerin farklı emilim karakteri sergilediği anlaşılmaktadır (Arenas vd., 2016).

Deney sonucunda, farklı kalınlıktaki benzer içeriğe sahip numunelerin farklı emilim karakteri sergilediği anlaşılmaktadır. Bu araştırmada numune kalınlığı artış gösterdikçe düşük frekanslardaki ses yutum etkinliğinin artış gösterdiği görülmektedir, (Kim ve Lee, 2010).

Farklı kalınlıktaki numunelerin ses emiliminin fazla olduğu değerler (tepe noktası) birbirinden farklı olduğu ve ayrıca maksimum emilimin de gözlemlendiği frekans değerlerinin de birbirinden farklı olduğu gözlemlenmektedir. Numune kalınlığı arttıkça maksimum emilimin gözlemlendiği tepe noktaları artış göstermiştir. Ayrıca numune kalınlığı arttıkça düşük frekanslardaki ses yutum katsayısı değerleri genel anlamda artış sergilemiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, farklı kalınlıktaki benzer içeriğe sahip numunelerin farklı emilim karakteri sergilediği anlaşılmaktadır (Bartolini vd., 2010). Deneysel araştırma sonucunda, farklı kalınlıktaki benzer içeriğe sahip numunelerin farklı emilim karakteri sergilediği anlaşılmıştır. Kalınlık artışına bağlı olarak düşük frekanslardaki ses emilim etkinliğinin arttığı görülmektedir, (Neithlah, 2004).

Bu çalışmada, betonun ısıl ve akustik davranışı üzerine işlenmemiş iri kömür agregasının ve polipropilen lifin etkisini değerlendirmeyi amaç edinmiştir. beton karışımı farklı polipropilen içeriğine (%0, %1 ve %2) ve işlenmemiş iri kömür agrega içeriği %0-30 doğal iri agrega ile yer değiştirmesiyle üretilmiştir. İşlenmemiş kömür iri agregası ve polipropilen lifin her ikisinin dahil edilmesiyle betonun ses yalıtımı ve gürültü azaltma davranışı önemli bir şekilde gelişti. 2000 Hz'de normal agrega ile %30 işlenmemiş kömür agregasının yer değiştirilmesi ve %2 polipropilen lif eklenmesiyle betonun %67 ses yutum katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir (Karimipour vd., 2021).

Glé vd. üç tip bağlayıcının gözeneklilik oranı incelerken a ve b tipi bağlayıcının gözeneklilik oranı % 50 civarlarında olduğunu, c tipi bağlayıcının ise gözeneklilik oranının %39 civarında olduğunu söylenmiştir. C tipi doğal çimento bağlayıcısının ses emilimi diğer iki bağlayıcı tipine göre daha az olmaktadır. Bu sonuçtan yola çıkarak, C bağlayıcı tipine ait emilim değerinin az olmasının gözeneklilik oranından kaynaklı olabileceğini tahmin edilmiştir (Glé vd., 2011).

Horoshenkov ve Swift (2001), yaptıkları bir araştırmalarında, farklı boyutlardaki kauçuk taneler ile poliüretan bağlayıcı maddenin basınç altında sıkıştırılması ile hazırlanan numunelerin bağlayıcı madde oranı ile ses yutum katsayısı arasındaki ilişkiyi sorgulanmıştır. Gerçekleştirilen çalışma neticesinde, genel anlamda malzeme içindeki bağlayıcı malzeme miktarı arttıkça, ses yutum katsayı değerlerinin azaldığı anlaşılmaktadır.

Glé vd., kenevir agrega kullanarak hazırlanan kenevir beton numune örneklerinde, bağlayıcı madde oranının ses yutuculuğuna olan etkisi sorgulanmıştır. Farklı bağlayıcı oranına sahip numuneler üretilmiştir. Bağlayıcı oranının artmasının gözeneklilik oranını azalttığı ve bu sebepten dolayı ses emiliminde güçlü bir azalma yaşandığı belirtilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, malzeme içerisindeki bağlayıcı oranının artmasının ses yutum değerini genel anlamda azalttığı anlaşılmaktadır, (Glé vd., 2011)

Genleştirilmiş perlit, kil keramzit (genleştirilmiş kil) ve cüruf agregayı gözenekli beton uygulamalarında deneyerek ses yutum katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bağlayıcı tipi olarak portland çimentosu kullanılmıştır. Agregası tipinin ses yutum katsayısına büyük etkisinin olduğunu belirtilmiştir. Üç farklı tip agrega kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş ve en yüksek NRC değeri perlit agregası tipi kullanılarak elde edilmiştir (Zhao vd., 2014).

%0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranında cüruf agreganın hacimsel olarak kullanılmıştır. En büyük NRC değerine cüruf agrega oranının %0 olduğu perlite agreganın %100 oranında bulunduğu karışımda elde edilmiştir ve cüruf oranı artış gösterdikçe NRC değeri azaldığı ifade edilmiştir (Zhao vd., 2014).

Araştırmada, agrega olarak kırma taş yerine temel oksijen fırını cürufunun kullanılmasının ses emilimini olumlu yönde etkilediği vurgulanmıştır. Ayrıca kalınlık artışına bağlı olarak düşük frekanslardaki ses yutum katsayısının arttığı anlaşılmaktadır. (Shen vd., 2009).

Medina vd. yaptıkları araştırmanın sonucunda, kırıntı kauçuk oranının artmasına bağlı olarak ses yutum düzeyinin artırabileceği ifade edilmiştir (Medina vd., 2016).

Gandoman ve Kokabi yaptıkları bir çalışmada üretilen numunelerin ses emilimini karşılaştırmış ve atık kauçukların ses emilime olumlu faydasının olabildiği belirtilmiştir, (Gandoman ve Kokabi, 2015).

Karışımın toplam hacmi değişmeyecek şekilde ince agreganın yerine deneylerde kırıntı kauçuk kullanılmıştır. Ses emilimi artış gösterirken geçirgen boşluk oranı, kauçuk miktarı arttıkça azalmaktadır, (Sukontasukkul, 2009).

Stankevičius vd. (2007) kauçuk katkılı akustik sıvaların özelliklerini incelemiş ve sıva harcına ince agreganın yerine %30 oranında kırıntı kauçuk eklenmiştir. Bağlayıcı miktarını, su miktarını ve kaba agrega oranını değiştirilmemiş olup ince agreganın yerine kırıntı kauçuk kullanılmıştır. Kırıntı Kauçuk katkılı sıva ile normal sıvanın karşılaştırmasını yapılmış ve kırıntı kauçuk katkılı sıvanın ses emilim değerinin daha fazla olduğunu belirtilmiştir.

Dere kumu agrega (tane boyutları 2 ile 4 mm aralığında olan) kullanılarak hazırlanan karışımlarda, bağlayıcı oranı üzerine araştırmalar gerçekleştirilmiş ve genel olarak bağlayıcı oranının azalmasına bağlı olarak ses yutum katsayısının artış gösterebildiği tespit edilmiştir. Ses yutum katsayısının arttırılabilmesi için bağlayıcı oranının azaltılması iyi bir yaklaşım olabilmektedir (Bozkurt, 2019).

Çok ince agreganın kullanılmasının ses yutum katsayısını olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Dere kumu ve pomza agrega ile hazırlanan karışımlarda, polipropilen lif, keten lif takviyesinin ve agrega yerine kırıntı kauçuk kullanılması düşük frekanslardaki ses

yutum katsayısını arttırdığı ve hafif agrega kullanılması ile NRC değerinin artış gösterdiği tespit edilmiştir. Keten lif takviyesinin NRC değerini ve genel anlamda açık gözeneklilik oranını da arttırdığı görülmüştür. Keten lif takviyesinin eğilme dayanımı üzerinde dikkate değer bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Son olarak keten lif katkısının eğilme dayanımını olumsuz etkileyebildiği görülmüştür (Bozkurt, 2019).

Demiryolu gürültüsünü azaltabilmek amacıyla demiryolu beton kaplaması üzerinde gerçekleştirilen bir araştırmada, agrega boyutlarının ses emilimine olan etkisi üzerinde araştırmalar yürütülmüştür. Bu kapsamda agregaları elek aralıklarını 0 ~ 2mm, 1 ~ 3mm ve 1~5mm olmak üzere üç farklı boyutsal derecelendirme içerisinde incelenmiştir. 1 ~ 3 mm elek aralığı diğer üç aralığa nazaran daha iyi NRC değerine sahiptir. 0 ~ 2mm elek aralığı diğer üç aralığa nazaran daha düşük NRC değerine sahip olmaktadır. Agrega boyutu oldukça küçük olduğunda, iç gözeneklerin ve iç açıklıkların tıkanıdığı ve hava akış direncinin arttığı söylenmiştir. Ayrıca agrega boyutunun küçülmesi kullanılan çimento hamurunun artması beraberinde getirdiği ve bu durumun agregalar arasındaki gözeneklerin küçülmesine sebebiyet verdiği açıklanmıştır. Bu durumdan dolayı ses dalgasının efektif olarak gözenekli malzemenin içerisinde hareket edemediği söylenmiş ve ses yutum katsayısında dikkate değer bir azalma gözlemlendiği belirtilmiştir. Aksi olarak agrega boyutu büyüdüğünde, gözeneklerin ve aralıkların arttığı ve uygun bir akustik emilim performansı elde edildiği açıklanmıştır (Zhao vd., 2014). Çok küçük boyutta agrega kullanmanın (çok ince kum boyutlarında) ses yutum katsayısını olumsuz etkilediği görülmüştür (Arenas vd., 2016).

Agrega boyutlarının küçülmesiyle genel anlamda ses yutum katsayısı da artmakta olduğu gözlemlenmektedir. Bu değişimde bağlayıcı oranın azalması da etkili olduğunu söylemek gerekir. Her iki farklı agrega tipinde de (hafif agrega- geliştirilmiş kil ve normal agrega – öğütülmüş çakıl) agrega boyutu azaldıkça karışımlarda bağlayıcı oranı azalmaktadır (Kim ve Lee, 2010).

Araştırma sonucunda, aralıklı- gradasyonlu agrega kullanmanın (GGA) gürültü azaltım katsayısı olan NRC değerini arttırmak için iyi bir yöntem olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca çok ince boyutta agrega kullanıldığı takdirde NRC değerinin azaldığı anlaşılmaktadır (Palomar vd., 2015).

Deneysel çalışmalarda karakteristik çapı 3.5 mm olan boyuttaki agrega karışımının ses yutum katsayısı, değerlerine göre en fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu deneysel çalışmada

bağlayıcı oranları farklı olarak karışımlara eklendiği için bağlayıcı oranının etkisi göz ardı edilmemelidir (Karakteristik çapı 3.5 mm boyuttaki agreganın bağlayıcı/ agreganın ağırlık oranı 0.108 değerini, karakteristik çapı 6.5 mm boyuttaki agreganın bağlayıcı/ agreganın ağırlık oranı 0.2 değerini, karakteristik çapı 8.5 mm boyuttaki agreganın bağlayıcı/ agreganın ağırlık oranı 0.325 değerini ve karakteristik çapı 12 mm olan boyuttaki agreganın bağlayıcı/ agreganın ağırlık oranı 0.216 değerini almaktadır), (Vasina vd., 2006).

Neithalath (2004) ve Marolf vd. (2004) yaptıkları araştırmalarda agreganın boyutu ile gözenekli betonların ses yutumu arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Üç farklı tane boyutuna sahip agregalar içeren çalışmalarının sonucunda tane boyutunun küçülmesi ile ses emilim katsayısının iyileştiğini ifade etmişlerdir. (Neithalath, 2004; Marolf vd., 2004).

Agreganın boyutunun genel olarak azalması durumunda ses yutum katsayısının artış gösterebildiği anlaşılmaktadır. Ayrıca karışım sisteminin farklı bir karakter sergileyebileceği ve tepelerinin değişiminde farklı karışım tiplerinin etkili olduğu anlaşılmaktadır (Neithalath, 2004). Üretilen numunelerde ince agreganın oranı arttıkça ses emilim oranının genel anlamda azaldığı belirlenmiştir. Eklenen kumun gözeneklerde blok etkisi oluşturduğunu belirtilmiş ve bunun sonucunda ses yansımalarının artış gösterdiği söylenmiştir (Neithalath, 2004).

Yapılan araştırmada, agreganın tane boyutu üzerinde gerçekleştirilen deneylerin sonucunda, deneyde kullanılan agreganın tane boyutu değişikliğinin ses emilimine etkisinin diğer incelenen bağlayıcı oranı, bağlayıcı tipi, gibi parametreler kadar etkili olmadığı belirtilmiştir. Üç tane boyutunun da 400 Hz aralığında ses emiliminin birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, küçük tane boyutunun kullanılmasının etkisi daha çok 400 Hz aralığından sonra gözlemlenebilmektedir. Deney sonucu elde edilen grafikten özellikle 400Hz değerinden sonraki frekanslarda küçük tane boyutunda agreganın kullanmanın ses emilimini arttırdığı anlaşılmaktadır (Glé vd., 2011).

Gözenekli beton kaplamasında polipropilen lif katkı oranları % 0.1 , % 0.2 , % 0.3 , %0.4 ve %0.5 olacak şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, düşük frekanslarda (500 Hz değerinin altındaki frekanslarda) fiber oranının artmasının ses yutum katsayısını olumsuz etkilediği açıklanmıştır. 500 Hz frekansının üzerindeki yüksek frekans değerlerinde ise fiber oranının artmasının ses yutum katsayısı artışına sebep olduğunu

belirtilmiştir. NRC değeri ile ses yutum katsayısı değerlendirmesinde, hazırlanan beş farklı karışım içerisinde en iyi sonucun %0.3 oranında fiber katkıli karışımından elde edildiği açıklanmıştır (Zhao vd., 2014).

Selüloz lif içermeyen karışım tipi ile üretilen numuneler, % 2 oranında (toplam agrega hacmine oranla) selüloz lif içeren karışım tipi ile üretilen numuneler ve %4 oranında (toplam agrega hacmine oranla) selüloz lif içeren karışım tipi ile üretilen numuneler karşılaştırılmıştır. Selüloz lif oranı %2 olduğu zaman NRC değeri artış gösterdiği ve selüloz lif oranının %4 oranında olduğunda NRC değerinin azaldığı deneysel sonuçlarında gösterilmiştir (ölçüm aralığı sebebiyle NRC hesaplamasında 2000 Hz yerine 1500 Hz değerini göz önünde tutulmuştur), (Palomar vd., 2015).

%0, % 0.5 ve % 1.5 oranında polipropilen lif içeren numunelerin ses emilim katsayısı grafik üzerinde gösterilmiştir. Bu agrega tipinde polipropilen lif katkısının ses emilimine çok ciddi katkısının olduğu görülmektedir. Bu durumun oluşmasında eklenen liflerin gözenek boyutlarını azalttığı ve bu durumun sonucu olarak da akustik yansımanın azaldığı belirtilmiştir (Neithlah, 2004). Neithalath tarafından gözenekli beton üzerine yapılan araştırmada, üç farklı agrega aralığında üretilen numunelerdeki lif katkısının etkisini anlatabilmek için maksimum ses yutum katsayıları karşılaştırılmıştır. Kullanılan agrega boyutunun küçülmesinin maksimum emilim değerinin artışını azalttığı anlaşılmaktadır (Neithlah, 2004).

Neithalath tarafından gözenekli beton üzerine yapılan araştırmada, üç farklı agrega aralığında üretilen numunelerdeki lif katkısının etkisini değerlendirebilmek için gözeneklilik oran incelenmiştir. Gözeneklilik oranı ile polipropilen lif oranı arasında bir orantı olmadığı anlaşılmaktadır. Sonuçlar, lif katkısının gözeneklilik üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Liflerin gözenekleri doldurarak gözeneklilik oranını azaltabilse de agregaları ayırmasıyla olumlu etki sergileyebilmektedir (Neithlah, 2004).

Jiang vd. tarafından polyester lif katkısının, klorlanmış polietilen kompozelerdeki ses emilimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Polyester lif oranının artışının ses emilimin de etkilediği belirlenmiştir. Özellikle 1600 Hz'den sonraki yüksek frekanslarda lif katkısının ses emilimi üzerinde çok etkili olduğu ve ses emilim katsayısını arttırabildiği anlaşılmaktadır (Jiang vd., 2012).

Karışımlarda kullanılan selüloz lif oranları farklılaştırılmış ve değişen lif oranlarına göre ses emilimi karşılaştırılmıştır. Selüloz lifleri sırasıyla %0, %1.5, %3 , %4.5 , %6 ve %7.5 oranında karışım hacmine eklenmiştir. Selüloz lifler üzerine gerçekleştirilen araştırmada selüloz lif katkısının ses emilim değerini olumlu etkileyebildiği belirtilmiştir, (Neithalath vd., 2004).

Keten lifleri, M.Ö. 5000'den beri Mısırlılardan günümüze kadar kullanılan bir bitki olan (linum usitatissimum) keten bitkinin sap ve gövdesinden elde edilmektedir. Ketenin yetiştirilmesi kolaydır ve gübreleme ya da arındırma işlemine gerek duymadan herhangi bir toprakta yetiştirilip işlenebilir (Kırbyık, 2012). Keten bitkisi yaklaşık %70 selüloz içerir. Keten lifleri havayı muhafaza ederek iyi yalıtım özellikleri gösterir. Liflerin elastikiyeti ayrıca darbe ses yalıtkanları olarak kullanılmasını sağlar. Keten panellerin ve ruloların yoğunluğu 20 ile 100 kg/m³ arasında, ısı iletim katsayısı 0.038 ile 0.075 W/m.K arasında ve özgül ısı kapasitesi 1.4 ile 1.6 kJ/kg.K arasındadır. Keten lifleri genellikle mekanik direnci arttırmak için pol-yester ile, ateş ve güve direncini arttırmak için bor tuzları gibi katkı maddeleri ile karıştırılır (Kymäläinen ve Sjöberg, 2008).

El Hajja vd., çekilmiş keten (kısa lifler) ve bazı keten ürünlerinden oluşan yenilikçi bir malzemenin ısı ve akustik performansını değerlendirmiştir. Test edilen malzeme sentetik bağlayıcı içermeyip 0.060W/m.K'lik bir ısı iletim katsayısına ve yaklaşık 170 kg/m³ yoğunluğa sahiptir. Bu yeni malzemenin akustik özellikleri 2 mm kalınlığındaki bir panel için 500 Hz'den yüksek frekanslarda test edilmiş ve ses yutum katsayısı 0.4'den yüksek olduğu belirlenmiştir (El Hajja vd., 2011).

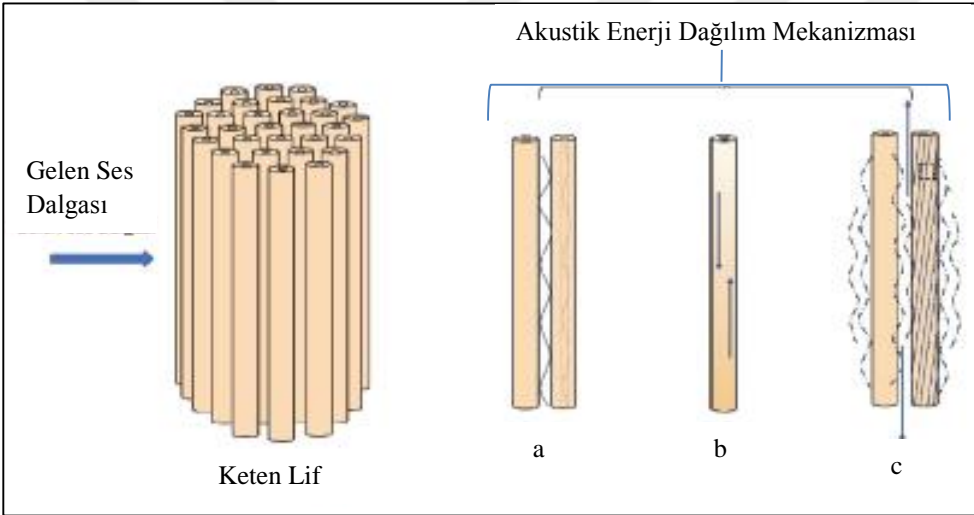
Keten ve kenevir, yüksek performanslı ısı yalıtım malzemesi üretmek için birlikte karıştırılabilir. En iyi performans gösteren karışım malzemesinin ısı iletim katsayısı 0.033 W/m.K'dir (Kauriinvaha vd., 2001).

Keten lifi, mıcır ve sentetik bir bağlayıcıdan yapılmış 32 kg/m³'lük yoğun bir numune üzerinde yapılan ölçümler 0.043 W/m.K'lik bir ısı iletim katsayısı ve 2.9 su buharlı direnç faktörünü göstermiştir (Korjenic vd., 2011).

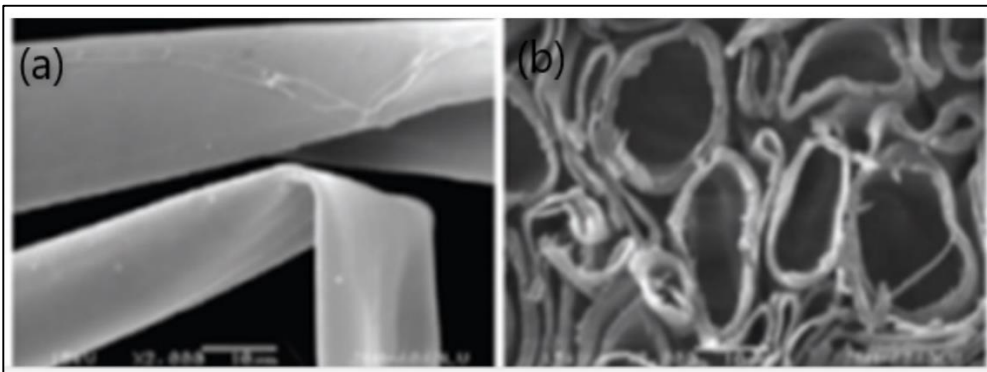
Keten ve cam lif şeritlerinden oluşan tabakaların ses yutum katsayılarının belirlendiği bir çalışmada; yoğunluk farklılığına bağlı olarak cam lifi içerikli numunelerin kalınlıklarının yaklaşık % 50 daha ince olduğu belirlenmiştir. Buna bağlı olarak, 250-4000 Hz frekans

aralığında daha kalın olan keten lifi içerikli numunelerin çok daha iyi ses yutum performansı sergilediği gözlemlenmiştir (Zhang vd., 2018)

Araştırmacılar aynı frekans aralığı için cam lifi içerikli numunenin ses yutum katsayısının 0.5'in altında kaldığını ifade etmişler ve bu durumu şöyle açıklamışlardır: “Gelen ses enerjisi lifler arasındaki ve lümenler içerisindeki hava moleküllerinin titreşimine sebep olurlar. Bu da hava ile lif hücre duvarı arasında bir etkileşime sebep olur. Bunun sonucu olan viskoz direnç, akustik enerjinin bir kısmını ısı enerjisiye çevirir. Bu esnada, lifin komşu partikülleri arasındaki ısı alışverişine bağlı olarak da ses yutumu sağlanır. En önemlisi ise, cam liflerinin rijit yapılarından farklı olarak keten liflerinin titreşim yapabilmesi sayesinde ses enerjisi ısı enerjisine kolaylıkla dönüşebilmektedir (Zhang vd., 2018). Keten liflerin akustik enerji dağılım mekanizması Şekil 2.20’de, boyuna ve enine kesiti ise Şekil 2.21’de verilmiştir.



Şekil 2.20. Keten liflerin akustik enerji dağılım mekanizması (Zhang vd., 2018)



Şekil 2.21. Keten Lifin (a) Boyuna ve (b) Enine Kesiti (Zhang vd., 2018; Bos, 2004)

Ketende polyester lif kullanılmadığında atık ürünleri tekrar kullanılabilir, geri dönüştürülebilir ve gübre üretimi için de kullanılabilir. Kenaf liflerinin ısı iletim katsayısı

0.034 ve 0.043 W/mK arasında yoğunluğu 30 ve 180 kg/m³ arasında özgül ısıları 1.6 – 1.7 kJ/kg.K arasındadır. Bazı kenaf esaslı malzemelerin akustik yutum katsayısı 500 Hz'den daha yüksek frekanslar için 0.2'nin üzerinde ve 1000 Hz'den daha yüksek frekanslar için 0,4'ün üzerindedir. Ayrıca dinamik sertlik 27.7 MN/m³ kadar düşük olabilir (Schiavoni vd., 2016).

Xu vd., bağlayıcı olmadan üretilmiş yenilikçi bir kenaf panelin ısı yalıtım ve akustik yutum özelliklerini test etmişlerdir. Bu panellerin ısı iletim katsayısı yoğunluğuna bağlı olup 0.040 W/m.K'den (100 kg/m³'e eşit yoğunlukta) 0.060 W/m.K'e (250 kg/m³) kadar değişir (Xu vd., 2004).

Ses yutum katsayısı geleneksel malzemeler için gözlenen değerlere benzerdir. Daha hafif malzemeler daha iyi bir akustik yutum performansı gösterebileceği ifade edilmiştir (D'Alessandro ve Pispola, 2005)

Kenevir hint kenevirinden üretilen genellikle polyester lif ve yangın geciktiricilerle karıştırılmış bina uygulamaları için kullanılan bir tekstil lifidir. Kenevirin ısı iletm katsayısı 0.038 ila 0.060W/m.K arasında yoğunluğu 20 - 90 kg/m³ arasında ve özgül ısı 1.6 – 1.7 kJ/kg.K arasındadır. Kenevir esaslı malzemeler her doğal materyal gibi havadan büyük miktarda su emme eğilimi gösterirler ve bunun sonucunda ısı iletim katsayıları artar (Zach vd., 2013).

Kymäläinen vd. tarafından gerçekleştirilen karşılaştırmalı pazar ve performans analizi çalışmasında kenevir lifi malzemesi öncelikle daha uzun bir kullanım süresine olanak tanıyan biyolojik bozunabilirlik, düşük ısı iletken katsayısı ve bazı ekolojik özellikleri nedeniyle ısı yalıtım malzemesi olarak potansiyelini kanıtlamıştır (Kymäläinen ve Sjöberg, 2008).

Bununla birlikte, bu malzemelerin nem, kemirgenler, böcekler ve serbest suya karşı korunması gerekir. Korjenic vd. kenevir lifleri (% 64 ve % 48), mısır (sırasıyla % 16 ve % 32) ve bir bağlayıcı kullanılarak elde ettikleri numuneleri test etmişlerdir. Yoğunluğu 82 kg/m³ olan malzeme için ölçülen en düşük ısı iletim katsayısı değeri 0.039 W/m.K bulunmuştur (Korjenic vd., 2011).

Kenevir mıcırı, bağlayıcı ve su karıştırılarak oluşturulan yenilikçi bir materyal Glé ve vd. tarafından geliştirilmiş ve çalışılmıştır. Çalışmada ısı iletim katsayısı yaklaşık 0,060

W/m.K ve 150 Hz üzerinde en iyi performans gösteren karışım için ses yutum katsayısı yaklaşık 0.5 olarak elde edilmiştir (Glé vd., 2011).

Kenevir verimli toprağa ihtiyacı yoktur, gübrelemeye gerek duymaz, hızlı büyür ve kolay işlenebilir. Atık kenevir esaslı malzemeler geri dönüştürülebilir veya atık toplama alanlarında imha edilebilir. Vermikülit, volkanik magma kaynaklarından elde edilen bir mineraldir. Yüksek sıcaklık (800 - 1100 °C) altında işlenerek hacmi genişler, geçirgenliği artar ve hacim ağırlığı belirgin bir şekilde düşerek şekil değiştirir. Elde edilen ürün çok hafif, temiz, kokusuz ve sterildir (Kırbyık, 2012).

Tuğla ve hafif betonlarda bağlayıcı malzeme olmadan (tane boyutu 0.1 - 15 mm) veya bir bağlayıcı madde ile karıştırılarak kullanılabilir ve ısı yalıtım performansı uzun bir süre için sabittir (Maderuelo-Sanz vd., 2016; Sütçü, 2015; Schackow, 2014). Çoğu mineral malzeme gibi kemirgenler ve böcekler tarafından hasar görmez. Genleştirilmiş vermikülitin ısı iletim katsayısı 0.062 – 0.090 W/m.K arasındadır. Bağlayıcı ile karıştırıldığında 0,080 ve 0.100 W/mK arasındadır. Serbet (sıkıştırılmamış) malzemenin yoğunluğu 85 ve 105 kg/m³ arasında ve özgül ısı 0.8 ve 1 kJ/kg.K arasındadır (Kırbyık, 2012). Diğer granüllü malzemelerde olduğu gibi gözenekli ortamda iyi akustik performans doğru tane boylarını seçerek, doğru bağlayıcı yoğunluğunu ve kalınlıklarını kullanarak elde edilebilir (Maderuelo-Sanz vd., 2016). Malzeme ekolojik olarak inorganiktir ve 20 yıl boyunca yapısı bozulmaz. Çok yüksek su tutma kapasitesine sahiptir. Ekstra hafif ağırlıktır. Yüksek havalanma kapasitesine sahiptir. Absorbe edilen sıvıları yavaşça serbest bırakma özelliği yanında düşük ısı geçirgenliği ile yüksek ısı yalıtım özelliğine sahiptir (Kırbyık, 2012). Genleştirilmiş vermikülit zararsız olup ısıtıldığında tehlikeli gazlar açığa çıkartmadığından güvenli bir şekilde kullanılabilir. Kullanım ömrünün sonunda yeniden kullanılabilir veya beton için agrega olarak geri dönüştürülebilir (Fassi ve Maina, 2009; Suvorov, 2003)

Hafif genişletilmiş kil agrega yüksek sıcaklıklarda kil genişleme işlemleri kullanılarak üretilmiş hücreli bir malzemedir (Pargana, 2014). Granüllü malzeme serbest veya sıva ile karıştırılarak kullanılabilir. Ayrıca hafif beton üretimi için de kullanılır (Del Coz Díaz, 2013). Bu malzemelerin ısı iletim katsayısı oldukça yüksektir (0,08-0,20 W/m.K), ancak yüksek yoğunlukta (290-750 kg/m³) düşük ısı yayılım katsayısı seviyelerinin elde edilebilir. Hafif genişletilmiş kil agreganın özgül ısı 0.9 – 1.0 kJ/kg.K arasında değişmektedir (Schiavoni vd., 2016). Genleştirilmiş kil geniş bir frekans aralığında ses emici olarak

etkin bir şekilde kullanılabilir. Aynı zamanda beton veya dolgu alanları atığı için agrega olarak geri dönüştürülerek de kullanılabilir (Asdrubali ve Horoshenkov, 2002).



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Çimento

Deney çalışmasında, Votorantim Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'nin Yozgat Çimento fabrikasında üretilen CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentoya kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3.1' de verilmiştir.

Tablo 3.1. CEM I 42,5 R Portland çimentosunun özellikleri

Kimyasal Bileşim	
Bileşen	(%)
MgO	2.6
SiO ₂	18.7
Al ₂ O ₃	5.48
Fe ₂ O ₃	3.01
Na ₂ O	0.23
K ₂ O	1.22
SO ₃	3.25
CaO	62.3
Kızdırma Kaybı	2.57
Çözünmeyen Kalıntı	0.84
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık g/cm ³	3.11
Özgül Yüzey cm ² /g.	3319

3.1.2. Agregası

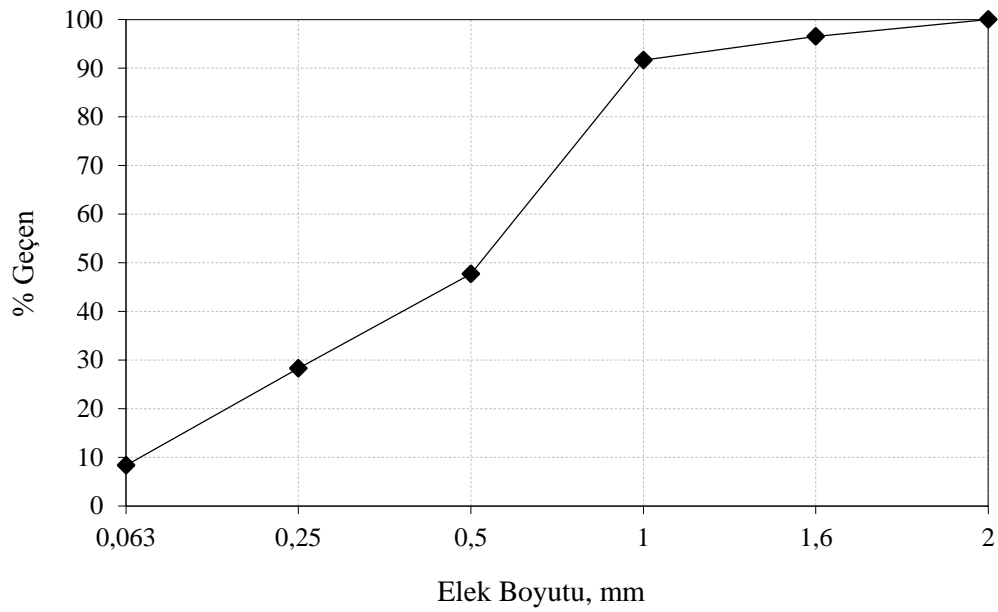
Harç üretiminde ince agregası olarak 0 - 2 mm boyutunda kırma kum, genişletilmiş kil agregası, pomza, genişletilmiş vermikülit, kauçuk kullanılmıştır.

3.1.2.1. Kırma Kum

İnce agrega olarak özgül ağırlığı 2.65 ve su emme oranı % 9 olan kalker kökenli 0-2 mm boyutunda kırma kum kullanıldı. Kırma kum agregası Resim 3.1’de, agregaya ait tane dağılım eğrisi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Resim 3.1. Kırma kum agregası



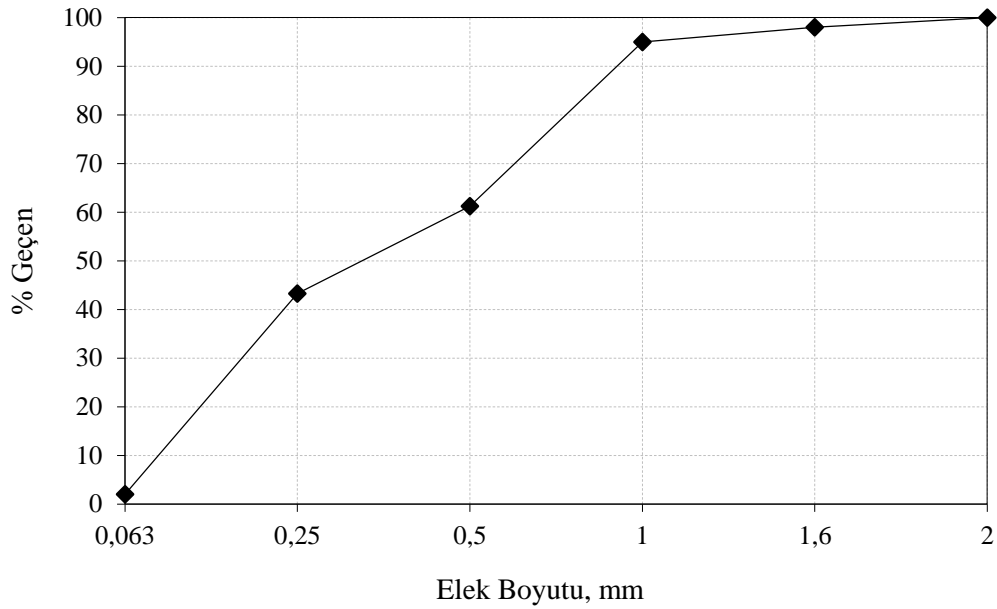
Şekil 3.1. Kırma kum agregasına ait tane boyut dağılım eğrisi

3.1.2.2. Genleştirilmiş Kil

İnce agrega olarak özgül ağırlığı 2.28 ve su emme oranı % 9,12 olan Söğüt Toprak Madencilik Sanayi A.Ş' den temin edilen 0-2 mm boyutunda genleştirilmiş kil kullanıldı. Genleştirilmiş kil agregası Resim 3.2'de, agregaya ait tane dağılım eğrisi Şekil 3.2'de verilmiştir.



Resim 3.2. Genleştirilmiş kil agregası



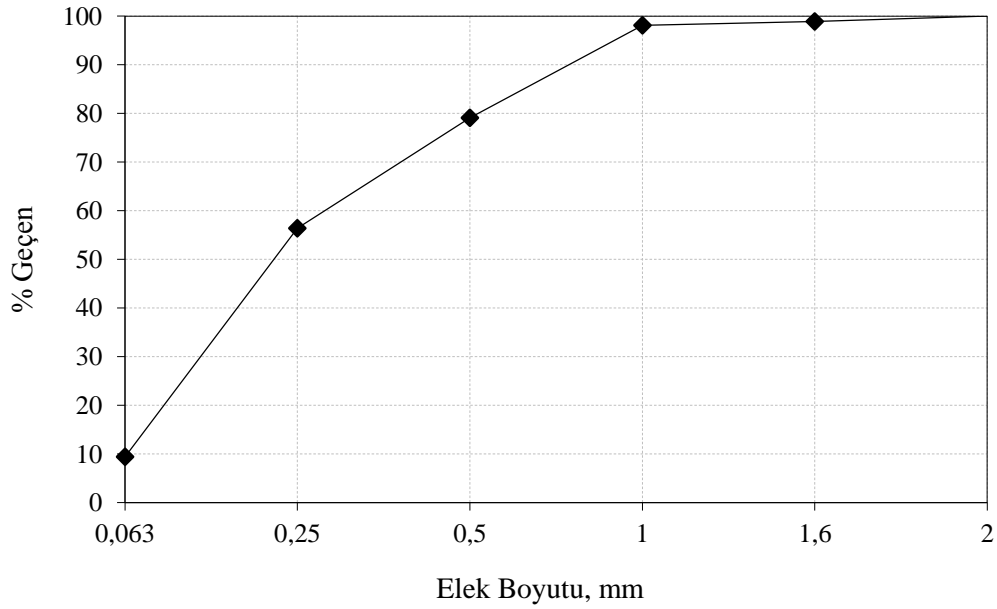
Şekil 3.2. Genleştirilmiş kil agregasına ait tane boyut dağılım eğrisi

3.1.2.3. Pomza

İnce agrega olarak özgül ağırlığı 2,14 ve su emme oranı % 29,81 olan Kayseri ili Develi bölgesinden temin edilen 0-2 mm boyutunda pomza kullanıldı. Pomza agregası Resim 3.3’de, agregaya ait tane dağılım eğrisi Şekil 3.3’de verilmiştir.



Resim 3.3. Pomza agregası



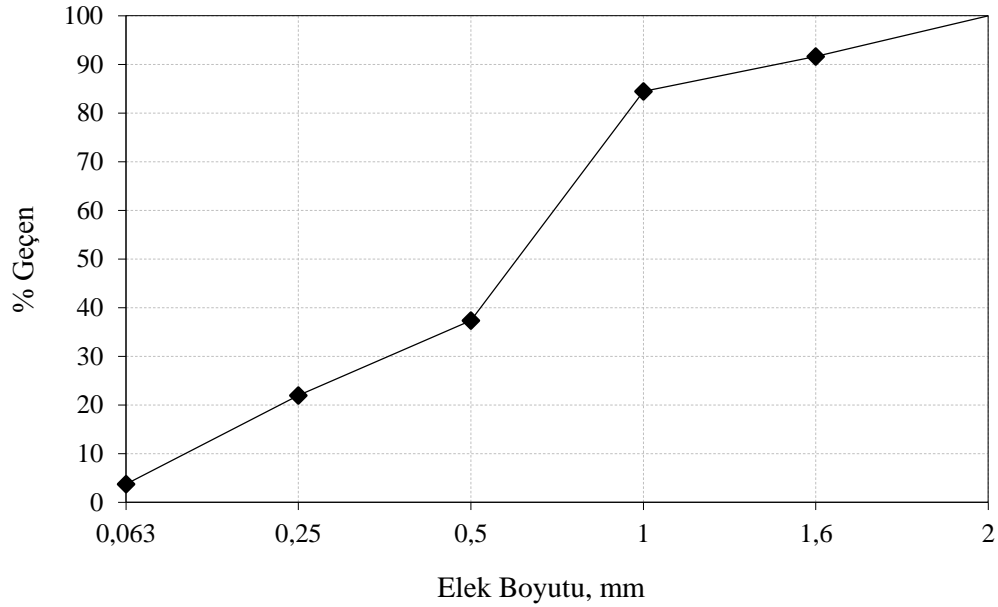
Şekil 3.3. Pomza agregasına ait tane boyut dağılım eğrisi

3.1.2.4. Genleştirilmiş Vermikülit

İnce agrega olarak özgül ağırlığı 0,95 ve su emme oranı % 40,32 olan İzmir Tartes Firmasından temin edilen 0-2 mm boyutunda genleştirilmiş vermikülit kullanıldı. Genleştirilmiş vermikülit agregası Resim 3.4'de, agregaya ait tane dağılım eğrisi Şekil 3.4'de verilmiştir.



Resim 3.4. Genleştirilmiş vermikülit agregası



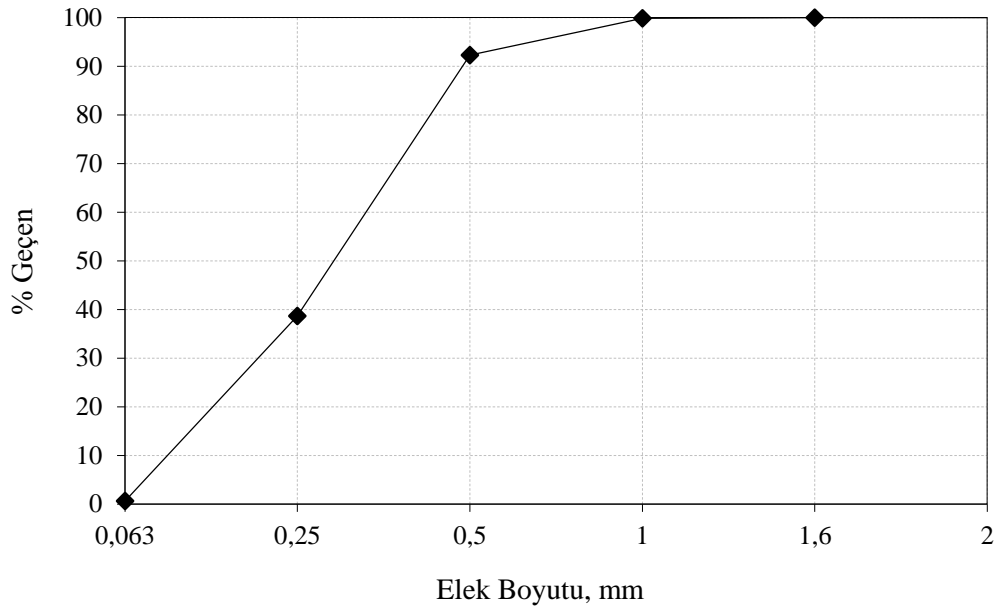
Şekil 3.4. Genleştirilmiş vermikülit agregasına ait tane boyut dağılım eğrisi

3.1.2.5. Kauçuk

İnce agrega olarak özgül ağırlığı 0,79 ve su emme oranı % 0,73 olan Has Kauçuk Firmasından temin edilen 0-2 mm boyutunda kauçuk kullanıldı. Atık kauçuk agregası Resim 3.5’de, agregaya ait tane dağılım eğrisi Şekil 3.5’de verilmiştir.



Resim 3.5. Kauçuk agregası



Şekil 3.5. Kauçuk agregasına ait tane boyut dağılım eğrisi

3.1.3. Keten Lif

Çalışmada; doğal bir lif türü olan keten lif kullanılmıştır. Kullanılan keten lifin görünümü Resim 3.6’ da ve özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.



Resim 3.6. Çalışmada kullanılan keten lif

Tablo 3.2. Çalışmada kullanılan keten lifin özellikleri

Çekme Dayanımı, MPa	800-1500
Elastisite Modülü, GPa	50-70
Yoğunluk, g/cm ³	1,54
Isıl İletkenlik Katsayısı, W/(m.K)	0.118-0.344
Uzunluk, mm	≈ 12-18
Çap, µm	17

3.1.4. Köpük Ajanı

TSE K - 314’de sulu çözelti halinde iken, suyun yüzey gerilmesini düşüren ve köpük oluşturan katkı olarak tanımlanan köpük ajanından köpük solüsyonu hazırlamak için; reçine bitkisel esaslı köpük ajanı ile suyun kütlece %5 oranında karıştırılıp elde edilen solüsyonu kullanılarak köpük üretim makinasının hava basıncı yardımıyla köpük üretildi

3.1.5. Karışım Suyu

Bu çalışmada karışım suyu olarak TS EN 1008'e uygun olarak Yozgat ili şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2. Karışım Oranları ve Üretim

Standart harç karışım miktarları referans alınarak numunelerin üretimleri gerçekleştirilmiştir. Kırma kum, kauçuk, pomza, genişletilmiş vermikülit ve genişletilmiş kil agregaları 0-2 mm boyutunda farklı agregalar kullanılarak 0 ve 15 kg/m³ miktarlarda keten lif ilave edilerek normal harç ve köpük beton numuneleri üretilmiştir.

Karışımların kodlanması normal harç veya köpük beton olmasına, agrega türüne ve lif takviyesine bağlı olarak yapılmıştır. İlk hane normal harç (H) veya köpük beton (Foam=F) olmasına, ikinci hane agrega türüne, son hane ise lif durumuna göre kodlanmıştır. Örnek olarak H-K-KL karışım kodu agrega türü kırma kum olan keten lif takviyeli normal harcı, F-KAU karışım kodu agrega türü kauçuk olan köpük beton karışımı ifade etmektedir. Harçların karışım miktarları ve yayılma tablası deney sonuçları Tablo 3.3'te, köpük beton karışım miktarları ise Tablo 3.4'de verilmiştir.

3.2.1.1. Normal Harç Numunelerinin Üretimi

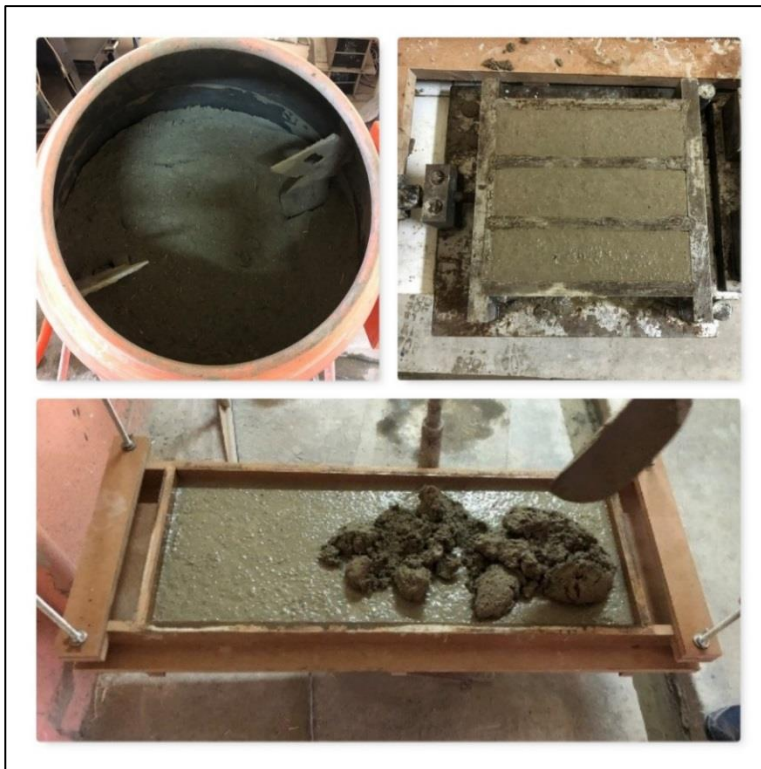
Normal harçlar için belirlenen karışım oranlarına göre malzemeler tartılarak hazırlanmış ve betoniyerde kuru karışım olarak homojen şekilde dağılım göstermesi için karıştırılmıştır. Karışıma gerekli miktarda su ilave edilerek homojen bir karışım sağlanıncaya kadar karıştırma işlemi uygulanmıştır. Bütün karışımlarda işlenebilirlik sabit tutulmuştur. Üretilen numuneler prizini aldıktan sonra kalıptan çıkarılmış ve 28 gün boyunca 20 ±5 °C laboratuvar sıcaklığında kür edilmiştir.

Fiziksel ve mekanik deneyler için referans numuneler ile birlikte toplam 10 seri harç üretimi yapılmıştır. Her bir seri için kuru birim hacim ağırlık, su emme, porozite, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç deneylerinde kullanmak üzere altı adet olmak üzere toplamda 60 adet 40×40×160 mm boyutlarında prizmatik, kılcal su emme deneylerinde kullanmak üzere dört adet olmak üzere toplamda 40 adet 70 ×70 mm küp, ısı iletkenlik deneyinde kullanmak üzere her bir seri için üç adet olmak üzere toplamda 30 adet 3×30 ×30 mm boyutlarında plak, ses yutumu deneyinde kullanmak üzere her bir seri için üç adet olmak üzere toplamda düşük

frekans için 100 mm çapında 1, 3 ve 5 cm kalınlıklarında her bir kalınlık için ayrı ayrı 30 adet silindir (dairesel en kesitli) ve yüksek frekans için 29 mm çapında 1, 3 ve 5 cm kalınlıklarında her bir kalınlık için ayrı ayrı 30 adet silindir (dairesel en kesitli), yarmada çekme deneyinde kullanmak üzere her bir seri için üç adet olmak üzere toplamda 30 adet 10×20 mm boyutlarında silindir, elastisite modül deneyinde kullanmak üzere her bir seri için üç adet olmak üzere toplamda 30 adet 10×20 mm boyutlarında silindir numune üretilmiştir.

Tablo 3.3. Normal harç karışımında kullanılan malzeme miktarları (kg/m³)

Agrega Türü	Karışım Kodu	Lif Miktarı, kg	Çimento, kg	Agrega, kg	Su, kg	Yayılma Tablası Deneysel Sonuçları, cm
Kırma Kum	H-K	0	416	1525	227	15.5
	H-K-KL	15	416	1525	254	15.5
Kauçuk	H-KAU	0	436	434	399	15.5
	H-KAU-KL	15	436	434	411	15.5
Pomza	H-P	0	398	911	313	15.5
	H-P-KL	15	398	911	380	15.5
Genleştirilmiş Vermikülit	H-GV	0	422	182	642	15.5
	H-GV-KL	15	422	182	720	15.5
Genleştirilmiş Kil	H-GK	0	386	1031	277	15.5
	H-GK-KL	15	386	1031	328	15.5



Resim 3.7. Normal harç numunelerinin üretim aşaması



Resim 3.8. Taze harcın kalıplara yerleştirilmesi



Resim 3.9. Normal harc numunelerin kalıptan çıkarıldıktan sonraki durumu



Resim 3.10. Numunelerin standart küre bırakılması

3.2.1.2. Köpük Beton Numunelerinin Üretimi

Köpük beton karışımları için belirlenen karşım oranlarına göre malzemeler tartılarak hazırlanmış ve betoniyerde kuru karşım olarak homojen şekilde dağılım göstermesi için karıştırılmıştır. Köpük beton karşımında kullanılan malzeme miktarları Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4. Köpük beton karşımında kullanılan malzeme miktarları (kg/m³)

Agrega Türü	Karşım Kodu	Lif Miktarı, kg	Çimento, kg	Agrega, kg	Su, Kg
Kırma Kum	F-K	0	416	1525	260
	F-K-KL	15	416	1525	294
Kauçuk	F-KAU	0	436	434	386
	F-KAU-KL	15	436	434	438
Pomza	F-P	0	398	911	382
	F-P-KL	15	398	911	394
Genleştirilmiş Vermikülit	F-GV	0	422	182	395
	F-GV-KL	15	422	182	560
Genleştirilmiş Kil	F-GK	0	386	1031	277
	F-GK-KL	15	386	1031	316

Karşıma gerekli miktarda su ilave edilerek homojen bir karşım sağlanıncaya kadar karıştırma işlemi uygulanmıştır. Köpük solüsyonu bütün karşımlarda 80 g/l olacak şekilde ayarlanarak köpük üretim makinasından basınçlı hava yardımıyla üretilmiştir. Köpük solüsyonu Resim 3.11’de verilmiştir.



Resim 3.11. Köpük solüsyonu

Daha sonra hazırlanmış karışıma gerekli miktarda köpük betonyere ilave edilerek homojen bir karışım sağlanıncaya kadar karıştırma işlemi uygulanmıştır. Köpük beton numunelerin üretimi aşaması Resim 3.12’de verilmiştir. Üretilen numuneler prizini aldıktan sonra kalıptan çıkarılmış ve 28 gün boyunca 20 ± 5 °C laboratuvar sıcaklığında kür edilmiştir.



Resim 3.12. Köpük beton numunelerin üretimi aşaması

Fiziksel ve mekanik deneyler için referans numuneler ile birlikte toplam 10 seri harç üretimi yapılmıştır. Her bir seri için kuru birim hacim ağırlık, su emme, porozite, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç deneylerinde kullanmak üzere altı adet olmak üzere toplamda 60 adet $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarında prizmatik, kılcal su emme deneylerinde kullanmak üzere dört adet olmak üzere toplamda 40 adet 70×70 mm küp, ısıl iletkenlik deneyinde kullanmak üzere her bir seri için üç adet olmak üzere toplamda 30 adet $3 \times 30 \times 30$ mm boyutlarında plak,

ses yutum deneyinde kullanmak üzere her bir seri için üç adet olmak üzere toplamda düşük frekans için 100 mm çapında 1, 3 ve 5 cm kalınlıklarında her bir kalınlık için ayrı ayrı 30 adet silindir (dairesel en kesitli) ve yüksek frekans için 29 mm çapında 1, 3 ve 5 cm kalınlıklarında her bir kalınlık için ayrı ayrı 30 adet silindir (dairesel en kesitli), yarmada çekme deneyinde kullanmak üzere her bir seri için üç adet olmak üzere toplamda 30 adet 10×20 mm boyutlarında silindir, elastisite modül deneyinde kullanmak üzere her bir seri için üç adet olmak üzere toplamda 30 adet 10×20 mm boyutlarında silindir numune üretilmiştir.

3.3. Deneyler

3.3.1. Taze Harç Deneyleri

Hazırlanan harçlar üzerinde TS EN 12350-6' da belirtilen şartlara uygun olarak taze harç deneyleri yapılmıştır.

3.3.1.1. Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Harç numunelerinin üretimi sırasında TS EN 12350-6' da belirtilen şartlara uygun olarak taze birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır.



Resim 3.13. Taze birim hacim ağırlık deneyi

3.3.1.2. Yayılma Tablası Deneyi

Harçların kıvamının belirlenmesi amacıyla numunelerin üretimi sırasında taze harçlar üzerinde TS EN 1015-3'e uygun olarak yayılma tablası deneyi yapılmıştır. Yayılma tablası deneyi Resim 3.14 ve 3.15'de verilmiştir.



Resim 3.14. Yayılma tablası deney aşaması



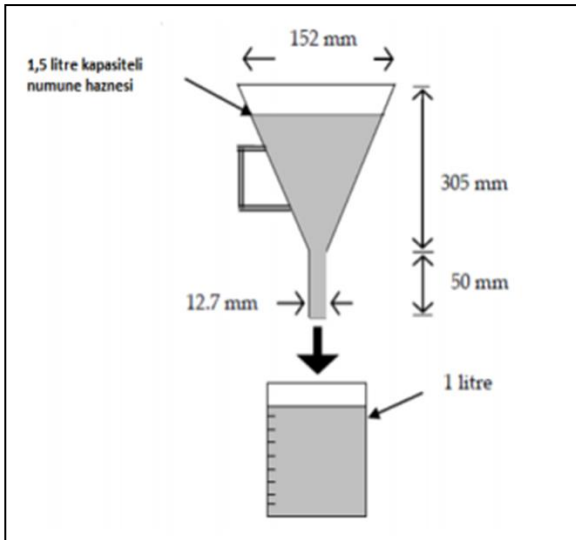
Resim 3.15. Yayılma tablası deneyi

3.3.1.3. Marsh Konisi – Akışkanlık Deneyi

Bu metot genellikle 1.5 litre hazır harcın bu huniden 1 litre harcın akış süresinin ölçülmesine dayanmaktadır. Akma süresi yanında akış davranışı da izlenerek kaydedilir. Bir litre harcın bir dakikadan daha az sürede akması halinde sabit ve dengeli akma şeklinde değerlendirme yapılır (Jones vd. 2003). Buna karşı akma süresi 1 dakikayı geçiyorsa engelli ya da zor akan harç şeklinde kayıt edilir (Tablo 3.5). Eğer hiç akma yoksa “akmadı” şeklinde yazılır (Mohammad 2011). Hazırlanan tüm harçlar için akmadı olarak kayda geçilmiştir. Marsh konisi deney düzeneği Şekil 3.6’da, Marsh konisi deneyi ise Resim 3.16’da verilmiştir.

Tablo 3. 5. Köpük beton harcının akma süresine göre yapılan sınıflandırma (Jones, 2003)

Temel Sınıf	Tanımı	Alt Sınıfı	Açıklama
1	1 litre < 1 dk	A	Sabit düzenli akma
2	1 dk < Akma < 2 dk	B	Kesikli olarak akma
3	0.5 Litre < Akış < 1 Litre	C	Hafifçe sıkıştırılarak akışın tamamlanması
4	Akma < 0.5 Litre	-	Sadece 1. ve 2. akış
5	Akma Yoktur	-	sınıfları için uygundur.



Şekil 3.6. Marsh konisi – akışkanlık deney düzeneği



Resim 3.16. Marsh konisi akışkanlık deneyi

3.3.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri

3.3.2.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık, Su Emme ve Porozite Deneyi

28 günlük standart kür sonrası prizma numuneler üzerinde kuru birim hacim ağırlık, porozite ve su emme oranlarının tespiti için Arşimet deneyi yapılmıştır. Ayrıca, Arşimet deneyi ile su içinde tartılarak gerçek hacimleri hesaplanan numunelerin birim hacim ağırlık, porozite (P) ve su emme değerleri (μ) sırasıyla (3.1), (3.2) ve (3.3) eşitlikleri yardımı ile hesaplanmıştır. Arşimet deneyi Resim 3.17’de verilmiştir.

$$BHA = \frac{W_0}{W_1 - W_2}, \text{ kg/m}^3 \quad (3.1)$$

$$P(\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_1 - W_2} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\mu(\%) = \frac{(W_1 - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (3.3)$$

Burada,

W_0 : Etüv kurusu ağırlık

W_1 : Suyu doymun havadaki ağırlık

W_2 : Su içerisindeki ağırlık olarak ifade edilmektedir.



Resim 3.17. Arşimet, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri için üretilen numuneler



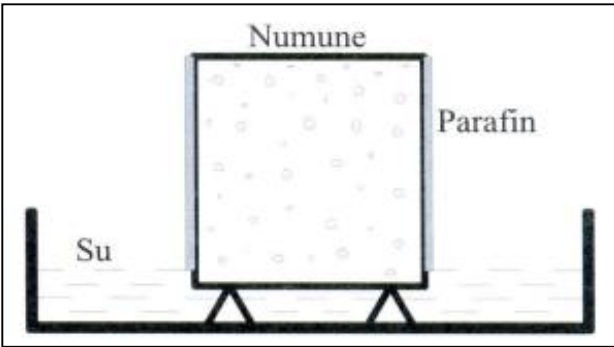
Resim 3.18. Arşimet deneyi



Resim 3.19. Numunelerin etüvdeki durumu

3.3.2.2. Kılcal Su Emme Deneyi

TS EN 772-11 standardına uygun olarak gerçekleştirilen kılcal su emme deneyinde her bir karışım için hazırlanan 7×70 mm küp numuneler, sabit ağırlığa gelinceye kadar 100 °C ± 5'de etüvde bekletilmiştir. Sabit kütleye ulaşan numuneler oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve etrafları su yalıtım bandıyla kaplanarak kaplanarak kılcal su emme etkisinin belirlendiği kapilerite deneyine tabi tutulmuştur. 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81 ve 100. dakikalardaki su emme ağırlıkları tespit edilmiştir. Kılcal su emme deney düzeneği Şekil 3.7'de, kılcal su emme deneyi ise Resim 3.20'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Kılcal su emme deney düzeneği

$$q^2 = k t \quad (3.4)$$

Burada;

q = Birim alandan emilen su miktarı, (cm^3/cm^2)

t = Geçen zaman (sn)

k = Kapilerite katsayısı (cm^2/sn)



Resim 3.20. Kılcal su emme deneyi için üretilen numunelerin hazırlanması ve kılcal su emme deneyinin yapılması

3.3.2.3. Ultrases Geçiş Hızlarının Belirlenmesi

Numuneler üzerinde sıcaklığa maruz bırakılmadan önce ve sonrasında TS EN 12504-4 standartlarına uygun olarak ultrases geçiş hızının tayini deneyi yapılmıştır. Ultrases geçiş hızı deney düzeneği Şekil 3.8’de, ultrases geçiş hızı deneyi ise Resim 3.21’de verilmiştir. Deneyde, ultrases aleti ile 0.1 μs duyarlıklı ses geçiş süreleri ölçülmüştür. Ses geçiş hızı ölçüm yapılan numune boyunun kaydedilen geçiş süresine bölünmesiyle elde edilmiştir.

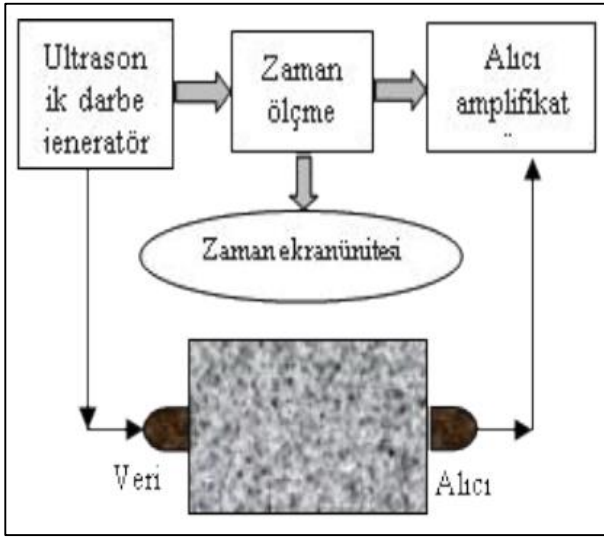
$$V_{ses} = L / t \quad (3.5)$$

Burada;

V_{ses} : Ultrases geçiş hızı (km/sn)

L : İki transducer arası mesafe (160 mm)

t : Ultrases geçiş süresi (μ s) olarak ifade edilmektedir.



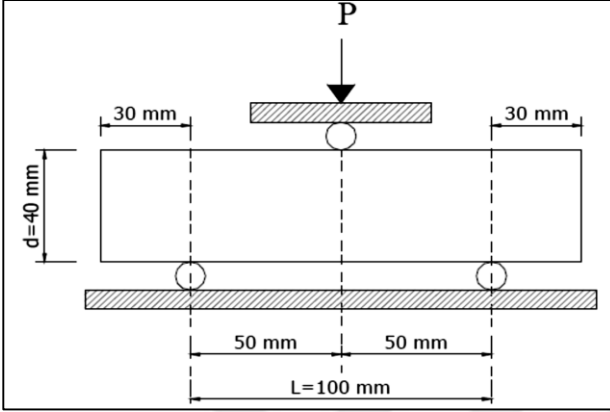
Şekil 3.8. Ultrases Geçiş Hızı Deney Düzenegi



Resim 3.21. Ultrases geçiş hızı deneyi

3.3.2.4. Eğilme Dayanımı

Çalışmada üretilen 40×40×160 mm boyutundaki prizma numuneler 28 gün standart küre tabi tutulduktan sonra numuneler üzerinde TS EN 196-1 standartlarına uygun olarak eğilme deneyi yapılmıştır. Eğilme deneyi düzeneği Şekil 3.9’da, eğilme dayanımı deneyi ise Resim 3.22’de verilmiştir.



Şekil 3.9. Eğilme dayanımı deney düzeneği

$$\sigma_e = \frac{1.5PL}{bd^2} \quad (3.6)$$

Burada;

P : Uygulanan kuvvet (N)

L : Mesnetler arası uzaklık (100 mm)

b : Numune kesitinin kısa kenar uzunluğu (40 mm)

d : Numune kesitinin yüksekliği (40 mm)

σ_e : Eğilme dayanımı, MPa

ifade etmektedir.

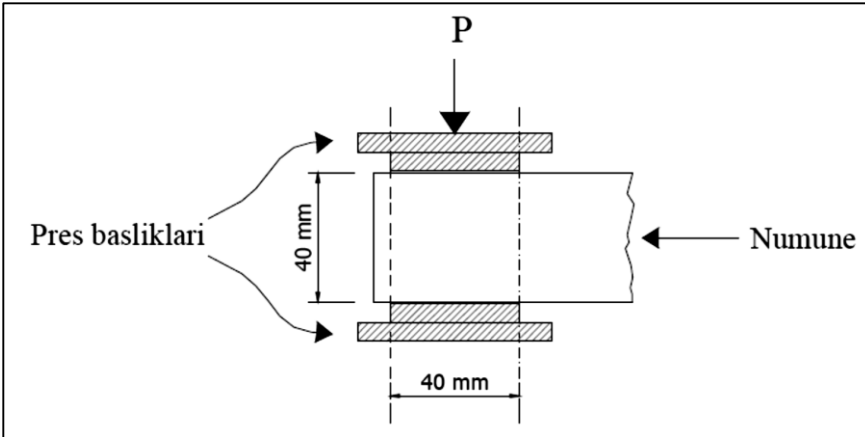
Eğilme deneyi 50 N/s yükleme hızında ve her bir karışım grubu için altı adet numune üzerinde yapılmıştır. Deney sonucu olarak altı numunenin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



Resim 3.22. Eğilme dayanımı deneyi

3.3.2.5. Basınç Dayanımı

Eğilme dayanımı deneyinden elde edilen numuneler üzerinde TS EN 196-1 standartlarına uygun olarak basınç deneyi yapılmıştır. Basınç deney düzeneği Şekil 3.10’da, basınç dayanımı deneyi ise Resim 3.23’de verilmiştir.



Şekil 3.10. Basınç dayanımı deney düzeneği

$$\sigma_b = \frac{P}{A} \quad (3.7)$$

Burada;

P : Uygulanan kuvvet (N)

A : Kesit Alanı (1600 mm²)

σ_b : Basınç Dayanımı, MPa ifade etmektedir.

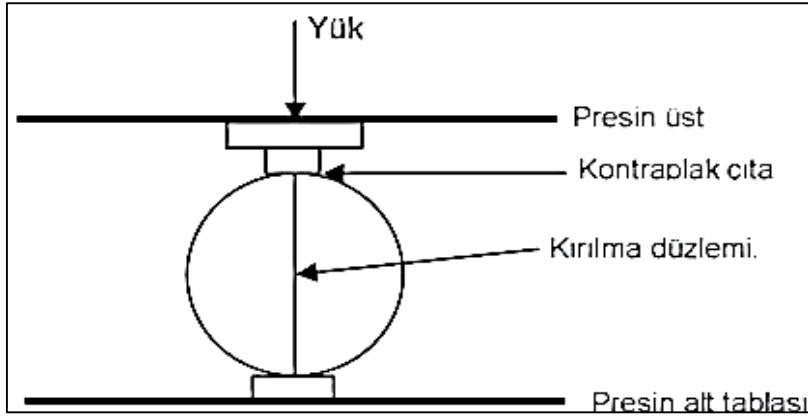
Eğilme deneyi sonrası 2 parçaya ayrılan numunelerden elde edilen toplam 12 adet numune üzerinde basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı deney sonucu 12 adet numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



Resim 3.23. Basınç dayanımı deneyi

3.3.2.6. Yarma Dayanımı

Çalışmada üretilen 10×20 mm boyutundaki silindir numuneler 28 gün standart küre tabii tutulduktan sonra numuneler üzerinde TS EN 12390-6 standartlarına uygun olarak yarma deneyi yapılmıştır. Yarma deneyi düzeneği Şekil 3.11’de, yarma dayanımı deneyi ise Resim 3.24’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Yarma dayanımı deney düzeneği (Çivici ve Eren, 2004)

Silindir şekilli deney numuneleri, uzunluğu boyunca bir levhaya, basınç yükü uygulanarak yüklenmiştir. Yükleme doğrultusuna dik doğrultuda oluşan çekme kuvveti sonucunda, numunede düşey çatlak meydana gelerek kırılmıştır. Yarmada çekme dayanımı, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi LD} \quad (3.8)$$

Burada;

f_{ct} : Yarmada çekme dayanımı, MPa (N/mm²)

P : En büyük yük (N)

L : Numunenin yükleme levhasına temas çizgisi uzunluğu, mm

D : Numunenin seçilen en kesit boyutu, mm



Resim 3.24. Yarma dayanımı deneyi için üretilen numuneler



Resim 3.25. Yarma dayanımı deneyi



Resim 3.26. Yarma dayanımı deneyi sonrası numunenin görünümü

3.3.2.7. Elastisite Modülü

Deneylerde yük ve deplasman kontrollü, 500 ton kapasiteli hidrolik beton basınç presi kullanılmıştır. Deneyler sırasında vidalarla tutturularak yükleme çerçevesi içerisine oturtulan numuneye iki adet LVDT bağlanmıştır. Her deney öncesi numune çerçeve içine oturtularak gerekli ayarlamalar yapılmış ve sonrasında tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Gerilme-birim deformasyon grafikleri elde edilmiş ve bu değerler excel ortamında işlenerek elastisite modülü belirlenmiştir. Elastisite modülü deneyi Şekil 3.28’de verilmiştir.



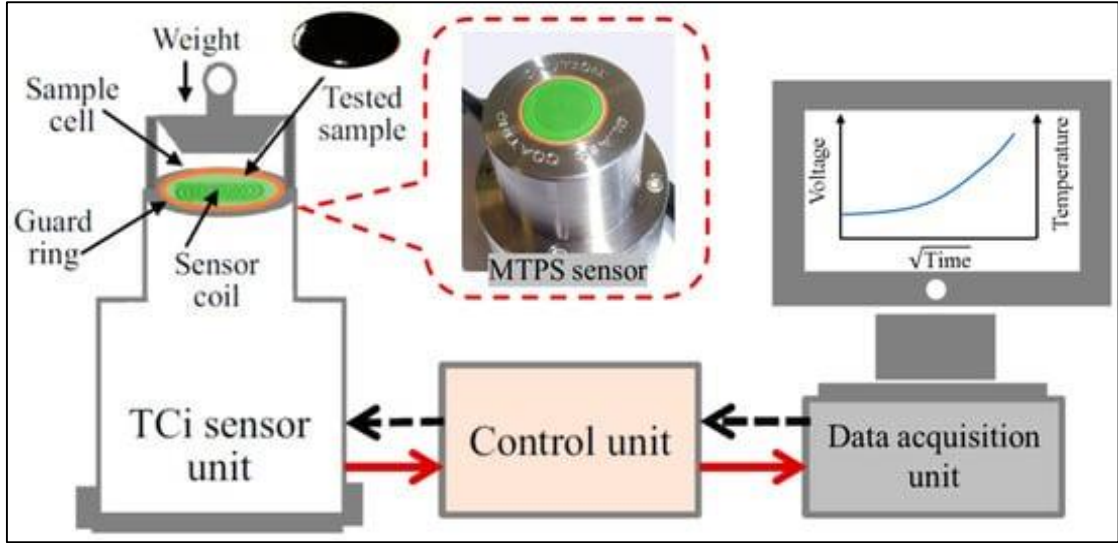
Resim 3.27. Elastite modülü deneyi için üretilen numuneler



Resim 3.28. Elastisite modülü deneyi

3.3.2.8. Isıl İletkenlik Katsayısının Belirlenmesi

Üretilen standart normal harç ve köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları TCi Thermal Conductivity Analyzer cihazı kullanılarak yapıldı. Cihaz değiştirilmiş geçici düzlem kaynağı (Modified Transient Plane Source) metoduna göre ölçüm yapmaktadır. Isıl iletkenlik deney düzeneği Şekil 3.12, ısı iletkenlik deneyi ise Resim 3.30'da verilmiştir.

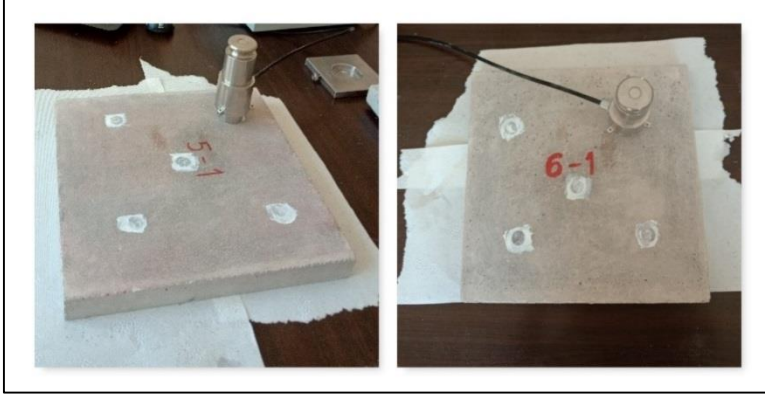


Şekil 3.12. Isıl iletkenlik deney düzeneği

Isının bir maddeden, kendisinden daha soğuk bir maddeye geçişi ısı transferi diye adlandırılır. Isı transferi üç şekilde meydana gelir. Bunlardan birisi ısı iletimi (kondüksiyon) ve diğerleri ısı taşınımı (Konveksiyon), ışınım (Radyasyon)'dır. Deneyde ısı iletim katsayısı (k) bulunacaktır. Isı iletim katsayısı sıcaklık farkının 1°C olabilmesi için, 1 metre kalınlığındaki, 1m^2 'lik kesitinden 1 saat süresince geçmesi gereken ısı miktarıdır. Birimi W/mK ile ifade edilir. Deneyde içerisinde pirinç silindir ve pirinç disk bulunan ve dışarısı ile ısı transferini engelleyecek şekilde izolasyon yapılmış iki kısım vardır. Silindir parça altına deney numuneleri konularak yüzeyden sıcaklık değişimleri ölçülmüştür. Hangi numunenin sıcaklık değişimi ölçülecekse o numunenin üzerine kablolar yerleştirilir. İlk etapta sabit bir değerde güç verilir. Bundan sonra sıcaklık değerleri üzerinden okunur. Soğutma suyu ile gerekli soğutma işlemi yapılabilir.



Resim 3.29. Isıl iletkenlik deneyi için üretilen numuneler



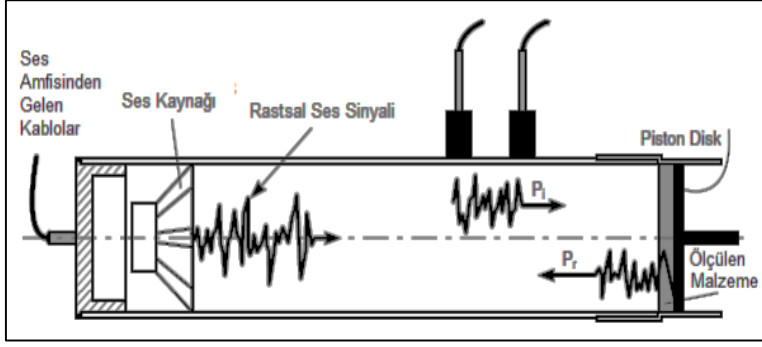
Resim 3.30. Isıl iletkenlik deneyi

3.3.2.9. Ses Yutum Katsayısının Belirlenmesi

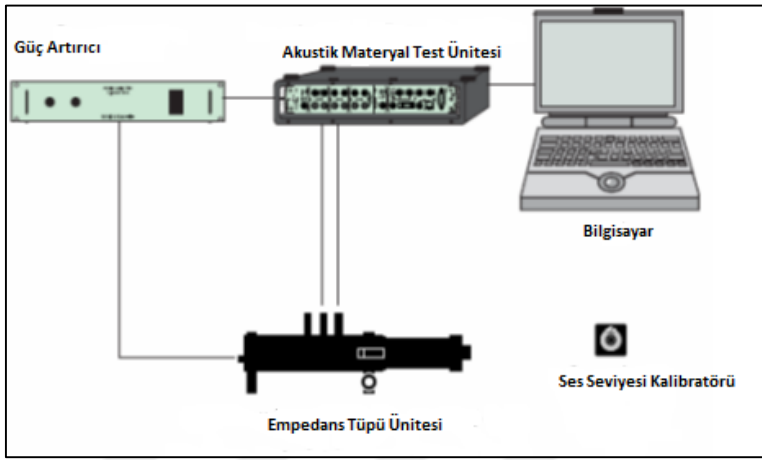
İki mikrofonlu empedans tüpü konfigürasyonunda, “Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part2: Transfer-function method” başlıklı ISO 10534-2 standartına uygun olarak akustik malzemelerin ses yutum katsayısı ölçülebilmektedir. Kullanılan tüp konfigürasyonuna göre 70-1600 Hz veya 200-6400 Hz arası ölçüm yapmak mümkündür. Bu ölçüm, rastsal (random) karakterli bir akustik tahriğin ses kaynağı tarafından üretilmesi ve malzeme üzerindeki yansıyan – iletilen ses bileşenlerinin tespiti ile yapılmaktadır. Yansıyan ses bileşeni, malzemenin akustik özelliklerine göre belirlenmektedir. Ses yutum katsayısı ölçüm tüpleri, üstte düşük frekans (70-1600Hz), altta yüksek frekans (200-6400 Hz). Çalışmada kullanılan ses yutum katsayısı ölçüm tüpleri Resim 3.31’de, ses yutum katsayısı tüpünün şematik çalışma prensibi Şekil 3.13’de, ses yutum katsayısı deney düzeneği ise Şekil 3.14’de verilmiştir.



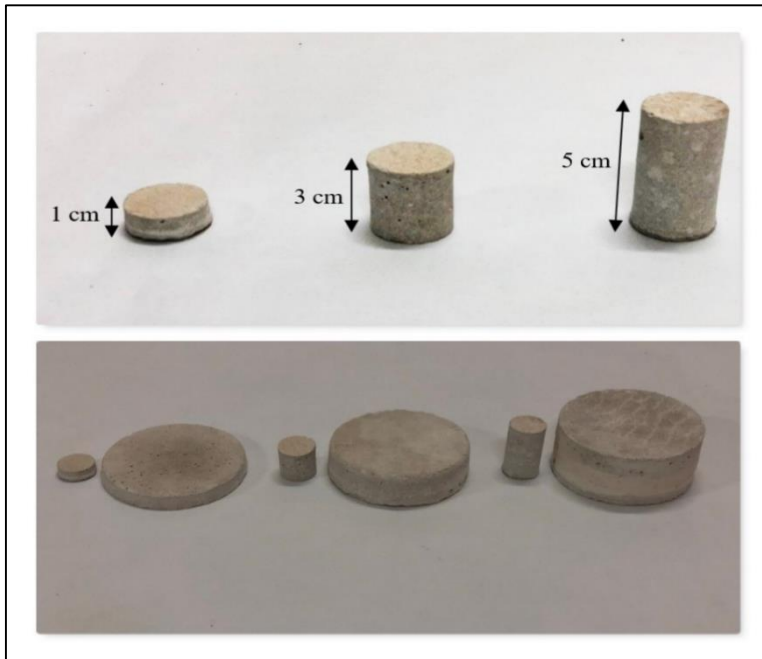
Resim 3.31. Çalışmada kullanılan yüksek ve düşük frekans için ses yutum katsayısı ölçüm tüpleri



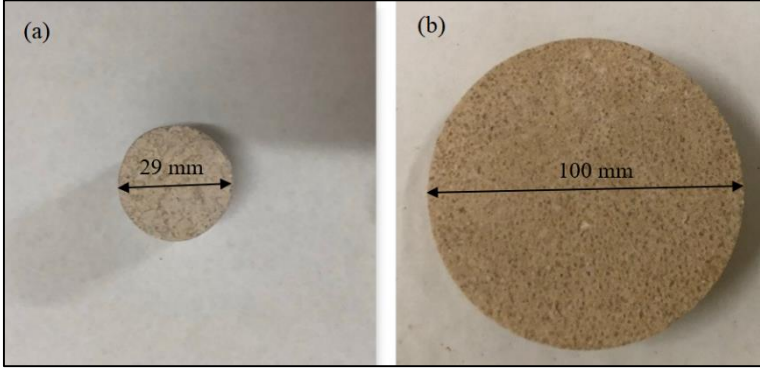
Şekil 3.13. Empedans tüpünün şematik çalışma prensibi



Şekil 3.14. Ses yutum katsayısı deney düzeneği



Resim 3.32. Yüksek ve düşük frekans için farklı kalınlıklarda numuneler



Resim 3.33. (a) Yüksek frekans için numune çapları, (b) düşük frekans için numune çapları



Resim 3.34. Ses yutum katsayısı deneyi için numunelerin hazırlanması



Resim 3.35. Numunelerin empedans tüpü içerisine yerleştirilmesi ve ses yutum katsayısı deneyi

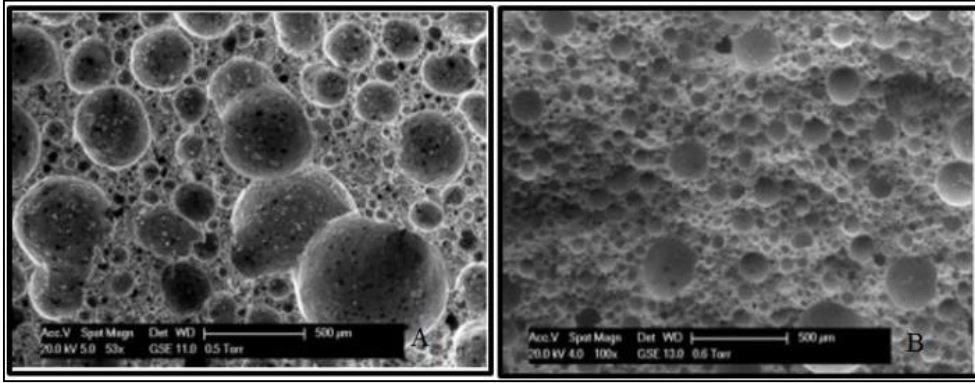
3.3.3. Numunelerin Elementel Analizleri

Çalışmada üretilen numunelere Yozgat Bozok Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde SEM ve XRD analizleri yapılmıştır.

3.3.3.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

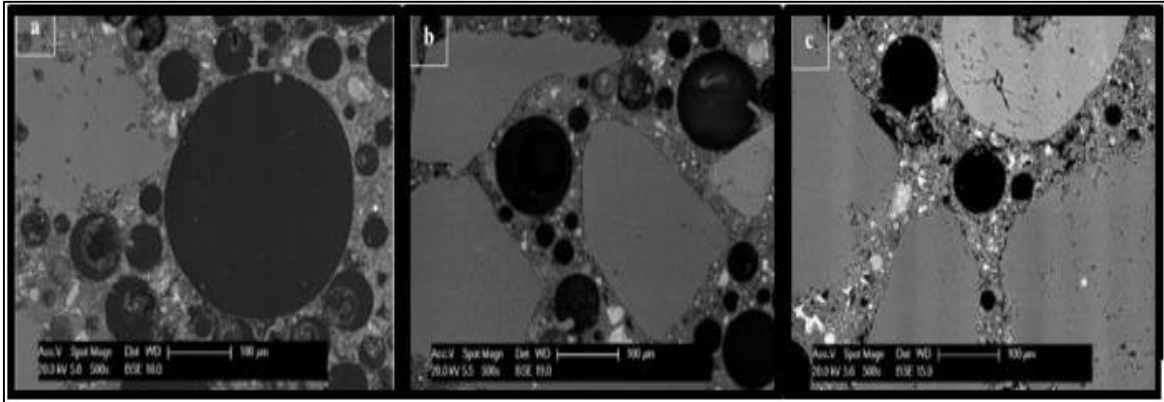
İnsan gözü ile çok küçük detayları görebilmek mümkün değildir. Bu sebeple daha küçük ayrıntıları görebilmek için birçok cihaz geliştirilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) elektro optik kabuller çerçevesinde numunelerin içeriğindeki minerallerin tipi, boyutu ve yerleşim düzeni hakkında bilgi veren bir analiz türüdür. Elektronların yüksek voltaj ile hız kazandırılarak numune üzerine odaklanmasıyla elektronlar ve numune arasında ortaya çıkan etkiler algılayıcılarda toplanıp, sinyal güçlendiricilerden geçirilir. Daha sonra katot ışınları tüpünün ekranına aktarılması ile görüntü oluşmaktadır. Modern sistemlerde bu sinyaller dijital sinyallere dönüştürülerek bilgisayar monitörüne aktarılmaktadır (Dakman 2017; Erdin N., 1987).

Wei, vd., (2013) birim ağırlığı 500-1000 kg/m³ olan köpük betonlarda hava içeriği yüksek olan köpük betonlarda hava gözeneklerinin yakın olması nedeni ile gözeneklerin birleşmeleri daha fazladır. Birim ağırlığı düşük olan köpük betonlarda daha büyük hava gözeneklerine gözlemlenmiştir. Birim ağırlığı 900 kg/m³ olan betonlarda daha belirginleştiği görülmüştür. Gözenek birleşmelerinin yeterli çimento hamuru olmayışından kaynaklandığını ifade edilmiştir. Şekil 3.15’de köpük betondaki boşluk yapısının SEM ile çekilmiş görüntülerinde birbirine yakın gözeneklerin birleşimi görülebilmektedir.



Şekil 3.15. Farklı birim ağırlıktaki köpük betonlarda hava boşluk yapısının karşılaştırılması (Wei vd., 2013)

Hilal vd., (2015) yaptıkları bir çalışmada 1300 kg/m³, 1600 kg/m³, 1900 kg/m³ birim ağırlıklarına sahip üç farklı birim ağırlığında numuneler üreterek, birim ağırlığına bağlı gözenek yapısı ve miktarını SEM görüntüleme yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Boşluk miktarının, köpük betonun birim ağırlığı azaldıkça arttığı gözlenmiştir. Birim ağırlık azaldıkça gözenekler arasındaki mesafe azaldığından daha büyük gözenekler olduğu ifade edilmiştir. Birim ağırlığa bağlı gözenek yapısı Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16. Birim ağırlığa bağlı gözenek yapısı a)1300 kg/m³, b)1600 kg/m³, c)1900 kg/m³ (Hilal vd., 2015).

TESCAN ve VEGA'nın üretmiş olduğu tungsten filaman elektron kaynaklı cihazdan x, y, z yönünde saçılan elektronlar manyetik alan yardımı ile numune üzerine odaklanarak numunenin görüntülenmesi yapılır. Numunelerin iletkenliğini artırıp elektronların numunenin yüzeyi ile daha iyi etkileşime girerek daha net bir görüntü almak için numuneler nanometre seviyesinde altın ile kaplanmıştır.

Çalışmada üretilen numunelerin iç yapıları taramalı elektron mikroskobu yardımı ile görüntülenmiştir. Tarayıcı elektron mikroskobu cihazı yardımı ile numunelerin farklı noktalarından farklı boyutta büyütme yapılarak SEM görüntüleri alınarak mikro boyutta yapı analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM analizi deneyi için numunelerin hazırlanma aşaması ve SEM analizi deneyinin yapılması Resim 3.36'da verilmiştir.



Resim 3.36. SEM analizi deneyi için numunelerin hazırlanma aşaması ve SEM analizi deneyinin yapılması

3.3.3.2. XRD (X-Işını Difraktometresi) Analizi

X ışınları kırınımı yöntemi kristalin ve bileşiklerin kalitatif olarak tanınmasını sağlamaktadır. XRD yöntemi çoğunlukla ağır elementlerden oluşan katı inorganik ve kristal

haldeki maddelerin ve minerallerin oranları doğrultusunda özelliklerinin incelenmesinde kullanılan bir yöntemdir.

XRD deneyi üretilen kaplama numunelerinin sahip olduğu kimyasal içeriğini ve yapısını belirlemede kullanılmaktadır. Toz haline getirilen malzemeler özel numune kaplarına konularak X-ışını tüpüne yerleştirilerek deney düzeneği çalıştırılmıştır. Deneyde her bir numunenin $-111^{\circ}\text{C} < 20 < 168^{\circ}\text{C}$ aralığında belirli dalga boylarında elde edilen pik değerleri tespit edilmiştir.



4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

Bu bölümde numuneler üzerinde yapılan fiziksel ve mekanik deneylerin sonuçları verilmektedir.

4.1. Taze Harç Deney

4.1.1. Taze Birim Hacim Ağırlık

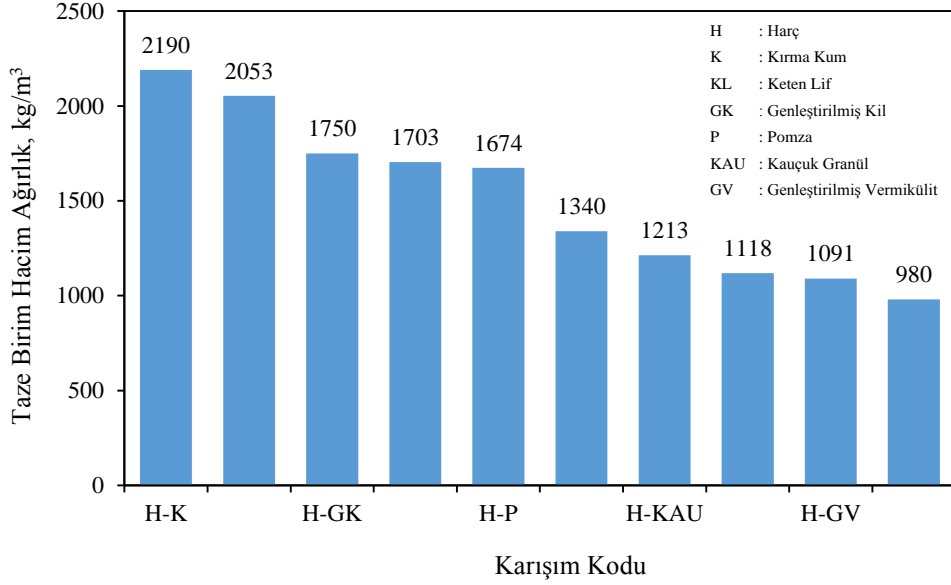
Numuneler ait taze birim hacim ağırlık deney sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Numunelerin taze birim hacim ağırlık değerleri

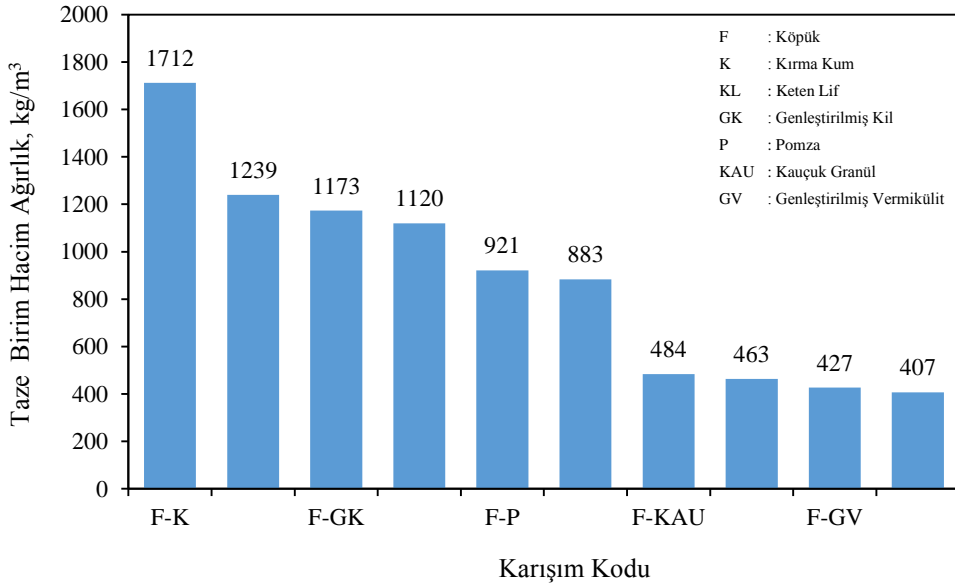
Numune Tipi	Karışım Kodu	Taze Birim Hacim Ağırlık kg/m^3
NORMAL HARÇ	H-K	2190
	H-K-KL	2053
	H-KAU	1213
	H-KAU-KL	1118
	H-P	1674
	H-P-KL	1340
	H-GV	1091
	H-GV-KL	980
	H-GK	1750
	H-GK-KL	1703
KÖPÜK BETON	F-K	1712
	F-K-KL	1239
	F-KAU	484
	F-KAU-KL	463
	F-P	1173
	F-P-KL	1120
	F-GV	427
	F-GV-KL	407
	F-GK	921
	F-GK-KL	883

Kırma kum, genişletilmiş kil, pomza, kauçuk ve genişletilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen köpük beton karışımların taze birim ağırlığı sırasıyla 2190, 1750, 1674, 1213 ve 1091 kg/m^3 , keten lif takviyeli karışımların taze birim ağırlığı ise sırasıyla 2053, 1703, 1340, 1123 ve 980 kg/m^3 olarak elde edilmiştir. En düşük taze birim ağırlık değeri genişletilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 980 kg/m^3 ,

en yüksek taze birim ağırlık değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 2190 kg/m^3 olarak elde edilmiştir. Normal harçların agrega tipine bağlı olarak taze birim hacim ağırlık değişimleri Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Normal harçların taze birim hacim ağırlıklarının değişimi



Şekil 4.2. Köpük betonların taze birim hacim ağırlıklarının değişimi

Kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve genleştirilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen köpük beton karışımların taze birim ağırlığı sırasıyla $1712, 1173, 921, 484$ ve 427 kg/m^3 , keten lif takviyeli karışımların taze birim ağırlığı ise sırasıyla $1239, 1120, 883, 463$ ve 407 kg/m^3 olarak elde edilmiştir. En düşük taze birim ağırlık değeri genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 407 kg/m^3 ,

en yüksek taze birim ağırlık değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 1712 kg/m^3 olarak elde edilmiştir. Köpük betonların agrega tipine bağlı olarak taze birim hacim ağırlık değişimleri Şekil 4.2’de verilmiştir.

4.1.2. Sertleşmiş Harç Deney Bulguları

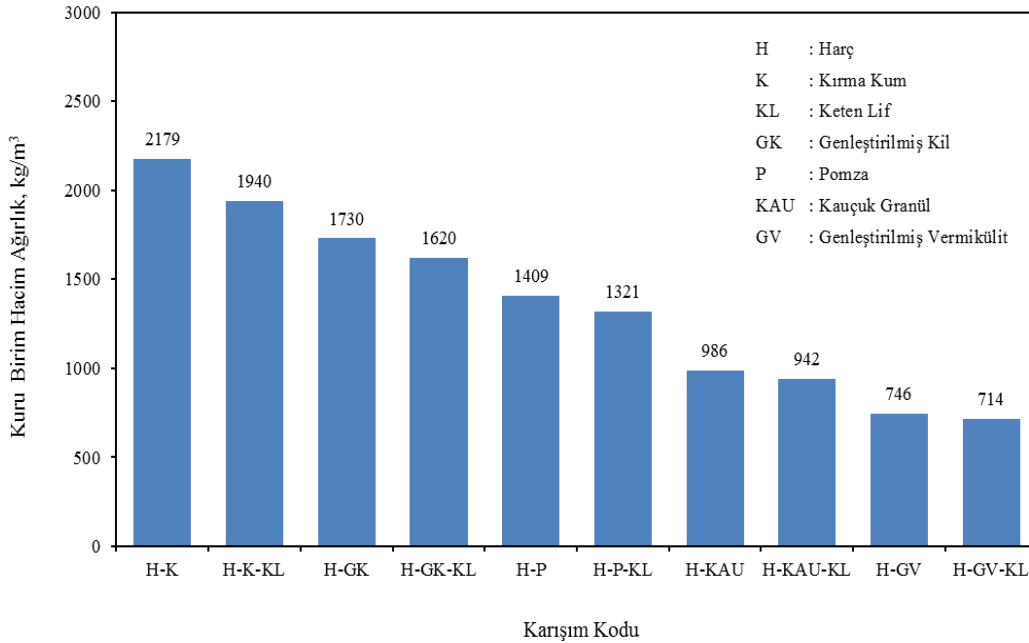
4.1.2.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık

28 gün standart küre tabi tutulan numuneler kuru ağırlığı değişmeyinceye kadar kurumaya bırakıldı. Daha sonra sertleşmiş normal harç ve köpük numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlendi. Deney sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerleri

Numune Tipi	Karışım Kodu	Kuru Birim Hacim Ağırlık, kg/m^3	
NORMAL HARÇ	H-K	2179	
	H-K-KL	1940	
	H-KAU	986	
	H-KAU-KL	942	
	H-P	1409	
	H-P-KL	1321	
	H-GV	746	
	H-GV-KL	714	
	H-GK	1730	
	H-GK-KL	1620	
	KÖPÜK BETON	F-K	1491
		F-K-KL	1330
F-KAU		726	
F-KAU-KL		695	
F-P		1035	
F-P-KL		971	
F-GV		585	
F-GV-KL		562	
F-GK		1214	
F-GK-KL		1138	

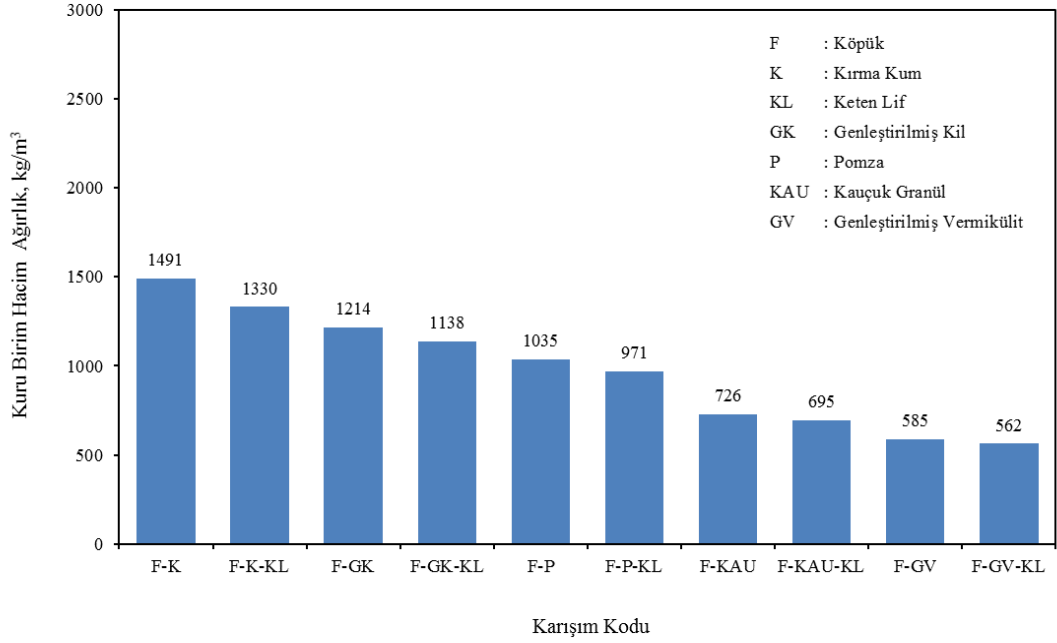
Kırma kum, geliştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve geliştirilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen normal harç karışımların kuru birim ağırlığı sırasıyla 2179, 1730, 1409, 986 ve 746 kg/m³, keten lif takviyeli karışımların kuru birim ağırlığı ise sırasıyla 1940, 1620, 1321, 942 ve 714 kg/m³ olarak elde edilmiştir. En düşük kuru birim ağırlık değeri geliştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 714 kg/m³, en yüksek kuru birim ağırlık değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 2179 kg/m³ olarak elde edilmiştir. Normal harçların kuru birim hacim ağırlıkları keten lif takviyesi ile azalmıştır. Normal harçların kuru birim hacim ağırlıklarının değişimi Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Normal harçların kuru birim hacim ağırlıklarının değişimi

Kırma kum, geliştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve geliştirilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen köpük beton karışımların kuru birim ağırlığı sırasıyla 1491, 1214, 1035, 726 ve 585 kg/m³, keten lif takviyeli karışımların kuru birim ağırlığı ise sırasıyla 1330, 1138, 971, 695 ve 562 kg/m³ olarak elde edilmiştir. En düşük kuru birim ağırlık değeri geliştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 562 kg/m³, en yüksek kuru birim ağırlık değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 1491 kg/m³ olarak elde edilmiştir. Köpük betonların kuru birim hacim ağırlıkları keten lif takviyesi ile azalmıştır. Köpük betonların kuru birim hacim ağırlıklarının değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir.

Normal harçların kuru birim hacim ağırlıkları keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 10.97, genişletilmiş kil agregalı numunelerde % 6.36, pomza agregalı numunelerde % 6.25, kauçuk agregalı numunelerde % 4.47 ve genişletilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 4.29 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile kuru birim hacim ağırlığındaki en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 10.97, en az azalma ise genişletilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 4.29 olarak elde edilmiştir



Şekil 4.4. Köpük betonların kuru birim hacim ağırlıklarının değişimi

Köpük betonların kuru birim hacim ağırlıkları keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 10.80, genişletilmiş kil agregalı numunelerde % 6.26, pomza agregalı numunelerde % 6.18, kauçuk agregalı numunelerde % 4.27 ve genişletilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 3.93 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile kuru birim hacim ağırlığındaki en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 10.80, en az azalma ise genişletilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 3.93 olarak elde edilmiştir.

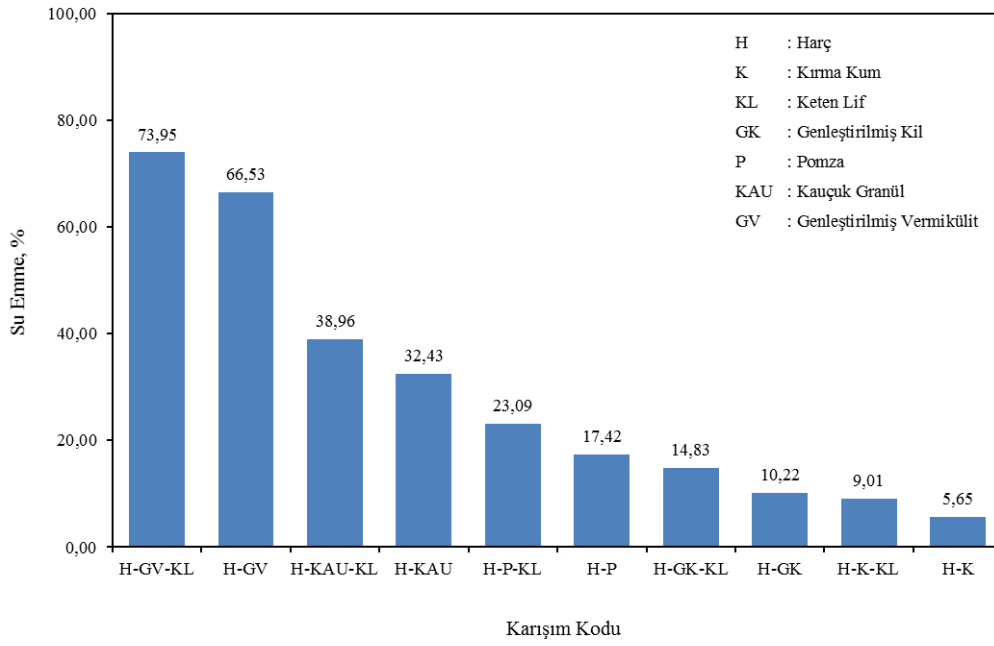
4.1.2.2. Su Emme

28 gün standart bakıma tabi tutulan numuneler kuru ağırlığı değişmeyinceye kadar kurumaya bırakıldı. Daha sonra sertleşmiş normal harç ve köpük numunelerin su emme değerleri belirlendi. Deney sonuçları Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Numunelerin su emme değerleri

Numune Tipi	Karışım Kodu	Su Emme, %
NORMAL HARÇ	H-K	5.65
	H-K-KL	9.01
	H-KAU	32.43
	H-KAU-KL	38.96
	H-P	17.42
	H-P-KL	23.09
	H-GV	66.53
	H-GV-KL	73.95
	H-GK	10.22
	H-GK-KL	14.83
KÖPÜK BETON	F-K	12.61
	F-K-KL	19.77
	F-KAU	56.21
	F-KAU-KL	62.62
	F-P	33.59
	F-P-KL	41.98
	F-GV	90.70
	F-GV-KL	98.14
	F-GK	21.84
	F-GK-KL	30.21

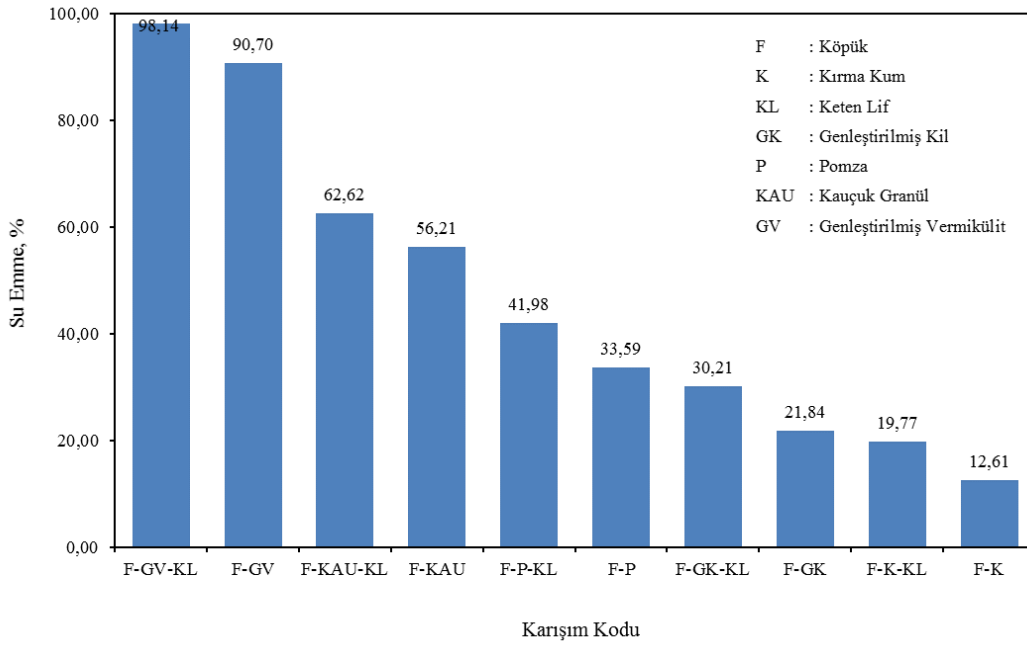
Kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve genleştirilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen normal harç karışımların su emme oranları sırasıyla % 5.65, 10.22, 17.42, 32.43 ve 66.53, keten lif takviyeli karışımların su emme oranları ise sırasıyla % 9.01, 14.83, 23.09, 38.96 ve 73.95 olarak elde edilmiştir. En yüksek su emme oranı genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde % 73.95, en düşük su emme oranı ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde % 5.65 olarak elde edilmiştir. Normal harçların su emme değerlerinin değişimi Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Normal harçların su emme değerlerinin değişimi

Kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve genleştirilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen köpük beton karışımların su emme oranları sırasıyla % 12.61, 21.84, 33.59, 56.21 ve 90.70, keten lif takviyeli karışımların su emme oranları ise sırasıyla % 19.77, 30.21, 41.98, 62.62 ve 98.14 olarak elde edilmiştir. En yüksek su emme oranı genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde % 98.14, en düşük su emme oranı ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde % 19.77 olarak elde edilmiştir. Köpük betonların su emme değerlerinin değişimi Şekil 4.6’da verilmiştir.

Normal harçların su emme oranı keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 59.47, genleştirilmiş kil agregalı numunelerde % 45.11, pomza agregalı numunelerde % 32.55, kauçuk agregalı numunelerde % 20.13 ve genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 11.15 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile su emme oranındaki en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 59.47, en az azalma ise genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 11.15 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.6. Köpük betonların su emme değerlerinin değişimi

Köpük betonların su emme oranı keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırmı kum agregalı numunelerde % 56,78, genleştirilmiş kil agregalı numunelerde % 38,32, pomza agregalı numunelerde % 24,98, kauçuk agregalı numunelerde % 11,40 ve genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 8,20 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile su emme oranındaki en fazla azalma kırmı kum agregalı numunelerde % 56,78, en az azalma ise genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 8,20 olarak elde edilmiştir.

4.1.2.3. Kılcal Su Emme

28 gün standart küre tabi tutulan numuneler kuru ağırlığı değişmeyinceye kadar kurumaya bırakıldı. Daha sonra sertleşmiş normal harç ve köpük numunelerin kılcal su emme katsayı değerleri belirlendi. Deney sonuçları Tablo 4.4’de verilmiştir.

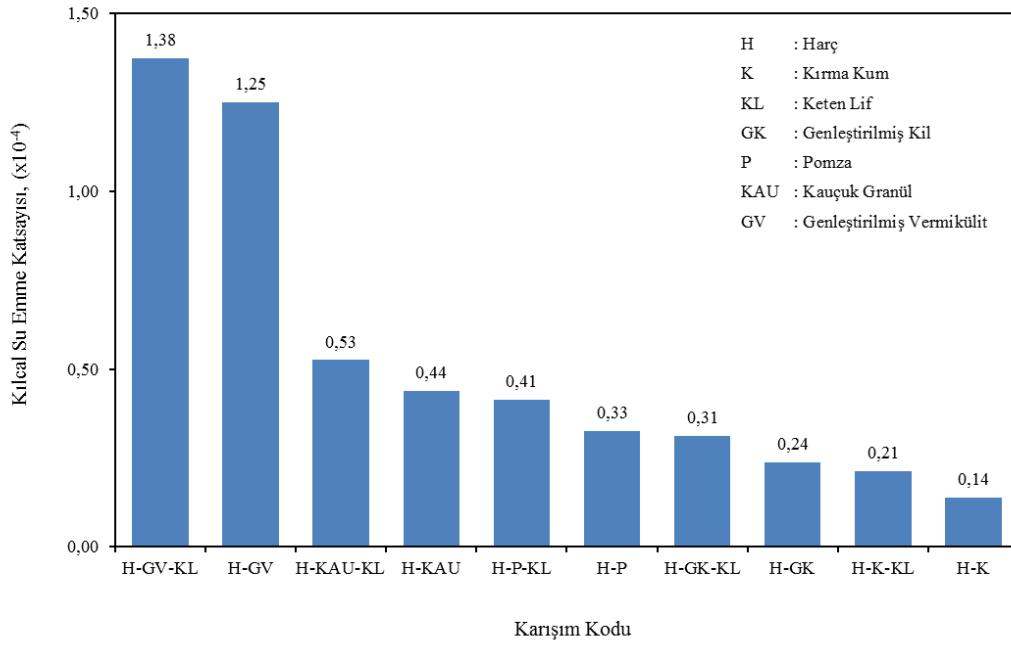
Kırmı kum, genleştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve genleştirilmiş vermikülit agregaları kullanarak üretilen lif içermeyen normal harç karışımların kılcal su emme katsayı değerleri sırasıyla 0,14, 0,24, 0,33, 0,44 ve $1,25 \times 10^{-5}$, keten lif takviyeli karışımların kılcal su emme katsayı değerleri ise sırasıyla 0,21, 0,31, 0,41, 0,53 ve $1,38 \times 10^{-5}$ olarak elde edilmiştir. En yüksek kılcal su emme katsayı değeri genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde $1,38 \times 10^{-5}$, en düşük kılcal su emme katsayı değeri ise kırmı kum agregalı lif

içermeyen referans numunelerde $0,14 \times 10^{-5}$ olarak elde edilmiştir. Normal harçların kılcal su emme katsayısının değişimi Şekil 4.7’de verilmiştir.

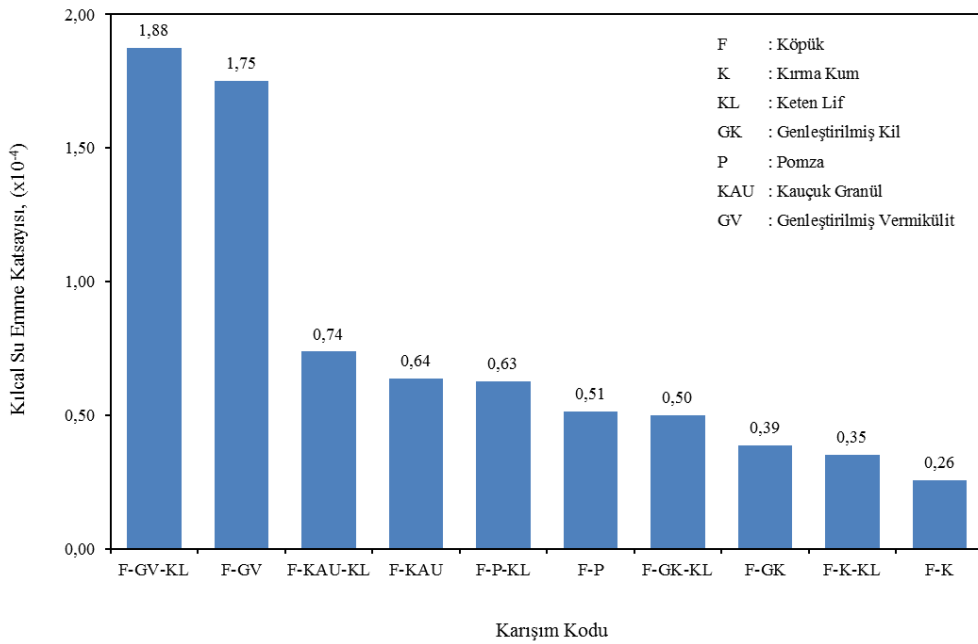
Tablo 4.4. Numunelerin kılcal su emme değerleri

Numune Tipi	Karışım Kodu	Kılcal Su Emme ($\times 10^{-5}$), cm^2/s ,
NORMAL HARÇ	H-K	0.14
	H-K-KL	0.21
	H-KAU	0.44
	H-KAU-KL	0.53
	H-P	0.33
	H-P-KL	0.41
	H-GV	1.25
	H-GV-KL	1.38
	H-GK	0.24
	H-GK-KL	0.31
KÖPÜK BETON	F-K	0.26
	F-K-KL	0.35
	F-KAU	0.64
	F-KAU-KL	0.74
	F-P	0.51
	F-P-KL	0.63
	F-GV	1.75
	F-GV-KL	1.88
	F-GK	0.39
	F-GK-KL	0.5

Kırma kum, genişletilmiş kil, pomza, kauçuk ve genişletilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen köpük beton karışımların su emme oranları sırasıyla 0.26, 0.39, 0.51, 0.64 ve 1.75×10^{-5} , keten lif takviyeli karışımların su emme oranları ise sırasıyla 0.35, 0.50, 0.63, 0.74 ve 1.88×10^{-5} olarak elde edilmiştir. En yüksek su emme oranı genişletilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 1.88×10^{-5} , en düşük su emme oranı ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 0.26×10^{-5} olarak elde edilmiştir. Köpük betonların kılcal su emme katsayısının değişimi Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Normal harçların kılcal su emme katsayısının değişimi



Şekil 4.8. Köpük betonların kılcal su emme katsayısının değişimi

Normal harçların su emme oranı keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 54.55, genleştirilmiş kil agregalı numunelerde % 31.58, pomza agregalı numunelerde % 26.92, kauçuk agregalı numunelerde % 20 ve genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 10 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile su emme oranındaki en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 54.55, en az azalma ise genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 10 olarak elde edilmiştir.

Köpük betonların su emme oranı keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırm kum agregalı numunelerde % 36.59, genleştirilmiş kil agregalı numunelerde % 29.03, pomza agregalı numunelerde % 21.95, kauçuk agregalı numunelerde % 15.69 ve genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 7.14 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile su emme oranındaki en fazla azalma kırm kum agregalı numunelerde % 36.59, en az azalma ise genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 7.14 olarak elde edilmiştir.

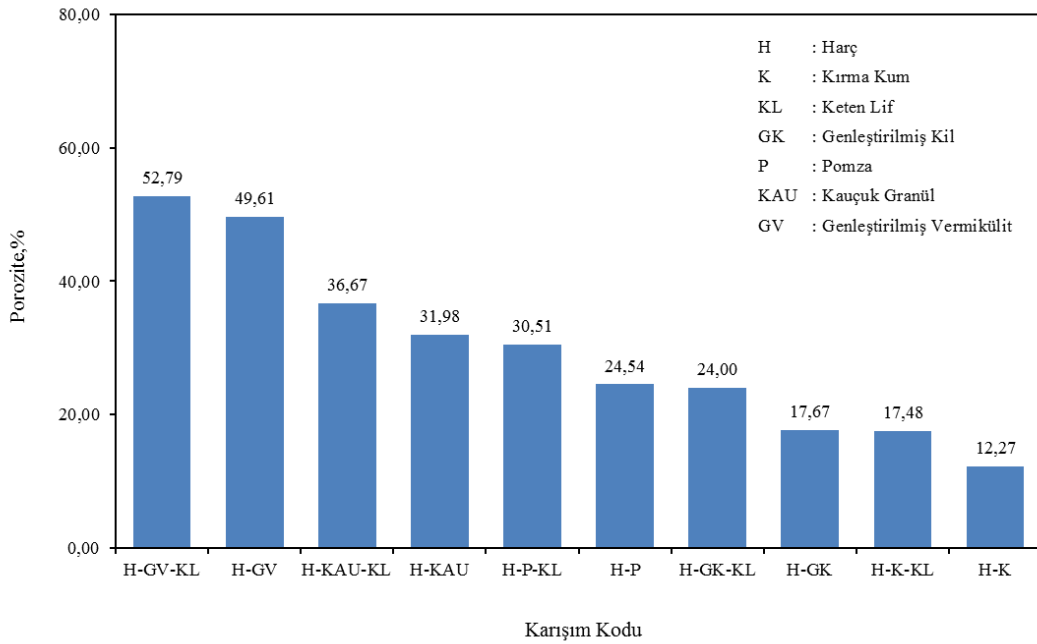
4.1.2.4. Porozite

28 gün standart bakıma tabi tutulan numuneler kuru ağırlığı değişmeyinceye kadar kurumaya bırakıldı. Daha sonra sertleşmiş normal harç ve köpük numunelerin porozite değerleri belirlendi. Deney sonuçları Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo. 4.5. Numunelerin porozite değerleri

Numune Tipi	Karışım Kodu	Porozite, %
NORMAL HARÇ	H-K	12.27
	H-K-KL	17.48
	H-KAU	31.98
	H-KAU-KL	36.67
	H-P	24.54
	H-P-KL	30.51
	H-GV	49.61
	H-GV-KL	52.79
	H-GK	17.67
	H-GK-KL	24.00
KÖPÜK BETON	F-K	18.55
	F-K-KL	26.28
	F-KAU	40.80
	F-KAU-KL	43.49
	F-P	34.75
	F-P-KL	40.75
	F-GV	53.06
	F-GV-KL	55.28
	F-GK	26.50
	F-GK-KL	34.33

Kırma kum, geliştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve geliştirilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen normal harç karışımların porozite değerleri sırasıyla % 12.27, 17.67, 24.54, 31.98 ve 49.61 keten lif takviyeli karışımların porozite değerleri ise sırasıyla % 17.48, 24.00, 30.51, 36.67 ve 52.79 olarak elde edilmiştir. En yüksek porozite değeri geliştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde % 49.61, en düşük porozite değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde % 12.27 olarak elde edilmiştir. Normal harçların porozite değerlerinin değişimi Şekil 4.9’da verilmiştir.

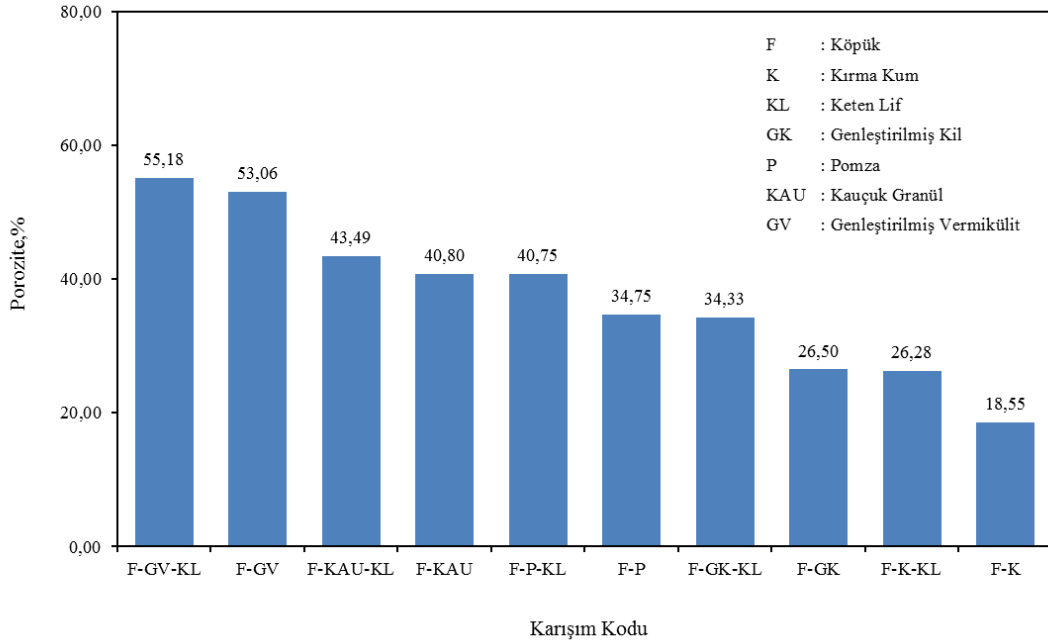


Şekil 4.9. Normal harçların porozite değerlerinin değişimi

Kırma kum, geliştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve geliştirilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen köpük beton karışımların porozite değerleri sırasıyla % 18.55, 26.50, 34.75, 40.80 ve 53.06 keten lif takviyeli karışımların porozite değerleri ise sırasıyla % 26.28, 34.33, 40.75, 43.49 ve 55.18 olarak elde edilmiştir. En yüksek porozite değeri geliştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde % 55.18, en düşük porozite değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde % 18.55 olarak elde edilmiştir. Köpük betonların porozite değerlerinin değişimi Şekil 4.10’da verilmiştir.

Normal harçların porozitesi keten lif takviyesi ile artmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 42.46, geliştirilmiş kil agregalı numunelerde % 35.82, pomza agregalı numunelerde % 24.33 kauçuk agregalı numunelerde % 14.67 ve geliştirilmiş vermikülit

agregalı numunelerde % 6.41 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile porozitede en fazla artma kırma kum agregalı numunelerde % 42.46, en az artma ise geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 6.41 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Köpük betonların porozite değerlerinin değişimi

Köpük betonların porozitesi keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 41.67, geliştirilmiş kil agregalı numunelerde % 29.55, pomza agregalı numunelerde % 17.27 kauçuk agregalı numunelerde % 6.59 ve geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 4 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile porozitede en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 41.67, en az azalma ise geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 4 olarak elde edilmiştir.

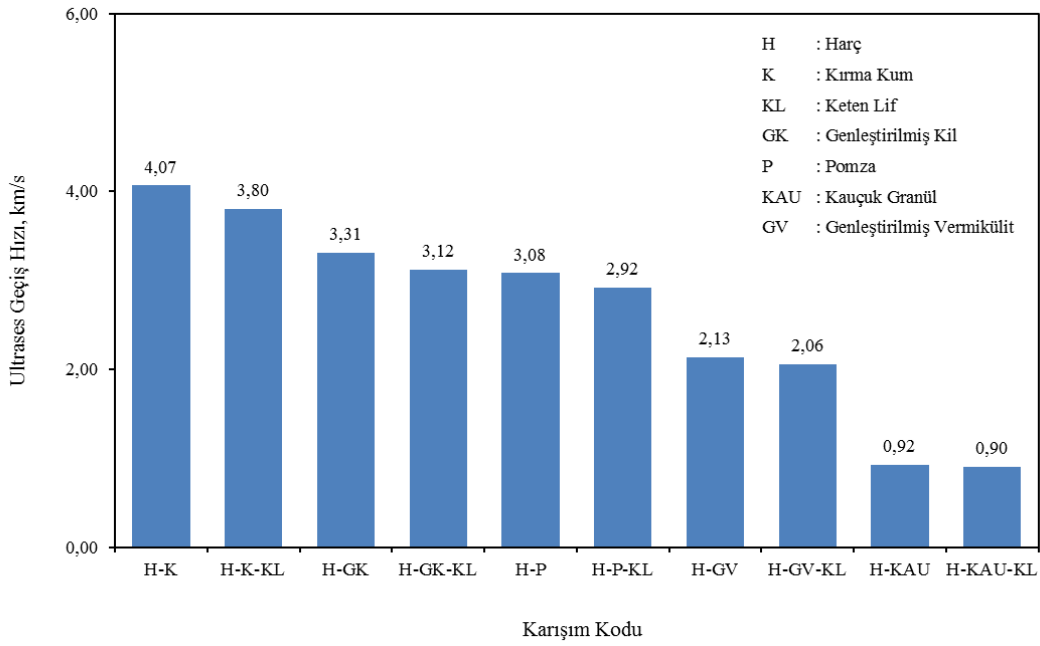
4.1.2.5. Ultrases Geçiş Hızı

28 gün standart bakıma tabi tutulan numuneler kuru ağırlığı değişmeyinceye kadar kurumaya bırakıldı. Daha sonra sertleşmiş normal harç ve köpük numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri belirlendi. Deney sonuçları Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo. 4.6. Numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri

Numune Tipi	Karışım Kodu	Ultrases Geçiş Hızı, km/sa
NORMAL HARÇ	H-K	4.07
	H-K-KL	3.80
	H-KAU	0.92
	H-KAU-KL	0.90
	H-P	3.08
	H-P-KL	2.92
	H-GV	2.13
	H-GV-KL	2.06
	H-GK	3.31
	H-GK-KL	3.12
KÖPÜK BETON	F-K	2.77
	F-K-KL	2.61
	F-KAU	0.74
	F-KAU-KL	0.73
	F-P	2.39
	F-P-KL	2.30
	F-GV	1.70
	F-GV-KL	1.65
	F-GK	2.52
	F-GK-KL	2.41

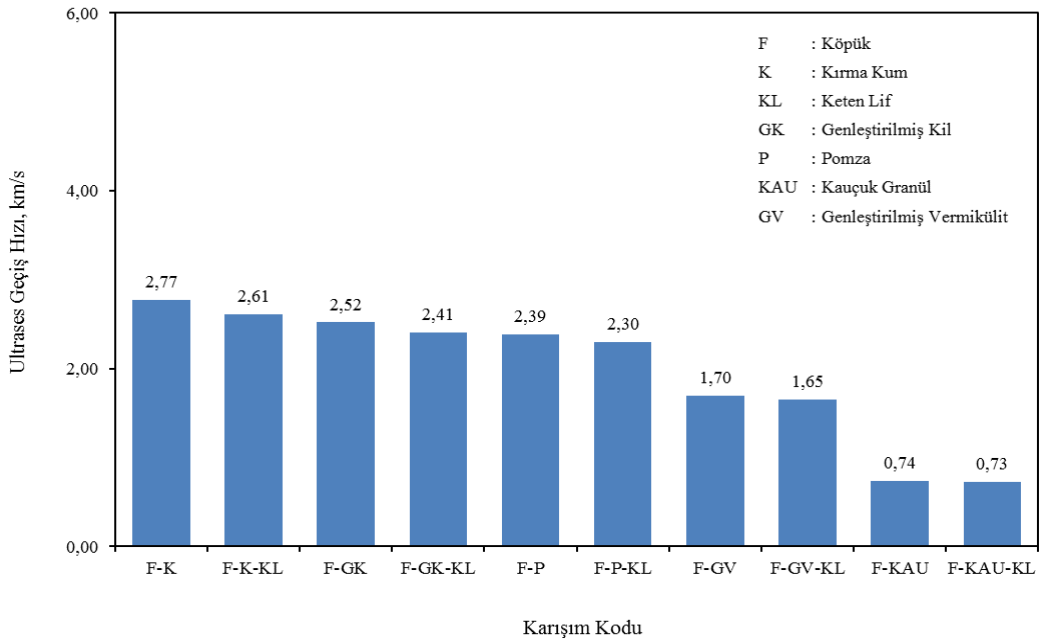
Kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve genleştirilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen normal harç karışımların ultrases geçiş hızı değerleri sırasıyla 4.07, 3.31, 3.08, 1.98, 0.93 km/s keten lif takviyeli karışımların ultrases geçiş hızı değerleri ise sırasıyla 3.80, 3.12, 2.92, 1.97 ve 0.90 km/s olarak elde edilmiştir. En düşük ultrases geçiş hızı değeri genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.90 km/s, en yüksek ultrases geçiş hızı değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 4.07 km/s olarak elde edilmiştir. Normal harçların ultrases geçiş hızı değerlerinin değişimi Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Normal harçların ultras ses geçiş hızı değerlerinin değişimi

Kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve genleştirilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen köpük beton karışımların ultras ses geçiş hızı değerleri sırasıyla 2.77, 2.52, 2.39, 1.70 ve 0.74 km/s keten lif takviyeli karışımların ultras ses geçiş hızı değerleri ise sırasıyla 2.61, 2.41, 2.30, 1.65 ve 0.73 km/s olarak elde edilmiştir. En düşük ultras ses geçiş hızı değeri genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.72 km/s, en yüksek ultras ses geçiş hızı değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 2.77 km/s olarak elde edilmiştir. Köpük betonların ultras ses geçiş hızı değerlerinin değişimi Şekil 4.12’de verilmiştir.

Normal harçların ultras ses geçiş hızı keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 6.52, genleştirilmiş kil agregalı numunelerde % 5.74, pomza agregalı numunelerde % 5.19, kauçuk agregalı numunelerde % 3.29 ve genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 2.17 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile ultras ses geçiş hızında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 6.52, en az azalma ise genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 2.17 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.12. Köpük betonların ultras ses geçiş hızı değerlerinin değişimi

Köpük betonların ultras ses geçiş hızı keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kıırma kum agregalı numunelerde % 5.78, genişletirilmiş kil agregalı numunelerde % 4.37, pomza agregalı numunelerde % 3.77, kauçuk agregalı numunelerde % 2.94 ve genişletirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 1.35 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile ultras ses geçiş hızında en fazla azalma kıırma kum agregalı numunelerde % 5.78, en az azalma ise genişletirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 1.35 olarak elde edilmiştir.

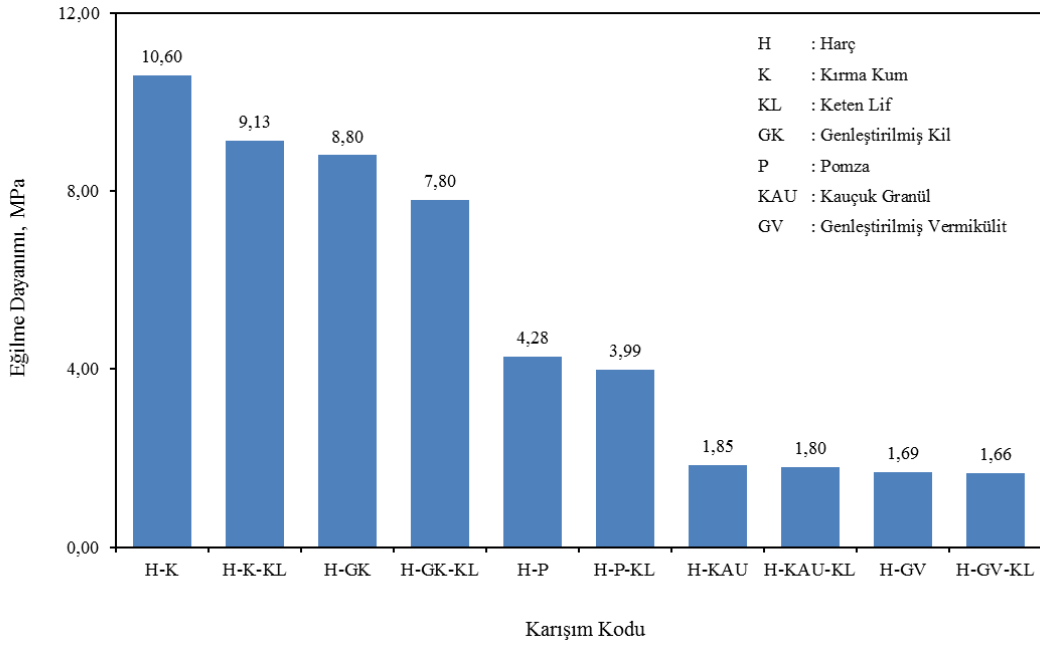
4.1.2.6. Eğilme Dayanımı

28 gün standart küre tabi tutulan numuneler kuru ağırlığı değişmeyinceye kadar kurumaya bırakıldı. Daha sonra sertleşmiş normal harç ve köpük numunelerin eğilme dayanım değerleri belirlendi. Deney sonuçları Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo. 4.7. Numunelerin eğilme dayanım değerleri

Numune Tipi	Karışım Kodu	Eğilme Dayanımı, MPa
NORMAL HARÇ	H-K	10.60
	H-K-KL	8.92
	H-KAU	1.85
	H-KAU-KL	1.80
	H-P	4.28
	H-P-KL	3.99
	H-GV	1.69
	H-GV-KL	1.66
	H-GK	8.80
	H-GK-KL	7.80
KÖPÜK BETON	F-K	3.24
	F-K-KL	2.80
	F-KAU	1.13
	F-KAU-KL	1.10
	F-P	1.38
	F-P-KL	1.31
	F-GV	1.08
	F-GV-KL	1.06
	F-GK	2.77
	F-GK-KL	2.42

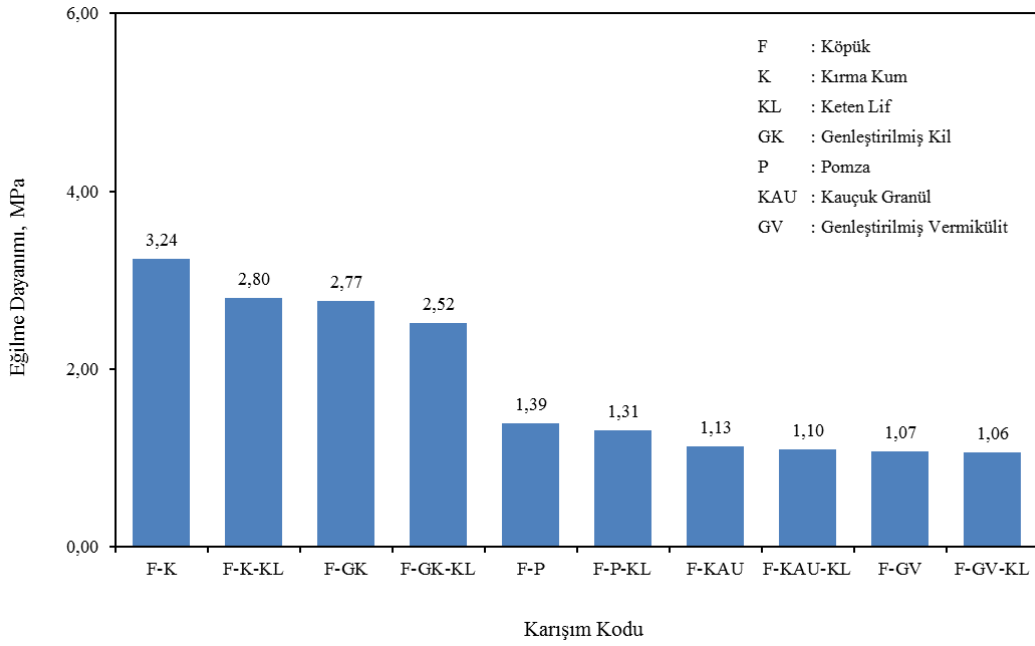
Kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve genleştirilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen normal harç karışımların eğilme dayanım değerleri sırasıyla 10.60, 8.80, 4.28, 1.85 ve 1.69 MPa keten lif takviyeli karışımların eğilme dayanım değerleri ise sırasıyla 9.13, 7.80, 3.99, 1.80 ve 1.66 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük eğilme dayanım değeri genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 1.66 MPa, en yüksek eğilme dayanım değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 10.60 MPa olarak elde edilmiştir. Normal harçların eğilme dayanım değerlerinin değişimi Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.13. Normal harçların eğilme dayanım değerlerinin değişimi

Kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve genleştirilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen köpük beton karışımların eğilme dayanım değerleri sırasıyla 3.24, 2.77, 1.39, 1.13 ve 1.07 MPa keten lif takviyeli karışımların eğilme dayanım değerleri ise sırasıyla 2.80, 2.52, 1.31, 1.10 ve 1.06 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük eğilme dayanım değeri genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 1.06 MPa, en yüksek eğilme dayanım değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 3.24 MPa olarak elde edilmiştir. Köpük betonların eğilme dayanım değerlerinin değişimi Şekil 4.14'de verilmiştir.

Normal harçların eğilme dayanımı keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 13.87, genleştirilmiş kil agregalı numunelerde % 11.36, pomza agregalı numunelerde % 6.78, kauçuk agregalı numunelerde % 2.70 ve genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 1.78 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile eğilme dayanımında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 13.87, en az azalma ise genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 1.78 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.14. Köpük betonların eğilme dayanım değerlerinin değişimi

Köpük betonların eğilme dayanımı keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 13.58, genleştirilmiş kil agregalı numunelerde % 9.03, pomza agregalı numunelerde % 5.76, kauçuk agregalı numunelerde % 2.65 ve genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 0.93 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile eğilme dayanımında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 13.58, en az azalma ise genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 0.93 olarak elde edilmiştir.

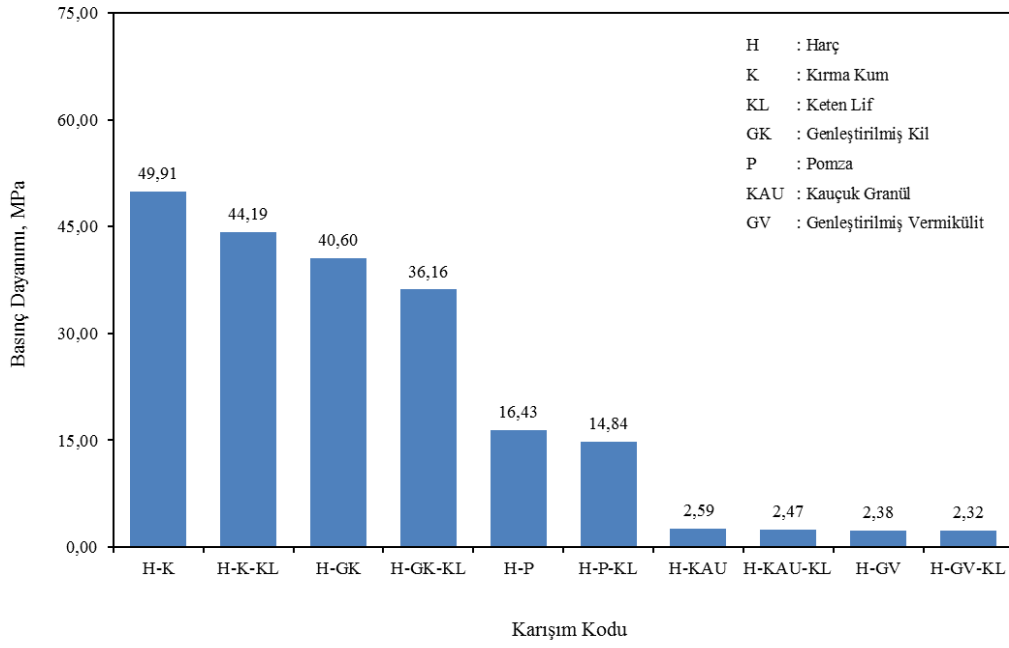
4.1.2.7. Basınç Dayanımı

28 gün standart küre tabi tutulan numuneler kuru ağırlığı değişmeyinceye kadar kurumaya bırakıldı. Daha sonra sertleşmiş normal harç ve köpük numunelerin eğilme dayanım değerleri belirlendi. Eğilme dayanım deneyinden sonra her bir numuneden elde edilen iki parça numuneye basınç dayanım deneyi uygulanmış ve elde edilen ortalama değerler basınç dayanım değeri olarak not edilmiştir. Basınç dayanımı deneyi sonucu bulunan her bir karışıma ait basınç dayanımı değerleri Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo. 4.8. Numunelerin basınç dayanım değerleri

Numune Tipi	Karışım Kodu	Basınç Dayanımı, MPa
NORMAL HARÇ	H-K	49.91
	H-K-KL	44.19
	H-KAU	2.59
	H-KAU-KL	2.47
	H-P	16.43
	H-P-KL	14.84
	H-GV	2.38
	H-GV-KL	2.32
	H-GK	40.60
	H-GK-KL	36.16
KÖPÜK BETON	F-K	21.17
	F-K-KL	18.94
	F-KAU	1.46
	F-KAU-KL	1.40
	F-P	9.02
	F-P-KL	8.31
	F-GV	1.36
	F-GV-KL	1.34
	F-GK	18.42
	F-GK-KL	16.66

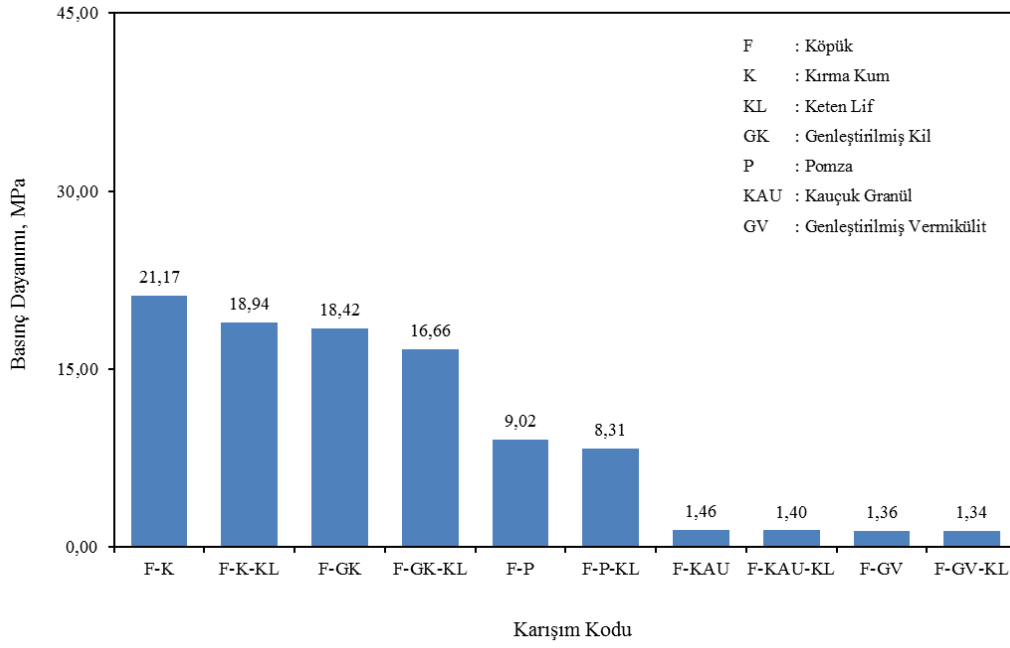
Kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve genleştirilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen normal harç karışımların basınç dayanım değerleri sırasıyla 49.91, 40.60, 16.43, 2.59 ve 2.38 MPa keten lif takviyeli karışımların basınç dayanım değerleri ise sırasıyla 44.19, 36.16, 14.84, 2.47 ve 2.32 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük basınç dayanım değeri genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 2.32 MPa, en yüksek basınç dayanım değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 49.91 MPa olarak elde edilmiştir. Normal harçların basınç dayanım değerlerinin değişimi Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.15. Normal harçların basınç dayanım değerlerinin değişimi

Kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve genleştirilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen köpük beton karışımların basınç dayanım değerleri sırasıyla 21.17, 18.42, 9.02, 1.46 ve 1.36 MPa keten lif takviyeli karışımların basınç dayanım değerleri ise sırasıyla 18.94, 16.66, 8.31, 1.40 ve 1.34 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük basınç dayanım değeri genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 1.34 MPa, en yüksek basınç dayanım değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 21.17 MPa olarak elde edilmiştir. Köpük betonların basınç dayanım değerlerinin değişimi Şekil 4.16'da verilmiştir.

Normal harçların basınç dayanımı keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 11.46, genleştirilmiş kil agregalı numunelerde % 10.94, pomza agregalı numunelerde % 9.68, kauçuk agregalı numunelerde % 4.63 ve genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 2.52 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile basınç dayanımında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 11.46, en az azalma ise genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 2.52 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.16. Köpük betonların basınç dayanım değerlerinin değişimi

Köpük betonların basınç dayanımı keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 10,3, genleştirilmiş kil agregalı numunelerde % 9,55, pomza agregalı numunelerde % 7,87, kauçuk agregalı numunelerde % 4,11 ve genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 1,47 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile basınç dayanımında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 10,53, en az azalma ise genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 1,47 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.16).

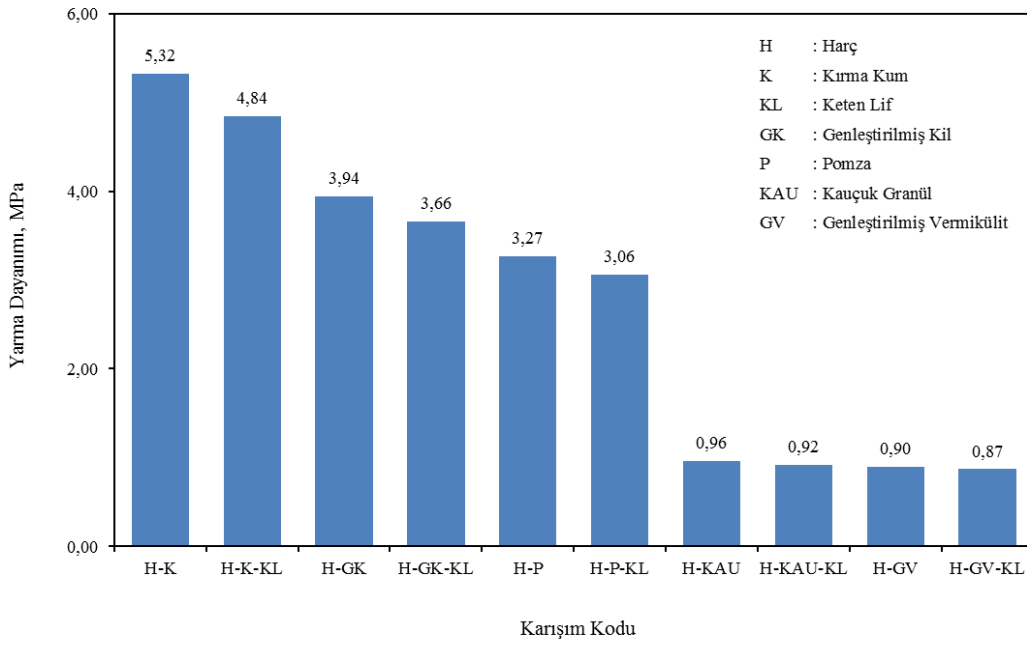
4.1.2.8. Yarma Dayanımı

28 gün standart küre tabi tutulan numuneler kuru ağırlığı değişmeyinceye kadar kurumaya bırakıldı. Daha sonra sertleşmiş normal harç ve köpük numunelerin yarma dayanımı değerleri belirlendi. Deney sonuçları Tablo 4.9’da verilmiştir.

Tablo 4.9. Numunelerin Yarma Dayanımı Değerleri

Numune Tipi	Karışım Kodu	Yarma Dayanımı, MPa
NORMAL HARÇ	H-K	5.32
	H-K-KL	4.84
	H-KAU	0.96
	H-KAU-KL	0.92
	H-P	3.27
	H-P-KL	3.06
	H-GV	0.90
	H-GV-KL	0.87
	H-GK	3.94
	H-GK-KL	3.66
KÖPÜK BETON	F-K	2.05
	F-K-KL	1.90
	F-KAU	0.79
	F-KAU-KL	0.76
	F-P	1.45
	F-P-KL	1.37
	F-GV	0.75
	F-GV-KL	0.73
	F-GK	1.73
	F-GK-KL	1.61

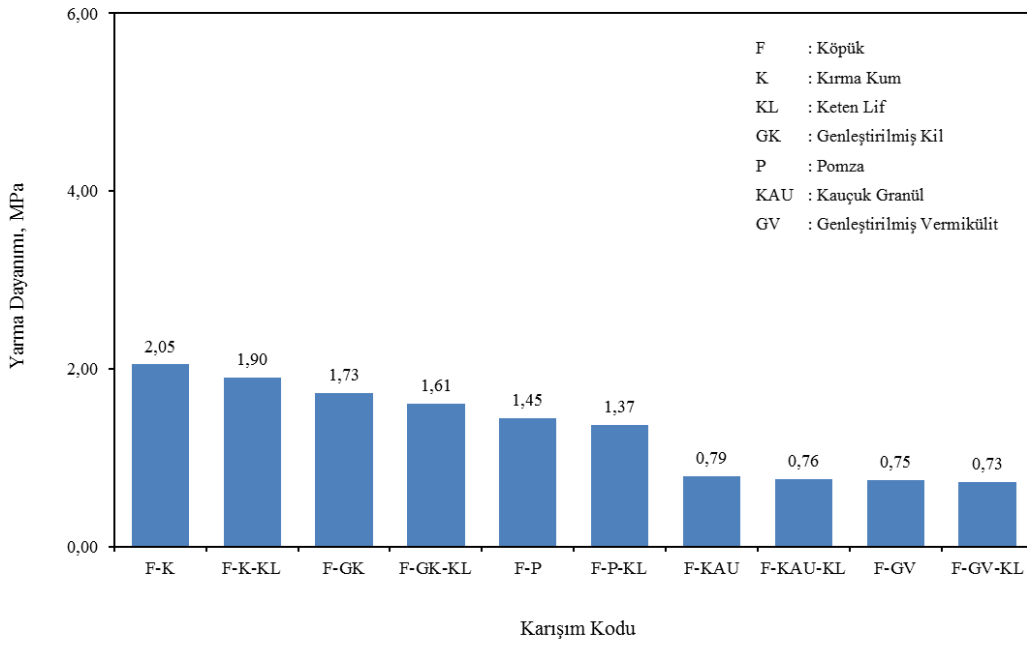
Kırma kum, genişletilmiş kil, pomza, kauçuk ve genişletilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen normal harç karışımların yarma dayanım değerleri sırasıyla 5.32, 3.94, 3.27, 0.96 ve 0.90 MPa keten lif takviyeli karışımların yarma dayanım değerleri ise sırasıyla 4.84, 3.66, 3.06, 0.92 ve 0.87 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük yarma dayanım değeri genişletilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.87 MPa, en yüksek yarma dayanım değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 5.32 MPa olarak elde edilmiştir. Normal harçların yarma dayanım değerlerinin değişimi Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17. Normal harçların yarma dayanım değerlerinin değişimi

Kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve genleştirilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen köpük beton karışımların yarma dayanım değerleri sırasıyla 2.05, 1.73, 1.45, 0.79 ve 0.75 MPa keten lif takviyeli karışımların yarma dayanım değerleri ise sırasıyla 1.90, 1.61, 1.37, 0.76 ve 0.73 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük yarma dayanım değeri genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.73 MPa, en yüksek yarma dayanım değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 2.05 MPa olarak elde edilmiştir. Köpük betonların yarma dayanım değerlerinin değişimi Şekil 4.18’de verilmiştir.

Normal harçların yarma dayanımı keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 9.02, genleştirilmiş kil agregalı numunelerde % 7.11, pomza agregalı numunelerde % 6.42, kauçuk agregalı numunelerde % 4.17 ve genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 3.33 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile yarma dayanımında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 9.02, en az azalma ise genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 3.33 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.18. Köpük betonların yarma dayanım değerlerinin değişimi

Köpük betonların yarma dayanımı keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 7.32, genleştirilmiş kil agregalı numunelerde % 6.94, pomza agregalı numunelerde % 5.52, kauçuk agregalı numunelerde % 3.80 ve genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 2.67 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile yarma dayanımında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 7.32, en az azalma ise genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 2.67 olarak elde edilmiştir.

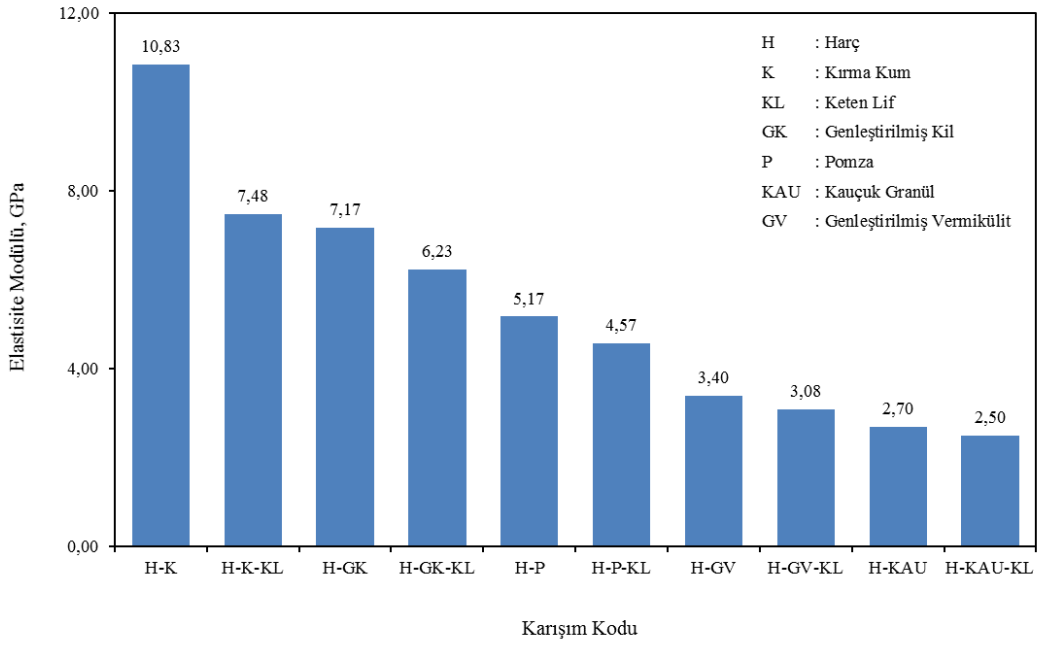
4.1.2.9. Elastisite Modülü

Gerilme-birim deformasyon grafikleri elde edilmiş ve bu değerler excel ortamında işlenerek elastisite modülü değerleri belirlenmiştir. Deney sonuçları Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10. Numunelerin elastisite modülü değerleri

Numune Tipi	Karışım Kodu	Elastisite Modülü, GPa
NORMAL HARÇ	H-K	10.83
	H-K-KL	7.48
	H-KAU	2.70
	H-KAU-KL	2.50
	H-P	5.17
	H-P-KL	4.57
	H-GV	3.40
	H-GV-KL	3.08
	H-GK	7.17
	H-GK-KL	6.23
KÖPÜK BETON	F-K	5.50
	F-K-KL	4.15
	F-KAU	1.80
	F-KAU-KL	1.68
	F-P	2.99
	F-P-KL	2.68
	F-GV	2.03
	F-GV-KL	1.87
	F-GK	4.10
	F-GK-KL	3.60

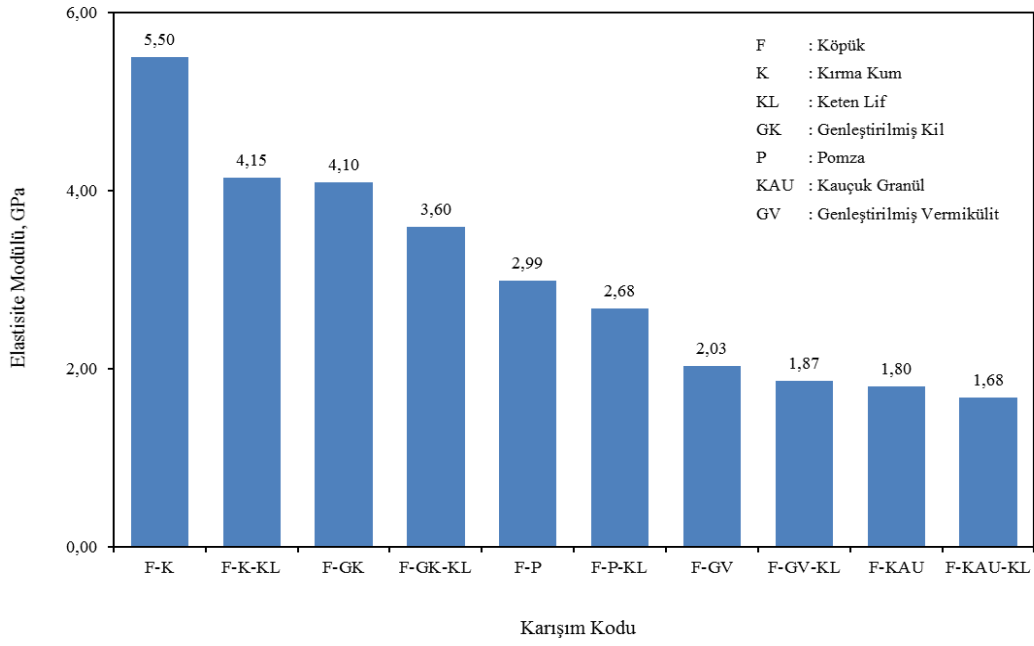
Kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, genleştirilmiş vermikülit ve kauçuk agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen normal harç karışımların elastisite modülü değerleri sırasıyla 10.83, 7.17, 5.17, 3.40, 2.70 GPa keten lif takviyeli karışımların elastisite modülü değerleri ise sırasıyla 7.48, 6.23, 4.57, 3.08 ve 2.50 GPa olarak elde edilmiştir. En düşük elastisite modülü değeri kauçuk agregalı keten lif takviyeli numunelerde 2.50 GPa, en yüksek elastisite modülü değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 10.83 GPa olarak elde edilmiştir. Normal harçların elastisite modül değerlerinin değişimi Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.19. Normal harçların elastisite modül değerlerinin değişimi

Kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, genleştirilmiş vermikülit ve kauçuk agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen köpük beton karışımların elastisite modülü değerleri sırasıyla 5.50, 4.10, 2.99, 2.03, 1.80 GPa keten lif takviyeli karışımların elastisite modülü değerleri ise sırasıyla 4.15, 3.60, 2.68, 1.87 ve 1.68 GPa olarak elde edilmiştir. En düşük elastisite modülü değeri kauçuk agregalı keten lif takviyeli numunelerde 1.68 GPa, en yüksek elastisite modülü değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 15.50 GPa olarak elde edilmiştir.. Köpük betonların elastisite modül değerlerinin değişimi Şekil 4.20’de verilmiştir.

Normal harçların elastisite modülü keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 30.93, genleştirilmiş kil agregalı numunelerde % 13.11, pomza agregalı numunelerde % 11.61, kauçuk agregalı numunelerde % 9.41 ve genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 7.41 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile elastisite modülü en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 30.93, en az azalma ise genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 7.41 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.20. Köpük betonların elastisite modül değerlerinin değişimi

Köpük betonların elastisite modülü keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 24.55, genleştirilmiş kil agregalı numunelerde % 12.20, pomza agregalı numunelerde % 10.37, kauçuk agregalı numunelerde % 7.88 ve genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 6.67 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile elastisite modülü en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 24.55, en az azalma ise genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 6.67 olarak elde edilmiştir.

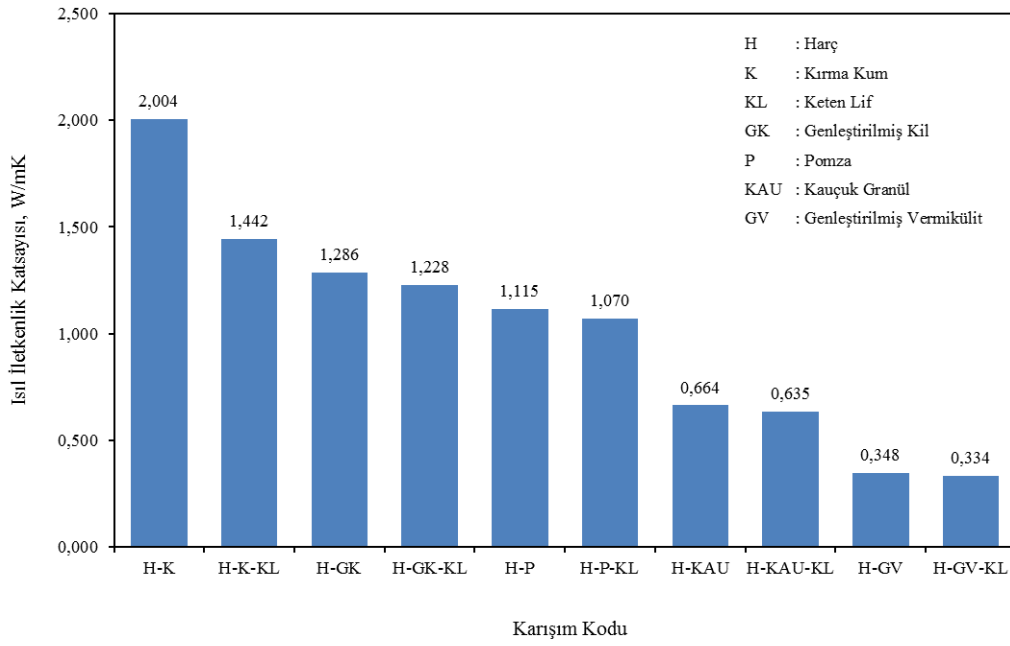
4.1.2.10. Isıl İletkenlik

Üretilen standart normal harç ve köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları TCi Isıl İletkenlik Analiz cihazı kullanılarak yapıldı. Cihaz değiştirilmiş geçici düzlem kaynağı (Değiştirilmiş Geçici Düzlem Kaynağı) metoduna göre ölçüm yapmaktadır. Isıl iletkenlik deney değerleri Tablo 4.11’de verilmiştir.

Tablo 4.11. Numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri

Numune Tipi	Karışım Kodu	Isıl İletkenlik Katsayısı, W/m.K
NORMAL HARÇ	H-K	2.004
	H-K-KL	1.442
	H-KAU	0.664
	H-KAU-KL	0.635
	H-P	1.255
	H-P-KL	0.972
	H-GV	0.348
	H-GV-KL	0.334
	H-GK	1.286
	H-GK-KL	1.228
KÖPÜK BETON	F-K	0.828
	F-K-KL	0.675
	F-KAU	0.383
	F-KAU-KL	0.371
	F-P	0.590
	F-P-KL	0.571
	F-GV	0.204
	F-GV-KL	0.198
	F-GK	0.644
	F-GK-KL	0.622

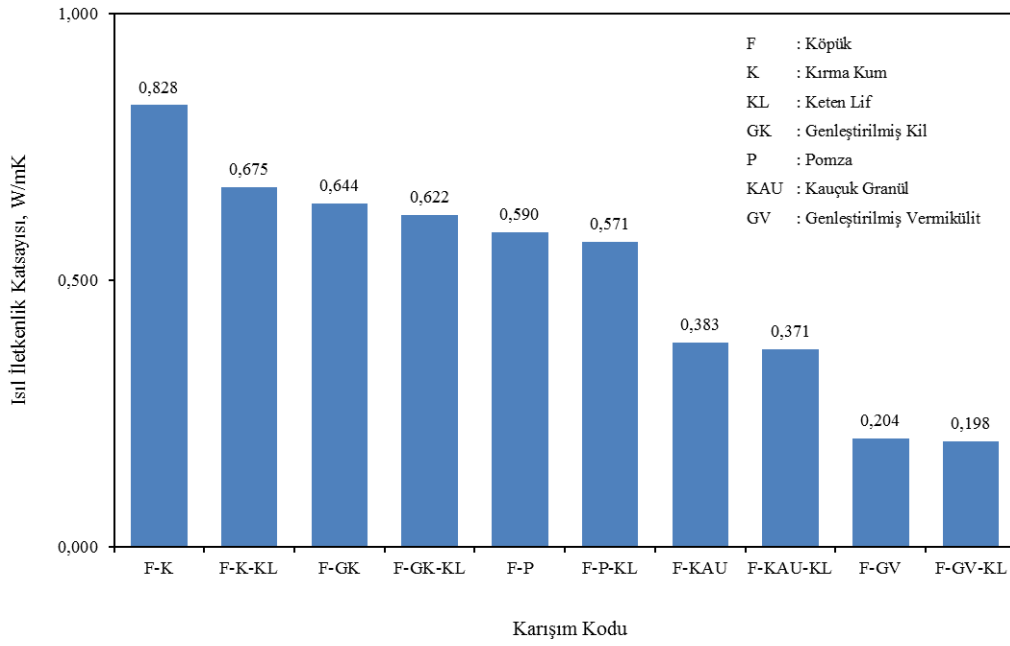
Kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve genleştirilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen normal harç karışımların ısı iletkenlik katsayı değerleri sırasıyla 2.004, 1.286, 1.115, 0.664, 0.348 W/m.K keten lif takviyeli karışımların su emme oranları ise sırasıyla 1.442, 1.228, 1.070, 0.635 ve 0.334 W/m.K olarak elde edilmiştir. En düşük ısı iletkenlik katsayı değeri genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.334 W/m.K, en yüksek ısı iletkenlik katsayı değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 2.004 W/m.K olarak elde edilmiştir. Normal harçların ısı iletkenlik katsayı değerlerinin değişimi Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21. Normal harçların ısı iletkenlik katsayı değerlerinin değişimi

Kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, kauçuk ve genleştirilmiş vermikülit agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen köpük beton karışımların ısı iletkenlik katsayı değerleri sırasıyla 0.828, 0.644, 0.590, 0.383 ve 0.204 W/m.K keten lif takviyeli karışımların su emme oranları ise sırasıyla 0.675, 0.622, 0.571, 0.371, 0.198 W/m.K olarak elde edilmiştir. En düşük ısı iletkenlik katsayı değeri genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.198 W/m.K, en yüksek ısı iletkenlik katsayı değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 0.828 W/m.K olarak elde edilmiştir. Köpük betonların ısı iletkenlik katsayı değerlerinin değişimi Şekil 4.22’de verilmiştir.

Normal harçların ısı iletkenlik katsayısı keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 28.06, genleştirilmiş kil agregalı numunelerde % 4.51, pomza agregalı numunelerde % 4.05, kauçuk agregalı numunelerde % 3.93 ve genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 3.75 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile ısı iletkenlik katsayısında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 28.06, en az azalma ise genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 3.75 olarak elde edilmiştir.

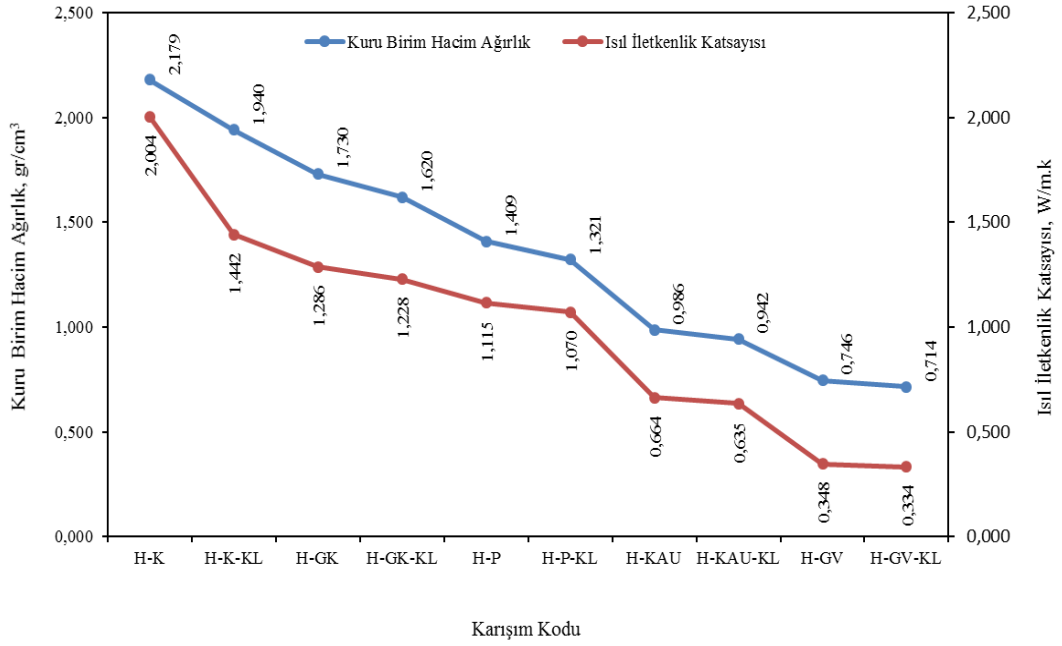


Şekil 4.22. Köpük betonların ısı iletkenlik katsayı değerlerinin değişimi

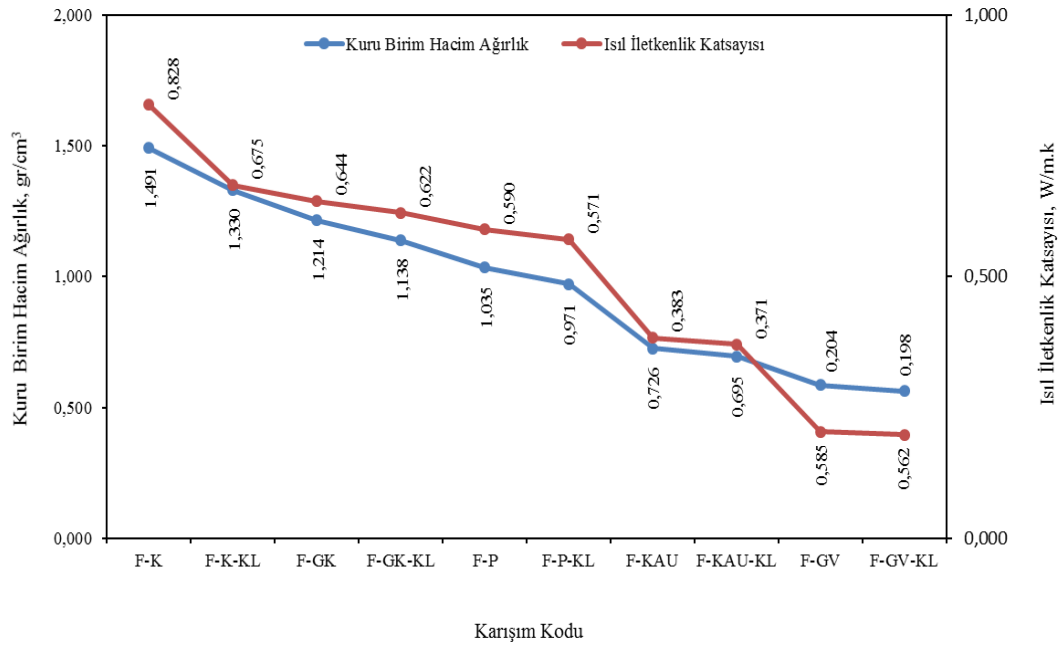
Köpük betonların ısı iletkenlik katsayısı keten lif takviyesi ile azalmıştır. Kırma kum agregalı numunelerde % 18.46, genleştirilmiş kil agregalı numunelerde % 3.42, pomza agregalı numunelerde % 3.19, kauçuk agregalı numunelerde % 3.13 ve genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 2.94 olarak elde edilmiştir. Keten lif takviyesi ile ısı iletkenlik katsayısında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 18.46, en az azalma ise genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 2.94 olarak elde edilmiştir.

Keten lif takviyesi ile harçların kuru birim ağırlıklarında, ultrases geçiş hızlarında ve ısı iletkenliklerinde azalma gözlenirken, buna karşılık boşluk oranı ve su emme değerlerinde artış elde edilmiştir. Keten lif içeren ve içermeyen pomza agregalı harçların ısı iletkenlik değerleri kırma kum agregalı harçlara kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir.

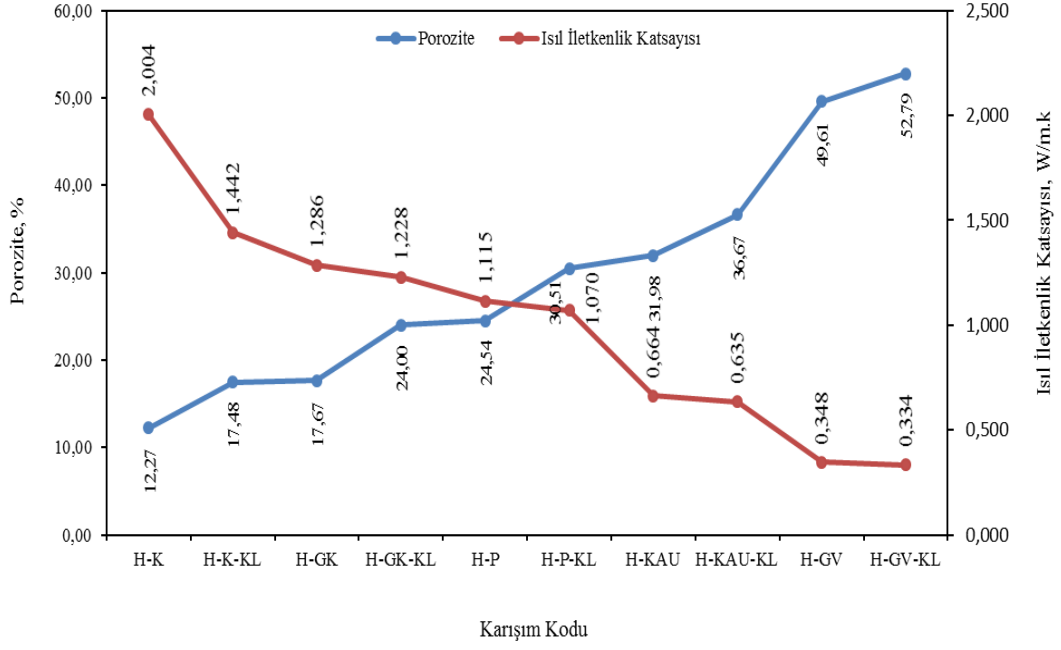
Normal harçların ve köpük betonların kuru birim hacim ağırlıklarında azalmaya bağlı olarak boşluk-gözenek (porozite) miktarının artması ile ısı iletkenlik katsayı değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Bu durum ısı iletkenlik katsayısı bakımından daha verimli sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Normal harçların ve köpük betonların kuru birim hacim ağırlık - ısı iletkenlik katsayı ilişkisi sırasıyla Şekil 4.23 ve 4.24'de verilmiştir. Normal harçların ve köpük betonların porozite - ısı iletkenlik katsayı ilişkisi ise sırasıyla Şekil 4.25 ve 4.26'da verilmiştir.



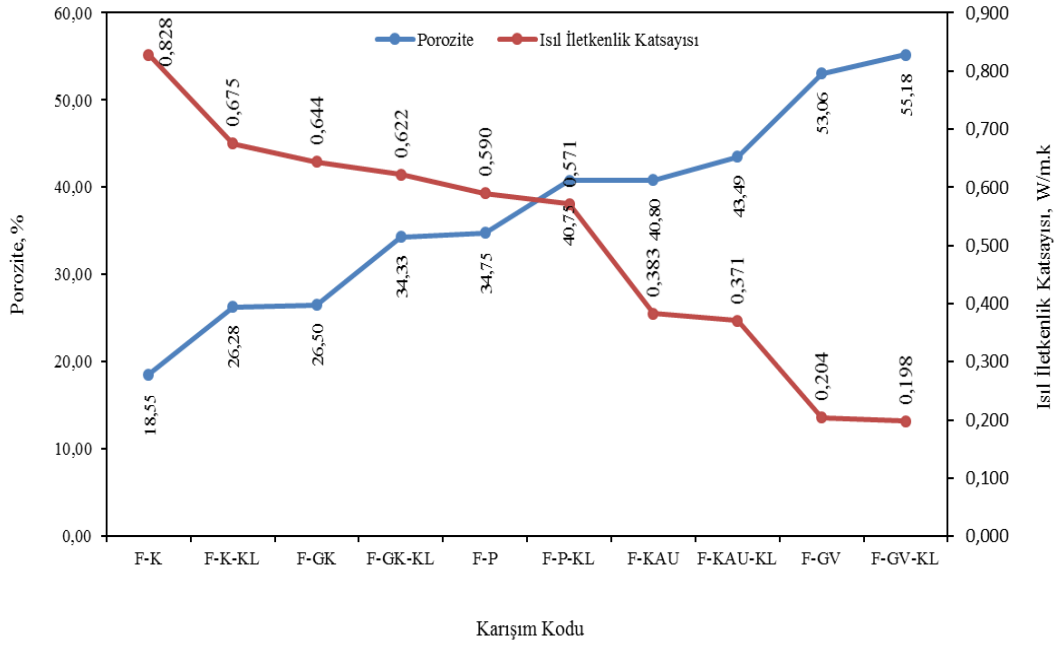
Şekil 4.23. Normal harçların kuru birim hacim ağırlık - ısı iletkenlik katsayısı ilişkisi



Şekil 4.24. Köpük betonların kuru birim hacim ağırlık - ısı iletkenlik katsayısı ilişkisi



Şekil 4.25. Normal harçların porozite - ısıl iletkenlik katsayısı ilişkisi



Şekil 4.26. Köpük betonların porozite - ısıl iletkenlik katsayısı ilişkisi

4.1.2.11. Ses Yutum Katsayısı

Ses yutum deneyleri her bir karışım için çapları 29 mm ve 100 mm olan numuneler, ses yutum katsayıları ve ses iletim kayıplarının ölçümü için empedans tüpü ile teste tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Daha sonra ses yutum katsayılarının büyük ve küçük çaplı numunelerinin ölçüm sonuçları birleştirilmiş ve ortak frekans aralığındaki değerler interpolasyon yapılarak bütün frekans bandı için grafiklere yansıtılan ses yutum katsayıları elde edilmiştir. Normal harç ve köpük beton olarak üretilen farklı kalınlıktaki numuneler ses yutum katsayısı ölçümlerine tabi tutulmuş, merkez oktav bant, 1/3 oktav bant ölçüm sonuçları elde edilmiş ve NRC değerleri incelenerek karşılaştırılmıştır. Deneyi sonucu bulunan her bir karışıma ait normal harç numunelerin ses yutum katsayı değerleri Tablo 4.12’de ve köpük beton numunelerin ses yutum katsayı değerleri Tablo 4.13’de verilmiştir.

Tablo 4.12. Normal harç numunelerin ses yutum katsayı değerleri

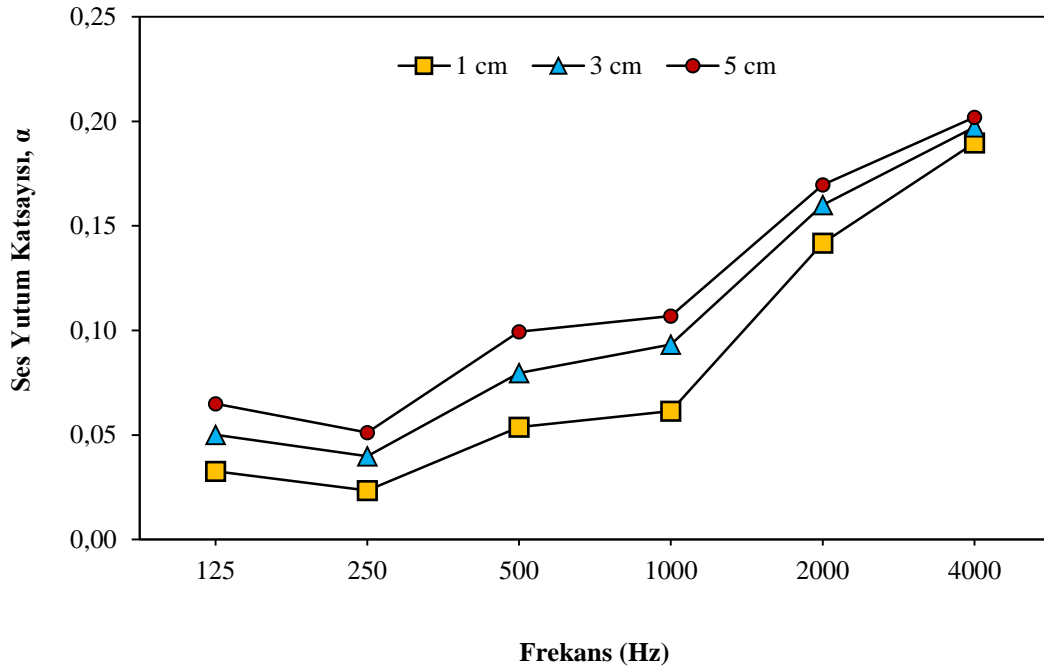
KARIŞIM KODU	Kalınlık cm	Frekans (Hz)																	NRC	
		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000		5000
H-K	1 cm	0,0179	0,0327	0,0140	0,0158	0,0235	0,0255	0,0226	0,0539	0,0775	0,0630	0,0615	0,0802	0,1105	0,1417	0,1637	0,1813	0,1897	0,1860	0,0701
	3 cm	0,0288	0,0501	0,0246	0,0287	0,0399	0,0457	0,0442	0,0797	0,1116	0,0952	0,0933	0,1089	0,1333	0,1600	0,1769	0,1875	0,1971	0,1929	0,0932
	5 cm	0,0382	0,0650	0,0325	0,0386	0,0511	0,0579	0,0581	0,0994	0,1344	0,1119	0,1069	0,1219	0,1457	0,1697	0,1844	0,1952	0,2019	0,1972	0,1068
H-K-KL	1 cm	0,0253	0,0409	0,0161	0,0164	0,0336	0,0261	0,0475	0,0580	0,0793	0,0645	0,0728	0,1007	0,1215	0,1477	0,1646	0,1794	0,1937	0,1872	0,0780
	3 cm	0,0350	0,0565	0,0243	0,0266	0,0559	0,0475	0,0814	0,0875	0,1180	0,0957	0,0985	0,1194	0,1389	0,1583	0,1774	0,1899	0,1973	0,1940	0,1001
	5 cm	0,0413	0,0655	0,0337	0,0390	0,0647	0,0583	0,1066	0,1096	0,1386	0,1139	0,1146	0,1312	0,1514	0,1705	0,1896	0,1997	0,2084	0,2055	0,1149
H-GK	1 cm	0,1076	0,0204	0,0217	0,0205	0,0958	0,0635	0,0659	0,0623	0,1447	0,1368	0,1246	0,1018	0,1167	0,1075	0,1075	0,1235	0,1333	0,0813	0,0976
	3 cm	0,1240	0,0332	0,0354	0,0324	0,1201	0,0869	0,0858	0,0809	0,1565	0,1538	0,1444	0,1141	0,1263	0,1215	0,1157	0,1325	0,1453	0,1052	0,1167
	5 cm	0,1478	0,0494	0,0501	0,0494	0,1367	0,1027	0,0992	0,0967	0,1685	0,1672	0,1618	0,1282	0,1383	0,1319	0,1203	0,1391	0,1535	0,1192	0,1318
H-GK-KL	1 cm	0,1202	0,0898	0,0281	0,0226	0,1142	0,0922	0,0896	0,0902	0,1350	0,1436	0,1182	0,1020	0,1188	0,1172	0,1036	0,1273	0,1352	0,1034	0,1099
	3 cm	0,1318	0,0959	0,0410	0,0372	0,1250	0,1074	0,0976	0,0995	0,1469	0,1548	0,1261	0,1156	0,1296	0,1293	0,1169	0,1396	0,1497	0,1160	0,1200
	5 cm	0,1486	0,1029	0,0532	0,0524	0,1335	0,1167	0,1091	0,1176	0,1604	0,1681	0,1425	0,1253	0,1395	0,1449	0,1317	0,1491	0,1593	0,1284	0,1346
H-P	1 cm	0,1209	0,0569	0,0176	0,0158	0,0924	0,1080	0,0885	0,0781	0,0981	0,1248	0,1236	0,1191	0,1258	0,1643	0,1584	0,1220	0,1520	0,1648	0,1146
	3 cm	0,1274	0,0644	0,0285	0,0272	0,1099	0,1283	0,1108	0,0947	0,1168	0,1433	0,1403	0,1338	0,1398	0,1840	0,1800	0,1338	0,1669	0,1784	0,1322
	5 cm	0,1522	0,0776	0,0426	0,0410	0,1419	0,1565	0,1306	0,1153	0,1351	0,1551	0,1562	0,1444	0,1543	0,1980	0,1902	0,1565	0,1793	0,1903	0,1529
H-P-KL	1 cm	0,1311	0,0600	0,0208	0,0162	0,1025	0,0892	0,0789	0,0658	0,1167	0,1266	0,1303	0,1206	0,1776	0,1745	0,1698	0,1261	0,1661	0,1654	0,1183
	3 cm	0,1432	0,0733	0,0297	0,0275	0,1177	0,1021	0,0905	0,0810	0,1287	0,1391	0,1443	0,1344	0,1909	0,1890	0,1850	0,1399	0,1793	0,1782	0,1330
	5 cm	0,1554	0,0934	0,0434	0,0412	0,1489	0,1249	0,1112	0,1078	0,1398	0,1499	0,1585	0,1489	0,2053	0,2014	0,1960	0,1570	0,1898	0,1886	0,1541
H-GV	1 cm	0,1124	0,0639	0,0209	0,0201	0,0924	0,0856	0,0740	0,0685	0,0811	0,1176	0,1656	0,1622	0,1862	0,2019	0,1606	0,1631	0,1632	0,1300	0,1321
	3 cm	0,1233	0,0755	0,0336	0,0315	0,1082	0,0988	0,0847	0,0803	0,0967	0,1423	0,1873	0,1833	0,1976	0,2189	0,1681	0,1691	0,1756	0,1410	0,1486
	5 cm	0,1373	0,0837	0,0466	0,0432	0,1225	0,1088	0,0973	0,0910	0,1163	0,1626	0,2000	0,1954	0,2072	0,2296	0,1790	0,1803	0,1867	0,1558	0,1608
H-GV-KL	1 cm	0,1392	0,0762	0,0226	0,0214	0,0947	0,0860	0,0767	0,0699	0,1028	0,1517	0,1710	0,1769	0,2296	0,1990	0,1949	0,1999	0,2000	0,1476	0,1336
	3 cm	0,1633	0,0955	0,0379	0,0319	0,1100	0,0991	0,0872	0,0823	0,1277	0,1776	0,1926	0,2027	0,2522	0,2200	0,2073	0,2107	0,2114	0,1787	0,1512
	5 cm	0,1767	0,1226	0,0593	0,0492	0,1232	0,1196	0,1092	0,1015	0,1578	0,2013	0,2137	0,2219	0,2683	0,2358	0,2185	0,2216	0,2258	0,1961	0,1685
H-KAU	1 cm	0,0150	0,0510	0,0194	0,0198	0,1029	0,0980	0,0846	0,0807	0,0900	0,1225	0,2029	0,1946	0,2608	0,2133	0,1596	0,1629	0,1720	0,1296	0,1499
	3 cm	0,0301	0,0603	0,0265	0,0276	0,1284	0,1159	0,1097	0,1056	0,1156	0,1719	0,2495	0,2451	0,3323	0,2793	0,2225	0,2362	0,2431	0,2291	0,1907
	5 cm	0,0406	0,0712	0,0377	0,0381	0,1394	0,1289	0,1270	0,1279	0,1379	0,2217	0,2946	0,2821	0,3662	0,3130	0,2485	0,2553	0,2795	0,2645	0,2187
H-KAU-KL	1 cm	0,0162	0,0644	0,0237	0,0248	0,1137	0,1043	0,0917	0,0920	0,0930	0,1260	0,2129	0,2966	0,3136	0,2691	0,3409	0,3290	0,2853	0,2647	0,1719
	3 cm	0,0303	0,0748	0,0366	0,0379	0,1219	0,1173	0,1113	0,1125	0,1160	0,1771	0,2575	0,3209	0,3538	0,3105	0,3682	0,3519	0,3205	0,2876	0,2006
	5 cm	0,0419	0,0859	0,0467	0,0487	0,1396	0,1348	0,1251	0,1345	0,1394	0,2208	0,2975	0,3444	0,3713	0,3387	0,3903	0,3717	0,3453	0,3092	0,2276

Tablo 4.12. Köpük beton numunelerin ses yutum katsayı değerleri

KARIŞIM KODU	Kalınlık cm	Frekans (Hz)																	NRC	
		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000		5000
F-K	1 cm	0,0126	0,0203	0,0310	0,0401	0,0864	0,0934	0,1140	0,1888	0,1956	0,1266	0,0946	0,1693	0,1525	0,1669	0,1902	0,2161	0,2446	0,2799	0,1342
	3 cm	0,0309	0,0471	0,0596	0,0697	0,1378	0,1407	0,1697	0,2432	0,2571	0,1926	0,1416	0,2163	0,1923	0,2246	0,2284	0,2701	0,3378	0,4101	0,1868
	5 cm	0,0482	0,0663	0,0799	0,1060	0,1879	0,1946	0,2318	0,3113	0,3452	0,2776	0,2029	0,2692	0,2400	0,2765	0,2785	0,3333	0,4019	0,4663	0,2446
F-K-KL	1 cm	0,0266	0,0543	0,0207	0,0276	0,0834	0,1036	0,1200	0,1680	0,1859	0,1483	0,1396	0,1703	0,1605	0,1827	0,1902	0,2171	0,2756	0,2915	0,1434
	3 cm	0,0317	0,0681	0,0600	0,0707	0,1307	0,1598	0,1796	0,2407	0,2687	0,2163	0,1904	0,2215	0,2022	0,2224	0,2309	0,2733	0,3422	0,4136	0,1960
	5 cm	0,0485	0,0769	0,0806	0,1067	0,1826	0,1953	0,2323	0,3015	0,3472	0,2799	0,2445	0,2531	0,2480	0,2800	0,2994	0,3556	0,4095	0,4688	0,2521
F-GK	1 cm	0,0904	0,0300	0,0235	0,0208	0,1005	0,0783	0,0702	0,1753	0,2191	0,1735	0,1528	0,1592	0,1484	0,1898	0,1707	0,1861	0,2543	0,2544	0,1546
	3 cm	0,1291	0,0540	0,0503	0,0447	0,1387	0,1176	0,1145	0,2149	0,2744	0,2225	0,1940	0,2065	0,1939	0,2405	0,2167	0,2694	0,3361	0,4150	0,1970
	5 cm	0,1598	0,0979	0,0875	0,0797	0,2123	0,1897	0,1880	0,2772	0,3691	0,2980	0,2395	0,2494	0,2331	0,2886	0,2811	0,3418	0,4009	0,4695	0,2544
F-GK-KL	1 cm	0,1014	0,0311	0,0329	0,0478	0,1088	0,1295	0,1727	0,1974	0,2628	0,2312	0,1762	0,1616	0,1718	0,2079	0,2402	0,2578	0,2974	0,3545	0,1726
	3 cm	0,1267	0,0646	0,0733	0,0938	0,1625	0,1835	0,2340	0,2648	0,3206	0,2705	0,2266	0,1927	0,2092	0,2519	0,2921	0,3121	0,3560	0,4187	0,2264
	5 cm	0,1397	0,1012	0,1067	0,1459	0,2070	0,2220	0,2692	0,3169	0,3738	0,3313	0,2782	0,2358	0,2594	0,2996	0,338	0,3667	0,4194	0,4754	0,2754
F-P	1 cm	0,1212	0,0635	0,0421	0,0492	0,1341	0,1777	0,2179	0,1864	0,2042	0,1803	0,2122	0,2024	0,2322	0,2540	0,2537	0,2747	0,3005	0,3428	0,1967
	3 cm	0,1449	0,0904	0,0723	0,0993	0,1793	0,2257	0,2654	0,2278	0,2961	0,2344	0,2528	0,2267	0,2545	0,2913	0,2787	0,3075	0,3366	0,4093	0,2378
	5 cm	0,1683	0,1193	0,1094	0,1343	0,2149	0,2557	0,3004	0,2753	0,3249	0,2711	0,2975	0,2639	0,2906	0,3306	0,3160	0,3426	0,3797	0,4484	0,2796
F-P-KL	1 cm	0,1246	0,0689	0,0449	0,0520	0,1392	0,1883	0,2182	0,1891	0,2051	0,2220	0,2303	0,2288	0,2361	0,2657	0,2645	0,2749	0,3015	0,3455	0,2061
	3 cm	0,1563	0,1213	0,0953	0,1076	0,1956	0,2282	0,2661	0,2290	0,2473	0,2619	0,2663	0,2645	0,2697	0,3026	0,2927	0,3188	0,3476	0,4158	0,2484
	5 cm	0,1993	0,1676	0,1385	0,1531	0,236	0,2662	0,3047	0,2673	0,2867	0,2942	0,3027	0,2962	0,3039	0,3448	0,3294	0,3524	0,3880	0,4546	0,2877
F-GV	1 cm	0,1292	0,0697	0,0440	0,0505	0,1255	0,1421	0,1624	0,1821	0,1722	0,1397	0,2069	0,2327	0,2606	0,3203	0,2696	0,2736	0,3007	0,3504	0,2087
	3 cm	0,1671	0,0983	0,0706	0,0811	0,1860	0,2018	0,2236	0,2436	0,2297	0,1974	0,2613	0,2819	0,3133	0,3657	0,2940	0,2992	0,3403	0,4343	0,2642
	5 cm	0,1894	0,1264	0,1023	0,1101	0,2425	0,2590	0,2783	0,2879	0,2711	0,2345	0,2989	0,3121	0,3480	0,3962	0,3133	0,3203	0,3871	0,5154	0,3064
F-GV-KL	1 cm	0,1343	0,0900	0,0779	0,0824	0,1397	0,1598	0,1639	0,1998	0,1825	0,1517	0,2249	0,2489	0,2830	0,3452	0,2706	0,2821	0,3140	0,3602	0,2274
	3 cm	0,1733	0,1197	0,1036	0,1165	0,1978	0,2221	0,2252	0,2556	0,2332	0,2004	0,2702	0,2853	0,3262	0,3794	0,3010	0,3124	0,3579	0,4195	0,2757
	5 cm	0,1996	0,1477	0,1390	0,1613	0,2558	0,2825	0,2815	0,3094	0,2727	0,2515	0,3095	0,3222	0,3606	0,4039	0,3245	0,3444	0,3969	0,5164	0,3196
F-KAU	1 cm	0,1117	0,0874	0,0994	0,1151	0,1721	0,1963	0,2435	0,2895	0,2633	0,2461	0,2604	0,3638	0,3939	0,3863	0,3609	0,3754	0,4177	0,4240	0,2771
	3 cm	0,1400	0,1114	0,1380	0,1531	0,2229	0,2571	0,3067	0,3403	0,3128	0,2958	0,3092	0,4167	0,4515	0,4465	0,4218	0,4331	0,4717	0,4798	0,3297
	5 cm	0,1696	0,1275	0,1589	0,1911	0,2583	0,2870	0,3297	0,3634	0,3355	0,3116	0,3344	0,4534	0,4950	0,4938	0,4768	0,4997	0,5331	0,5353	0,3625
F-KAU-KL	1 cm	0,1203	0,0926	0,1384	0,1661	0,1814	0,2176	0,2892	0,3785	0,4021	0,4127	0,4593	0,5512	0,6111	0,6317	0,6178	0,6310	0,6907	0,7094	0,4127
	3 cm	0,1691	0,1492	0,1986	0,2508	0,2767	0,3396	0,4242	0,4888	0,4975	0,4948	0,5388	0,6271	0,7035	0,7245	0,7061	0,7305	0,7952	0,8116	0,5072
	5 cm	0,2165	0,2061	0,2705	0,3296	0,364	0,4346	0,4990	0,5450	0,5584	0,5590	0,5965	0,6856	0,7731	0,7903	0,7764	0,7879	0,8433	0,8593	0,5740

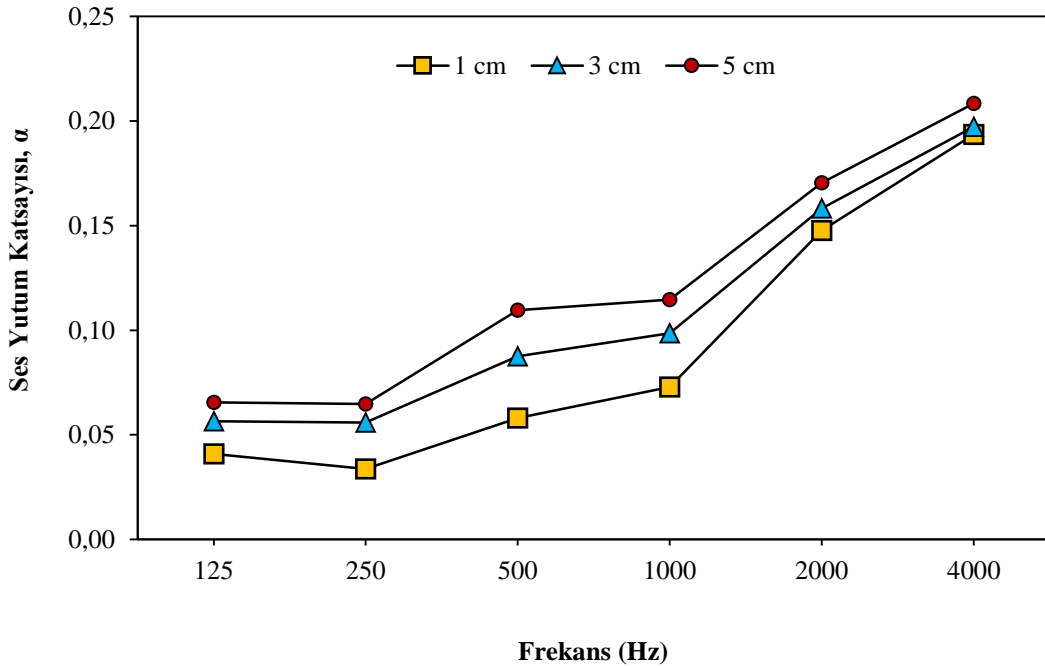
Bu çalışma farklı kalınlıklarda ve farklı agrega tipleri kullanılmasının ses yutum ve ses iletim katsayısının üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla yapılmıştır.

Kırma kum agregalı üretilen normal harç referans numunelerde ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0,0327, 0,0235, 0,0539, 0,0615, 0,1417, 0,1897, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0,0501, 0,0399, 0,0797, 0,0933, 0,16, 0,1971, 5 cm kalınlık değeri için: 0,065, 0,0511, 0,994, 0,1069, 0,1697, 0,2019 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 250 Hz iken 0.0235 ile en düşük, frekans = 4000 Hz ise 0.1897 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 250 Hz de iken 0.0399 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.1971 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 250 Hz de iken 0.0511 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.2019 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Kırma kum agregası kullanılarak üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.27’de verilmiştir.



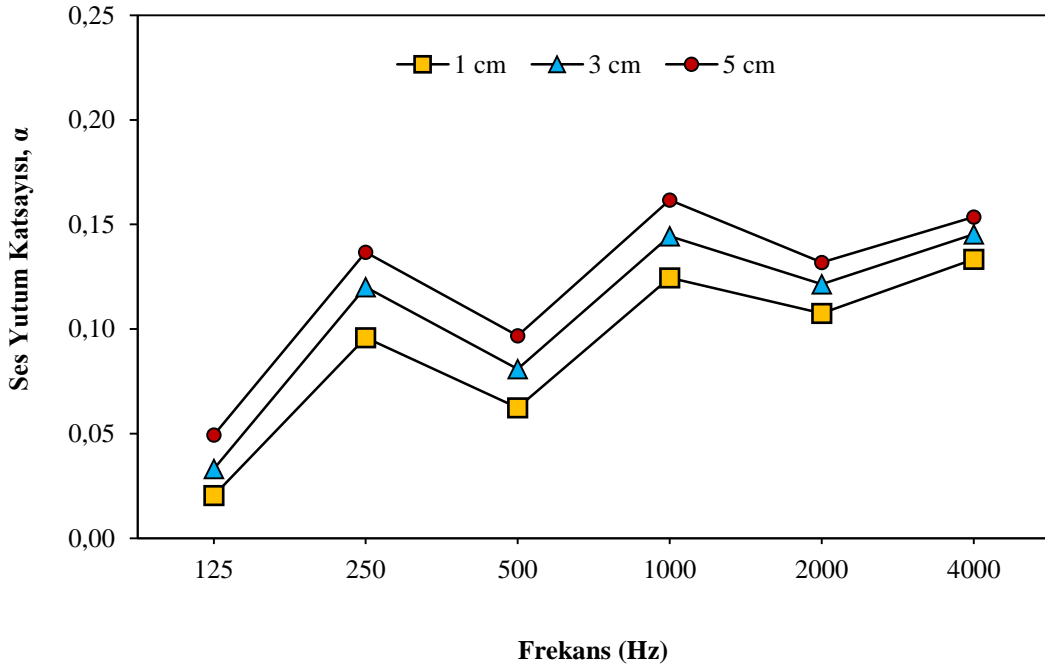
Şekil 4.27. Kırma kum agregası kullanılarak üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Keten lif takviyeli kırma kum agregalı üretilen normal harç referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0409, 0.0336, 0.0580, 0.0728, 0.1477, 0.1937, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0565, 0.0559, 0.0875, 0.0985, 0.1583, 0.1973, 5 cm kalınlık değeri için: 0.0655, 0.0647, 0.1096, 0.1146, 0.1705, 0.2084 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 250 Hz iken 0.0336 ile en düşük, frekans = 4000 Hz ise 0.1937 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 250 Hz de iken 0.0559 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.1973 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 250 Hz de iken 0.665 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.2084 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağılı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Kırma kum agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağılı değişimi Şekil 4.28'te verilmiştir.



Şekil 4.28. Kırma kum agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağılı değişimi

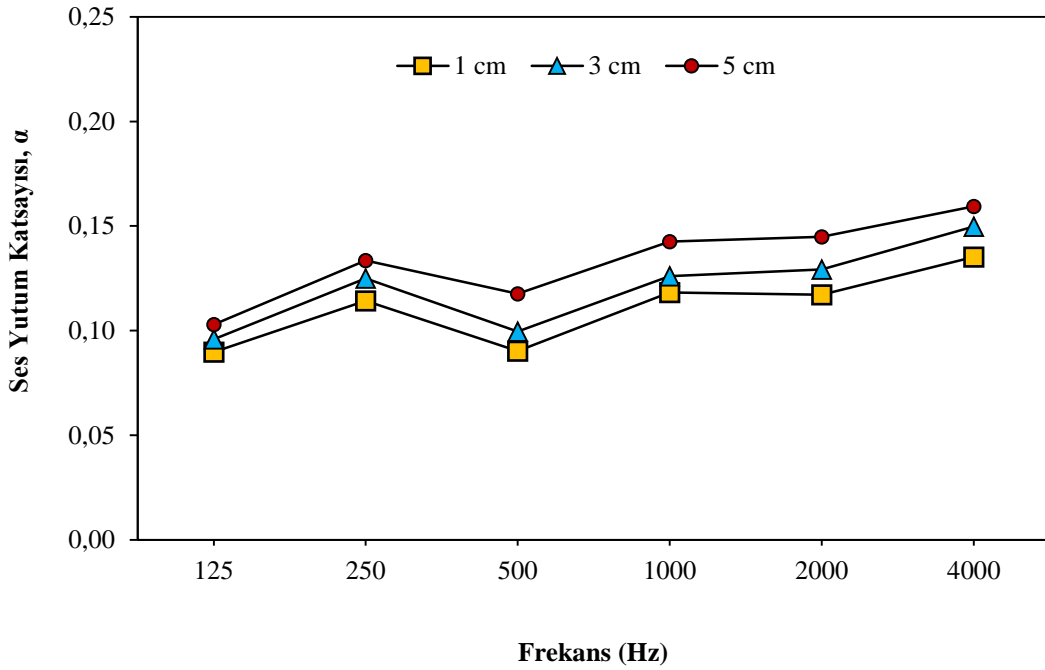
Genleştirilmiş kil agregalı üretilen normal harç referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0204, 0.0958, 0.0623, 0.1246, 0.1075, 0.1333, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0332, 0.1201, 0.0809, 0.1444, 0.1215, 0.1453, 5 cm kalınlık değeri için: 0.0494, 0.1367, 0.967, 0.1618, 0.1319, 0.1535 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0.0204 ile en düşük, frekans = 4000 Hz ise 0.1333 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125Hz de iken 0.0332 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.1453 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0494 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.1535 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.29. Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Keten lif takviyeli genleştirilmiş kil agregalı üretilen normal harç referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0898, 0.1142, 0.0902, 0.1182, 0.1172, 0.1352, 3 cm

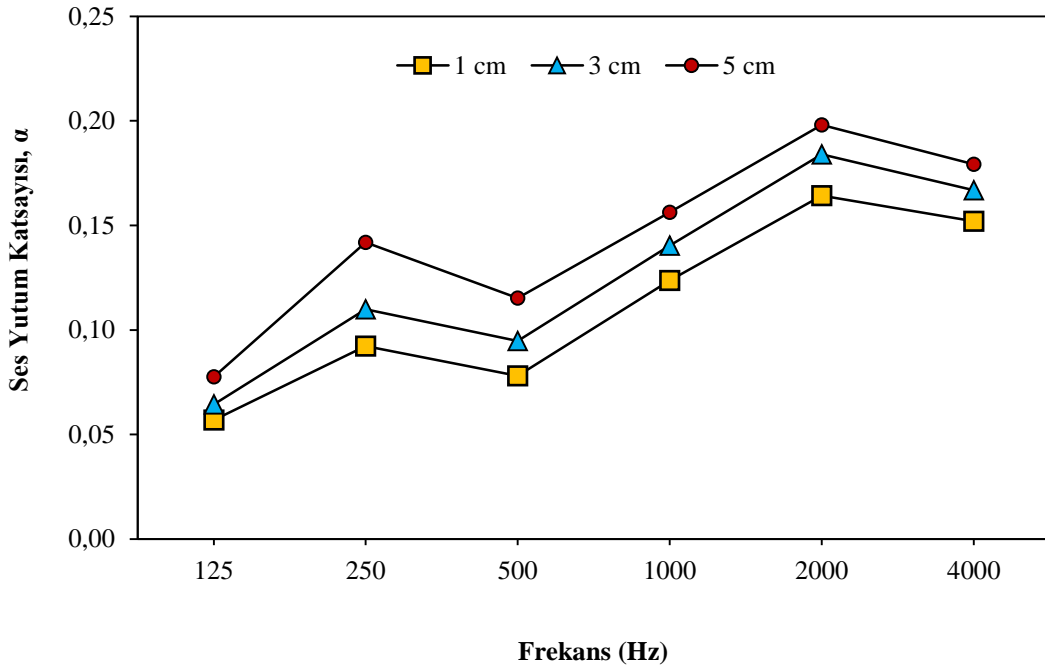
kalınlık deęeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0959, 0.1250, 0.0995, 0.1261, 0.1293, 0.1497, 5 cm kalınlık deęeri için: 0.1029, 0.1335, 0.1176, 0.1425, 0.1449, 0.1593 olarak elde edilmiřtir. Numunelerin 1 cm kalınlık deęeri için frekans = 125 Hz iken 0.0898 ile en dūřuk, frekans = 4000 Hz ise 0.1352 ile en yūysek, 3 cm kalınlık deęeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0959 ile en dūřuk, frekans = 4000 Hz de ise 0.1497 ile en yūysek 5 cm kalınlık deęeri için frekans = 125 Hz de iken 0.1029 ile en dūřuk, frekans = 4000 Hz de ise 0.1593 ile en yūysek ses yutum katsayı deęeri elde edilmiřtir. Kalınlıęa baęlı olarak ses yutum katsayı deęerinde artıř gōzlemlenmiřtir. Genel anlamda frekans deęeri arttıķca ses yutum katsayı deęeri de artmıřtır. Genleřtirilmiř kil agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle ūretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı deęerlerinin kalınlıęa baęlı deęiřimi Őekil 4.30'da verilmiřtir.



Őekil 4.30. Genleřtirilmiř kil agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle ūretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Pomza agregalı ūretilen normal harç referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0569, 0.0924, 0.0781, 0.1236, 0.1643, 0.1520, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0644, 0.1099, 0.0947, 0.1403, 0.1840, 0.1669, 5 cm kalınlık değeri için: 0.0776, 0.1419, 0.1153, 0.1562, 0.198, 0.1793 olarak elde edilmiştir.

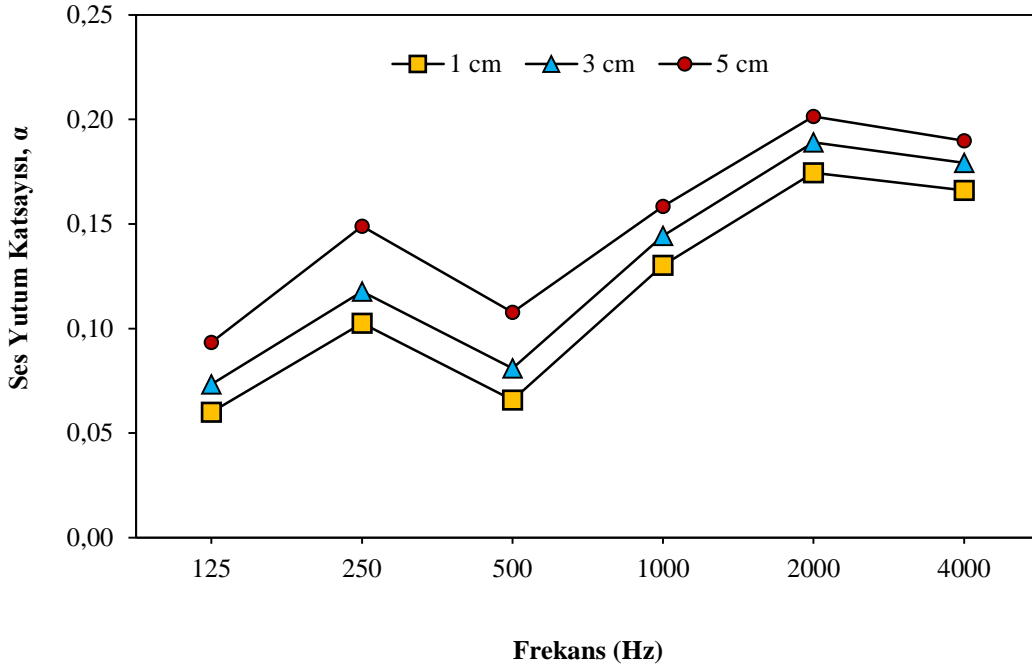
Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0.0569 ile en düşük, frekans = 2000 Hz ise 0.1643 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0644 ile en düşük, frekans = 2000 Hz de ise 0.184 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0776 ile en düşük, frekans = 2000 Hz de ise 0.198 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Pomza agregası kullanılarak üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.31’de verilmiştir.



Şekil 4.31. Pomza agregası kullanılarak üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Keten lif takviyeli pomza agregalı üretilen normal harç referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.06, 0.1025, 0.0658, 0.1303, 0.1745, 0.1661, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0733, 0.1177, 0.0810, 0.1443, 0.1890, 0.1793, 5 cm kalınlık değeri için: 0.0934, 0.1489, 0.1078, 0.1585, 0.2014, 0.1898 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0.06 ile en düşük, frekans = 2000 Hz ise 0.1745 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0733 ile en düşük, frekans = 2000 Hz de ise 0.189 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri

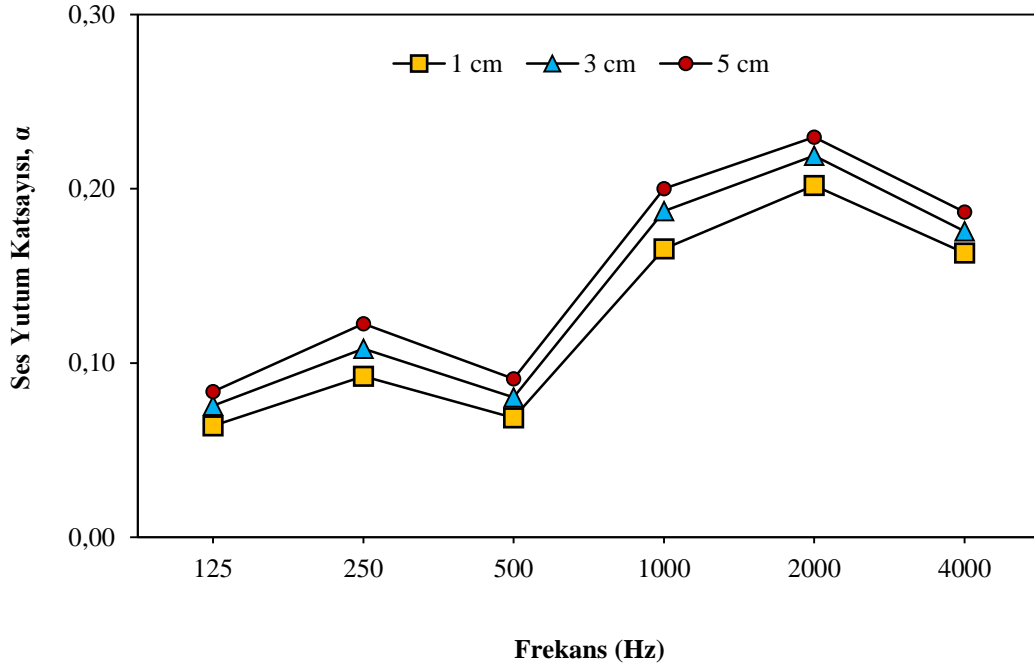
için frekans = 125 Hz de iken 0.0934 ile en düşük, frekans = 2000 Hz de ise 0.2014 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Pomza agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.32’de verilmiştir.



Şekil 4.32. Pomza agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Genleştirilmiş vermikülit agregalı üretilen normal harç referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0639, 0.0924, 0.0685, 0.1656, 0.2019, 0.1632, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.075, 0.1082, 0.0803, 0.1873, 0.2189, 0.1756, 5 cm kalınlık değeri için: 0.0837, 0.1225, 0.091, 0.2, 0.2296, 0.1867 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0.0639 ile en düşük, frekans = 2000 Hz ise 0.2019 ile en yüksek. 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.075 ile en düşük, frekans = 2000 Hz de ise 0.2189 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0837 ile en düşük, frekans = 2000 Hz de ise 0.2296 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı

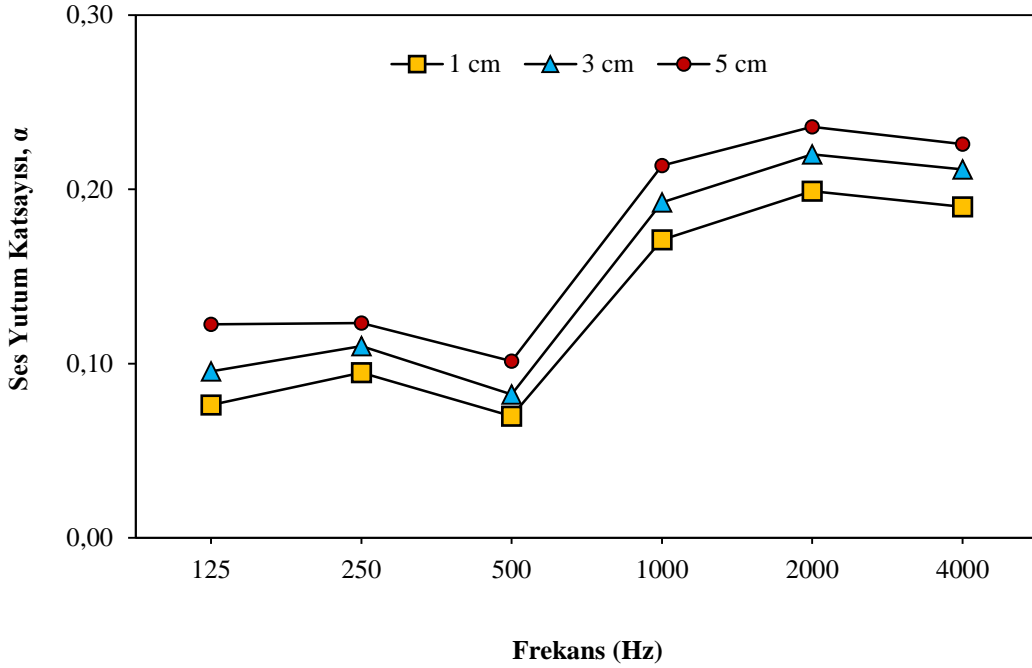
değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.33’de verilmiştir.



Şekil 4.33. Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

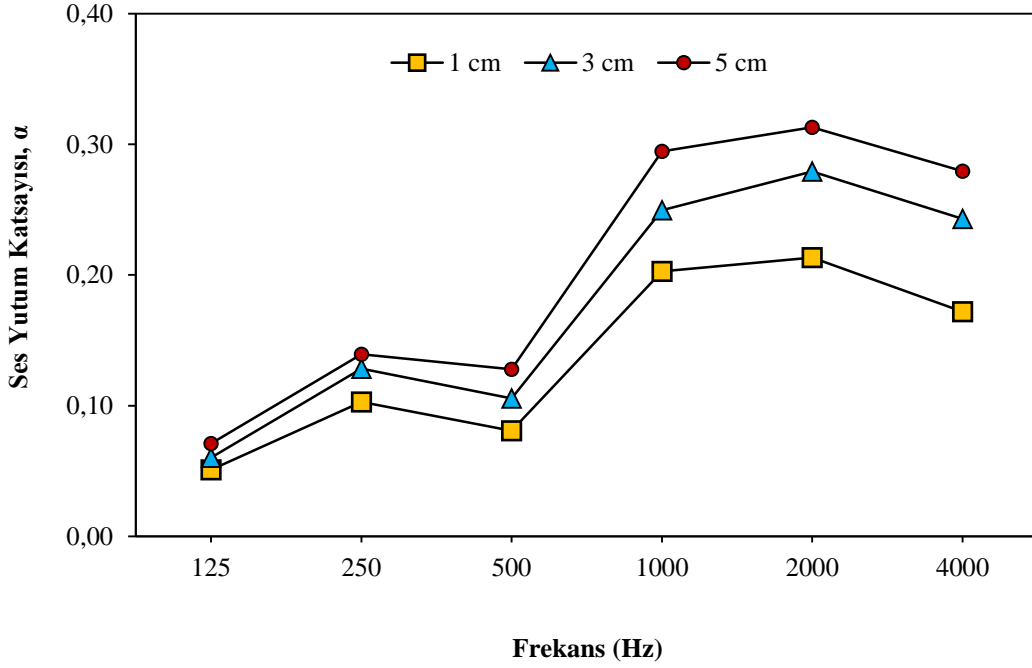
Keten lif takviyeli genleştirilmiş vermikülit agregalı üretilen normal harç referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0762, 0.0947, 0.0823, 0.171, 0.199, 0.19, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0955, 0.11, 0.0823, 0.1926, 0.22, 0.2114, 5 cm kalınlık değeri için: 0.1226, 0.1232, 0.1015, 0.2137, 0.2358, 0.2258 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0.0762 ile en düşük, frekans = 2000 Hz ise 0.199 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0955 ile en düşük, frekans = 2000 Hz de ise 0.22 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.1226 ile en düşük, frekans = 2000 Hz de ise 0.2358 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak keten lif

ikamesiyle üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.34'de verilmiştir.



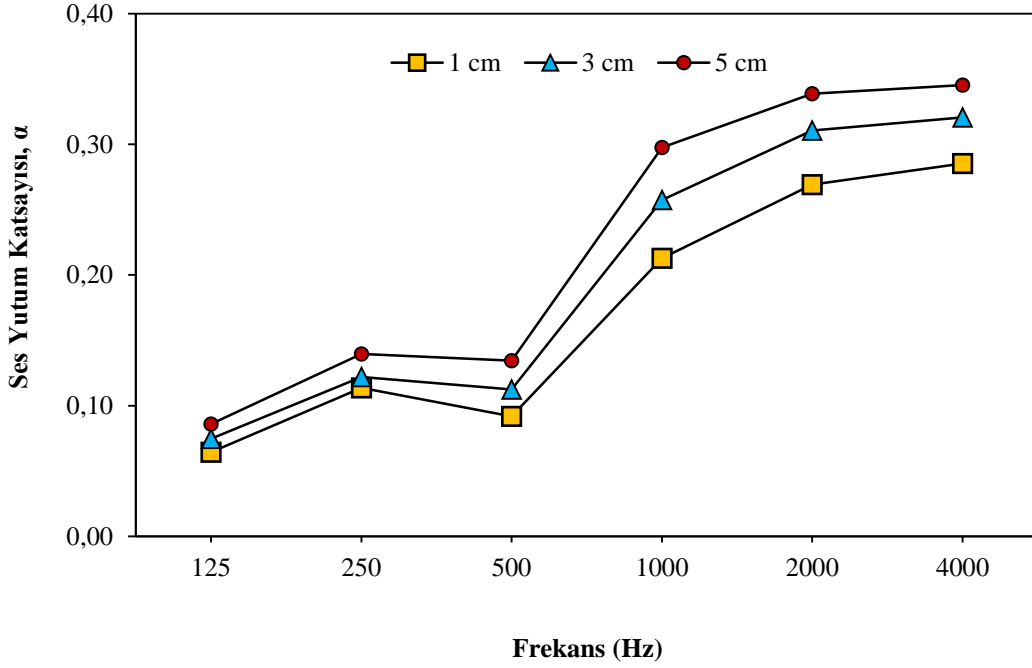
Şekil 4.34. Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Kauçuk agregalı üretilen normal harç referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0510, 0.1029, 0.0807, 0.2029, 0.2133, 0.1720, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0603, 0.1284, 0.1056, 0.2495, 0.2793, 0.2431, 5 cm kalınlık değeri için: 0.0712, 0.1394, 0.1279, 0.2946, 0.313, 0.2795 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0.051 ile en düşük, frekans = 2000 Hz ise 0.2133 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0603 ile en düşük, frekans = 2000 Hz de ise 0.2793 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0712 ile en düşük, frekans = 2000 Hz de ise 0.313 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Kauçuk agregası kullanılarak üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.35'de verilmiştir.



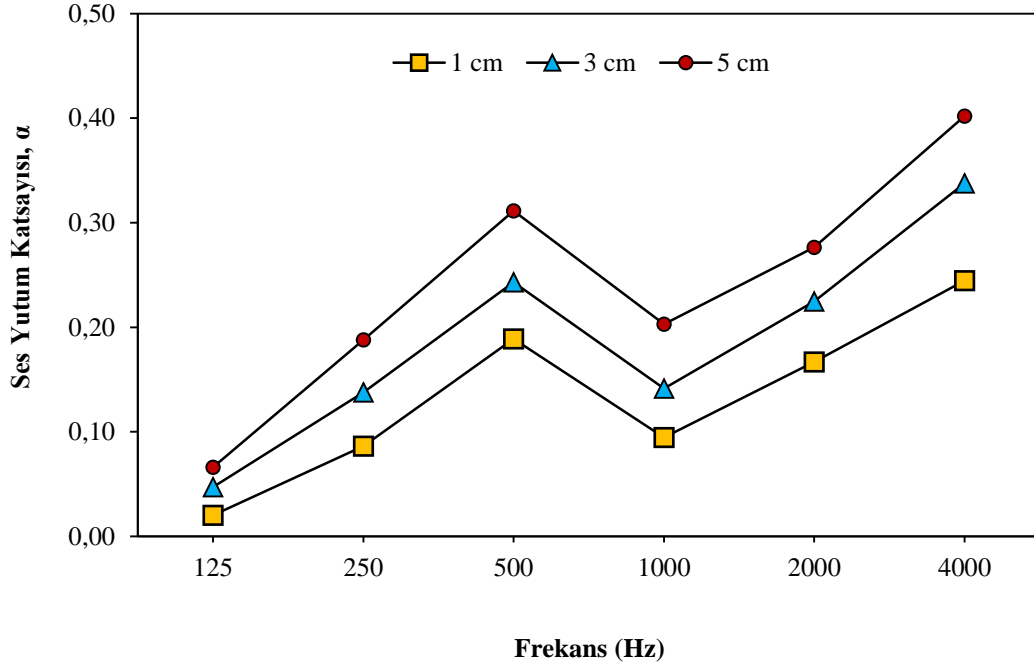
Şekil 4.35. Kauçuk agregası kullanılarak üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Keten lif takviyeli kauçuk agregalı üretilen normal harç referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0644, 0.1137, 0.092, 0.2129, 0.2691, 0.2853, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0748, 0.1219, 0.1125, 0.2575, 0.3105, 0.3205, 5 cm kalınlık değeri için: 0.0859, 0.1396, 0.1345, 0.2975, 0.3387, 0.3453 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0.0644 ile en düşük, frekans = 4000 Hz ise 0.2853 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0748 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.3205 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0859 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.3453 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Kauçuk agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.36'da verilmiştir.



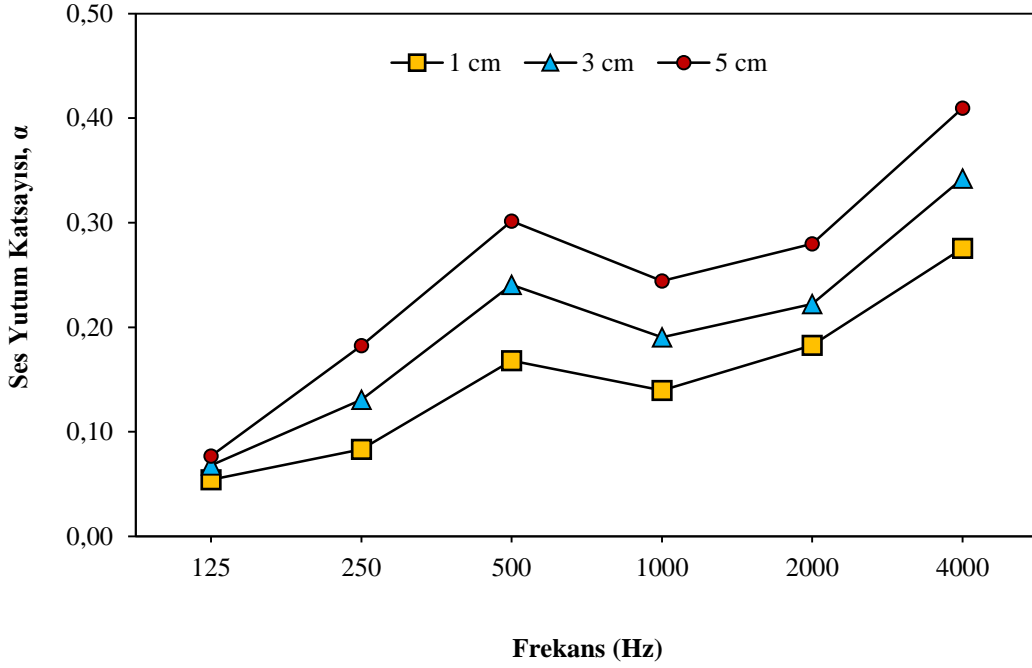
Şekil 4.36. Kauçuk agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Kırma kum agregalı üretilen köpük beton referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0203, 0.0864, 0.1888, 0.0946, 0.1669, 0.2446, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0471, 0.1378, 0.2432, 0.1416, 0.2246, 0.3378, 5 cm kalınlık değeri için: 0.0663, 0.1879, 0.3113, 0.2029, 0.2765, 0.4019 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0.0203 ile en düşük, frekans = 4000 Hz ise 0.2446 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0471 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.3378 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0663 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.4019 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Kalınlığa bağlı değişimde yüksek frekans değerlerinde ses yutum katsayı değerleri birbirine yakın, frekans değeri = 4000 Hz iken ses yutum katsayı değerleri birbirine neredeyse eşit olarak elde edilmiştir. Kırma kum agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.37’de verilmiştir.



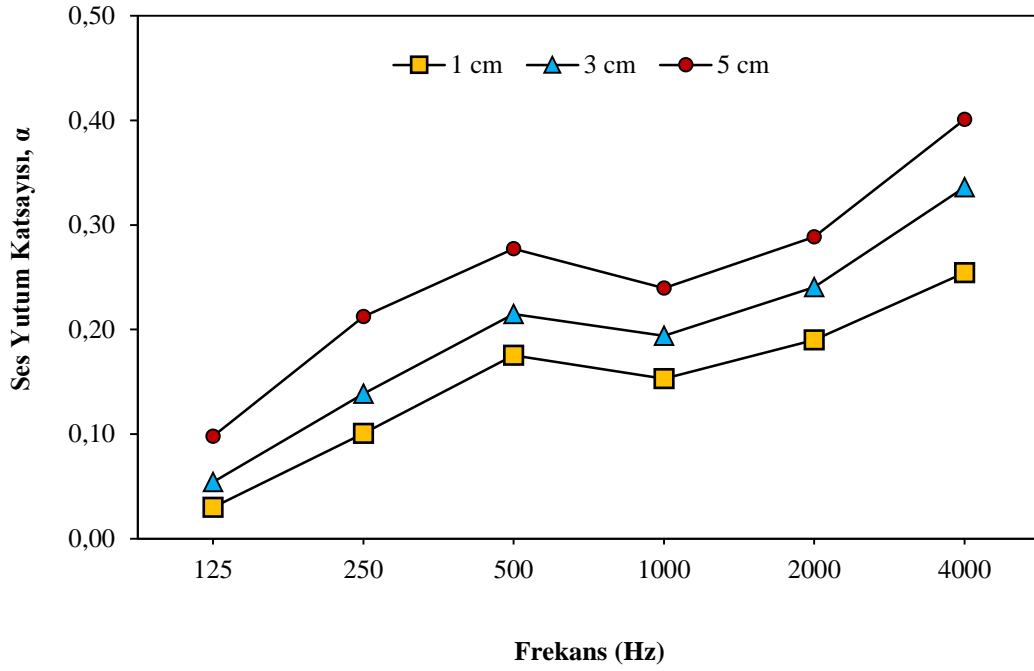
Şekil 4.37. Kırma kum agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Keten lif takviyeli kırma kum agregalı üretilen köpük beton referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0543, 0.0834, 0.168, 0.1396, 0.1827, 0.2756, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0681, 0.1307, 0.2407, 0.1904, 0.2224, 0.3422, 5 cm kalınlık değeri için: 0.0769, 0.1826, 0.3015, 0.2445, 0.28, 0.4095 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0.0543 ile en düşük, frekans = 4000 Hz ise 0.2756 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0681 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.3422 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0769 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.4095 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Kırma kum agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.38’de verilmiştir.



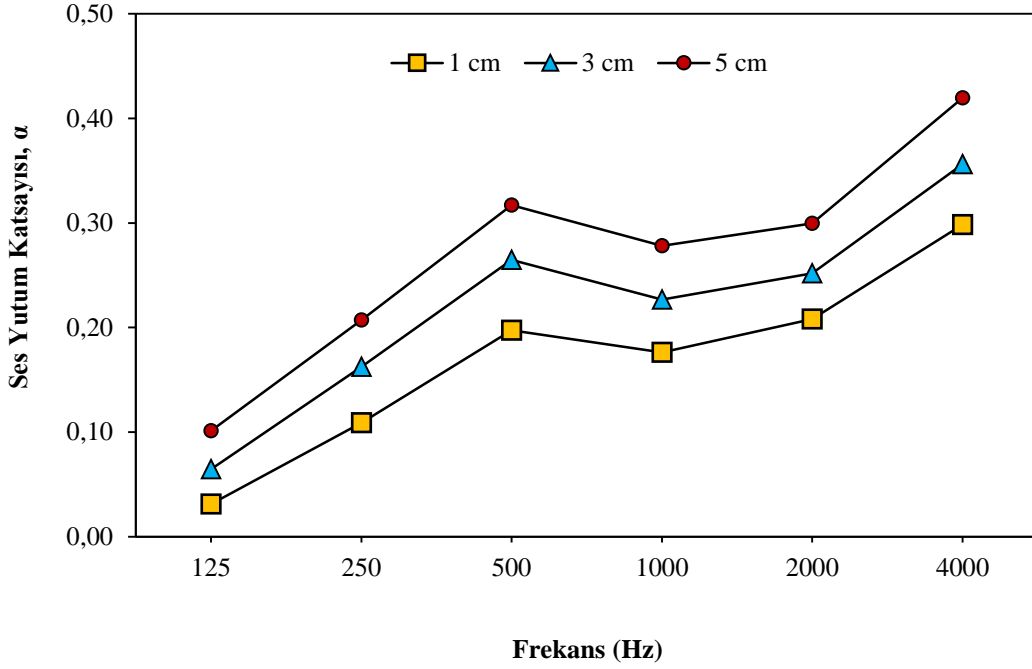
Şekil 4.38. Kıırma kum agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değęerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Genleştirilmiş kil agregalı üretilen köpük beton referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.03, 0.1005, 0.1753, 0.1528, 0.1898, 0.2543, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.054, 0.1387, 0.2149, 0.194, 0.2405 0.3361, 5 cm kalınlık değeri için: 0.0979, 0.2123, 0.2772, 0.2395, 0.2886, 0.4009 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0.03 ile en düşük, frekans = 4000 Hz ise 0.2543 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.054 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.3361 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0979 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.4009 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıka ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.39'da verilmiştir.



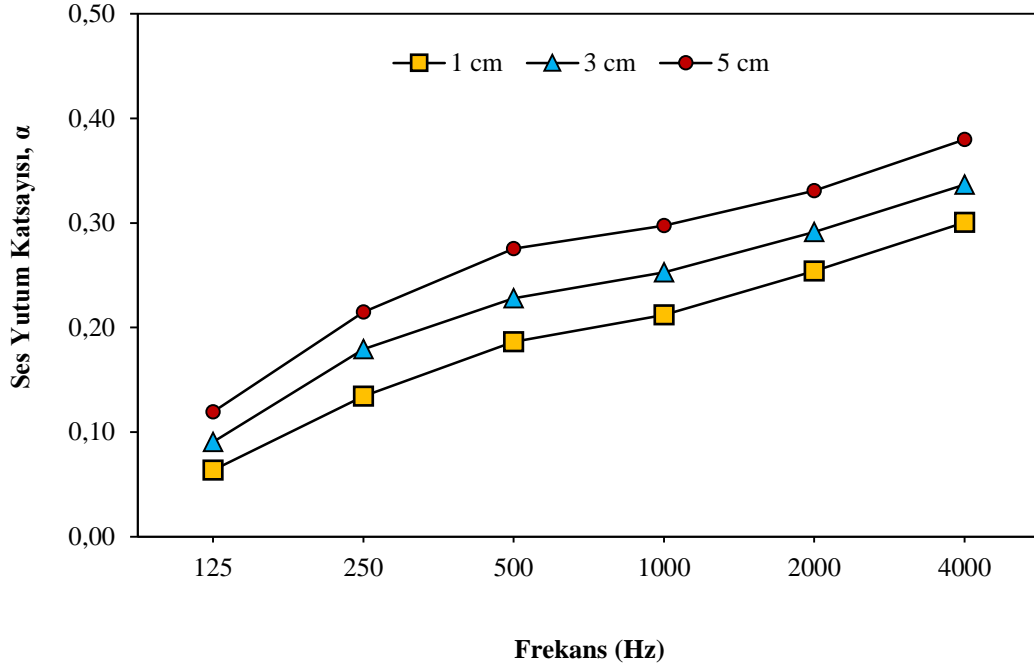
Şekil 4.39. Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Keten lif takviyeli kauçuk genleştirilmiş kil agregalı üretilen köpük beton referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0311, 0.1088, 0.1974, 0.1762, 0.2079, 0.2984, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0646, 0.1625, 0.2648, 0.2266, 0.2519 0.356, 5 cm kalınlık değeri için: 0.1012, 0.207, 0.3169, 0.2782, 0.2996, 0.4194 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0.0311 ile en düşük, frekans = 4000 Hz ise 0.2984 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0646 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.356 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.1012 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.4194 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.40’da verilmiştir.



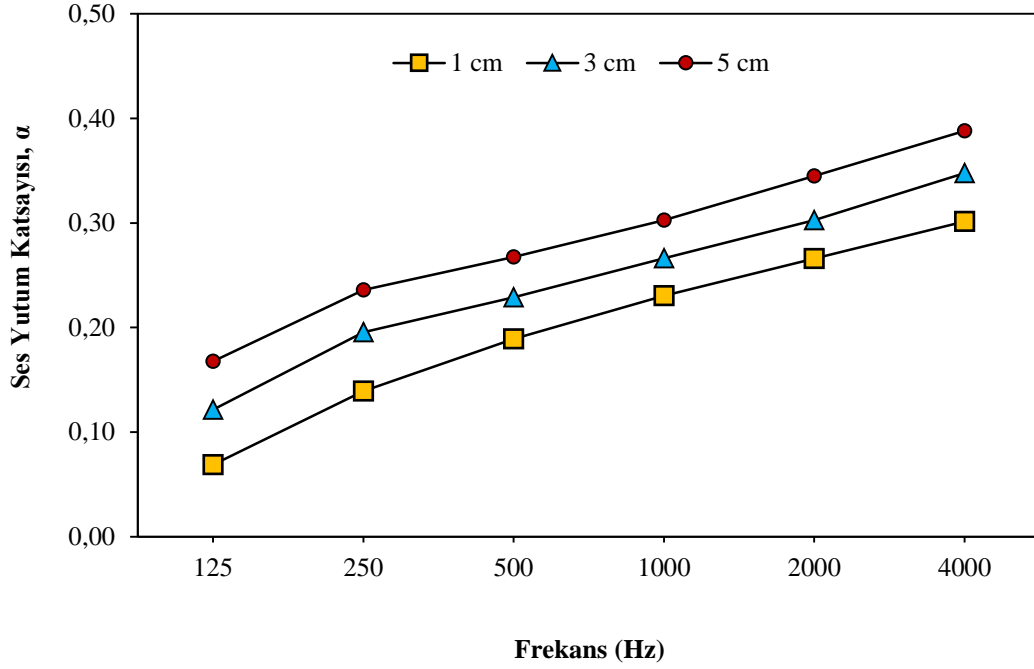
Şekil 4.40. Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Pomza agregalı üretilen köpük beton referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0635, 0.1341, 0.1864, 0.2122, 0.254, 0.3005, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0904, 0.1793, 0.2278, 0.2528, 0.2913 0.3366, 5 cm kalınlık değeri için: 0.1193, 0.2149, 0.2753, 0.2975, 0.3306, 0.3797 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0.0635 ile en düşük, frekans = 4000 Hz ise 0.3005 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0904 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.3366 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.1193 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.3797 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Pomza agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.41’de verilmiştir.



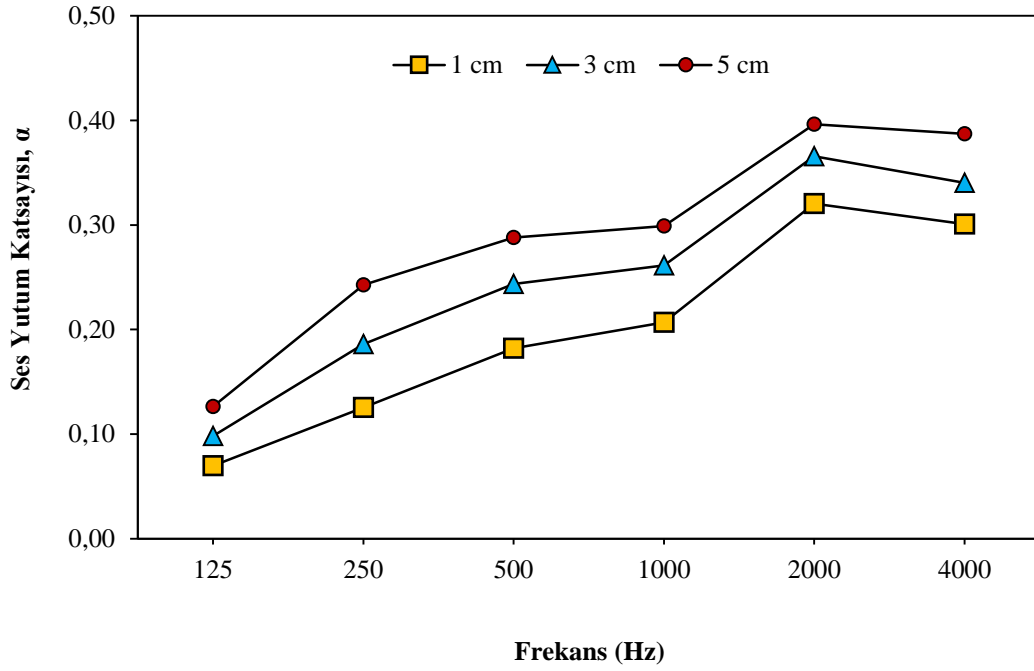
Şekil 4.41. Pomza agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Keten lif takviyeli pomza agregalı üretilen köpük beton referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0689, 0.1392, 0.1891, 0.2303, 0.2657, 0.3015, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.1213, 0.1956, 0.229, 0.2663, 0.3026, 0.3476, 5 cm kalınlık değeri için: 0.1676, 0.236, 0.2673, 0.3027, 0.3448, 0.388 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0.0689 ile en düşük, frekans = 4000 Hz ise 0.3015 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.1213 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.3476 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.1676 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.3880 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Pomza agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.42’de verilmiştir.



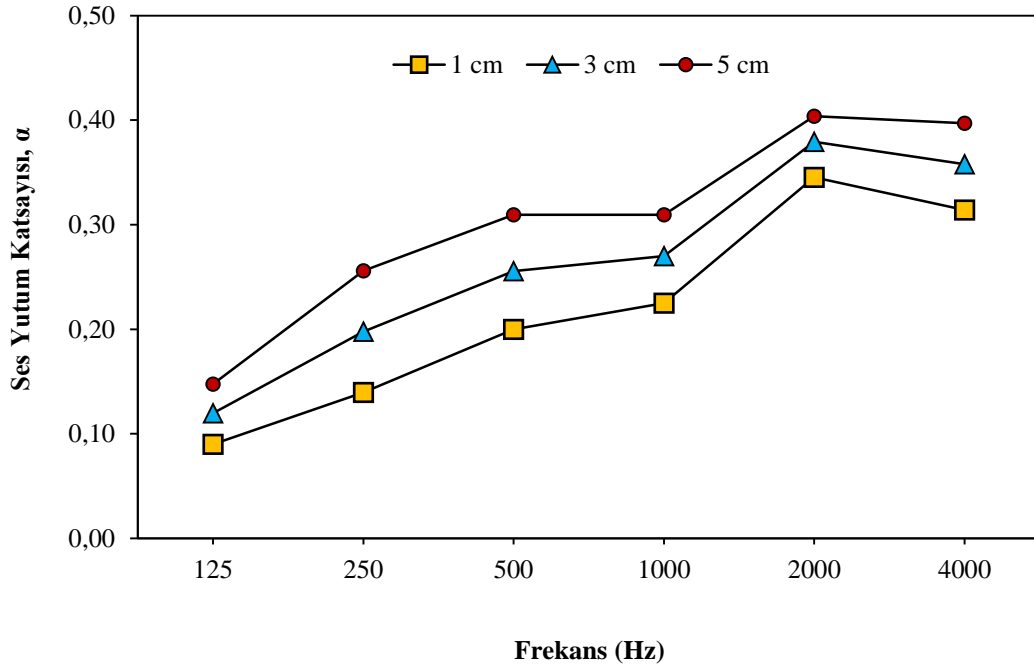
Şekil 4.42. Pomza agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Genleştirilmiş vermikülit agregalı üretilen köpük beton referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0697, 0.1255, 0.1821, 0.2069, 0.3203, 0.3007, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0983, 0.186, 0.2436, 0.2613, 0.3657, 0.3403, 5 cm kalınlık değeri için: 0.1264, 0.2425, 0.2879, 0.2989, 0.3962, 0.3871 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0.0697 ile en düşük, frekans = 2000 Hz ise 0.3203 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.0983 ile en düşük, frekans = 2000 Hz de ise 0.3657 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.1264 ile en düşük, frekans = 2000 Hz de ise 0.3962 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.43’de verilmiştir.



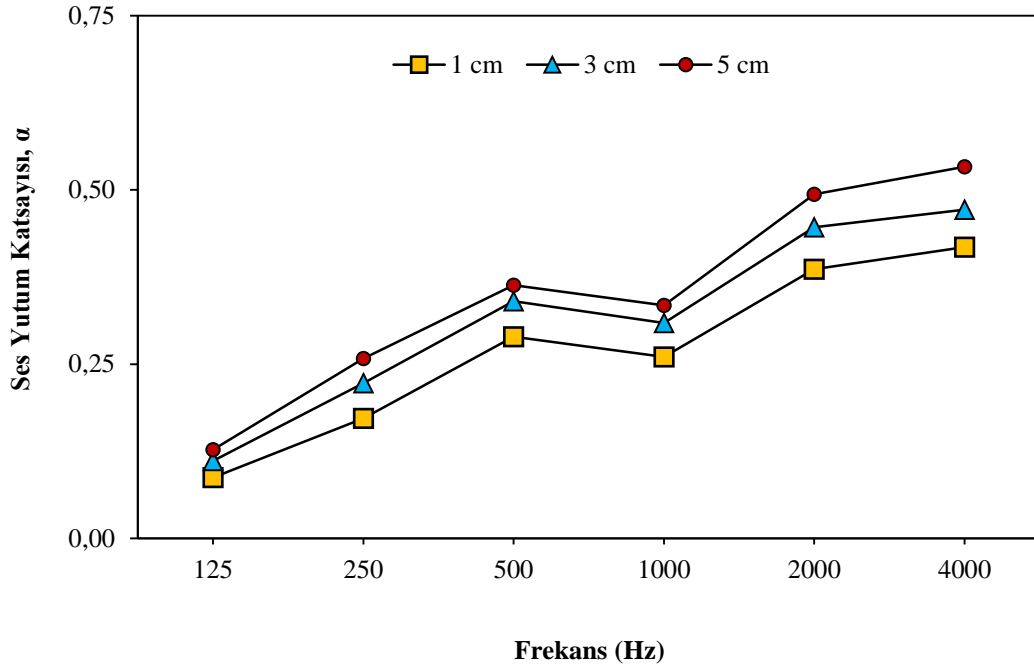
Şekil 4.43. Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Keten lif takviyeli genleştirilmiş vermikülit agregalı üretilen köpük beton referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.09, 0.1397, 0.1998, 0.2249, 0.3452, 0.314, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.1197, 0.1978, 0.2556, 0.2702, 0.3794, 0.3579, 5 cm kalınlık değeri için: 0.1477, 0.2558, 0.3094, 0.3095, 0.4039, 0.3969 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0,09 ile en düşük, frekans = 2000 Hz ise 0.3452 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.1197 ile en düşük, frekans = 2000 Hz de ise 0.3579 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.1477 ile en düşük, frekans = 2000 Hz de ise 0.4039 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.44’de verilmiştir.



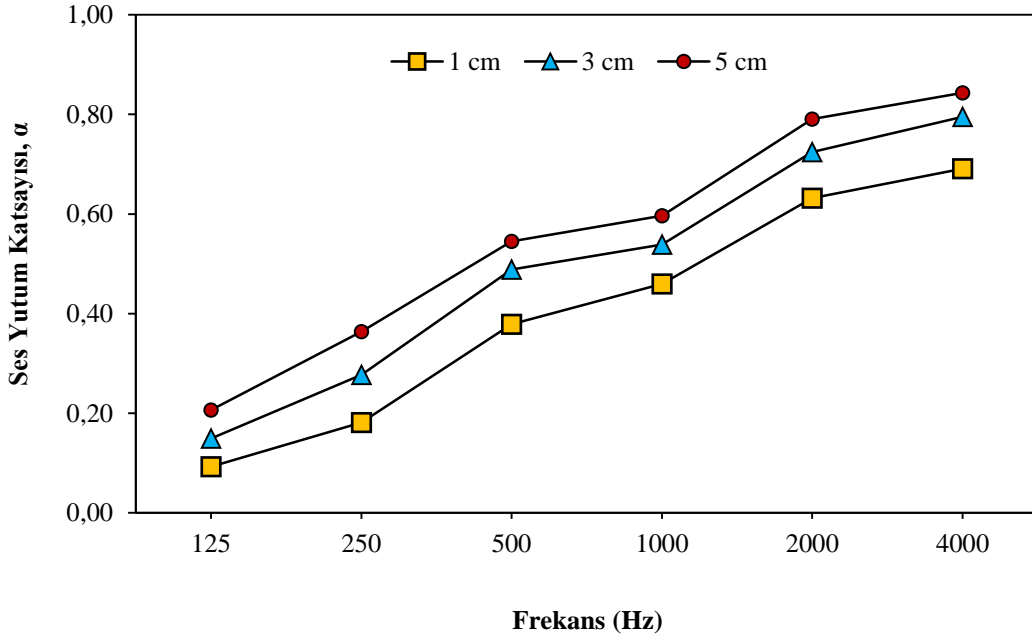
Şekil 4.44. Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Kauçuk agregalı üretilen köpük beton referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0,0874, 0,1721, 0,2895, 0,2604, 0,3863, 0,4177, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0,1114, 0,2229, 0,3403, 0,3092, 0,4465, 0,4717, 5 cm kalınlık değeri için: 0,1275, 0,2583, 0,3634, 0,3344, 0,4938, 0,5331 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0,0874 ile en düşük, frekans = 4000 Hz ise 0,4177 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0,1114 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0,4717 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0,1275 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0,5331 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Kauçuk agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.45’de verilmiştir.



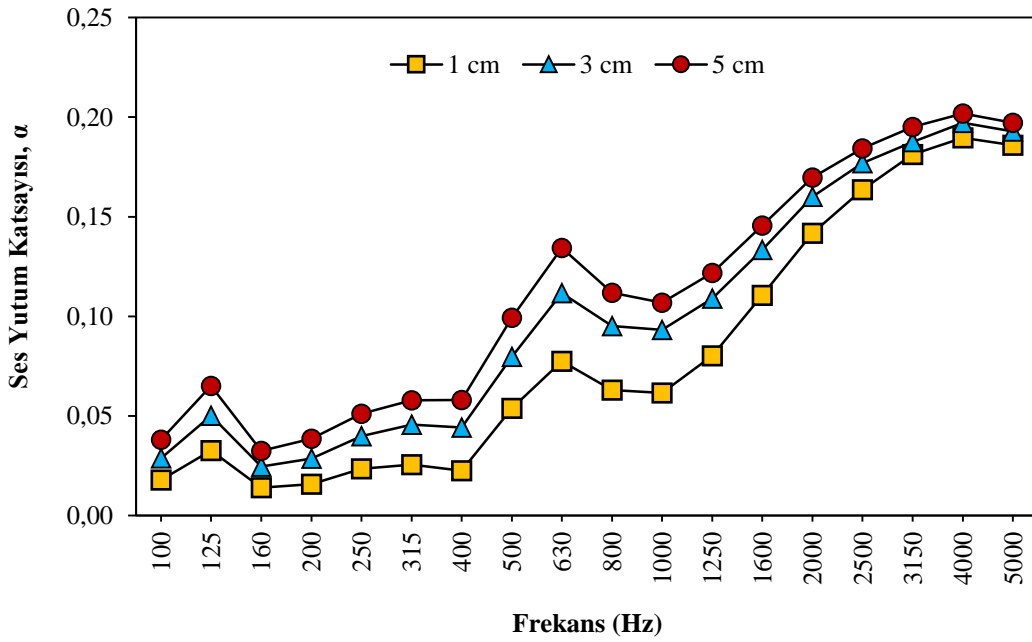
Şekil 4.45. Kauçuk agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

Keten lif kauçuk agregalı üretilen köpük beton referans numunelerde merkez oktav bant ses yutum katsayısı 1 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.0926, 0.1814, 0.3785, 0.4593, 0.6317, 0.6907, 3 cm kalınlık değeri için: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz de sırasıyla; 0.1492, 0.2767, 0.4888, 0.5388, 0.7245, 0.7952, 5 cm kalınlık değeri için: 0.2061, 0.364, 0.545, 0.5965, 0.7903, 0.8433 olarak elde edilmiştir. Numunelerin 1 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz iken 0.0926 ile en düşük, frekans = 4000 Hz ise 0,6907 ile en yüksek, 3 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.1492 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.7952 ile en yüksek 5 cm kalınlık değeri için frekans = 125 Hz de iken 0.2061 ile en düşük, frekans = 4000 Hz de ise 0.8433 ile en yüksek ses yutum katsayı değeri elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak ses yutum katsayı değerinde artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda frekans değeri arttıkça ses yutum katsayı değeri de artmıştır. Kauçuk agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi Şekil 4.46'da verilmiştir.

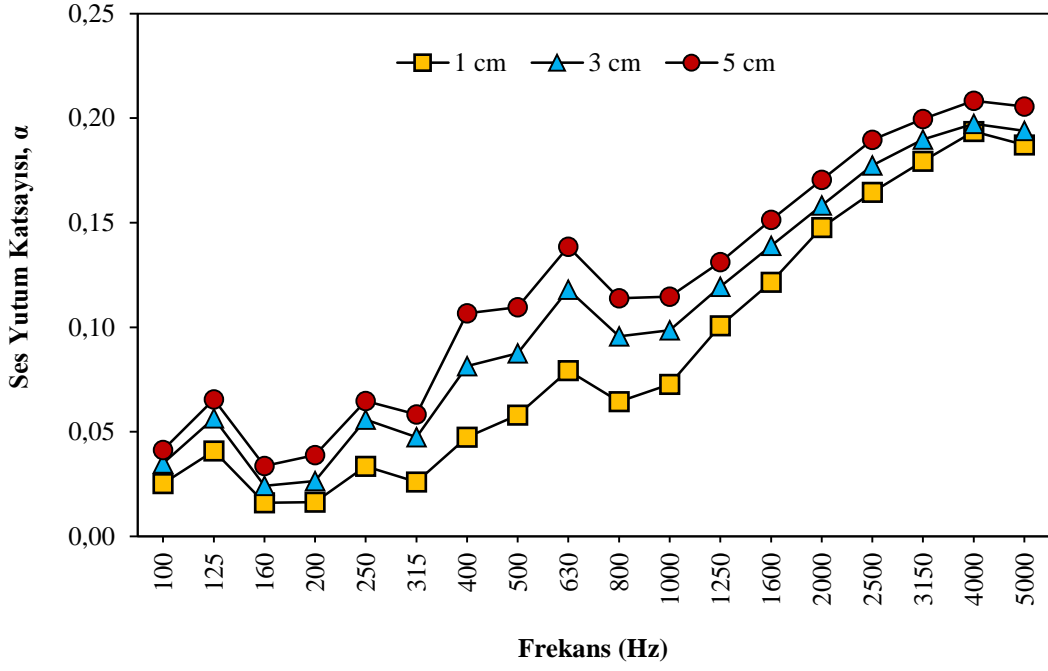


Şekil 4.46. Kauçuk agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

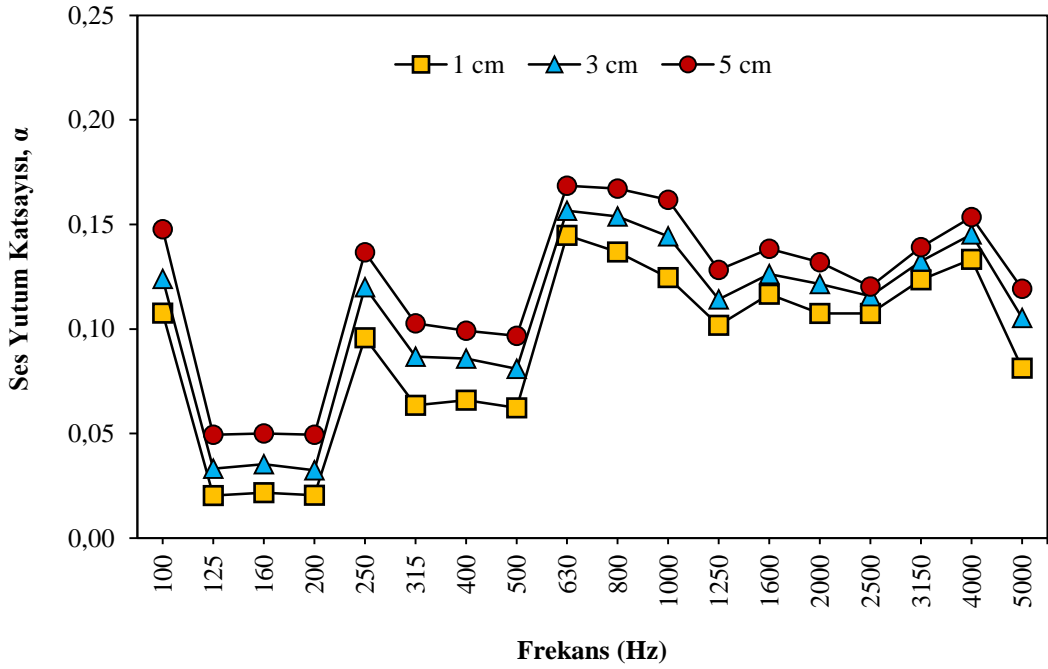
Normal harç numunelerin NRC değerleri normal harç numunelere kıyasla daha yüksek değerler elde edilmiştir. Köpük ikamesiyle NRC değerlerinde artma gözlemlenmiştir. Numune kalınlığının artışı ile ses yutum katsayılarında artış gözlemlenmiştir.



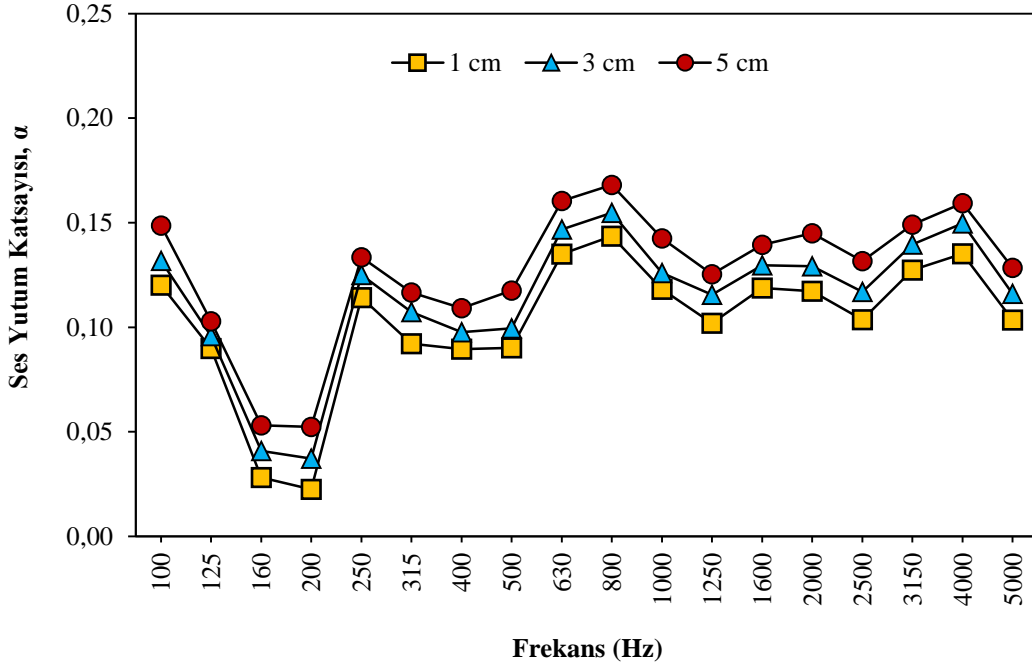
Şekil 4.47. Kırma kum agregası kullanılarak üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



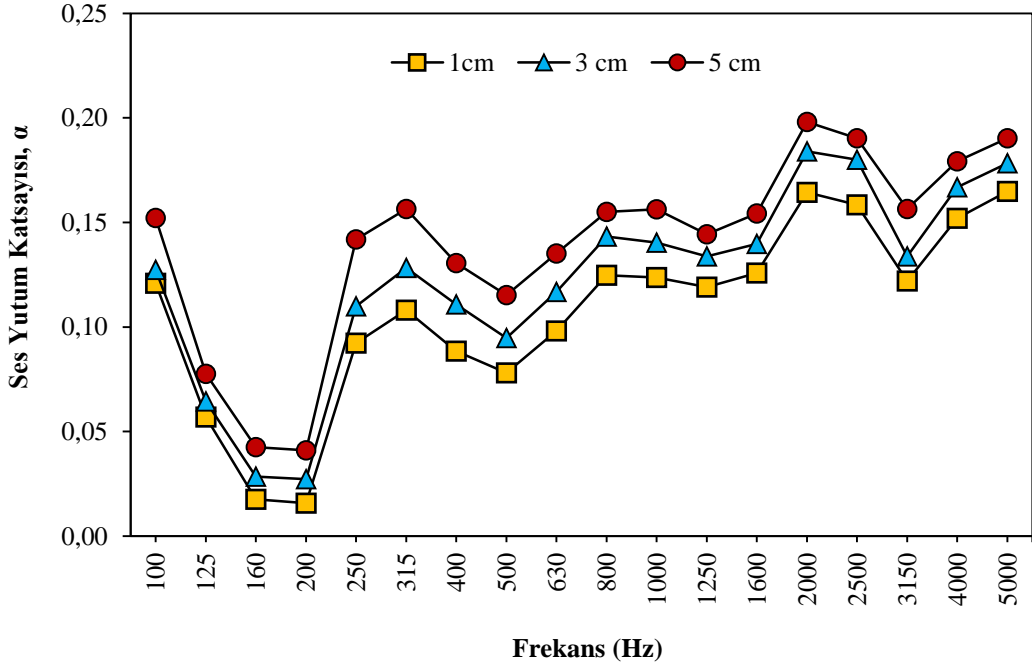
Şekil 4.48. Kırma kum agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



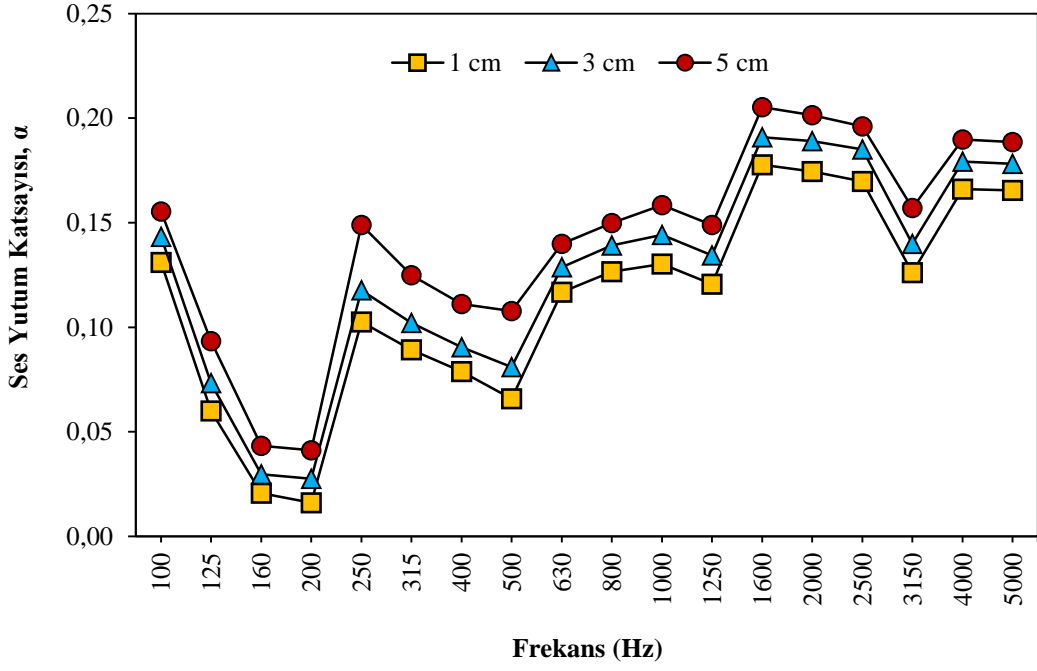
Şekil 4.49. Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



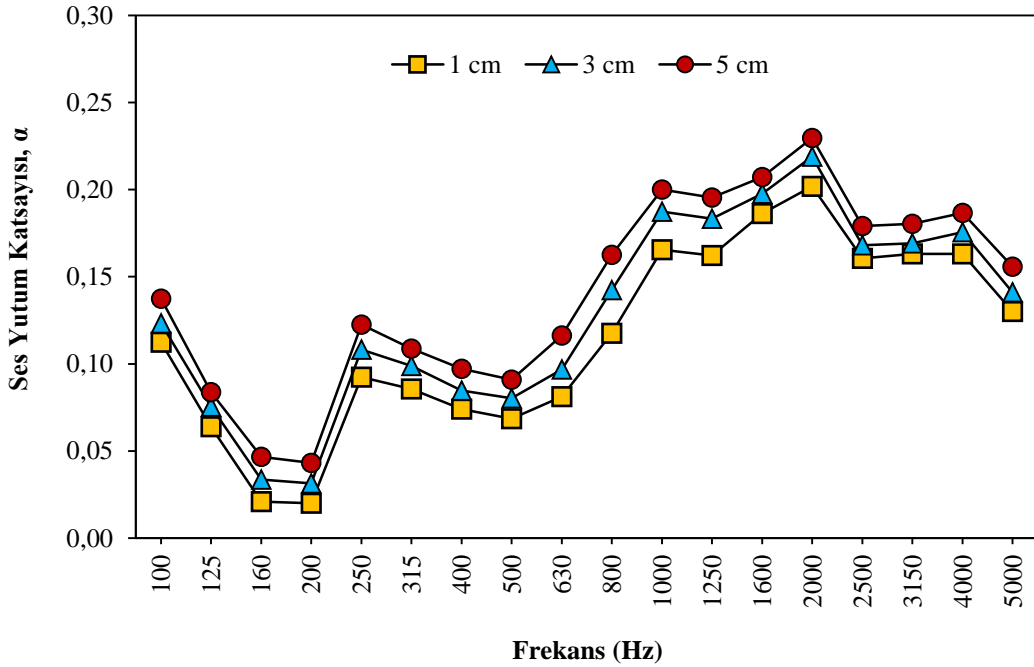
Şekil 4.50. Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



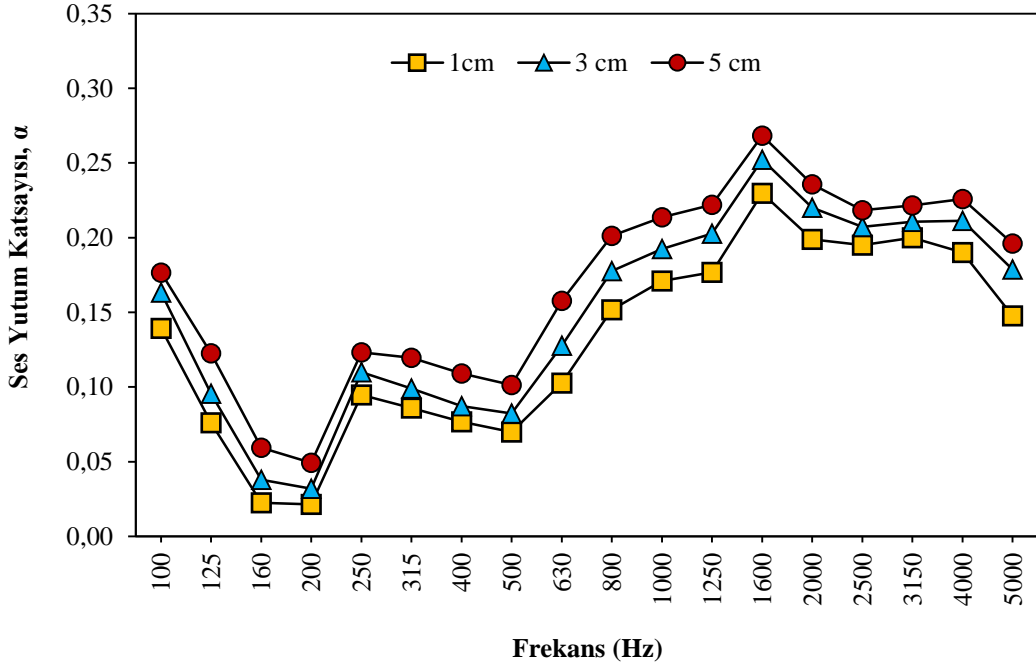
Şekil 4.51. Pomza agregası kullanılarak üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



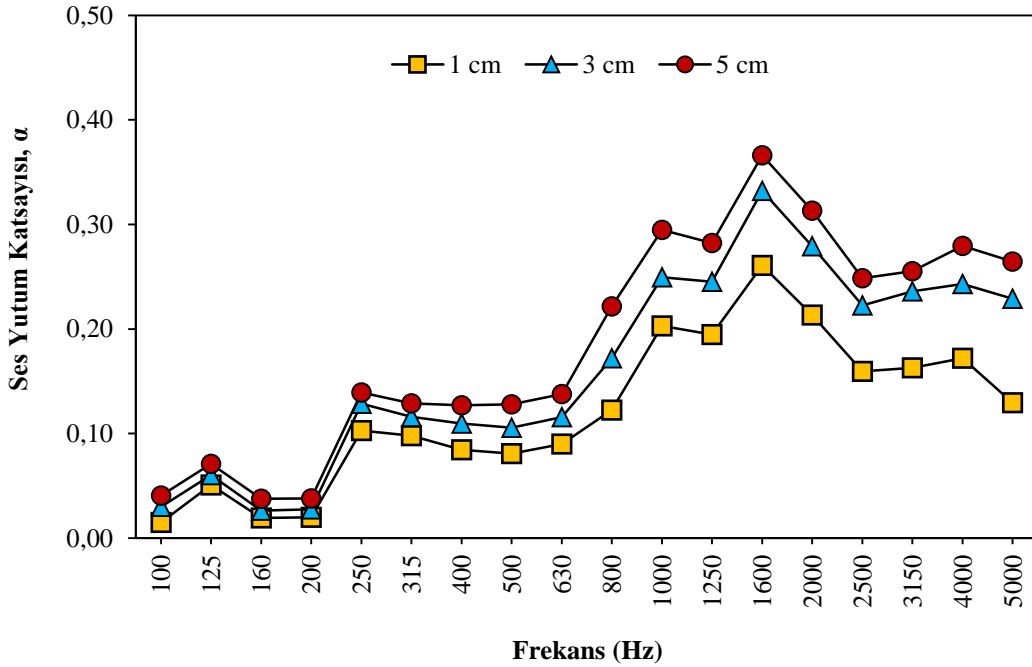
Şekil 4.52. Pomza agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



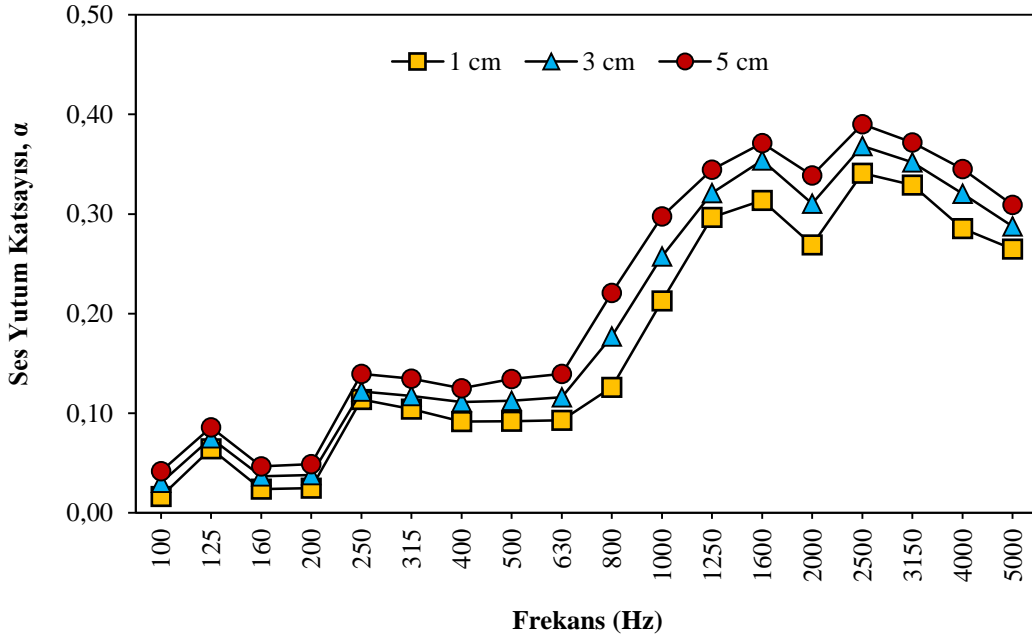
Şekil 4.53. Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



Şekil 4.54. Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

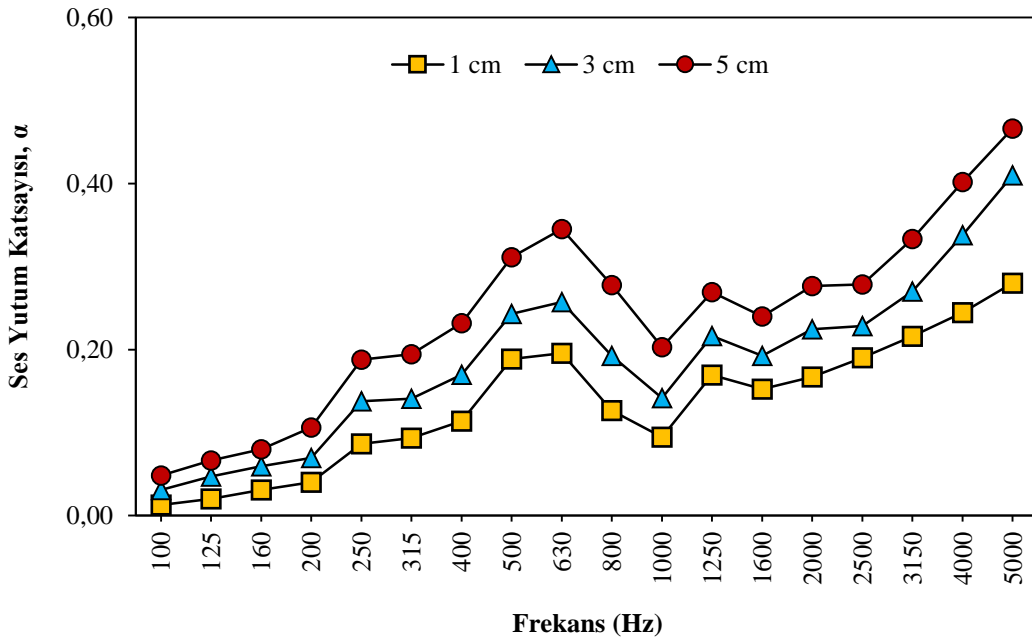


Şekil 4.55. Kauçuk agregası kullanılarak üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

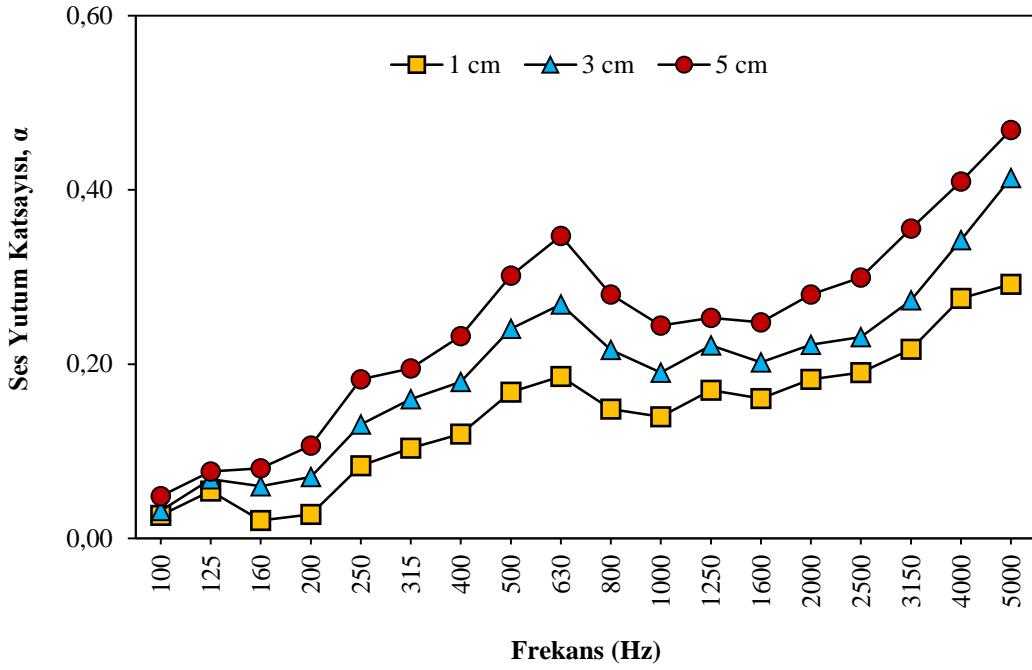


Şekil 4.56. Kauçuk agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen normal harçların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi

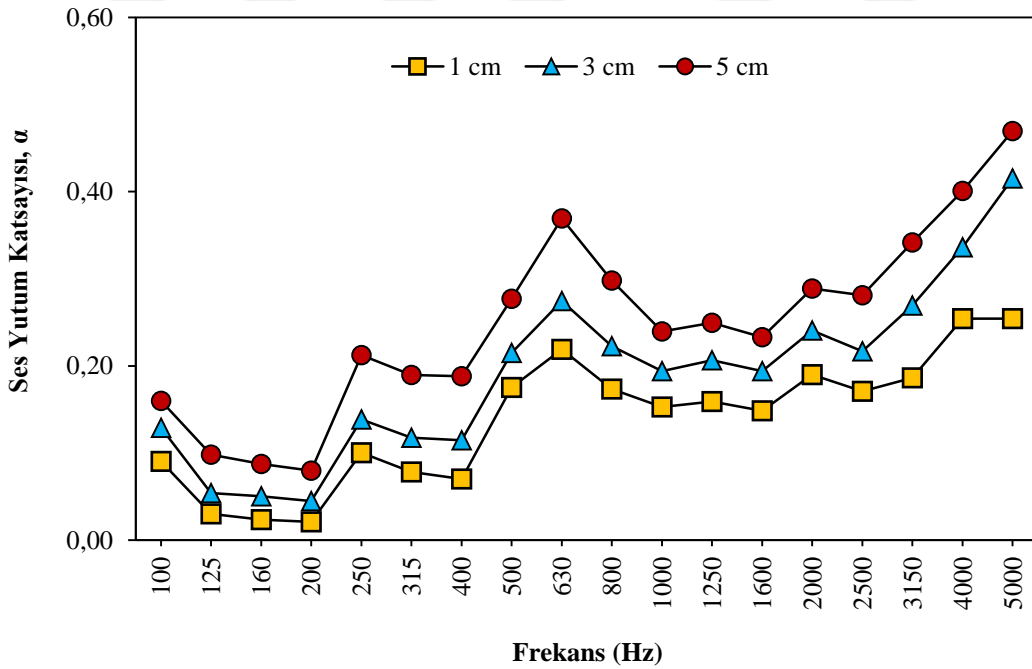
Köpük beton numunelerin NRC değerleri normal harç numunelere kıyasla daha yüksek değerler elde edilmiştir. Köpük ikamesiyle NRC değerlerinde artma gözlemlenmiştir. Numune kalınlığının artışı ile ses yutum katsayılarında artış gözlemlenmiştir.



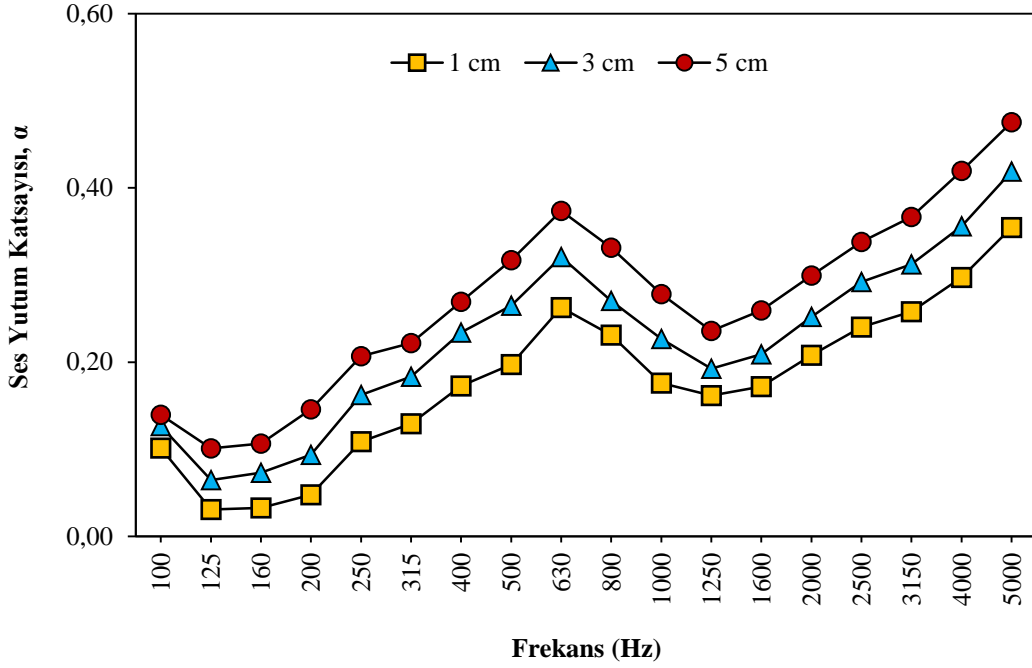
Şekil 4.57. Kırma kum agregası kullanılarak üretilen köpük betonların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



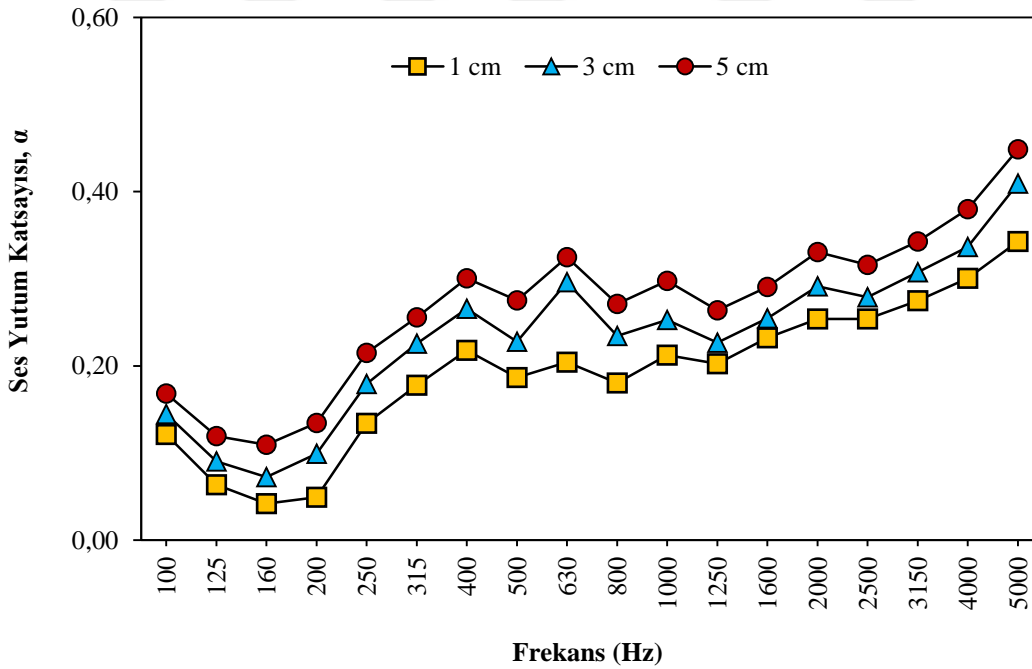
Şekil 4.58. Kırma kum agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



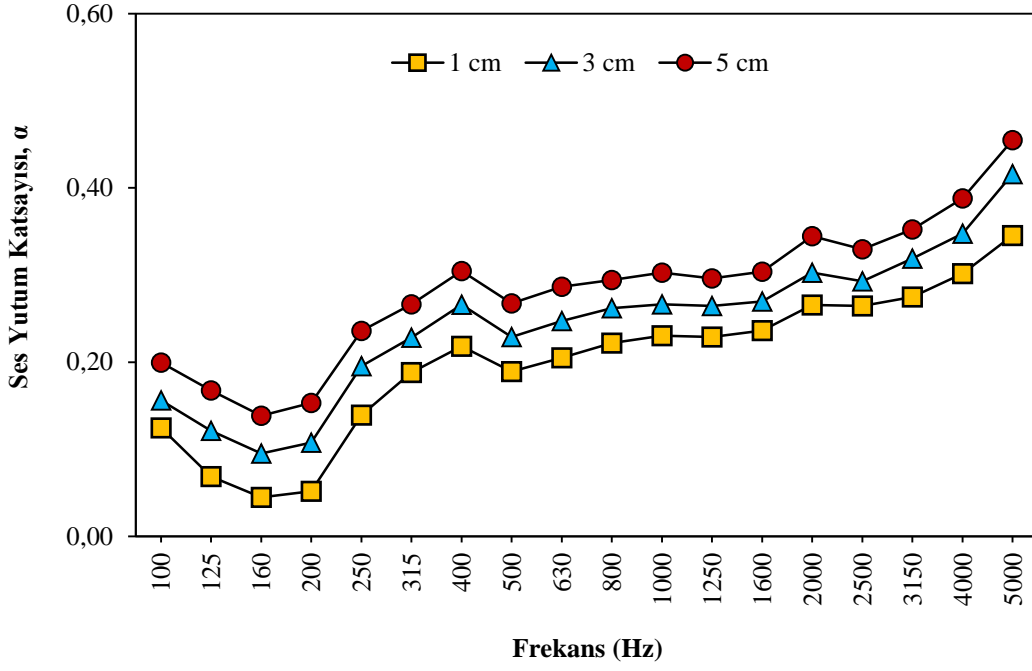
Şekil 4.59. Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak üretilen harçların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



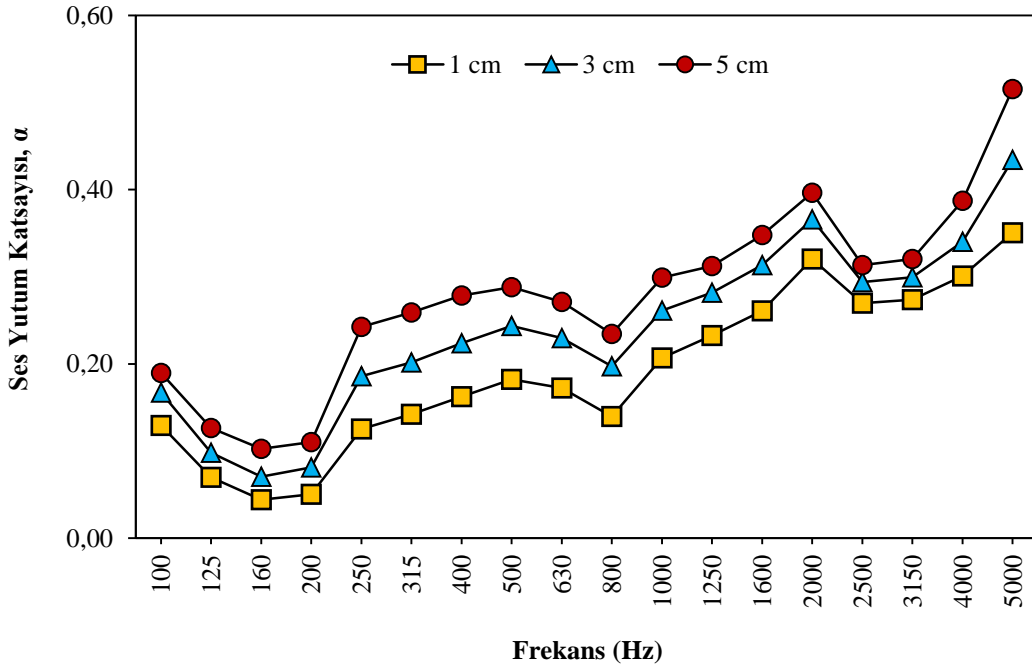
Şekil 4.60. Genleştirilmiş kil agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



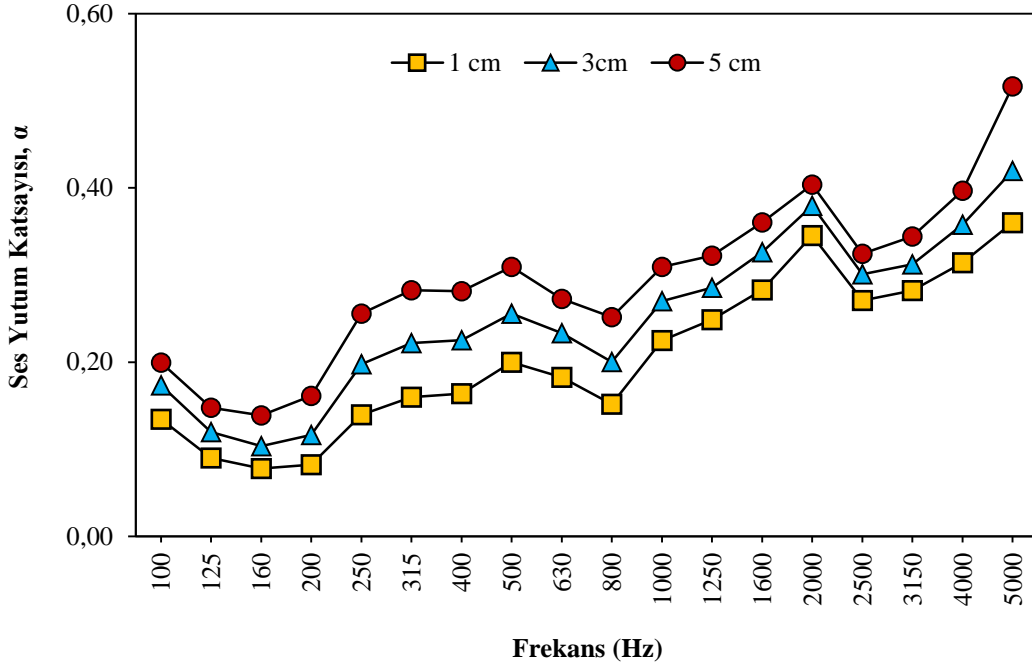
Şekil 4.61. Pomza agregası kullanılarak üretilen köpük betonların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



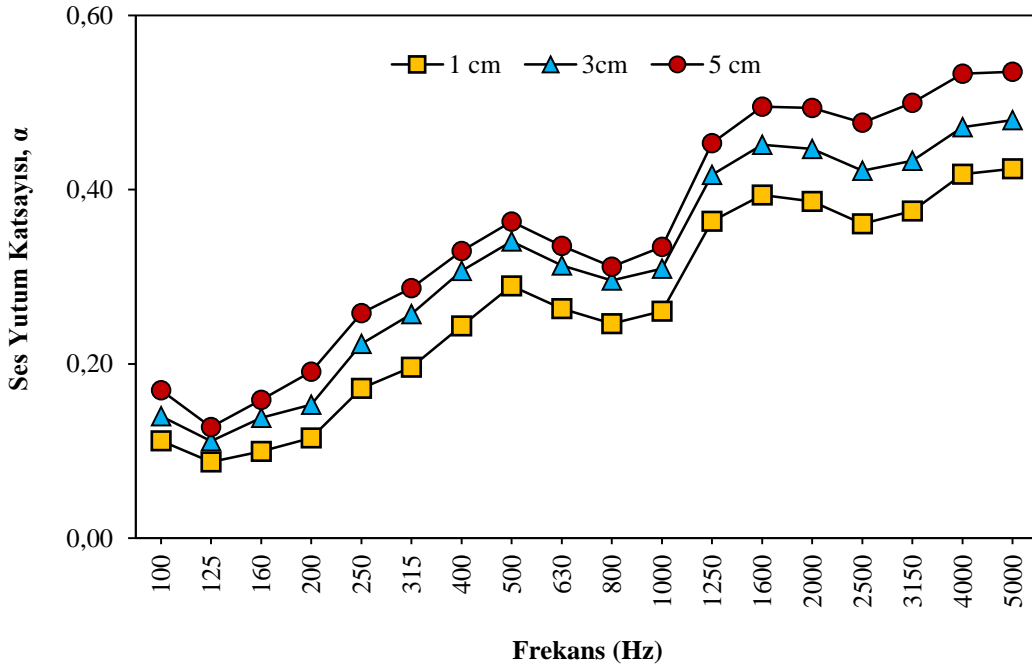
Şekil 4.62. Pomza agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



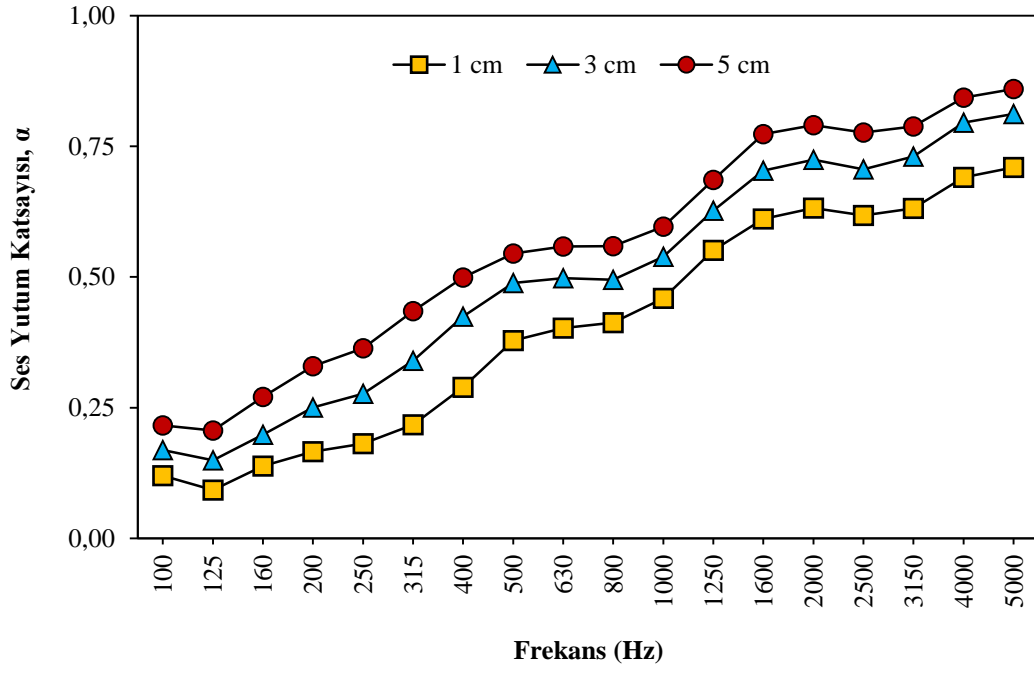
Şekil 4.63. Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak üretilen köpük betonların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



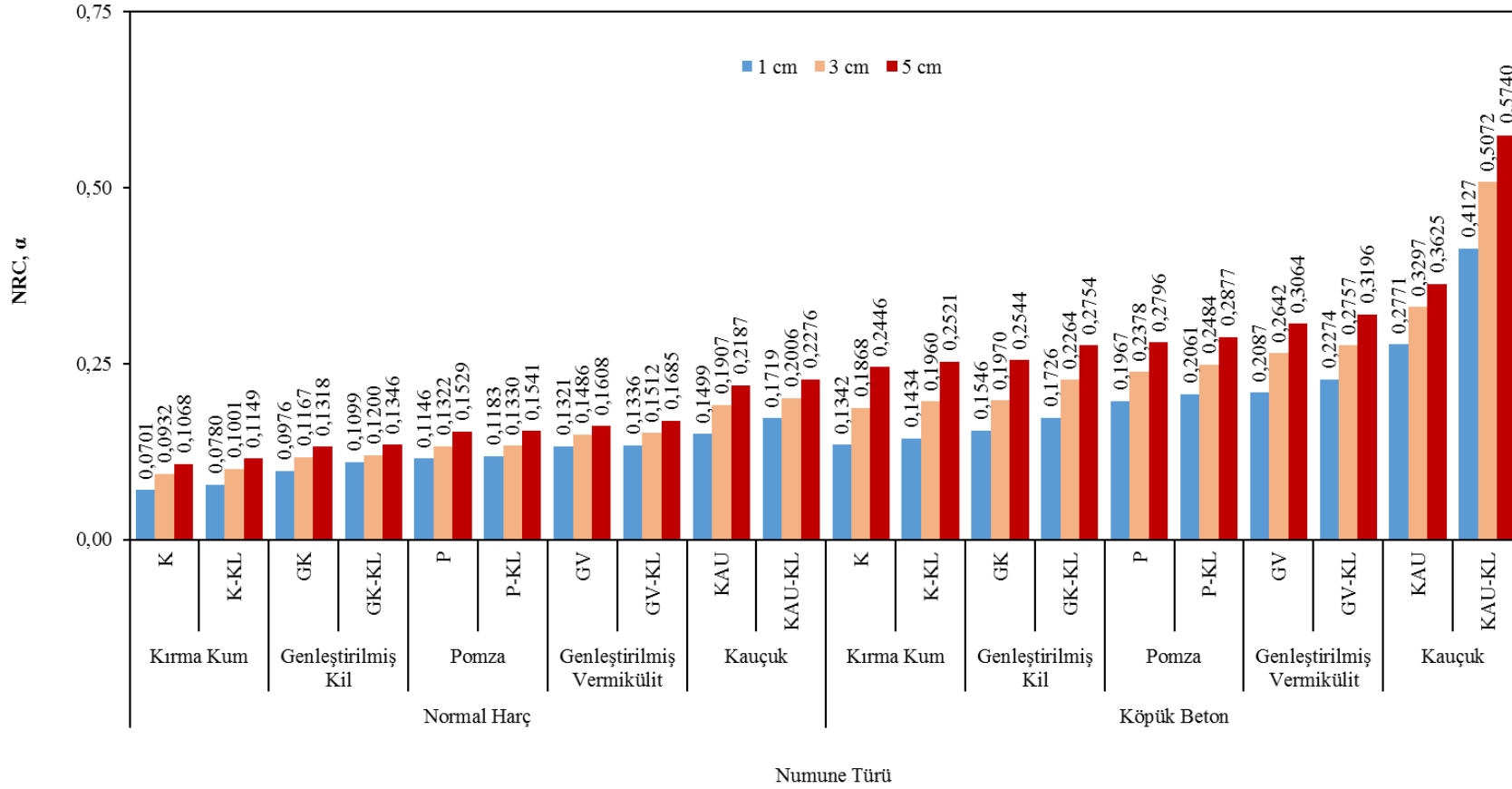
Şekil 4.64. Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



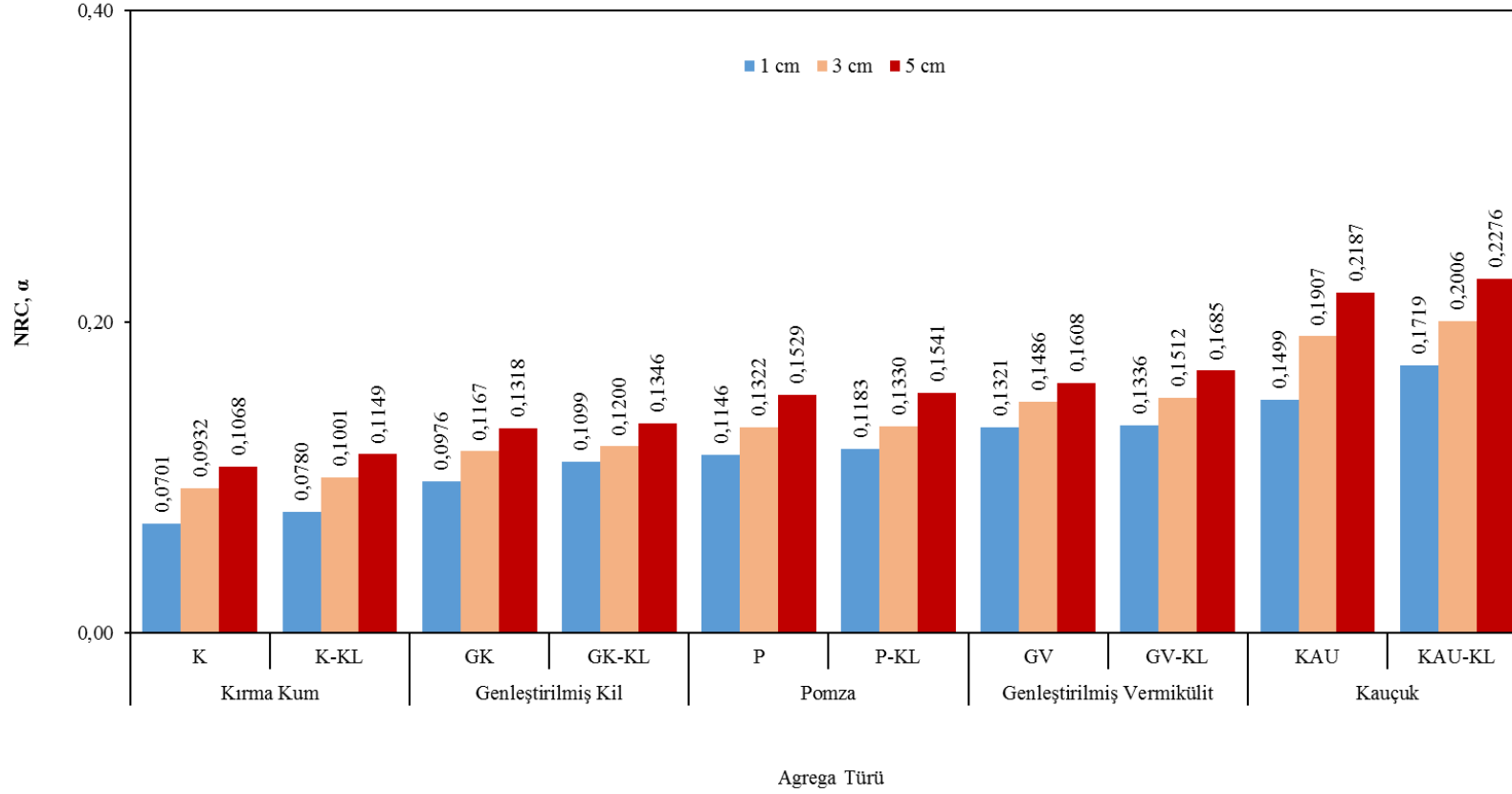
Şekil 4.65. Kauçuk agregası kullanılarak üretilen köpük betonların merkez oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



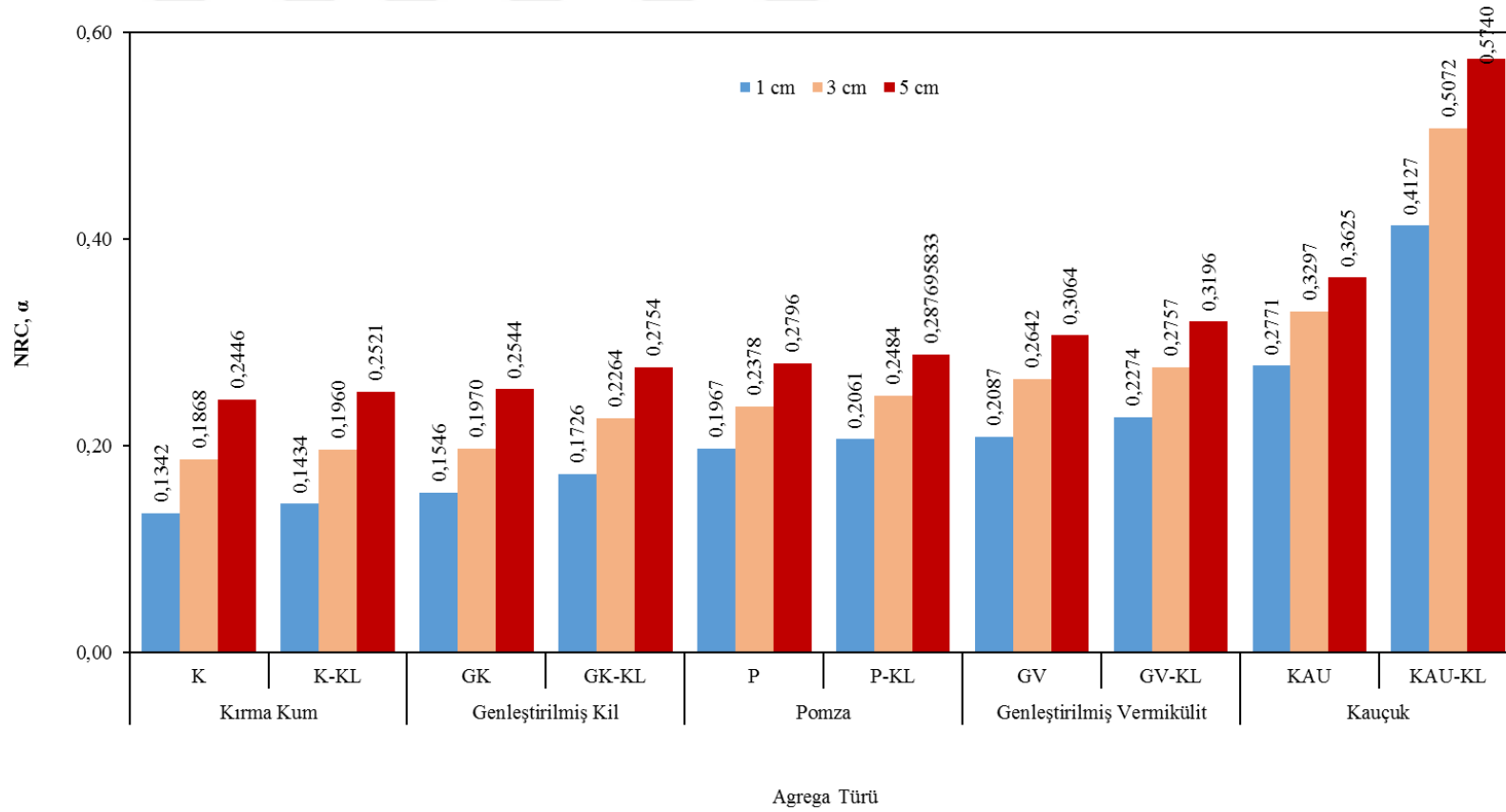
Şekil 4.66. Kauçuk agregası kullanılarak keten lif ikamesiyle üretilen köpük betonların 1/3 oktav bant ses yutum katsayı değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



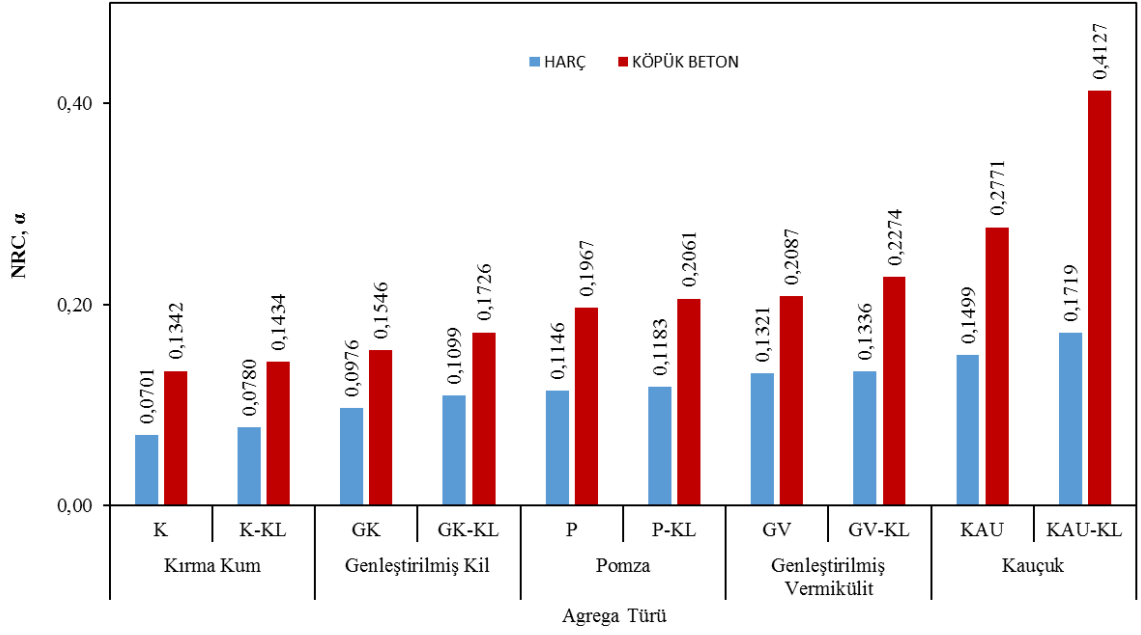
Şekil 4.67. Numunelere ait NRC değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



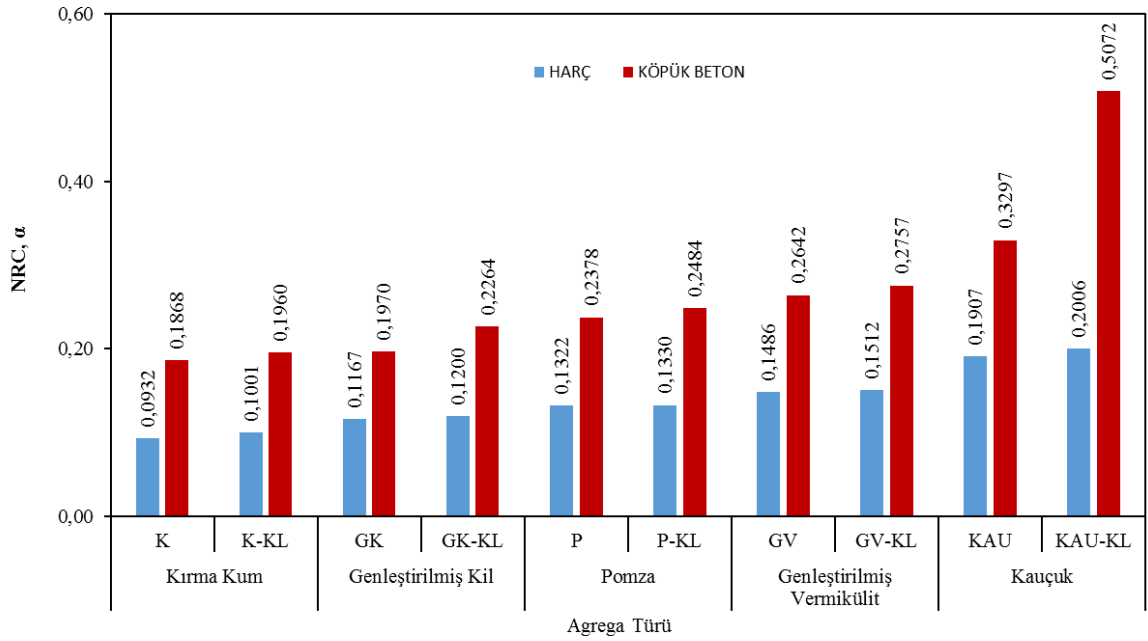
Şekil 4.68. Normal harç numunelere ait NRC değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



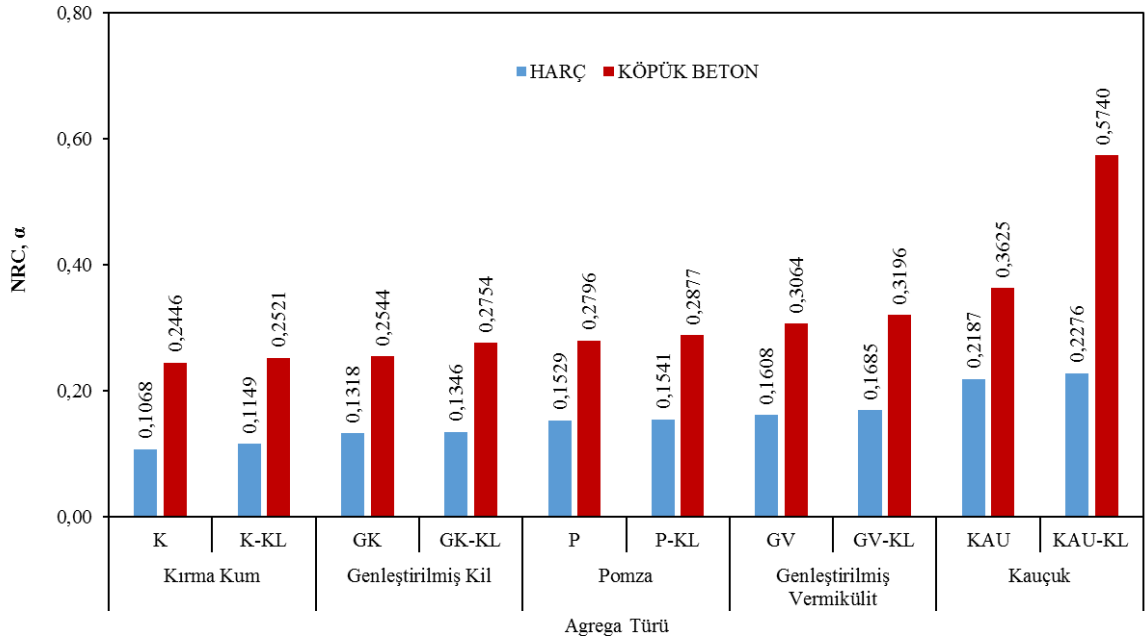
Şekil 4.69. Köpük beton numunelere ait NRC değerlerinin kalınlığa bağlı değişimi



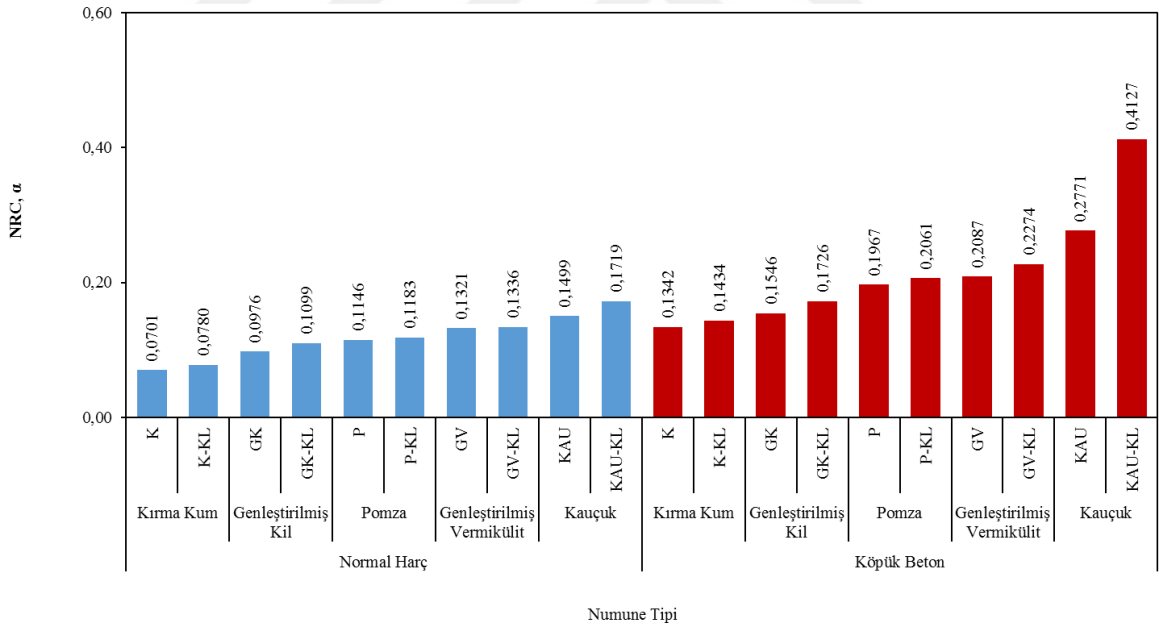
Şekil 4.70. Agregaya türüne göre kalınlığı 1 cm olan numunelere ait NRC değerlerinin değişimi



Şekil 4.71. Agregaya türüne göre kalınlığı 3 cm olan numunelere ait NRC değerlerinin değişimi



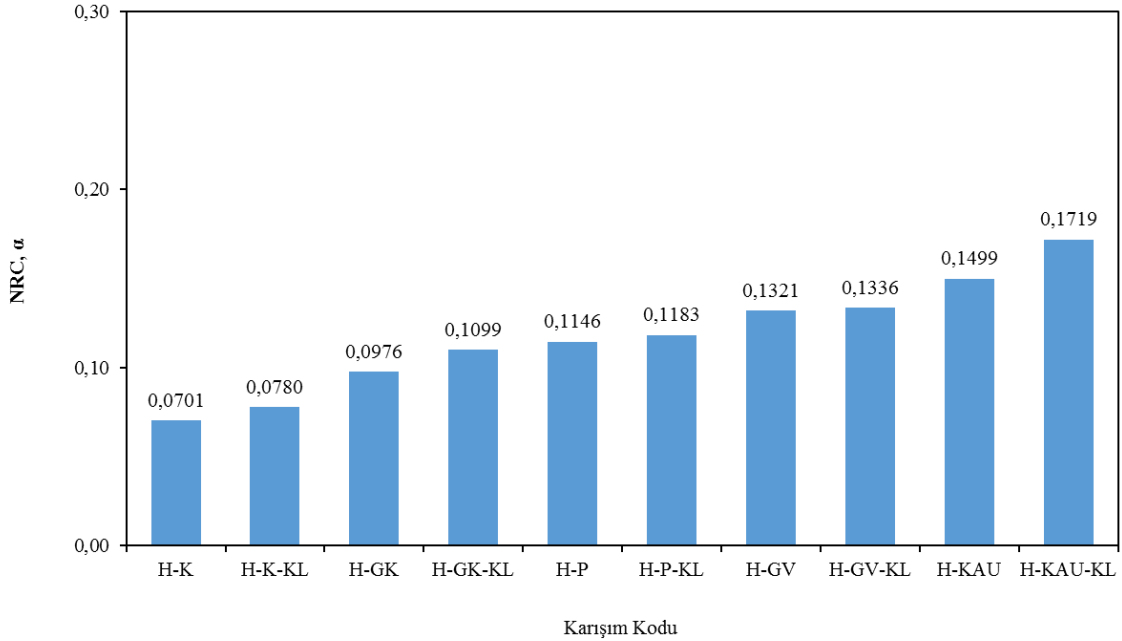
Şekil 4.72. Agregata türüne göre kalınlığı 5 cm olan numunelere ait NRC değerlerinin değişimi



Şekil 4.73. Kalınlığı 1 cm olan numunelere ait NRC değerlerinin değişimi

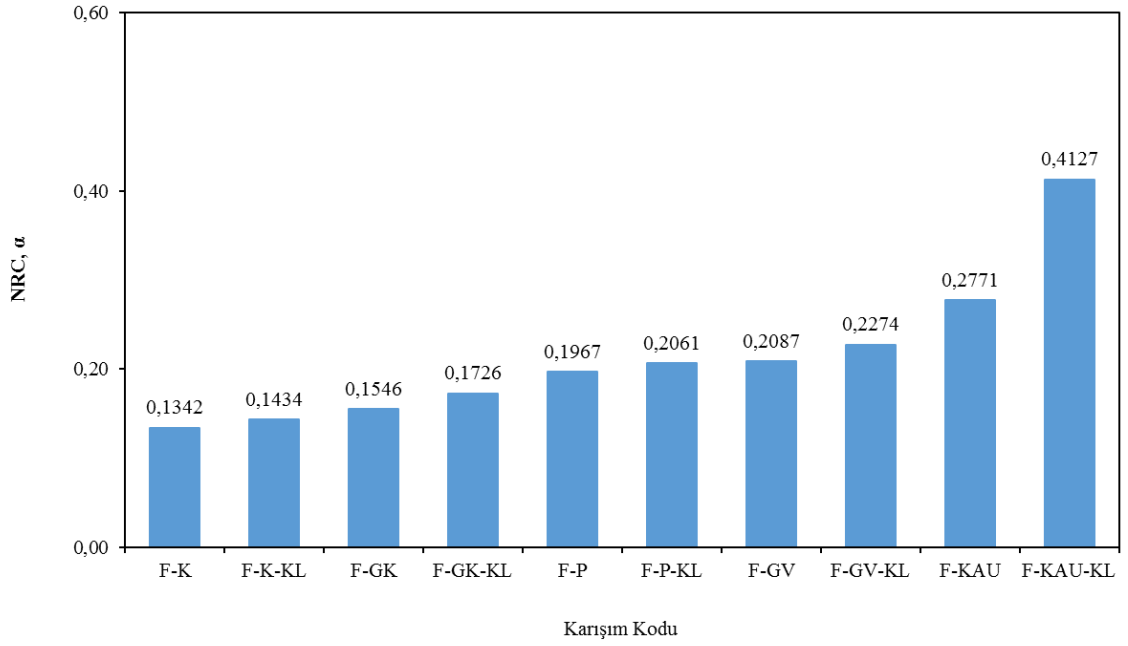
Numunelerin kalınlığı 1 cm olduğunda kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, genleştirilmiş vermicülit ve kauçuk agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen normal harç karışımların NRC değerleri sırasıyla 0.0701, 0.0976, 0.1146, 0.1321, 0.1499 keten lif takviyeli karışımların NRC değerleri ise sırasıyla 0.0780, 0.1099, 0.1183, 0.1336, 0.1719

olarak elde edilmiştir. En yüksek NRC değeri kauçuk agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.1719, en düşük NRC değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 0.0701 olarak elde edilmiştir. Kalınlığı 1 cm olan normal harç numunelere ait NRC değerlerinin değişimi Şekil 4.74’de verilmiştir.

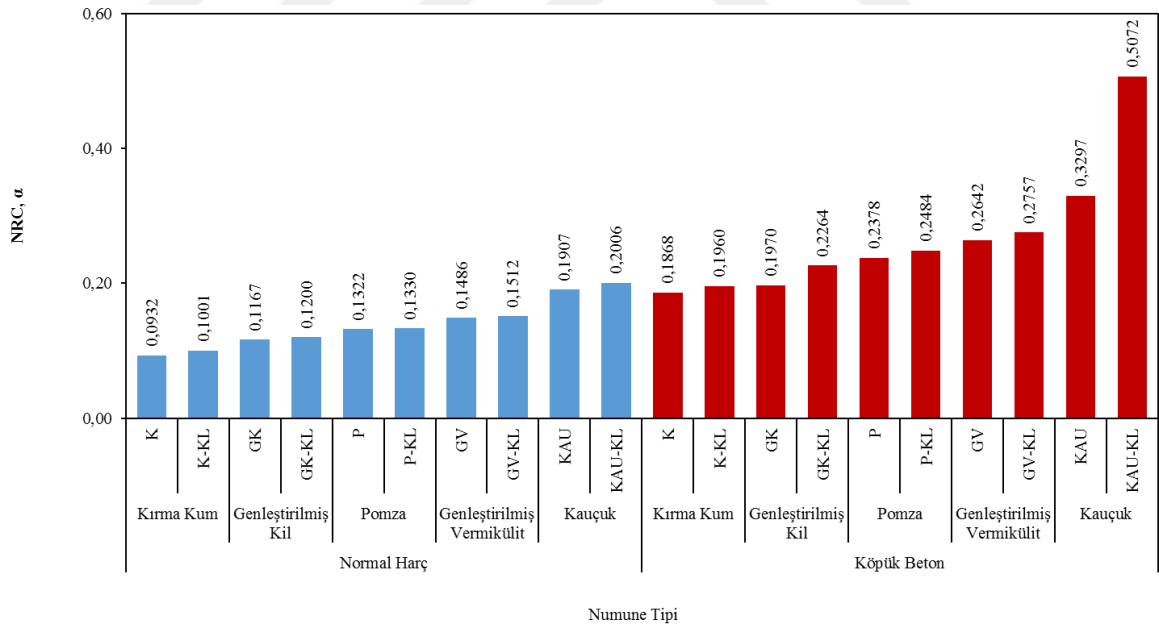


Şekil 4.74. Kalınlığı 1 cm olan normal harç numunelere ait NRC değerlerinin değişimi

Numunelerin kalınlığı 1 cm olduğunda kırma kum, genişletilmiş kil, pomza, genişletilmiş vermikülit ve kauçuk agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen köpük beton karışımların NRC değerleri sırasıyla 0.1342, 0.1546, 0.1967, 0.2087, 0.2771 keten lif takviyeli karışımların NRC değerleri ise sırasıyla 0.1434, 0.1726, 0.2061, 0.2274 ve 0.4127 olarak elde edilmiştir. En yüksek NRC değeri kauçuk agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.4127 en düşük NRC değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 0.1342 olarak elde edilmiştir. Kalınlığı 1 cm olan köpük beton numunelere ait NRC değerlerinin değişimi Şekil 4.75’de verilmiştir.



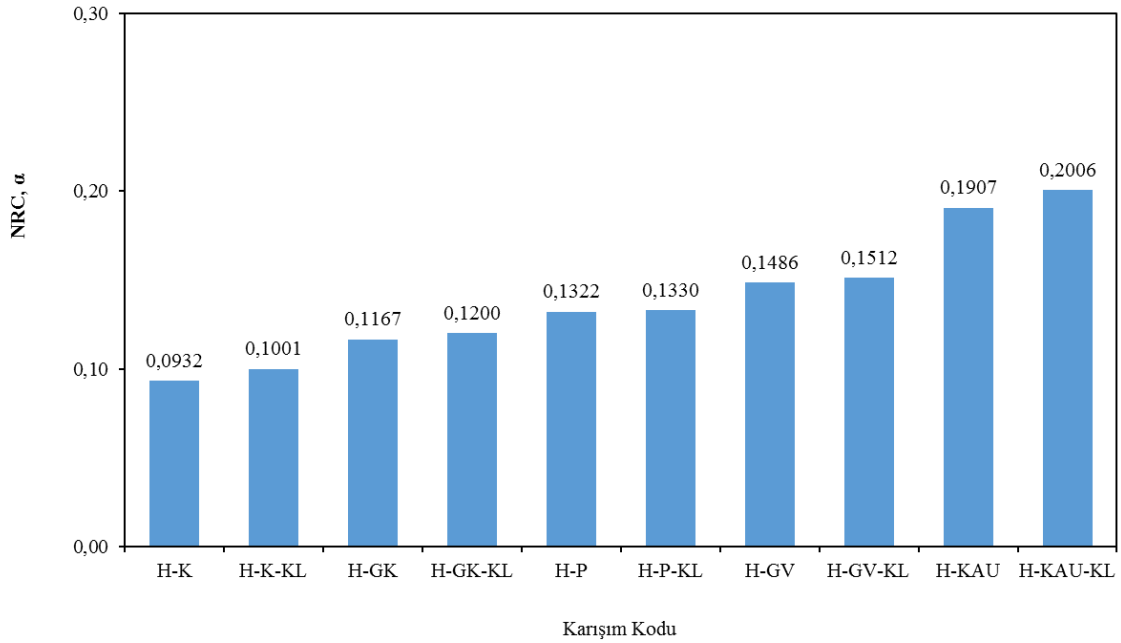
Şekil 4.75. Kalınlığı 1 cm olan köpük beton numunelere ait NRC değerlerinin değişimi



Şekil 4.76. Kalınlığı 3 cm olan numunelere ait NRC değerlerinin değişimi

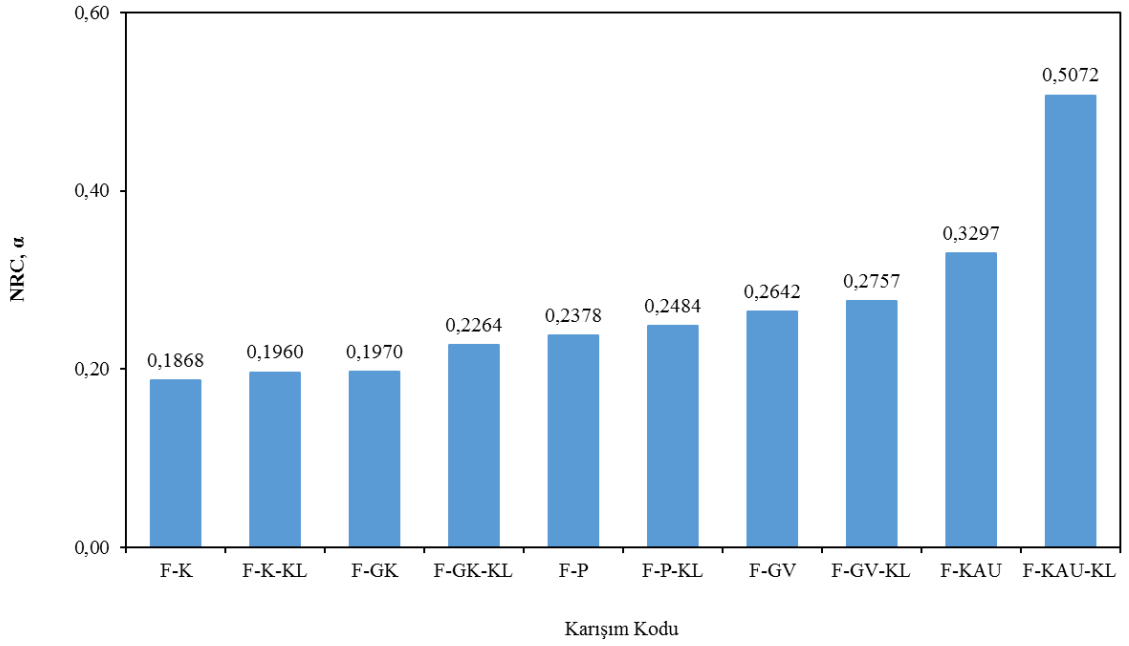
Numunelerin kalınlığı 3 cm olduğunda kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, genleştirilmiş vermikülit ve kauçuk agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen normal harç karışımların NRC değerleri sırasıyla 0.0932, 0.1167, 0.1322, 0.1486, 0.1907 keten lif

takviyeli karışımların NRC değerleri ise sırasıyla 0.1001, 0.12, 0.133, 0.1512, 0.2006 olarak elde edilmiştir. En yüksek NRC değeri kauçuk agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.2006, en düşük NRC değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 0.0932 olarak elde edilmiştir. Kalınlığı 3 cm olan normal harç numunelere ait NRC değerlerinin değişimi Şekil 4.77’de verilmiştir.

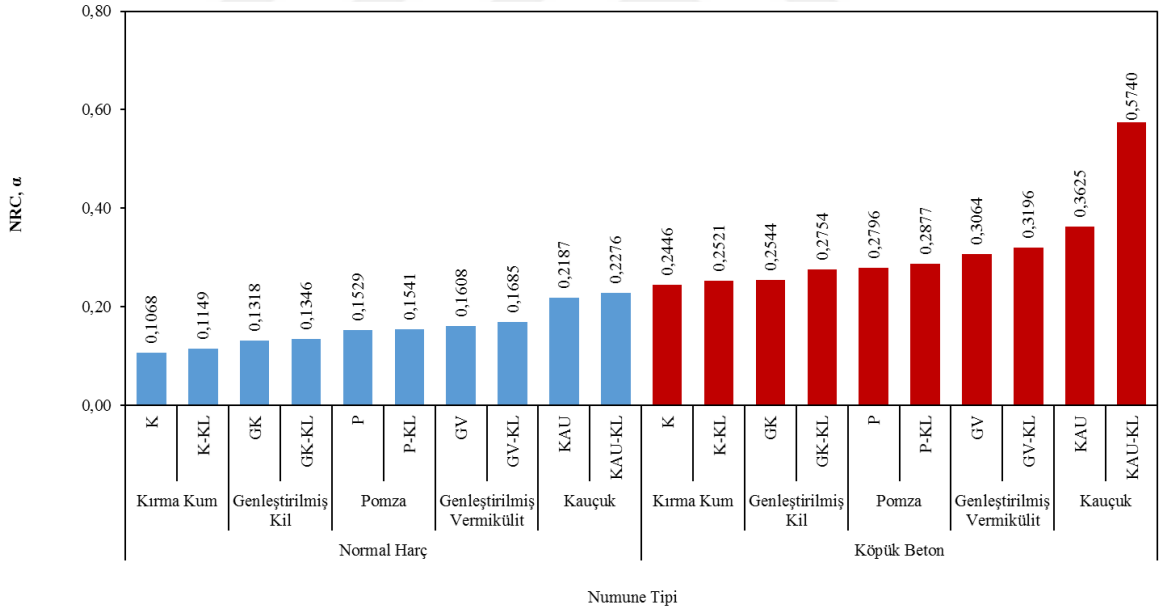


Şekil 4.77. Kalınlığı 3 cm olan normal harç numunelere ait NRC değerlerinin değişimi

Numunelerin kalınlığı 3 cm olduğunda kırma kum, genişletilmiş kil, pomza, genişletilmiş vermikülit ve kauçuk agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen köpük beton karışımların NRC değerleri sırasıyla 0.1868, 0.197, 0.2378, 0.2642 ve 0.3297 keten lif takviyeli karışımların NRC değerleri ise sırasıyla 0.196, 0.2264, 0.2484, 0.2757 ve 0.5072 olarak elde edilmiştir. En yüksek NRC değeri kauçuk agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.5072 en düşük NRC değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 0.1868 olarak elde edilmiştir. Kalınlığı 3 cm olan köpük beton numunelere ait NRC değerlerinin değişimi Şekil 4.78’de verilmiştir.



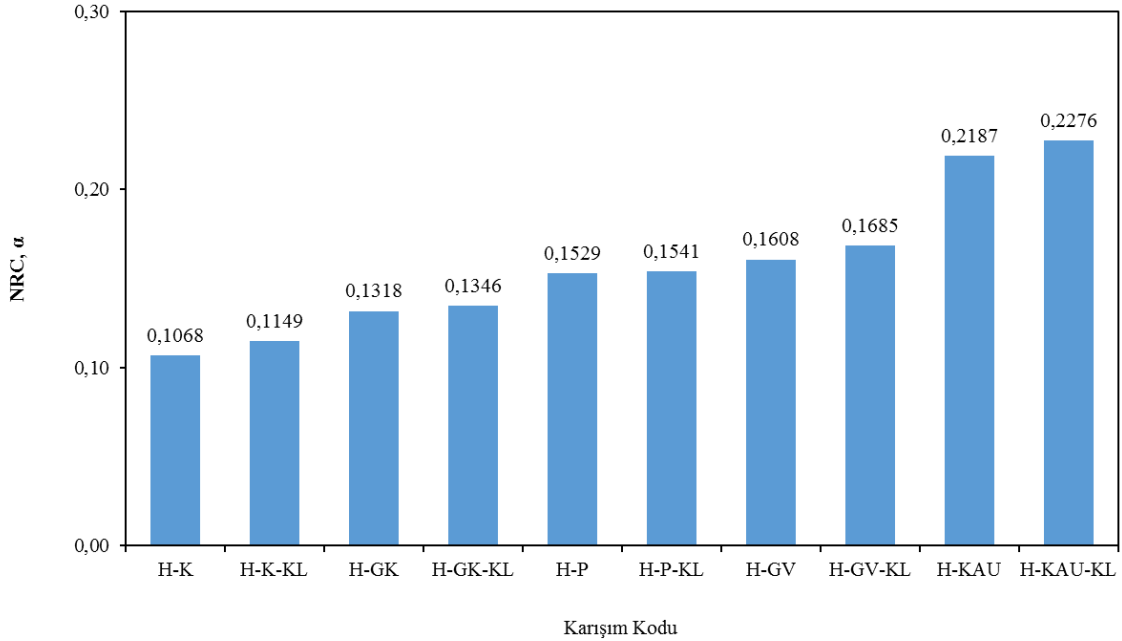
Şekil 4.78. Kalınlığı 3 cm olan köpük beton numunelere ait NRC değerlerinin değişimi



Şekil 4.79. Kalınlığı 5 cm olan numunelere ait NRC değerlerinin değişimi

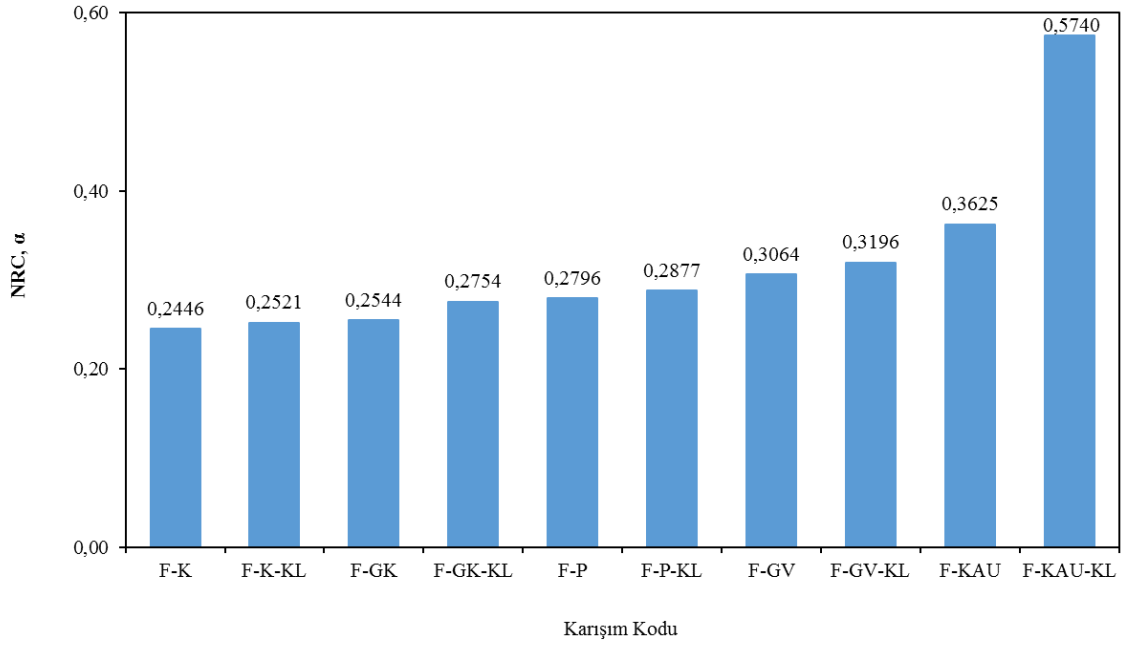
Numunelerin kalınlığı 5 cm olduğunda kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, genleştirilmiş vermikülit ve kauçuk agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen normal harç karışımların NRC değerleri sırasıyla 0.1068, 0.1318, 0.1529, 0.1608, 0.2187 keten lif takviyeli karışımların NRC değerleri ise sırasıyla 0.1149, 0.1346, 0.1541, 0.1685, 0.2276

olarak elde edilmiştir. En yüksek NRC değeri kauçuk agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.2276, en düşük NRC değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 0.1068 olarak elde edilmiştir. Kalınlığı 5 cm olan normal harç numunelere ait NRC değerlerinin değişimi Şekil 4.80’de verilmiştir.



Şekil 4.80. Kalınlığı 5 cm olan normal harç numunelere ait NRC değerlerinin değişimi

Numunelerin kalınlığı 5 cm olduğunda kırma kum, genişletilmiş kil, pomza, genişletilmiş vermikülit ve kauçuk agregaları kullanılarak üretilen lif içermeyen köpük beton karışımların NRC değerleri sırasıyla 0.2446, 0.2544, 0.2796, 0.3064 ve 0.3625 keten lif takviyeli karışımların NRC değerleri ise sırasıyla 0.2521, 0.2754, 0.2877, 0.3196 ve 0.5724 olarak elde edilmiştir. En yüksek NRC değeri kauçuk agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.5740 en düşük NRC değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 0.2446 olarak elde edilmiştir. Kalınlığı 5 cm olan köpük beton numunelere ait NRC değerlerinin değişimi Şekil 4.81’de verilmiştir.

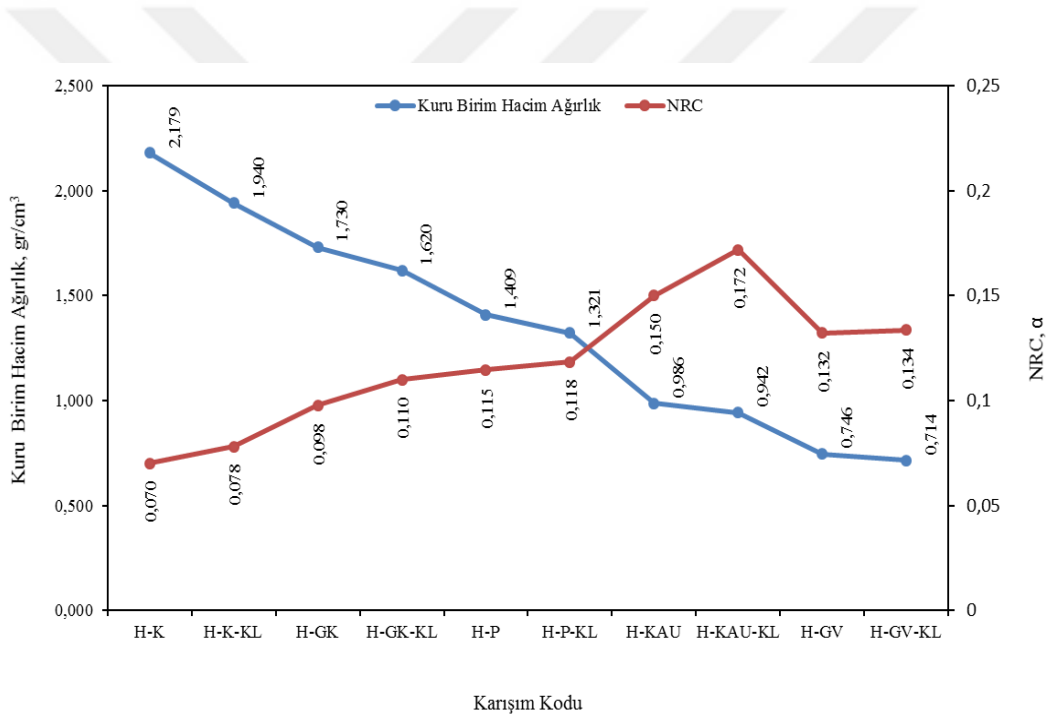


Şekil 4.81. Kalınlığı 5 cm olan köpük beton numunelere ait NRC değerlerinin değişimi

Numune kalınlığının ses yutum katsayısı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiş, numune kalınlığı arttıkça ses yutum katsayısının artış gösterdiği belirlenmiştir. Numune kalınlığı 5 cm olan numunelerin yüksek frekanslardaki ve düşük frekanslardaki ses yutum katsayılarının diğer kalınlıklara nazaran daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Keten lif ve köpük ikamesi ile numunelerin ses yutum katsayılarında önemli derecede iyileşme olduğu gözlemlenmiştir.

Açık gözenekliliğin artması ile ses yutum katsayısında artış gözlemlenmiştir. Gözenekliliğin artışına bağlı olarak genel anlamda su emme ve kılcal su emme değerleri artış gösterirken kuru birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı, ısı iletkenlik, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve basınç dayanımı değerlerinde ise azalma gözlemlenmiştir. Kauçuk agregalı keten lif ikameli köpük beton numuneler ses yutum katsayısı en iyi değerlerini almasına rağmen basınç ve eğilme dayanımında oldukça düşük değerler elde edilmiştir.

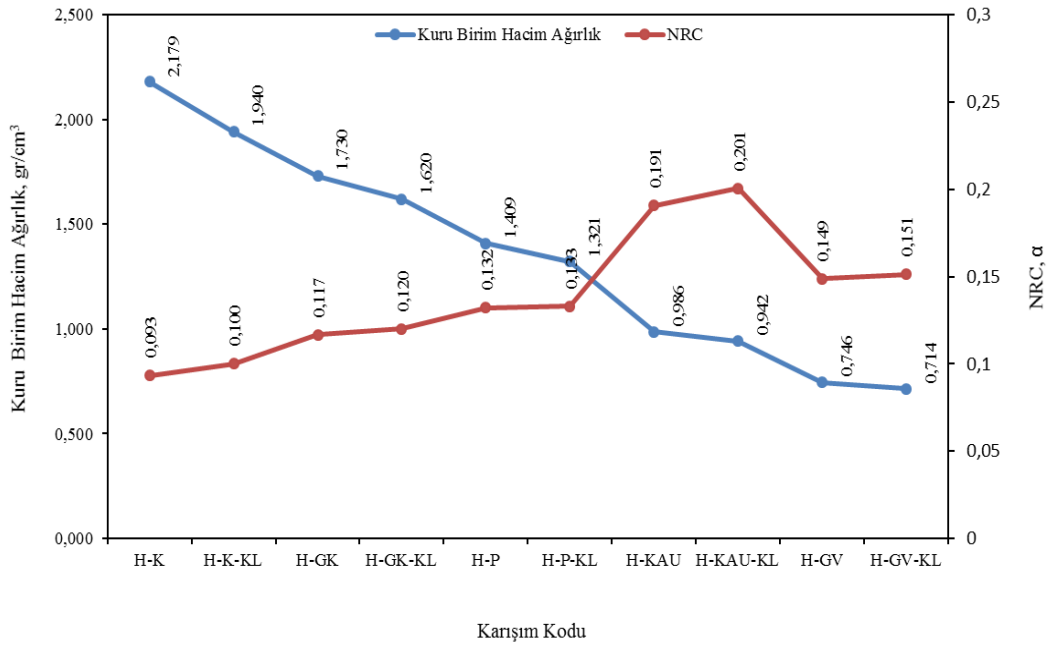
Normal harçların ve köpük betonların kuru birim hacim ağırlıklarında azalmaya bağlı olarak boşluk-gözenek (porozite) miktarının artması ile ses yutum katsayı değerlerinde genel anlamda artış gözlemlenmiştir. Bu durum ses yutum katsayısı bakımından daha verimli sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Normal harçların ve köpük betonların kuru birim hacim ağırlık – ses yutum katsayı ilişkisi kalınlık = 1 cm olan numunelerde sırasıyla Şekil 4.82 ve 4.83’de, kalınlık = 3 cm olan numunelerde sırasıyla Şekil 4.84 ve 4.85’de, kalınlık = 5 cm olan numunelerde ise sırasıyla Şekil 4.86 ve 4.87’de verilmiştir. Normal harçların ve köpük betonların porozite – ses yutum katsayı ilişkisi kalınlık = 1 cm olan numunelerde sırasıyla Şekil 4.88 ve 4.89’da, kalınlık = 3 cm olan numunelerde sırasıyla Şekil 4.90 ve 4.91’de, kalınlık = 5 cm olan numunelerde ise sırasıyla Şekil 4.92 ve 4.93’de verilmiştir.



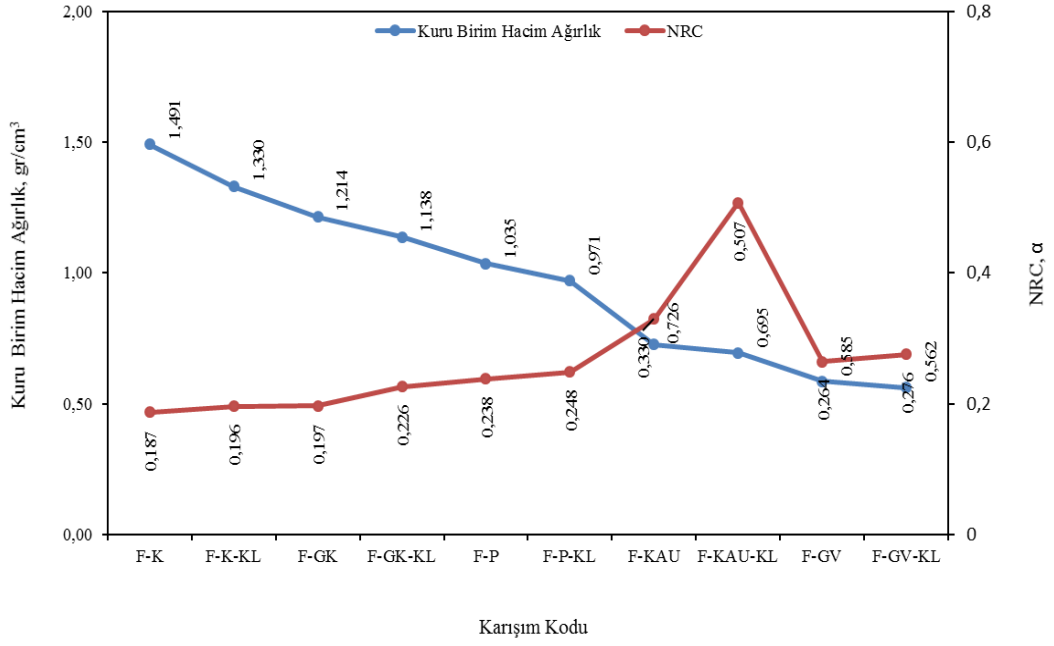
Şekil 4.82. Kalınlığı 1 cm olan normal harçların kuru birim hacim ağırlık - NRC ilişkisi



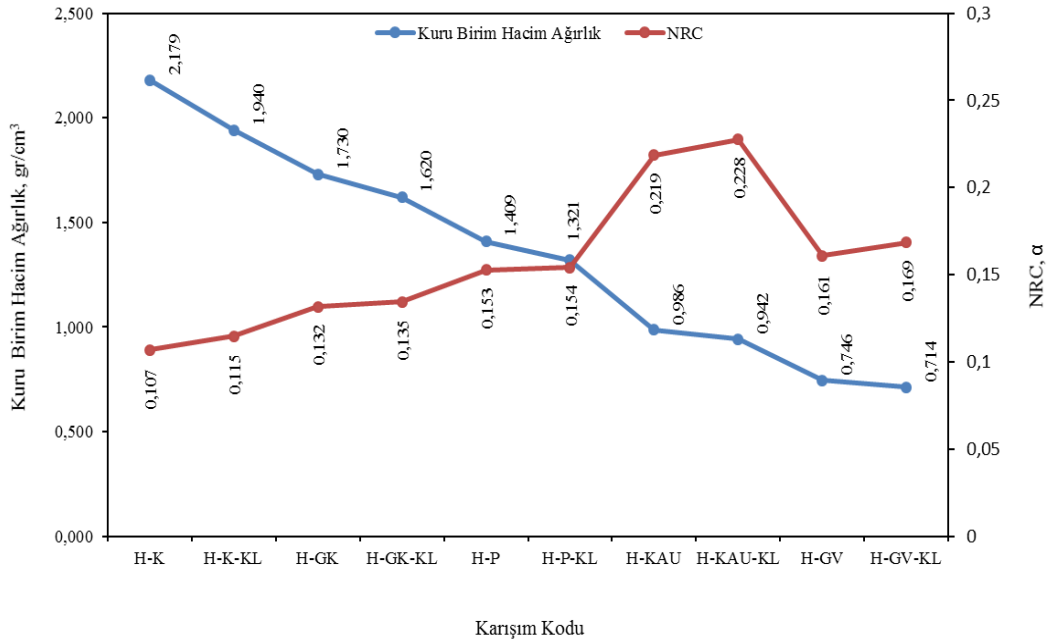
Şekil 4.83. Kalınlığı 1 cm olan köpük betonların kuru birim hacim ağırlık - NRC ilişkisi



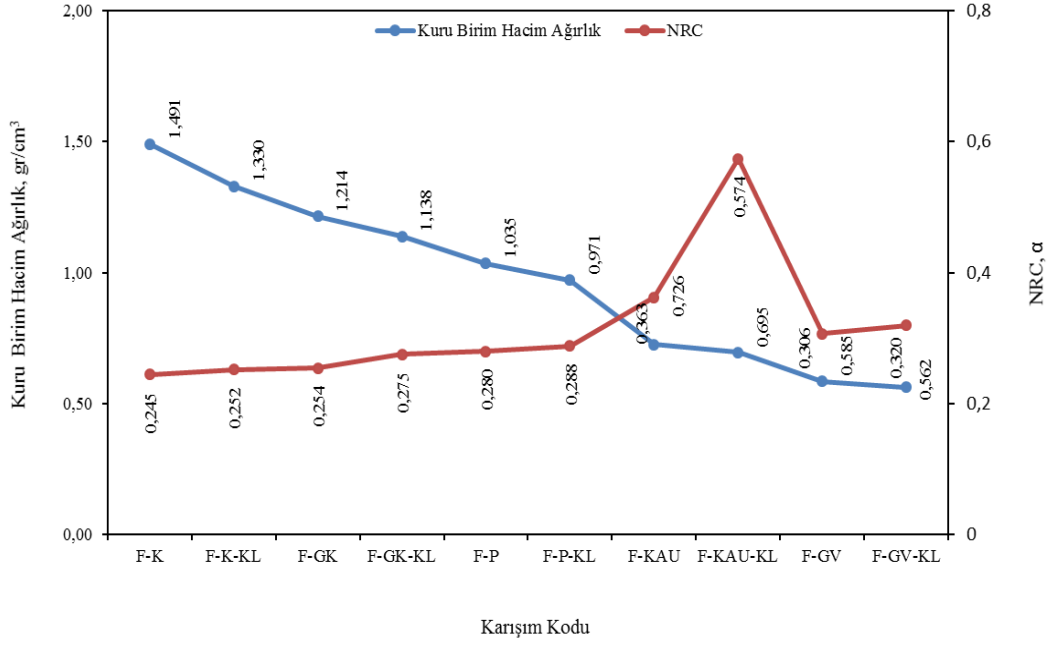
Şekil 4.84. Kalınlığı 3 cm olan normal harçların kuru birim hacim ağırlık - NRC ilişkisi



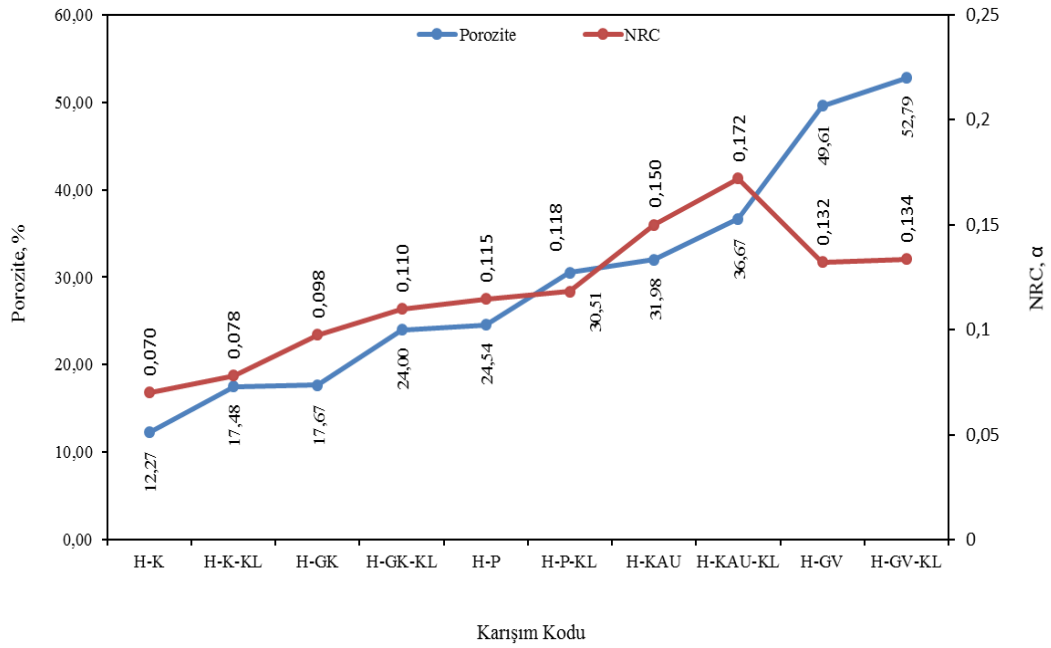
Şekil 4.85. Kalınlığı 3 cm olan köpük betonların kuru birim hacim ağırlık - NRC ilişkisi



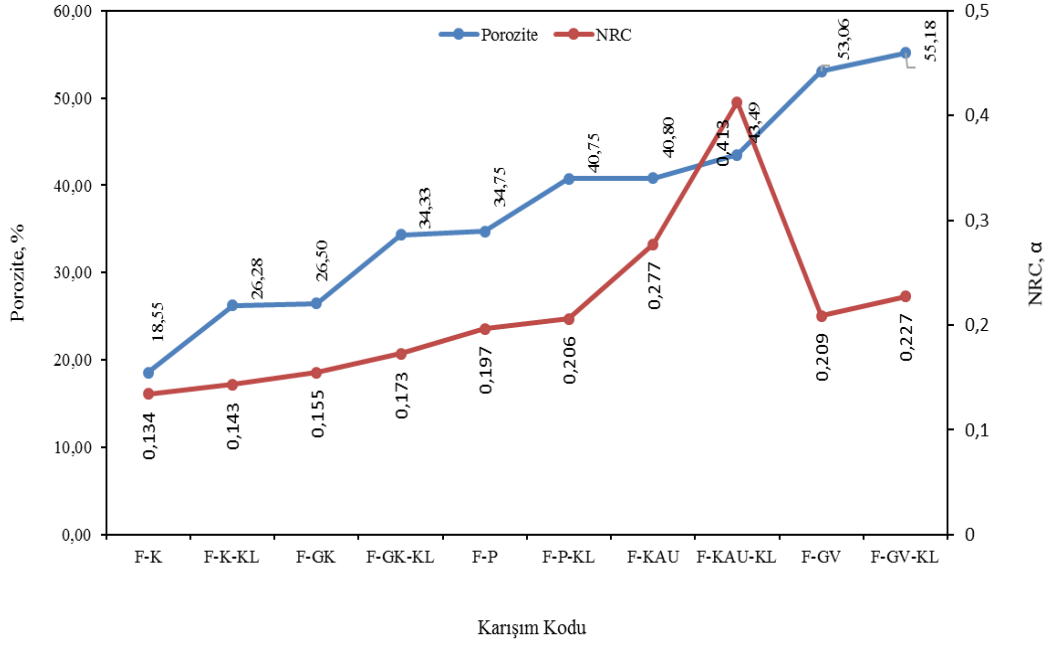
Şekil 4.86. Kalınlığı 5 cm olan normal harçların kuru birim hacim ağırlık - NRC ilişkisi



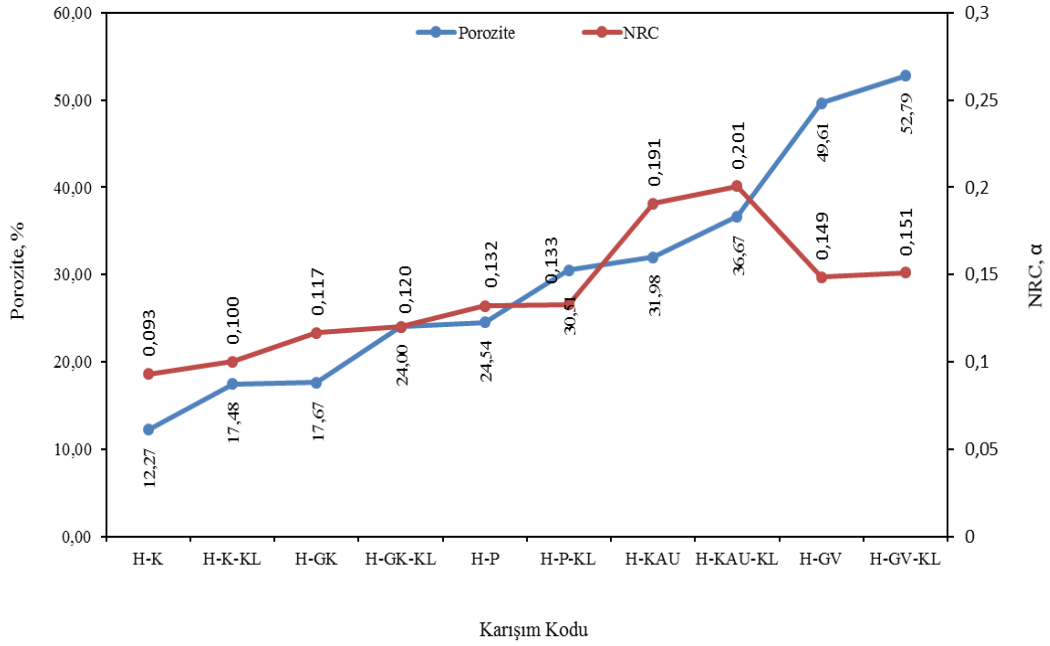
Şekil 4.87. Kalınlığı 5 cm olan köpük betonların kuru birim hacim ağırlık - NRC ilişkisi



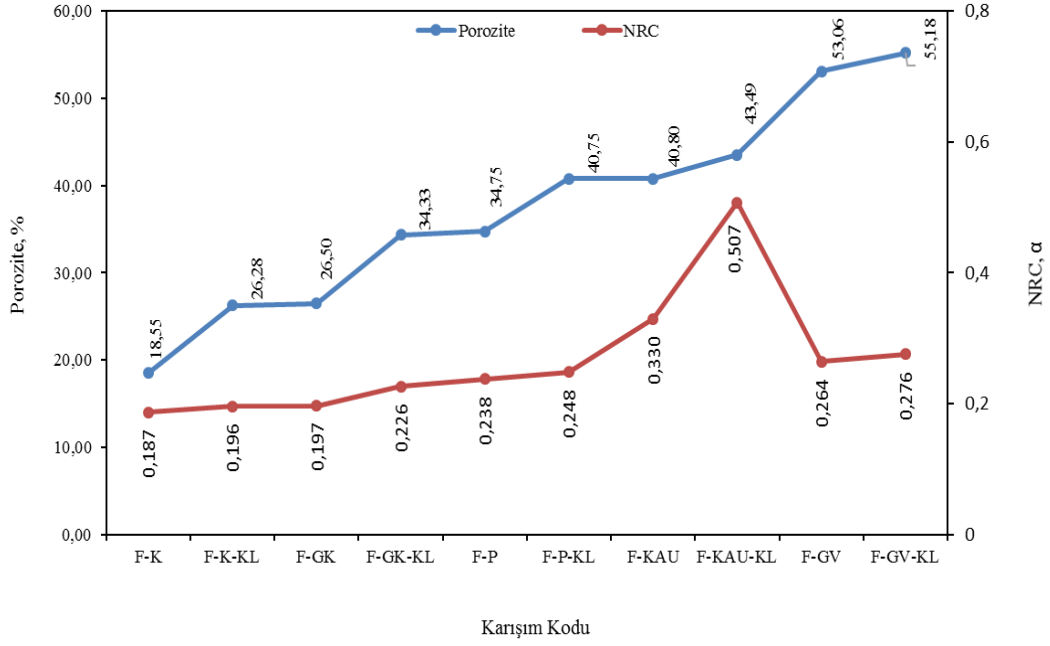
Şekil 4.88. Kalınlığı 1 cm olan normal harçların porozite - NRC ilişkisi



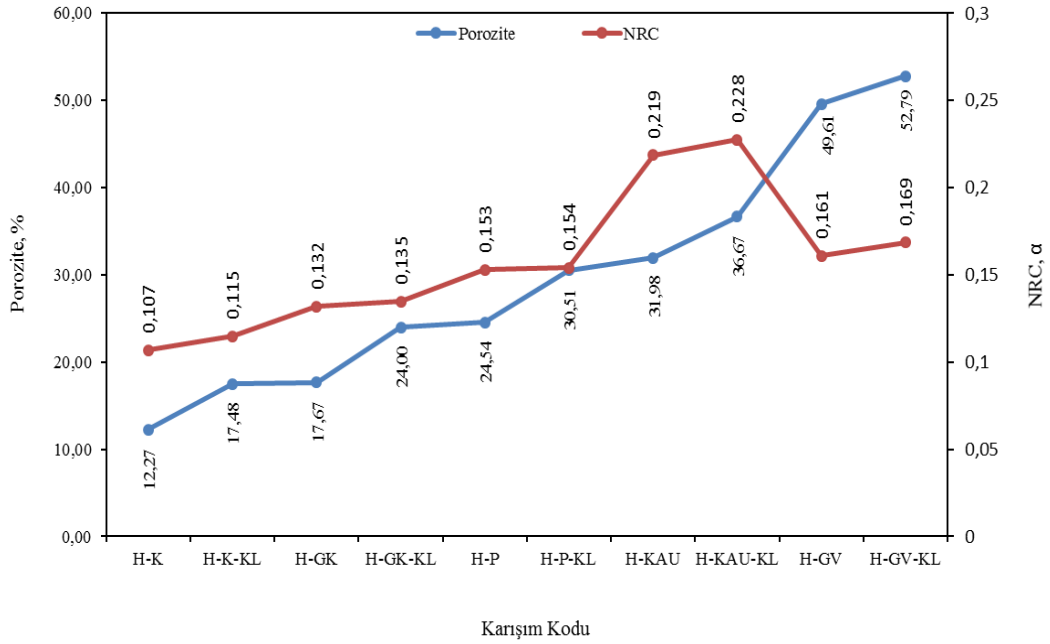
Şekil 4.89. Kalınlığı 1 cm olan köpük betonların porozite - NRC ilişkisi



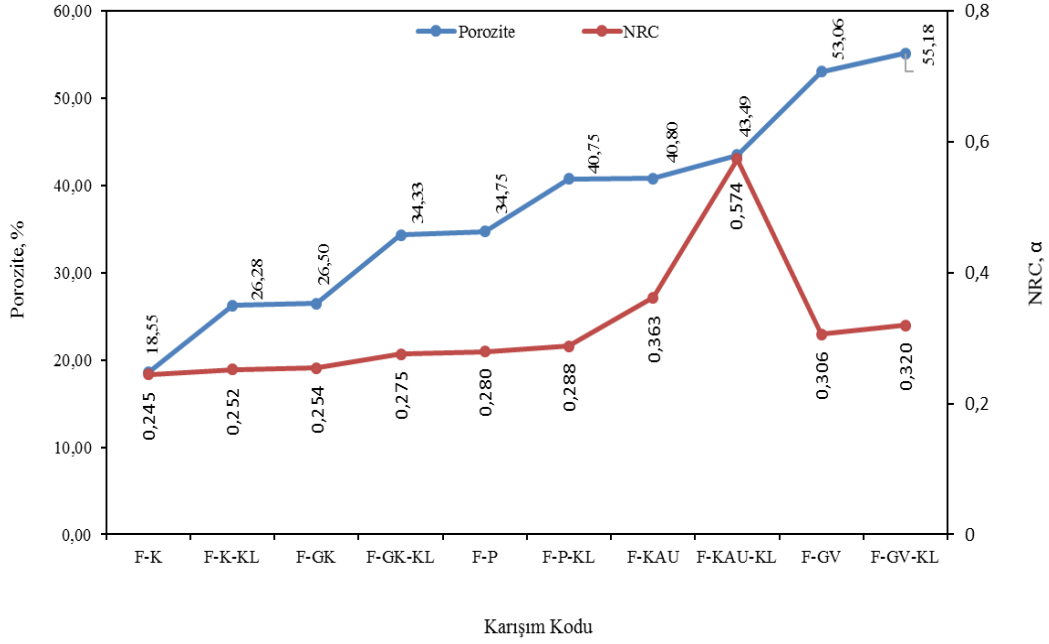
Şekil 4.90. Kalınlığı 3 cm olan normal harçların porozite - NRC ilişkisi



Şekil 4.91. Kalınlığı 3 cm olan köpük betonların porozite - NRC ilişkisi



Şekil 4.92. Kalınlığı 5 cm olan normal harçların porozite - NRC ilişkisi



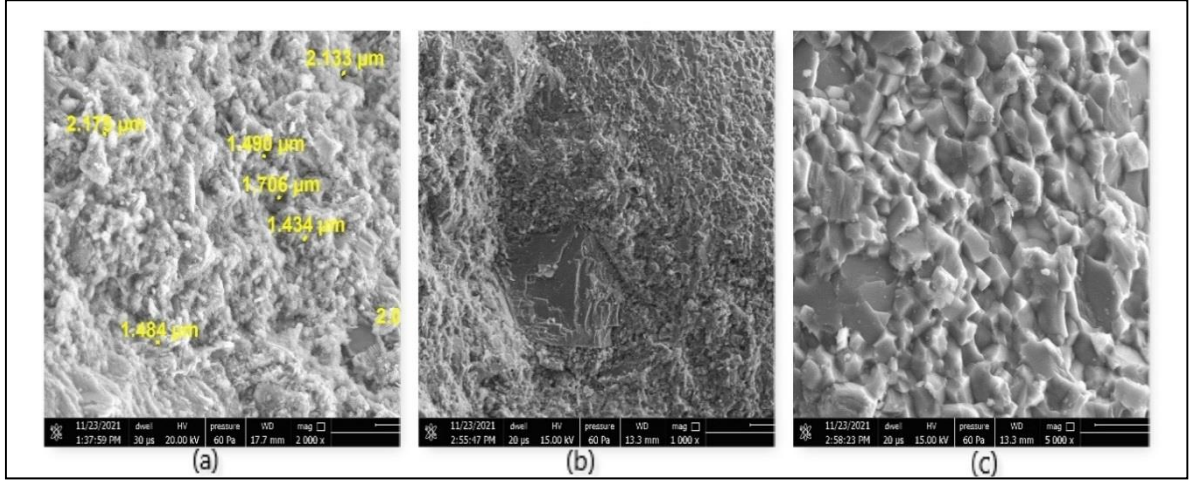
Şekil 4.93. Kalınlığı 5 cm olan köpük betonların porozite - NRC ilişkisi

4.1.3. Numunelerin Elementel Analizleri

4.3.1. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) Analizi

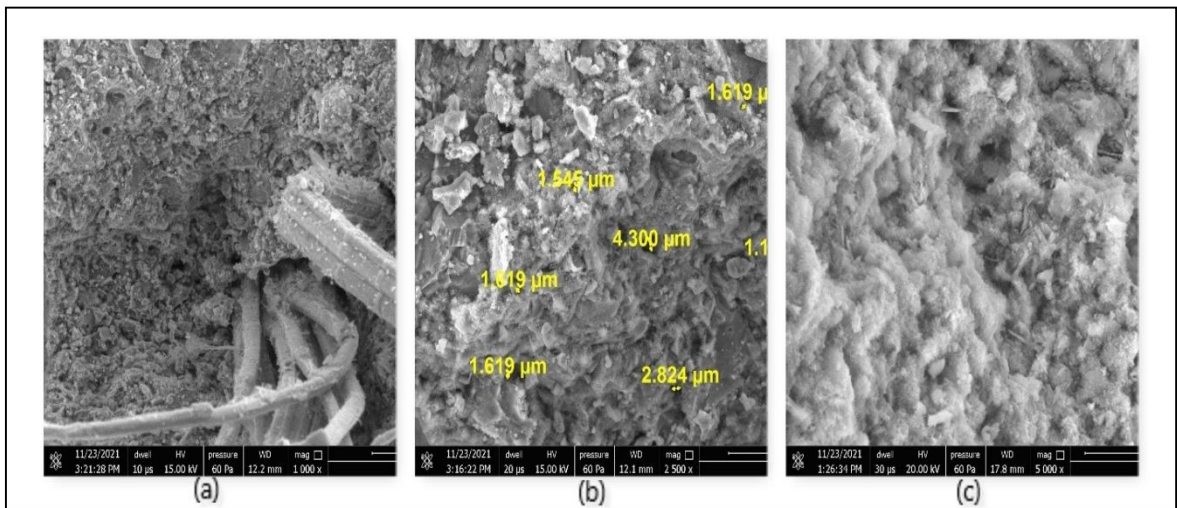
Numuneler üzerinde 20°C’de yapılan SEM görüntülerinden de görülebileceği gibi köpük solüsyonu ikamesi ile numunelerdeki gözeneklerde ve gözenek boyutlarında artışlar görülmüştür.

Kırma kum agregalı normal referans harç numunelerin (köpük solüsyonu katılmayan lifsiz) agrega yapısı, gözenek boyutu, gözenek dağılımları için iç yapısı incelenmiştir. Çimento ve agregaya genel bakış 1000× büyütme ile yapılırken, gözenekli yapı göz ile seçilebilmektedir. Numuneler üzerinde yapılan 1000× büyütmede ise C-S-H yapıları görülmektedir. 2000× büyütmede küçük gözeneklere, 5000× büyütme de ise gözeneğin oluşum noktaları ve yapılar daha iyi incelenebilmektedir. Yapılan 2000× yakın çekimlerinde gözenekli yapıların köpük beton numunelere kıyasla azlığı, gözenek boyutlarının küçüklüğü ve gözeneklerin yaklaşık $\approx 1.77 \mu\text{m}$ boyutlarında olduğu dikkat çekmektedir. 5000× büyütme de ise gözeneğin oluşum noktaları ve C-S-H yapıları, agrega yapısı daha iyi incelenebilmektedir. HK-R karışım kodlu numunenin SEM analizi Şekil 4.94’de verilmiştir.



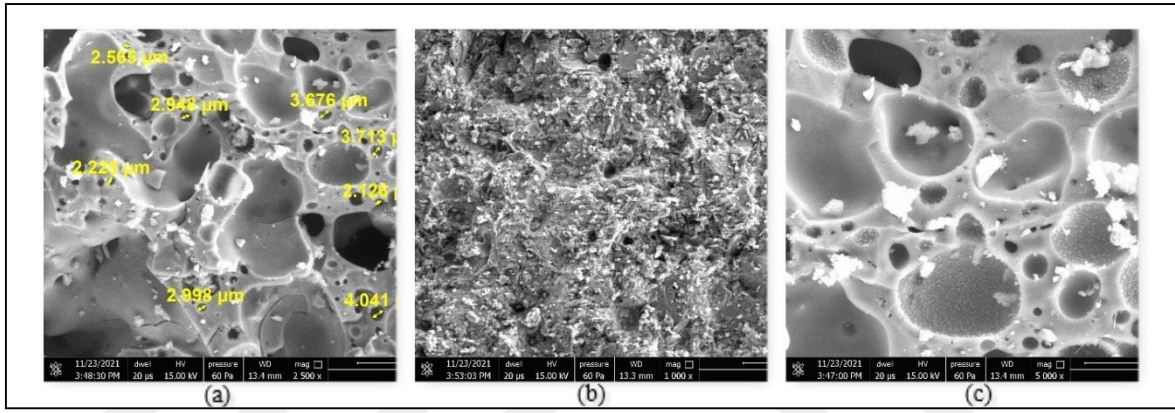
Şekil 4.94. HK-R karışım kodlu numunenin SEM analizi (a) 1000× büyütme, (b) 2000× büyütme, (c) 5000× büyütme

Numune üretim aşamasında kullanılan keten liflerin yapı içerisinde bütünlüklerini korudukları ve hidrasyon ortamından etkilenmedikleri gözlemlenmiştir. Çimento ve agregaya genel bakış 1000× büyütme ile yapılırken, gözenekli yapı ve lifin çıktığı yerdeki yapılar göz ile seçilebilmektedir. Yapılan 2000× yakın çekimlerinde gözenekli yapıların köpük beton numunelere kıyasla azlığı, gözenek boyutlarının küçüklüğü ve gözeneklerin yaklaşık $\approx 2.18 \mu\text{m}$ boyutlarında olduğu dikkat çekmektedir. 5000× büyütme de ise gözeneğin oluşum noktaları ve C-S-H yapıları, agrega yapısı daha iyi incelenebilmektedir. H-K-KL karışım kodlu numunenin SEM analizi Şekil 4.95’de verilmiştir.



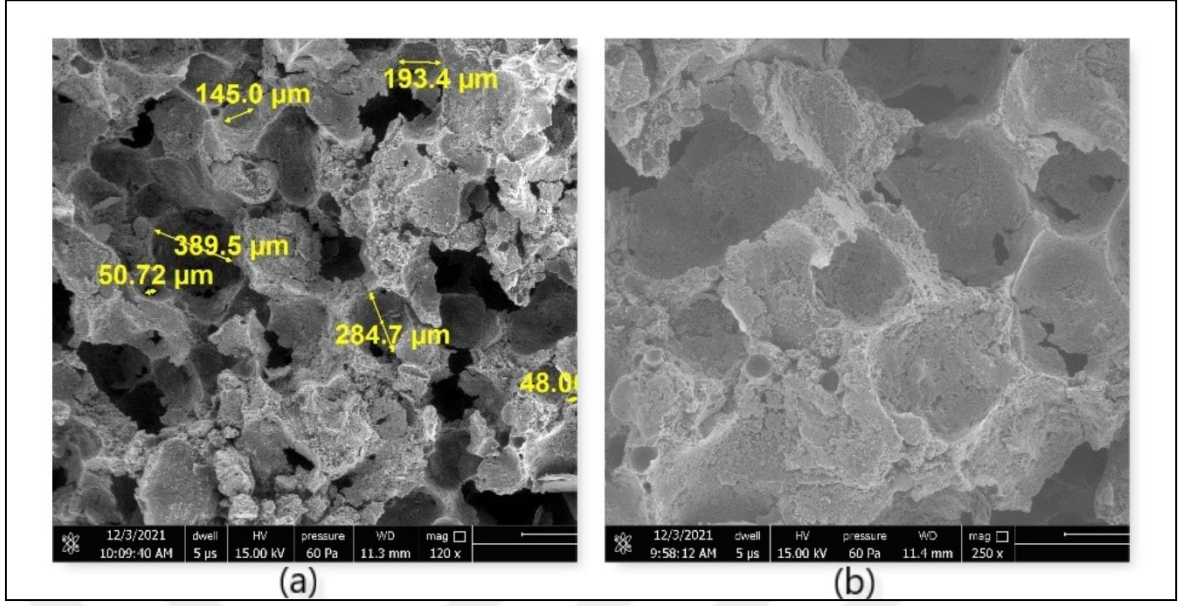
Şekil 4.95. H-K-KL karışım kodlu numunenin SEM analizi (a) 1000× büyütme, (b) 2500× büyütme, (c) 5000× büyütme

Kırma kum agregalı referans köpük beton numunelerin normal harç numunelere kıyasla ses yutum katsayılarından elde edilen NRC ve ısı iletkenlik katsayısının umut vadeden değerleri neticesinde agrega yapısı, gözenek boyutu, gözenek dağılımları için iç yapısı incelenmiştir. Çimento ve agregaya genel bakış 1000× büyütme ile yapılırken, gözenekler göz ile seçilebilmektedir. 2500× yakın çekimlerinde küçük büyük birçok gözenek ve oluşum noktaları incelenebilmekte ve gözeneklerin yaklaşık $\approx 3.07 \mu\text{m}$ boyutlarında olduğu dikkat çekmektedir. 5000× büyütmede ise gözenegin oluşum noktaları ve C-S-H yapıları, agrega yapısı daha iyi incelenebilmektedir. F-K-R karışım kodlu numunenin SEM analizi Şekil 4.96'da verilmiştir.

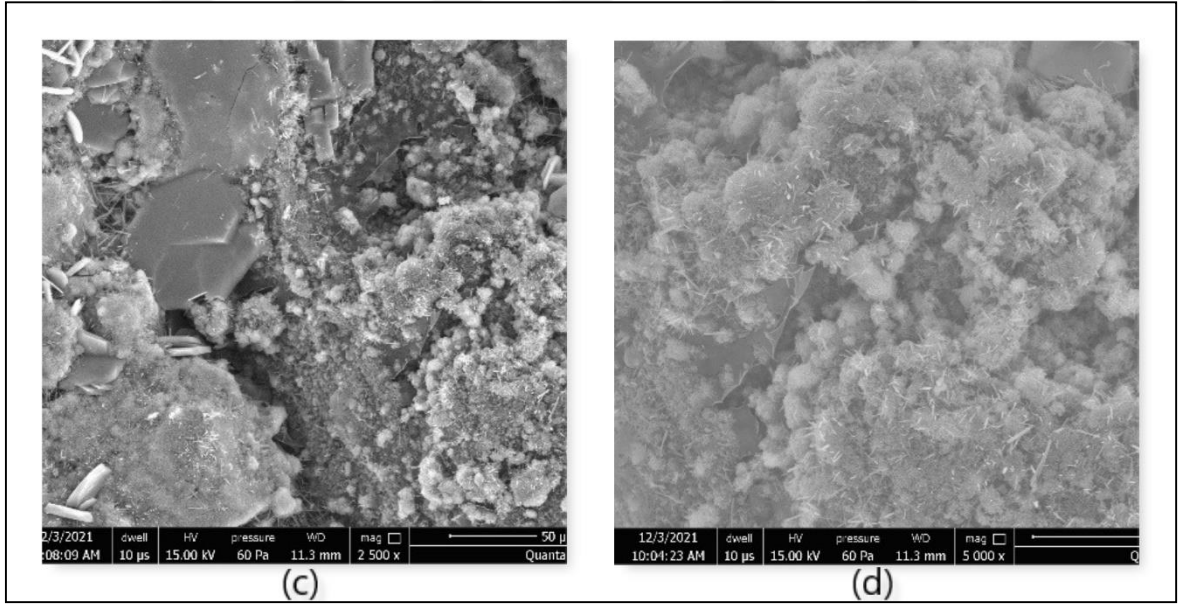


Şekil 4.96. F-K-R karışım kodlu numunenin SEM analizi (a) 1000× büyütme, (b) 2500× büyütme, (c) 5000× büyütme

Atık kauçuk agregalı köpük beton numunelerin ses yutum katsayılarından elde edilen NRC ve ısı iletkenlik katsayısının umut vadeden değerleri neticesinde agrega yapısı, gözenek boyutu, gözenek dağılımları için iç yapısı incelenmiştir. Çimento ve agregaya genel bakış 250× büyütme ile yapılırken, gözenekli yapı göz ile seçilebilmektedir. Yapılan 120× çekimlerinde gözenekli yapı, küçük büyük birçok gözenegin olduğu ve gözeneklerin yaklaşık $\approx 156.28 \mu\text{m}$ boyutlarında olduğu dikkat çekmektedir. 2500× yakın çekimlerinde ise gözenegin oluşum noktaları ve lifin çıktığı yerdeki yapılar görülmektedir. 5000× büyütmede ise gözenegin oluşum noktaları ve C-S-H yapıları, agrega yapısı daha iyi incelenebilmektedir. F-KAU karışım kodlu numunenin SEM analizi Şekil 4.97 ve 4.98'de verilmiştir.



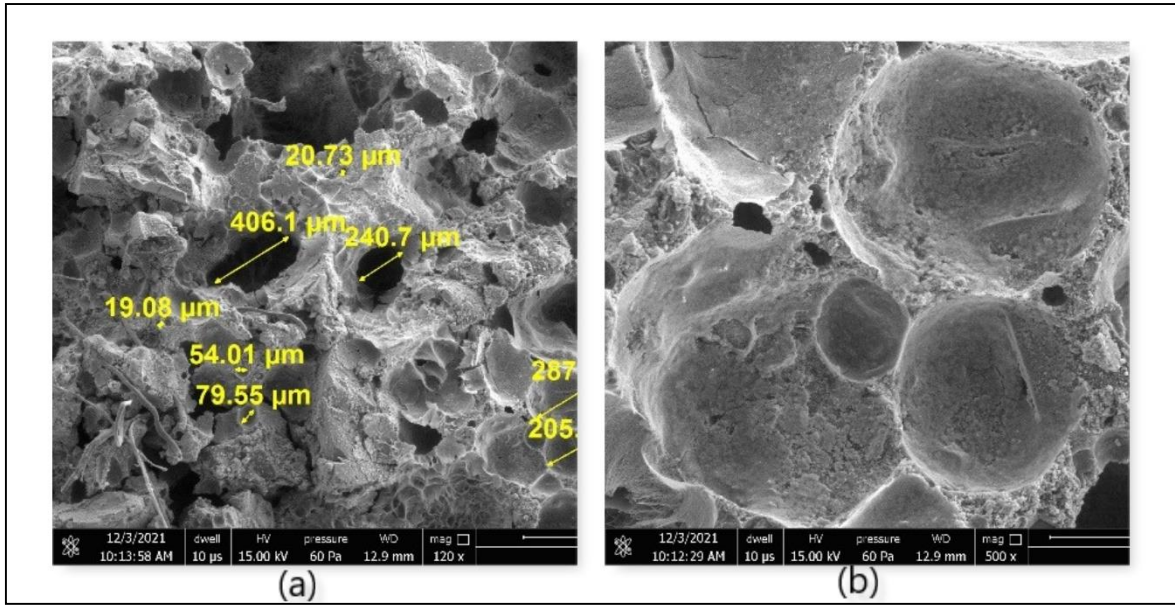
Şekil 4.97. F-KAU karışım kodlu numunenin SEM analizi (a) 120× büyütme, (b) 250× büyütme



Resim 4.98. F-KAU karışım kodlu numunenin SEM analizi (c) 2500× büyütme, (d) 5000× büyütme

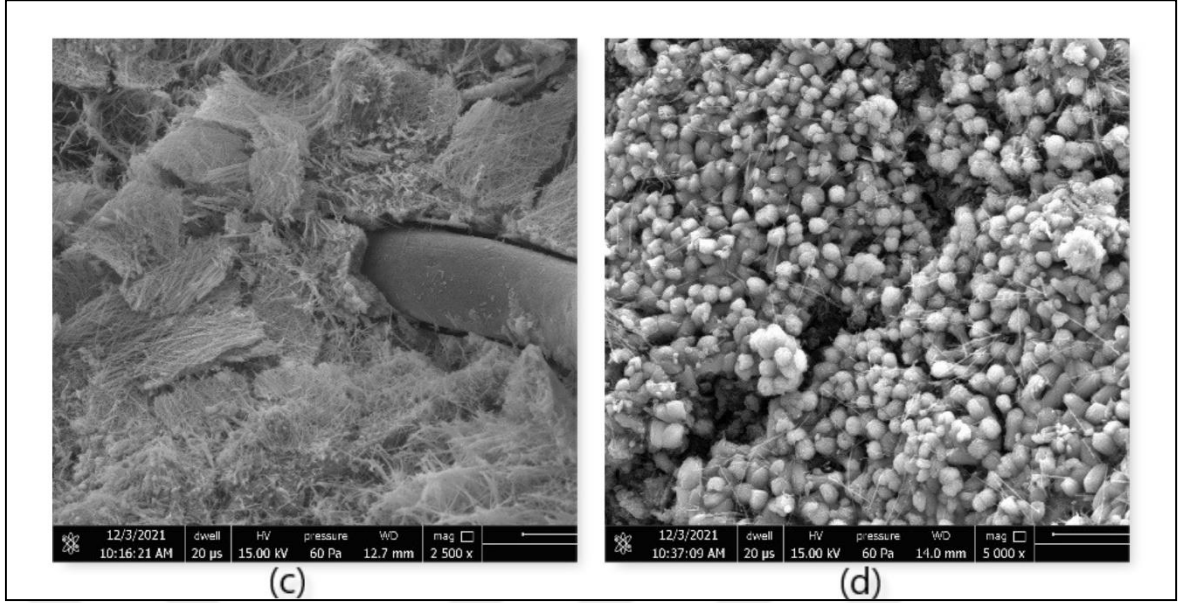
Keten lif takviyeli atık kauçuk agregalı köpük beton numunelerin ses yutum katsayılarından elde edilen NRC ve ısı iletkenlik katsayısının umut vadeden değerleri neticesinde agrega yapısı, gözenek boyutu, gözenek dağılımları için iç yapısı incelenmiştir.

Numune üretim aşamasında kullanılan keten liflerin yapı içerisinde bütünlüklerini korudukları ve hidrasyon ortamından etkilenmedikleri gözlemlenmiştir. Çimento ve agregaya genel bakış 500× büyütme ile yapılırken, gözenekli yapı göz ile seçilebilmektedir. Yapılan 120× çekimlerinde gözenekli yapı, küçük büyük birçok gözeneğin olduğu ve gözeneklerin yaklaşık $\approx 164.15 \mu\text{m}$ boyutlarında olduğu dikkat çekmektedir. 2500× yakın çekimlerinde ise gözeneğin oluşum noktaları ve lifin çıktığı yerdeki yapılar görülmektedir. 5000× büyütmede ise gözeneğin oluşum noktaları ve C-S-H yapıları, agrega yapısı daha iyi incelenebilmektedir. F-KAU-KL karışım kodlu numunenin SEM analizi Şekil 4.99 ve 4.100'de verilmiştir.



Şekil 4.99. F-KAU-KL SEM analizi (a) 120× büyütme, (b) 500× büyütme

Çimentodaki kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin su ile reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin oluşma hızına ve miktarına bağlı olarak çimento hamurunun kazanabileceği dayanım artmaktadır. C-S-H jelleri ne kadar hızlı ve çok olursa, dayanım da o kadar yüksek çıkmaktadır (Akyıldız, 2012). Numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile iç yapıları incelendiğinde çimentoya bağlayıcılık özelliği ve dayanım kazandıran kalsiyum silikat hidratın (C-S-H) köpük ikamesi ile azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), harç içindeki boşlukları en aza indirdiğinden (Özcan, 2005; Erdoğan, 2003; Mutlu, 2000) kırma kum referans numunelerde diğer numunelere kıyasla fazla oranda bulunduğu görülmüştür.



Şekil 4.100. F-KAU-KL SEM analizi (c) 2500× büyütme, (d) 5000× büyütme

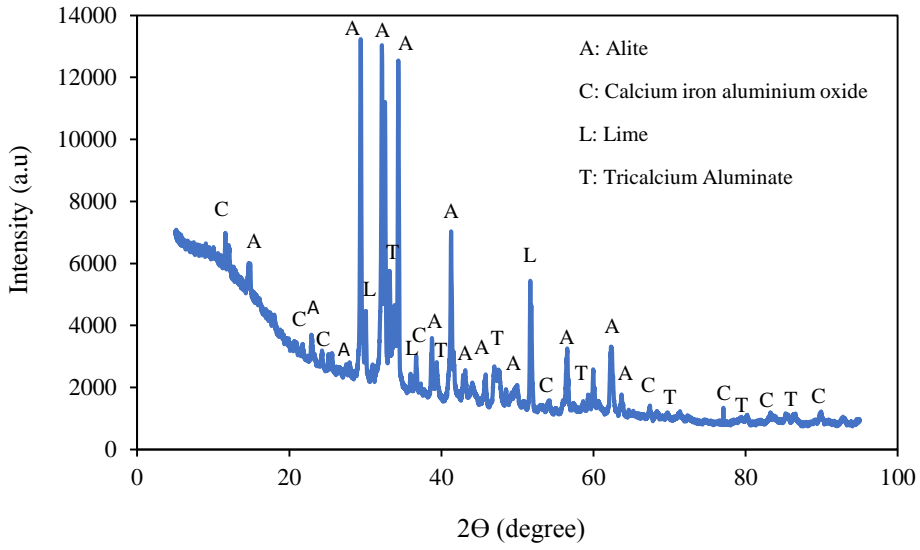
Keten lif takviyeli köpük beton numunelerde kristallerin tam olarak mikro yapıyı kaplamadıklarından dolayı kompozit yapı içinde mikro çatlakların ortaya çıkmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Atık kauçuk agregalar ve keten lifi agrega-matris ara yüzeyinde zayıf bir bağ oluşmasına neden olmuştur. Agrega - matris ara yüzeyinin betonun dayanımı üzerine büyük bir etkisi vardır, bu sebeple dayanımları düşük çıkmıştır. Ayrıca malzemenin gözeneginin artışına bağlı olarak etrenjit oluşumunun da arttığı gözlemlenmiştir.

Normal harç numunelere köpük ikamesi ile gözeneklerin sayısında ve boyutlarında artış meydana gelirken, gözeneklerin de birbirine yaklaştığı görülmüştür.

4.3.2. X-Işını Difraktometresi (XRD) Analizi

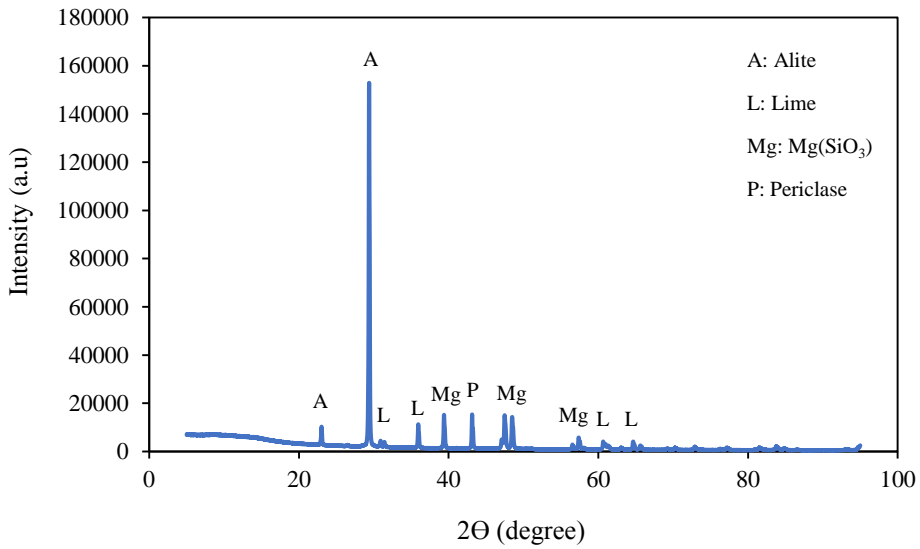
Deneysel çalışmada çimento esaslı harçların üretiminde kullanılan çimento ve farklı agregaların X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi yapılmıştır. Malzemelerin XRD analizleri Şekil 4.101 - 4.107’de verilmiştir.

Çalışmada kullanılan çimento malzemesinin XRD modelinde alit (C_3S) kalsiyum demir aliminyum oksit ($Ca_3(Al,Fe)_2O_6$) kireç ($CaOH$)₂ fazlarının yanı sıra trikalsiyumaluminat ($Ca_3Al_2O_6$) da tespit edilmiştir. Çimentonun XRD analizi Şekil 4.101’de verilmiştir.



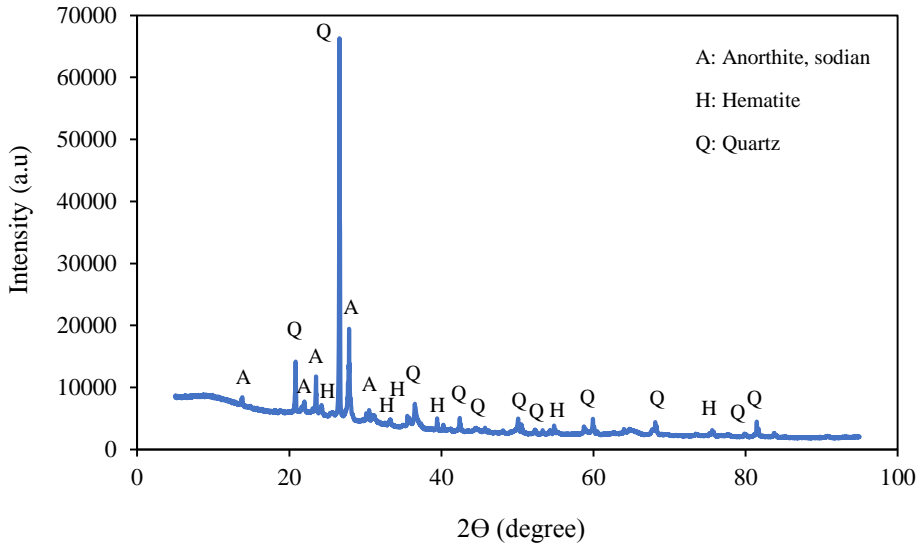
Şekil 4.101. Çimentonun X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi

Çalışmada kullanılan kırma kum agregasının XRD modelinde alit (C_3S), kireç ($CaOH$)₂, protoenstatit $Mg(SiO_3)$ fazlarının yanı sıra periklaz (MgO) da tespit edilmiştir. Kırma kum agregasının XRD analizi Şekil 4.102’de verilmiştir.



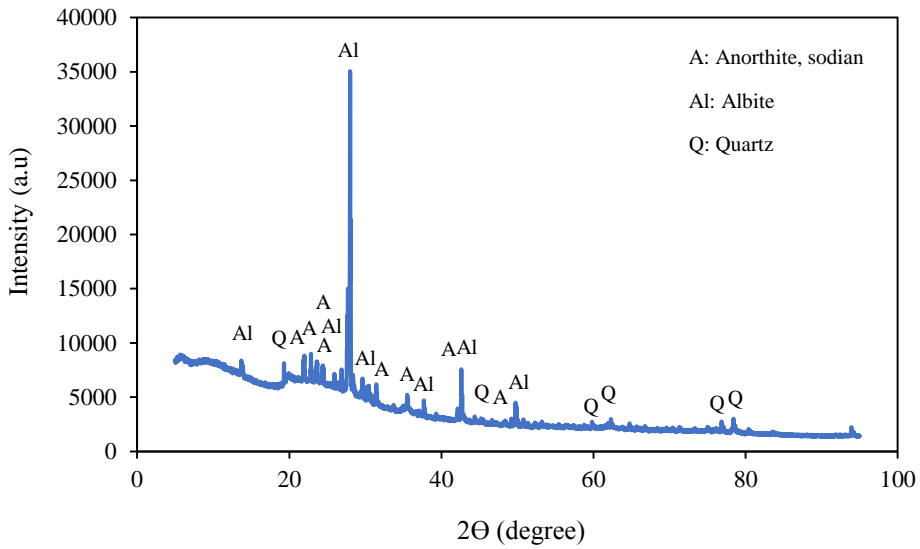
Şekil 4.102. Kırma kum agregasının X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi

Çalışmada kullanılan genişletilmiş kil agregasının XRD modelinde alit (C_3S), anortit sodian $(Ca,Na)(Al,Si)_2Si_2O_8$, hematit (Fe_2O_3) fazlarının yanı sıra kuvars (SiO_2) da tespit edilmiştir. Genleştirilmiş kil agregasının XRD analizi Şekil 4.103’de verilmiştir.



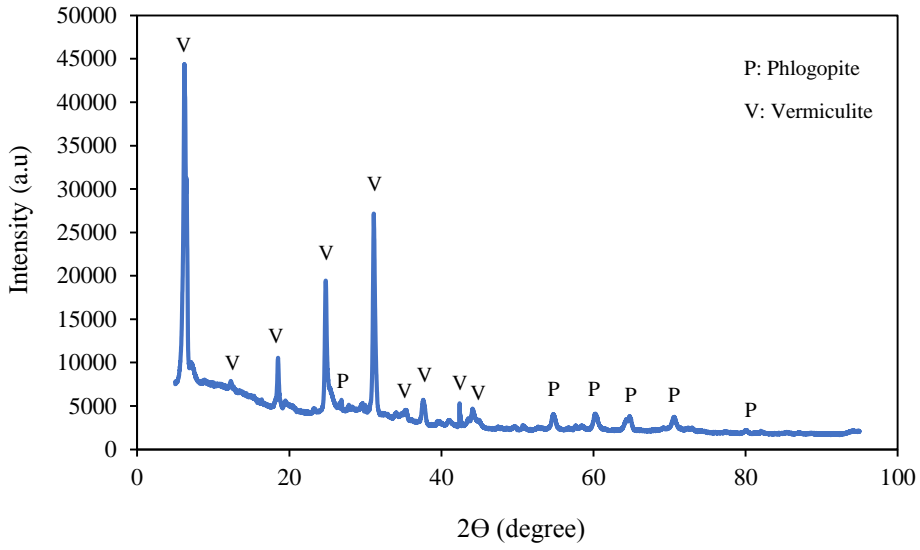
Şekil 4.103. Genleştirilmiş kil agregasının X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi

Çalışmada kullanılan pomza agregasının XRD modelinde anortit sodian ($(Ca,Na)(Al,Si)_2Si_2O_8$), albit ($NaAlSi_3O_8$), fazlarının yanı sıra kuvars (SiO_2) da tespit edilmiştir. Pomza agregasının XRD analizi Şekil 4.104’de verilmiştir.



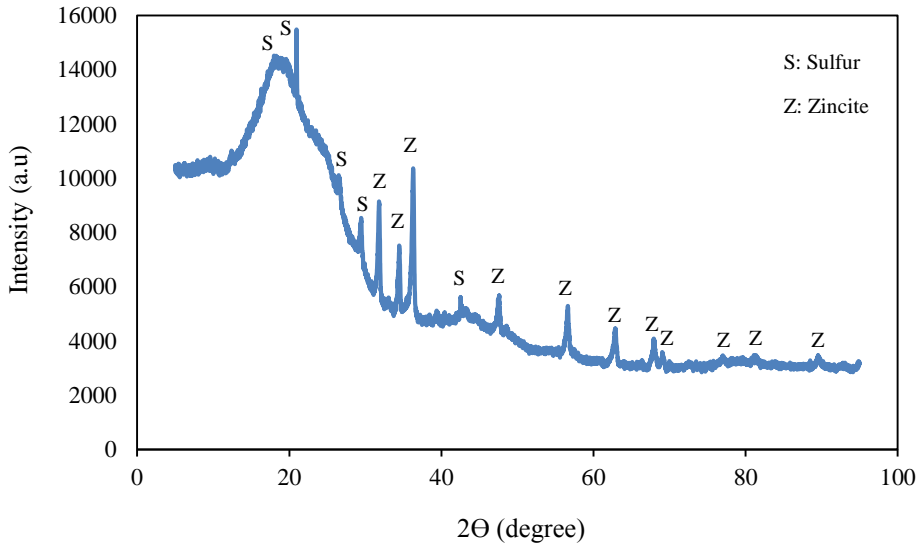
Şekil 4.104. Pomza agregasının X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi

Çalışmada kullanılan vermikülit agregasının XRD modelinde phlogopite ($KMg_3AlSi_3O_{10}(F,OH)_2$) fazının yanı sıra vermiculite ($((Mg,Fe^{2+},Fe^{3+})_3[(Al,Si)_4O_{10}](OH)_2 \cdot 4H_2O)$) de tespit edilmiştir. Genleştirilmiş vermikülit agregasının XRD analizi Şekil 4.105’de verilmiştir.



Şekil 4.105. Genleştirilmiş vermikülit agregasının X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi

Çalışmada kullanılan kauçuk atığı agregasının XRD modelinde kükürt (S) fazının yanı sıra çinko (Zn) da tespit edilmiştir. Kauçuk atığı agregasının XRD analizi Şekil 4.106'da verilmiştir.



Şekil 4.106. Kauçuk atığı agregasının X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi

Çalışmada kullanılan kauçuk atığı agregasının XRD modelinde kükürt (S) fazının yanı sıra çinko (Zn) da tespit edilmiştir.

5. TARTIŞMA

Handisycle (1967) yaptığı bir çalışmada beton yapı elemanları ses yalıtım açısından yeterli düzeyde olmadığını ve betonun sert yapıya sahip bir malzeme olmasından kaynaklı darbe sesini büyük bir oranda ilettiğini ifade etmiştir. Bu sebeple ses yalıtımı ile ilgili problemler için çeşitli önlemler alınması gereklidir. Diğer yapı malzemelerinde olduğu gibi beton da kendi ağırlığı oranında ses yalıtımı sağlamaktadır. Betonun birim hacim ağırlığı arttıkça yoğunluğu da artmaktadır ve buna bağlı olarak ses geçirimsizliği azalmaktadır. Ancak betona sıva benzeri bir bitiş malzemesi eklenmesiyle, ağırlığının bir miktar arttırılmasından daha iyi yalıtım sağladığı ifade edilmiştir.

Betonun birim hacim ağırlığı arttıkça, sesi yansıtması da artmaktadır. Betonun 500 Hz için ses yutum katsayı değeri 0.02, çimento ve kireç ile yapılan harçta 0.02 alçı ile yapılan harçta ise 0.03 olmaktadır (Eriç, 1994).

Bir yüzey sesin %85'ini yansıtması demek o yüzeyin ses yutum katsayısının $\alpha = 0.15$ olması demektir. Bu katsayı değeri malzemelerin iç yapısına bağlı olarak değişkenlik gösterir (Eriç, 1994). Ses yutum özelliği frekansa da bağlı olarak değişmektedir. Gözenekli olan malzemelerde, frekansın yükselmesi ses yutum katsayı değerinin de artmasına yol açar. Sesin absorblanması sadece yansıyan sesi azaltmaktadır, sesin bir yapı elemanından geçmesini azaltmamaktadır. Bu durumda yansımanın az olabilmesi için, ses yutum katsayısının büyük değer alması gerekir. Yansıma değerinin fazla çıkması yankıya yol açmaktadır ve bu durumun işitme koşullarını bozduğu görüşmüştür (Onaran 1999).

Gözenekli nano yapılarda, gözeneklilik artışının ısı iletim katsayısını azaltmaktadır (Lysenko ve Volz, 2000).

Gözenekli malzemelerde ses enerjisi gözenek içinde hareket ederken ses dalgaları hava ile sürtünür ve sürtünme sonucu ısı açığa çıkar. Gözenekli malzemelerin yapısında %90 oranında hava bulunmaktadır. Ses enerjisi bu hava içerisine girer ve orada yutulur. Özetle; gözenekli malzemelerde ses enerjisi ısı enerjisine dönüşerek absorblanır. Ses dalgaları düşük frekanslarda ise malzeme içine giremeyen gözeneklerin sert duvarlarından yansımaya uğrayabilmektedir. (Seddeq, 2009; Zent ve Long, 2007). Sert bir yüzeye sahip olan malzemeler sesi daha az yutarak yansıtılmaktadır (teknikakustik.net, 2017).

Emilen ses enerjisinin ortamdaki sesin enerjisine oranı ses yutum katsayısı (α) olarak adlandırılan (Gao vd., 2016; Del Sorbo vd., 2019), uygulanan frekansa bağlı olarak 0 ile 1

arasında değişkenlik gösteren bir değerdir. Bu değer 1'e ne kadar yakınsa o kadar iyi ses yutumu sağlamaktadır (Cox ve D'Antonio, 2017). Bir malzemenin ses yutumunun etkinliğini değerlendirmek açısından 0.5 kritik bir değerdir (Liu ve Hu, 2010). Fakat Liu ve Zuo (2019)'ya göre ses yutum katsayısı 0.2 olan bir malzeme ses yutum malzemesi olarak değerlendirilebilmektedir. Genel olarak, absorpsiyon katsayıları 0.15'den daha düşük olan malzemeler yansıtıcı kabul edilirken ses absorpsiyon katsayıları 0.4'den büyük olan malzemeler sesi yutan malzemeler olarak kabul edilmektedir.

Gözenekli ses yutum materyallerinin ses yutum katsayı değerleri ile ilgili çalışmalar incelendiğinde ortaya çıkan genel kanaate göre; düşük frekanslarda ses yutum değerleri oldukça düşük iken orta ve yüksek frekanslarda daha iyi ses yutum özelliğine sahiptirler.

Malzeme yüzeyindeki gözenek tipi, büyüklüğü ve sayısı, bükümlülük, hava akış direnci ve kalınlık akustik performansı etkileyen önemli parametrelerdir (Seddeq, 2009; Zent ve Long, 2007). Gözenek miktarının, köpük betonun birim ağırlığı azaldıkça arttığı gözlenmiştir. Birim ağırlık azaldıkça gözenekler arasındaki mesafe azaldığından daha büyük gözenekler olduğu ifade edilmiştir (Hilal, vd.,2015; Wei, vd., 2013).

Gözeneklilik yapısını şekillendiren değişkenlerin kontrol edilebildiği akustik modelleme çalışmalarında, malzemenin ses yutum özelliklerinin belirlenmesinde açık gözeneklilik parametresinin tek başına belirleyici bir özellik olmadığı, gözenek boyutu ve yapısal karakteristiklerin de malzemenin ses yutuculuğunu etkilediği anlaşılmaktadır (Meriç vd., 2014). Açık hücreli köpük, duvarlardaki oluşan delikleri nedeniyle kapalı hücre malzemelerine kıyasla daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Açık hücreli köpükler, kapalı hücreli malzemelerden daha iyi ses absorpsiyona sahip olduğu gorlmştir. Kapalı hücrelerin duvarlarında delik bulunmadığından içindeki gazların kaçışına izin vermediği için basınç dayanımları yüksek ancak ses yutum katsayıları açık hücreli köpüklere daha düşük çıkmaktadır (El Khodor, 2020).

Karışımlarda agrega olarak atık kauçuk kullanmanın genel anlamda açık gözeneklilik oranını yükselttiği ifade edilmiştir (Lysen Ko ve Volz, 2000).

Kullanılan lifin inceliği, geometrisi, enine kesiti ve içeriği de akustik özelliği etkileyen faktörlerdir. İnce ve farklı enine kesitlerdeki liflerden üretilen malzemelerin birim ağırlığında daha fazla lif olduğundan ve yüzey alanı arttığından ses yutum katsayısı da

artmaktadır (Tascan ve Vaughn, 2008). Yapılarda ince liflerin kullanıldığında yoğunluğun artması ile paralel olarak lifler birbirine karışacağından sesin geçişi de engellemiş olacaktır (Shahani vd., 2013; Lee ve Joo,2004; Tascan vd., 2011; Ballagh, 1996).

Çok ince agreganın kullanılmasının ses yutum katsayısını olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Dere kumu ve pomza agrega ile hazırlanan karışımlarda, polipropilen lif, keten lif takviyesinin ve agrega yerine kırıntı kauçuk kullanılması düşük frekanslardaki ses yutum katsayısını arttırdığı ve hafif agrega kullanılması ile NRC değerinin artış gösterdiği tespit edilmiştir. Keten lif takviyesinin NRC değerini ve genel anlamda açık gözeneklilik oranını da arttırdığı görülmüştür. Keten lif takviyesinin eğilme dayanımı üzerinde dikkate değer bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Son olarak keten lif katkısının eğilme dayanımını olumsuz etkileyebildiği görülmüştür. (Bozkurt, 2019)

Gözeneklerin oluşturduğu kanalların malzeme içinde ne kadar kıvrımlı bir yol izlediğini tanımlayan bir özellik olan bükümlülük (tortuosity) değeri arttığında, maksimum ses yutum katsayısı değerinin arttığı ve maksimum ses emilimin gözlendiği frekansın da daha yüksek frekanslara doğru ötelendiği belirtilmektedir, (Knapen vd., 2003).

Malzeme kalınlığı arttıkça ses yutum katsayısı da artmaktadır (Arenas vd., 2016). Bunun yanı sıra çok düşük yoğunlukta ses yutum katsayısı düşük olacağı gibi yoğunluk arttıkça da ses malzemedan geçemeyeceği için yansıma oranı artacaktır (Küçük ve Korkmaz, 2012).

Malzeme kalınlığı azaldıkça düşük frekanslardaki ses yutum katsayısı etkinliğinin de genel anlamda azaldığı görülmüştür. Ses emiliminin fazla olduğu pik noktalarda birbirine yakın olsalar da, maksimum emilimin gözlendiği frekans değerleri farklılaşmaktadır. Bu sonuçlar doğrultusunda, farklı kalınlıktaki benzer içeriğe sahip numunelerin farklı emilim karakteri sergilediği anlaşılmaktadır (Arenas vd., 2016; Kim ve Lee, 2010; Bartolini vd., 2010; Neithlah, 2004).

Malzeme karakteristiği de ses yutumun da önemli bir parametredir. Gözenekli esnek yapılar çok az sayıda araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Beranek 1947'de rijit levha ve esnek ince tabakalar için empedans ve yutum katsayısını çalışırken çoğu lifli malzemenin yapısının esnek olduğuna dikkat çekmiştir. Sert malzemelerin sesi daha az yuttuğu ve yansıttığı ifade edilmiştir (teknikakustik.net, 2017).

Yapılan deneysel çalışmalar ve taramalı elektron incelemeleri sonucunda malzemelerin ses yutum katsayısının gözenek boyutu ve artışı ile arttığı, birim ağırlığın artışına bağlı olarak genel anlamda azaldığı keten lif takviyesi ile ve özellikle köpük ikame edilerek elde edilen köpük beton numunelerde ses yutum katsayısı değerinin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Birim ağırlık azaldıkça gözenekler arasındaki mesafe azalarak gözenek boyutları büyümüş ve gözenekler birbirine yaklaşmıştır. Taramalı elektron mikroskobu analizlerine göre birbirine yaklaşarak birleşen gözenekler açık hücreli gözenekleri oluşturmuştur. Açık hücreli gözeneklerin duvarlarında oluşan delikler nedeni ile içindeki gazların kaçışına izin verdiği için dayanım değerleri düşmüştür. Ancak açık hücreli gözenekler ve içindeki gazların kaçabilmesi nedeni ile daha iyi bir ses absorpsiyon performansı görülmüştür. Ses yutum katsayısı artışında birim ağırlığın düşmesi ve açık gözenekliliğin artışının tek başına yeterli olmadığı gözeneklerin oluşturduğu kanalların (bükümlülük) ve malzeme karakteristiğinin de etkili olduğu görülmüştür. Yapılan elastisite modül deneylerinden elde edilen verilere göre malzeme karakteristiğinin de ses yutumunu etkileyen önemli bir parametre olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçların literatürdeki diğer çalışmalarla uyumlu olduğu ve paralellik gösterdiği belirlenmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu doktora çalışmasında kırma kum, genleştirilmiş kil, pomza, genleştirilmiş kil ve atık kauçuk olmak üzere beş farklı agrega tipi ile normal harç ve köpük beton olarak üretilen çimento esaslı kompozitlerin ısı özellikleri ve akustik performansları araştırılmıştır.

Dünya nüfusundaki artışa paralel olarak enerji tüketimi artarken mevcut enerji kaynakları hızla tükenmektedir. Enerjinin akılcı kullanılması ve tasarruf edilmesi günümüz problemidir. Ülkemiz enerjide dışa bağı bir ülke olduğundan, enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasının önemi oldukça büyüktür. Ayrıca nüfusun artışı ile birlikte doğal ve yapay atık oluşumu da hız kazanmıştır. Atıkların doğada uzun süre ayrışmaması hem çevresel hem de ekonomik yönden büyük bir tehdit oluşturmaktadır.

Sürdürülebilir ekolojik bir yaşam için alternatif yalıtım malzemelerinin üretimine gereken önem verilmelidir. Atık kauçuk malzemenin yalıtım malzemesi olarak değerlendirilmesi ile hem ekolojik soruna çevresel bir çözüm sağlanacak hem de enerji tasarrufu ile dışa bağımlılık azaltılarak ülke ekonomisine ciddi bir katkı sağlanmış olacaktır. Yapılan çalışma ile son yıllarda ülkemizdeki atık problemine çözüm sunan yenilikçi, günümüz sorunlarına ışık tutan özgün, yeni çalışmalara ışık tutacak nitelikte, literatüre yön verecek bir lisansüstü çalışması olarak değerlendirilebilir.

Çalışmadan elde edilen fiziksel ve mekanik özellikler farklı başlıklar altında özet olarak aşağıda verilmiştir.

Fiziksel Özellikler

Bu çalışmada keten lifin farklı agregalarla üretilmiş harçların fiziksel özelliklerine etkisi ile ilgili sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Normal harç karışımlarında en düşük kuru birim ağırlık değeri genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 714 kg/m^3 , en yüksek kuru birim ağırlık değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 2179 kg/m^3 olarak elde edilmiştir.
- Köpük beton karışımlarında en düşük kuru birim ağırlık değeri genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 562 kg/m^3 , en yüksek kuru birim

ağırlık değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 1491 kg/m^3 olarak elde edilmiştir.

- Normal harçların keten lif takviyesi ile kuru birim hacim ağırlıktaki en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 10.97, en az azalma ise geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 4.29 olarak elde edilmiştir.
- Köpük betonların keten lif takviyesi ile kuru birim hacim ağırlıktaki en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 10.80, en az azalma ise geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 3.93 olarak elde edilmiştir.
- Normal harç karışımlarında en yüksek su emme oranı geliştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde % 73.95, en düşük su emme oranı ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde % 5.65 olarak elde edilmiştir.
- Köpük beton karışımlarında en yüksek su emme oranı geliştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde % 98.14, en düşük su emme oranı ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde % 19.77 olarak elde edilmiştir.
- Normal harçların keten lif takviyesi ile su emme oranındaki en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 59.47, en az azalma ise geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 11.15 olarak elde edilmiştir.
- Köpük betonların keten lif takviyesi ile su emme oranındaki en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 56.78, en az azalma ise geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 8.20 olarak elde edilmiştir.
- Normal harçların en yüksek porozite değeri geliştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde % 49.61, en düşük porozite değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde % 12.27 olarak elde edilmiştir.
- Köpük betonların en yüksek porozite değeri geliştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde % 55.18, en düşük porozite değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde % 18.55 olarak elde edilmiştir.

- Normal harçların keten lif takviyesi ile porozitede en fazla artma kırma kum agregalı numunelerde % 42.46, en az artma ise geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 6.41 olarak elde edilmiştir.
- Köpük betonların keten lif takviyesi ile porozitede en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 41.67, en az azalma ise geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 4 olarak elde edilmiştir.
- Normal harçların en düşük ultrases geçiş hızı değeri geliştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.90 km/s, en yüksek ultrases geçiş hızı değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 4.07 km/s olarak elde edilmiştir.
- Köpük betonların en düşük ultrases geçiş hızı değeri geliştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.72 km/s, en yüksek ultrases geçiş hızı değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 2.77 km/s olarak elde edilmiştir.
- Normal harçların keten lif takviyesi ile ultrases geçiş hızında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 6.52, en az azalma ise geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 2.17 olarak elde edilmiştir.
- Köpük betonların keten lif takviyesi ile ultrases geçiş hızında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 5.78, en az azalma ise geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 1.35 olarak elde edilmiştir.
- Normal harçların en düşük ısı iletkenlik katsayı değeri geliştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.334 W/m.K, en yüksek ısı iletkenlik katsayı değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 2.004 W/m.K olarak elde edilmiştir.
- Köpük betonların en düşük ısı iletkenlik katsayı değeri geliştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.198 W/m.K, en yüksek ısı iletkenlik katsayı değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 0.828 W/m.K olarak elde edilmiştir.
- Normal harçların keten lif takviyesi ile ısı iletkenlik katsayısında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 28.06, en az azalma ise geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 3.75 olarak elde edilmiştir.

- Köpük betonların keten lif takviyesi ile ısı iletkenlik katsayısında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 18.46, en az azalma ise genleştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 2.94 olarak elde edilmiştir.
- Keten lif takviyesi ile normal harçların ve köpük betonların kuru birim ağırlıklarında, ultrases geçiş hızlarında ve ısı iletkenliklerinde azalma gözlenirken, buna karşılık boşluk oranı ve su emme değerlerinde artış elde edilmiştir.
- Birim ağırlığı azalan harçların buna paralel olarak boşluk-gözenek miktarının artması ile porozite ve su emme değerleri de daha yüksek çıkmıştır. Diğer taraftan bu durum ısı ve ses yalıtımı bakımından daha verimli sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.
- Keten lif takviyesi ile kuru birim ağırlık, su emme, porozite, ultrases geçiş hızı ve ısı iletkenlikte en fazla değişimin kırma kum agregalı olan numunelerde olduğu tespit edilmiştir.
- Keten lif takviyesi ile kuru birim ağırlık, su emme, porozite ve ısı iletkenlikte en az değişimin vermikülit agregalı olan numunelerde olduğu tespit edilmiştir.
- Keten lif içeren vermikülit agregalı harçların ısı iletkenlik değerleri kırma kum agregalı harçlara kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Keten lif içeren vermikülit agregalı harçların ısı iletkenlik değerleri kırma kum agregalı harçlara kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Mekanik Özellikler

Bu çalışmada keten lifin farklı agregalarla üretilmiş harçların mekanik özelliklerine etkisi ile ilgili sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Normal harçların en düşük eğilme dayanım değeri genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 1.66 MPa, en yüksek eğilme dayanım değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 10.60 MPa olarak elde edilmiştir.
- Köpük betonların en düşük eğilme dayanım değeri genleştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 1.06 MPa, en yüksek eğilme dayanım değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 3.24 MPa olarak elde edilmiştir.

- Normal harçların keten lif takviyesi ile eğilme dayanımında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 13.87, en az azalma ise geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 1.78 olarak elde edilmiştir.
- Köpük betonların keten lif takviyesi ile eğilme dayanımında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 13.58, en az azalma ise geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 0.93 olarak elde edilmiştir.
- Normal harçların en düşük basınç dayanım değeri geliştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 2.32 MPa, en yüksek basınç dayanım değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 49.91 MPa olarak elde edilmiştir.
- Köpük betonların en düşük basınç dayanım değeri geliştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 1.34 MPa, en yüksek basınç dayanım değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 21.17 MPa olarak elde edilmiştir.
- Normal harçların keten lif takviyesi ile basınç dayanımında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 11.46, en az azalma ise geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 2.52 olarak elde edilmiştir.
- Köpük betonların keten lif takviyesi ile basınç dayanımında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 10.53, en az azalma ise geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 1.47 olarak elde edilmiştir.
- Normal harçların en düşük yarma dayanım değeri geliştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.87 MPa, en yüksek yarma dayanım değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 5.32 MPa olarak elde edilmiştir.
- Köpük betonların en düşük yarma dayanım değeri geliştirilmiş vermikülit agregalı keten lif takviyeli numunelerde 0.73 MPa, en yüksek yarma dayanım değeri ise kırma kum agregalı lif içermeyen referans numunelerde 2.05 MPa olarak elde edilmiştir.
- Normal harçların keten lif takviyesi ile yarmada çekme dayanımında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 9.02, en az azalma ise geliştirilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 3.33 olarak elde edilmiştir.

- Köpük betonların keten lif takviyesi ile yarmada çekme dayanımında en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 7.32, en az azalma ise genişletilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 2.67 olarak elde edilmiştir.
- Normal harçların keten lif takviyesi ile elastisite modülü en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 30.93, en az azalma ise genişletilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 7.41 olarak elde edilmiştir.
- Köpük betonların keten lif takviyesi ile elastisite modülü en fazla azalma kırma kum agregalı numunelerde % 24.55, en az azalma ise genişletilmiş vermikülit agregalı numunelerde % 6.67 olarak elde edilmiştir.
- Harçların birim ağırlıklarının azalmasına paralel olarak eğilme ve basınç dayanımlarında azalmalar olduğu gözlemlenmiştir.
- Keten lif takviyesi ile eğilme, basınç ve yarmada çekme dayanımında en fazla değişimin kırma kum agregalı olan numunelerde olduğu tespit edilmiştir.
- Keten lif takviyesi ile eğilme, basınç ve yarmada çekme dayanımında en az değişimin vermikülit agregalı olan numunelerde olduğu tespit edilmiştir.
- Keten lif içeren genişletilmiş vermikülit agregalı harçların eğilme dayanımı, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı değerlerinin diğer agregalara kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Lif içermeyen kırma kum agregalı referans harçların eğilme dayanımı, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı değerlerinin diğer agregalara kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, yapılan deneysel çalışmalar ve taramalı elektron incelemeler ile malzemelerin ısı yalıtım ve ses yutum katsayısının gözenek boyutu ve artışı ile arttığı, birim ağırlığa bağlı olarak genel anlamda azaldığı keten lif takviyesi ile ve özellikle köpük ikame edilerek elde edilen köpük beton numunelerde ses yutum katsayısı değerinin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Taramalı elektron mikroskopu analizlerine göre birim ağırlık azaldıkça gözenekler arasındaki mesafe azalarak gözenek boyutları büyümüş ve gözenekler birbirine yaklaşmıştır. Birbirine yaklaşarak birleşen gözenekler açık hücreli gözenekleri oluşturmuştur. Açık hücreli gözeneklerin duvarlarında oluşan delikler nedeni ile içindeki

gazların kaçışına izin verdiği için dayanım deęerleri dūřmūřtur. Ancak açık hūcreli gōzenekler ve içindeki gazların kaçabilmesi nedeni ile daha iyi bir ses absorpsiyon performansı gōrūlmūřtur.

Ūretilen ısı ve ses özellikleri iyi olan imento esaslı malzeme ile yalıtım malzemesi sektōrüne katkı sağlanması hedefi gerçekleştirilmiştir. Atık malzemelerin yapı sektōründe değerlendirilmesi ūlkemize Ar-Ge ve ekonomik anlamda bŷyŷk katkılar sağlamaktadır. Bu araştırma kapsamında yapılan çalışmalar sonraki çalışmalara ışık tutacak ve yeni fikirlerin ortaya çıkması beklenmektedir. Keten lifin farklı lif boyutları ve içerikleri için fiziksel ve mekanik özellikleri incelenebilir ve maksimum ses ve ısı özellikleri için optimum lif içeriği ve boyutları belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- ACI 213R-03. (2003). "Guide for structural lightweight-aggregate concrete. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1: Materials and General Properties of Concrete". *American Concrete Institute*, Michigan: Farmington Hills,
- Acun, S. (2000). *Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Dizayn Parametresi Olarak Lifsel Katkıların İrdelenmesi*, (yüksek lisans tezi), İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- Addleson, L. (1972). *Materials For Building*, Cilt 1, London: Iliffe.
- Akyıldız, A. (2012). *Beton Üretiminde Bor Atıklarının Pozzolan Materyal Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, (doktora tezi), Namık Kemal Üniversitesi.
- Aldrige, D. (2005). "Introduction to Foamed Concrete: What, Why, How? Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction". *University of Dundee*, Scotland, July 5, 1–14.
- Al-Khaiat, H., Haque, M.N. (1998). "Effect of Initial Curing on Early Strength and Physical Properties of Lightweight Concrete". *Cement And Concrete Research*, No. 28, 859-866.
- Altun Ş. (2010). *Türkiye'deki Tekstil ve Hazır Giyim Atıklarının ve Geri Kazanım İmkanlarının Genel Profiline Çıkarılması*, TÜBİTAK Rapor No: 109Y008, 55s.
- Anonim. (2020 b). <https://www.flokser.com.tr/kimya/flokser-kimya-rijit-poliuretansistemler/>
- Arenas, C., Vilches, L.F., Leiva, C., Alonso-Fariñas, B. & Rodríguez-Galán, M. (2016). "Recycling Ceramic Industry Wastes in Sound Absorbing Materials". *Materiales de Construcción*, Vol 66, No 324 (2016), e106, ISSN-L: 0465-2746, <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2016.10615>
- Asdrubali F, Horoshenkov K.V. (2002). "The Acoustic Properties of Expanded Clay Granulates". *Building Acoustics*, 9: 85–98.
- ASTM C423-09a. (2009). "Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by The Reverberation Room Method". *American Society for Testing and Materials*.

- Balo, F. (2017). “Ekolojik Yalıtım Malzemesi Üretimine Analitik Hiyerarşi Prosesi ile Değerlendirilmesi”. *Politeknik Dergisi*, 20:733-742.
- Barnes, R.A. (2009). “Excellence in Concrete Construction Through Innovation, Foamed Concrete: Application and Specification”. *The Concrete Society*, UK, 3-9.
- Bartolini, R., Filippozzi, S., Princi, E., Schenone, C. & Vicini, S. (2010). “Acoustic and Mechanical Properties of Expanded Clay Granulates Consolidated by Epoxy Resin”. *Applied*
- Beranek, L. L. & Ver, I. L. (2006). “Noise and Vibration Control Engineering Principles and Applications”. *John Wiley&Sons, Inc.*, ISBN-13: 978- 0471-44942-3 ve ISBN-10: 0471-44942-3.
- Bilova, M. & Lumntzer E. (2011). “Acoustical Parameters of Porous Materials and Their Measurement”. *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of engineering*, Fascicule 4 (October-December), ISSN 2067-3809.
- Bindiganavile, V. Ve Hoseini, M. (2008). “Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete”. *Foamed Concrete*, University of Alberta, Canada, pp. 231-255.
- Bing, C., Zhen, W., Ning, L. (2011). “Experimental Research on Properties of Highstrength”. *Foamed Concrete*, J. Mater. Civ. Eng. 24 (1), 113–118.
- Bos, H. (2004), “The Potential of Flax Fibres as Reinforcement for Composite Materials, Adhesion in Flax Fibre Reinforced Composites”. *University Press Facilities*, Eindhoven, the Netherlands.
- Bozkurt, T. S. (2019). *Tarihi Mekânlarda Kullanılan Sıva Yüzey Kaplamalarının Ses Yutma Katsayısının İncelenmesi ve Geliştirilmesi*, (doktora tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi. İstanbul.
- Brady, K.C., Jones, M.R.ve Watts, G.R. (2001). “Specification for Foamed Concrete”. *Application guide AG39*: TRL Limited,.

- Briga-Sa A., Nascimento D., Teixeira N., Pinto J., Caldeira F., Varum H., Paiva A. (2013). "Textile Waste as an Alternative Thermal Insulation Building Material Solution". *Construction and Building Materials*, 38, 155-160.
- Castrodale, R.W. (2006). "Lightweight High Performance Concrete for Bridge Decks". *Presentation in Virginia Concrete Conference*.
- Chandra, S. & Berntsson L. (2002) "Lightweight Aggregate Concrete". New York, USA: Noyes Publications.
- Chawla K.K. (1998). *Fibrous Materials*. Cambridge University Pres, Cambridge.
- Chung, S-Y. ve ark. (2017). "Pore Characteristics and Their Effects on the Material Properties of Foamed Concrete Evaluated Using Micro-CT Images and Numerical Approaches". *Applied Sciences*, 7(6), 550.
- Clay Science, 48(3), April 2010, 460-465, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.02.007>.
- Cong, M., Bing, C. (2015). "Properties of a Foamed Concrete with Soil as Filler". *Construction and Building Materials*, 76, 61-69.
- Cox T. J. & D'Antonio, P. (2005). "Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory Design and Application". *Spon Pres; Taylor and Francis*, ISBN 0-203-49299-4.
- Cyr M., (2004). "Hybrid-Fiber Reinforcement in Cementitious Composites. Center for Advanced Cement". *Based Materials*. Northwestern University Evanston, IL USA.
- Çivici, F., Eren, İ., (2004). "Çelik Lifli Betonun Direkt Çekme Dayanımının Ölçülmesi Üzerine Deneysel Bir Çalışma". *TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 434 - 2004/6.
- Dakman, M. H. (2017). *Köpük Betonda Yüksek Sıcaklık Etkisi*, (yüksek lisans tezi), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi. Eskişehir.
- D'Alessandro, F., Pispolo, G. (2005). "Sound Absorption Properties of Sustainable Fibrous Materials in an Enhanced Reverberation Room". *International Congress on Noise Control Engineering*, Rio de Janeiro, 2359-2368.

- Del Coz Díaz J.J., Álvarez Rabanal F.P., García Nieto P.J., Domínguez Hernández J., Rodríguez Soria B., Pérez-Bella J.M. (2013). “Hygrothermal Properties of Lightweight Concrete: Experiments and Numerical Fitting Study”. *Construction and Building Materials*, 40: 543–55.
- Demir, İ. (2010). *İnşaat Yıkıntı Atıklarının Beton Üretiminde Kullanımı ve Beton Özelliklerine Etkisi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, 03200, Afyonkarahisar.
- Demirel, B. ve Yazıcıoğlu S. (2010). “Uçucu Külün Karbon Fiber Takviyeli Hafif Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi”. *Selçuk Üniversitesi Teknik Dergisi*. 9: 24-40.
- Demirel, C., Toklu, K., Şimşek O. (2015). “Geri Dönüşüm Agregasının Beton Üretiminde Kullanılabilirliği ve Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirilmesi”. *2. International Sustainable Buildings Symposium*, Ankara.
- Devecioğlu, A. G., Biçer, Y. (2012). “Genleştirilmiş Kil Agregalı Betonların Isıl Özelliklerinin İncelenmesi”. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, 3(2), 75-81, Aralık.
- Domone, P. And Illston, J. (2010). “Construction Materials Their Nature and Behaviour”. *Fifth Edition*, CRC Press.
- Ekincioglu, Ö. (2003). *Karma Lif içeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı- Bir Optimum Tasarım*, (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi. İstanbul.
- El Hajja N. Mboumba-Mamboundou B., Dheilily R-M., Aboura Z., Benzeggagh M., Queneudec M. (2011). “Development of Thermal Insulating and Sound Absorbing Agro-Sourced Materials From Auto Linked Flax-Tows”. *Industrial Crops and Products*, 34: 921–928.
- El Khodor, M. (2020). *Termoplastik Köpüklerin Üretim Parametrelerinin Ses Sönümleme Performansına Etkisi*, (yüksek lisans tezi), Bursa Uludağ Üniversitesi. Bursa.
- EN 12354-1. (2000). “Building Acoustics – Estimation of Acoustic Performance of Buildings From the Performance of Elements – Part 1: Airborne Sound Insulation Between Rooms”. *European Committee for Standardization*.

- EN 12354-2. (2000). “Building Acoustics – Estimation of Acoustic Performance of Buildings From the Performance of Elements – Part 2: Impact Sound Insulation Between Rooms”, *European Committee for Standardization*.
- Erdoğan, T. (2003). *Beton Metu Press*. Ankara.
- Eriç, M. (1994). *Yapı Fiziği ve Malzemesi*. İstanbul: Literatür Yayınları.
- Ersoy, H. Y. (2001). *Kompozit Malzeme*. İstanbul: Literatür Yayınları.
- Expanded Shale, Clay & Slate Institute (ESCSI). (2007). “Chapter 9 High-Performance Lightweight Concrete”. (<http://www.escsi.org>).
- Field reference manual. (2005). “Specification for Structural Concrete ACI 301-05 with Selected ACI References, American Concrete Institute”. *Farmington Hills, Michigan*.
- Fiorato, A.E. (1981). “Inspection Guide for Reinforced Concrete Vessels”. *Final Report*, Vol.2, No. CG-M-11-81, Portland Cement Association, Commentary, U.S. Department of Transportation.
- Gaitero, J., Campillo, I., Mondal, P. ve Shah, S. (2010). “Small Changes Can Make a Great Difference”. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2141, 1-5.
- Gandoman, M. & Kokabi, M. (2015). “Sound Barrier Properties of Sustainable Waste Rubber/Geopolymer Concretes.” *Iranian Polymer Journal*, February 2015, 24(2), 105–112, Springer Berlin Heidelberg, <https://doi.org/10.1007/s13726-014-0304-1>.
- Girgin, Z.C. (2017). “Hafif Agregalı Yüksek Performanslı Beton ve Prefabrikasyon Uygulamaları”. *Beton Prefabrikasyon*, (121-122), 5-12.
- Glé P., Gourdon E., Arnaud L. (2011). “Acoustical Properties of Materials Made of Vegetable Particles with Several Scales of Porosity”. *Applied Acoustics*, 72: 249–259.

- Granalo, J. (1995). "Chromafusion Architectural Decorative Glass Products Expand Desing Opportunities for Laminated Glass". *Arc. Laminated Glazing News, Butacite, Du Pond*, No.2, 2-3.
- Gündüz, L. ve Şapcı, N. (2005). Türkiye Pomza Madenciliği, Endüstrisi Ve Türkiye Açısından Önemi (Gelişen Yeni Bir Sektör). *19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, IMCET2005, İzmir.
- Gündüz, L., Bekar, M., Şapcı, N. (2006). Genleşen Killerin Doğal Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi. *Mühendislik Jeolojisinde Çağdaş Uygulamalar Sempozyumu*, Denizli, 465-476.
- Gündüz, L., Rota, A., Hüseyin, A. (2001). Türkiye ve Dünyadaki Pomza Oluşumlarının Malzeme Karakteristiği Analizi. *4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 175-188, 19 Ekim, İzmir.
- Gürdal, E., Tanaçan, L., Toydemir, N. (2000). *Yapı Elemanı Tasarımında Malzeme*. İstanbul: Literatür Yayınları.
- Hamad Mohammed, J., & Hamad, A. J. (2014). Materials, Properties and Application Review of Lightweight Concrete. *Revista Tecnica de La Facultad de Ingenieria Universidad Del Zulia*, 37: 10–15.
- Handisycle, C. C. (1967). Building Materials Science and Practice, London. *Architectural Press*.
- Hilal, A.A., Thom, N.H., Dawson, A.R. (2015-a). "On Entrained Pore Size Distribution of Foamed Concrete". *Construction and Building Materials*, 75, 227-233.
- Hilal, A.A., Thom, N.H., Dawson, A.R. (2015-b). "On Void Structure and Strength of Foamed Concrete Made without/with Additives". *Construction and Building Materials*, 85, 157-164.
- Horoshenkov, K. V. & Swift M. J. (2001). "The Effect of Consolidation on he Acoustic Properties of Loose Granulates". *Applied. Acoustics*, Volume 62, Issue 6, June 2001, Pages 665-690, [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)00069-4](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00069-4).

http://www.cematrix.com/_resources/case-studies/cs-central-road.pdf, Aġustos (2019).

<https://www.ekaconcrete.com/services/foam-concrete/>, Aġustos (2019).

<https://www.teknikakustik.net/renkli-piramit-sunger.html>, E.T. 01.02.202

Ismail, K. M., Fathi, M. S., ve Manaf, N. (2004). "Study of Lightweight Concrete Behaviour". *Universiti Teknologi Malaysia*.

ISO 10140. (2010). "Acoustics – Laboratory Measurement of Sound Insulation of Building Elements". *International Organization for Standardization*.

ISO 10534-2. (1998). "Acoustics – Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes – Part 2: Transfer-Function Method". *International Organization for Standardization*.

ISO 16283-1. (2014). "Acoustics – Field Measurement of Sound Insulation in Buildings And of Building Elements – Part 1: Airborne Sound Insulation". *International Organization for Standardization*.

ISO 16283-2. (2015). "Acoustics – Field Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements – Part 2: Impact Sound Insulation". *International Organization for Standardization*.

ISO 354. (2003). "Acoustics – Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room". *International Organization for Standardization*.

ISO 717-1. (2013). "Acoustics – Rating of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements – Part 1: Airborne Sound Insulation". *International Organization for Standardization*.

ISO 717-2. (2013). "Acoustics – Rating of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements – Part 2: Impact Sound Insulation". *International Organization for Standardization*.

ISO 9052-1. (1989). "Acoustics – Determination of Dynamic Stiffness – Part 1: Materials Used Under Floating Floors in Dwellings". *International Organization for Standardization*.

- İbrahim, H.H.W. (2014). “Compressive and Flexural Strength of Foamed Concrete Containing Polyolefin Fibers”. *Advanced Materials Research*, 9, 489-493.
- Jiang, J., ve ark. (2016). “Study on The Preparation and Properties of High-Porosity Foamed Concretes Based on Ordinary Portland Cement”. *Materials and Design* ,92, 949-959.
- Jiang, S., Xu, Y., Zhang, H., White, C. B. & Yan X. (2012). “Seven-Hole Hollow Polyester Fibers as Reinforcement in Sound Absorption Chlorinated Polyethylene Composites”. *Applied Acoustics*, 73(3), 243-247, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.09.006>.
- Jones M.R., McCarthy A., (2005-b). “Utilising Unprocessed Low-Lime Coal Fly Ash in Foamed Concrete”. *Fuel* 84 (11), 1398–1409.
- Jones, M.R., McCarthy, A. (2005-a). “Preliminary Views on the Potential of Foamed Concrete as a Structural Material”. *Mag. Concr. Res.* 57 (1), 21–31.
- Jones, M.R., McCarthy, M.J., McCarthy, A. (2003). “Moving Fly Ash Utilization in Concrete Forward: a Uk Perspective, in: Proceedings of The 2003 International Ash Utilisation Symposium”. *Centre for Applied Energy Research*, University of Kentucky, 20–22.
- Jordeva S., Tomovska E., Trajkovic D., Dimovski R., Zafirova K. (2015). “Sound Insulation Properties of Structure Designed from Apparel Cutting Waste”. *15th AUTEX World Textile Conference*. 10-12 June, Bucharest, Romania, 1-6.
- Karimipour, A., de Brito, J., & Edalati, M. (2021).” Influence of Polypropylene Fibres on the Thermal and Acoustic Behaviour of Untreated Coal Coarse Aggregates Concrete”. *Journal of Building Engineering*, 36, 102125. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102125>.
- Kauriinva E., Viljanen M., Pasila A., Kymäläinen H-R., Pehkonen A. (2001). “Bio-fiber From Field to Insulation of Building”. *Helsinki University of Technology, Laboratory of Structural Engineering and Building Physics, Publication 117*.
- Kearsley, E.P., Mostert, H.F. (2005). “The Use of Foamed Concrete in Refractories”. *Use of foamed concrete in construction*. Thomas Telford, 89–96.

- Kearsley, E.P., Wainwright, P.J. (2001-a). "Porosity and Permeability of Foamed Concrete". *Cement and Concrete Research*, 31, 805-812,
- Kearsley, E.P., Wainwright, P.J. (2001-b) "The Effect of High Fly Ash Content on the Compressive Strength of Foamed Concrete". 31, 105-112.
- Kına, C., Türk, K. (2017). "Mikromekanik Olarak Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitin (ECC) Kendiliğinden İyileşmesi". *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 22(3).
- Kırbyık E. (2012). *Ses ve Isı Yalıtımlı Ekolojik Yapı Malzemelerinin İncelenmesi ve Trakya Bölgesinde Yetiştirilen Ayçiçeği Bitkisinin Yalıtım Malzemesi Olarak Araştırılması*, (yüksek lisans tezi), Trakya Üniversitesi. Edirne.
- Kim, H. K. & Lee H. K. (2010). "Influence of Cement Flow And Aggregate Type on the Mechanical and Acoustic Characteristics of Porous Concrete". *Applied Acoustics*, 71(7), July 2010, Pages 607-615, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.02.001>.
- Knapen, E.; Lanoye, R.; Vermeir G.; Lauriks, W.; Van Gemert, D. (2003). "Acoustic Properties of Sound Absorbing, Polymer-Modified Porous Cement Mortars". *6th International Conference on Materials Science and Restoration, MSR-VI*, Aedificato Publishers, 347-358.
- Kocataşkın, F. (1991). *Betonun Dünü Bugünü Yarını*, 2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton. Kardeşler Matbaası, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 23-42.
- Koçak, Y., Alpaslan, L. (2011). "Atık Lastiklerin Çimento ve Beton Sektöründe Kullanım Potansiyelleri". *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18 May 2011, Elazığ.
- Konuk, H. (2003). *Hafif Agregalı Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı*.
- Korjenic A., Petránek V., Zach J., Hroudová J. (2011). "Development and Performance Evaluation of Natural Thermal-İnsulation Materials Composed of Renewable Resources". *Energy and Buildings*, 43: 2518–2523.

- Kumar, N.V., Arunkumar, C., Senthil, S.S., (2018). Experimental Study on Mechanical and Thermal Behavior of Foamed Concrete”. *Materials Today: Proceedings*, 5, 8753-8760.
- Kurt, G. ve Taşdemir, M. A. (2006). *Lif İçeriği Ve Su/Çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri*, (yüksek lisans tezi).
- Kuzielová, E., Pach, L., Palou, M. (2016). “Effect of Activated Foaming Agent on the Foam Concrete Properties”. *Construction and Building Materials*, 125, 998-1004.
- Kymäläinen H.R., Sjöberg A.M. (2008). “Flax and Hemp Fibres as Raw Materials for Thermal Insulations”. *Building and Environment*, 43: 1261–1269.
- Lo T. Y., Tang W. C., Cui H. Z. (2007). “The Effects of Aggregate Properties on Lightweight Concrete”. *Building and Environment*, 42, 3025–3029.
- Lysen Ko, V., Volz, S. (2000). “Porous Silicon Thermal Conductivity by Scanning Probe Microscopy”. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 182 (2): R6-R7.
- Ma, C., Chen, B. (2017). “Experimental Study on the Preparation and Properties of a Novel Foamed Concrete Based on Magnesium Phosphate Cement”. *Construction and Building Materials*, 137, 160-168.
- Maderuelo-Sanz R., Nadal-Gisbert A.V., Crespo-Amorós J.E., Barrigón Morillas J.M., Parres-García F., Juliá Sanchis E. (2016). “Influence of The Microstructure in The Acoustical Performance of Consolidated Lightweight Granular Materials”. *Acoustics Australia*, 44:149–157.
- Marolf, A., Neithalath, N., Sell E., Wegner, K., Weiss, J. & Olek J. (2004). “Influence of Aggregate Size and Gradation on the Acoustic Absorption of Enhanced Porosity Concrete”. *Aci Materials Journal*, 101(1), 82-91.
- McCormick, F.C. (1967). “Rational Proportioning of Preformed Foam Cellular Concrete”. *ACI J. Proc.* 64 (2), 104–110.

- McSaveney, L.G. (2000). "The Wellington Stadium: New Zealand's First Use of High Strength Lightweight Precast Concrete". *Proceedings 2nd Int. Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*, Oslo, Norvege
- MEB. (2011). *Atık Lastikler*, Ankara: T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Aile ve Tüketici Hizmetleri.
- Medina, F. N., Flores-Medina, D. & Hernández-Olivaresa F. (2016). "Influence Of Fibers Partially Coated with Rubber From Tire Recycling as Aggregate on the Acoustical Properties of Rubberized Concrete". *Construction and Building Materials*, Volume 129, 30 December 2016, 25-36, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.007>.
- Mehta, P. K. (1986). "Concrete: Structure", *Properties, and Materials*. Prentice- Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, p. 353-367.
- Meriç, I., Tavukçuoğlu, A. ve Çalışkan, M. (2014). "Malzemelerin Mikro Yapı Özelliklerinin Akustik Performansa Etkisi: Gözeneklilik Yapısı İle Ses Yutma Özellikleri Arasındaki İlişki, Yapı Fiziği Derneği". *1. Ulusal Yapı Fiziği ve Çevre Kontrolü Kongresi*, 13-14 Mart 2014, İstanbul: İTÜ Mimarlık Fakültesi.
- Mindess, S. and Young, J. F. (1981). *Concrete*, Prentice-Hall., Inc., New Jersey.
- Mondal, P., Shah, S., Marks, L. ve Gaitero, J. (2010). "Comparative Study of the Effects of Microsilica and Nanosilica in Concrete". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2141, 6-9.
- Mouli M., Khelafi H. (2008). "Performance Characteristics of Lightweight Aggregate Concrete Containing Natural Pozzolan". *Building and Environment*, 43, 31–36.
- Mutlu, A. (2020). *Agrega Tipinin Çimento Esaslı Kompozitlerin Radyasyon Tutuculuk Özelliğine Etkisi*, (yüksek lisans tezi), Yozgat Bozok Üniversitesi. Yozgat.
- Mydin, M.A.O. (2011). "Effective Thermal Conductivity of Foamcrete Of Different Densities". *Concrete Research Letters*, 2(1).
- Nambiar, E.K.K., Ramamurthy, K. (2007-a) "Air-Void Characterisation of Foam Concrete". *Cement and Concrete Research*, 37, 221-230.

- Nambiar, E.K.K., Ramamurthy, K. (2007-b). "Sorpton Characteristics of Foam Concrete". 37, 1341-1347.
- Narayanan, N., Ramamurthy, K. (2000). "Structure and Properties of Aerated Concrete: A Review". *Cem. Concr. Compos.*, 22 (5), 321–329.
- Neithalath, H. (2004). "Development and Characterization of Acoustically Efficient Cementitious Materials". *PhD thesis*, Purdue University, 2004.
- Neville, A. M., and J.J. Brooks. (2010). "Concrete Technology (2nd ed.)". *Prentice Hall* Harlow, England.
- Neville, A.M. (1995). *Properties of Concrete*. Fourth Ed, Longman Group Limited, Essex, England.
- Oğuz, M. (2019). *Geri Dönüştürülmüş Betonların Köpük Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, (yüksek lisans tezi), Bartın Üniversitesi. Bartın.
- Oikonomou, N.D. (2005). "Recycled Concrete Aggregates". *Cement & Concrete Composites*, 27, 315-318.
- Olin, H. B., Schmidt, J. L., Lewis W. H. (1995). "Construction: Principles, Materials and Methods", New York.
- Onaran, K. (1999). *Malzeme Bilimi*, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul
- Özcan, F. (2005). *Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri ve Hızlandırılmış Kür İle Dayanım Tahmini*, (yüksek lisans tezi), Çukurova Üniversitesi. Adana.
- Özyurt, N. (2000). *Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı*, (yüksek lisans tezi), İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Palomar, I., Barluenga G. & Puentes J. (2015). "Lime–Cement Mortars For Coating with Improved Thermal and Acoustic Performance". *Construction and Building Materials*, Volume 75, 30 January 2015, 306-314, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.012>.

- Panesar, D.K., (2013). “Cellular Concrete Properties and The Effect of Synthetic and Protein Foaming Agents”. *Constr. Build. Mater.* 44 (1), 575–584.
- Pargana N., Pinheiro MD., Silvestre JD., De Brito J. (2014). “Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Thermal Insulation Materials of Buildings”. *Energy and Buildings*, 82: 466–81.
- Ramamurthy K., Nambiar, E.K. Ranjani, G.I.S. (2009). “A Classification Of Studies On Properties of Foam Concrete”. *Cem. Concr. Compos.* 31 (6) 388–396.
- Ries, J.P., J.Speck and K.S.Harmon. (2010). “Lightweight Aggregate Optimizes the Sustainability of Concrete, Through Weight Reduction, Internal Curing, Extended Service Life, and Lower Carbon Footprint”. *Concrete Sustainability Conference*. National Ready Mixed Concrete Association, Tempe, AZ.
- Sagartzazu, X., Hervella, L., Pagalday, J.M. (2008). “Review in Sound Absorbing Materials”. *Archives of Computational Methods in Engineering*, Volume 15, Issue 3, 311–342.
- Sallal, A.K. (2018). “Use Foam Concrete in Construction Works”. *International Journal of Research in Advanced Engineering and Technology*, 4(2),15-20.
- Sayadi, A.A. ve ark. (2016). “Effects of Expanded Polystyrene (EPS) Particles on Fire Resistance, Thermal Conductivity and Compressive Strength of Foamed Concrete”. *Construction and Building Materials*, 112, 716-724.
- Schackow A., Effting C., Folgueras M.V., Güths S., Mendes G.A. (2014). “Mechanical and Thermal Properties of Lightweight Concretes With Vermiculite and EPS Using Air-Entraining Agent”, *Construction and Building Materials*, 57: 190–197.
- Schiavoni S., D'Alessandro F., Bianchi F., Asdrubali F. (2016). “Insulation Materials for the Building Sector: A Review and Comparative Analysis”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62: 988–1011.
- Seddeq, H. S. (2009). “Factors Influencing Acoustic Performance of Sound Absorptive Materials”. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(4), (2009), pp: 4610-4617, ISSN 1991-8178.

- Serin, G., Çankıran, O., Başıyigit, Ç., Taş, H.H., Fenkli, M. (2007). “Normal, Hafif Ve Yarı Hafif Beton Blokların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması”. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 15-22.
- Shah, S.P., Balaguru, P.N. (1992). “Fiber-Reinforced Cement Composites”. *McGraw-Hill Inc.*, Singapore.
- Shen, D., Wu, C. & Du J. (2009). “Laboratory Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag For Substitution of Aggregate in Porous Asphalt Mixture”. *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 1, January 2009, Pages 453-461, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.001>.
- Smith, R. C., Andres, C. K. (1988). “Materials of Construction”. New York: Mc Graw-Hill.
- Stankevičius, V., Skripkiūnas, G., Grinys, A. & Miškiniš, K. (2007). “Acoustical Characteristics and Physical-Mechanical Properties of Plaster with Rubber Waste Additives”. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 13(4), 2007, Issn 1392–1320.
- Sukontasukkul P. (2009). “Use of Crumb Rubber to Improve Thermal and Sound Properties of Pre-Cast Concrete Panel”. *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 2, February 2009, Pages 1084-1092, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.021>.
- Sutcu M., “Influence of Expanded Vermiculite on Physical Properties and Thermal Conductivity of Clay Bricks”. *Ceramics International*, 41: 2819–2827, (2015).
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2005). Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği.
- Tan, X. ve ark. (2014). “Experimental Study of Ultralight Foamed Concrete”. *Advances in Materials Science and Engineering*, 514759.
- Taşdemir, C. (2003). “Hafif Betonların Isı Yalıtım ve Taşıyıcılık Özellikleri”. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 427, 57-61.
- Taylor W.H. (1965). “Concrete Technology and Practice”, American Elsevier Co. Inc.,NY, 185.

- Thanoon W.A., ve ark. (2004). "Development of an Innovative Interlocking Load Bearing Hollow Block System in Malaysia". *Constr. Build. Mater.* 18 (6), 445–454.
- Tjaden, B., Brett, D.J.L., Shearing, P.R. (2016). "Tortuosity in Electrochemical Devices: A Review of Calculation Approaches". 47-67.
- TSE K 314. (2014) Köpük Betondan Mamul Yerinde Döküm, Taşıyıcı Olmayan Duvar Elemanları - Binalar İçin Standart, Türk Standartları Enstitüsü.
- Tüfekçi, M.M. (2011). *Geri Kazanılmış Agregaların Beton Üretiminde Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, (yüksek lisans tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi. İstanbul.
- Türkel, S. ve Kadiroğlu B. (2007). "Pomza Agregalı Hafif Taşıyıcı Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3: 353-359.
- Uygunoğlu, T. (2008). *Hafif Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri*, (doktora tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi. Isparta.
- Uysal, F. (2016). *Vermikülitin Karayolu Esnek Üstyapıları Bitümlü Sıcak Karışımlarında Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, (yüksek lisans tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi. Isparta.
- Üçgül İ., Turak B. (2015). "Tekstil Katı Atıklarının Geri Dönüşümü ve Yalıtım Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi". *APJES*, 3(3), 39-48.
- Valore Jr, R.C. (1954). Cellular Concretes Part 2 Physical Properties. *ACI J. Proc.*, 50 (6).
- Vasina, M., Hughes D. C., Horoshenkov, K. V. & Lapcik Jr. L. (2006). "The Acoustical Properties of Consolidated Expanded Clay Granulates". *Applied Acoustics*, 67(8), August 2006, 787-796, <https://doi:10.1016/j.apacoust.2005.08.003>.
- Vigran, T. E. (2008). *Building Acoustics*, Taylor and Francis, ISBN13: 978-0-415-42853-8 (hbk), ISBN10: 0-415-42853-X (hbk).

- Vilches, J., Ramezani, M., Neitzert, T. (2012). "Experimental Investigation of the Fire Resistance of Ultra Lightweight Foam Concrete". *International Journal of Advanced Engineering Applications*, 1(4), 15-22.
- Vitruvius. (1998). *Mimarlık Üzerine On Kitap*. İstanbul: Şevki Vanlı Mimarlık Vakfı Yayınları.
- Vural, T. (1998). *Fiberli Betonun Basınç Dayanımına Etkisi*, (bitirme ödevi), İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi. İstanbul.
- Wei, S., Yiqiang, C., Yunshang, Z., Jones, M.R. (2013). "Characterization and Simulation of Microstructure and Thermal Properties of Foam Concrete". *Construction and Building Materials*, 47, 1278-1291.
- Wei, S., Yunshen, Z., Jones, M.R. (2014). "Three- Dimensional Numerical Modeling and Simulation of Thermal Properties of Foam Concrete". *Construction And Building Materials* 50, 421-431.
- Xie, Y., ve ark. (2018). "Effects of Bentonite Slurry on Air-Void Structure and Properties of Foamed Concrete". *Construction and Building Materials*, 179, 207-219.
- Xu, J., Sugawara R., Widyorini, R., Han G., Kawai S. (2004). "Manufacture and Properties of Low-Density Binderless Particleboard From Kenaf Core". *Journal of Wood Science*, 50: 62-7.
- Yeşilata, B., Bulut, H., Turgut, P., Demir, F. (2007). "Atık Taşıt Lastiklerinin Geri Kazanımı ve Yalıtım Amaçlı Kullanımı". *MMO Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 102, 64-72.
- Yosun, M. (2008). *Gözenekli Ses Yalıtım Malzemelerinin Akustik Parametrelerinin Belirlenmesi*, (yüksek lisans tezi), Bursa Teknik Üniversitesi. Bursa.
- Zach J., Hroudova J., Brožovský J., Krejzad Z., Gailiuse A. (2013). "Development of Thermal Insulating Materials on Natural Base For Thermal Insulation Systems". *Procedia Engineering*, 57:1288-1294.
- Zhang, J., Yiou Shen, I.D., Jiang, B. ve Li, Y. (2018), "Sound Absorption Characterization of Natural Materials and Sandwich Structure Composites". *Aerospace*, 5, 75.

- Zhao, C., Wang, P., Wang L. & Liu, D. (2014). “Reducing Railway Noise with Porous Sound-Absorbing Concrete Slabs”. *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2014, Article ID 206549, 11 pages, Hindawi Publishing Corporation, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/206549>.
- Zhihua, P., Hengzhi, L., Weiqing, L. (2014). “Preparation and Characterization of Super Low Density Foamed Concrete From Portland Cement and Admixtures”. 72, 256-261.
- Zuritz C., Y.H.Chai and et.al. (2006). Health Monitoring of the New Benicia-Martinez Bridge Instrumentation Plan and Preliminary Results. *Caltrans Bridge Research Conference*.
- Zwikker, C. & Kosten, C, W. (1949). *Sound Absorbing Materials*, Elsevier Publishing Company: Newyork.