



**VOLKANİK TÜF ATIKLARI KULLANILARAK
ÜRETİLEN SİLİKA AEROJEL KATKILI HAFİF
BETONUN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Selçuk ÇİMEN

**Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği
Ana Bilim Dalı
Doç. Dr. Ömer CAN
2023**

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI

VOLKANİK TÜF ATIKLARI KULLANILARAK ÜRETİLEN SİLİKA AEROJEL
KATKILI HAFİF BETONUN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Selçuk ÇİMEN

Danışman: Doç. Dr. Ömer CAN

BAYBURT - 2023

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Ömer CAN danışmanlığında, Selçuk ÇİMEN tarafından hazırlanan “Volkanik Tüf Atıkları Kullanılarak Üretilen Silika Aerojel Katkılı Hafif Betonun Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, 08.11.2023 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Metin İPEK

Üye : Doç. Dr. Ömer CAN

Üye : Doç. Dr. İbrahim Hakkı KARAKAŞ

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Nurullah ÖKSÜZER

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Murat KUL
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Ömer CAN danışmanlığında hazırlamış olduğum “Volkanik Tüf Atıkları Kullanılarak Üretilen Silika Aerojel Katkılı Hafif Betonun Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı program seçin tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

08.11.2023

Selçuk ÇİMEN



ÖN SÖZ

Lisansüstü eğitimim süresince bilgisi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, her türlü yardımı esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Ömer CAN'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin şekillenmesinde tavsiyelerini aldığım, farklı görüş ve önerilerini benden esirgemeyen tez izleme komitesi üyesi hocalarım Doç. Dr. İbrahim Hakkı KARAKAŞ ve Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ'a değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Kıymetli vakitlerini ayırarak tez savunmamda bulunan hocalarım Prof. Dr. Metin İPEK ve Dr. Öğr. Üyesi Nurullah ÖKSÜZER'e tez çalışmasının olgunlaşmasına sağladıkları değerli katkılarından dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Çalışmada bilgi ve deneyimlerini esirgemeyerek paylaşan Doç. Dr. Murat ÇOLAK, Dr. Öğr. Üyesi Emin USLU ile Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÇAĞLAR hocalarıma ve Kimya Yük. Müh. Emrah BAYRAMOĞLU'na teşekkür ederim.

Son olarak, her adımda yanımda olarak desteğini sürekli gördüğüm değerli eşim Öğr. Gör. Arzu ÇİMEN ile canım çocuklarım Enes ve Elif Aynur'a sonsuz sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Selçuk ÇİMEN

ÖZET

Doktora Tezi

VOLKANİK TÜF ATIKLARI KULLANILARAK ÜRETİLEN SİLİKA AEROJEL KATKILI HAFİF BETONUN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Selçuk ÇİMEN

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ömer CAN

Bayburt-2023, Sayfa: 114

Tez çalışmasında, volkanik tüf taşlardan olan Bayburt Taşı (BT) atıkları ile silika aerogel (SA) sentezi sağlanmıştır. Belirli oranlarda SA'nın hafif betonuna ikamesinin ısı ve ses yalıtımına, dayanımına ve porozite gibi özelliklere etkisi araştırılmıştır. Çalışma ile çevre dostu bir yöntemle üretimi sağlanan, yüksek termal kararlılığa sahip, yalıtım özellikleri iyileştirilmiş hafif betonun inşaat sektörüne kazandırılması hedeflenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında BT atıkları kullanılarak SA sentezi gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise SA katkılı hafif beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Numunelere fiziksel (birim hacim ağırlık, porozite, su emme, termal iletkenlik ve ultrases geçiş hızı), mekanik (basınç dayanımı) deneyleri uygulanmış ve sonuçlar ANOVA analizi ile yorumlanmıştır. Ayrıca numunelerin yapısal karakterizasyon (XRD, TEM, FT-IR, TGA/DTA ve SEM) analizleri ile optik mikroskop görüntülemeleri gerçekleştirilmiştir. Isı yalıtımının optimum olacağı hafif betonun tespiti için taguchi yöntemi kullanılmıştır. Hafif betonda SA oranı (%0, 1, 2 ve 3), çimento dozajı (300 ve 350) ve karışım suyu oranı (0,40 ve 0,45) parametreleri belirlenerek L_8 ($4^1 \times 2^2$) ortogonal dizisi seçilmiştir. Çalışma ile ısı yalıtımının (%3, 350 ve 0,40) seviyeleriyle optimum olacağı belirlenmiştir. (%3) SA ikamesinin hafif betonda: (%46) termal iletkenlik değerini iyileştirdiği, porozitesini (%31,48) artırdığı ve basınç dayanımında (9,72 MPa) azalma yaşanmasına neden olduğu belirlenmiştir. Karakterizasyon incelemelerinde: SA'nın hidrofobik ve iyi adsorpsiyon özellikte olduğu, beton içerisinde SA'nın etrafında gözenekli yapının oluştuğu ve SA konsantrasyonunun artması ile betonda çoklu kristal yapının arttığı, bu artışın malzemenin mekanik dayanımında azalmaya neden olduğu değerlendirilmektedir. Termogravimetik analizinde 1000 °C'de gözlenen kütle kaybının %0 SA ikamesinde %27'lerde iken %3 SA ikamesi ile bu değer %21'lere düştüğü gözlenmiş ve bu durum SA ikamesinin artmasının betonda termal durabiliteyi artırdığının göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, yüksek yalıtım özellikli hafif beton elde etmede SA'nın etkisinin büyük olduğunu ve atık BT kullanımının bölge ekonomisini olumlu yönde etkileyeceği değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bayburt taşı, silika aerogel, hafif beton, termal iletkenlik, taguchi.

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

EXAMINATION OF ENGINEERING PROPERTIES OF SILICA AEROGEL ADDED LIGHTWEIGHT CONCRETE PRODUCED USING VOLCANIC TUFA WASTES

Selçuk ÇİMEN

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ömer CAN

Bayburt-2023, Pages: 114

In the thesis study, silica aerogel (SA) synthesis was achieved using Bayburt Stone (BT) waste, which is a volcanic tuff stone. The results of the change of SA in lightweight concrete such as heat and sound insulation, leakage and porosity were investigated. The study provides an environmentally friendly production and aims to introduce lightweight concrete with high thermal stability and improved voltage properties to the construction industry. In the first stage of the study, SA synthesis was performed using BT attacks. In the second stage, lightweight concrete with SA additives was produced. Physical (unit volume weight, porosity, water absorption, thermal conductivity and ultrasound transmission rate) and mechanical (pressure test) tests were performed on the samples and the results were interpreted by ANOVA analysis. In addition, structural characterization (XRD, TEM, FT-IR, TGA/DTA and SEM) analyzes and optical microscope imaging of the samples were performed. Taguchi method was used to determine the lightweight concrete with optimum thermal insulation. In lightweight concrete, the $L_8 (4^1 \times 2^2)$ orthogonal series was selected by determining the SA rate (0, 1, 2 and 3%), cement dosage (300 and 350) and mixing water rate (0,40 and 0,45). The study determined that thermal insulation would be optimum at levels (3, 350 and 0,40). It was determined that (3%) SA substitution in lightweight concrete improved the thermal conductivity value (46%), increased its porosity (31,48%) and caused a decrease in temperatures (9,72 MPa). In the characterization studies: It is evaluated that SA is hydrophobic and has good adsorption properties, that it consists of communities all over the SA in the concrete, and that multicrystals in the concrete increase with the proliferation of SA, and this increase causes a decrease in its physical breakage. In thermogravimetric analysis, while the mass loss observed at 1000 °C was 27% with 0% SA change, it was observed that this value decreased to 21% with 3% SA change, and this was considered as an indicator that the increase in SA change increased the thermal durability of concrete. In addition, it is considered that SA has a great impact on obtaining high quality lightweight concrete and waste BT will positively affect the regional economy.

Keywords: Bayburt stone, silica aerogel, lightweight concrete, thermal conductivity, taguchi.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	II
BEYANNAME	III
ÖN SÖZ	IV
ÖZET	V
ABSTRACT	VI
İÇİNDEKİLER.....	VII
TABLOLAR.....	IX
ŞEKİLLER.....	XI
KISALTMALAR.....	XIII
SİMGELER.....	XIII
GİRİŞ.....	1
BİRİNCİ BÖLÜM	3
KURAMSAL ÇERÇEVE	3
1.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
1.2. AEROJEL.....	9
1.3. BETON.....	11
1.3.1. Betonun Sınıflandırılması	12
1.3.2. Betonun Avantajları ve Dezavantajları	14
1.4. HAFİF BETON	14
1.4.1. Hafif Betonun Sınıflandırılması.....	16
1.4.2. Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	17
1.4.3. Hafif Beton Kullanım Alanları.....	17
1.4.4. Hafif Betonun Avantajları ve Dezavantajları.....	18
1.5. DENEY TASARIMI	18
1.5.1. Taguchi Yöntemi.....	19
İKİNCİ BÖLÜM.....	21
MATERYAL VE YÖNTEM	21
2.1. BAYBURT TAŞI.....	21
2.2. ÇİMENTO.....	23
2.3. KARIŞIM SUYU	24
2.4. KİMYASAL MALZEMELER.....	24
2.5. DENEYLERİN GERÇEKLEŞTİĞİ LABORATUVARLAR VE DENEY PROSESİ	24
2.6. SİLİKA AEROJEL SENTEZİ	26
2.6.1. X- Işınları Kırınımı	30
2.6.2. Geçirimli Elektron Mikroskobu	30
2.6.3. Fourier Kızılötesi Dönüşüm Spektroskopisi	31
2.6.4. Yoğunluk Tespiti.....	31
2.7. AGREGALAR ÜZERİNDE UYGULANAN DENEYLER.....	32
2.8. DENEY TASARIMI	33
2.9. SİLİKA AEROJEL KATKILI HAFİF BETONUN HAZIRLANMASI	35
2.10. SİLİKA AEROJEL KATKILI HAFİF BETON ÜZERİNDE GERÇEKLEŞTİRİLEN DENEYLER.....	37
2.10.1. Çökme (Slump).....	37
2.10.2. Taze Beton Birim Hacim Ağırlık.....	37

2.10.3. Sertleşmiş Beton Birim Hacim Ağırlık.....	38
2.10.4. Su Emme (Ağırlıkça).....	38
2.10.5. Porozite	39
2.10.6. Termal İletkenlik.....	39
2.10.7. Ultrases Geçiş Hızı	40
2.10.8. Basınç Dayanımı.....	41
2.10.9. Donma-Çözülme Dayanımının Basınç Dayanımı Üzerine Etkisi	42
2.10.10. Hafif Betonun Optik Mikroskop İncelemeleri	42
2.10.11. Hafif Betonun Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi	43
2.10.12. Hafif Betonun Termogravimetrik Analizi	43
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	45
BULGULAR.....	45
3.1. SENTEZLENEN SİLİKA AEROJELİN KARAKTERİZASYONU	45
3.1.1. X- Işınları Kırınımı Analiz Sonuçları	45
3.1.2. Geçirimli Elektron Mikroskobu Analiz Sonuçları	46
3.1.3. Fourier Kızılötesi Dönüşüm Spektroskopisi Analizi Sonuçları	47
3.1.4. Yoğunluk Tespiti.....	48
3.2. SİLİKA AEROJEL KATKILI HAFİF BETON ÜZERİNDE UYGULANAN DENEYLER.....	49
3.2.1. Çökme (Slump) Deney Sonuçları	49
3.2.2. Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları	52
3.2.3. Sertleşmiş Beton Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları	57
3.2.4. Termal İletkenlik Deney Sonuçları	61
3.2.5. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları.....	66
3.2.6. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	70
3.2.7. Donma – Çözülmenin Basınç Dayanımı Üzerine Etkisi.....	74
3.2.8. Su Emme (Ağırlıkça) Deney Sonuçları.....	75
3.2.9. Porozite Deney Sonuçları.....	76
3.3. SİLİKA AEROJEL KATKILI HAFİF BETON DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	78
3.3.1. Termal İletkenlik ve Basınç Dayanımı Sonuçları	78
3.3.2. Yoğunluk ve Basınç Dayanımı Sonuçları	79
3.3.3. Yoğunluk ve Termal İletkenlik Sonuçları.....	80
3.4. OPTİK MİKROSKOP İNCELEME SONUÇLARI.....	80
3.5. SİLİKA AEROJEL KATKILI HAFİF BETONUN SEM VE EDX ANALİZİ SONUÇLARI	83
3.6. SİLİKA AEROJEL KATKILI HAFİF BETONUN TERMOGRAVİMETRİK ANALİZİ SONUÇLARI	89
3.7. MALİYET ANALİZİ.....	91
SONUÇ VE ÖNERİLER	94
KAYNAKÇA.....	97
ÖZ GEÇMİŞ	114

TABLÖLAR

Tablo 1: Farklı Parametre ve Seviyelerle Uygulanan Deney Sayılarının Karşılaştırması.....	20
Tablo 2: BBT'nın Kimyasal Özellikleri.....	23
Tablo 3: BBT'nın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	23
Tablo 4: Çimentonun Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri	24
Tablo 5: Elek Analizi Deney Sonuçları	32
Tablo 6: Birim Ağırlık Deney Sonuçları	33
Tablo 7: Özgöl Ağırlık ve Su Emme Oranları.....	33
Tablo 8: Gevşek ve Sıkışık Birim Ağırlık Değerleri.....	33
Tablo 9: Deney Parametreleri ve Seviyeleri	34
Tablo 10: Uygulanan Ortogonal Dizin $L_8 (4^1 \times 2^2)$	34
Tablo 11: Deney Numunelerinin Notasyonu	35
Tablo 12: 1 m ³ SAKHB için Gerekli Malzeme Miktarı (kg)	35
Tablo 13: Sentezlenen Silika Aerojelin XRD Analiz Verilerinin Karşılaştırılması	46
Tablo 14: Sentezlenen Silika Aerojel ve Literatürdeki Çalışmalara Ait Yoğunluk Verileri ...	48
Tablo 15: SAKHB'de Çökme (Slump) Değeri ve S/N Oranı	49
Tablo 16: SAKHB'de Çökme (Slump) Değeri Yanıt Tablosu	51
Tablo 17: SAKHB'de Çökme (Slump) Değerinin Varyans Analizi Sonuçları.....	51
Tablo 18: SAKHB'de Çökme (Slump) Değeri Model Özeti	51
Tablo 19: SAKHB'de Çökme (Slump) Değeri Regresyon Denklemi	52
Tablo 20: SAKHB'de Çökme (Slump) Ortalama ve Tahmini Değeri	52
Tablo 21: SAKHB'de Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Değeri ve S/N Oranı.....	53
Tablo 22: SAKHB'de Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Değeri Yanıt Tablosu	55
Tablo 23: SAKHB'de Taze Beton Birim Ağırlık Değerinin Varyans Analizi Sonuçları	55
Tablo 24: SAKHB'de Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Değeri Model Özeti	55
Tablo 25: SAKHB'de Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Değeri Regresyon Denklemi	56
Tablo 26: SAKHB'de Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Ortalama ve Tahmini Değeri.....	56
Tablo 27: SAKHB'de Sertleşmiş Beton Birim Hacim Ağırlık Değeri ve S/N Oranı	57
Tablo 28: SAKHB'de Sertleşmiş Beton Birim Hacim Ağırlık Değeri Yanıt Tablosu	59
Tablo 29: SAKHB'de Sertleşmiş Beton Birim Ağırlık Değerinin Varyans Analizi.....	59
Tablo 30: SAKHB'de Sertleşmiş Beton Birim Ağırlık Değeri Model Özeti.....	59
Tablo 31: SAKHB'de Sertleşmiş Beton Birim Ağırlık Değeri Regresyon Denklemi.....	60
Tablo 32: SAKHB'de Sertleşmiş Beton Birim Ağırlık Ortalama ve Tahmini Değeri.....	60
Tablo 33: SAKHB'de Termal İletkenlik Değerleri ve S/N Oranı.....	61
Tablo 34: SAKHB'de Termal İletkenlik Değeri Yanıt Tablosu	63
Tablo 35: SAKHB'de Termal İletkenlik Değerinin Varyans Analizi Sonuçları.....	63
Tablo 36: SAKHB'de Termal İletkenlik Değeri Model Özeti	63
Tablo 37: SAKHB'de Termal İletkenlik Değeri Regresyon Denklemi	64
Tablo 38: SAKHB'de Termal İletkenlik Ortalama ve Tahmini Değeri.....	64
Tablo 39: Yapı Malzemelerinin Isıl İletkenlik Değerlerinin Karşılaştırılması (TS 825)	65
Tablo 40: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Değerleri ve S/N Oranı.....	66
Tablo 41: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Değeri Yanıt Tablosu	68
Tablo 42: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Değerinin Varyans Analizi Sonuçları	68
Tablo 43: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Değeri Model Özeti.....	68

Tablo 44: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Değeri Regresyon Denklemi	69
Tablo 45: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Ortalama ve Tahmini Değeri.....	69
Tablo 46: SAKHB'de Basınç Dayanımı Değeri ve S/N Oranı	70
Tablo 47: SAKHB'de Basınç Dayanımı Değeri Yanıt Tablosu	72
Tablo 48: SAKHB'de Basınç Dayanımı Değerinin Varyans Analizi Sonuçları.....	72
Tablo 49: SAKHB'de Basınç Dayanımı Değeri Model Özeti	72
Tablo 50: SAKHB'de Basınç Dayanımı Değeri Regresyon Denklemi	73
Tablo 51: SAKHB'de Basınç Dayanımı Ortalama ve Tahmini Değeri	73
Tablo 52: SAKHB'de Donma Çözülme Öncesi ve Sonrası Basınç Dayanımı Değerleri	74
Tablo 53: SAKHB'de Su Emme (Ağırlıkça) Değerleri	75
Tablo 54: SAKHB'de Porozite Değerleri	77
Tablo 55: SAKHB'de SEM/EDX Element Analizi	89
Tablo 56: Silika Aerojel Sentezinin Maliyeti (1000 g)	91
Tablo 57: SAKHAB'nın Maliyeti (20 cm Kalınlıktaki 1 m ² Duvar).....	92

ŞEKİLLER

Şekil 1: Aerojel Örnekleri	9
Şekil 2: İnşaat Sektöründe Aerojel Kullanım Örnekleri	11
Şekil 3: Hafif Beton Sınıflandırması.....	16
Şekil 4: Taguchi Yönteminin Aşamaları.....	20
Şekil 5: Bayburt İl Haritası	21
Şekil 6: Bayburt Taşının Taş Ocaklarında ki Görünümü.....	22
Şekil 7: Kullanılan Çimento.....	24
Şekil 8: Tez Çalışma Prosesi.....	25
Şekil 9: BBT'nın (a) Atık Sahasındaki ve (b) Laboratuvara Getirilmiş Hali	26
Şekil 10: BBT'nın (a) Kırılmış ve (b) Toz Haline Getirilmiş Hali.....	27
Şekil 11: Isıl İşlem Uygulanması	27
Şekil 12: Deneylerde Kullanılan; (a) Vakum Pompası, (b) Filtre Kağıdı ve (c) pH Metre	28
Şekil 13: Karışımın; (a) Jelleşmeden Önceki ve (b) Jelleşmeden Sonraki Görünümü	28
Şekil 14: Silika Aerojelin; (a) Etüv Öncesi, (b) Kurutma Aşaması, (c) Kurutulmuş Hali ve (d) Öğütülme Süreçleri	29
Şekil 15: (a) Silika Aerojel ve (b) Sızdırmaz Poşetlerde Saklanması.....	29
Şekil 16: Kullanılan XRD Cihazı.....	30
Şekil 17: Kullanılan TEM Cihazı.....	30
Şekil 18: Kullanılan FT-IR Cihazı	31
Şekil 19: Gerçek Yoğunluk Ölçüm Tespitinde Deneyin Gerçekleşme Görüntüsü.....	31
Şekil 20: Karışımında Kullanılan Agreganın Granülometri Eğrisi.....	32
Şekil 21: Uygulanan Kodlama ve Açıklaması	34
Şekil 22: SAKHB Numunelerinin Hazırlanma Aşamaları.....	36
Şekil 23: SAKHB Numunelerinin Kalıplara Yerleştirilmesi	36
Şekil 24: SAKHB Numunelerin Kalıplardan Çıkarılma ve Kürlenme Süreci	37
Şekil 25: Taze Beton Birim Hacim Ağırlıklarının Tespitine Ait Görüntüler.....	38
Şekil 26: Sertleşmiş Beton Birim Hacim Ağırlıklarının Tespitine Ait Görüntü	38
Şekil 27: Isı İletim Katsayısının Tespitinde Kullanılan QTM-500 Cihazı	39
Şekil 28: Isı İletim Katsayısının Tespiti İçin Hazırlanan Numune Kalıpları	40
Şekil 29: Isı İletim Katsayısının Tespitinde Deneyin Gerçekleşme Görüntüsü.....	40
Şekil 30: SAKHB Numunelerinin Ultrases Geçiş Hızının Belirlenme Süreci	41
Şekil 31: SAKHB Numunelerinin Basınç Dayanımı Tespitinin Gerçekleştirilme Süreci.....	42
Şekil 32: SAKHB Numunelerinin Donma-Çözülme İşlemine Maruz Kalma Süreci	42
Şekil 33: SAKHB Numunelerinin (a) Zımparalama ve (b) Optik Mikroskop Görüntülemesinde Kullanılan Cihaz	43
Şekil 34: SAKHB Numunelerinin SEM Görüntülemesinde Kullanılan Cihaz.....	43
Şekil 35: SAKHB Numunelerinin TGA/DTG Analizinde Kullanılan Cihaz	44
Şekil 36: Sentezlenen Silika Aerojele Ait XRD Grafiği	45
Şekil 37: Sentezlenen Silika Aerojele Ait TEM Görüntüleri.....	47
Şekil 38: Sentezlenen Silika Aerojele Ait FT-IR Spektrumları	48
Şekil 39: SAKHB'de Çökme (Slump) Deney Sonuçları	50
Şekil 40: SAKHB'de Çökme (Slump) Deneyi S/N Oran Grafiği	50
Şekil 41: SAKHB'de Gerçek ve Tahmini Çökme (Slump) Grafiği	52

Şekil 42: SAKHB'de Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları.....	54
Şekil 43: SAKHB'de Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Deneyi S/N Oran Grafiği	54
Şekil 44: SAKHB'de Gerçek ve Tahmini Taze Beton Birim Ağırlık Grafiği.....	56
Şekil 45: SAKHB'de Sertleşmiş Beton Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları.....	58
Şekil 46: SAKHB'de Sertleşmiş Beton Birim Hacim Ağırlık Deneyi S/N Oran Grafiği	58
Şekil 47: SAKHB'de Gerçek ve Tahmini Sertleşmiş Beton Birim Ağırlık Grafiği.....	60
Şekil 48: SAKHB'de Termal İletkenlik Deney Sonuçları.....	62
Şekil 49: SAKHB'de Termal İletkenlik Deneyi S/N Oran Grafiği	62
Şekil 50: SAKHB'de Termal İletkenlik Gerçek ve Tahmini Değer Grafiği	64
Şekil 51: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları.....	67
Şekil 52: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Deneyi S/N Oran Grafiği	67
Şekil 53: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Gerçek ve Tahmini Grafiği.....	69
Şekil 54: SAKHB'de Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	71
Şekil 55: SAKHB'de Basınç Dayanımı Deneyi S/N Oran Grafiği	71
Şekil 56: SAKHB'de Basınç Dayanımı Gerçek ve Tahmini Grafiği	73
Şekil 57: SAKHB'de Donma Çözülmenin Basınç Dayanımına Etkisi	74
Şekil 58: SAKHB'de Donma Çözülme ile Basınç Dayanımından Yaşanan Kayıp Oranı	75
Şekil 59: SAKHB'de Su Emme (Ağırlıkça) Deney Sonuçları	76
Şekil 60: SAKHB'de Porozite Deney Sonuçları	77
Şekil 61: SAKHB'de Termal İletkenlik ve Basınç Dayanımı Sonuçlarının Karşılaştırılması ..	78
Şekil 62: SAKHB'de Yoğunluk ve Basınç Dayanımı Sonuçlarının Karşılaştırılması	79
Şekil 63: SAKHB'de Yoğunluk ve Termal İletkenlik Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	80
Şekil 64: Optik Mikroskopta; (a) Silika Aerojel ve (b) Su ile Tepkimesinin Görünümü	81
Şekil 65: Silika Aerojelin Beton İçerisindeki Tepkisinin Fiziksel Modellenmesi	81
Şekil 66: SAKHB Numunelerinin Makro Yapı ve Optik Mikroskop Görüntüleri	82
Şekil 67: %0 SAKHB Numunesinin SEM Görüntüsü.....	84
Şekil 68: %1 SAKHB Numunesinin SEM Görüntüsü.....	85
Şekil 69: %2 SAKHB Numunesinin SEM Görüntüsü.....	86
Şekil 70: %3 SAKHB Numunesinin SEM Görüntüsü.....	87
Şekil 71: SAKHB Numunelerinin SEM/EDX Spektrumları	88
Şekil 72: SAKHB Numunelerinin TGA/DTA Grafiği.....	90
Şekil 73: SAKHB Numunelerinin TG Eğrileri	90

KISALTMALAR

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
BT	: Bayburt Taşı
BBT	: Beyaz Bayburt Taşı
BUMER	: Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi
BUMFYML	: Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı
C	: Çimento Dozajı
SB	: Serbestlik Derecesi
ERUTAUM	: Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi
FT-IR	: Fourier Kızılötesi Dönüşüm Spektroskopisi
HCl	: Hidroklorik asit
MS	: Kareler Ortalaması
OA	: Ortogonal Dizin
W/C	: Karışım Suyu Oranı
SAKHB	: Silika Aerojel Katkılı Hafif Beton
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
S/N	: Sinyal / Gürültü
S	: Kareler Toplamı
Na₂SiO₃	: Sodyum Silikat
TEM	: Geçirimli Elektron Mikroskobu
TGA/DTA	: Termogravimetrik ve Diferansiyel Termal Analiz
TMCS	: Trimetilklorosilan
XRD	: X-Işınları Kırınımı

SİMGELER

f_c	: Basınç Dayanımı
m	: Kütle
ρ	: Yoğunluk
γ_k	: Kuru Özgül Ağırlık
V	: Hacim
λ	: Isıl İletkenlik
θ	: Temas Açısı
Φ	: Porozite
Gt	: Giga Ton

GİRİŞ

Enerji, toplumların gelişmişliğinin önemli ölçütlerinden biri olarak görülmektedir (Kut, 2018). Hızla artan dünya nüfusu ve teknolojiye yaşanan gelişmeler, enerjiye olan ihtiyacı artırmaktadır (Kuk, 2019). Bu ihtiyacın karşılanması için yaşanan enerji krizi, toplum tarafından geniş çapta sosyal kalkınmanın önündeki büyük bir engel olarak görülmektedir (Butler, 2008; Collins, 2017; Coma vd., 2016).

Enerji tüketiminin artması çevresel sorunlar, salınan sera gazı etkisiyle iklim değişiklikleri ve enerji için ülkeler arası yaşanan savaşlar enerji konusunda devletlerin önlemler almasını zorunlu hale getirmektedir. Bu bağlamda enerji tüketimini azaltma, alternatif enerji kaynakları üretme veya mevcut enerjinin korunumu üzerinde durulmaktadır.

Enerji tüketim alanlarına bakıldığında; toplam enerji tüketiminin %35-40'ının binalar (konut, fabrika, hastane, okul vb.) tarafından tüketildiği görülmektedir (Li vd., 2016; Samson vd., 2016; Sezer, 2005). Son yıllarda ise inşaat sektöründe enerji tüketiminin %1,8 oranında artmakta olduğu ve konut sektörü %27'lik enerji tüketim dilimiyle dünyada en çok enerji tüketen üç sektör arasında yer aldığı görülmektedir (Nejat vd., 2015).

İnşaat sektörü aynı zamanda çevre üzerinde muazzam olumsuz etkileri olan sera gazlarının en büyük üreticilerinden biridir. 2017 yılı küresel durum raporuna göre, yıllık küresel bina kaynaklı karbon emisyonları, 2016 yılında yaklaşık 9,0 giga ton (Gt) CO₂'tir. Bu miktarın 2,8 Gt CO₂ doğrudan binalardan ve 3,7 Gt CO₂ bina inşaatından salınmaktadır (Li, 2014).

Son yıllarda, çok farklı malzemeler ısı yalıtımı amacıyla inşaat sektörüne girmiştir. Bunlardan biri de aerojeldir. Günümüzde aerojel, mükemmel termal yalıtım özellikleri nedeniyle inşaat sektöründe popülerlik kazanmaktadır.

Aerojellerin yapısında yüksek miktarda gözenek bulunduğundan, ısı ve elektrik iletiminde süper yalıtkan olarak da bilinmektedirler. Günümüzde teknolojinin ilerlemesiyle malzemelerin kullanım yerlerinde de bazı ihtiyaçlar ortaya çıkmıştır. Aerojeller, sahip olduğu özelliklerden nedeniyle son zamanlarda teknolojik açıdan ilgi çekmeye başlamıştır. Yeryüzünde doğal olarak bulunan malzemelerden de aerojel sentezleyebilme olanakları olduğundan, sentezlenme aşamasında ekonomik açıdan da katkı sağlayabilmektedir (Öz vd., 2018).

Bu çalışmada Bayburt il sınırları içerisinde bulunan, tuf taş grubunda olan Bayburt Taşı (BT) atıkları kullanılarak aerojel sentezinin yapılması ve bu aerojelin hafif betonda kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra elde edilen aerojelin

özelliklerinin tespit edilmesi ve termal performansı yüksek, fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirilmiş hafif betonun inşaat sektörüne kazandırılması hedeflenmiştir.

Bu çalışma uygulanmaya başlandığında;

- Üretilen hafif betonun kullanımının artmasıyla yapılardaki ölü yükünde azalma meydana gelecektir.
- Aerojel katkılı hafif betonla üretilen yapının deprem yükü gibi yatay yüklerden etkilenme oranı azalacaktır.
- Fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirilmiş bir hafif beton bilim dünyasına kazandırılmış olacaktır.
- Bayburt ili sınırları içerisinde bulunan taş ocaklarında meydana gelen atıkların bertaraf edilmesine fayda sağlayacaktır.
- Doğal kaynaklarımızın hafif beton üretiminde kullanılması sürdürülebilir yapı üretiminde yararlı olacaktır.
- Isı yalıtım değeri yüksek bir beton elde edilecek, bu durumda ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır.

BİRİNCİ BÖLÜM

KURAMSAL ÇERÇEVE

Bu bölüm içerisinde ilk olarak; aerojelin inşaat sektöründe kullanımı, hafif betonun yalıtım özelliğinin iyileştirmesinde gerçekleştirilen uygulamalar ile deney tasarımı yöntemlerinden taguchi yöntemi uygulanarak gerçekleştirilen çalışmalar hakkında literatür taramasına yer verilmiştir. Ardından aerojel, beton, hafif beton ve deney tasarımı hakkında bilgiler özetlenmiştir.

1.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Aerojelin beton sektöründe kullanımı;

Ratke (2008) yapmış olduğu çalışmada hacimce %70 silika aerojel granülleri kullanarak beton üretmiştir. Çalışmasında 50 mm kalınlığındaki bir aerojel beton plakanın bir yüzeyini 2 saat boyunca 1000°C’de bir yangına maruz bırakmış, 2 saat sonunda beton plağın diğer tarafının sıcaklığının 60°C’nin altında olduğunu tespit etmiştir.

Gao vd. (2014) yaptıkları çalışmada, hacimce %60 aerojel granül ekleyerek, 1000 kg/m³ yoğunluğa, ortalama 8,3 MPa basınç dayanımına ve 0,26 W/mK ısı iletkenliğe sahip bir aerojel betonu üretmişlerdir. Aynı çalışmada, yazarlar ayrıca bu aerojel içeren harçlarda hava boşluğu içeriğinin sıfıra yakın olduğunu gözlemlemişlerdir.

Ramakrishnan vd. (2015) yapmış oldukları çalışmada, parafin/genleştirilmiş perlit ile karıştırılmış betonun termal özelliklerini incelemişlerdir. Parafin/genleştirilmiş perlit kompozitinin betonun termal enerji tasarrufunu ve termal ataletini önemli ölçüde artırabileceğini tespit etmişlerdir.

Fickler vd. (2015) çalışmalarında silika aerojeli beton içerisinde kullanarak yüksek performanslı aerojel beton geliştirmişlerdir. Farklı oranlarda aerojel kullanılarak ürettikleri betonun basınç dayanımı ve ısı iletkenliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak üretilen numunelerin, 3,0-23,6 MPa arasında değişen bir basınç dayanımına, 0,16-0,37 W/mK arasında değişen ısı iletkenlik değerine sahip olduklarını tespit etmişlerdir.

Ng vd. (2015) yaptıkları çalışmada, aerojel betonun ısı iletkenliği üzerindeki aerojel içeriğinin etkisini araştırmışlardır. Beton karışımına hacimce %50 oranında aerojel ikame etmişlerdir. Sonuç olarak; 0,55 W/mK ısı iletkenliğe sahip aerojel katkılı beton elde etmişler ve aerojel katkısının betonun yoğunluğunu ile ısı iletkenliğini iyileştirdiğini bildirmişlerdir.

Fakat aerojel içeriğinin çok yüksek olması nedeniyle betonun maliyetinin arttığını ve mühendislik uygulamalarını engellediğini belirtmişlerdir.

Welsch vd. (2017) çalışmalarında, aerojel katkılı betonun yapısı ve özellikleri arasındaki ilişkileri tanımlamak için kullanılan matematiksel modelleri incelemiştir. Çalışma sonucunda, aerojel katkılı betonun, kuru birim hacim ağırlığı ile basınç dayanımı arasında ve basınç dayanımı ile ısı iletkenlik arasında bir bağlantı olduğunu tespit etmişlerdir. Bu bağlantının aerojel katkılı betonun güvenilir bir gelişme sağlayabilme kabiliyetine sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Tsioulou vd. (2017) yaptıkları çalışmada, beton üretiminde kullanılan kum yerine aerojel tozu ve aerojel granülü ikame ederek aerojel katkılı beton üretmişlerdir. Çalışma sonunda, uygun bağlayıcı ve aerojel kullanımının aerojel katkılı betonun ısı performansını iyileştirdiğini bildirmişlerdir.

Wang vd. (2018) çalışmalarında agrega yerine aerojel ile doldurulmuş genişlemiş perlit kullanarak aerojel beton üretmişlerdir. Çalışma sonunda, aerojel ile doldurulmuş perlit agregasının miktarı arttıkça betonun ısı iletkenliği ve mekanik özelliklerinde azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Çalışmada %100 aerojel ile doldurulmuş perlit agregası kullanıldığında, ısı iletkenliğin 0,098 W/mK ve basınç dayanımının ise 3,71 MPa olduğunu ifade etmişlerdir.

Welsch ve Schnellenbach-Held (2018) yaptıkları çalışmada, beton malzemesi içerisine aerojel ikame ederek beton üretmişlerdir. Ürettikleri numunelerin basınç dayanımı 2 MPa ile 25 MPa arasında değişirken ısı iletim katsayısı $0,09 \text{ W/mK} \leq \lambda \leq 0,25 \text{ W/mK}$ aralığında olduğu görülmüştür. Aynı miktarda aerojel granülünde kuru kütle yoğunluğu, aerojel beton üzerinde önceki araştırmalara kıyasla daha az olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin eğilme mukavemetinin önemli ölçüde azaldığı, karışımların akıcı, neredeyse kendi kendine yerleşen ve kısa bir hidrasyon süreci ile birlikte artan bir çekme eğilimi gösterdiği bildirilmiştir.

Li vd. (2019) yaptıkları çalışmada, nano gözenekli aerjeli köpük betona ekleyerek yeni bir aerjelli köpük beton üretimi yapmışlardır. Üretilen betona mikro yapı ve ısı iletkenlik deneyleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, yoğunluğunun 198 kg/m^3 , ısı iletim katsayısının ise $0,049 \text{ W/mK}$ olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca üretilen köpük betonun yeşil ve sıfır enerji tüketen bina üretiminde kullanılabileceğini bildirmişlerdir.

Zhang vd. (2020) yaptıkları çalışmada, aerojel tozu ve doğranmış cam elyaf kullanarak yüksek performanslı köpük beton üretimi yapmışlardır. Aerojel tozunu dolgu malzemesi olarak, doğranmış elyafı ise takviye malzemesi olarak kullanmışlardır. Çalışmada sonuç olarak, aerojel

katkılı köpük betonun, düşük ve sıfır enerjili binalardaki uygulamalar için güneş radyasyonu veya aşırı sıcak havaya karşı daha iyi termal yalıtım performansına sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Adhikary vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada, genleştirilmiş cam, uçucu kül, prefabrike plastik kabarcıklar ve aerojel kullanarak hafif-ultra hafif beton üretimi yapmışlardır. Sonuç olarak, %15 oranında aerojel ikamesinin betonun basınç dayanımının yaklaşık %50 oranında düşürdüğünü bildirmişlerdir. Genleştirilmiş cam agregası ve aerojel kullanımının 800 kg/m³ yoğunluğun altında bir yoğunluğa sahip olduğunu bildirmişlerdir. Bununla birlikte, uçucu kül ve prefabrike plastik kauçuğun akışkan hafif/ultra hafif beton üretiminde kullanılmasının olumlu sonuçlar vereceğini ifade etmişlerdir.

Adhikary vd. (2021) yaptıkları çalışmada, karbon nanotüp, hafif agrega olarak %55 oranında genleştirilmiş cam ve %45 oranında hidrofobik silika aerojel kullanarak beton üretimi yapmışlardır. Sonuç olarak, karbon nanotüplerin hafif betonun basınç dayanımını ve mikroyapısal özelliklerini dikkate değer bir şekilde arttırdığını bildirmişlerdir.

Ma vd. (2023) çalışmalarında hacimce %0, 5, 10 ve 20 oranlarında aerojel kullanarak ürettikleri betonu 1000 °C'ye kadar kademeli olarak ısıtarak yüksek sıcaklık karşısında betonda meydana gelen bozulmayı incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda betonun ısı kaynaklı bozulmasında aerogelin etkisinin önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Wu vd. (2023) araştırmalarında ultra hafif aerojel ile gelişmiş aerogelin köpük beton üzerinde ki etkilerini incelemişlerdir. Hafif yoğunluğa sahip (170 kg/m³) ile ultra hafif yoğunluğa sahip (75 kg/m³) aerojeli köpük betona farklı oranlarda kullanmışlardır. Ultra hafif yoğunluktaki aerogelin uygulandığı betonda %9 oranında ısı kaybının azaldığı gözlenmiştir.

Aerogelin çimento sektöründe kullanımı;

Kim vd. (2013) yaptıkları çalışmada, aerojeli çimento hamuruna ikame ederek 0,135 W/mK değerinde ısı iletkenlik elde etmiştir.

Hanif vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada, aerojel ve uçucu kül içeren çimento bileşimlerinin mikroyapısına yönelik araştırma bulgularını rapor etmiş ve bileşimlerin gözenekli bir iç yapıya sahip olduğunu kanıtlamışlardır.

Shah vd. (2021) yaptıkları çalışmada, silika aerogelin çimento kompoziti üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Numuneleri taze durum özellikleri, basınç dayanımı, su emme, yoğunluk, porozite deneylerine tabi tutmuşlardır. Çalışma sonucunda silika aerogelin üretilen

numunelerin çökmesi ile kıvamını %90 oranında, yoğunluğu %35 oranında ve basınç dayanımını ise %76 oranında azalttığını tespit etmişlerdir.

Rostami vd. (2021) çalışmalarında, parafin kaplı geri dönüştürülmüş beton agregaları ve aerjel agregaları kullanarak yeni bir çimento kompoziti üretmişlerdir. Ürettikleri numuneler üzerinde mekanik, termal ve dayanıklılık deneyleri uygulamışlardır. Sonuç olarak, parafin kaplı geri dönüştürülmüş beton agregaları kullanımının su emme ve geçirgen boşluklar dayanıklılık özellikleri açısından iyileştirme olduğunu bildirmişlerdir. Bunun yanı sıra kırılma yapıları nedeniyle aerjelin mekanik özelliklerini olumsuz etkilerken, termal özelliklerini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir.

Shah vd. (2023) çalışmalarında hafif çimentolu kompozitler üzerinde kimyasal olarak işlenmiş silika aerjel kullanmışlardır. Hacimce %80 oranında işlenmiş silika aerjel uyguladıkları numuneler de yoğunlukta %45 oranında azalma, basınç dayanımında %81 oranında azalma ve su emmesin de %375'e varan artış tespit etmişlerdir.

Aerjelin harç üretiminde kullanımı;

Zhu vd. (2019) yaptıkları çalışmada, mikro yapının, özellikle gözenek yapısına odaklanarak, aerjel harçların ısı iletkenliği ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak, yangın patlamasına karşı performansın bir ön testi yapıldı. Aerjel içeren harçlar, belirli bir termal yükleme protokolü altında yüksek performanslı beton küplerini yangının patlamasından koruyabilirken, elde edilen termal iletkenlik ve mekanik özellikler, aynı toplam gözeneklilik aralığında hücreli betonunkilere benzer olduğunu tespit etmiştir.

Bostancı (2020a) yaptığı çalışmada, alkali-aktif edilmiş cüruf harçlara bağlayıcı ağırlığının %0, %0,3 ve %0,6'sı kadar silika aerjel ve bağlayıcı ağırlığının %0, %1,5 ve %3,0'ü kadar hurda kauçuğu eklemişlerdir. Sonuç olarak, %0,3 aerjel ve %3,0 hurda kauçuk ikamesi durumunda ısı yalıtım değerinin %33 oranında arttığını tespit etmiştir.

Bostancı (2020b) yaptığı çalışmada, alkali – aktif edilmiş uçucu kül harçlarına aerjel ikame ederek yeni bir harç üretimi gerçekleştirmiştir. Aerjel oranını %0,25 ve %0,50 olarak belirlemiştir. Elde ettiği harcın mekanik, por yapısı ve mikro yapı özelliklerini incelemiştir. Sonuç olarak silika aerjelin harç üretiminde kullanımında herhangi bir sakınca olmadığını bildirmiştir.

Jia vd. (2023) araştırmasında aerjel ile geliştirilmiş perlitin ısı yalıtım harcı elde etmedeki etkilerini incelemiştir. Geliştirilmiş perlitin gözenek yapısı aerjel ile

doldurularak yığın yoğunluğu %50'ye kadar bir artış gözlenmiştir. Bunun yanında termal iletkenlik değerinde yaklaşık %30'lara varan bir iyileşme gözlemlendiğini bildirmiştir.

Aerogelin sıva üretiminde kullanımı;

Buratti vd. (2014) yapmış oldukları çalışmada, aerogel katkılı beton ve sıva malzemesi üretmişlerdir. Çalışma sonucunda, süper yalıtımlı beton ve sıva üretilebileceğini bildirmişlerdir.

İbrahim vd. (2014) yaptıkları çalışmada, dış duvarda uygulanmak üzere üretilen yalıtım kaplamasına aerogelin ikame edilmesi ile elde edilen yalıtım malzemelerinin diğer tüm termal malzemelerden daha iyi performansa sahip olduğunu bildirmiştir.

Julio vd. (2016) yapmış oldukları çalışmada silika aerogellerle karıştırılmış hafif beton bazlı termal sıva üretimi yapmışlardır. Çalışma sonucunda silis kumu yerine sentezlenen aerogel tamamen kullanıldığında yoğunluğunun 410 kg/m^3 , ısı iletkenlik değerinin 0.085 W/mK olduğunu tespit etmiştir.

Masera vd. (2017) yaptıkları çalışmada konutların yalıtım açısından iyileştirilmesi amacıyla aerogel katkılı tekstil duvar kâğıdı üretmişlerdir. Çalışma sonucunda üretilen duvar kâğıdının ısı iletim katsayısı değerinde %24 oranında azalma olduğunu bildirmişlerdir.

Westgate vd. (2018) yapmış oldukları çalışmada aerogel katkılı sıva üretimi yapmışlardır. Ürettikleri sıva malzemesinin mekanik özelliklerini ve ısısal performansını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda mukavemetinde azalma, termal iletkenlik ve buhar geçirgenliğinde azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Fantucci vd. (2019) yaptıkları çalışmada aerogel katkılı sıva üretimi gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, sıvanın ısı iletim katsayısının $0,05 \text{ W/mK}$ 'lık bir değer olduğunu bildirmişlerdir.

Maia vd. (2021) yaptıkları çalışmada çok katmanlı bir kaplama malzemesinin bir bileşenini aerogel katkılı olarak üretmişlerdir. Ürettikleri bu kaplama malzemesinin ısı iletkenlik ve buhar geçirgenliğini incelemişlerdir. Sonuç olarak, üretilen kaplama malzemesinin açık gözeneklilik oranının %83, kılcal su emme katsayısının $0,129 \text{ kg/m}^2$ gibi yüksek bir değere sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Aerogelin kompozit malzeme üretiminde kullanımı;

Wei vd. (2009) yapmış oldukları çalışmada, silika aerogel %0,5-%0,20 oranında karbon fiber kullanarak kompozit malzeme üretimi yapmışlardır. Çalışmada sonuç olarak aerogel içerisine %20 oranında cam elyaf ikame edildiğinde yoğunluğu özgül yüzey alanın ve ısı iletkenliğin azaldığını bildirmişlerdir.

Zhang vd. (2012) yapmış oldukları çalışmada grafen, Patil vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada, karbon nanotüpler ve Li vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada atapulgit nanofiber katkılı çimento üretimi yapmışlardır. Çalışmalarında sonuç olarak bu katkıların çimento kompozitinde kullanılmasında herhangi bir sakınca olmadığı ve kullanım durumunda ısı yalıtım özelliklerinde iyileşme görüldüğünü bildirmişlerdir.

Shafi vd. (2019) yaptıkları çalışmada, silis dumanı, aerjel ve cam elyaf kullanarak kompozit malzeme üretmişlerdir. Ürettikleri kompozit malzemeleri, yalıtım ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak 0,0194 W/mK ısı iletim katsayısına, 0,58 MPa eğilme dayanımına ve 0,239 g/cm³ yoğunluğa sahip kompozitler üretmişlerdir. Elde edilen bu değerlerin kompozitler için oldukça düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

Cıza (2021) yapmış olduğu çalışmada, Bayburt taşı atıkları ile silika aerjel sentezi gerçekleştirmiş ve bu aerjeli hacimce %25, 50 ve 75 oranında alçı içerisinde kullanarak yüksek yalıtımlı alçı esaslı kompozit malzeme üretmiştir. Çalışma sonunda 0,069 W/mK kadar düşük bir ısı iletkenlik değerine ulaştığını bildirmiştir.

Slosarczyk vd. (2023) çalışmalarında sinterlenmiş uçucu kül agregası ile silika aerjeli kullanarak kompozit malzeme tasarlamışlardır. Hacimce yüzde %30'a kadar silika aerjel kullanımının termal iletkenlik katsayısını 0,70'den 0,51 W/mK'ye düşmesine neden olduğunu ve mekanik parametrelerde önemli bir düşüş yaşandığını bildirmişlerdir.

Taguchi yöntemi uygulamaları;

Tanyıldızı ve Coşkun (2013) silis dumanı katkılı hafif betonun mekanik özelliklerinin tespiti için yaptıkları çalışmalarında silis dumanı değişkenini dört seviyede incelerken, çimento dozajını iki seviyede incelemiş ve L₈ ortogonal dizisi ile deney planı seçmişlerdir. Bu sayede geleneksel deney tasarımına göre 256 deney yapması gerekirken taguchi yöntemi kullanarak 16 deneyle sonuca ulaşmışlardır.

Tanyıldızı (2014), hafif betonun yangın sonrası davranışını taguchi yöntemi ile tasarlayarak araştırmış ve çalışmasında kullandığı ısıtma derecesi ile uçucu kül değişkenleri 3 seviyede tasarıma alınırken, çimento dozajı 2 seviyede tasarıma eklenmiştir. Bu sayede L₁₈ ortogonal dizinin olduğu tasarım seçilmiştir.

Xu vd. (2012) genleşmiş polistirenin hafif agregalı beton ve tuğlanın mekanik özelliklerine etkisini araştırırken taguchi yöntemi kullanmıştır. Yöntemde çimento dozajı, W/C, EPS hacmi ve kum oranı parametreleri seçilmiş ve her parametre için 3'er seviye belirlenmiştir. Bu belirlenen kriterler doğrultusunda L₉ ortogonal dizisi seçilmiş ve 9 karışım ile deney tamamlanmıştır.

Zahedi ve Dehestani (2022) kendiliğinden yerleşen harcın yangın sonrası mekanik özellikleri tespiti için yaptıkları çalışmada, su/bağlayıcı, kireçtaşı, polipropilen elyaf ve çelik elyaf parametrelerini üçer seviyede kullanacak şekilde taguchi yöntemini uygulayarak, L₂₇ ortogonal dizin kullanarak tasarım gerçekleştirmişlerdir.

Li vd. (2022) geri dönüştürülmüş agregalar için beton hazırlık sürecinin optimizasyonunu belirlemek için yaptığı tasarımda su bağlayıcı oranı, kum oranı ve çimentolu malzeme içeriği seçilerek ortogonal L₉ ortogonal dizini belirlenerek taguchi yöntemi uygulanmıştır.

Bakhshi vd. (2023) yapısal hafif perlit betonunun enerji dağıtma kapasitesinin belirlenmesi üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarında taguchi yönteminden yararlanmışlardır. Çalışmada dört seviye ve on değişkenin uygulandığı L₃₂ ortogonal dizini uygulamışlardır.

1.2. AEROJEL

Bugüne kadar insan tarafından yapılmış en hafif katı malzemeler olan aerojeller (Smirnova & Gurikov, 2018; Korkmaz & Kariper, 2020), onları ekstra hafif hale getiren ince, açık gözenek yapısına sahip nano gözenekli katılardır (0,003–0,15 kg/m³). Yüksek gözenekli ve geniş bir yüzey alanına (500-1000 m²/g) sahiplerdir. Aerojel, gevşek bir şekilde paketlenmiş veya bağlanmış parçacıklardan veya bir gazla hacminin her yerine genişleyen ve böylece çok düşük yoğunluklu ve yüksek spesifik yüzey alanı gösteren liflerden oluşan açık bir koloidal veya polimerik ağı sahip katı bir malzeme olarak tanımlanmaktadır (Smirnova & Gurikov, 2017). Aslında, aerojelleri daha iyi yalıtım malzemesi haline getiren yüksek gözeneklilik ve yüksek hava boşluklarının birleşimidir ve ultra hafiftir, bu da inşaat endüstrisinde istenen bir başka özelliktir (Şekil 1).



Şekil 1: Aerojel Örnekleri

Aerogeller, yüksek özgül yüzey alanı, yüksek gözeneklilik, küçük termal iletkenlik, küçük yoğunluk ve büyük akustik direnç gibi birçok mükemmel fiziksel özelliğe sahiptir (Bond & Flamerz, 1987; Mohannan & Brock, 2004). Bu özellikler aerogellerin verimli süper termal yalıtım sistemleri (Cuce vd., 2014; Koebel vd., 2012), ilaç dağıtımı (Simirnova vd., 2004), akustik yalıtım, petrol sızıntısı temizleme (Reynolds vd., 2001), katalizör destekleri (Kogel vd., 2006) ve diğer ileri teknoloji gibi birçok alanda uygulama değerine sahip olmasını sağlamaktadır (Schmidt vd., 1998; Gao vd., 2009; Gibiat vd., 1995; Engel-Herbert vd., 2007).

Aerogeller; silika (Lu vd., 1991; Ehrburger-Dolle, 1995; Hereid, 1995; Rao & Wagh, 1998; Schmidt & Schwertfeger, 1998; Smith vd., 1998), karbon (Job vd., 2005; Kawashima, vd., 2000; Kyatoni, 2000; Yamamoto, 2002), farklı organik malzemeler (Liu vd., 2002; Tamon, & Ishizaka, 1999) veya organik-inorganik kompozitlerden (Chen vd., 2013; Wang vd., 2014) elde edilebilmektedir. Grafen aerogel (Lin vd., 2011), silica aerogel (Dorcheh & Abbasi, 2008; Schmidt & Schwertfeger, 1998), karbon aerogel (Lee vd., 2010) ve cellulose aerogel (Sehaqui vd., 2011) inşaat sektöründe kullanılan aerogellerdir.

Birbirine bağlı nano partikül yapı taşlarına sahip (Kistler, 1931) ve ilk olarak 1930'larda, Samuel Stephens Kistler tarafından üretilen silica aerogel inşaat alanında en çok kullanılan aerogel çeşididir. Yapılarda pek çok amaç için kullanılabilen aerogel, su geçirmezliği yüksek ve hafif bir malzemedir (Kistler, 1941). Havadan neredeyse üç kat daha yoğun ve %95'in üzerinde gözenekliliğe sahiptir. Büyük aerogel partikülleri, mezo gözenekli (~50 nm çapında) ve mikro gözenekli (5–10 nm çapında) partikül ağından oluşmaktadır. Bir başka anlatımla, büyük aerogel partikülleri, küçük nanopartiküllerin kümeleridir (Pierre & Pajonk, 2002). Silika bazlı aerogeller hem iyi sıcaklık direnci (Fesmire, 2006; Ghazi & Wakili, 2017; Wei vd., 2016) hem de basit bir üretim süreci (Koebel vd., 2016; Huber vd., 2017) ile karakterize edilmektedir.

Silika aerogeller, ideal ısı yalıtım özelliklerine sahip bir malzeme sınıfıdır. Mezo gözenekli ağ yapıları nedeniyle, gaz iletkenliği Knudsen etkisi tarafından güçlü bir şekilde bastırılmaktadır. Bu da tipik olarak 25°C'de ve atmosfer basıncında 0,013–0,020 W/mK aralığında rekor düşük toplam termal iletkenlik değerlerine yol açmaktadır. Farklı alanlarda önemli ölçüde süper düşük termal iletkenlik (0,015 W/mK) ve ultra düşük yoğunluk (100 kg/m³) sergilemektedirler (Aegerter vd., 2011; Buratti & Moretti, 2012; Cuce vd., 2014).

Aerogeller, inşaat endüstrisinde, yüksek performanslı sıva (Buratti vd., 2014; Bianco vd., 2015), sıva (Júlio vd., 2016a; Júlio vd., 2016b), harç (Stahl vd., 2012; Abbas vd., 2019; Bostancı, 2020; Mermer & Pişkin, 2018; Ciza, 2021) ve betonda (Gao vd., 2014; Wang vd., 2019; Li vd., 2019; Wang vd., 2018) katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2: İnşaat Sektöründe Aerojel Kullanım Örnekleri

Son yıllarda, hafif/ultra hafif beton üretiminde genleştirilmiş polistiren (Dissanayake vd., 2017; Adhikaryvd., 2019; Xie, 2019; Dixit vd., 2019), poliüretan (Harith, 2018; Chen vd., 2019; Major vd., 2017), volkanik tüf (Hossain, 2005; Pimraksa vd., 2009; Posi vd., 2014; Tchamdjouvd., 2018), diatomit (Pimraksa vd., 2009; Posi vd., 2014), pomza (Chen vd., 2019; Major vd., 2017; Kılıç vd., 2003), genleştirilmiş kil (Ahmad vd., 2019; Rashad, 2018) vb. malzemelerin kullanımı ivme kazanmıştır.

1.3. BETON

Yeryüzünde en yaygın insan yapımı ve tüm dünyada inşaat endüstrilerinde kullanılan önemli malzeme betondur (Shaikh, 2016; Courland, 2011). Oldukça düşük fiyatı, dayanıklılığı, bileşen malzemelerinin mevcudiyeti ve herhangi bir şekil veya boyutta oluşturulabilmesi nedeniyle en yaygın kullanılan yapı malzemesi olarak kabul edilmektedir (Basha vd., 2016; Shaikh, 2016). Beton üretiminde kullanılan bağlama teknikleri ile malzemeler inşaat teknolojisinde önemli bir yeri bulunmaktadır (Lakshmi & Nagan, 2011; Amran vd., 2020). Erişilebilirliği, şekillendirilebilirliği ve ekonomik olması nedeniyle yapı malzemeleri arasında tercih edilmektedir.

Beton, gerekli durumlarda belirli amaçlarla kullanılan agrega (kum ve çakıl), çimento, su ve kimyasal ile belirli oranlarda kullanılan mineral katkı maddelerinin karıştırılmasıyla elde edilen kompozit bir yapı malzemesidir (Amali, 2009; Betaubun & Hairulla, 2018; Jahami vd., 2020; Vdovin & Stroganov, 2020; Karaburç, 2020; Kashevarova & Tonkoy, 2020). Beton bir kompozit olduğundan, betonun kalitesi her bir şekillendirme malzemesinin kalitesine bağlıdır (Elvira, 2016; Ervianto vd., 2016; Laksono, 2017). Betonun özellikleri, karışımda kullanılan malzemelerin özellikleri ve karışım oranları ile yakından ilgilidir. Özellikleri aynı olmayan malzemeler ve bazı katkı maddeleri kullanıldığında birbirinden farklı özelliklerde beton elde edilebilmektedir (Krausmann, 2018).

Karışımı oluşturan malzemeler bir araya getirilip karıştırılmaya başlandığında, su ve çimentonun hidratasyon adı verilen reaksiyonu sonucunda plastik kıvamda beton üretilir (Ersoy & Özcebe, 2001).

Betonu diğer yapı malzemelerinden üstün kılan en önemli özelliklerinden biri üretildiğinde plastik kıvamda olmasıdır. Hazneye dökülen beton 1-10 saat arasında katılaşır ve zamanla mukavemet kazanır. Betonun katılaşmasına rijitleşme, zamanla dayanım kazanmasına ise betonun sertleşmesi denir. Beton ilk 28 günde gerçek dayanımının %60-90'ına ulaşır. Bu değerin %100'e ulaşması uzun yıllar alır (Elmas, 2020).

Beton genellikle basit binalar ve minimum risk ile yükselmeyen binalar için kullanılmaktadır (Syaiful, 2021).

Betonun tarihi, betonun bileşimi olan çimento hamuru ile başlar ve en eski çimento hamuru İsraili jeologlar tarafından Negrev çölünde on iki milyon yıllık bir kaya oluşumu içinde keşfedilmiştir (Courland, 2011). Bu malzemenin gelişmesinde insanoğlunun merakı ve çevre koşullarından korunma gerekliliği önemli rol oynamıştır. Beton, beton bileşeni olarak kullanılabilecek yeni malzemelerin keşfedilmesi veya yeni teknoloji geliştirme yoluyla geliştirilebileceği anlamına gelen yenilikçi bir malzemedir.

1.3.1. Betonun Sınıflandırılması

Betonlar; basınç dayanımları, üretim yerleri, yoğunlukları ve özel betonlar olarak gruplara ayrılmışlardır.

Basınç dayanımlarına göre betonlar;

- Düşük Dayanımlı Betonlar: 28 günlük basınç dayanımı < 20 MPa olan betonlardır.
- Normal Dayanımlı Betonlar: $20 \text{ MPa} < 28$ günlük basınç dayanımı < 40 MPa olan betonlardır (Serinoğlu, 2011; Bakır, 2011).
- Yüksek Dayanımlı Betonlar: 28 günlük basınç dayanımı > 40 MPa olan betonlardır (Yılmaz, 2017; Serinoğlu, 2011).

Birim ağırlıklarına göre betonlar;

- Hafif Beton: Etüv kurusu durumundaki yoğunluğu $< 2000 \text{ kg/m}^3$ olan betonlardır (TS EN 206-1, 2002).
- Normal Beton: $2000 \text{ kg/m}^3 < \text{Etüv kurusu durumundaki yoğunluğu} < 2600 \text{ kg/m}^3$ olan betonlardır (Serinoğlu, 2011; TS EN 206-1, 2002).
- Ağır Beton: Etüv kurusu yoğunluğu $> 2600 \text{ kg/m}^3$ olan betonlardır (TS EN 206-1, 2002).

Üretildikleri yerlere göre betonlar;

- Şantiye betonu: beton karışım malzemelerinin şantiye içerisinde elle veya betonyer ile karıştırılması sonucu elde edilen betonlardır. Üretimi kalifiye işçiler tarafından yapılmaktadır.
- Santral betonu: Karışımının hazır beton fabrikalarında yapıldığı ve kullanılacak alana transmikser vasıtasıyla taşınan betonlardır.

Özel betonlar;

- Lifli betonlar; Betonun iyi olmayan özelliklerinin çeşitli boyut ve miktarlarda lifler kullanılarak üretilen betonlardır. Üstün mekanik özellikleri, sünekliği ve çatlama direnci nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Aghaee & Khayat, 2021).
- Kütle betonu; Çimentonun su ile yapmış olduğu reaksiyon sonucu oluşan hidrasyon ısı ve bunun sonucunda meydana gelen hacim değişikliğinden dolayı oluşan termal çatlakların alt seviyelere çekilmesi için üretilen betonlara denir (Tezel, 2020).
- Vakumlu beton; taze betonda betonun işlenebilirliği için kullanılan suyun vakum yardımıyla kontrollü bir şekilde beton içerisinde uzaklaştırılması ile elde edilen betonlara denir.
- Püskürtme beton; yüksek hava basıncı ile istenilen yüzeye püskürtülen ve kendi kendine sıkışan betonlardır. Genellikle tünel işlerinde kullanılmaktadır (Kale, 2020).
- Ferrocement beton; eşit aralıklarla yan yana dizilen demirlere çok katmanlı tel örgülerin birleştirilmesi ve donatıların tamamen harç ile kaplanması sonucu elde edilen betonlardır. Genellikle deniz yapılarında ve tarım alanlarındaki yapılarda kullanılmaktadır.
- Silindirle sıkıştırılmış beton; betonun kamyonlarla taşınıp, buldozer yardımıyla yayılan ve vibratörlü silindir ile sıkıştırılan betonlara denilmektedir. Üretiminin hızlı, maliyetinin düşük ve dayanıklılığının yüksek olması silindirle sıkıştırılmış betonu cazip kılmaktadır (Aghabaglou vd., 2020).
- Kendiliğinden yerleşen beton; herhangi bir şekilde kalıplara, kalıplardan ayrılma, terleme ve ayrışma olmadan ve ek mekanik sıkıştırmaya ihtiyaç duymadan yerçekimi ekişi ile sıkıştırılan özel reolojik özelliklere sahip betonlara denir (Dybel, 2021).
- Su altı betonu; Suyun altında bulunan beton döküm işleminin zor olduğu köprü ayakları ve bazı deniz yapılarında kullanılan betonlardır (Kale, 2020).
- Hava sürüklenmiş beton; Çimento hamurunda birbirine çok yakın mesafede fakat birbiriyle bağlantısı bulunmayan çok sayıda hava kabarcığından oluşan betonlara denir (Tezel, 2020).

1.3.2. Betonun Avantajları ve Dezavantajları

Betonun avantajları;

- Taze haldeyken istenilen şekil ve boyutlarda üretim yapılabilir.
- Sertleşmiş beton yerinde üretildiği gibi herhangi bir fabrikada üretildikten sonra serleşmiş halde yapıya monte edilebilir.
- Betonu yerleştirme olanakları fazla bununla beraber yerleştirme işlemi de kolaydır.
- Beton sertleşmiş haldeyken yüksek basınç dayanımına sahiptir.
- Sertleşmiş beton hizmet ömrü boyunca diğer yapı malzemelerine oranla daha az yıpranmakta, bakımı ve onarımı kolay yapılmaktadır.
- Çelik donatılarla aderansı oldukça iyidir.
- Estetik amaçlar için de kullanılabilen beton diğer yapı malzemelerine oranla daha ekonomiktir.

Betonun dezavantajları;

- Beton sertleşmiş haldeyken çekme dayanımı oldukça düşüktür.
- Beton sertleşmiş gevrek bir malzemedir.
- Atmosfer şartlarından etkilenmekte ve hacim değişikliğine uğramaktadır.
- Sabit yükler altında kalıcı deformasyonlara maruz kalmaktadır.
- Dayanım/ağırlık oranı metallere kıyasla oldukça düşüktür (Güldür, 2013).

1.4. HAFİF BETON

Hafif betonun inşaat ve altyapıdaki önemi nedeniyle tüketimi dünya çapında artmaktadır (Tayeh vd., 2021). İki bin yıla aşkın bir geçmişi olan hafif betonun teknik gelişimi halen devam etmektedir (Thienel vd., 2020). Sürdürülebilirlik perspektifinden bakıldığında, hafif beton sayısız yapısal ve mimari çözümlere katkıda bulunmaktadır. Hafif beton, yapı üzerindeki ölü yüklerin azaltılması, yoğunluğunun düşük olması daha etkili bina yalıtımı, daha etkili ses yalıtımı ve daha düşük nakliye maliyetleri gibi özellikleriyle normal ağırlıklı betona göre daha avantajlıdır (Riez vd., 2010; Roberz vd., 2017; Amin & Tayeh, 2020; Sikora vd., 2020).

Hafif betonun düşük yoğunluk, elverişli yapı fiziği ve yüksek yangın direnci gibi fiziksel özellikleri, gelecek vaat eden bir malzemenin (Cavalline vd., 2017; Fares vd., 2015; Robertz, 2017; Samson, 2017) ve mükemmel dayanıklılığının (Liu vd., 2010; Helland vd., 2010; Lotfy vd., 2016) temel özellikleridir (Real, 2016).

Hafif beton, yüksek bina duvarlarının, kaldırımların, metal yapıların, prefabrik panellerin ve üst yapıların yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır (Agwa vd., 2020; Holm & Ries, 2007).

19. ve 20. yüzyıllarda endüstriyel olarak üretilen hafif agregaların gelişimi, hafif beton teknolojisi için tarihi bir dönüm noktası olmuştur (Mousa vd., 2018; Thienel, 2020).

Hafif betonlar, antik çağlardan beri bilinmekte ve temel olarak günümüz betonunun öncüsü sayılmaktadır. Hafif betonun ilk Avrupa referansları, iki bin yıl önce Roma İmparatorluğu'nun başlarında inşa edilmiştir. İtalya'nın Roma kentindeki Pantheon, M.Ö. 128 A.D. en iyi bilinen örneklerden biri olarak gösterilmektedir. Yüzlerce yıldır çeşitli disiplinlerden mühendisleri şaşırtmış ve Opus Caementitium'da çeşitli doğal hafif agregaların sistematik kullanımını etkileyici bir şekilde göstermiştir (Lamprecht, 1996). Roma İmparatorluğu'nun çöküşünden sonra, doğal, volkanik agregaların düşük mevcudiyeti ve değişkenliği nedeniyle hafif beton kullanımı sınırlandırılmıştır (Chandra & Berntsson, 2002; Expanded Clay and Slate Institute, 1971).

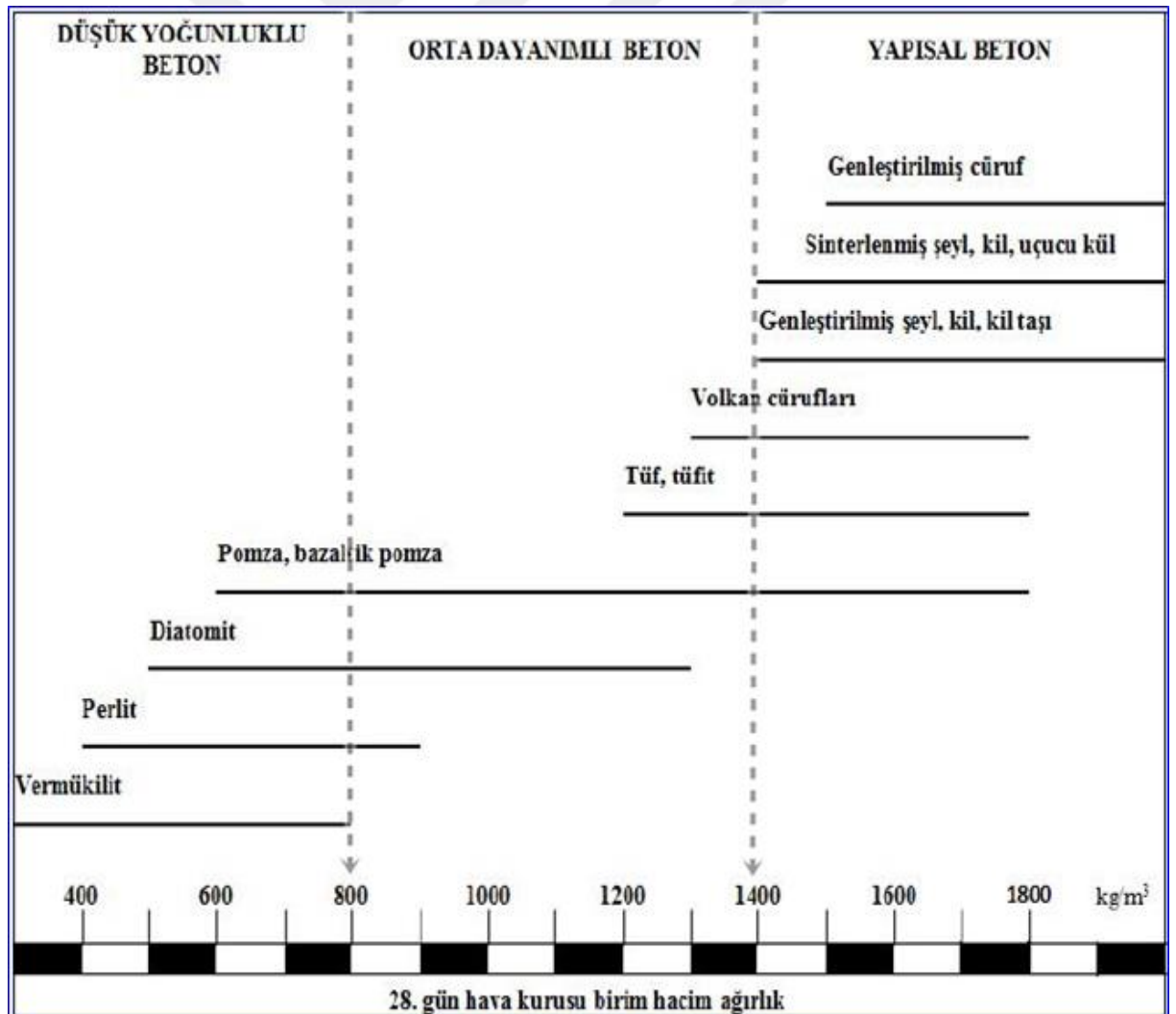
Başlangıçta, geliştirilmiş agregaların kullanımı Amerika Birleşik Devletleri Donanmasında kullanılmıştır. İlişkili ABD Acil Durum Filosu İnşa Kurulu, ABD'nin I. Dünya Savaşı'na girmesiyle birlikte bir gemi inşa programı oluşturmuştur. 1918'de Atlantis bu programdan çıkan ilk gemi olmuş ve toplamda 14 hafif beton gemi gövdesi inşa edilmiştir. Bu erken deneyimler sayesinde, İkinci Dünya Savaşı sırasında kargo kapasiteleri 3.200 ila 140.000 ton arasında değişen 104 tedarik gemisinin konuşlandırılmasına yol açmıştır (Thienel vd., 2020).

Gemi yapımında başarılı kullanımı, hafif betonun yapı mühendisliğine girmesini sağlamıştır. 1920'lerde, hafif betonda agrega olarak genişletilmiş arduvaz kullanılarak birkaç köprü inşa edilmiştir. Elli yıl sonra Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'da 200'den fazla hafif beton köprü inşa edilmiştir (Thienel vd., 2020). 20. yüzyılın ortalarında, yapı mühendisliğinde hafif beton kullanımı yoğunlaşmıştır. Prudential Plaza Building veya Chicago'daki Marina City Towers gibi çok katlı yüksek binaların yapımına neden olmuştur. Bununla birlikte, hafif beton ağırlıklı olarak yapısal nedenlerle kullanılmıştır. Hafif betonun mimari tarafından bilinçli bir şekilde uyarlanması büyük ölçüde bireysel durumlarla sınırlı kalmıştır. 1973'teki petrol krizinin bir sonucu olarak Almanya, enerji tüketimine ilişkin siyasi konumunu yeniden gözden geçirmiştir. Enerji ithalatından daha bağımsız hale gelmek için, mantıklı bir sonuç olarak Enerji Tasarrufu Yasası hayata geçirilmiştir. Diğer şeylerin yanı sıra binalarda enerjinin verimli kullanımı siyasi bir zorunluluk haline gelmiştir. Ekonomik kalınlığa sahip hafif betondan yapılmış monolitik dış duvarlar, artan ısı yalıtım gereksinimlerini artık

karşılamamaya başlamıştır. 1990'lerden beri, Almanya'da betonarme binalar için teknik düzenlemeler revize edilmiştir. Hafif betonların kullanımı, bu yeni düzenlemelerin yanı sıra hem teknolojiye hem de bilimde devam eden gelişmeler nedeniyle bir yükseliş yaşamıştır. Ancak, gerçekleştirilen örneklerin sayısı nispeten düşük kalmıştır. Son gelişmeler, yeterli ve mümkün olduğu kadar yüksek bir dayanım sağlarken, beton yoğunluğunun daha da azaltılmasını amaçlamaktadır. Son yıllarda en düşük dayanım ve yoğunluk sınıflarında açık yüzölçümlü hafif betonlardan yapılan monolitik yapılar Avrupa'da popülerlik kazanmıştır. Bu yapılar tek işlemde bitmiş bir duvarın inşasını sağlamakta ve böylece çok katmanlı duvar yapılarının kullanılmasını engellemektedir (Thienel, 2007).

1.4.1. Hafif Betonun Sınıflandırılması

Hafif betonlarda sınıflandırma agrega türü baz alınarak birim hacim ağırlık ve dayanım özelliklerine göre yapılmaktadır (Neville, 2011). Şekil 3'de hafif betonlar düşük yoğunluklu beton, orta dayanımlı beton ve yapısal beton olmak üzere üç gruba ayrılmıştır (Özdişi, 2019).



Şekil 3: Hafif Beton Sınıflandırması

Düşük dayanımlı hafif beton;

Genellikle üretiminde vermikülit, perlit ve pomza gibi doğal hafif agregalar kullanılmaktadır. Bu betonların ısı iletimi düşüktür. 28. Gün hava kurusu birim hacim ağırlıkları 800 kg/m^3 ün altındadır. Basınç dayanımı ise 0,7-7 MPa arasındadır (ACI, 2014).

Orta dayanımlı hafif beton;

Agrega olarak tüf, tüfit, volkanik cürufklar ve diatomit kullanılmaktadır. 28. Gün hava kurusu birim hacim ağırlıkları 800 ila 1400 kg/m^3 ün arasında değişmektedir. Basınç dayanım değerleri ise 7-17 MPa'dır. Isı iletimleri geleneksel betona kıyasla daha düşüktür (ACI, 2014).

Yapısal hafif beton;

Üretiminde genleştirilmiş şeyl, uçucu kül, pomza, kil ve kil taşı gibi doğal agregalar kullanılmaktadır. 28. Gün hava kurusu birim hacim ağırlıkları 1400 - 1900 kg/m^3 ün arasında değişmektedir. Basınç dayanım değerleri ise 17 MPa'nın üzerindedir. Düşük yoğunluklu ve orta dayanımlı betona göre yüksek, geleneksel betona göre düşük ısı iletim özelliğine sahiptir (ACI, 2014).

1.4.2. Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Hafif betonun fiziksel ve mekanik özellikleri oluşumunda rol oynayan diğer malzemelerin özellikleri ile ilişkilidir. Beton prizini aldığı anda bünyesinde bir takım değişiklikler meydana gelmiştir. Bu değişikliğin fiziksel ve mekanik özelliklerle bağlantılı olduğu bilinmektedir. Fiziksel ve mekanik özellikler;

- Birim hacim ağırlık
- İşlenebilirlik
- Dayanım
- Agregas matris aderansı
- Yoğunluk
- Su emme
- Yüksek sıcaklık etkisindeki değişimler
- Aşınma direnci (Çalışkan, 2015).

1.4.3. Hafif Beton Kullanım Alanları

Yapılarda hafif malzeme kullanımı binaya etki eden deprem yükü, ekonomiklik, ısı ve ses izolasyonu, yangına karşı dayanım gibi sorunların çözümü için etkili bir yol olmaktadır (Bingöl & Gül, 2004).

Hafif betonlar sadece yapı elemanı olarak değil aynı zamanda farklı fonksiyonlar içinde inşaat alanında aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlar;

- Çatı ve ara kat ısı yalıtım malzemesi olarak,
- Yangın önleyici boşlukların inşa edilmesi,
- Geleneksel binaların tavan sıva malzemesi olarak,
- Dolgu malzemesi olarak,
- Taşıyıcı olmayan duvar uygulaması,
- Kanalizasyon işlemleri,
- Zemin stabilizasyonu (Ekinci, 2008).

1.4.4. Hafif Betonun Avantajları ve Dezavantajları

Hafif betonun avantajları;

- Yapının ölü yükünü azaltmaktadır.
- Düşey kuvvetlerin azalmasıyla yapıya etki eden deprem yükü azalmaktadır.
- Betonarme elemanların kesit alanlarında azalma meydana gelmektedir.
- Isı iletim katsayısı düşüktür.
- Yangın dayanımı yüksektir.
- Yerinde uygulama ve nakliye basit olması endüstriyel üretime olanak sağlamaktadır.
- Yüksek ısı ve ses yalıtım özelliğine sahiptir (Güçlüer, 2019).

Hafif betonun dezavantajları;

- Basınç dayanımı düşüktür.
- Rötne, sünme, su emme değerleri geleneksel betona kıyasla daha yüksektir.
- Yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri için kalifiye işçilik gerekmektedir.
- Aşınma direnci yüksektir.
- Geleneksel betona kıyasla daha fazla çimentoya ihtiyaç duyması beton maliyetini arttırmaktadır (Dikici, 2010).

1.5. DENEY TASARIMI

1900'li yıllarda Sir Ronald Fisher tarafından deneysel tasarım ilk kez geliştirilmiştir. Deney tasarımının uygulanması ile süreci etkileyen faktörler ile sürecin çıktıları arasında ki ilişki belirlenmeye çalışılmakta ve bunun için uygulanan etkili ve sistematik bir yöntemdir. Deney tasarımının uygulanmasının etkili ve sistematik olması, süreci etkileyen faktörler ile sürecin çıktıları arasında ki ilişki belirlemede etkili bir metod olmasını sağlamıştır. Yöntemin temelinde sebep/sonuç ilişkisinin etmenleri araştırılmakta ve uygulanacak yöntemin tespitinde

etkili bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır (Bowden vd., 2019; Antony, 2014; Kechagias vd., 2020).

Geleneksel yöntemde, uygulanacak deney parametreleri belirlenirken, bir parametre sabit tutulur ve diğer parametreler sırayla değiştirilir ve bu döngü devam etmektedir (Taşgetiren & Gökçe, 2009). Geleneksel yöntemde parametreler arası etkileşimin göz ardı edilmekte ve çok zaman ve maliyet gerekmektedir (Breyfogle, 2003).

Günümüzde “tam faktöriyel yöntem, yanıt yüzeyi yöntemi, kesirli faktöriyel yöntem ve taguchi yöntemi” deney tasarımı uygulanan çalışmalarda en çok kullanılan yöntemlerdir.

Yukarıda bahsedilen olumsuzluklar nedeniyle deney tasarımları oluşturmak bir ihtiyaç haline gelmiştir.

1.5.1. Taguchi Yöntemi

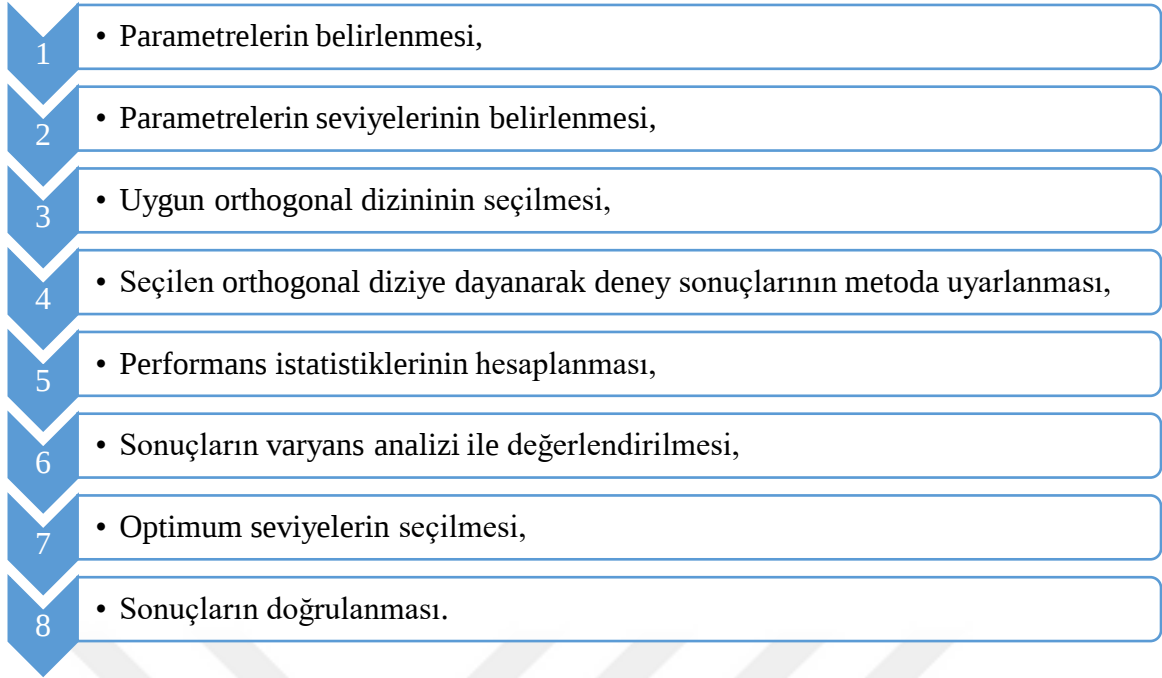
Tez çalışmasında deney tasarımı oluşturabilmek için uygulanacak parametrelerin optimizasyonu ve bu parametrelerin deney sonuçları üzerindeki etkisini belirlemek için “Taguchi Yöntemi” kullanılmıştır.

1940’lı yıllarda mühendis ve bilim insanı olan Dr. Genichi Taguchi’nin geliştirdiği, 1980’ler de ise tüm dünya da kullanımının yaygınlaştığı bir tekniktir. Taguchi yönteminin ana prensibi az sayıda deney yapmak suretiyle tam faktörlü çalışma sonuçları elde etmeyi hedefleyen bir optimizasyon yöntemidir. Uygulanan teknik sayesinde maliyet düşmekte, sonuçlara daha kısa sürede ulaşılabilen, tasarımda kullanılan parametrelerin sonuç üzerinde ki etkisinin belirlenmesi için geliştirilmiş bir optimizasyon yöntemidir (Samuek, 1998).

Geleneksel deney tasarımının yerine kullanılabilen, kullanılan parametre ve seviye sayılarına göre farklı ortogonal diziler kullanılarak deney sayısını azaltan bir yöntem olduğu ve literatürde yer aldığı gözlenmiştir (Uçurum vd., 2021; Hınıslioğlu & Bayrak, 2005).

Taguchi yöntemi ile araştırmacılar, deney sayısı çok fazla olan konularda çok büyük kolaylık yaşamaktadır. Bu yöntemde kontrol edilebilen parametreler ve seviyelere göre ortogonal dizinler (OA) şeklinde bilinen standartlaşmış tablolar kullanılmaktadır. Seçilen ortogonal dizin sayesinde çok az sayıda deney ve çalışma uygulanarak parametrelerin etkileri belirlenmektedir.

Taguchi yöntemi uygulanan optimizasyon aşamaları Şekil 4’de gösterilmektedir (Serencam & Uçurum, 2019);



Şekil 4: Taguchi Yönteminin Aşamaları

Farklı seviye ve faktörlere göre geliştirilmiş orthogonal dizi çeşitleri ile tam faktöriyel deney sayılarının karşılaştırılması Tablo 1’de verilmiştir (Aktürk, 2021).

Tablo 1: Farklı Parametre ve Seviyelerle Uygulanan Deney Sayılarının Karşılaştırması

Taguchi Ortogonal Dizi	Parametreler	Seviyeler	Taguchi Yöntemi Deney Sayısı	Tam Faktöriyel Deney Sayısı
L ₄	3	2	4	8
L ₈	7	2	8	128
L ₈	2	4-2	16	256
L ₉	4	3	9	81
L ₁₆	5	4	16	1024
L ₁₆	15	2	16	32768

Çok parametrelili deneylerde uygulanan deney tasarımında, deneylerde varyasyonu azaltmak için, sinyal / gürültü oranı (S/N) diye adlandırılan optimizasyon kriterleri kullanılarak performans istatistikleri incelenmektedir.

Yapılan tasarımda, zamandan tasarruf ettiğimiz en düşük maliyetle ortaya çıkan “optimum” durum elde edilmektedir (Çolak, 2020).

Deney tasarımında parametreler arasındaki etkileşimin araştırılması da önemli bir etkidir. Gerçekleştirilen deneyde varyans analizi (ANOVA) ile bu durum araştırılmaktadır. ANOVA, çalışmada kullanılan her bir faktörlerin etki derecesinin bulunması amacıyla yapılmaktadır (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

İKİNCİ BÖLÜM

Tez çalışmasında, yerel kaynaklarımızdan olan Bayburt taşı atıkları kullanılarak silika aerogel sentezi gerçekleştirmek ve sentez sonrası elde edilen silika aerogelin hafif betondaki etkileri araştırılmıştır. Bu bölümde silika aerogel sentezi ile hafif beton numunelerinin hazırlanması aşamalarında kullanılan malzemelere ait bilgiler ve gerçekleştirilen deneyler açıklanmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. BAYBURT TAŞI

Bayburt, kuzeyinde Rize ve Trabzon, güneyde Erzincan, doğuda Erzurum, batıda Gümüşhane illeriyle çevrili Karadeniz bölgesinde yer alan bir şehirdir (Çimen & Akpınar, 2021). Şehrin konumu Şekil 5’de gösterilmiştir.



Şekil 5: Bayburt İl Haritası

Bayburt jeolojik yapısından ötürü farklı maden yataklarının oluşmasına olanak sağlamaktadır (Aykut, 2017). Bayburt ve çevresinde bulunan, volkanik patlamalar sonucu meydana gelen tüf ve tüfitlere Bayburt Taşı (BT) denilmektedir (Can, 2022). İlde BT dışında kireçtaşı, mermer, kumtaşı, traverten, granit, hematit, bazalt gibi farklı kayaç türlerine de rastlanmaktadır. BT bölgede en çok kullanılan endüstriyel hammadde kaynağıdır. Birim hacim ağırlığının düşük olması ve kolaylıkla işlenebilme özelliğine sahip olması nedeniyle camii süslemelerinde ve tarihi eserlerin onarım işlemlerinde kullanılmaktadır (Şahin, 2018).

Yapı malzemesi olarak kullanılan BT, il ekonomisine önemli katkılar sağlamaktadır. 2005 yılında Bayburt Valiliği’nden gelen talep doğrultusunda ilde ve çevresinde çok sayıda etüt çalışmaları sonucunda 2.535.700 ton görünür rezerv BT olduğu tespit edilmiştir (MTA, 2005).

İç ve dış cephelerde kaplama malzemesi olarak kullanılan BT, yeşil, bej ve beyaz renklerde (Önenç, 2002). Ayrıca yapı dış kabuğunda dekoratif malzeme olarak, mihrap, barbekü, mezar ve duvar elemanı üretiminde de kullanılmaktadır (Öksüzer, 2016).

BT'nın hem taş ocaklarından çıkartılırken uygulanan teknik hem de işlenme aşamasında modern teknolojinin kullanılmaması nedeniyle %70'lere ulaşan atık malzemenin ortaya çıktığı görülmektedir (Yılmaz, 2015).

Taş ocaklarında gerçekleştirilen incelemeler neticesinde en fazla beyaz renkli Beyaz Bayburt Taşı (BBT) 'nın atık halde bulunduğu gözlenmiştir. BBT atığının fazla olması deneysel çalışmalarda BBT tercih edilme nedenidir. BT'nın taş ocaklarında ki görünümü Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6: Bayburt Taşının Taş Ocaklarında ki Görünümü

BBT'nın kimyasal özellikleri Tablo 2'de (Öksüzer, 2016), fiziksel ve mekanik özellikleri ise Tablo 3'de sunulmuştur (MTA, 2005).

Tablo 2: BBT'nın Kimyasal Özellikleri

Oksitler (%)	BBT	TS EN 450-1	TS EN 197-1	ASTM C 618
SiO ₂	68,92			
Al ₂ O ₃	11,96			
Fe ₂ O ₃	0,34			
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	81,22			>70,00
CaO	3,85			
MgO	1,29		<5,00	
SO ₃	0,21	<3,00		<5,00
Na ₂ O	0,23			
K ₂ O	2,38			
Toplam	99,31			
Kızdırma Kaybı	10,13	<5,00		<6,00

Tablo 3: BBT'nın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Sertlik	(Mohs)	4-5
Birim Hacim Ağırlık	(gr/cm ³)	1,69
Atmosfer Basıncında Su Emme	(Ağırlıkça %)	12,2
	(Hacimce %)	20,6
Kaynar Suda Su Emme	(Ağırlıkça %)	13,1
	(Hacimce %)	22,0
Görünür Porozite	(%)	20,6
Don Kaybı	(%)	0,22
Doluluk Oranı	(%)	70,1
Gözeneklilik Derecesi	(%)	29,9
Ortalama Aşınma	(cm ³ /50cm ²)	25,6

2.2. ÇİMENTO

Çalışmalarda Erzurum il sınırları içerisinde bulunan Aşkale Çimento San. A.Ş tarafından TS EN 197-1 (Çimento, Bileşim özellikleri ve Uygunluk Kriterleri) standardına göre üretilen CEM I 42,5 R sınıfı portland çimentosu hafif beton üretiminde kullanılmıştır (Şekil 7). Tablo 4’de kullanılan çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri verilmiştir (TS EN 197-1, 2012).



Şekil 7: Kullanılan Çimento

Tablo 4: Çimentonun Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

Analiz	Ok	Değer	Analiz	Deneysel	Değer
Kimyasal (%)	Ca	63,5	Fiziksel	Özgül Yüzey (cm ² /g)	3320
	Al ₂	5,35		Hacim Genleşme (mm)	1,2
	Fe ₂	3,30		Su İhtiyacı (g)	28,5
	SiO	20,41		Yoğunluk (g/cm ³)	3,12
	SO	2,93		Priz Başlama Süresi (dk)	163
	Mg	1,65		Priz Bitirme Süresi (dk)	240
	Na ₂	0,15	Mekanik	Gün	MPa
	Cl	0,011		2	28,2
	K ₂	0,71		7	42,7
	HC	0,28		28	51,4

2.3. KARIŞIM SUYU

Aerojel sentezleme aşamalarında laboratuvar ortamında kullanılan saf su kullanılmıştır. Hafif beton numunelerinin üretimin aşamasında ise karışım suyu olarak içerisinde organik madde ve madensel tuzlar içermeyen içme suyu kullanılmıştır.

2.4. KİMYASAL MALZEMELER

Silika aerojel sentezinde kullanılacak olan hidroklorik asit (HCl), trimetilklorosilan (TMCS), etanol (C₂H₆O), n-Heptan (C₇H₁₆) ve sodyum hidroksit kimyasal malzemeleri Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir.

2.5. DENEYLERİN GERÇEKLEŞTİĞİ LABORATUVARLAR VE DENEY PROSESİ

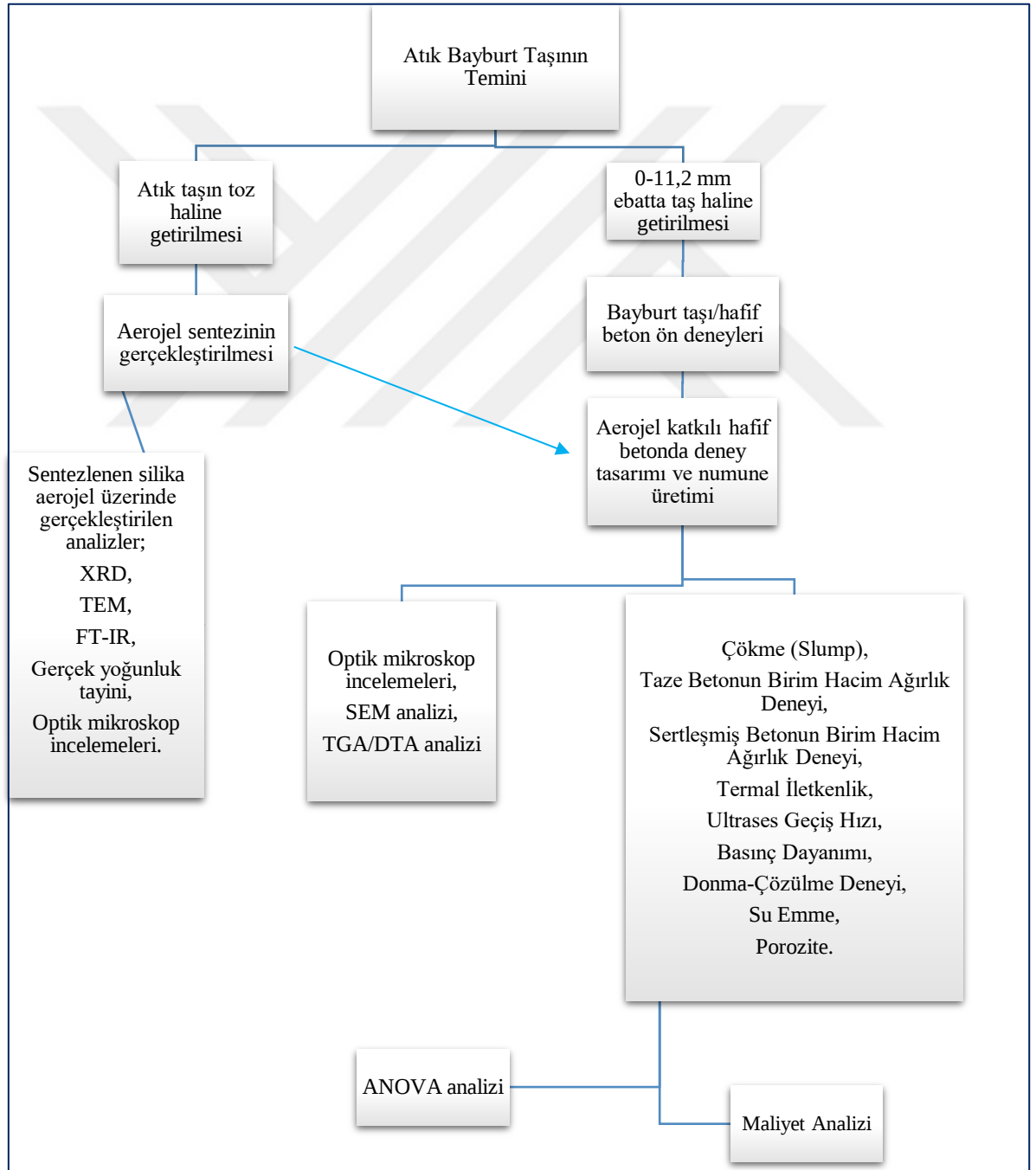
Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneyler Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (BUMER), Bayburt Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda (BUMFYML) ve deneylerin açıklama kısımlarında belirtilen üniversitelerde gerçekleştirilmiştir.

BUMER'de silika aerojel sentezinin gerçekleştirilmesi için beher, ısıtıcı manyetik karıştırıcı, pH metre, etüv, hassas terazi, vakum pompası ve filtre kağıdı kullanılmıştır.

BUMFYML'da terazi, laboratuvar tipi konkasör, etüv fırını, elek, numune kalıpları ile kür havuzu kullanılmıştır.

Tez çalışmasında gerçekleştirilen numune temini, silika aerojel sentezi, karakterizasyon analiz ve deneyler Şekil 8'de özetlenmiştir.



Şekil 8: Tez Çalışma Prosesi

2.6. SİLİKA AEROJEL SENTEZİ

Silika aerjel sentezinin gerçekleşmesi iki aşamada meydana gelmektedir. Bu aşamalar ise şu şekildedir.

İlk aşamada; hem aerjel sentezinde hem de hafif beton numune üretiminde kullanılacak olan Bayburt taşı atıkları, ilin sanayi bölgesinde bulunan taş ocağının atık sahasından 5 – 30 cm arasına değişen ebatlarda toplanarak deneylerin yapılacağı laboratuvara getirilmiştir (Şekil 9).



Şekil 9: BBT'nın (a) Atık Sahasındaki ve (b) Laboratuvara Getirilmiş Hali

BUMFYML'na atık halde getirilen taş, laboratuvar tipi konkasörde kırılmış ve 0-16 mm ebatlarında taş elde edilmiştir ve bir kısım atık taşta yatay ekseninde hareket eden bilyalı değirmen vasıtasıyla toz şekline getirilmiştir (Şekil 10). Kırılma ve toz haline getirme işleminin ardından numuneler 24 saat boyunca 105 °C'de etüv fırınında kurutulmuştur. Toz haline getirilen atık taş hava ile temas etmeyecek şekilde plastik poşetlere konularak daha sonra kullanılmak üzere saklanmıştır.



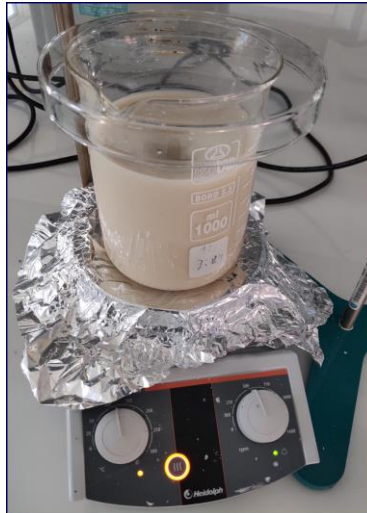
Şekil 10: BBT'nın (a) Kırılmış ve (b) Toz Haline Getirilmiş Hali

İkinci aşamada ise; BUMER'de gerçekleştirilen silika aerojel sentezi üretim proseslerinin her bir adımında çeşitli kimyasal malzemeler kullanılmaktadır. Bu kimyasalların prosesdeki temel işlevleri ise;

- Başlangıçta katalizör olarak, jel elde etmek için hidroklorik asit (HCl),
- Yüzey modifikasyonu ve hidrofobizasyonunda trimetilklorosilan (TMCS),
- Çözücü değişimi için etanol (C_2H_6O), n-Heptan (C_7H_{16}),
- Sodyum Silikat (Na_2SiO_3) sentezi için sodyum öncüsü olarak kullanılan boncuk formundaki sodyum hidroksit kullanılmıştır (Şekil 15).

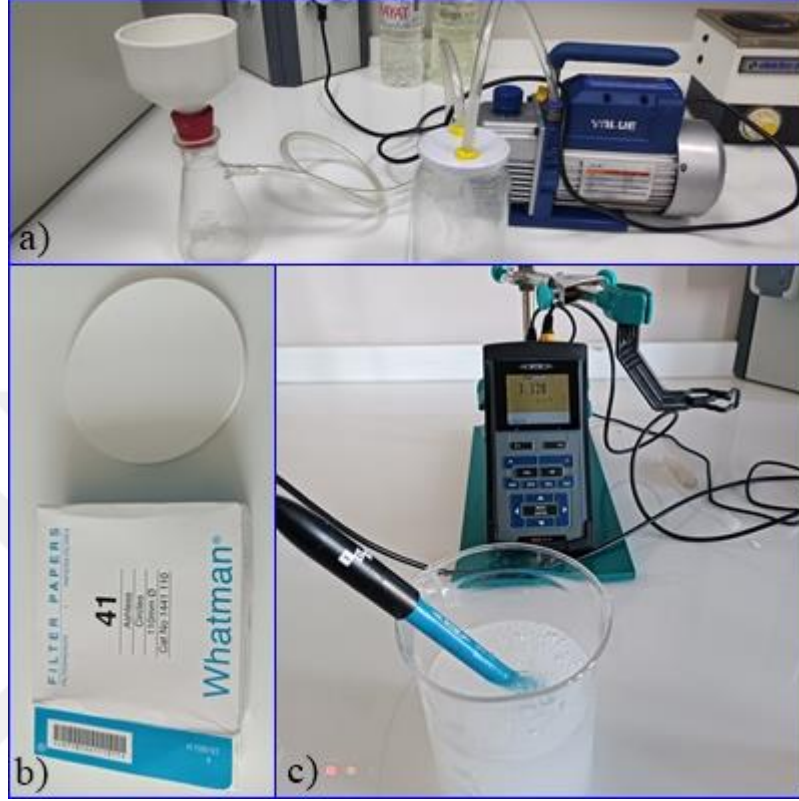
Gerçekleştirilen ön deney süreçleri neticesinde aşağıda belirtilen prosesin uygulanmasına karar verilmiştir.

Daha önce işlemlere maruz kalmış 40 g BBT tozu 500 ml beher içerisinde potasyum hidroksit ve saf su belirli miktarlarda karıştırılmasıyla sodyum silikat elde edilmiştir. Ardından elde edilen karışım 4 saat boyunca $150\text{ }^{\circ}C$ 'de sıcaklıkta ısıtılma tabi tutulmuştur (Şekil 11).

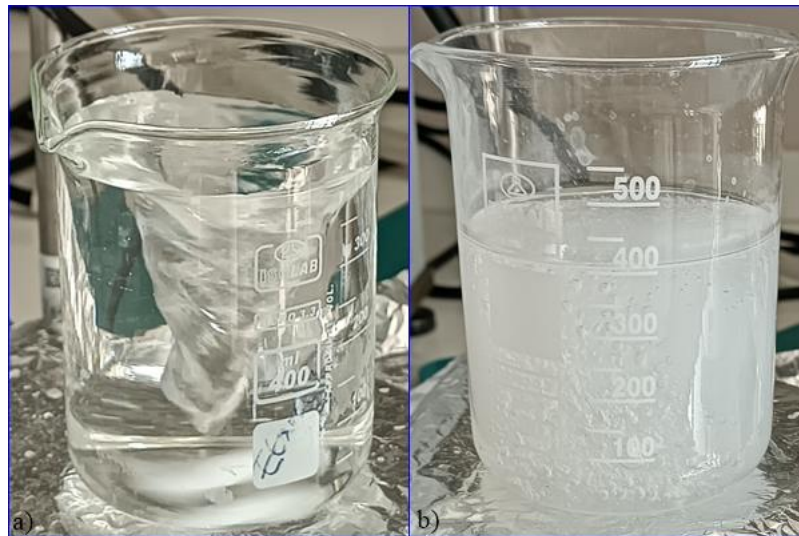


Şekil 11: Isıl İşlem Uygulanması

Isıl işlem tamamlandıktan sonra karışım vakum pompası yardımıyla filtre kâğıdı kullanılarak süzölmüştür. Filtre kâğıdı altında kalan karışım pH değeri 1 oluncaya dek 5 molarlık hidroklorikasit ile kaynama sıcaklığında 2 saat süresince karıştırma gerçekleşir (Şekil 12). Bu süreçte karışımında jelleşme süreci gözlenmiştir (Şekil 13).



Şekil 12: Deneylerde Kullanılan; (a) Vakum Pompası, (b) Filtre Kağıdı ve (c) pH Metre



Şekil 13: Karışımın; (a) Jelleşmeden Önceki ve (b) Jelleşmeden Sonraki Görünümü

Ardından 2 hafta boyunca oda sıcaklığında yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Karışımı safsızlıklardan arındırmak için destile su kullanılarak 2 saatte bir suyunun

değiştirilmesi koşuluyla 4 kez yıkanmış ve ardından süzme işlemi yapılmıştır. Süzme işlemi tamamlandıktan sonra hacimce %80 oranında Etanol/saf su karışımına eklenmiş ve 60°C'deki etüv fırınında 1 gün boyunca tutulmuştur. Etüvden alınan karışıma hacimce %100 oranında etanol eklenip 60°C sıcaklıktaki etüv fırınında 1 gün boyunca tutulmuştur. Daha sonra hacimce %70 Etanol/TMCS eklenerek 60°C sıcaklıktaki etüv fırınında 1 gün boyunca tutulmuştur. Karışıma süzme işlemi uygulanıp, hacimce %100 n-heptan içerisinde 1 gün boyunca tutulmuştur. Son olarak karışım, etüv fırınında 90°C'de 4 saat ve 125°C'de 24 saat kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Böylelikle hidrofobik silika aerogel üretimi gerçekleştirilmiştir. Silika aerogel hafif beton üretiminde kullanılmak üzere sızdırmaz poşetlere konularak saklanmıştır (Şekil 14).



Şekil 14: Silika Aerogelin; (a) Etüv Öncesi, (b) Kurutma Aşaması, (c) Kurutulmuş Hali ve (d) Öğütülme Süreçleri

Tez kapsamında ihtiyaç duyulan miktarda silika aerogelin sentezinin üretimi için uygulanan bu proses yeterli miktarda tekrarlanmış ve elde edilen silika aerojeller sızdırmaz poşetlerde saklanmıştır (Şekil 15).

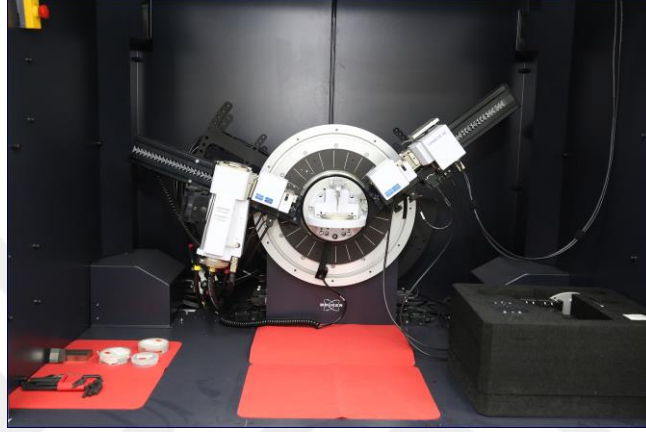


Şekil 15: (a) Silika Aerogel ve (b) Sızdırmaz Poşetlerde Saklanması

2.6.1. X- Işınları Kırınımı

XRD, uygulanan malzemenin amorf ya da kristal yapıda olup olmadığının belirlenmesi için kullanılan bir tekniktir. Uygulanan teknik sayesinde malzemenin yapısal özellikleri, tane boyutunun ortalama değeri, kristal yapısının durumu ve kusurları gibi çok önemli bilgilerin öğrenilmesinde etkili olan, tahribatsız ve çok yönlü bir analiz tekniğidir (Karakaş, 2022).

Üretilen silika aerogelin XRD analizi BUMER'de yapılmıştır. Deneyde Bruker marka, D8 Discover model XRD cihazda 2 teta 5° - 90° aralığında gerçekleştirilmiştir (Şekil 16).



Şekil 16: Kullanılan XRD Cihazı

2.6.2. Geçirimli Elektron Mikroskobu

TEM, malzemelerin kristal ve morfolojik incelemelerine imkân sağlayan, kırınım ve görüntüleme oluşumunu eş zamanlı inceleyen karakterizasyon cihazlarından (İlgar, 2015).

Üretilen silika aerogelin TEM analizleri BUMER'de yapılmıştır. Deneyde FEI TALOS F200S TEM 200 kV cihazı kullanılmıştır (Şekil 17).



Şekil 17: Kullanılan TEM Cihazı

2.6.3. Fourier Kızılötesi Dönüşüm Spektroskopisi

FT-IR, organik ya da inorganik yapıların karakterizasyonun da kullanılan yöntemdir. Her bir maddede bulunan ve kendine özel olan bir frekans değeri bulunmaktadır. Titreşim hareketi ile bu frekans değeri elde edilmektedir. Yöntemin maliyeti uygun ve hızlıdır (İlgar, 2015).

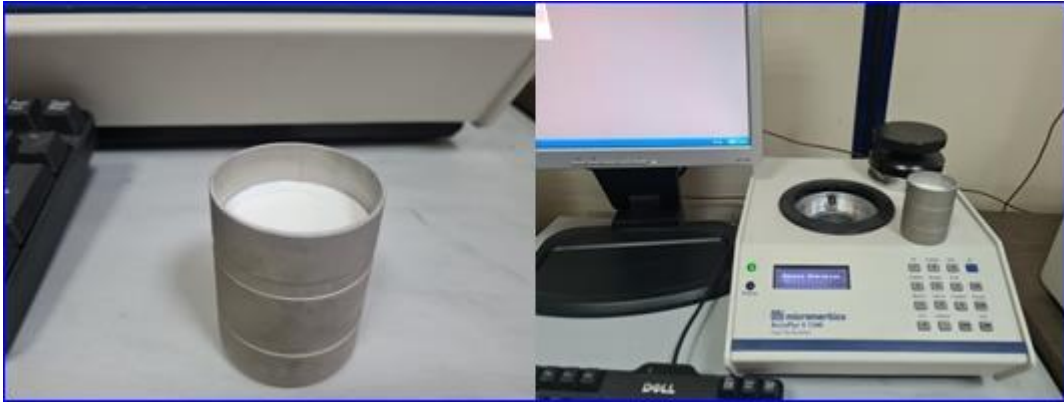
Üretilen silika aerogelin FT-IR analizi BUMER'de gerçekleştirilmiş ve kullanılan cihaz Şekil 18'de verilmiştir.



Şekil 18: Kullanılan FT-IR Cihazı

2.6.4. Yoğunluk Tespiti

Üretilen silika aerogelin yoğunluk değerinin tespiti Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde (ERUTAUM) yapılmıştır. Deneyde otomatik gerçek yoğunluk ölçüm cihazı olan PMICROMERITICS marka, Accupyc II 1340 Gas Pycnometer model cihaz kullanılmıştır (Şekil 19). Bu cihaz katı ya da toz haldeki numunelerin gerçek özgül ağırlığının tespitinde kullanılmaktadır.



Şekil 19: Gerçek Yoğunluk Ölçüm Tespitinde Deneyin Gerçekleşme Görüntüsü

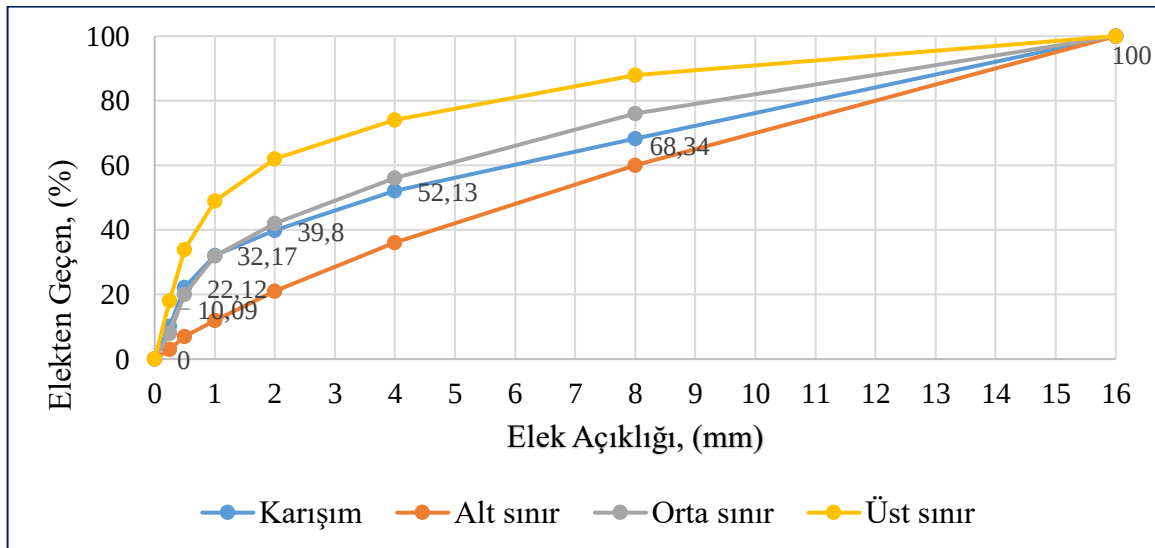
2.7. AGREGALAR ÜZERİNDE UYGULANAN DENEYLER

Çalışmanın bu alanında tez kapsamında kullanılacak olan BBT atıklarının tanınması, özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu ön deneyler neticesinde, karışımda ki toplam agrega hacminin %50'si 0-4 mm boyutunda, %10'u 4-8 mm boyutunda ve %40'ında 8-11,2 mm boyutunda agrega olarak belirlenmiştir.

Elek analizi; Hafif beton numuneleri üretiminde kullanılacak olan agregaların uygun kullanım oranının belirlenmesi amacıyla elek analiz testi gerçekleştirilmiştir. Bu deney TS EN 933-1 standardına göre yapılan deney sonrasında elde edilen sonuçlar Tablo 5'de gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan BT agregalarının TS EN 13055 standardına uygun olduğu Tablo 5 incelenmesinde görülmüştür. Elek analizinde elde edilen veriler ile hafif agregalar için verilen sınır değerlerin karşılaştırılması için çizilen granülometri eğrisi Şekil 20'de gösterilmiştir (Türkmenoğlu, 2017).

Tablo 5: Elek Analizi Deney Sonuçları

Elek Analizi	
Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)
16	100,00
11,2	84,71
8	68,34
4	52,13
2	39,80
1	32,17
0,5	22,12
0,25	10,09
0,0625	0,01



Şekil 20: Karışımda Kullanılan Agreganın Granülometri Eğrisi

Agrega birim ağırlık deneyi; Çalışmada kullanılacak agregaları sıkışık ve gevşek durumdaki birim ağırlıklarının tespiti TS EN 1097-3 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Deney kapsamında en büyük dane çapı 16 mm olduğundan 3 dm³ hacimde bir kova ve 5 kg numune ile üçer kez bu deney gerçekleştirilmiş ve elde edilen deneyler Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6: Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Sıkışık Birim Hacim Ağırlık	Gevşek Birim Hacim Ağırlık
2,35 kg/dm ³	2,06 kg/dm ³

Özgül ağırlık ve su emme tayini; Tez çalışması kapsamında kullanılacak olan BBT atıklarının özgül ağırlığı TS 706 ve TS EN 13055 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılacak agregalar ince ve iri agregalar olarak iki farklı şekilde hesaplanmış ve elde edilen değerler Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7: Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranları

	Kuru Özgül Ağırlık (γ _k)	DKY Özgül Ağırlık (γ _{dk})	Su Emme Oranı (%)
İnce Agregalar (0-4 mm)	2,40	2,45	1,92
İri Agregalar (4-16 mm)	1,75	2,02	15,42

BBT ile hafif beton üretilebilirliğinin belirlenmesi; Atık halde bulunan BBT ile hafif beton üretiminin gerçekleştirilip gerçekleştirilemeyeceğinin tespiti için hafif beton numuneleri üretilmiştir. Numunelerden elde edilen veriler doğrultusunda hafif beton numunesi üretiminin gerçekleştirilebildiği gözlenmiştir (Tablo 8).

Tablo 8: Gevşek ve Sıkışık Birim Ağırlık Değerleri

	Ortalama Değer (gr/cm ³)
Gevşek Birim Ağırlık	1,375
Sıkışık Birim Ağırlık	1,725

2.8. DENEY TASARIMI

Öncelikle tez çalışmasında en iyi karışım oranının belirlenmesi amacıyla parametreler ve bu parametrelere ait seviyeler belirlenmiştir. Çalışmada, Silika Aerojel Katkılı Beton (SAKHB), Çimento Dozajı (C) ve Karışım Suyu Oranı (W/C) parametreleri seçilmiştir. Her bir parametreye ait seviyeler sırasıyla (ince agreganın ağırlıkça %0-%1-%2-%3), (300-350 kg/m³)

ve (0,40-0,45) olarak belirlenmiştir. Seçilen parametre ve seviyelerine ait bilgiler Tablo 9’da verilmiştir. Yapılan deneyler, aynı ortam şartlarında ve farkı zamanlarda her bir deney için üç numune olacak şekilde iki kez tekrarlanmıştır.

Tablo 9: Deney Parametreleri ve Seviyeleri

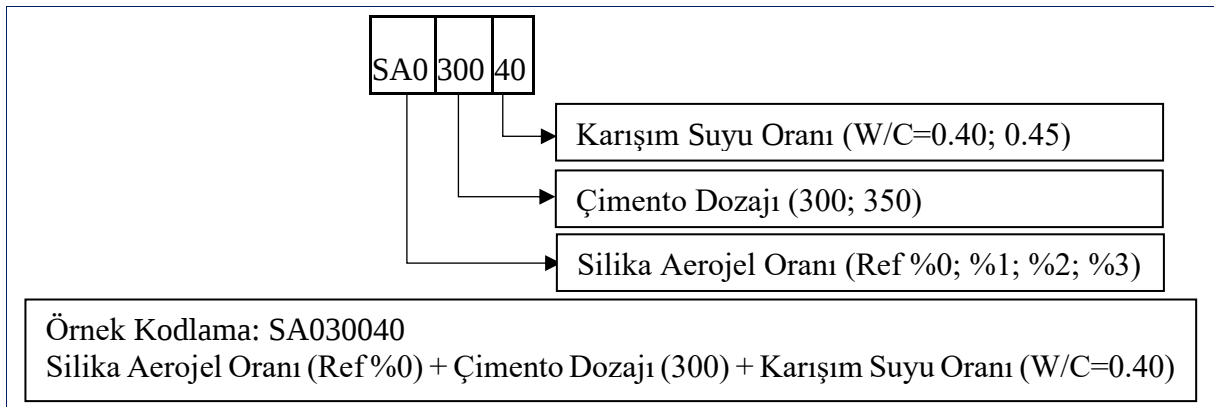
Deney Parametreleri	Seviyeler			
	1	2	3	4
Aerojel Oranı (%) (SAKHB)	0 (SAKHB0)	1 (SAKHB1)	2 (SAKHB2)	3 (SAKHB3)
Çimento Dozajı (kg/m ³) (C)	300 (C1)	350 (C2)		
Karışım Suyu Oranı (%) (W/C)	0,40 (W/C1)	0,45 (W/C2)		

Belirlenen parametre ve seviyelere göre kullandığımız L₈ (4¹*2²) ortogonal dizisi ile düzenlenmiş hali Tablo 10’da beraber verilmiştir.

Tablo 10: Uygulanan Ortogonal Dizin L₈ (4¹*2²)

Deney No	Parametreler ile Parametrelere Ait Seviyeler					
	A	B	C	Aerojel Oranı (%)	Çimento Dozajı (kg/m ³)	Karışım Suyu Oranı (%)
1	1	1	1	SAKHB0	C1	W/C1
2	1	2	2	SAKHB0	C2	W/C2
3	2	1	1	SAKHB1	C1	W/C1
4	2	2	2	SAKHB1	C2	W/C2
5	3	1	2	SAKHB2	C1	W/C2
6	3	2	1	SAKHB2	C2	W/C1
7	4	1	2	SAKHB3	C1	W/C2
8	4	2	1	SAKHB3	C2	W/C1

Uygulanan deneylerde numune içeriklerinin tanımlanması için kodlama gerçekleştirilmiştir. Kodlamada belirlenen kısaltma ve açıklaması örnek üzerinde Şekil 21’de gösterilirken, ortogonal dizisinde uygulanan notasyon ise Tablo 11’de verilmiştir.



Şekil 21: Uygulanan Kodlama ve Açıklaması

Tablo 11: Deney Numunelerinin Notasyonu

Karışım Oranları	Notasyon
%0 Silika Aerojel, 300 Çimento Dozajı ve 0.40 Karışım Suyu Oranı	SA030040
%0 Silika Aerojel, 350 Çimento Dozajı ve 0.45 Karışım Suyu Oranı	SA035045
%1 Silika Aerojel, 300 Çimento Dozajı ve 0.40 Karışım Suyu Oranı	SA130040
%1 Silika Aerojel, 350 Çimento Dozajı ve 0.45 Karışım Suyu Oranı	SA135045
%2 Silika Aerojel, 300 Çimento Dozajı ve 0.45 Karışım Suyu Oranı	SA230045
%2 Silika Aerojel, 350 Çimento Dozajı ve 0.40 Karışım Suyu Oranı	SA235040
%3 Silika Aerojel, 300 Çimento Dozajı ve 0.45 Karışım Suyu Oranı	SA330045
%3 Silika Aerojel, 350 Çimento Dozajı ve 0.40 Karışım Suyu Oranı	SA335040
%0 Silika Aerojel, 350 Çimento Dozajı ve 0.40 Karışım Suyu Oranı	SA035040
%1 Silika Aerojel, 350 Çimento Dozajı ve 0.40 Karışım Suyu Oranı	SA135040
%2 Silika Aerojel, 350 Çimento Dozajı ve 0.40 Karışım Suyu Oranı	SA235040

Tez çalışmasında elde edilen verilerin analizleri MINITAB 19 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ANOVA analizi sayesinde parametrelerin katkı oranları yüzdelik olarak belirlenmiş ve parametrelere ait (P değeri) anlamlılık değeri tespit edilmiştir. Yapılan analizlerde anlamlılık %5 ve güvenilirlik %95 değerleri seçilmiştir.

2.9. SİLİKA AEROJEL KATKILI HAFİF BETONUN HAZIRLANMASI

Tez çalışması kapsamında belirlenen ortogonal dizine numunelerin hazırlanmasına TS 2511 “Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları” standardı baz alınarak başlanmıştır. Gerçekleştirilen ön deney sürecinde mutlak hacim metodu ile 1 m³ hafif beton üretimi için gerekli olan malzeme miktarı belirlenmiş ve malzemelerin karışımında kullanılma miktarları Tablo 12’de gösterilmektedir.

Tablo 12: 1 m³ SAKHB için Gerekli Malzeme Miktarı (kg)

Karışım Kodu	Silika Aerojel	Çimento	Karışım Suyu	Agrega (Bayburt Taşı)		
				(0-4) mm	(4-8) mm	(8-11.2)
SA030040	0	300	0,40	940,8	156,8	548,8
SA035045	0	350	0,45	876,6	146,1	511,3
SA130040	7,25	300	0,40	931,4	156,8	548,8
SA135045	6,75	350	0,45	867,8	146,1	511,3
SA230045	14,08	300	0,45	904,3	153,8	538,3
SA235040	13,70	350	0,40	879,6	149,6	523,6
SA330045	20,92	300	0,45	895,1	153,8	538,3
SA335040	20,35	350	0,40	870,6	149,6	523,6

Agregaların karıştırma sürecine geçmeden atık BBT agregalarına 30 dk süreyle ön emdirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Burada amaç karışıma eklenen suyun agrega tarafından emmesinin engellenmesidir (Nayır, 2021). Karışıma ilk önce agrega olarak (0-4 mm), sonrasında (4-8 mm) ve devamında (8-11,2 mm) ölçülere sahip BBT atıkları karıştırıcıya konulmuş ve karıştırma işlemi sürdürülmüştür. Agregaların doldurulmasından sonra sırasıyla karışım içerisine çimento, silika aerojel ve karışım suyu eklenerek karıştırma aşaması tamamlanmıştır. SAKHB numunelerine ait karışım aşamaları Şekil 22’de gösterilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen taze betonlar standartta belirtildiği üzere iki aşamada kalıplara doldurulmuştur (Şekil 23). Sonrasında mala yardımıyla kalıpların üst yüzeyleri düzeltilerek numune üretim aşaması bitmiştir. 24 saat kalıplarda bekleyen numuneler, kalıplardan çıkartılmış ve 28 gün standart kür koşullarında beklemeye alınmıştır (Şekil 24).



Şekil 22: SAKHB Numunelerinin Hazırlanma Aşamaları



Şekil 23: SAKHB Numunelerinin Kalıplara Yerleştirilmesi



Şekil 24: SAKHB Numunelerin Kalıplardan Çıkarılma ve Kürlenme Süreci

2.10. SİLİKA AEROJEL KATKILI HAFİF BETON ÜZERİNDE GERÇEKLEŞTİRİLEN DENEYLER

Deneylerde belirlenen ortogonal dizine göre hazırlanan numuneler üzerinde çökme (slump), birim hacim ağırlık, termal iletkenlik, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler esas alınarak en iyi ya da optimum durum tespiti için S/N analizi kullanılmıştır.

Tespit edilen termal iletkenlik değeri için belirlenen optimum parametre seviyelerine göre çizilen S/N oran grafiğine göre tekrardan numune hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde 28 gün süren kür işleminden sonra su emme, porozite, donma-çözülme deneyi ile yapısal karakterizasyon (XRD, TEM, FT-IR, optik mikroskop görüntüleme, SEM ve TGA/DTA) deneyleri gerçekleştirilmiştir.

2.10.1. Çökme (Slump)

TS EN 12350-2 uyarınca gerçekleştirilen çökme (slump) deneyi, taze betonun işlenebilirliğini belirlemek için yapılmaktadır. Slump konisi içerisine taze beton üç eşit tabaka halinde ve her tabakada 25 kez şişlenme işlemi uygulanarak yerleştirilmiştir. Sonrasında taze betonun üst kısmı mala kullanılarak düzgün hale gelmesi sağlanmıştır. Sonraki aşamada beton sarsılmamasına sağlanacak şekilde özen göstererek koni yukarı doğru çekilme işlemi gerçekleştirildi. Çöken betonun üst seviyesi ile koninin üst seviyesi arasındaki mesafenin (h_c) ölçülmesi ile taze betonun çökme (slump) değerleri bulunmuştur.

2.10.2. Taze Beton Birim Hacim Ağırlık

Taze betonda birim hacim ağırlık deneyi TS EN 12350-6 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyde 100x100x100 mm ebatlarında küp kalıplar kullanılmıştır. İki aşamada doldurulan küpler her bir tabaka 25'er kez şişleme uygulanarak sıkıştırılmıştır.

Doldurulmuş küplerden darası düşölerek küpün hacmine bölünmesi ile taze betonun birim hacim ağırlığı bulunmuştur (Şekil 25).



Şekil 25: Taze Beton Birim Hacim Ağırlıklarının Tespitine Ait Görüntüler

2.10.3. Sertleşmiş Beton Birim Hacim Ağırlık

TS EN 12390-7 standardına göre gerçekleştirilen deneyde 100x100x100 mm ebatlarında ki küp numuneler kullanılmıştır. 28 gün su küründe bekletilen numuneler sonrasında etüvde 110 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilerek değişmez ağırlığa gelmesi sağlanmıştır. Küpün ağırlığının hacmine bölünmesi ile sertleşmiş betonun birim hacim ağırlığı bulunmuştur (Şekil 26).



Şekil 26: Sertleşmiş Beton Birim Hacim Ağırlıklarının Tespitine Ait Görüntü

2.10.4. Su Emme (Ağırlıkça)

Hafif beton numunelerinin su emme (ağırlıkça) değerleri TS EN 12390-7 standardı kullanılarak yapılmıştır. Kür havuzundan çıkartılan numunelerin yüzeyleri kurulanmıştır. Bu sayede doygun kuru yüzey haline gelen beton numunelerinin havada tartma işlemi uygulandıktan sonra, tel sepet içerisinde su ortamında tartma gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sonrasında etüvde $105 \pm 5^\circ \text{C}$ ortamında beton numunelerin değişmez ağırlığa gelmesi gözlenmiş ve tartma işlemi yapılmıştır (Altuncu vd., 2021). Su emme oranının belirlenmesinde kullanılan denklem (1)'de verilmiştir.

$$SE = \left(\frac{M_1 - M_3}{M_3} \right) * 100 \quad (\text{Denklem 1})$$

Denklemde numunenin; SE = su emme oranı (%), M_1 = doygun yüzey kuru ağırlığı (g), M_3 = etüv kurusu ağırlığı (g) göstermektedir.

2.10.5. Porozite

Porozite, diğer bir adıyla gözeneklilik, numunenin bünyesinde bulunan boşluk oranına denilmektedir (Li vd., 2021). Hafif beton numunelerinin porozite değerleri TS EN 12390-7 standardına göre hesaplanmıştır. Kür havuzundan çıkartılan numunelerin yüzeyleri kurulanmıştır. Bu sayede doygun kuru yüzey haline gelen beton numunelerinin havada tartma işlemi uygulandıktan sonra, tel sepet içerisinde su ortamında tartma gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sonrasında etüvde $105 \pm 5^\circ \text{C}$ ortamında beton numunelerin değişmez ağırlığa gelmesi gözlenmiş ve tartma işlemi yapılmıştır (Altuncı vd., 2021). Porozitenin belirlenmesinde kullanılan denklem (2)'de verilmiştir.

$$p = \left(\frac{M_1 - M_3}{M_1 - M_2} \right) * 100 \quad (\text{Denklem 2})$$

Denklemde numunenin; p = porozite (%), M_1 = doygun yüzey kuru ağırlığı (g), M_2 = su içinde asılı ağırlığı (g), M_3 = etüv kurusu ağırlığı (g) göstermektedir.

2.10.6. Termal İletkenlik

Üretilen referans ve SAKHB numunelerinin ısı iletim katsayılarının belirlenmesi İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde yapılmıştır. Ölçümlerde Thermal Conductivity Meter (KEM QTM 500) cihazı kullanılmıştır (Şekil 27). ASTM C1113-90 standardına sahip cihaz, ölçüm metodu olarak sıcak tel yöntemiyle işlem yapmaktadır. Bu cihaz çeşitli izolasyon malzemeleri, seramik, tuğla, plastik ve beton gibi ısı iletim katsayısı düşük malzemelerin ısı iletim katsayılarının ölçümünde kullanılmaktadır.



Şekil 27: Isı İletim Katsayısının Tespitinde Kullanılan QTM-500 Cihazı

Isı iletkenlik ölçümünün gerçekleştirilmesi için özel olarak 120x60x30 mm ebatlarında kalıplar hazırlanmıştır (Şekil 28).

Şekil 29’da gösterildiği şekilde numunelerin iki yüzeyinden 3’er ölçüm olmak üzere toplamda 6’şar ölçüm yapılmış, bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak numunenin ısı iletim katsayısı W/mK cinsinden belirlenmiştir (İşiker & Yeşilata, 2017; Sütçü vd., 2015).



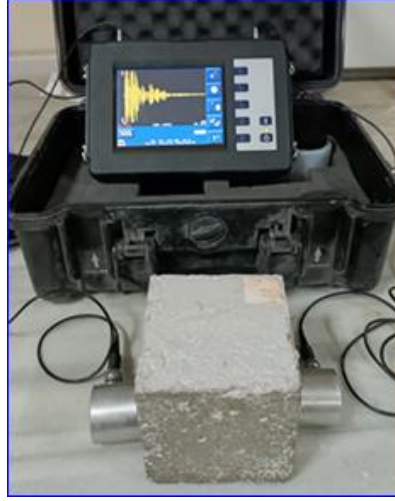
Şekil 28: Isı İletim Katsayısının Tespiti İçin Hazırlanan Numune Kalıpları



Şekil 29: Isı İletim Katsayısının Tespitinde Deneyin Gerçekleşme Görüntüsü

2.10.7. Ultrases Geçiş Hızı

Beton numuneler üzerinde tahribatsız uygulanan deney yöntemlerinden bir tanesi de ultrases geçiş hızı deneyidir. Bu yöntem de ultrasonik ses dalgaları yardımı ile gerçekleştirilen bu yöntemde yapıya hasar verilmemektedir. Deney ile beton içerisinde bulunan çatlak ve boşluk oluşumları hakkında bilgiye ulaşılabilmektedir. Üretilen 100x100x100 mm’lik küp referans ve SAKHB numunelerinin ultrases geçiş hızını ölçmek için Matest C372M cihazı kullanılmıştır. ASTM C 597 standardına uygun bir şekilde ölçme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 30).



Şekil 30: SAKHB Numunelerinin Ultrases Geçiş Hızının Belirlenme Süreci

Ölçüm gerçekleştirilmeden önce numunenin üzerindeki tozlar bir fırça yardımıyla temizlenmiştir. Ultrasonik jel hem alıcının konulacağı hem de vericinin konulacağı yüzeye sürülmüştür. Alıcı ve verici arasında numune kalacak şekilde ölçüm işlemi iki kez tekrarlanmış, belirlenen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak ultrases geçiş hızı tespit edilmiştir.

2.10.8. Basınç Dayanımı

Hafif beton numunelerinin mekanik özelliklerinin tespiti için yapılan deneylerden biri basınç dayanımı deneyidir. Çalışma kapsamında BUMFYML'da 100x100x100 mm boyutundaki küp numunelere, 28 günlük kür süresi sonunda TS EN 12390-3 deney standardı baz alınarak basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı değerinin elde edilmesinde kullanılan denklem (3)'de verilmiştir. Deneyde kullanılan cihaz ve deneyin gerçekleşme görüntüsü Şekil 31'de verilmiştir.

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

(Denklem 3)

Denklemden; f_c = hesaplanan basınç dayanımını (MPa), F = numunede kırılmaya neden olan maksimum yük değeri (N) ve A_c = numunenin yüzey alanının (mm²) göstermektedir.



Şekil 31: SAKHB Numunelerinin Basınç Dayanımı Tespitinin Gerçekleştirilme Süreci

2.10.9. Donma-Çözülme Dayanımının Basınç Dayanımı Üzerine Etkisi

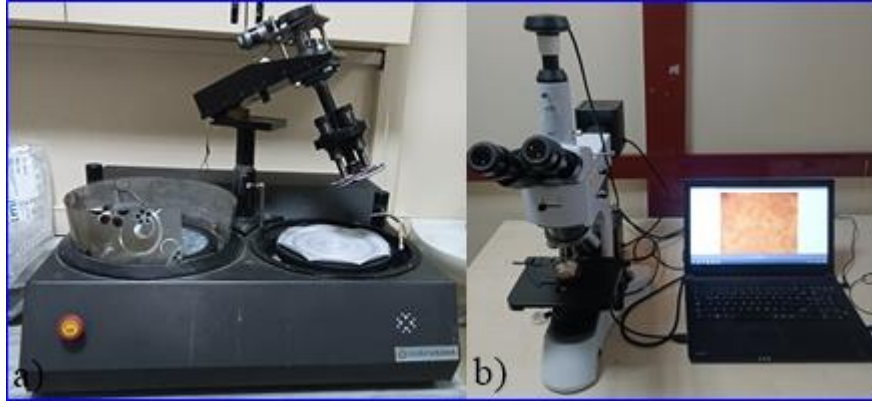
Hafif beton numunelerine donma-çözülme deneyi TSE CEN/TS 12390-9 standardı kullanılarak uygulanmıştır. Deneyin ilk aşamasında hafif beton numuneleri 1 saat su dolu bir kaptaki bekletilmiştir. İkinci aşamada yüzey kuru hale getirildikten sonra -20°C 'de 2 saat donma işlemine maruz bırakılmıştır. Üçüncü ve son aşamada ise numuneler 1 saat oda sıcaklığında çözölmeye bırakılan numunede bu işlem 20 kez tekrarlanmıştır (Şekil 32).



Şekil 32: SAKHB Numunelerinin Donma-Çözülme İşlemine Maruz Kalma Süreci

2.10.10. Hafif Betonun Optik Mikroskop İncelemeleri

Tez çalışması kapsamında farklı silika aerojel oranları (%0, %1, %2 ve %3) ile üretimi gerçekleştirilen hafif beton numunelerinin mikro yapılarının incelenmesi Bayburt Üniversitesi'nde bulunan NMM-800/820 seri optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yüzeyleri öncelikle sırasıyla 180, 400, 800 ve 1200 kademelerde SiC zımparada aşındırıldıktan sonra fotoğraf çekim işlemine geçilmiştir. Çekimler optik mikroskopta 50X, 100X, 200X büyütmede gerçekleştirilmiştir. Zımparalama cihazı ve kameralı mikroskop cihazının görselleri Şekil 33'de verilmiştir.

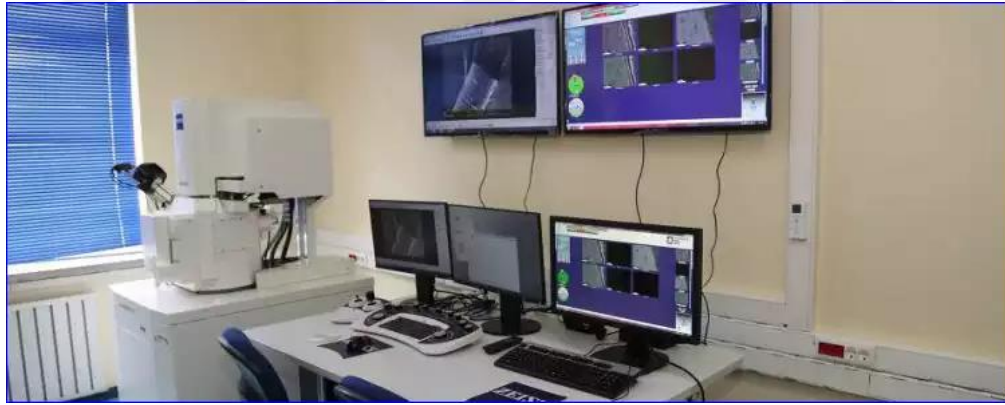


Şekil 33: SAKHB Numunelerinin (a) Zımparalama ve (b) Optik Mikroskop Görüntülemesinde Kullanılan Cihaz

2.10.11. Hafif Betonun Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi

SEM, blok halde ya da toz halde bulunan katı nesnelerin mikro/nano ölçekli yapılarına ait görüntüleme ve analizinde kullanılan yaygın yöntemlerdendir (Karakaş vd., 2022).

Tez çalışması için üretilen hafif beton numunelerine ait SEM analiz görüntüleri ERUTAUM'de bulunan ZEISS marka GEMINI 500 model cihazda gerçekleştirilmiştir (Şekil 34).



Şekil 34: SAKHB Numunelerinin SEM Görüntülemesinde Kullanılan Cihaz

2.10.12. Hafif Betonun Termogravimetrik Analizi

TGA analizi, bir malzemenin sıcaklık karşısında kütleinde meydana gelen değişimin zaman fonksiyonu olarak verildiği ve belirtilen eğrilerin o malzemeye özgü olduğu analizdir. TGA analizi ile birden fazla malzemenin kompizasyonu, termal bozulma grafiği ve nem/buhar içeriğine ait bilgiler elde edilmektedir (Saadatkhah vd., 2020).

Hafif beton numunelerinin TGA/DTG analizleri, ERUTAUM'de yapılmıştır. Deneyde otomatik gerçek yoğunluk ölçüm cihazı olan Perkin Elmer marka, Diamond model cihaz ile

hava ortamında, 10 °C/dk ısıtma hızı ile 25-1000 °C aralığında analiz gerçekleştirilmiştir (Şekil 35).



Şekil 35: SAKHB Numunelerinin TGA/DTG Analizinde Kullanılan Cihaz

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

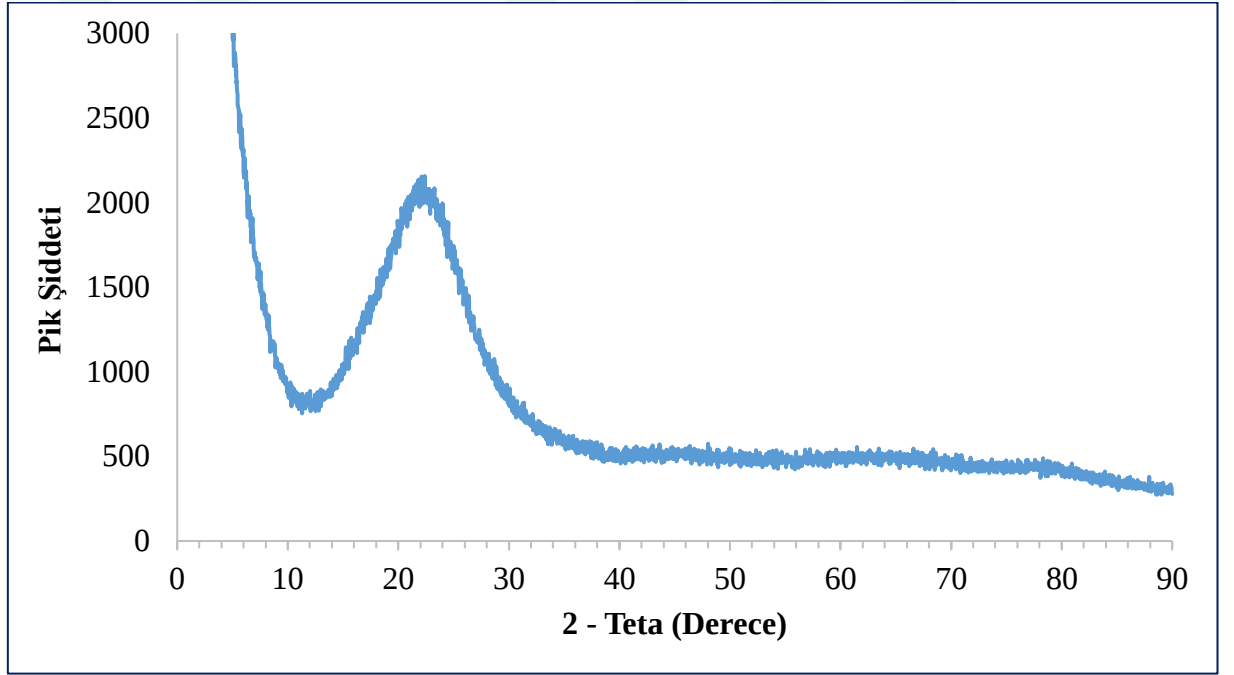
BULGULAR

Bu bölümde atık BBT ile sentezlenen silika aerogelin karakterizasyon deneyleri ile taguchi yönteminde belirlenen parametrelere göre üretilen SAKHB üzerinde gerçekleştirilen deneyler ve analizlerin sonuçları sunulmuştur.

3.1. SENTEZLENEN SİLİKA AEROJELİN KARAKTERİZASYONU

3.1.1. X- Işınları Kırınımı Analiz Sonuçları

Çalışmada XRD analizi sentezlenen silika aerogelin kristal yapısının karakterize etmek için gerçekleştirilmiştir. Silika aerojele ait XRD spektrumları Şekil 36'da verilmiştir.



Şekil 36: Sentezlenen Silika Aerojele Ait XRD Grafiği

Şekil 36'daki XRD spektrumları incelendiğinde, amorf silika aerogel ait belirgin özelliği olan karakteristik geniş tepe noktası (2θ 'da 20° - 30° arası) XRD spektrumlarında gözlenmiştir (Feng vd., 2018). Grafikte silika aerogelin yapısında NaCl piklerinin olmaması, sentez aşamasında distile su ile yeterli miktarda yıkama işleminin gerçekleştirildiği göstermektedir. Ciza, (2021) gerçekleştirdiği çalışmasında yıkama sayısının NaCl pikinin oluşum seviyesini düşürdüğünü XRD grafiği incelemesinde belirtmiştir.

Tablo 13'de XRD analizi sonuçları ve literatürdeki benzer çalışmalara ait verilere yer verilmiştir.

Tablo 13: Sentezlenen Silika Aerojelin XRD Analiz Verilerinin Karşılaştırılması

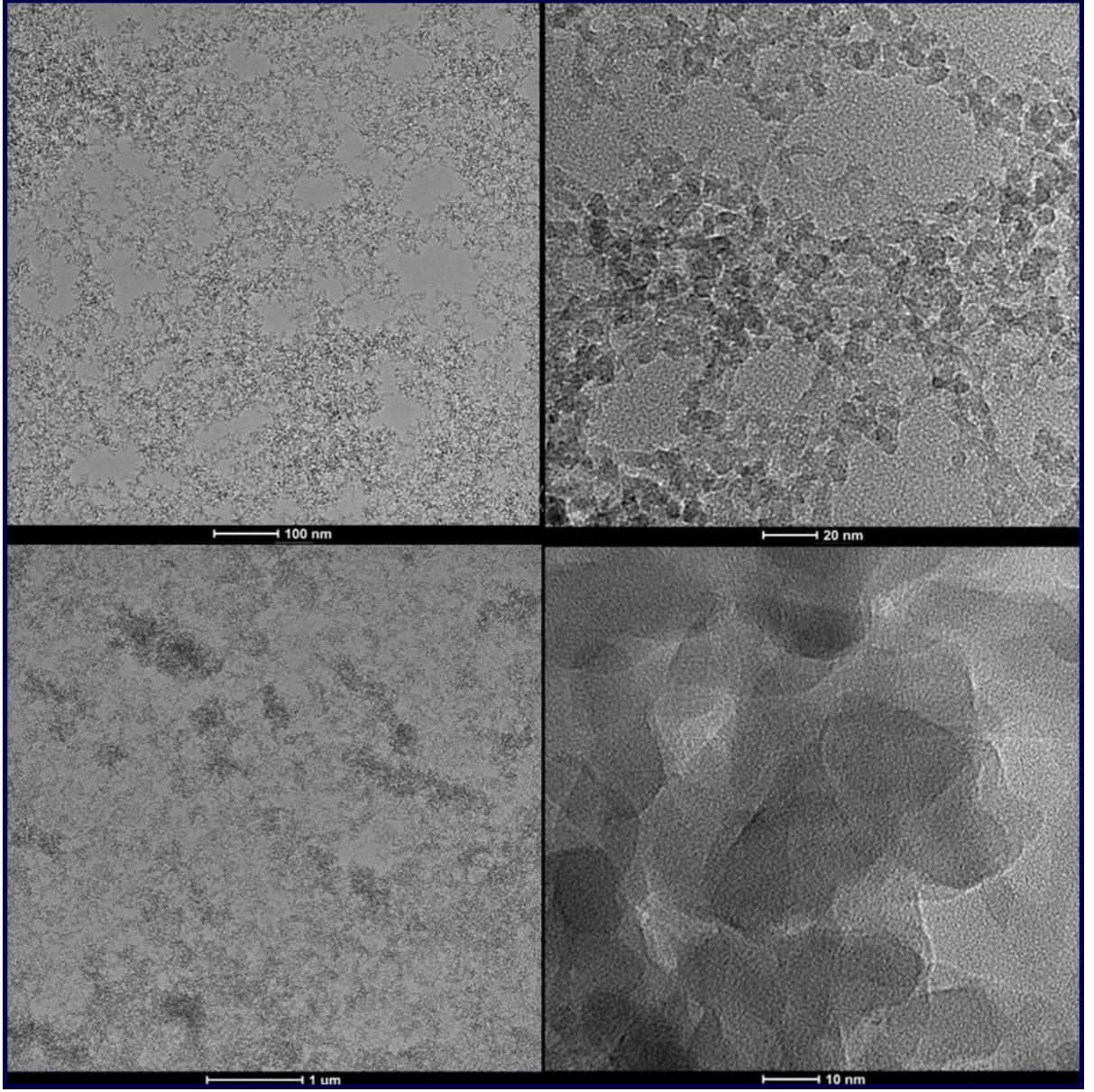
Araştırmacı	Amorf Piki
Wu vd. (2018)	22°
Zhou vd. (2018)	23,2°
Rahmani vd. (2018)	20°
Saraç, (2018)	22° - 23°- 24°
Gerçekleştirilen Çalışmada	21,5°

Literatürdeki benzer çalışmaların XRD analizleri incelendiğinde; Wu vd. (2018) 22°, Zhou vd. (2018) 23,2°, Rahmani vd. (2018) 20° ve Saraç, (2018) ise gerçekleştirdiği 7 farklı malzeme ile silika aerojel sentezinde 22° ile 23° arasında amorf piki elde etmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada ise 21,5°’de belirgin bir amorf pikine ulaşılmıştır. Piklerdeki $\pm 1-2^\circ$ ’de gözlenen kayma; X-ışını tüpündeki farklılıklar, numunenin içerdiği safsızlık ve XRD ile numune hazırlama koşullarından kaynaklanıyor olabilir. XRD analizi için bu düzeyde sapmalar olağan kabul edilir. Yapılan analiz, silika aerojel üretiminin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermiştir.

3.1.2. Geçirimli Elektron Mikroskobu Analiz Sonuçları

TEM, malzemelerin kristal ve morfolojik incelemelerine imkân sağlayan, kırınım ve görüntüleme oluşumunu eş zamanlı inceleyen karakterizasyon cihazlarından (İlgar, 2015). Sentezlenen silika arojele ait TEM görüntüleri Şekil 37’de verilmiştir.

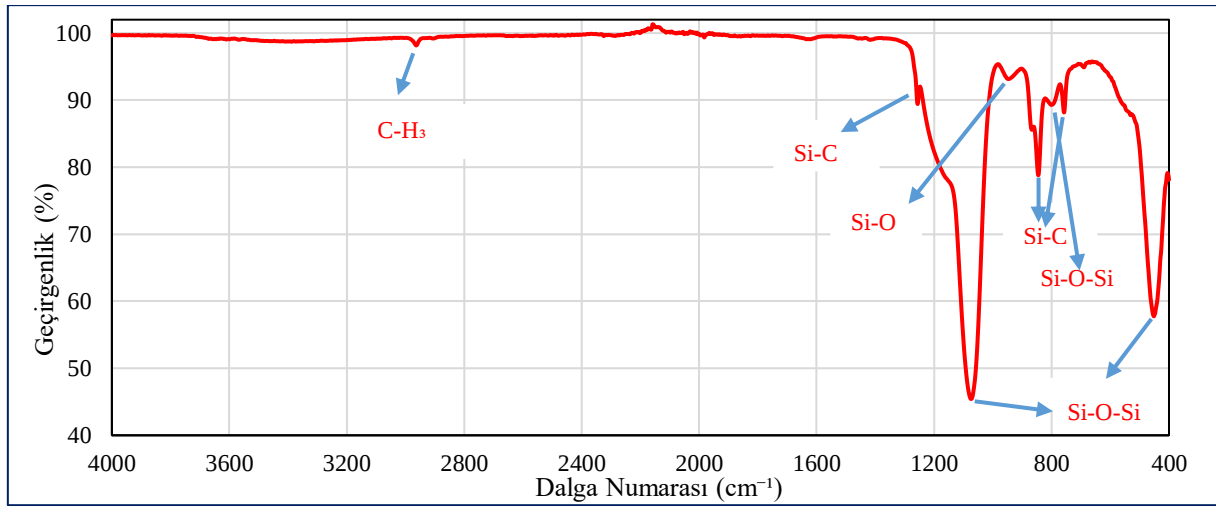
Şekil 37’de verilen sentezlenen silika arojellerin, yaklaşık 10 nm büyüklüğünde küresel taneciklerden oluşan, şekil ve boyut dağılımı açısından oldukça homojen partiküller elde edildiği görülmektedir. Daha önce yapılmış çalışmalarda silika bazlı arojellerle benzer yapılar elde edildiği görülmektedir (Cai vd., 2020; Babiarczuk vd., 2020). TEM görüntülerinde ayrıca, partiküller arası sintelleşme ile agloromasyon olmadığı, partiküller arası etkileşimler ve çekim kuvvetleri vs. olmadığı görülmüştür. Bu nedenlerle sentezlenen silika arojel parçacıklarının kolayca disperse olabilecek bir yapıya sahip olduğunun düşünülmektedir.



Şekil 37: Sentezlenen Silika Aerojele Ait TEM Görüntüleri

3.1.3. Fourier Kızılötesi Dönüşüm Spektroskopisi Analizi Sonuçları

Üretimi gerçekleştirilen silika aerojelin bileşimi ile etkileşimini karakterize etmek amacıyla FT-IR spektroskopisi uygulanmıştır. Şekil 38’de silika aerogel numunesine ait 400 – 4000 cm^{-1} arası titreşim pikleri ve FT-IR spektrumları verilmektedir.



Şekil 38: Sentezlenen Silika Aerojele Ait FT-IR Spektrumları

Şekil 38’da silika aerojelin ana karakteristik verisi olan Si-O-Si titreşim tipinin (1075 cm^{-1}) değeri ile literatürde belirtilen ($1250\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$) aralığında olduğu ve diğer Si-O-Si piklerinin (800 ve 452 cm^{-1}) olduğu görülmüştür (Karamikamkar vd., 2019). Spektrum piklerindeki diğer değerler incelendiğinde C-H₃ (2963 cm^{-1}), Si-C (1255 , 845 ve 757 cm^{-1}), Si-O (946 cm^{-1}) ve bu değerlerinde literatürdeki diğer benzer çalışma verileri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir (Yu vd., 2015; Ban, 2019; Güler, 2012; Kapica vd., 2020; Ito vd., 2013; Karamikamkar vd., 2020). Spektrum değerleri, çalışma ile silika aerojel sentezinin başarılı gerçekleştiğini göstermektedir.

3.1.4. Yoğunluk Tespiti

Üretimi gerçekleştirilen silika aerojelin gerçek yoğunluk değeri, gaz piknometresi cihazı ile belirlenmiştir. Tablo 14’de ölçülen yoğunluk değeri ile literatürdeki benzer çalışmalara ait verilere yer verilmiştir.

Tablo 14: Sentezlenen Silika Aerojel ve Literatürdeki Çalışmalara Ait Yoğunluk Verileri

Araştırmacı	Yoğunluk (g/cm^3)	Standart Sapma (g/cm^3)
Kara, (2020)	2,40-3,29	-
Xie vd. (2022)	3,337	-
Juhl vd. (2015)	1,86-1,95-2,39	0,08
Niu vd. (2021)	3,3378	-
Gerçekleştirilen Çalışmada	1,8774	0,0242

Benzer çalışmalara ait yoğunluk değerleri incelendiğinde; Kara, (2020) bir dizi uyguladığı aerojel sentezinde $2,40$ ile $3,29\text{ g/cm}^3$, Xie vd. (2022) çalışmalarında $3,337\text{ g/cm}^3$, Juhl vd. (2015) yaptıkları çalışmada $1,86$ ile $2,39\text{ g/cm}^3$ ve Niu vd. (2021) ise çalışmalarında $3,3378\text{ g/cm}^3$ yoğunluk değeri elde etmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada yoğunluk değerini

1,8774 g/cm³ olarak bulunması literatürdeki düşük yoğunluk değerlerine sahip silika arojellere benzer olduğu gösterir.

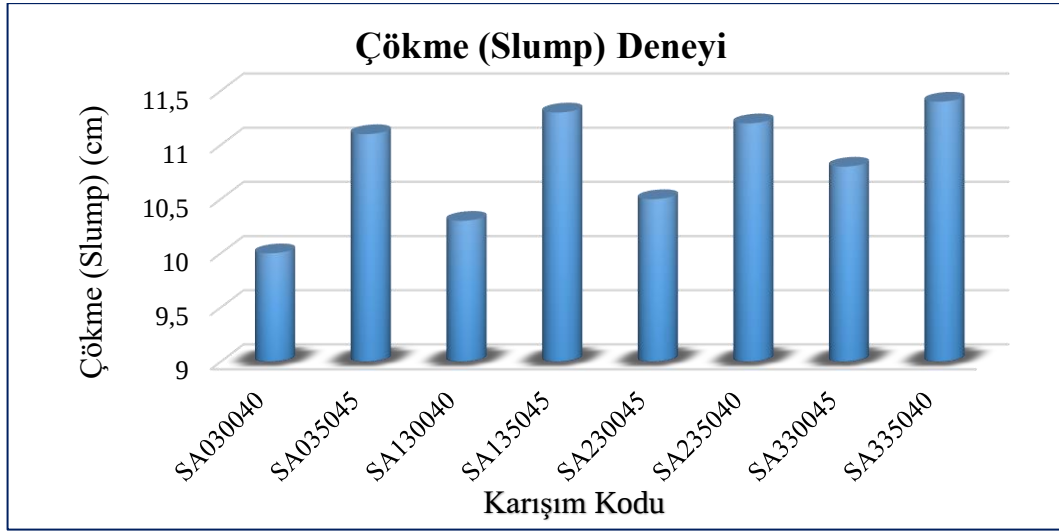
3.2. SİLİKA AEROJEL KATKILI HAFİF BETON ÜZERİNDE UYGULANAN DENEYLER

3.2.1. Çökme (Slump) Deney Sonuçları

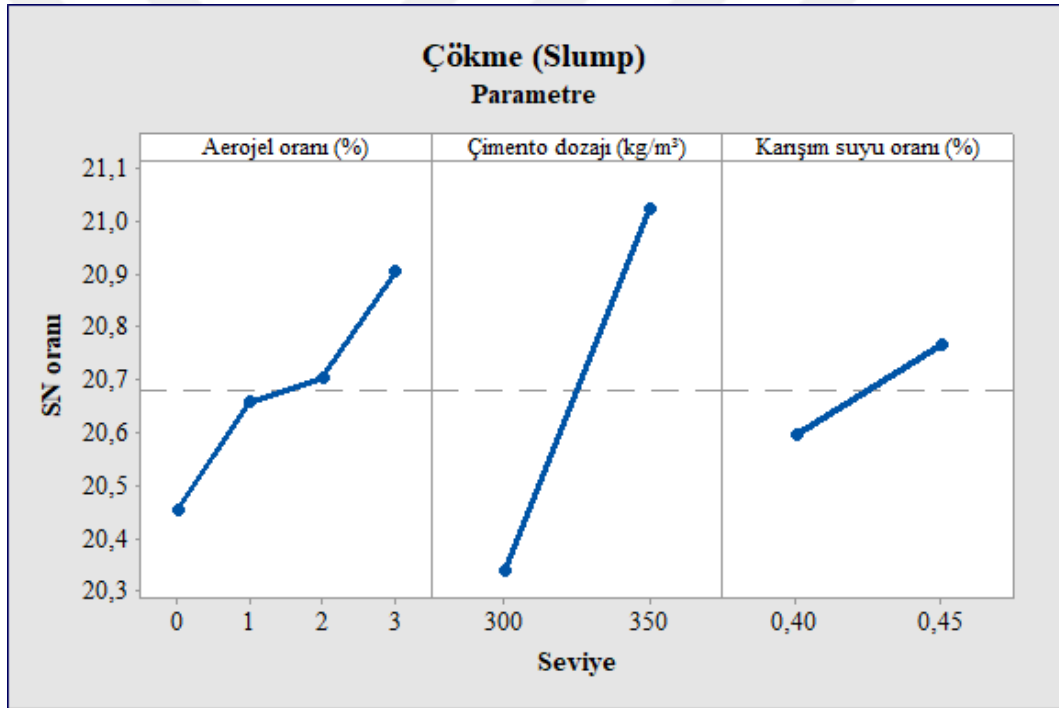
Çalışma kapsamında üretilen taze beton numunelerin çökme değerleri Tablo 15 ve Şekil 39'da sunulmuştur. Ayrıca elde edilen değerlerin optimizasyonu için MINITAB 19 programında en büyük en iyi yöntemi ayarlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen S/N oranları Tablo 15 ve Şekil 40'da sunulmuştur.

Tablo 15: SAKHB'de Çökme (Slump) Değeri ve S/N Oranı

Karışım Kodu	Çökme Değerleri (cm)		S/N Oranı
	Sonuçlar	Ortalama	
SA030040	9,8	10,0	20,0000
	10,3		
	9,9		
SA035045	10,9	11,1	20,9065
	11,6		
	10,8		
SA130040	10,2	10,3	20,2567
	10,4		
	10,3		
SA135045	11,0	11,3	21,0616
	11,4		
	11,5		
SA230045	10,1	10,5	20,4238
	10,7		
	10,7		
SA235040	11,1	11,2	20,9844
	11,5		
	11,0		
SA330045	9,9	10,8	20,6685
	11,3		
	11,2		
SA335040	11,5	11,4	21,1381
	11,2		
	11,5		



Şekil 39: SAKHB'de Çökme (Slump) Deney Sonuçları



Şekil 40: SAKHB'de Çökme (Slump) Deneyi S/N Oran Grafiği

S/N oranının gösterildiği grafik incelendiğinde %3 aerojel oranı, 350 kg/m³ çimento ve 0,45 oranında karışım suyu oranı içeren taze beton numunenin en büyük çökme değerine sahip olacağı anlaşılmıştır.

Tablo 16'da verilen ortalama yanıt tablosu incelendiğinde çökme değeri üzerinde en çok etkili parametrenin çimento dozajının olduğu görülmektedir.

Tablo 16: SAKHB'de Çökme (Slump) Değeri Yanıt Tablosu

Level	Aerojel Oranı	Çimento Dozajı	Karışım Suyu Oranı
1	20,45	20,34	20,59
2	20,66	21,02	20,77
3	20,70		
4	20,90		
Delta	0,45	0,69	0,17
Rank	2	1	3

Tablo 17'de SAKHB numunelerinin çökme değerlerine ait varyans analizi sonuçları görülmektedir. Çökme değerinde en etkili faktör %78,75 ile çimento dozajının etkili olduğu belirlenmiştir. Çökme değeri üzerinde parametrelerin etki düzeyinin belirlenmesi için analiz verileri incelendiğinde üç parametrenin de P değeri 0,05 değerinden küçük olduğundan istatistiksel olarak anlamlı olduğu gözlenmiştir.

Tablo 17: SAKHB'de Çökme (Slump) Değerinin Varyans Analizi Sonuçları

Parametre	SB	S	Etki	MS	F-Değeri	P-Değeri
Aerojel Oranı (%)	3	0,305	16,62%	0,10167	40,67	0,024
Çimento Dozajı (kg/m ³)	1	1,445	78,75%	1,44500	578,00	0,002
Karışım Suyu Oranı (%)	1	0,08	4,36%	0,08000	32,00	0,030
Hata	2	0,005	0,27%	0,00250		
Toplam	7	1,835	100,00%			

Tablo 18 incelendiğinde ise gerçekleştirilen modelin %99,73 güven seviyesinde olduğu görülmüştür.

Tablo 18: SAKHB'de Çökme (Slump) Değeri Model Özeti

S	R ²	R ² (Düzeltilmiş)	Press	R ² (Tahmini)
0,05	99,73%	99,05%	0,08	95,64%

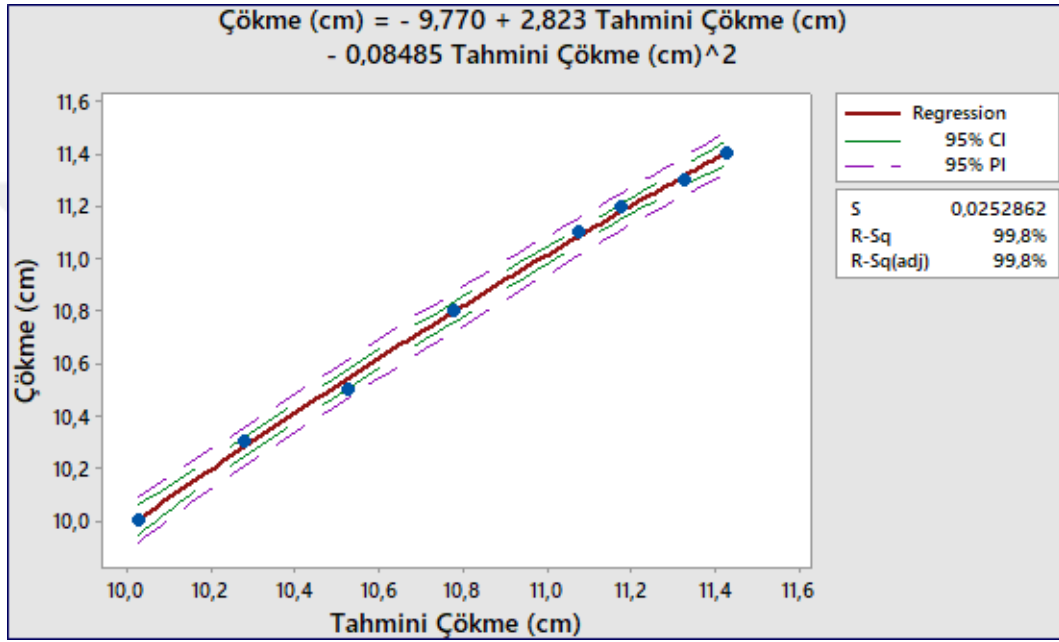
Uygulanan regresyon analizi sonucunda Tablo 19'deki regresyon eşitliği verisi elde edilmiştir. Tablo 20'de ise deney sonunda elde edilen değerler ile regresyon denklem ile elde edilen tahmini değerler verilmiş ve ayrıca tahmini değerler ile gerçek değerlerin grafiği Şekil 41'de verilmiştir.

Tablo 19: SAKHB'de Çökme (Slump) Değeri Regresyon Denklemi

Çökme (cm)	$3,345 + 0,1700 \text{ Aerojel Oranı (\%)} + 0,01700 \text{ Çimento Dozajı (kg/m}^3\text{)} + 4,00 \text{ Karışım Suyu Oranı (\%)} + 0,00000 \text{ Çökme (cm)}$
------------	--

Tablo 20: SAKHB'de Çökme (Slump) Ortalama ve Tahmini Değeri

Deney Numarası	1	2	3	4	5	6	7	8
Ort. Çökme (cm)	10,0	11,1	10,3	11,3	10,5	11,2	10,8	11,4
Tahmini Çökme	10,025	11,075	10,275	11,325	10,525	11,175	10,775	11,425

**Şekil 41:** SAKHB'de Gerçek ve Tahmini Çökme (Slump) Grafiği

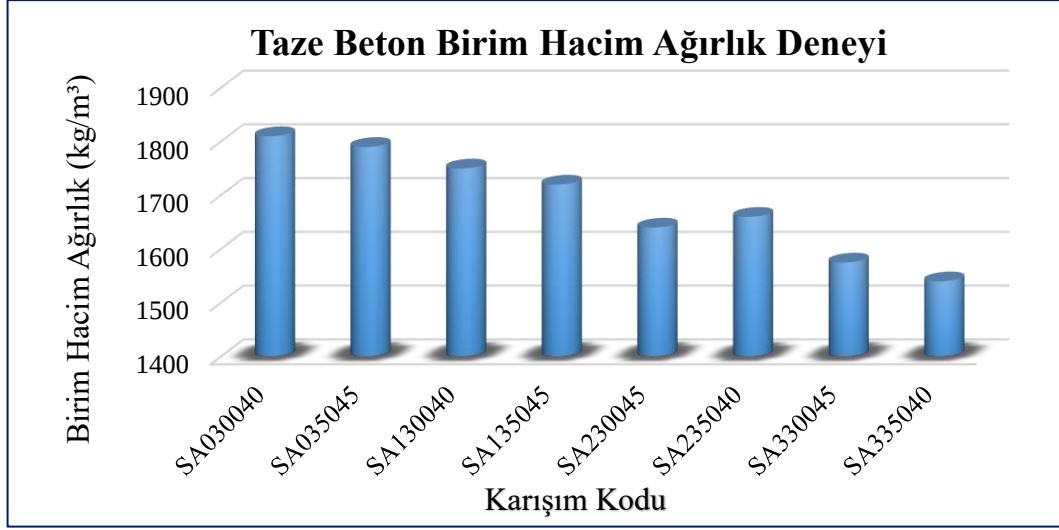
Veriler incelendiğinde SAKHB numunelerinin çökme değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlenmiştir.

3.2.2. Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları

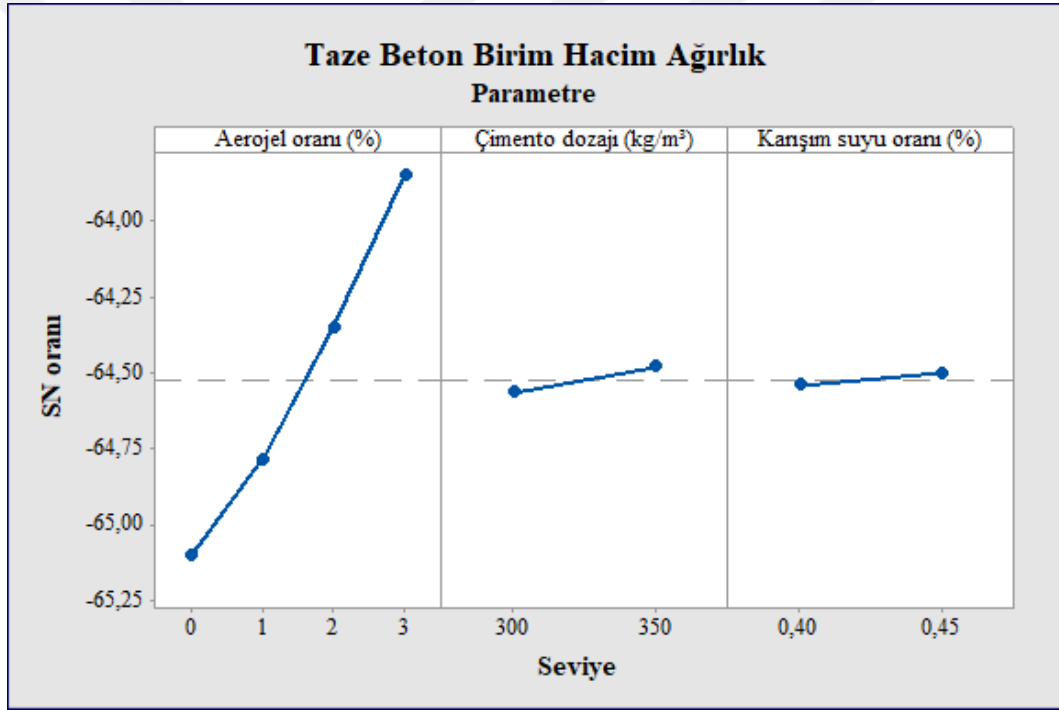
Çalışma kapsamında üretilen taze beton numunelerinin birim hacim ağırlık değerleri Tablo 21 ve Şekil 42'de sunulmuştur. Ayrıca elde edilen değerlerin optimizasyonu için MINITAB 19 programında en düşük en iyi yöntemi ayarlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen S/N oranları Tablo 20 ve Şekil 43'de verilmiştir.

Tablo 21: SAKHB'de Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Değeri ve S/N Oranı

Karışım Kodu	Birim Hacim Ağırlık Değerleri (kg/m ³)		S/N Oranı
	Sonuçlar	Ortalama	
SA030040	1835	1810	1812
	1795		
	1800		
SA035045	1760	1790	1787
	1810		
	1800		
SA130040	1755	1750	1747
	1715		
	1780		
SA135045	1710	1720	1722
	1725		
	1725		
SA230045	1630	1640	153
	1680		
	1610		
SA235040	1650	1660	1646
	1700		
	1630		
SA330045	1590	1575	1561
	1585		
	1550		
SA335040	1530	1540	1553
	1570		
	1520		



Şekil 42: SAKHB'de Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları



Şekil 43: SAKHB'de Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Deneyi S/N Oran Grafiği

S/N oranının gösterildiği grafik incelendiğinde %3 aerojel oranı, 350 kg/m³ çimento ve 0,45 oranında karışım suyu oranı içeren numunenin en küçük taze beton birim hacim ağırlık değerine sahip olacağı anlaşılmıştır.

Tablo 22'de verilen ortalama yanıt tablosu incelendiğinde taze beton birim hacim ağırlık değeri üzerinde en çok etkili parametrenin silika aerojel oranı olduğu görülmektedir.

Tablo 22: SAKHB'de Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Değeri Yanıt Tablosu

Level	Aerojel Oranı	Çimento Dozajı	Karışım Suyu Oranı
1	-65,11	-64,56	-64,54
2	-64,79	-64,48	-64,50
3	-64,35		
4	-63,85		
Delta	1,26	0,08	0,04
Rank	1	2	3

Tablo 23'de SAKHB numunelerinin taze beton birim hacim ağırlık değerlerine ait varyans analizi sonuçları görülmektedir. Birim ağırlık değerinde en etkili faktör %97,85 ile aerojel oranının etkili olduğu belirlenmiştir. Birim ağırlık değeri üzerinde parametrelerin etki düzeyinin belirlenmesi için analiz verileri incelendiğinde; aerojel oranının P değeri (0,017) 0,05 değerinden küçük olduğundan istatistiksel olarak anlamlı olduğu, çimento dozajı ile karışım suyu oranının P değerleri 0,05 değerinden büyük olduğundan istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirlenmiştir.

Tablo 23: SAKHB'de Taze Beton Birim Ağırlık Değerinin Varyans Analizi Sonuçları

Parametre	SB	S	Etki	MS	F-Değeri	P-Değeri
Aerojel Oranı (%)	3	66409,4	97,85%	22136,5	56,67	0,017
Çimento Dozajı (kg/m ³)	1	528,1	0,78%	528,1	1,35	0,365
Karışım Suyu Oranı (%)	1	153,1	0,23%	153,1	0,39	0,595
Hata	2	781,2	1,15%	390,6		
Toplam	7	67871,9	100,00%			

Tablo 24 incelendiğinde ise gerçekleştirilen modelin %98,85 güven seviyesinde olduğu görülmüştür.

Tablo 24: SAKHB'de Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Değeri Model Özeti

S	R ²	R ² (Düzeltilmiş)	Press	R ² (Tahmini)
19,7642	98,85%	95,97%	12500	81,58%

Uygulanan regresyon analizi sonucunda Tablo 25'deki regresyon eşitliği verisi elde edilmiştir. Tablo 26'da ise deney sonunda elde edilen değerler ile regresyon denklem ile elde

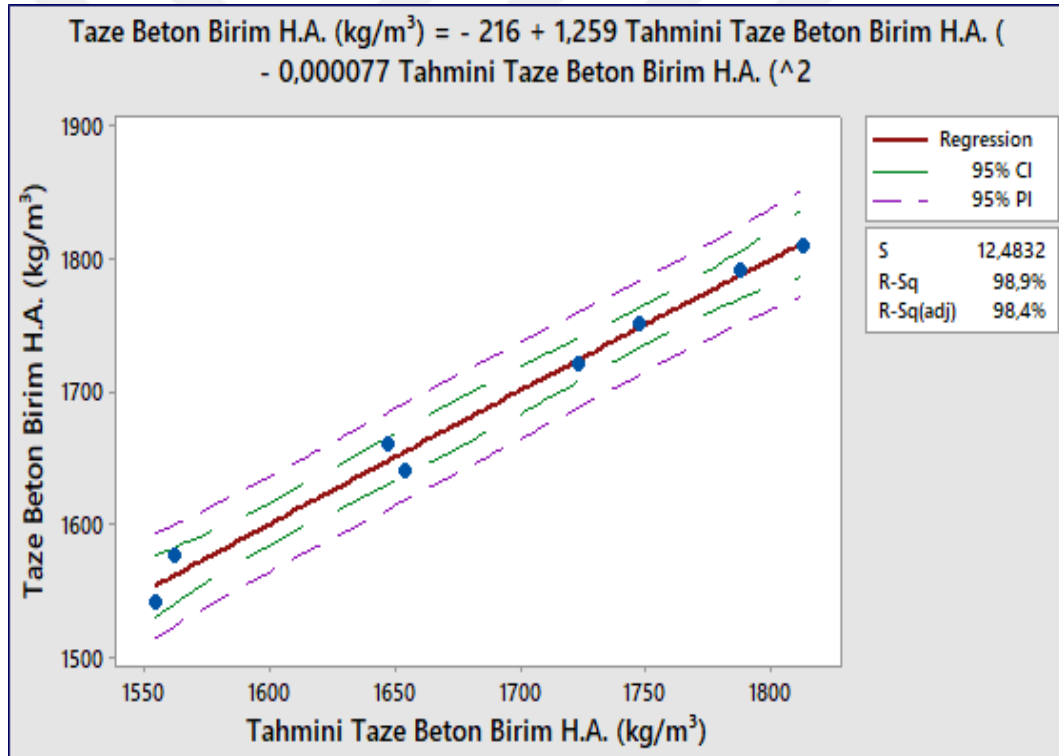
edilen tahmini değerler verilmiş ve ayrıca tahmini değerler ile gerçek değerlerin grafiği Şekil 44'de verilmiştir.

Tablo 25: SAKHB'de Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Değeri Regresyon Denklemi

Taze Beton Birim H.A. (kg/m ³)	1988 - 81,25 Aerojel Oranı (%) - 0,325 Çimento Dozajı (kg/m ³)
---	---

Tablo 26: SAKHB'de Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Ortalama ve Tahmini Değeri

Deney Numarası	1	2	3	4	5	6	7	8
Ort. Birim Ağırlık (kg/m ³)	1810	1790	1750	1720	1640	1660	1575	1540
Tahmini Birim Ağırlık (kg/m ³)	1813	1788	1748	1723	1654	1646	1561	1554



Şekil 44: SAKHB'de Gerçek ve Tahmini Taze Beton Birim Ağırlık Grafiği

Çalışma sonucunda elde edilen değerler bize üretilen numunelerin hafif beton standartlarında olduğunu göstermektedir.

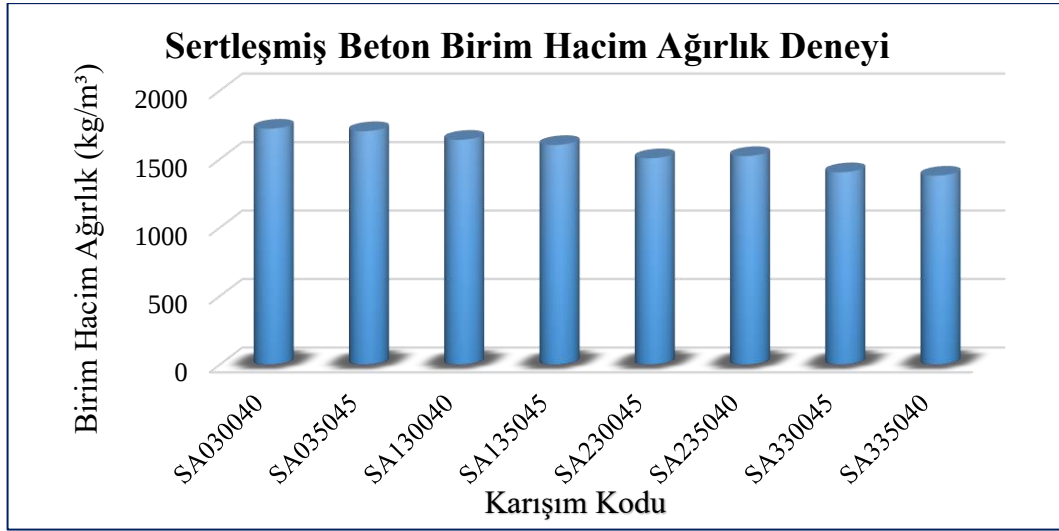
Gerçekleştirilen analiz verileri sonucunda, ısı iletim katsayısının optimum olacağı öngörülen karışım oranlarına göre yapılan doğrulama deneyinde numunenin birim ağırlık değeri 1565 kg/m³ bulunmuştur.

3.2.3. Sertleşmiş Beton Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları

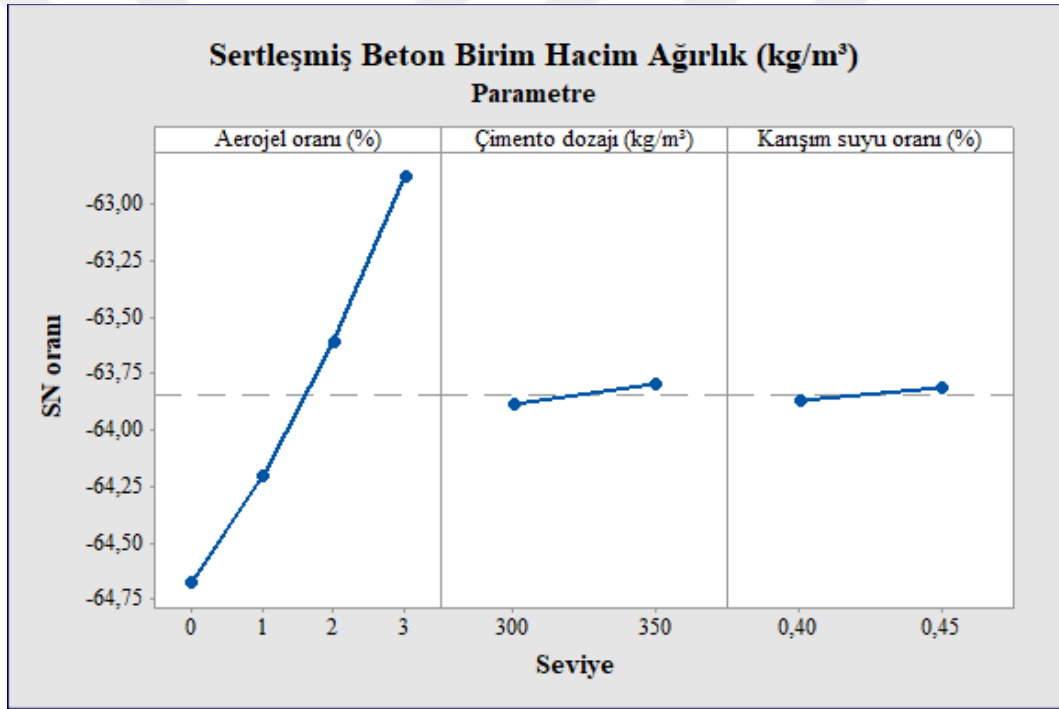
Çalışma kapsamında üretilen sertleşmiş beton numunelerin birim hacim ağırlık değerleri Tablo 27 ve Şekil 45’de sunulmuştur. Ayrıca elde edilen değerlerin optimizasyonu için MINITAB 19 programında en küçük en iyi yöntemi ayarlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen S/N oranları Tablo 27 ve Şekil 46’da sunulmuştur.

Tablo 27: SAKHB’de Sertleşmiş Beton Birim Hacim Ağırlık Değeri ve S/N Oranı

Karışım Kodu	Birim Hacim Ağırlık Değerleri (kg/m ³)		S/N Oranı
	Sonuçlar	Ortalama	
SA030040	1722	1723	64,6345
	1735		
	1712		
SA035045	1730	1705	64,6345
	1690		
	1695		
SA130040	1641	1642	64,3075
	1660		
	1625		
SA135045	1607	1604	64,1041
	1620		
	1585		
SA230045	1516	1507	63,5623
	1525		
	1480		
SA235040	1512	1523	63,6540
	1517		
	1540		
SA330045	1433	1405	62,9535
	1390		
	1392		
SA335040	1370	1380	62,7976
	1365		
	1405		



Şekil 45: SAKHB'de Sertleşmiş Beton Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları



Şekil 46: SAKHB'de Sertleşmiş Beton Birim Hacim Ağırlık Deneyi S/N Oran Grafiği

S/N oranının gösterildiği grafik incelendiğinde %3 aerojel oranı, 350 kg/m³ çimento ve 0,45 oranında karışım suyu oranı içeren numunenin en küçük sertleşmiş beton birim hacim ağırlık değerine sahip olacağı anlaşılmıştır.

Tablo 28'de verilen ortalama yanıt tablosu incelendiğinde sertleşmiş beton birim hacim ağırlık değeri üzerinde en çok etkili parametrenin silika aerojel oranı olduğu görülmektedir.

Tablo 28: SAKHB'de Sertleşmiş Beton Birim Hacim Ağırlık Değeri Yanıt Tablosu

Level	Aerojel Oranı	Çimento Dozajı	Karışım Suyu Oranı
1	-64,68	-63,89	-63,87
2	-64,21	-63,80	-63,81
3	-63,61		
4	-62,88		
Delta	1,80	0,09	0,06
Rank	1	2	3

Tablo 29’da SAKHB numunelerinin sertleşmiş beton birim hacim ağırlık değerlerine ait varyans analizi sonuçları görülmektedir. Birim ağırlık değerinde en etkili faktör %98,87 ile aerojel oranının etkili olduğu belirlenmiştir. Birim ağırlık değeri üzerinde parametrelerin etki düzeyinin belirlenmesi için analiz verileri incelendiğinde; aerojel oranının P değeri (0,007) 0,05 değerinden küçük olduğundan istatistiksel olarak anlamlı olduğu, çimento dozajı ile karışım suyu oranının P değerleri 0,05 değerinden büyük olduğundan istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirlenmiştir.

Tablo 29: SAKHB'de Sertleşmiş Beton Birim Ağırlık Değerinin Varyans Analizi

Parametre	SB	S	Etki	MS	F-Değeri	P-Değeri
Aerojel Oranı (%)	3	115522	98,87%	38507,5	148,03	0,007
Çimento Dozajı (kg/m ³)	1	528	0,45%	528,1	2,03	0,290
Karışım Suyu Oranı (%)	1	276	0,24%	276,1	1,06	0,411
Hata	2	520	0,45%	260,1		
Toplam	7	116847	100,00%			

Tablo 30 incelendiğinde ise gerçekleştirilen modelin %99,55 güven seviyesinde olduğu görülmüştür.

Tablo 30: SAKHB'de Sertleşmiş Beton Birim Ağırlık Değeri Model Özeti

S	R ²	R ² (Düzeltilmiş)	Press	R ² (Tahmini)
16,1284	99,55%	98,44%	8324	92,88%

Uygulanan regresyon analizi sonucunda Tablo 31’deki regresyon eşitliği verisi elde edilmiştir. Tablo 32’de ise deney sonunda elde edilen değerler ile regresyon denklem ile elde

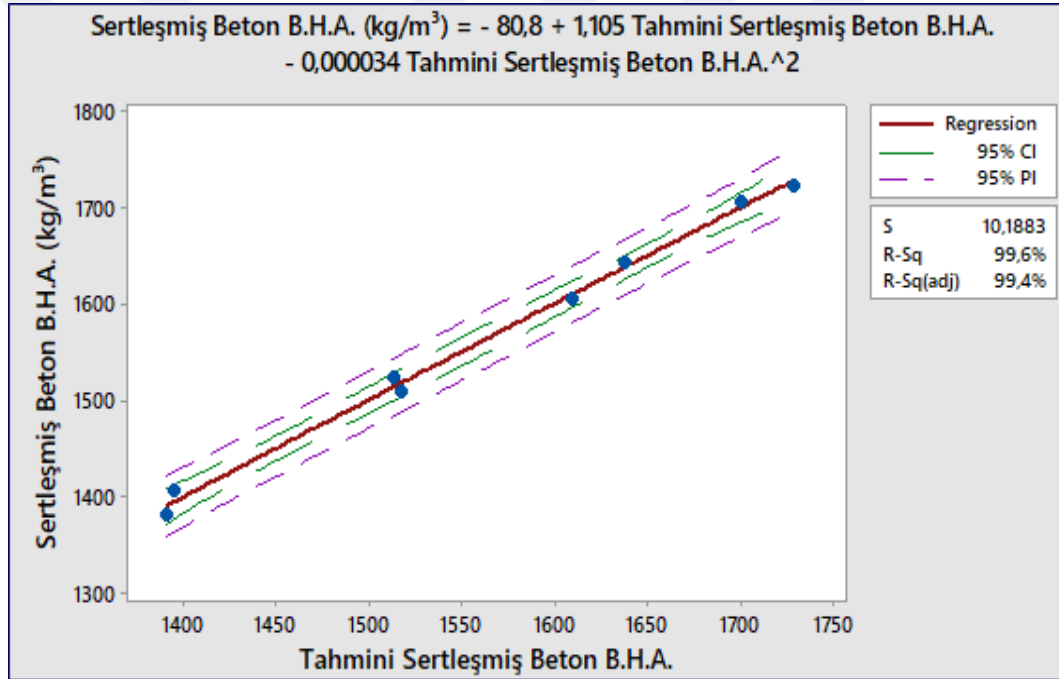
edilen tahmini değerler verilmiş ve ayrıca tahmini değerler ile gerçek değerlerin grafiği Şekil 47’de verilmiştir.

Tablo 31: SAKHB’de Sertleşmiş Beton Birim Ağırlık Değeri Regresyon Denklemi

Sertleşmiş Beton Birim H.A. (kg/m ³)	1928 - 107,25 Aerojel Oranı (%) - 0,325 Çimento Dozajı (kg/m ³) - 235 Karışım Suyu Oranı (%)
---	---

Tablo 32: SAKHB’de Sertleşmiş Beton Birim Ağırlık Ortalama ve Tahmini Değeri

Deney Numarası	1	2	3	4	5	6	7	8
Ort. Birim Ağırlık (kg/m ³)	1723	1705	1642	1604	1507	1523	1405	1380
Tahmini Birim Ağırlık (kg/m ³)	1728	1700	1637	1609	1517	151	1395	1390



Şekil 47: SAKHB’de Gerçek ve Tahmini Sertleşmiş Beton Birim Ağırlık Grafiği

Üretimi sağlanan silika aerojin özgül ağırlığının atık BBT ve çimentoya kıyasla küçük olması nedeniyle aerojin karışımında ki oranının artması hem taze betonda hem de sertleşmiş betonda birim ağırlığın düşmesine neden olmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen değerler bize üretilen numunelerin hafif beton standartlarında olduğunu göstermektedir.

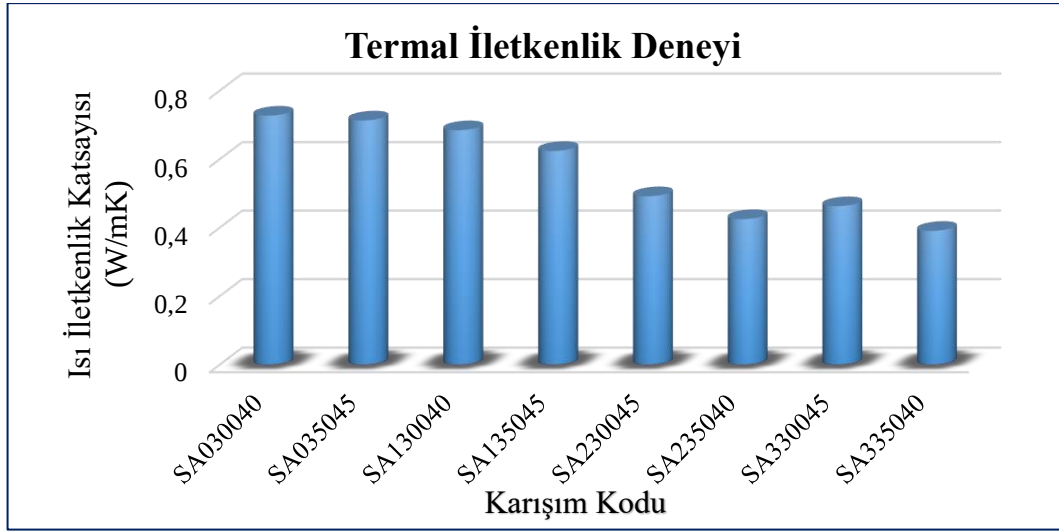
Gerçekleştirilen analiz verileri sonucunda, ısı iletim katsayısının optimum olacağı öngörülen karışım oranlarına göre yapılan doğrulama deneyinde numunenin birim ağırlık değeri 1397 kg/m³ bulunmuştur.

3.2.4. Termal İletkenlik Deney Sonuçları

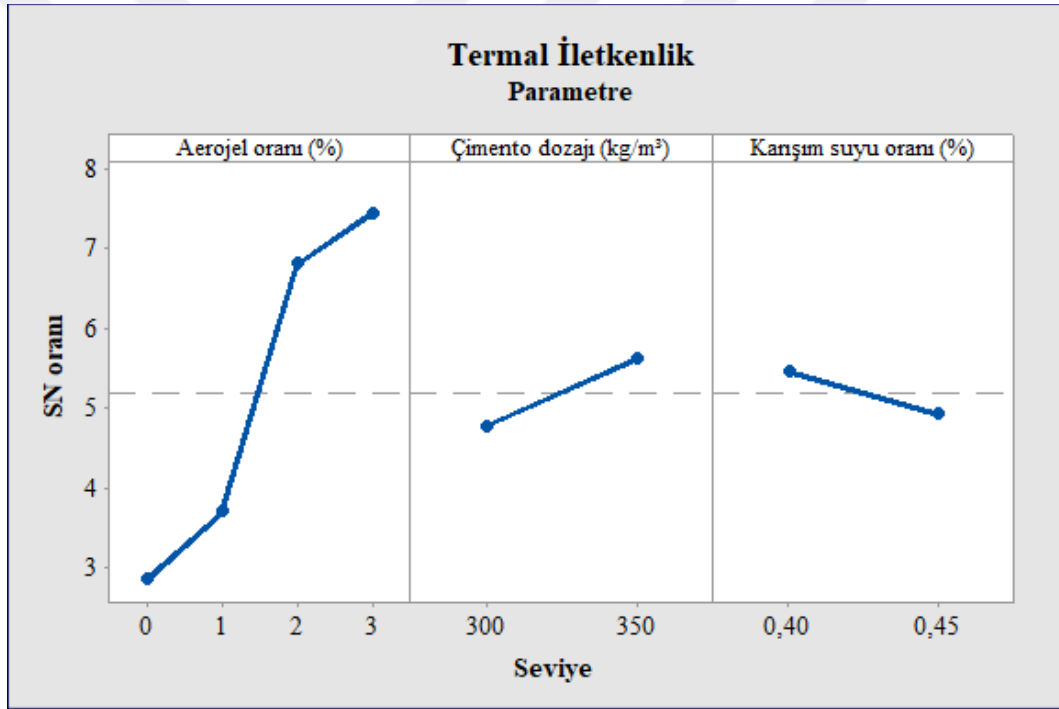
Çalışma kapsamında üretilen numunelerden elde edilen termal iletkenlik değerleri Tablo 33 ve Şekil 48’de sunulmuştur. Ayrıca elde edilen değerlerin optimizasyonu için MINITAB 19 programında en küçük en iyi yöntemi ayarlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen S/N oranları Tablo 33 ve Şekil 49’da sunulmuştur.

Tablo 33: SAKHB’de Termal İletkenlik Değerleri ve S/N Oranı

Karışım Kodu	Isı İletim Katsayısı Değerleri (W/mK)		S/N Oranı
	Sonuçlar	Ortalama	
SA030040	0,6921	0,7131	2,93699
	0,7241		
	0,7231		
SA035045	0,7235	0,7272	2,76692
	0,7315		
	0,7266		
SA130040	0,7010	0,6846	3,29126
	0,6790		
	0,6738		
SA135045	0,6031	0,6240	4,09631
	0,6327		
	0,6362		
SA230045	0,5136	0,4919	6,16246
	0,4890		
	0,4731		
SA235040	0,4430	0,4252	7,42813
	0,4125		
	0,4201		
SA330045	0,4710	0,4628	6,69213
	0,4540		
	0,4634		
SA335040	0,4105	0,3908	8,16091
	0,4039		
	0,3580		



Şekil 48: SAKHB'de Termal İletkenlik Deney Sonuçları



Şekil 49: SAKHB'de Termal İletkenlik Deneyi S/N Oran Grafiği

S/N oranının gösterildiği grafik incelendiğinde %3 aerojel oranı, 350 kg/m³ çimento ve 0,40 oranında karışım suyu oranı içeren numunenin en küçük termal iletkenlik değerine sahip olacağı anlaşılmıştır.

Tablo 34'de verilen ortalama yanıt tablosu incelendiğinde termal iletkenlik değeri üzerinde en çok etkili parametrenin silika aerojel oranı olduğu görülmektedir.

Tablo 34: SAKHB'de Termal İletkenlik Değeri Yanıt Tablosu

Level	Aerojel Oranı	Çimento Dozajı	Karışım Suyu Oranı
1	2,852	4,771	5,454
2	3,694	5,613	4,929
3	6,795		
4	7,427		
Delta	4,575	0,842	0,525
Rank	1	2	3

Tablo 35’de SAKHB numunelerinin termal iletkenlik değerlerine ait varyans analizi sonuçları görülmektedir. Termal iletkenlik değerinde en etkili faktör %94,87 ile aerojel oranının etkili olduğu belirlenmiştir. Termal iletkenlik değeri üzerinde parametrelerin etki düzeyinin belirlenmesi için analiz verileri incelendiğinde; aerojel oranının P değeri (0,017) 0,05 değerinden küçük olduğundan istatistiksel olarak anlamlı olduğu, çimento dozajı ile karışım suyu oranının P değerleri 0,05 değerinden büyük olduğundan istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirlenmiştir.

Tablo 35: SAKHB'de Termal İletkenlik Değerinin Varyans Analizi Sonuçları

Parametre	SB	S	Etki	MS	F-Değeri	P-Değeri
Aerojel Oranı (%)	3	0,124954	94,87%	0,041651	59,41	0,017
Çimento Dozajı (kg/m ³)	1	0,004287	3,26%	0,004287	6,12	0,132
Karışım Suyu Oranı (%)	1	0,001063	0,81%	0,001063	1,52	0,343
Hata	2	0,001402	1,06%	0,000701		
Toplam	7	0,131706	100,00%			

Tablo 36 incelendiğinde ise gerçekleştirilen modelin %98,94 güven seviyesinde olduğu görülmüştür.

Tablo 36: SAKHB'de Termal İletkenlik Değeri Model Özeti

S	R ²	R ² (Düzeltilmiş)	Press	R ² (Tahmini)
0,0264768	98,94%	96,27%	0,0224327	82,97%

Uygulanan regresyon analizi sonucunda Tablo 37’deki regresyon eşitliği verisi elde edilmiştir. Tablo 38’da ise deney sonunda elde edilen değerler ile regresyon denklem ile elde

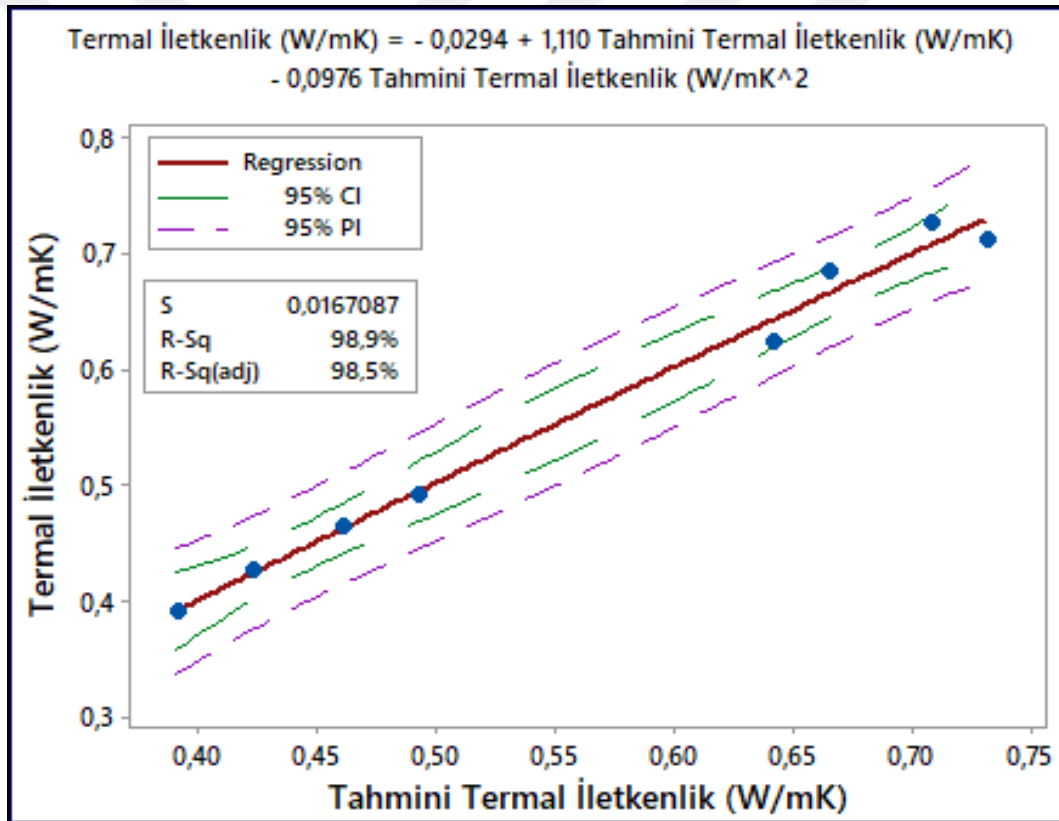
edilen tahmini değerler verilmiş ve ayrıca tahmini değerler ile gerçek değerlerin grafiği Şekil 50'de verilmiştir.

Tablo 37: SAKHB'de Termal İletkenlik Değeri Regresyon Denklemi

Termal İletkenlik (W/mK)	0,831 - 0,1076 Aerojel Oranı (%) - 0,000926 Çimento Dozajı (kg/m ³) + 0,461 Karışım Suyu Oranı (%)
--------------------------	--

Tablo 38: SAKHB'de Termal İletkenlik Ortalama ve Tahmini Değeri

Deney Numarası	1	2	3	4	5	6	7	8
Ort. Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0,7131	0,7272	0,6846	0,624	0,4919	0,4252	0,4628	0,3908
Tahmini Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0,7318	0,7085	0,6659	0,6427	0,4932	0,4239	0,4615	0,3921



Şekil 50: SAKHB'de Termal İletkenlik Gerçek ve Tahmini Değer Grafiği

Veriler incelendiğinde; en yüksek termal iletkenlik değerin 0,7272 W/mK ile SA030040 karışım kodlu deney numunesine ait olduğu, en düşük termal iletkenlik değerinin ise 0,3908 W/mK SA335040 karışım kodlu deney numunesine ait olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca numunelere silika aerojel ikamesi arttıkça, termal iletkenlik değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. Bir başka deyişle silika aerojel ikamesi ile daha yalıtkan bir hafif beton numunesi üretilmiştir.

Çatılar ve duvarlar gibi betonla inşa edilen yapı bileşenlerinden kaynaklanan ısı kaybı miktarı, binaların enerji tüketimini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu bağlamda, çimento esaslı malzemelerin ısı iletkenliği, iletim yoluyla ısı transferini değerlendirmede yardımcı olabilmektedir (Rostami vd., 2021). Bu nedenle, daha yüksek aerojel içeriği, daha düşük termal iletkenlik ile sonuçlanmaktadır. Aerojel kümelerindeki nanoyapı gözenekleri ağı bu kanıyı haklı çıkarabilmektedir. Diğer bir deyişle, aerojel gözenekleri içinde önemli miktarda hava boşluğunun varlığı ısıyı yalıtmakta ve sonuç olarak numunelerin termal iletkenliğini azaltmaktadır.

Yapılan literatür taraması çalışmamızda elde ettiğimiz verileri destekler niteliktedir. Beton malzemesinin yanı sıra çimento ve sıva gibi yapı malzemelerinde de aerojel katkısının termal iletkenlik özelliğini iyileştirdiği görülmüştür (Gao vd., 2014; Li vd., 2019; Ng vd., 2015; Welsch vd., 2017; Tsioulou vd., 2017; Wang; 2018; Welsch & Schnellenbach-Held, 2018; Zhang vd., 2020; Ramakrishnan vd., 2015; Rostami vd; 2021; Kim vd., 2013; Shafi vd., 2019; Buratti, 2014; Westgate vd., 2018; Fantucci vd., 2019; Julio vd., 2016).

Türkiye’de enerji kayıplarının önlenmesi amacıyla yapılarda ısı yalıtımı uygulanırken TS 825 standardına baz alınmaktadır. Tez çalışmasında %3 silika aerojel ikamesi ile elde edilen hafif betonun ısı iletim katsayısı değerinin, yoğunluk olarak neredeyse %50 daha düşük yoğunluğa sahip “beton briket veya duvar bloklar, doğal bims betondan yapılan dolu bloklarla” yaklaşık olduğu TS 825 standardında gözlenmiştir (Tablo 39).

Tablo 39: Yapı Malzemelerinin Isıl İletkenlik Değerlerinin Karşılaştırılması (TS 825)

Malzeme veya Bileşenin Çeşidi	Birim Hacim Kütlesi (kg/m ³)	Isıl iletkenlik Katsayısı (W/mK)
Gaz Beton Duvar Blokları	800	0,29
Beton Briket veya Duvar Blokları	700-1400	0,37-0,63
Doğal Bims Betondan Dolu Bloklar	900-1400	0,39-0,57
Gerçekleştirilen Çalışmada	1380	0,3908

Gerçekleştirilen analiz verileri sonucunda, ısı iletim katsayısının optimum olacağı karışım oranının belirlenmesi için çizilen S/N oran grafiği incelendiğinde “SAKHB3 (%3 silika aerojel içeren), C2 (350 kg/m³ çimento dozajı içeren) ve W/C1(0,40 karışım suyu oranı)” değeri belirlenmiştir. Taguchi yönteminin uygulama prensibine dayanarak belirlenen parametrelerde deney tekrarlanmış ve ısı iletim katsayısı 0,4012 W/mK bulunmuştur. Tez çalışmasında en optimum değer olarak ulaşılan 0,3908 W/mK ısı iletim katsayısı Tablo 39’da verilen benzer bloklarla karşılaştırıldığında yoğunluğu daha yüksek olmasına rağmen ısı iletim katsayısı

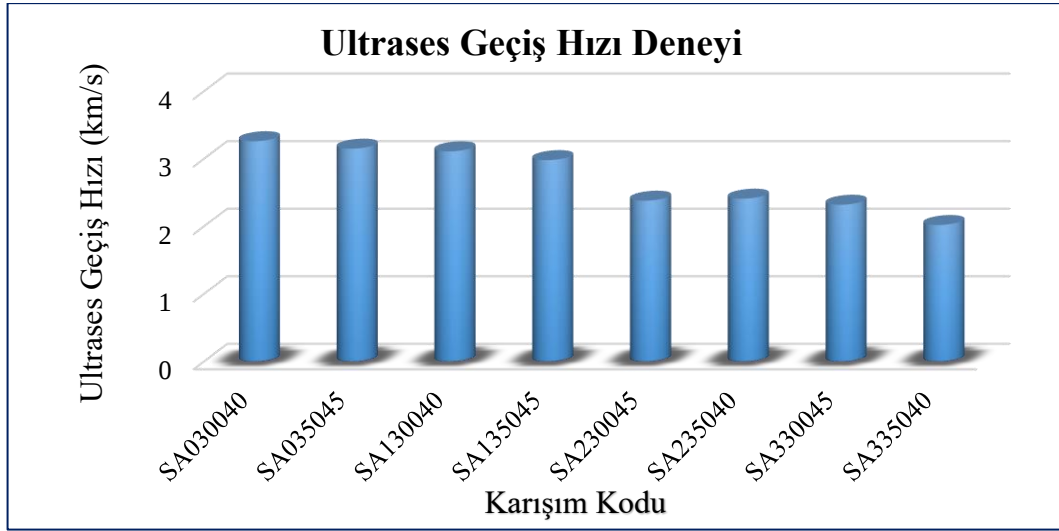
değerlerinin yakın olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçta bize silika aerogelin hafif betonun yalıtım özelliğini iyileştirdiğini göstermektedir.

3.2.5. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

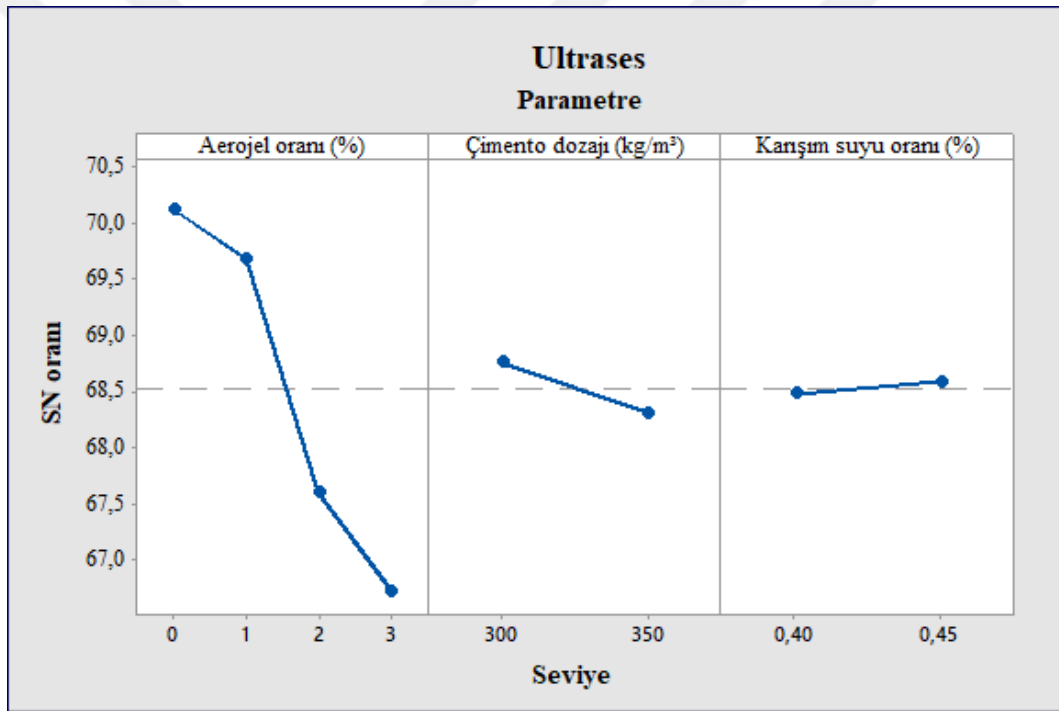
Çalışma kapsamında üretilen numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri Tablo 40 ve Şekil 51’de sunulmuştur. Ayrıca elde edilen değerlerin optimizasyonu için MINITAB 19 programında en büyük en iyi yöntemi ayarlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen S/N oranları Tablo 40 ve Şekil 52’de sunulmuştur.

Tablo 40: SAKHB’de Ultrases Geçiş Hızı Değerleri ve S/N Oranı

Karışım Kodu	Ultrases Geçiş Hızı Değerleri (km/s)		S/N Oranı
	Sonuçlar	Ortalama	
SA030040	3,36	3,26	70,2777
	3,11		
	3,32		
SA035045	3,22	3,15	69,9662
	3,00		
	3,23		
SA130040	3,05	3,11	69,8692
	3,23		
	3,06		
SA135045	2,87	2,98	69,4989
	3,03		
	3,05		
SA230045	2,28	2,38	67,5607
	2,42		
	2,46		
SA235040	2,49	2,41	67,6475
	2,36		
	2,38		
SA330045	2,29	2,32	67,3285
	2,38		
	2,30		
SA335040	1,98	2,02	66,1156
	2,15		
	1,93		



Şekil 51: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları



Şekil 52: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Deneyi S/N Oran Grafiği

S/N oranının gösterildiği grafik incelendiğinde %3 aerojel oranı, 350 kg/m³ çimento ve 0,45 oranında karışım suyu oranı içeren numunenin en büyük ultrases geçiş hızı değerine sahip olacağı anlaşılmıştır.

Tablo 41'de verilen ortalama yanıt tablosu incelendiğinde ultrases geçiş hızı değeri üzerinde en çok etkili parametrenin aerojel oranı olduğu görülmektedir.

Tablo 41: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Değeri Yanıt Tablosu

Level	Aerojel Oranı	Çimento Dozajı	Karışım Suyu Oranı
1	70,12	68,76	68,48
2	69,68	68,31	68,59
3	67,60		
4	66,72		
Delta	3,40	0,45	0,11
Rank	1	2	3

Tablo 42’de SAKHB numunelerinin ultrases geçiş hızı değerlerine ait varyans analizi sonuçları görülmektedir. Ultrases geçiş hızı değerinde en etkili faktör %96,06 ile aerojel oranının etkili olduğu belirlenmiştir. Ultrases geçiş hızı değeri üzerinde parametrelerin etki düzeyinin belirlenmesi için analiz verileri incelendiğinde; aerojel oranının P değeri (0,026) 0,05 değerinden küçük olduğundan istatistiksel olarak anlamlı olduğu, çimento dozajı ile karışım suyu oranının P değerleri 0,05 değerinden büyük olduğundan istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirlenmiştir.

Tablo 42: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Değerinin Varyans Analizi Sonuçları

Parametre	SB	S	Etki	MS	F-Değeri	P-Değeri
Aerojel Oranı (%)	3	1494036	96,06%	498012	37,18	0,026
Çimento Dozajı (kg/m ³)	1	34322	2,21%	34322	2,56	0,251
Karışım Suyu Oranı (%)	1	144	0,01%	144	0,01	0,927
Hata	2	26788	1,72%	13394		
Toplam	7	1555291	100,00%			

Tablo 43 incelendiğinde ise gerçekleştirilen modelin %98,28 güven seviyesinde olduğu görülmüştür.

Tablo 43: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Değeri Model Özeti

S	R ²	R ² (Düzeltilmiş)	Press	R ² (Tahmini)
115,734	98,28%	93,97%	428616	72,44%

Uygulanan regresyon analizi sonucunda Tablo 44’deki regresyon eşitliği verisi elde edilmiştir. Tablo 45’de ise deney sonunda elde edilen değerler ile regresyon denklem ile elde

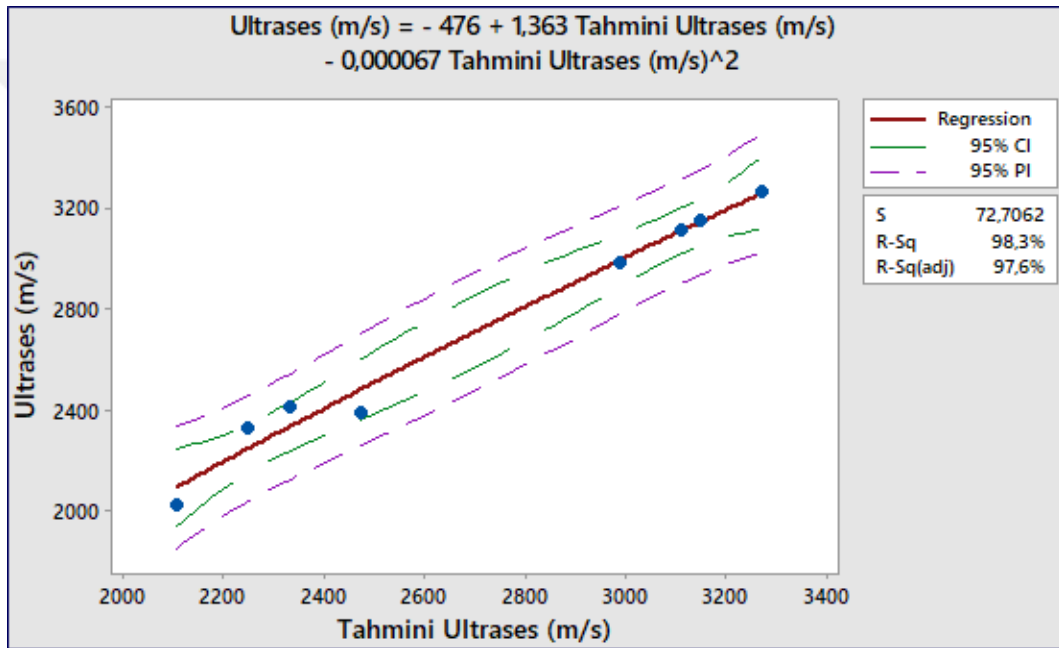
edilen tahmini değerler verilmiş ve ayrıca tahmini değerler ile gerçek değerlerin grafiği Şekil 53'de verilmiştir.

Tablo 44: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Değeri Regresyon Denklemi

Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	4050 - 375,2 Aerojel Oranı (%) - 2,62 Çimento Dozajı (kg/m ³) + 170 Karışım Suyu Oranı (%)
------------------------------	---

Tablo 45: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Ortalama ve Tahmini Değeri

Deney Numarası	1	2	3	4	5	6	7	8
Ort. Ultrases (km/s)	3,26	3,15	3,11	2,98	2,38	2,41	2,32	2,02
Tahmini Ultrases	3,26	3,14	3,11	2,98	2,47	2,33	2,24	2,10



Şekil 53: SAKHB'de Ultrases Geçiş Hızı Gerçek ve Tahmini Grafiği

Uygulama yapılan numunenin yoğunluğu ile ultrases geçiş hızı arasında bir ilişki vardır. Malzemenin yapısında bulunan gözenekliliğin artması ultrasonik dalga hızlarının düşmesine neden olmaktadır. Çalışmamızda kullanılan aerogelin gözenekli yapıda olması, numunedeki aerogel miktarının artmasıyla gözenekli yapıda olmasını artırmaktadır. Bu durumda ölçüm sonuçlarını doğrulamaktadır. Ayrıca ultrases geçiş hızı deneyi bize, numunedeki boşluk oranı, basınç dayanımı ile su emme değerlerinin yorumlanmasına yardımcı olmaktadır.

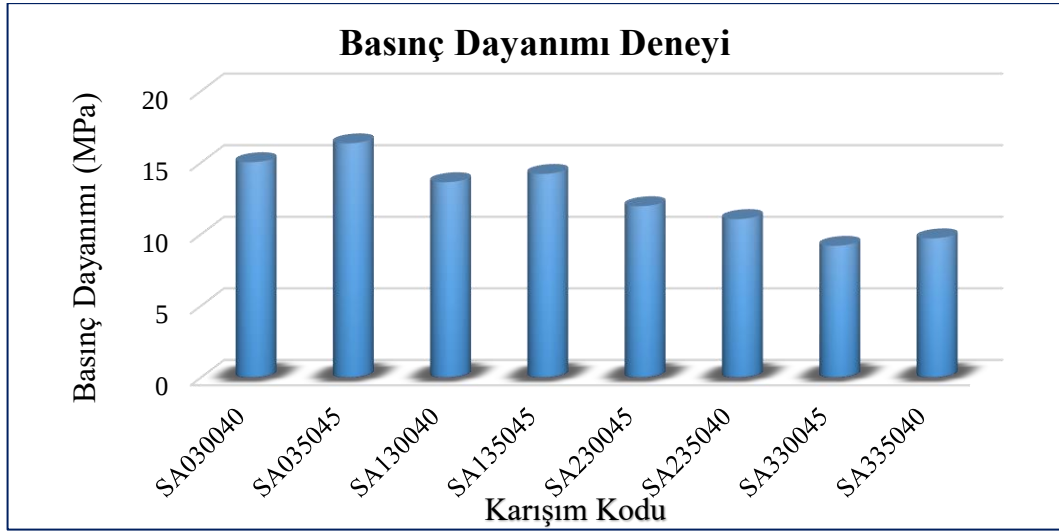
Gerçekleştirilen analiz verileri sonucunda, ısı iletim katsayısının optimum olacağı öngörülen karışım oranlarına göre yapılan doğrulama deneyinde numunenin ultrases geçiş hızı değeri 2,15 km/s bulunmuştur.

3.2.6. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

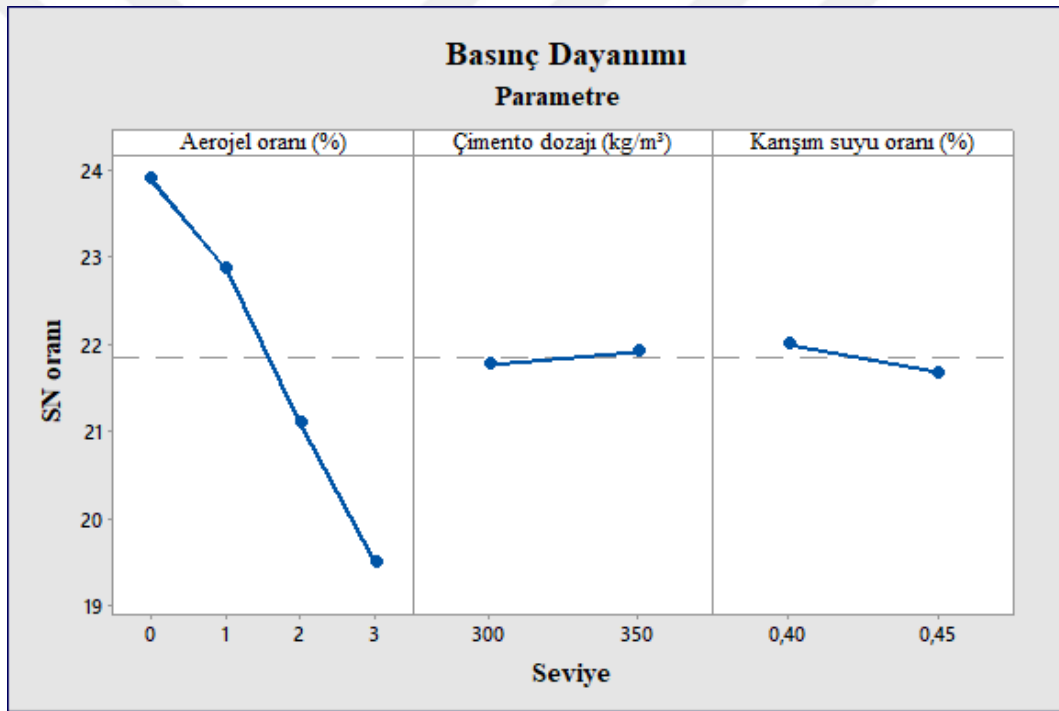
Çalışma kapsamında üretilen numunelere ait basınç dayanımı değerleri Tablo 46 ve Şekil 54’de sunulmuştur. Ayrıca elde edilen değerlerin optimizasyonu için MINITAB 19 programında en büyük en iyi yöntemi ayarlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen S/N oranları Tablo 46 ve Şekil 55’de sunulmuştur.

Tablo 46: SAKHB’de Basınç Dayanımı Değeri ve S/N Oranı

Karışım Kodu	Basınç Dayanımı Değerleri (MPa)		S/N Oranı
	Sonuçlar	Ortalama	
SA030040	15,82	15,04	24,2730
	14,85		
	14,45		
SA035045	16,55	16,35	23,5450
	15,85		
	16,66		
SA130040	12,80	13,64	22,6963
	14,01		
	14,11		
SA135045	14,90	14,22	23,0580
	14,05		
	13,71		
SA230045	12,07	11,96	20,8790
	12,03		
	11,52		
SA235040	11,35	11,06	21,3377
	10,97		
	10,87		
SA330045	9,85	9,19	19,2710
	8,72		
	9,01		
SA335040	10,30	9,72	19,7533
	9,95		
	8,91		



Şekil 54: SAKHB'de Basınç Dayanımı Deney Sonuçları



Şekil 55: SAKHB'de Basınç Dayanımı Deneyi S/N Oran Grafiği

S/N oranının gösterildiği grafik incelendiğinde %0 aerojel oranı, 350 kg/m³ çimento ve 0,40 oranında karışım suyu oranı içeren numunenin en büyük basınç dayanımı değerine sahip olacağı anlaşılmıştır.

Tablo 47'de verilen ortalama yanıt tablosu incelendiğinde basınç dayanımı değeri üzerinde en çok etkili parametrenin aerojel oranı olduğu görülmektedir.

Tablo 47: SAKHB'de Basınç Dayanımı Değeri Yanıt Tablosu

Level	Aerojel Oranı	Çimento Dozajı	Karışım Suyu Oranı
1	23,91	21,78	22,02
2	22,88	21,92	21,69
3	21,11		
4	19,51		
Delta	4,40	0,14	0,33
Rank	1	3	2

Tablo 48'de SAKHB numunelerinin basınç dayanımı değerlerine ait varyans analizi sonuçları görülmektedir. Basınç dayanımı değerinde en etkili faktör %97,12 ile aerojel oranının etkili olduğu belirlenmiştir. Basınç dayanımı değeri üzerinde parametrelerin etki düzeyinin belirlenmesi için analiz verileri incelendiğinde; aerojel oranının P değeri (0,029) 0,05 değerinden küçük olduğundan istatistiksel olarak anlamlı olduğu, çimento dozajı ile karışım suyu oranının P değerleri 0,05 değerinden büyük olduğundan istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirlenmiştir.

Tablo 48: SAKHB'de Basınç Dayanımı Değerinin Varyans Analizi Sonuçları

Parametre	SB	S	Etki	MS	F-Değeri	P-Değeri
Aerojel Oranı (%)	3	45,5266	97,12%	15,1755	33,75	0,029
Çimento Dozajı (kg/m ³)	1	0,019	0,04%	0,0190	0,04	0,856
Karışım Suyu Oranı (%)	1	0,4325	0,92%	0,4325	0,96	0,430
Hata	2	0,8992	1,92%	0,4496		
Toplam	7	46,8772	100,00%			

Tablo 49 incelendiğinde ise gerçekleştirilen modelin %98,08 güven seviyesinde olduğu görülmüştür.

Tablo 49: SAKHB'de Basınç Dayanımı Değeri Model Özeti

S	R ²	R ² (Düzeltilmiş)	Press	R ² (Tahmini)
0,670508	98,08%	93,29%	14,3866	69,31%

Uygulanan regresyon analizi sonucunda Tablo 50'daki regresyon eşitliği verisi elde edilmiştir. Tablo 51'de ise deney sonunda elde edilen değerler ile regresyon denklem ile elde

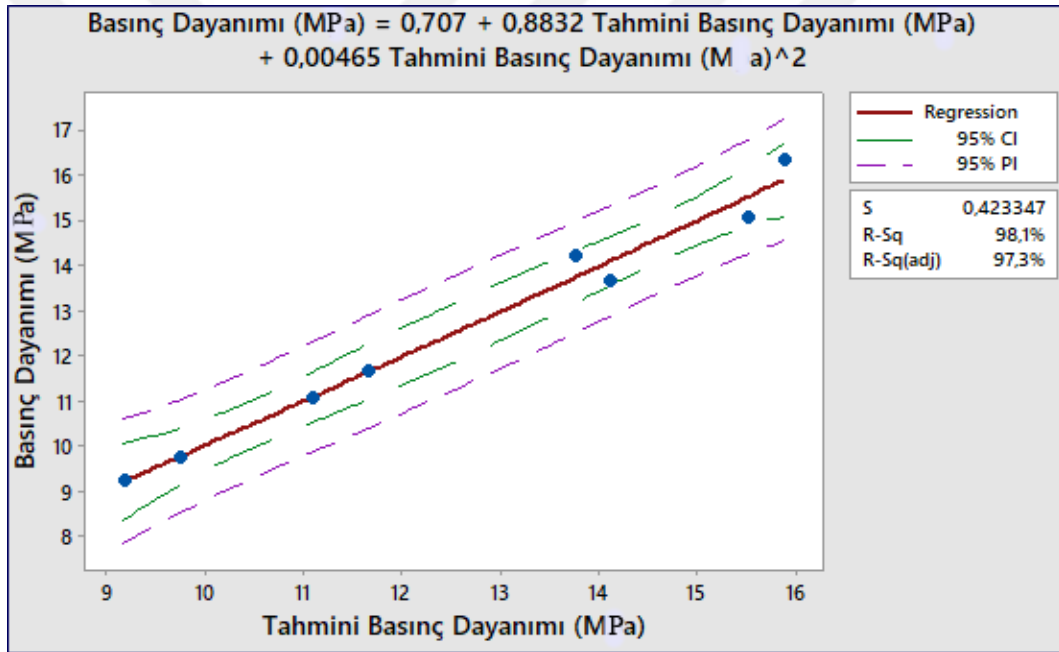
edilen tahmini değerler verilmiş ve ayrıca tahmini değerler ile gerçek değerlerin grafiği Şekil 56'da verilmiştir.

Tablo 50: SAKHB'de Basınç Dayanımı Değeri Regresyon Denklemi

Basınç Dayanımı (MPa) =	19,12- 2,129 Aerojel Oranı (%) + 0,00195 Çimento Dozajı (kg/m ³) - 9,30 Karışım Suyu Oranı (%)
-------------------------	--

Tablo 51: SAKHB'de Basınç Dayanımı Ortalama ve Tahmini Değeri

Deney Numarası	1	2	3	4	5	6	7	8
Ort. Basınç Dayanımı (MPa)	16,355	15,040	13,640	14,220	11,065	11,665	9,195	9,720
Tahmini Basınç Dayanımı (MPa)	15,881	15,514	14,114	13,746	11,084	11,646	9,176	9,739



Şekil 56: SAKHB'de Basınç Dayanımı Gerçek ve Tahmini Grafiği

Değerler incelendiğinde; numunelere ait basınç dayanımı değerlerinin 16,355 MPa - 9,72 MPa arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı değeri SA035045 karışım kodlu deney numunesinden sağlanırken, en düşük basınç dayanımı değeri SA330045 karışım kodlu deney numunesinden sağlanmıştır.

Çalışmada silika aerojel miktarının artmasıyla basınç dayanımında azalma meydana geldiği ve çimentonun bağlayıcılığı üzerinde silika aerojel katkısının olumsuz yönde etkisinin olduğu görülmüştür. Bir başka ifadeyle doğal agregaların aerojel ile değiştirilmesinin basınç dayanımının azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Buna göre, aerojel agregaların kırılma

doğası ve düşük mukavemetinin yanı sıra zayıf birleşik etkileri, aerjel malzemeleri içeren beton karışımlarının zayıf mekanik mukavemeti ile sonuçlanmaktadır (Jia vd., 2018). Bunun yanı sıra kırılğan yapıları nedeniyle aerjel SAKHB numunelerinin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Aerjelin basınç dayanımı üzerine etkisinin araştırıldığı çalışmalarda tez çalışmamızı destekler niteliktedir (Gao, 2014; Rostami, 2021; Wang vd., 2018; Welsch & Schnellenbach-Held, 2018; Adhikary, 2020; Shah vd., 2021; Westgate vd., 2018).

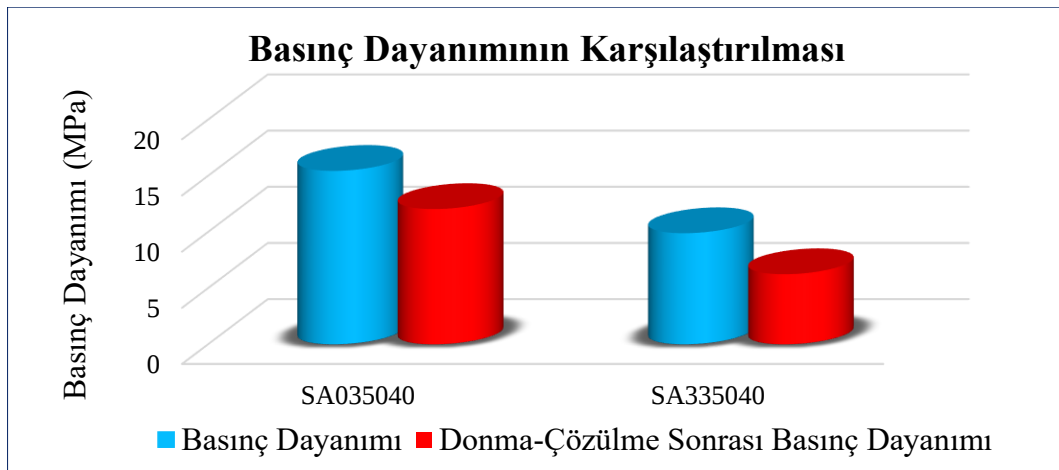
Gerçekleştirilen analiz verileri sonucunda, ısı iletim katsayısının optimum olacağı öngörülen karışım oranlarına göre yapılan doğrulama deneyinde basınç dayanımı 9,9 MPa bulunuştur.

3.2.7. Donma – Çözülmenin Basınç Dayanımı Üzerine Etkisi

Soğuk iklim bölgelerinde malzemenin kalıcılığını etkileyen en önemli olaylardan biri donma-çözülme olayıdır. Çalışmada analizler sonucu tespit edilen optimum seviyelere göre üretimi sağlanan SAKHB numunelerine donma çözülme deneyi uygulanmıştır. Numunelere donma çözülme öncesi ve sonrasında ki basınç değerleri ölçülerek elde edilen veriler Tablo 52 ve Şekil 57’de sunulmuştur.

Tablo 52: SAKHB’de Donma Çözülme Öncesi ve Sonrası Basınç Dayanımı Değerleri

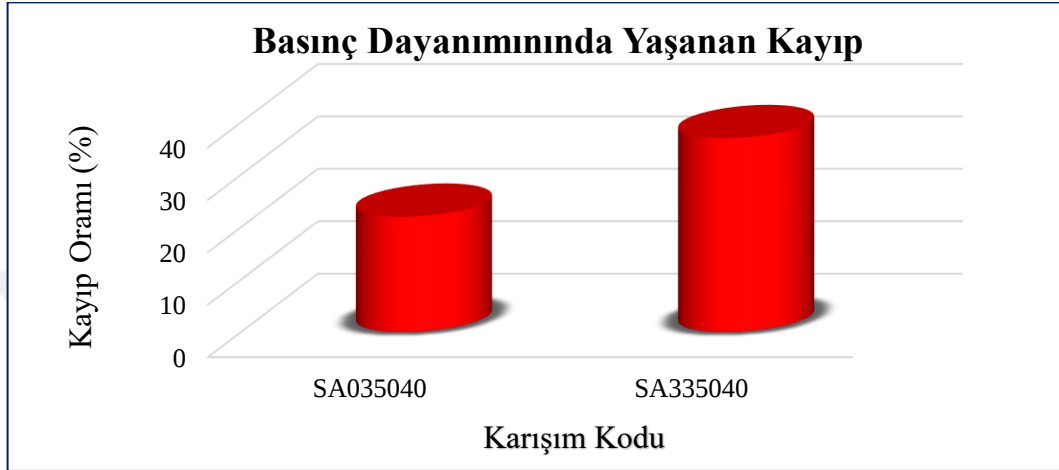
Karışım Kodu	Donma Çözülme Öncesi Basınç Dayanımı (MPa)		Donma Çözülme Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)	
	Sonuçlar	Ortalama	Sonuçlar	Ortalama
SA035040	14,90	15,45	9,70	9,90
	15,80		10,50	
	15,65		9,50	
	12,50		6,40	
SA335040	11,70	12,05	5,80	6,25
	11,95		6,55	



Şekil 57: SAKHB’de Donma Çözülmenin Basınç Dayanımına Etkisi

Numunelerde dayanım kaybı referans numunesinde 12,05 MPa ölçülürken, belirlenen optimum seviyedeki numunede ise 6,25 MPa olarak ölçüldüğü gözlenmiştir.

Şekil 58’de ise üretilen numunelerinin donma-çözülme sonrası basınç dayanım kaybı oranı verilmiştir. Şekil incelendiğinde; referans ve optimum seviyeli numunelerde yaklaşık olarak sırasıyla %22 ve %37 oranında dayanım kaybı olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan silika aerojel ikamesinin artması ile dayanım kaybının da arttığı tespit edilmiştir.



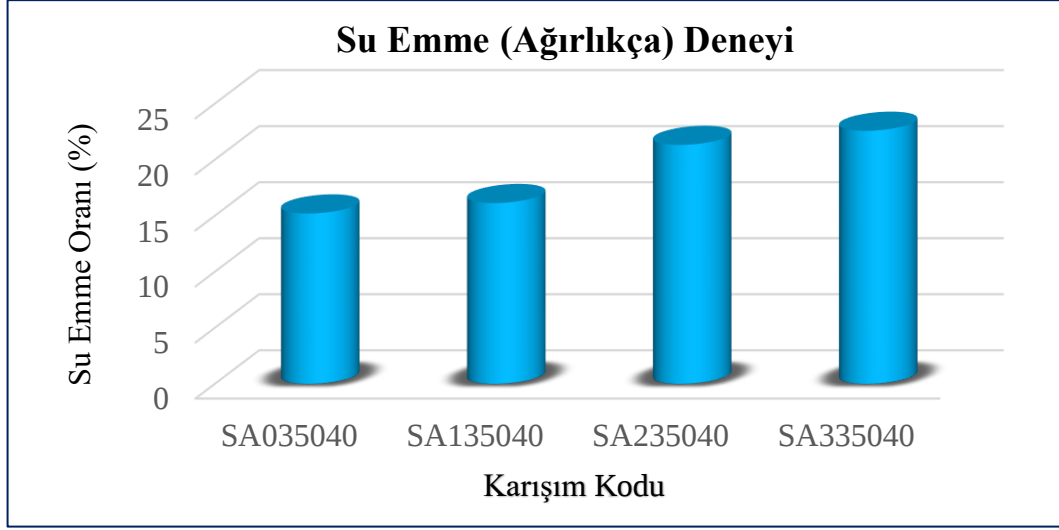
Şekil 58: SAKHB'de Donma Çözülme ile Basınç Dayanımından Yaşanan Kayıp Oranı

3.2.8. Su Emme (Ağırlıkça) Deney Sonuçları

Betonun yapısının geçirgen olması betonun dayanımı üzerindeki etkisi büyüktür. Hafif betonlarda ise su emmesi betonun gözenekliliği ile ilişkilidir. Gerçekleştirilen analizler sonrasında belirlenen optimum seviyelere göre üretimi sağlanan SAKHB numunelerine su emme (ağırlıkça) deneyi uygulanmış ve değerler Tablo 53 ve Şekil 59’da sunulmuştur.

Tablo 53: SAKHB'de Su Emme (Ağırlıkça) Değerleri

Karışım Kodu	Su Emme Değerleri (%)
	Ortalama
SA035040	15,21
SA135040	16,14
SA235040	21,33
SA335040	22,59



Şekil 59: SAKHB'de Su Emme (Ağırlıkça) Deney Sonuçları

Şekil 59 incelendiğinde; hafif beton numunelerine artan oranda silika aerojel ikamesinin hafif betonda su emilimini artırdığı. En düşük su emme oranı %15,21 ile SA035040 karışım kodlu referans numunesinde gözlenirken, en yüksek oran ise %3 oranında silika aerojel ikameli SA035040 karışım kodlu numunede elde edilmiştir.

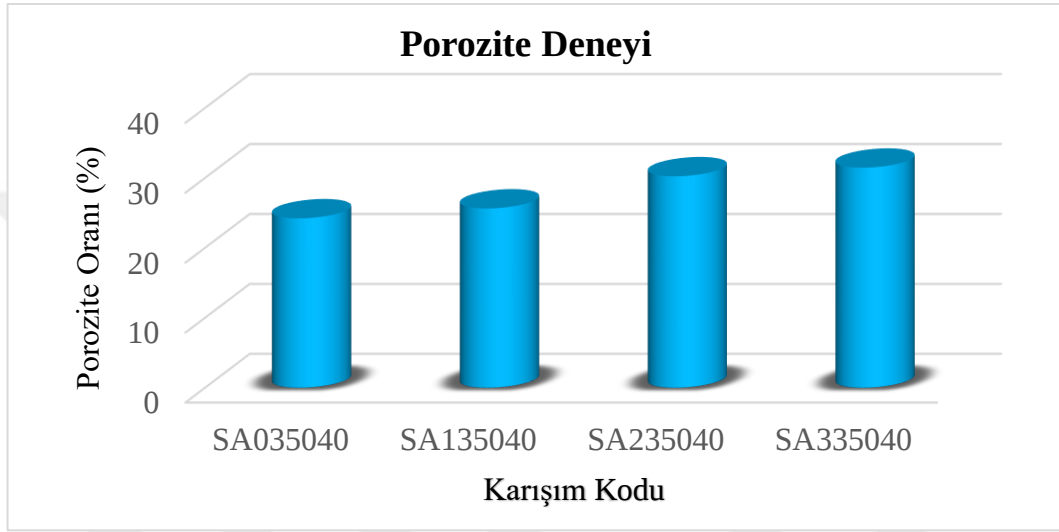
Silika aerojel katkılı hafif betonun artan oranda su emilimi gözlenmesinde, silika aerojel etrafında meydana gelen hava kabarcıklarının olması bu durumun gözlenmesine neden olabilir (Adhikary vd., 2022). Silika aerojelin çimentolu malzemeler ile tepkimesinde daha zayıf bir yapılaşma özelliğine sahip olması, beton içerisinde silika aerojelin etrafında hava kabarcıkları ve ayırma boşluklarının oluşmasına neden olduğu ve bu boşlukların gözenekliliği artırarak su emilim değerinin artmasına yol açabilir ve bu durum literatürde ki benzer çalışmalarla da desteklenmektedir (Adhikary vd., 2021; Rostami vd., 2021; Maia, 2021). Ayrıca SAKHB içerisinde silika aerojelin etrafında oluşan boşluklar optik mikroskop görüntülerin tarafından da desteklenmektedir.

3.2.9. Porozite Deney Sonuçları

Porozite, malzemenin gözeneklilik durumu olarak ifade edilebilmektedir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizler sonrasında belirlenen optimum seviyelere göre üretimi sağlanan SAKHB numunelerine uygulanan porozite deney sonuçları Tablo 54 ve Şekil 60'de verilmiştir.

Tablo 54: SAKHB'de Porozite Değerleri

Karışım Kodu	Porozite Değerleri (%)
	Ortalama
SA035040	24,24
SA135040	25,65
SA235040	30,25
SA335040	31,48

**Şekil 60:** SAKHB'de Porozite Deney Sonuçları

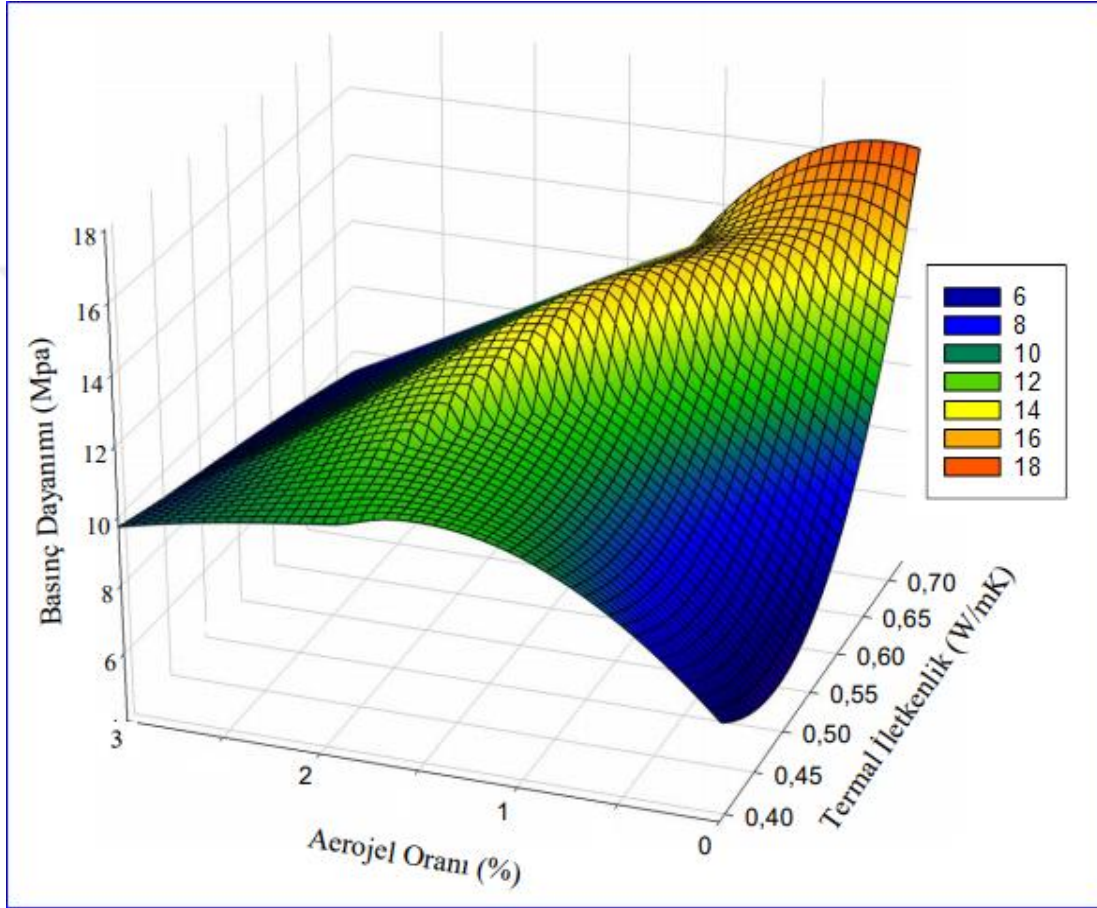
Şekil 60 incelendiğinde, silika arojel ikamesinin artmasıyla porozite oranlarında artış meydana geldiği görülmektedir. SAKHB numunelerinde en düşük porozite oranı değeri SA035040 karışım kodlu referans numunesinde (%24,24) ölçülürken, en yüksek porozite oranı değerinin ise %3 silika arojel ikameli SA335040 karışım kodlu numuneye (%31,48) ait olduğu görülmektedir.

Arojel agregaları etrafındaki su bakımından zengin bölge ile çimento matrisi arasındaki zayıf bağ, çimento macunu ve arojel agregaları arasında boşluklara neden olmaktadır (Júlio vd., 2016; Ng vd., 2016). Bu durum SAKHB numunelerinde porozite değerini artırmaktadır. Yapılan literatür taraması deney kapsamında elde edilen sonuçları desteklemektedir (Gao vd., 2014; Abbas vd., 2019). Aerojelin sadece hafif betonda kullanımında değil sıva ve köpük betonda kullanımı ile de porozite oranı değerlerinde artış meydana geldiği görülmüştür (Li vd., 2019; Cıza, 2021).

3.3. SİLİKA AEROJEL KATKILI HAFİF BETON DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

3.3.1. Termal İletkenlik ve Basınç Dayanımı Sonuçları

Şekil 48 ve Şekil 54’de sırasıyla SAKHB numunelerine ait termal iletkenlik değeri ve basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Şekil 61’de ise termal iletkenlik değeri ve basınç dayanımı değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 61: SAKHB'de Termal İletkenlik ve Basınç Dayanımı Sonuçlarının Karşılaştırılması

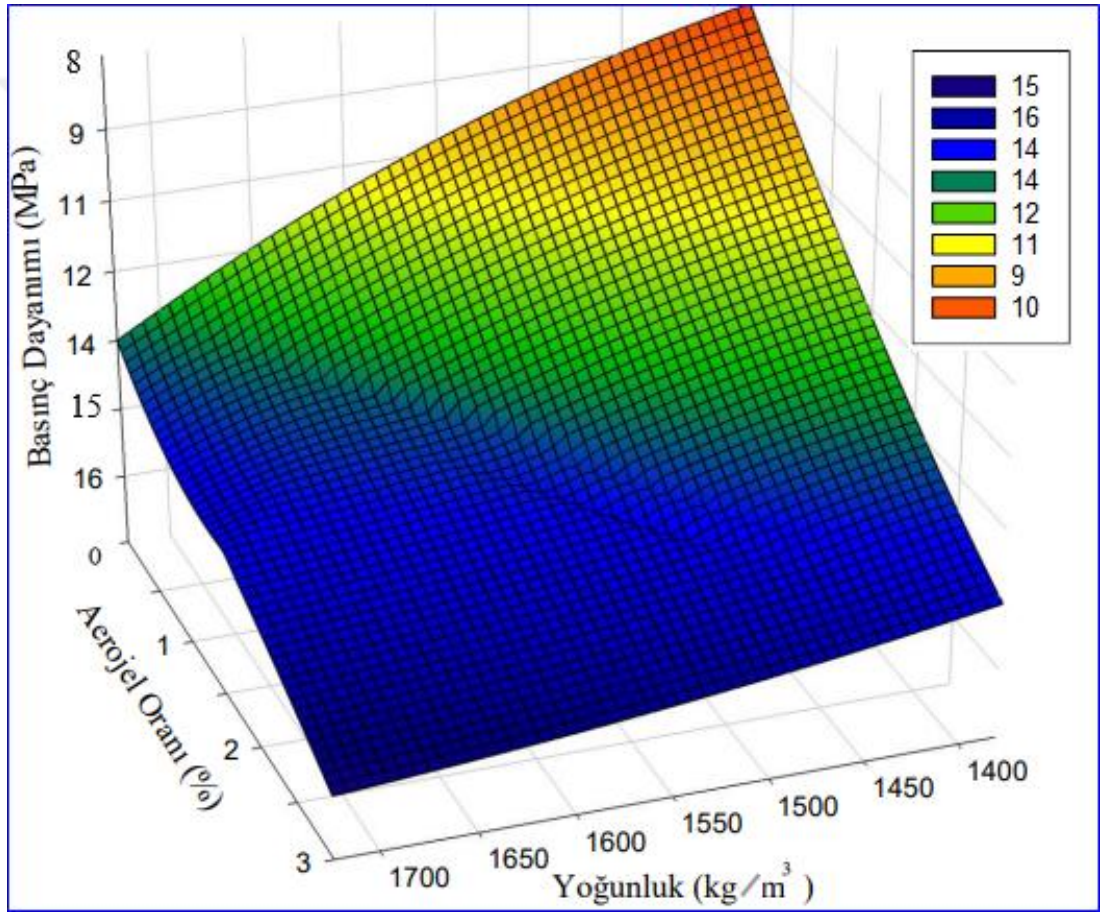
Şekil 61 incelendiğinde, S/N bileşeni ile gerçekleştirilen bu optimizasyonda, termal iletkenlik değerinin daha küçük en iyi parametresi uygulanırken, basınç dayanımının daha büyük olması seçilmiştir. Bir başka ifade ile hafif betonun içine ikame edilen silika arojel miktarı ne kadar artırılırsa ısı iletim katsayısında artma meydana geldiği, fakat aynı betonda arojel ikamesinin artması basınç dayanımında düşüşe neden olmuştur.

Çalışmanın en hassas noktalarından bir tanesi de bu dengenin sağlanmasıdır. Tez çalışmasının odak noktası olan yalıtım özelliğinin iyileştirilme, bu hassas noktanın belirlenmesine yardımcı olmuştur. Hafif betonda ki basınç dayanımı değerinin de güven aralığında kalması önemlidir. Gerçekleştirilen çalışmada referans numunesinin basınç dayanımı

değeri 15,82 MPa olarak orta dayanımlı hafif beton sınıfı (7-17MPa) içerisine girmiştir (ACI, 2014). Çalışmada içerisinde bulunduğu beton sınıfı değişmeden yalıtım özelliğinin iyileştirilmesi için silika aerjel ikame oranı ayarlanmış ve %3 oranında ki silika aerjel ikamesi ile basınç dayanımı değeri 9,95 MPa olarak bulunmuştur. Bu belirlenen oran sayesinde yalıtım özelliği iyileştirilmiş ve beton sınıfı değişmemiş SAKHB üretilmiştir.

3.3.2. Yoğunluk ve Basınç Dayanımı Sonuçları

Şekil 45 ve Şekil 54’de sırasıyla SAKHB numunelerine ait yoğunluk ve basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Şekil 62’de ise yoğunluk değeri ve basınç dayanımı değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

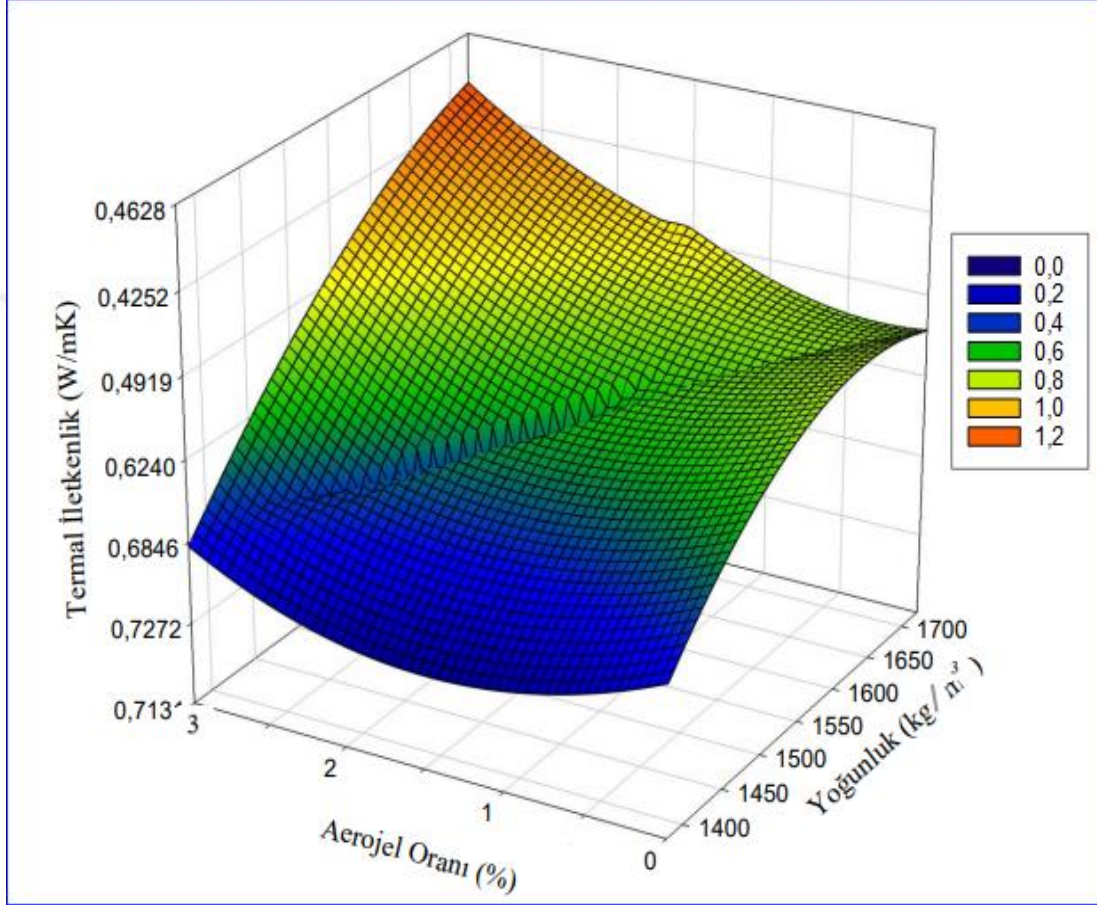


Şekil 62: SAKHB'de Yoğunluk ve Basınç Dayanımı Sonuçlarının Karşılaştırılması

Hafif beton numunelerinin fiziksel özelliklerinin tespitinde en önemli parametrelerden bir tanesi de yoğunluktur. Şekil 62 incelendiğinde, çalışmada 1722 - 1405 kg/m³ aralığında bir yoğunluk elde edildiği görülmüştür. Bu değer yapının ölü yükünün azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Bu sayede muhtemel deprem hasarı karşısında oluşabilecek hasar riski azaltılmaktadır. Çalışmada silika aerjel ikamesinin artması hem yoğunluk değerinde hem de basınç dayanımı değerinde düşmeye neden olduğu gözlenmiştir.

3.3.3. Yoğunluk ve Termal İletkenlik Sonuçları

Şekil 45 ve Şekil 48’de sırasıyla SAKHB numunelerine ait yoğunluk ve termal iletkenlik değerleri verilmiştir. Şekil 63’de ise yoğunluk değeri ve termal iletkenlik değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

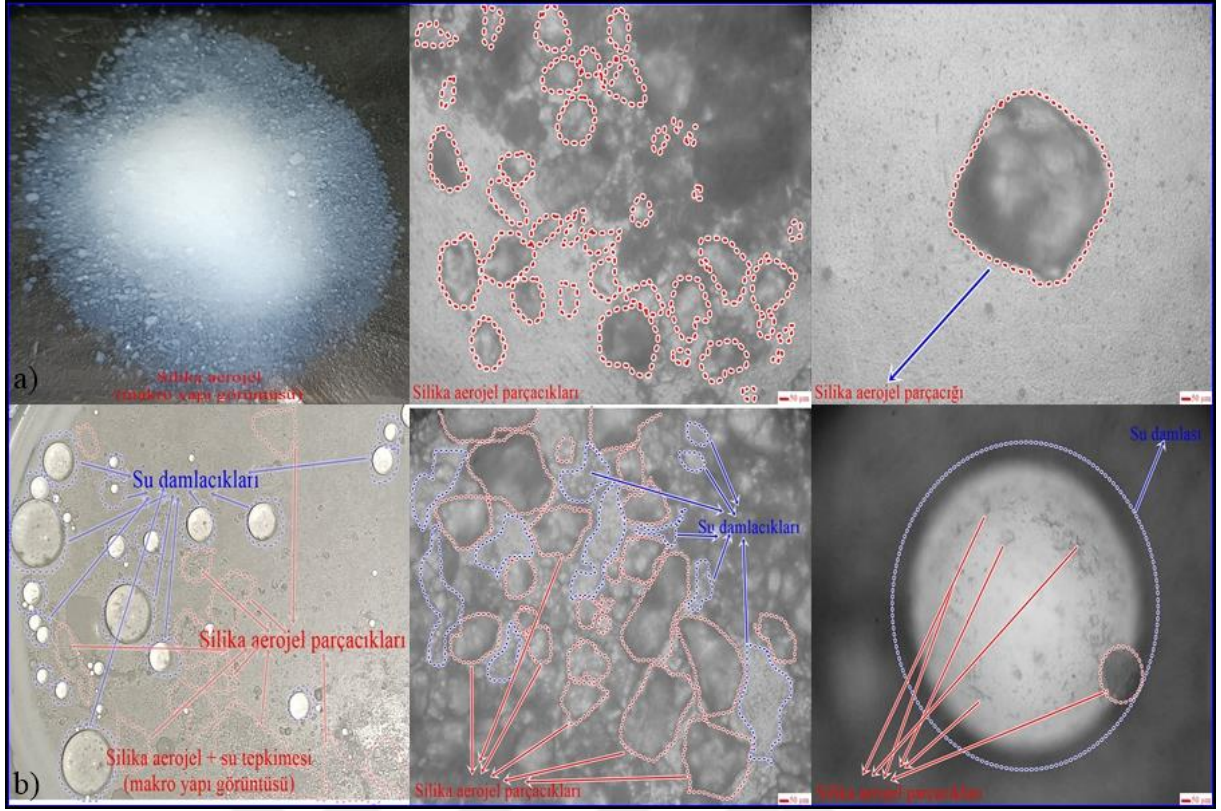


Şekil 63: SAKHB'de Yoğunluk ve Termal İletkenlik Sonuçlarının Karşılaştırılması

Betonun termal iletkenlik değeri temel olarak yoğunluğa bağlıdır. Aerojelin gözenekli yapısı ve hafif yoğunluğa sahip olması, hafif betona ikame durumunda yoğunluğu önemli ölçüde azaltmıştır. Şekil 63 incelendiğinde, tez çalışmasında hafif betona %3 oranında aerojel ikamesi ile yaklaşık olarak %18,4 yoğunluk düşüşü ve %46 oranında termal iletkenlik değerinde bir iyileşme olduğu gözlenmiştir.

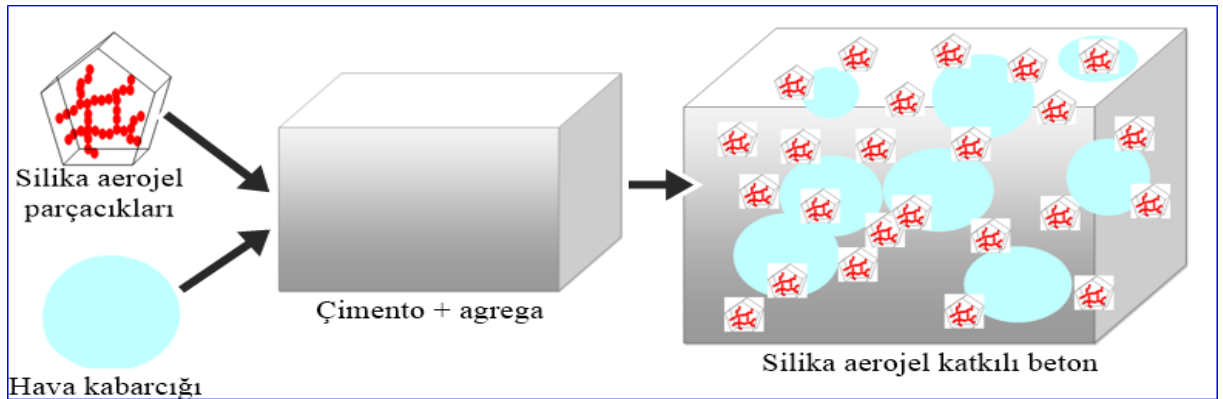
3.4. OPTİK MİKROSKOP İNCELEME SONUÇLARI

Çalışmada sentezi gerçekleştirilen silika aerojelin ve SAKHB numunelerinin 50X, 100X ve 200X’lik optik büyütme ile genel yapısı incelenmiştir.

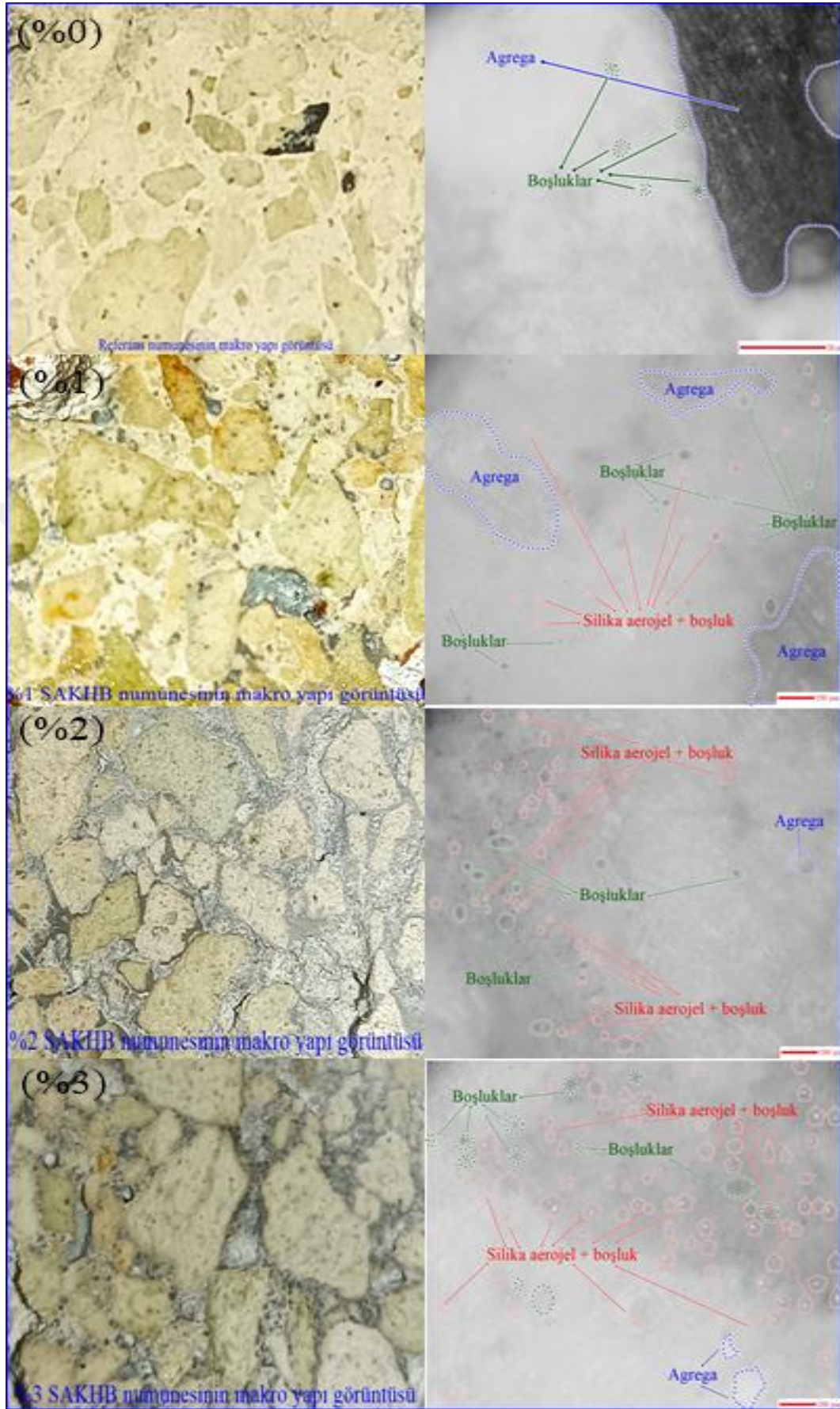


Şekil 64: Optik Mikroskopta; (a) Silika Aerjel ve (b) Su ile Tepkimesinin Görünümü

Şekil 64 (a) incelendiğinde sentezi gerçekleştirilen silika aerjelin makro görünümü, silika aerjel parçacıklarının toplu halde 50 μm ölçekteki görüntüleri görülmektedir. Şekil 64 (b)'de sentezlenen silika aerjelin hidrofobik özelliklerinin tespiti edilmesi amacıyla silika aerjel parçacıklarının üzerine su damlacıkları bırakılmıştır. Görüntüler bize silika aerjelin hidrofobik olduğunu ve iyi adsorpsiyon özelliğe sahip olduğunu göstermektedir. Sentezi gerçekleştirilen silika aerjelin hidrofobik özellikte olması literatürdeki benzer çalışmalar ile de desteklenmektedir (Li vd., 2023). Şekil 65 incelendiğinde silika aerjel ağ parçacıkları ile hava kabarcığının beton içerisinde ki davranışının modellenmiş şekli görülmektedir.



Şekil 65: Silika Aerjelin Beton İçerisindeki Tepkisinin Fiziksel Modellenmesi

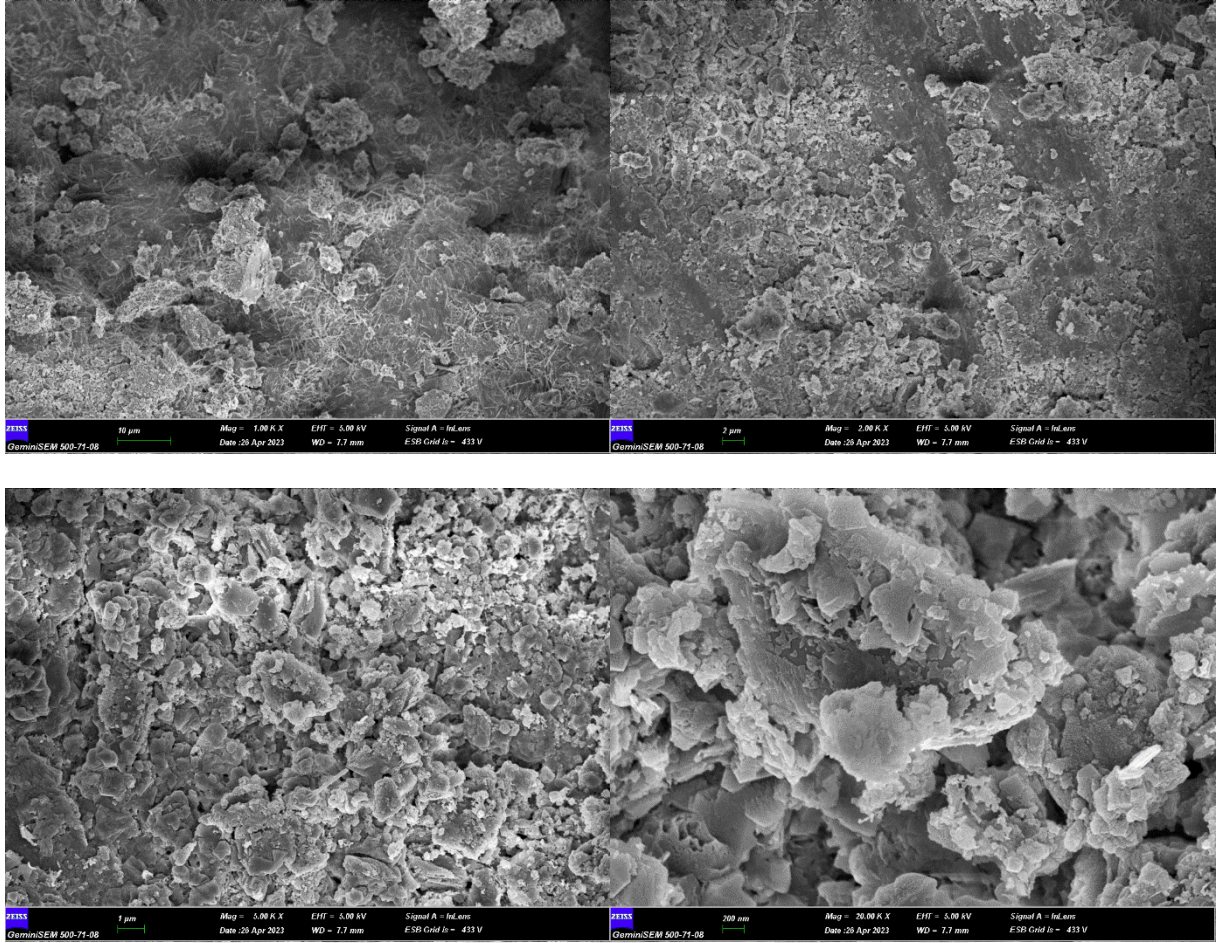


Şekil 66: SAKHB Numunelerinin Makro Yapı ve Optik Mikroskop Görüntüleri

Şekil 66'da silika arojelin farklı oranlarda (%0, %1, %2 ve %3) hafif betona ikame edilmesi ile elde edilen numunelerin makro yapı görüntüleri ve optik mikroskopla incelemesinde elde edilen görüntüler gösterilmiştir. Şekil 66'da verilen referans numunesinde (%0 silika arojel) gerçekleştirilen gözlemlerde belirli oranda boşluk yapının bulunduğu gözlenmiştir. Bunun nedeninin BBT'nin yapısının gözenekli yapıya sahip olması olduğu düşünülmektedir. Şekil 66'da hafif betonda ki (%1) silika arojel ikamesinin beyaz boncuklar şeklinde görüldüğü, betonda bulunan boşluk oranının artmasına etkili olduğu gözlenmiştir. Şekil 66'da verilen görüntülerde (%2) silika arojel ikamesinde olan betonda beyaz boncukların toplandığı bölgenin daha geçirgen olduğu belirginleşmiştir. En fazla silika arojel (%3) ikamesine sahip numunenin optik mikroskop görüntüleri Şekil 66'da verilen görüntüde beyaz boncuk şeklinde olan sığ yapının gözenekli yapıda olduğu gözlenmiştir. Ayrıca silika arojelin hidrofobik özelliğini bu bölgede daha da belirgin göstermiş olduğu, betonda bu bölgede porozitede artış olduğu gözlenmiştir. Genel olarak SAKHB numunelerinin optik görüntü incelemelerinde, silika arojelin beton içerisinde belirli bölgelerde yoğunlaştığı, bu yoğunlaşmanın önüne geçmek için homojen karışım gerçekleştirilebileceği ya da arojel miktarının önemli derecede artırılabilceği, yoğunlaşmanın etkisi ile bu bölgelerde porozite artışının fazla olabileceği düşünülmektedir.

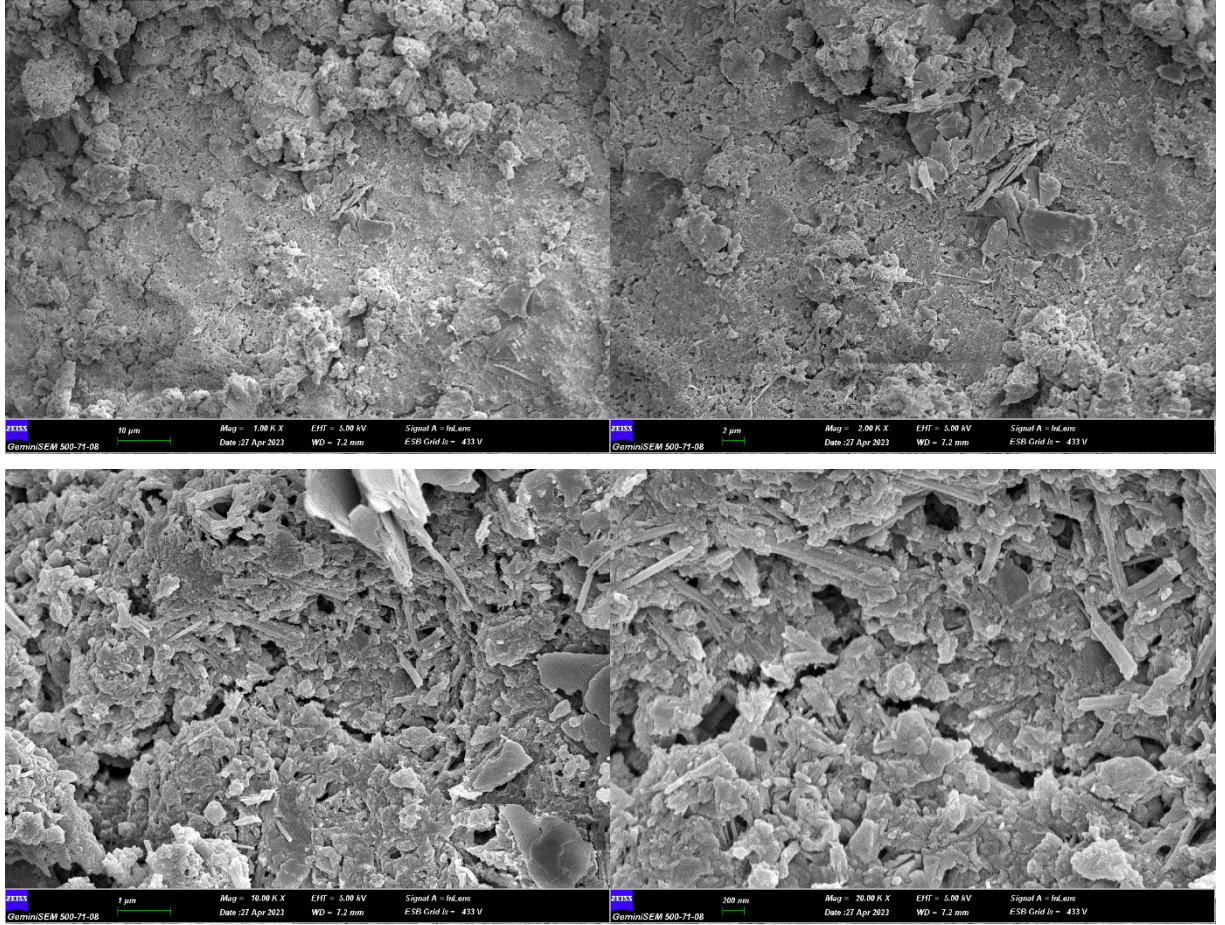
3.5. SİLİKA AEROJEL KATKILI HAFİF BETONUN SEM VE EDX ANALİZİ SONUÇLARI

Çalışmada uygulanan analizler sonrasında belirlenen optimum seviyedeki karışım oranı ve değişen silika arojel oranlarına (%0, 1, 2 ve 3) göre üretilen SAKHB numuneleri üzerinde gerçekleştirilen SEM görüntülerine sırasıyla yer verilmiştir.



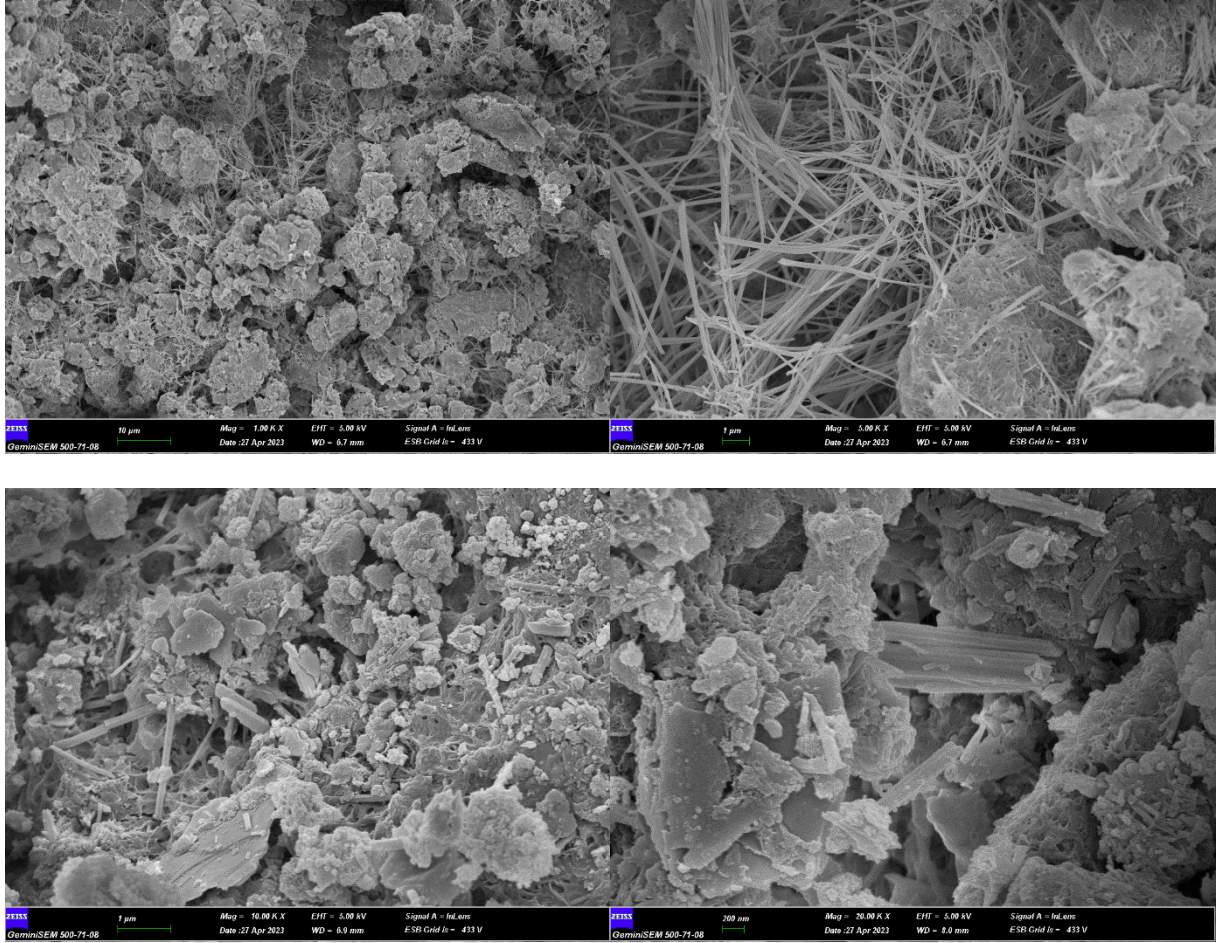
Şekil 67: %0 SAKHB Numunesinin SEM Görüntüsü

Şekil 67’de referans numunesine ait SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde, referans numunesinde kristal yapının fazla olduğu görülmektedir. Kristal yapının diğer numunelere göre fazla olması numunenin basınç dayanımının fazla olduğuna işaret eden bir faktör olabileceği düşünülmektedir. Bu durum Tablo 46’da verilen basınç dayanımı deneyleri ile de desteklenmektedir.



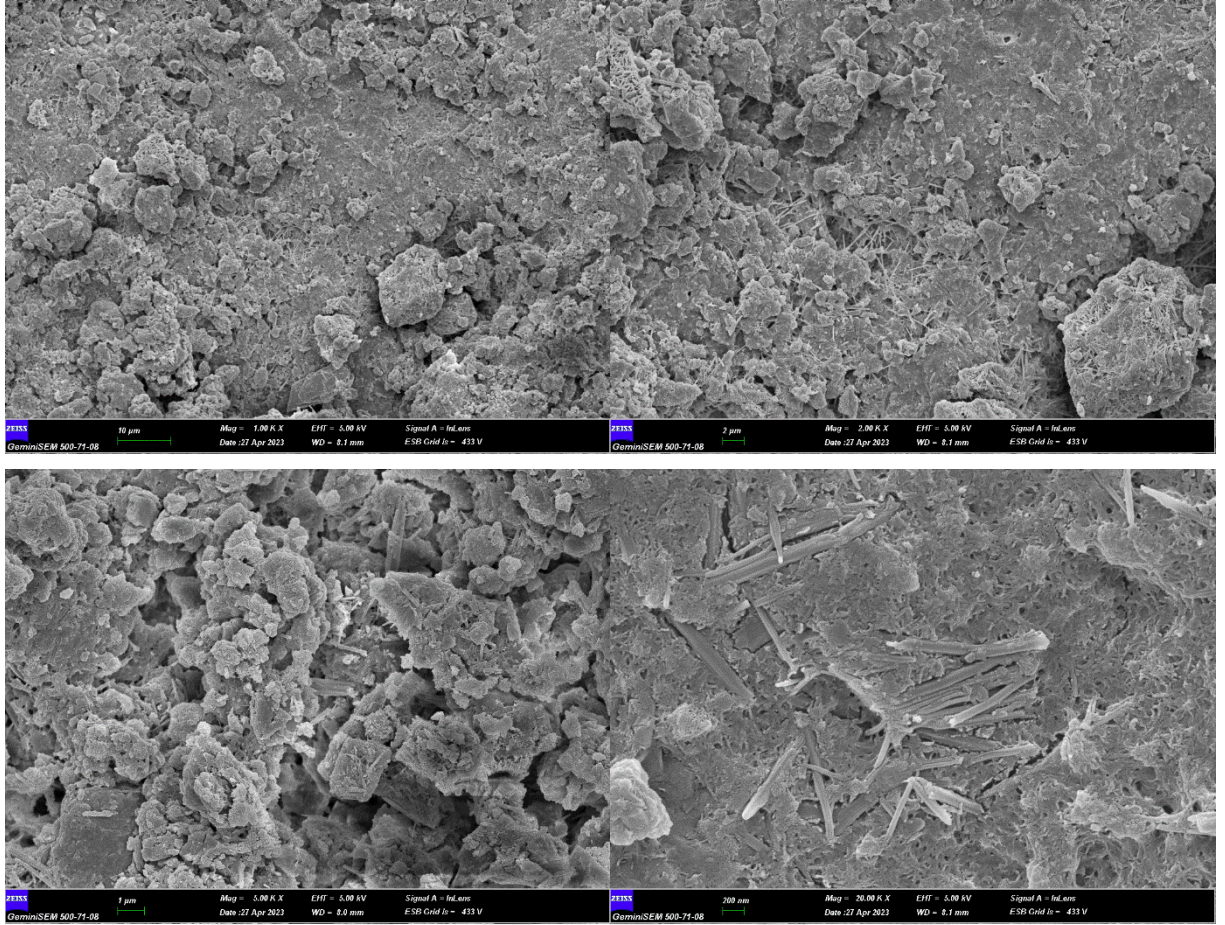
Şekil 68: %1 SAKHB Numunesinin SEM Görüntüsü

Şekil 68’de %1 oranında SAKHB numunelerine ait SEM görüntüsü sunulmuştur. Görüntü incelendiğinde yoğun bir şekilde kristal yapısı bulunan referans numunesinin Silika aerogel ikamesiyle yer yer polikristal/çoklu kristal yapıya dönüştüğü gözlenmektedir. Ayrıca tabakamsı kristal yapının yanı sıra kürecikli kristal yapı da bulunmaktadır. Düzensiz polikristal/çoklu kristal yapı kırılgan olması nedeniyle numuneye uygulanan basınca karşı dayanımı düşebilmektedir.



Şekil 69: %2 SAKHB Numunesinin SEM Görüntüsü

Şekil 69’da %2 oranında SAKHB numunelerine ait SEM görüntüsü sunulmuştur. Görüntü incelendiğinde numunenin kristal yapısında azalma olduğu, buna paralel olarak düzensiz polikristal/çoklu kristal yapının arttığı görülmektedir. Aynı zamanda küresel geometriye sahip partiküllerin miktarında hissedilebilir düzeyde bir artış meydana geldiği görülmektedir. Polikristal/çoklu kristal yapının artması malzemenin daha kırılğan hale gelmesine etken olduğu düşünülmektedir. Basınç dayanım deney sonucu bu kanıyı desteklemektedir.

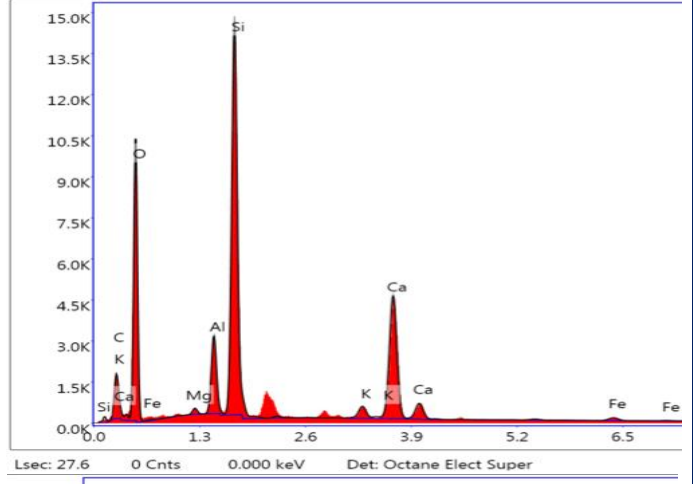
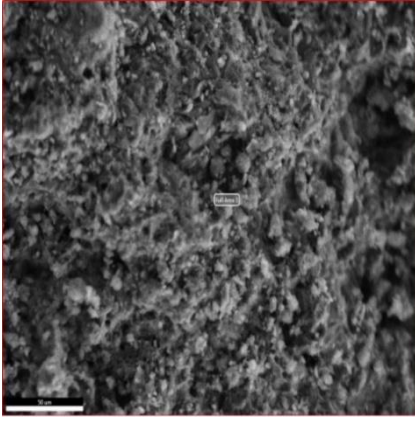


Şekil 70: %3 SAKHB Numunesinin SEM Görüntüsü

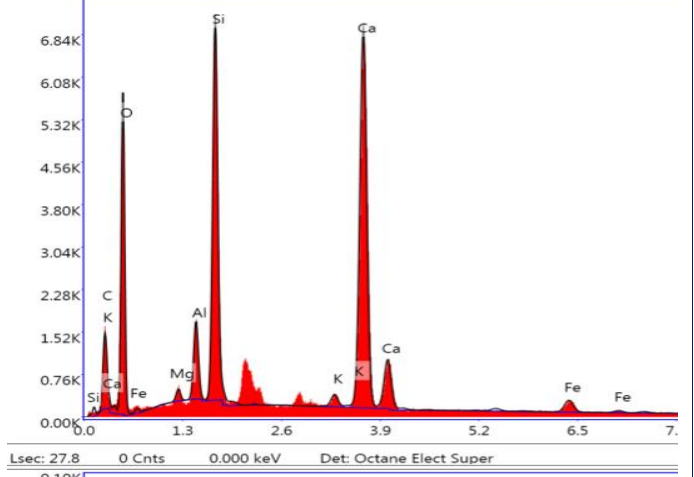
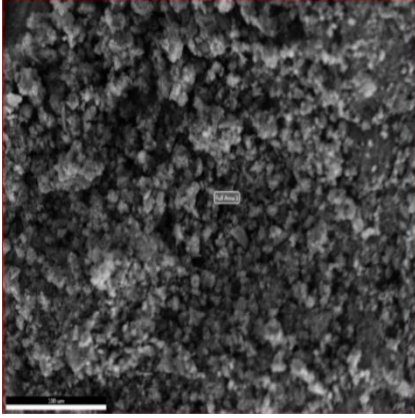
Şekil 70’de %3 oranında SAKHB numunelerine ait SEM görüntüsü sunulmuştur. Görüntülerde kristal yapının çok büyük oranda azaldığı ve polikristal/çoklu kristal yapının en yüksek düzeyde olduğu görülmektedir. Bu durum basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde en düşük basınç dayanımına sahip olması SEM görüntüsünü desteklemektedir.

SEM görüntüleri genel olarak incelendiğinde, %1 oranında silika aerogel ikamesinin betonun yapısında önemli bir değişikliğe neden olmadığı açık görülmektedir. Referans numunede görülmeyen bazı çubuksu kristal yapıya sahip yeni türlerin ortaya çıkmaya başladığı görülmektedir. Artan silika aerogel konsantrasyonu ile bu türlerin miktarında artış gösterdiği gözlenmiştir. Silika aerogel olmadıkları bilinen bu türlerin yapıya eklenmesi ile beton içindeki kristal yönelimlerinde farklılaşmaya başlanmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Çoklu kristal yapıya sahip malzemelerin mekanik dayanımlarında bir miktar azalma olması olağan bir durum olarak değerlendirilebilir.

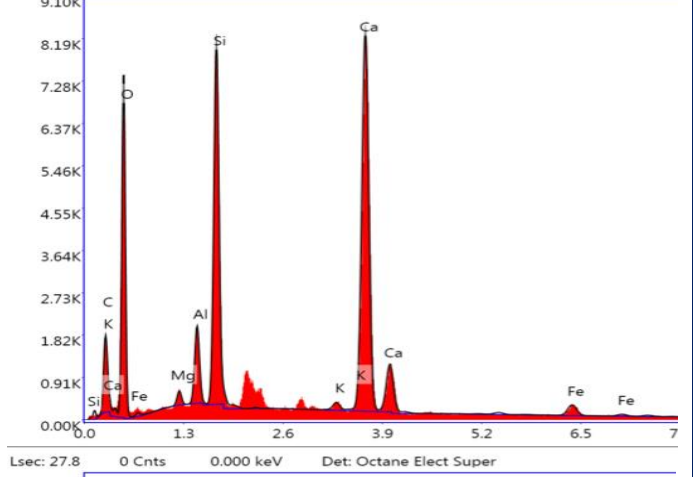
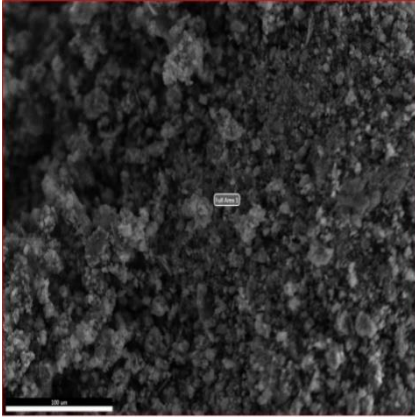
Referans Numunesi



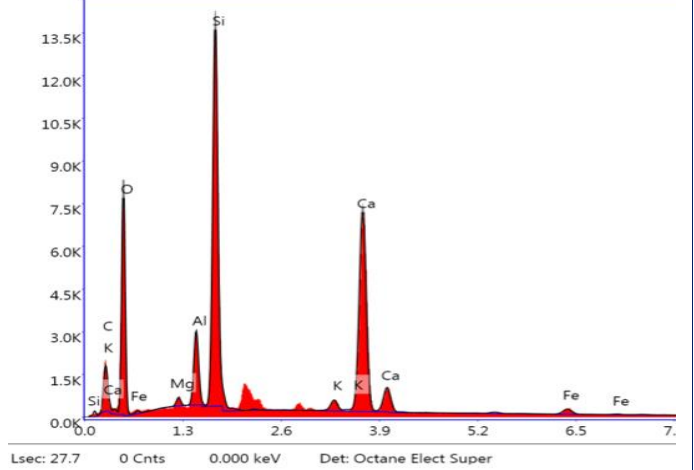
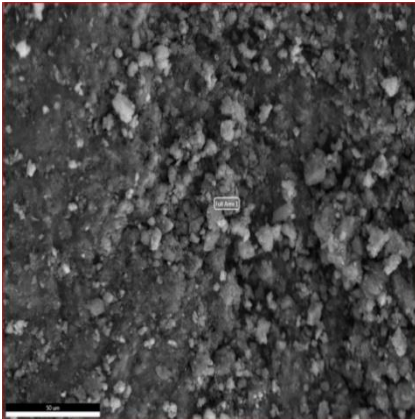
%1 SAKHB



%2 SAKHB



%3 SAKHB



Şekil 71: SAKHB Numunelerinin SEM/EDX Spektrumları

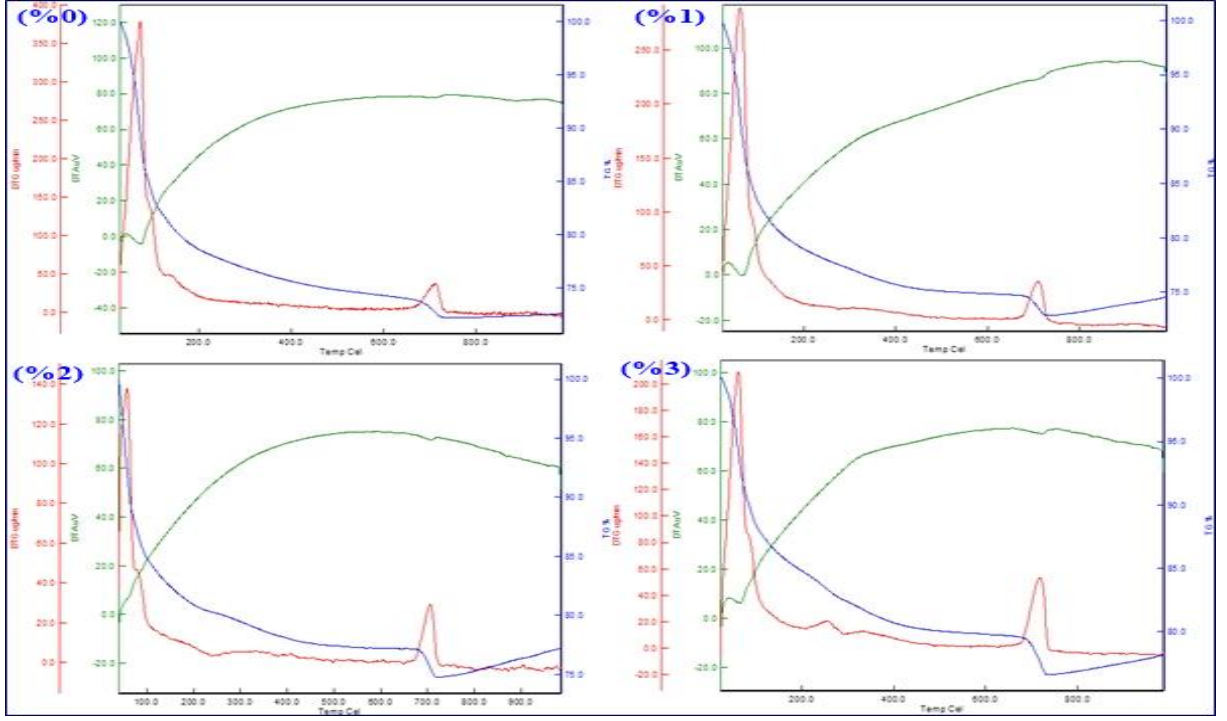
Tablo 55: SAKHB'de SEM/EDX Element Analizi

Karışım Kodu	Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)	Karışım Kodu	Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)
SA035040	C	9,08	14,68	SA235040	C	0,65	14,68
	O	44,09	59,61		O	46,38	59,09
	Mg	0,62	0,49		Mg	0,76	0,64
	Al	4,51	3,24		Al	2,96	2,24
	Si	20,63	14,27		Si	12,1	8,78
	K	1,09	0,54		K	0,48	0,25
	Ca	14,26	6,91		Ca	26,87	13,66
	Fe	0,72	0,25		Fe	1,8	0,66
SA135040	C	8,65	14,82	SA335040	C	8,95	15,2
	O	44,95	57,84		O	43,52	55,49
	Mg	0,67	0,57		Mg	0,67	0,56
	Al	3,02	2,31		Al	3,98	3,01
	Si	12,8	9,38		Si	18,79	1,65
	K	0,74	0,39		K	0,93	0,49
	Ca	27,17	13,96		Ca	21,85	11,12
	Fe	2,01	0,74		Fe	1,31	0,48

Çalışmada değişik oranlardaki silika aerojel (%0, 1, 2 ve 3) ikamesi ile üretilen SAKHB'nun içerisinde bulunan element miktarının belirlenmesi amacıyla EDX (Enerji Dağılım Spektrometresi) analizi uygulanmıştır. Yüzeylerden alınan EDX spektrumları Şekil 71'de verilirken, SAKHB numunelerine ait element içeriğine ait bilgilerde Tablo 55'de gösterilmiştir. Şekil 71'de verilen pikler incelendiğinde karşımıza C, O, Mg, Al, Si, K, Ca ve Fe elementlerinin varlığı çıkmaktadır.

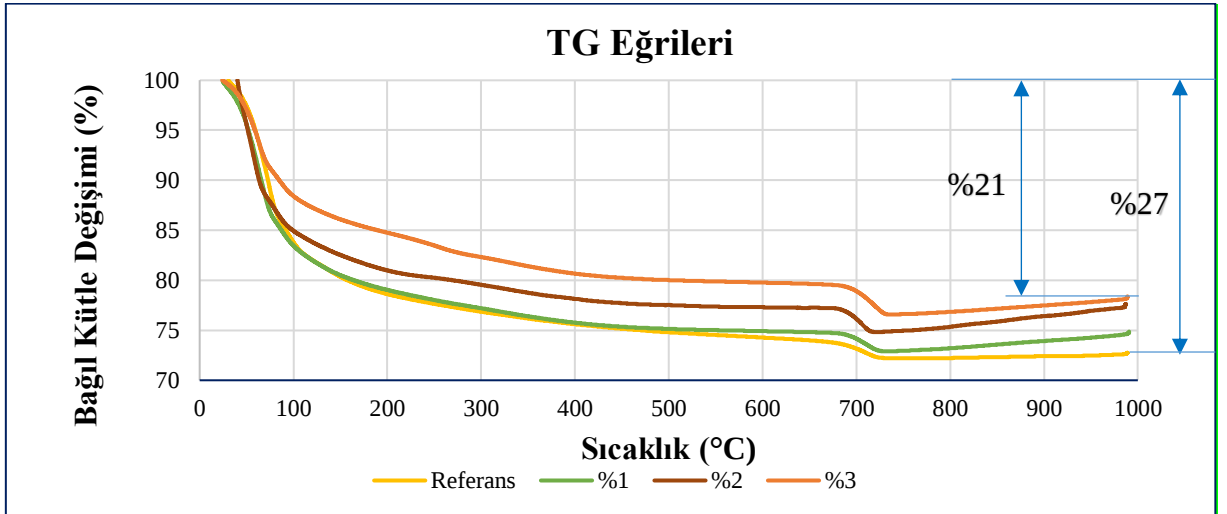
3.6. SİLİKA AEROJEL KATKILI HAFİF BETONUN TERMOGRAVİMETRİK ANALİZİ SONUÇLARI

Tez çalışmasında üretilen SAKHB numunelerinin termal kararlılık düzeylerinin tespiti için TGA/DTA analizi gerçekleştirilmiştir. Deneyler 10 °C/dk ısıtma hızı ile atmosfer ortamında 25 °C ile 1000 °C aralığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 72: SAKHB Numunelerinin TGA/DTA Grafiği

SAKHB numuneleri içerisinde (%0, 1, 2 ve 3) oranlarında aerogel ikamesi bulunmaktadır. Şekil 72’de üretilen numunesine ait TGA/DTA görüntüsü verilmiştir. Şekil 73’de ise numunelerin sıcaklık artışında ki kütle kayıpları tek DTG eğrilerinde beraber verilmiştir. Görüntü incelendiğinde SAKHB numunelerinde ısıtma işlemi sırasında yaklaşık olarak 100 °C’de meydana gelen kütle kaybının CSH ve etrenjitin (AFt) dehidrasyonundan meydana gelmektedir (Han, 2022; Jia, vd., 2019). Yaklaşık 200 °C’ye kadar numunede bulunan su kademeli olarak dışarı atılmaktadır. Beton karışımlarında 650-800 °C’de gözlemlenen büyük kütle kaybının, çimentonun içerisinde bulunan CaCO_3 türlerinden CO_2 ’nin ayrışmasından kaynaklandığı rapor edilmektedir (Manoj, 2022; Han, 2022).



Şekil 73: SAKHB Numunelerinin TG Eğrileri

Şekil 73’de üretilen numunelerin sıcaklıkla karşısında ki kütle değişimi gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde 1000 °C ye ulaşan (%0, 1, 2 ve 3) oranlarında aerjel ikameli numunelerde bağıl kütle kaybı değeri yaklaşık olarak sırasıyla (%27, 25, 22 ve 21) olarak bulunmuştur. Gözlenen kütle kaybındaki düşüşün nedeni, silika aerjel ikame oranı arttıkça betonda termal durabilitenin arttığının göstergesi olarak değerlendirilebilir.

3.7. MALİYET ANALİZİ

Tez çalışmasının bu bölümünde SAKHB üretimi ile sağlanan yalıtımlı malzeme ile benzer yalıtım değerine sahip yapı malzemesinin maliyetlerinin belirlenmesi için maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede öncelikle tez çalışmasında kullanılan malzemelerin ülkemizdeki güncel birim fiyat araştırması gerçekleştirilmiştir. 2023 yılı Eylül ayı içerisinde yapılan saha araştırması ve kimyasalların temin edildiği firma ile yapılan görüşmeler neticesinde kullanılan malzemelere ait birim fiyatlar belirlenmiştir.

Maliyet analizi belirlenmesi üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşama olarak silika aerjel sentezinin maliyeti hesaplanmıştır. İkinci aşama olarak SAKHB’nun maliyeti belirlenmiştir. Son aşamada ise seçilen yalıtım malzemesinin birim analizi belirlenmiştir.

Silika aerjel sentezinin maliyeti, üretim prosesinde kullanılan kimyasalların tek tek birim fiyatlarının temin edilmesi ile hesaplanmış ve elde edilen değer 1000 g için maliyeti ₺ cinsinden Tablo 56’de gösterilmiştir. Kullanılan kimyasallardan TMCS, etil alkol ve n-heptan proseste üç tekrar kullanımdan sonra yenilenmesi silika aerjel sentezindeki maliyeti belirli oranda düşürmüştür.

Tablo 56: Silika Aerjel Sentezinin Maliyeti (1000 g)

Sentez Bileşeni	Silika Aerjel Sentez Maliyeti (₺)	Maliyetteki Oranı (%)
Hidroklorik Asit	1404	9,8
Sodyum Hidroksit (Katı)	162	1,1
Sodyum Silikat Çözelti	2493	17,4
Etil Alkol	777	5,4
TMCS	8061	56,1
n-heptan	912	6,4
BBT Tozu	~ 0	~ 0
Su	~ 0	~ 0
Filtre Kağıdı	540	3,8
Σ Maliyet	14349	100

1000 g silika aerogel sentezinin maliyeti yaklaşık olarak KDV dahil 14349₺'ye mâl olmaktadır. Silika aerogel sentez maliyetinin en büyük kalemi (%56,1) ile yurt dışından temin edilen TMCS oluşturmaktadır. Ülkemiz koşullarında, yurtdışından kimyasal malzeme temin etmek birim fiyatın artmasında önemli rol oynamaktadır.

Tez çalışmasında sentezlenen silika aerogel hafif betonun içerisine %3 oranında ikame edilerek termal iletkenlik değerinin en optimum seviye elde edilmiştir. 20 cm kalınlıktaki SAKHAB'nın (%3 silika aerogel) maliyetinin belirlenmesi için hesaplama işlemi gerçekleştirilmiş ve elde edilen değer 1 m² için maliyeti ₺ cinsinden Tablo 57'da gösterilmiştir.

Tablo 57: SAKHAB'nın Maliyeti (20 cm Kalınlıktaki 1 m² Duvar)

Beton Bileşeni	1 m ² SAKHB Maliyeti (₺)	Maliyetteki Oranı (%)
Çimento	182	0,3
Agrega (Atık BBT)	~ 0	~ 0
Su	~ 0	~ 0
Silika Aerogel	~57000	99,6
Σ Maliyet	~57200	100

Isı iletim katsayısı değerinin tez çalışmasında ki optimum değere yakın olduğu gözlenen gaz beton duvar blokları / doğal bims dolu blokarın 20 cm kalınlıktaki 1 m² maliyeti ~1000₺ iken, aynı kalınlık ve oranda SAKHB ~57200₺'ye üretilabilmektedir. Birim maliyet farkının yaklaşık 57 kat olduğu dikkat çekmektedir. Bu hesaplamada ki birim fiyatlarda dikkat edilmesi gereken bir nokta da kullanılan kimyasal malzemelerin saflık oranları çok yüksek olan malzemelerdir. Özellikle yapı sektöründe çalışmada kullanılan kimyasallardan yüksek saflık değerine sahip olanlar kullanılmamaktadır. Bu malzemeler yapı sektöründe ar-ge çalışmalarında tercih edilen, kimyasal kompozitlerin araştırılmasında kullanılan malzemeler olduğundan, endüstri amaçlı temin edilebilecek fiyatlarından çok yüksek olduğu düşünülmektedir.

SAKHB'nin m² birim maliyetinin yüksekliği elde edilen değerlerin yüksekliğinde dikkat çekmektedir. Silika aerogel sentezinde kullanılan kimyasal malzemelerin yurtdışından temin edilen katkılardan olmaları ve bunun etkisiyle birim fiyatın döviz bazlı olması yüksek maliyetlerin ortaya çıkmasında başlıca etkindir. Bu durum literatür de “geleneksel yalıtım malzemelerine göre en düşük ısı iletkenliğine ve en yüksek üretim maliyetine sahip yalıtım malzemesinin aerojellerdir” şeklinde ifade edilmiştir (Huang vd., 2020). Yalıtım malzemesi uygulamalarında aerogel uygulamalarının etkili performansına rağmen geleneksel yalıtım

malzemelerine kıyasla yaygınlaşamamasının üzerinde çok yüksek maliyetinin etkisi büyüktür (Liang vd., 2017; Yang vd., 2018).

Aerojelin ilk üretildiği yıllardan günümüze 90 yılı aşkın bir süre geçmesine rağmen üzerinde araştırmalar devam etmekte ve gün geçtikçe yeni teknikler elde edilmektedir. Üstün özellikleri silika arojel araştırılarda sürekli ön planda tutacağı ve gelişen teknoloji ile yeni hazırlama teknikleri geliştirilerek maliyetin düşürülebileceğine ve pazardaki payının genişleyeceği düşünülmektedir.

SAKHB'nun silika arojel sentezinin maliyetinin yüksek olmasına rağmen, 1 m³ hafif betonun üretilmesinde hem silika arojel sentezinde (~20 kg) hem de SAKHB'nun ince/kaba agregasında atık halde bulunan BBT'nin (~1500 kg) kullanılmaktadır. Bu oran ~2500000 rezerve sahip BT'nin işlenme aşamasında %70'lere ulaşan atık malzemenin kullanımı açısından değerlendirildiğinde, ekonomiye kazandırılması anlamında önemli bir etkiye sahip olacağı düşünülmektedir.

Gerçekleştirilen tez çalışmasında hem silika arojel sentezinde hem de hafif beton üretiminde atık halde bulunan BT kullanımı 1 m³ için (~1520 kg) önemli bir miktar olduğu gözlenmektedir. Araştırma sonucunda önemli bir atık malzemenin hafif beton üretiminde değerlendirilebileceğini, bölge ekonomisi üzerinde sürdürülebilir kalkınmayı da olumlu yönde etkileyeceği düşünülmektedir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Tez çalışmasında Bayburt il sınırları içerisinde bulunan ve BBT olarak bilinen volkanik tüf kullanılarak silika aerogel sentezi yapılmış. Silika aerogelin termal olarak kararlılık göstermesi, geniş yüzey alanına sahip olması ile termal iletkenlik değeri düşük olmasının hafif betona etkisi araştırılmıştır.

Sentezlenen silika aerogelin hafif betonda etkilerinin değerlendirilebilmesi için deney tasarımlarından taguchi yöntemi uygulanmış, optimum seviyeler belirlenerek ve deney sonuçları ANOVA analiz ile değerlendirilmiştir. Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ve öneriler maddeler halinde sunulmuştur.

- BBT sentezi ile silika aerogel elde edilmiştir. Sentezlenen silika aerogellerin karakterizasyonu XRD, TEM, FT-IR ve yoğunluk analizleri ile gerçekleştirilmiş, sonuçlar literatürle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. BBT atıkları ile başarılı bir şekilde silika aerogelin sentezlendiği gözlenmiştir.
- Sentezlenen silika aerogellerin TEM görüntülerinde yaklaşık 10 nm büyüklüğünde küresel taneciklerden oluşan, şekil ve boyut dağılımı açısından oldukça homojen partiküller elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, partiküller arası sintelleşme ile agloromasyon olmadığı, partiküller arası etkileşimler ve çekim kuvvetleri vs. olmadığı görülmüştür. Hidrofobik yapıda ve iyi adsorpsiyon özelliğe sahip olduğu optik mikroskop incelemelerinde gözlenmiştir.
- SAKHB numuneleri üzerinde gerçekleştirilen optik mikroskop incelemelerinde, silika aerogel parçacıklarının etrafında boşlukların olduğu gözlenmiştir.
- SAKHB numunelerinde SEM görüntüleri incelendiğinde aerogel ikamesi ile referans numune de görülmeyen çubuksu kristal yapıların görüldüğü, aerogel konsantrasyonunun artması ile bu türlerde artış gösterdiği gözlenmiştir. Gözlenen bu çoklu kristal yapının malzemenin mekanik dayanım miktarında azalma yaşanmasında olağan bir etkisinin olduğu değerlendirilebilir.
- SAKHB numunelerinde gözlenen TG eğrileri silika aerogel ikamesinin artmasıyla artan sıcaklık karşısında kütle kaybında düşüş miktarının azaldığını göstermektedir.
- SAKHB numunelerinde ikame malzemesi olarak kullanılan silika aerogelin özgül ağırlığının hem BBT hem de çimentonun özgül ağırlığından düşük olması, taze ve sertleşmiş betonda birim ağırlığın düşmesine ve bu sayede numunelerin hafif beton standardında olmasını sağlamıştır.

- SAKHB numunelerinde silika aerjel ikamesinin artmasıyla su emme oranında artış meydana gelmiştir. En yüksek değer %22,59 ile %3 oranında silika SAKHB numunelerinden elde edilmiştir. Optik mikroskop görüntülerinde beton içerisinde ki silika aerjeller etrafında oluşan gözeneklerin su ile dolmasının su emme oranlarının artmasına neden olduğu düşünülmektedir.
- SAKHB numunelerinde porozite deneyi sonucunda silika aerjel ikamesinin numunelerin porozite değerlerini arttırdığı görülmüştür. Numunelerde silika aerjel ile çimento macunu arasında meydana gelen boşluklar porozite değerinin artmasına neden olmaktadır.
- Silika aerjel malzemesi, ısı yalıtım özellikleri iyileştirilmiş hafif beton üretiminde etkili bir malzemedir. SAKHB numunelerinde %3 silika aerjel ikamesinin termal iletkenlik değerinin %46 oranında iyileştiği göstermiştir. Silika aerjel ikamesinin artması ile daha yalıtkan bir hafif beton numunesi üretilebilmiştir. Bu durum silika aerjelin inşaat sektöründe çatı ve duvarlarda ısı kaybının önemli ölçüde azaltılmasında etkili olacağını, bu sayede yapılarda tüketilen enerji tüketiminin önemli ölçüde azaltılacağı düşünülmektedir.
- SAKHB numunelerinde uygulanan ultrasonik geçiş hızı araştırmacılara numunede bulunan boşluk oranını, basınç dayanımını ve su emme değerleri hakkında yorumlamalar yapmaya yardımcı olmaktadır. Sentezlenen silika aerjelin gözenekli yapıda olması nedeniyle SAKHB numunelerinde kullanılan aerjel oranının artması ultrasen deneyi verilerinin düşmesine neden olmuştur.
- SAKHB numunelerinde silika aerjel kullanım oranının artması basınç dayanımında önemli ölçüde düşüşe neden olmuştur. Bunun nedeni, silika aerjelin yapısının kırılgan ve düşük mukavemet özelliğidir. SAKHB numunelerinde aerjel miktarındaki artış numunelerin mekanik özelliklerine olumsuz etkisi olduğu belirlenmiştir.
- SAKHB numunelerinde donma-çözülme deney sonucunda silika aerjel ikamesinin artmasıyla donma çözülmenin basınç dayanım kayıplarında artış yaşanmasına neden olduğu görülmüştür.
- SAKHB numunelerinde ikame malzemesi olarak silika aerjelin %3 oranında ikame edilerek hafif betonun beton sınıfı değişmeden yalıtım özelliğinin iyileştirilmesi sağlanmıştır.
- Betonun termal iletkenlik değeri temel olarak yoğunluğa bağlıdır. Silika aerjelin gözenekli yapısı ve hafif yoğunluğa sahip olması, hafif betona ikame durumunda yoğunluğu önemli ölçüde azaltmıştır. Bu çalışmada hafif betona %3 oranında aerjel

ikamesi ile yaklaşık olarak %18,4 yoğunluk düşüşü ve %46 oranında termal iletkenlik değeri bir iyileşme olduğu gözlenmiştir.

- SAKHB numunelerinde yalıtım malzemesi uygulamalarında silika arojel ikamesinin etkili performansı bulunmasına rağmen sentez aşamasında ki döviz bazlı kimyasalların kullanımı maliyet üzerinde çok büyük etkisi bulunmaktadır.
- SAKHB numunelerinde ki yoğunluk değerindeki düşüş, yapının sabit yükünün azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Bu sayede muhtemel deprem hasarı karşısında oluşabilecek hasar riski azaltılmaktadır.
- Hafif beton üretiminde agrega olarak önemli miktarda atık BT kullanılabilir olması, hem atık malzemelerin muhtemel zamanla ortaya çıkacak çevre sorunlarının önüne geçmeyi sağlayabilecek hem de bölge ekonomisine önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.
- Bu çalışmada elde edilen sonuçlar uygulamaya geçirildiğinde bilim ve teknolojiye fayda sağlayacaktır.
- Bundan sonraki çalışmalarda arojelin betona katıldığında ortaya çıkacak olası olumsuz durumların üstesinden gelebilecek çalışmalar üzerinde durulması hedeflenmektedir.
- Doğal kaynakların arojel gibi önemli katkıların sentezinde kullanılması inşaat sektörü için önemli bir adım olacaktır.
- Sadece doğal kaynaklar değil aynı zamanda atıklarında arojel üretiminde kullanılması ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır.
- Silika arojel üretiminde ki maliyeti düşürmek için yerli kimyasal malzeme üretiminin artması ve alternatif proses yöntemlerinin değerlendirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Abbas, N., Khalid, H.R., & Lee H.K. (2019). Silica aerogel derived from rice husk: an aggregate replacer for lightweight and thermally insulating cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 195, 312-322. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.227>
- Abdulkareem O.A, Abdullah M.M.A.B, & Binhussain, M. (2013). Mechanical and microstructural evaluations of lightweight aggregate geopolymer concrete before and after exposed to elevated temperatures. *Materials (Basel)*, Oct 9;6(10):4450-4461. doi: 10.3390/ma6104450. PMID: 28788339
- ACI Committee 213R-14. (2014). Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. *American Concrete Institute*, Michigan.
- Adhikary, S.K., Rudžionis, Z., & Ashish, D. K. (2021). Effects of carbon nanotubes on expanded glass and silica aerogel based lightweight concrete. *Scientific Reports* 11:2104, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81665-y>
- Adhikary, S.K., Rudžionis, Z., & Tuckute, S. (2022). Characterization of novel lightweight self-compacting cement composites with incorporated expanded glass, aerogel, zeolite and fly ash. *Case Studies in Construction Materials*, Volume 16, e00879, ISSN 2214-5095. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00879>
- Adhikary, S.K., Ashish, S.K., & Rudžionis, Z. (2021). Aerogel based thermal insulating cementitious composites: A review. *Energy and Buildings*, 245, 111058, ISSN 0378-7788. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111058>
- Adhikary, S.K., Rudžionis, Z., & Vaičiukynienė, D. (2020). Development of flowable ultra - lightweight concrete using expanded glass aggregate, silica aerogel, and prefabricated plastic bubbles. *Journal of Building Engineering*, 31, 101399. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101399>
- Adhikary, S.K., Rudžionis, Z., & Zubrus, M. (2019). Investigations of the influence of polystyrene foamed granules on the properties of lightweight concrete. *Journal of Building Engineering*, 31.10139910. <https://doi.org/10.2478/jaes-2019-0002>
- Aegerter, M.A., Leventis, N., & Koebel, M.M. (2011). *Aerogels Handbook Springer*. New York.
- Aghabaglou, A.M., Bayqra, S.H., Özen, S., Altun, M.G., Faqırı, Z.A., & Ramyar, K. (2020). Review of research on designing methods and properties of roller compacted concrete mixtures. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(3), 419-431.
- Aghaee, K., & Khayat, K.H. (2021). Effect of shrinkage-mitigating materials on performance of fiber-reinforced concrete – An overview. *Construction and Building Materials*, 305(2021) 124586. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124586>
- Agwa, I.S., Omar, O.M., Tayeh, B.A., & Abdelsalam, B.A. (2020). Effects of using rice straw and cotton stalk ashes on the properties of lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 235-117541. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117541>

- Ahmad, M.R., Chen, B., & Shah, S.F.A. (2019). Investigate the influence of expanded clay aggregate and silica fume on the properties of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 220, 253 – 266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.171>
- Altuncu, Y.T, Öcal, C., Saplıoğlu, K., İnce, H.H., & Çevikbaş, M. (2021). Genleştirilmiş cam agrega ve genleştirilmiş perlit agrega ikameli üretilen şap betonlarının fiziksel özelliklerinin araştırılması. *Teknik Bilimleri Dergisi*, 11(2), 8-13. <https://doi.org/10.35354/tbed.918849>
- Amali, A. (2009). *Studi eksperimental perilaku mekanik beton normal dengan substitusi limbah debu pengolahan baja (dry dust collector)* (Master's thesis). Retrieved from <http://eprints.undip.ac.id/16410/1/AMALIA.pdf>
- Amin, T., & Tayeh, B.A. (2020). Investigating the mechanical and microstructure properties of fibre-reinforced lightweight concrete under elevated temperatures. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00459. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00459>
- Amran, YHM., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & El-Zeadani, M. (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete; a review. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119679>
- ASTM C 1113-90, ASTM C 1113-90. Test method for thermal conductivity of refractories by hot wire (Platinum resistance thermometer technique).
- ASTM C 597, Standard test method for pulse velocity through concrete, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700 West Conshohocken, PA19428-2959, United States 2003.
- Aykut, C. (2017). *Bayburt taşı atıklarının geopolimer tuğla üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 458855)
- Babiarczuk, B., Lewandowski, D., Szczurek, A., Kierzek, K., Meffert, M., Gerthsen, D., & Krzak, J. (2020). Novel approach of silica-PVA hybrid aerogel synthesis by simultaneous sol-gel process and phase separation. *The Journal of Supercritical Fluids*, 166, 104997. doi:10.1016/J.SUPFLU.2020.104997
- Bakhshi, M., Dalalbashi, A., & Soheili, H. (2023). Energy dissipation capacity of an optimized structural lightweight perlite concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 389, 2023, 131765, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131765>
- Bakır, H. (2011). *Dolgu maddesi oranının kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine etkisi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 312789)
- Basha S, M., & Reddy Ch, B., K, V. (2016). Strength behaviour of geopolymer concrete replacing fine aggregates by M- sand and E-waste. *International Journal of Engineering Trends Technology*, 40, 401–407. DOI:10.14445/22315381/IJETT-V40P265
- Betaubun P. & Hairulla. 2018. Compressive strength and tensile tests for concrete made from local materials from toftof, eligobel district. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 9(8): 574-579.

- Bianco, V., Manca, O., Nardini, S. & Vafai, K. (2015). *Heat transfer enhancement with nanofluids*. CRC Press.
- Bond, G.C., & Flamerz, S. (1987). Structure and reactivity of titania-supported oxides. Part 3: reaction of isopropanol over vanadia-titania catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 33 (1), 219-230. [https://doi.org/10.1016/S0166-9834\(00\)80594-1](https://doi.org/10.1016/S0166-9834(00)80594-1)
- Bostancı, L. (2020b). A comparative study of petroleum coke and silica aerogel inclusion on mechanical, pore structure, thermal conductivity and microstructure properties of hybrid mortars. *Journal of Building Engineering*, 31, 101478. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101478>
- Bostancı, L.(2020a). Synergistic effect of a small amount of silica aerogel powder and scrap rubber addition on properties of alkali-activated slag mortars. *Construction and Building Materials*, 250, 118885. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118885>
- Buratti, C., Moretti, E. (2012). Glazing systems with silica aerogel for energy savings in buildings. *Applied Energy*, 98 (5), 396-403. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.062>
- Buratti, C., Moretti, E., Belloni, E. & Agosti, F. (2014). Development of innovative aerogel based plasters: preliminary thermal and acoustic performance evaluation. *Sustain Basel* 6(9):5839–5852. <https://doi.org/10.3390/su6095839>
- Butler, D. (2008). Architecture: architects of a low-energy future. *Nature*, 452 (7187), 520. DOI:10.1038/452520a
- Cai, H., Jiang, Y., Feng, J., Chen, Q., Zhang, S., Li, L., & Feng, J. (2020). Nanostructure evolution of silica aerogels under rapid heating from 600 °C to 1300 °C via in-situ TEM observation. *Ceramics International*, vol. 46, no. 8, pp. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.02.011>
- Can, Ö. (2022). Determination of some engineering properties of volcanic tuff using non-destructive method. *Emerging Materials Research*, 11-1, doi.org/10.1680/jemmr.21.00056
- Cavalline, T.L. Castrodale, R.W., Freeman, C., & Wall, J. (2017). Impact of lightweight aggregate on concrete thermal properties. *ACI Materials Journal*, 114, 945–956. DOI:10.14359/51701003
- Chandra, S., & Berntsson, L. (2002). *Lightweight aggregate concrete*. 1st ed.; Noyes Publications: Norwich, UK, p. 450.
- Chen, B., He, M., Huang, Z., & Wu, Z. (2019). Long - tern field test and numerical simulation of foamed polyurethane insulation on concrete dam in severely cold region. *Construction and Building Materials*, 212 (2019) 618-634. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.016>
- Chen, F., Zhang, Y., Liu, J., Wang, X., Chu, K.P., Chu, B., & Zhang, N. (2020). Fly ash based lightweight wall materials incorporating expanded perlite/SiO₂ aerogel composite: Towards low thermal conductivity. *Construction and Building Materials*. 249. 118728. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118728>

- Chen, H.B., Chiou, B.S., Wang, Y.Z., & Schiraldi, D.A. (2013). Biodegradable pectin/clay aerogels. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5 (5), 1715-1721.
- Cıza, B. (2021). *Volkanik tüf atıklarından silika aerogel sentezi ve yüksek termal yalıtım özellikleri için alçı esaslı kompozitlerde değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 655985)
- Collins, T.J. (2017). Review of the twenty-three year evolution of the first university course in green chemistry: teaching future leaders how to create sustainable societies. *Journal of Cleaner Production*, 140,93-110. <https://doi.org/10.1021/am3028603>
- Coma, J., Pérez, G., Solé, C., Castell, A.,& Cabeza, L.F. (2016). Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy savings in buildings. *Renewable Energy*, 85, 1106-1115. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.074>
- Courland, R. (2011). *Concrete planet the strange and fascinating story of the world's most common man-made material*. 1st edition. New York: Prometheus Books.
- Cuce, E., Cuce, P.M., Wood, C.J., & Riffat, S.B. (2014). Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: a comprehensive review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 34, 273-299.
- Çağlar, A. (2018). *Geleneksel kastamonu evlerinde kullanılan harman tuğlası özelliklerinin bor atığı katkısı ile iyileştirilmesi üzerine deneysel araştırma* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 99533)
- Çalışkan, E. (2015). *Diyatomitten atmosferik buhar kürü yöntemi ile gazbeton üretimi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 413288)
- Çolak, M. (2020). Opticast yazılımı ile döküm endüstrisinde kalıplama tasarımı optimizasyonu uygulaması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10 (3) , 545-551. doi: 10.17714/gumusfenbil.689371
- Dash, M.K., Patro, S.K., & Dash M. (2022). Impact of elevated temperature on strength and micro-structural properties of concrete containing water-cooled ferrochrome slag as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, Volume 323, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126542>.
- Dikici, T. (2010). *Taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 283570).
- Dissanayake, D.M.K.W., Jayasinghe, C., & Jayasinghe, M.T.R. (2017). A comparative embodied energy analysis of a house with recycled expanded polystyrene (EPS) based foam concrete wall panels. *Energy and Buildings*, 135,85-94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.044>
- Dixit, A., Pang, S.D., Kang, S.H., & Moon, J. (2019). Lightweight structural cement composites with expanded polystyrene (EPS) for enhanced thermal insulation. *Cement and Concrete Composites*, 102,185 – 197. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.023>

- Dorcheh, A.S., & Abbasi, M.H. (2008). Silica aerogel; synthesis, properties and characterization, *Journal of Materials Processing Technology*, 199 (1), 10 – 26. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.060>
- Dybel, P. (2021). Effect of bottom-up placing of self-compacting concrete on microstructure of rebar-concrete interface. *Construction and Building Materials* 299, 124359. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124359
- Ehrburger-Dolle, F., Dallamano, J., Elaloui, E., & Pajonk G.M. (1995). Relations between the texture of silica aerogels and their preparation. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 186, pp. 9-17. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(95\)00036-4](https://doi.org/10.1016/0022-3093(95)00036-4)
- Ekinci, C.E., 2008. *Bordo kitap: yapı ve tasarımcının inşaat el kitabı*, Data Yayınları, Ankara.
- Elmas, A. (2020). *Additive selection in ready mixed concrete* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 667412)
- Elvira, Y. (2016). IJTI Case study on use area parking at new market city shopping center Bogor Syaiful, Yena Elvira Case Study on use area parking at new market city shopping center Bogor. *IJTI International Journal of Transportation and Infrastructure*. <https://doi.org/10.29138/ijti.v1i1.330>
- Engel-Herbert, R., Pforte, H., & Hesjedal, T. (2007). CVD synthesis and purification of single-walled carbon nanotubes using silica-supported metal catalyst. *Materials Letters*, 61 (11), 2589-2593. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.10.004>
- Ersoy, U., & Özcebe, G. (2001). *Betonarme*, Evrim Publishing House, İstanbul.
- Ervianto, M., Saleh, F., & Prayuda, H. (2016). Kuat tekan beton mutu tinggi menggunakan bahan tambah abut terbang (fly ash) dan zat adiktif (bestmittel). *Sinergi*, 20(3): 199. <http://dx.doi.org/10.22441/sinergi.2016.3.005>
- Expanded Clay & Slate Institute (1971). Lightweight concrete history applications economics; expanded clay and slate institute (ESCSI): *Salt Lake City*, UT, USA.
- Fantucci, S., Fenoglio, E., Grosso, G., Serra, V., Perino, M., Marino, V., & Dutto, M. (2019). Development of an aerogel-based thermal coating for the energy retrofit and the prevention of condensation risk in existing buildings. *Science and Technology for the Built Environment*, 25 (9), 1178–1186. <https://doi.org/10.1080/23744731.2019.1634931>
- Fares, H., Toutanji, H., Pierce, K., & Noumowé, A. (2015). Lightweight self-consolidating concrete exposed to elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27, 04015039. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001285](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001285)
- Feng, Q., Chen, K., Ma, D., Lin, H., Liu, Z., Qin, S., & Luo, Y. (2018). Synthesis of high specific surface area silica aerogel from rice husk ash via ambient pressure drying. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 539, pp. 399-406. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.12.025>
- Fesmire, J.E. (2006). Aerogel insulation systems for space launch applications. *Cryogenics*, 46 (3), 111-117. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2005.11.007>

- Fickler S., Milow B., Ratke L., Schnellenbach-Held M., & Welsch T. (2015). Development of high performance aerogel concrete. *Energy Procedia*, 78, 406-11. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.684>
- Firoozmandan, M., Moghaddas, J., & Yasrebi, N. (2016). Performance of water glass-based silica aerogel for adsorption of phenol from aqueous solution. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 79, 67–75.
- Gao, G.M., Miao, L.N., Ji, G.J., Zou, H.F., & Gan, S.C. (2009). Preparation and characterization of silica aerogels from oil shale ash. *Materials Letters*, 63 (30), 2721-2724. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2009.09.053>
- Gao, T., Jelle, B.P., Gustavsen, A., & Jacobsen, S. (2014). Aerogel-incorporated concrete: an experimental study. *Construction and Building Materials*, 52, 130-136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.100>
- Ghazi, K., & Wakili, A. (2017). Remhof Reaction of aerogel containing ceramic fibre insulation to fire exposure. *Fire and Materials*, 41 (1), 29-39. <https://doi.org/10.1002/fam.2367>
- Gibiat, V., Lefevre, O., Woignier, T., Pelous, J., & Phalippou, J. (1995). Acoustic properties and potential applications of silica aerogels. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 186, 244-255. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(95\)00049-6](https://doi.org/10.1016/0022-3093(95)00049-6)
- Güçlüer, K. (2019). *Zeolit metakaolin ve yüksek fırın cürufunun birlikte kullanımının gazbeton özelliklerine etkisinin araştırılması* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 544524)
- Güldür, Ş.E. (2013). *Mikronize kalsit katkısının beton özelliklerine etkisinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 351990).
- Güler, D. (2012). *Silis kumu, feldspat ve tetraetilortosilikattan sol-jel yöntemi ile silika aerogel sentezi ve karakterizasyonu* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 32984)
- Gürsoy, M. (2019). Bor atıklarının aerogel üretiminde değerlendirilmesi (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 596469)
- Han Y., Lin, R., & Wang, X.Y. (2022). Carbon conversion technology for performance improvement and environmental benefits of ultra-high-performance concrete containing slag. *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 21, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.075>
- Hanif, A., Parthasarathy, P., & Li, Z. (2017). Utilizing fly ash cenosphere and aerogel for lightweight thermal insulating cement - based composites, ICGBMCE 2017: 19th International Conference on Green Building. *Materials and Civil Engineering*, London.
- Harith, I.K. (2018). Study on polyurethane foamed concrete for use in structural applications. *Case Studies in Construction Materials*, 8, 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.11.005>
- Helland, S.; Aarstein, R.; Maage, M. (2010). In-field performance of North Sea offshore platforms with regard to chloride resistance. *Structural Concrete*, 11, 15–24. ISSN 1464-4177 | E-ISSN 1751-7648

- Hereid, S., Nilsen, E., Einarsrud, M.A. (1995). Subcritical drying of silica gels. *Journal of Porous Materials*, 2 (4),315-324
- Holm, T., & Ries, J. (2007). Reference manual for the properties and applications of expanded shale, clay and slate lightweight aggregate. *Prepared by Expanded Shale Clay and Slate Institute*.
- Hossain, KMA. (2005). Volcanic ash and pumice as cement additives: pozzolanic, alkali - silica reaction and autoclave expansion characteristics. *Cement and Concrete Research*, 35 (6), 1141-1144. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.025>
- Huang, H., Zhou, Y., Huang, R., Wu, H., Sun, Y., Huang, G., Xu, T. (2020). Optimum insulation thicknesses and energy conservation of building thermal insulation materials in Chinese zone of humid subtropical climate. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.10184>
- Huber, L., Zhao, S., Malfait, W.J., Vares, S., & Koebel, M.M. (2017). Fast and minimal-solvent production of superinsulating silica aerogel granulate. *Angewandte Chemie International Edition*, 56 (17), 4753-4756. <https://doi.org/10.1002/anie.201700836>
- Ito, H., Onitsuka, S., Gappa, R., Saitoh, H., Roacho, R., Pannell, K., & Kanda, K. (2013). Fabrication of amorphous silicon carbide films from decomposition of tetramethylsilane using ecr plasma of ar. *Journal of Physics: Conference Series*. doi:10.1088/1742-6596/441/1/012039
- İbrahim, M., Henry Biwolé, P., Wurtz, E., & Achard, P. (2014). A study on the thermal performance of exterior walls covered with a recently patented silica - aerogel - based insulating coating. *Building and Environment*, 81 (2014), 112 – 122. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.017>
- İlgar, M., (2015). *Selüloz katkılı poli(ε-Kaprolakton) kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu*, (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 392205).
- İşiker, Y., & Yeşilata, B. (2017). Yapı Malzemelerinin Isı İletim Katsayılarının Tespitine Yönelik Yeni Bir Yöntem Geliştirilmesi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 2 (1) , 14-21. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/humder/issue/30491/341142>
- Jahami A., Temsah Y., Khatib J., Baalbaki O., Darwiche M. & Chaaban S. (2020). Impact behavior of rehabilitated post-tensioned slabs previously damaged by impact loading. *Magazine of Civil Engineering*, 93(1): 134–146. doi:10.18720/MCE.93.11
- Jia, G., Guo, J., & Li, Z., (2023). Controllable preparation of aerogel/expanded perlite composite and its application in thermal insulation mortar. *Construction and Building Materials*, Volume 394. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132257>
- Jia, G., Li, Z., Liu, P., & Jing, Q., (2018). Applications of aerogel in cement-based thermal insulation materials: an overview. *Magazine of Concrete Research*, 70(16), 822-837. ISSN 0024-9831 | E-ISSN 1751-763X
- Jia, Z., Chen, C., Shi, J., Zhang, Y., Sun, Z., & Zhang, P. (2019). The microstructural change of C-S-H at elevated temperature in Portland cement/GGBFS blended system. *Cement Concr Res* 2019;123. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.018>

- Job, N., Thery, A., Pirard, R., Marien, J., Kocon, L., Rouzaud, J.N., Beguin, F., & Pirard, J.P. (2005). Carbon aerogels, cryogels and xerogels: influence of the drying method on the textural properties of porous carbon materials. *Carbon*, 43 (12), 2481-2494. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.04.031>
- Juhl, S. J., Dunn, N. J. H., Carroll, M. K., Anderson, A. M., Bruno, B. A., Madero, J. E., & Bono, M. S. (2015). Epoxide-assisted alumina aerogels by rapid supercritical extraction. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 426, 141–149. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2015.06.030
- Júlio M. F., Soares, A., Ilharco, L. M., Flores-Colen, I., & Brito, J. (2016b). Silica-based aerogels as aggregates for cement-based thermal renders. *Cement and Concrete Composites*, 72, 309-318. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.013>
- Júlio, M.F., Soares, A., Ilharco, L.M., Colen, I.F., & Brito, J. (2016a). Aerogel-based renders with lightweight aggregates: Correlation between molecular/pore structure and performance. *Construction and Building Materials*, 124(2016), 485-495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.103>
- Kale, M.O. (2020). *Pomza agregası kullanılarak üretilen hafif beton özelliklerinin uçucu kül ikamesi ile iyileştirilmesi üzerine deneysel bir araştırma*, (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi’nden edinilmiştir. (Tez No. 619142)
- Kapica, R., Markiewicz, J., Tyczkowska-Sieroń, E., Fronczak, M., Balcerzak, J., Sielski, J., and Tyczkowski, J. (2020). Artificial superhydrophobic and antifungal surface on goose down by cold plasma treatment. *Coatings*, Vol. 10, pp. 904.
- Kara, T.İ. (2020). *Magnezyum silika aerogel üretimi, karakterizasyonu ve berrak üzüm suyu üretiminde durultma performansının incelenmesi* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi’nden edinilmiştir. (Tez No. 643502).
- Karaburc S.N., Yildizel S.A., & Calis G.C. (2020). Evaluation of the basalt fiber reinforced pumice lightweight concrete. *Magazine of Civil Engineering*, 94(2): 81-92. doi:10.18720/MCE.94.7
- Karakaş, İ.H., Karakaş, Z.K., & Ertuğrul, M., (2022). Photocatalytic activity of cobalt alüminate nanoparticles synthesized by microwave-assisted combustion method, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Volume 161, 110482, <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2021.110482>
- Karamikamkar, S., Fashandi, M., Naguib, H.E., & Park, C.B. (2020). In situ interface design in graphene-embedded polymeric silica aerogel with organic/inorganic hybridization. *ACS applied materials and interfaces*, Vol. 12, pp. 26635-26648. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c04531>
- Kashevarova G.G., & Tonkov, Y.L. (2020). Technical diagnostics of reinforced concrete structures using intelligent systems. *Magazine of Civil Engineering*, 93(1), 13–26. doi: 10.18720/MCE.93.2
- Kawashima, D., Aihara, T., Kobayashi, Y., Kyotani, T., Tomita, A. (2000). Preparation of mesoporous carbon from organic polymer/silica nanocomposite. *Chemistry of Materials*, 12 (11), 3397-3401. <https://doi.org/10.1021/cm000435l>

- Kılıç, A., Atış, C.D., Yaşar, E., Özcan, F. (2003). High - strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*, 33 (10), 1595 – 1599. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00131-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00131-5)
- Kim, S., Seo, J., Cha, J., & Kim, S. (2013). Chemical retreating for gel - typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel. *Construction and Building Materials*, 40, 501 – 505. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.046>
- Kistler, S.S. (1931). Coherent expanded aerogels and jellies. *Nature*, 127 (1931), 741. <https://doi.org/10.1038/127741a0>
- Kistler, S.S. (1941). Method of making aerogels. *U. S. Patent* 2 (767), 249.
- Koebel, M., Rigacci, A., & Achard, P. (2012). Aerogel-based thermal superinsulation: an overview. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 63 (3) (2012), 315-339.
- Koebel, M.M., Huber, L., Zhao, S., & Malfait, W.J. (2016). Breakthroughs in cost-effective, scalable production of superinsulating, ambient-dried silica aerogel and silica-biopolymer hybrid aerogels: from laboratory to pilot scale. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 79 (2), 308-318.
- Kogel, J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M., & Krukowski S.T(Eds.), (2006). *Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses*, SME.
- Krausmann, F., Lauk, C., Haas, W. & Wiedenhofer, D. (2018). From resource extraction to outflows of wastes and emissions: the socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015. *Global Environment Change*, 52, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003>
- Krishnaiah, K., & Shahabudeen, P. (2012). Applied design of experiments and taguchi methods. *PHI Learning Private Limited*, 371 p, New Delhi.
- Kuk, İ.E. (2019). *Sürdürülebilirlik açısından konut tipi yapılarda ısı yalıtımı uygulamalarının farklı parametrelere göre incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 601102).
- Kut, U. (2018). *Yapılarda ısı yalıtımı için geopolimer malzeme üretimi ve karakterizasyonu* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 516166)
- Kyotani, T. (2000). Control of pore structure in carbon. *Carbon*, 38 (2), 269-286. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00142-6](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00142-6)
- Lakshmi, N., Lakshmi, R., & Nagan, S. (2011). Utilization of waste e plastic particles in cementitious mixtures. *Journal of Structural Engineering*.
- Laksono, B. (2017). Experiment of early age concrete with fly - ash using high-strength design engineering faculty. Retrieved from <https://eprints.ums.ac.id/55700/1/NAS PUB.pdf>
- Lamprecht, H.O. (1996). *Opus Caementitium: Bautechnik der Römer*, 5th ed.; Beton-Verlag GmbH: Düsseldorf, Germany; p. 264.

- Lee, Y.J, Jung, J.C., Yi, J., Baeck, S.H., Yoon, J.R & Song, K. (2010). Preparation of carbon aerogel in ambient conditions for electrical double - layer capacitor. *Current Applied Physics*, 10 (2), 682 – 686. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2009.08.017>
- Li, D.Y., He, J., & Li, L. (2016). A review of renewable energy applications in buildings in the hot - summer and warm - winter region of China. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 57, 327-36. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.124>
- Li, L.G., Feng, J.J., Zhu, J., Chu, S.H., & Kwan, A.K.H. (2021). Pervious concrete: effects of porosity on permeability and strength. *Magazine of Concrete Research*, 73(2), 69-79. doi:10.1680/jmacr.19.00194
- Li, P., Wu, H., Liu, Y., Yang, J., Fang, Z., & Lin, B. (2019). Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete. *Construction and Building Materials*, 205(2019) 529-542. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.212>
- Li, Y., Li, X., Liu, A., & Li, X. (2023). Preparation and properties of oriented and hydrophobic aerogels from corn stover. *Industrial Crops and Products*, 205, 2023,117414. doi:10.1016/j.indcrop.2023.117414
- Li, Y., Yang, L., He, B., & Zhao, D. (2014). Green building in China: needs great promotion. *Sustainable Cities and Society*, 11,1-6. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.10.002>
- Liang, Y., Wu, H., Huang, G., Yang, J., & Wang, H. (2017). Thermal performance and service life of vacuum insulation panels with aerogel composite cores. *Energy and Buildings*, 154, 606–617. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.085>
- Lin, Y., Ehlert, G.J., Bukowsky, C., & Sodano, H.A. (2011). Superhydrophobic functionalized graphene aerogels. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 3 (7), 2200 – 2203. <https://doi.org/10.1021/am200527j>
- Liu, X., Chia, K.S., & Zhang, M.H. (2010). Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride-ion penetration. *Cement and Concrete Composites*, 32, 757–766. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.08.005>
- Liu, X., Wang, M., & Risen V.M. (2002). Polymer-attached functional inorganic-organic hybrid nano-composite aerogels materials research society. *Boston, MA, United States*, 435-440.
- Lotfy, A., Hossain, K.M.A., & Lachemi, M. (2016). Transport and durability properties of self-consolidating concrete using three types of lightweight aggregates. *ACI Materials Journal*, 113, 679–690. doi:10.14359/51689112
- Lu, X, Wang, P., Buttner, D., Heinemann, U., Nilsson, O., Kuhn, J., & Fricke, J. (1991). Thermal transport in opacified monolithic silica aerogels. *High Temperatures-High Pressures*, 23 (4), 431-436. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(05\)80457-0](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(05)80457-0)
- Ma, G., Jia, K., Xie, P., Ruhan A., Li W., Ding, X., & Ju, D., (2023). Physical, mineralogical, thermal, and mechanical properties of aerogel-incorporated concrete exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, Volume 140, Materials Chemistry and Physics, 53 (1), 13-18. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105089>

- Maia, J., Pedroso, M., Ramos, N. M. M., Pereira, P. F., Flores-Colen, I., Glória Gomes, M., & Silva, L. (2021). Hygrothermal performance of a new thermal aerogel-based render under distinct climatic conditions. *Energy & Buildings*, 243, 111001. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111001>
- Major, M., Kuliński, K., & Major, I. (2017). Thermal and dynamic numerical analysis of a prefabricated wall construction composite element made of concrete – polyurethane. *Procedia Engineering*, 190 (2017) 231-236. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.331>
- Masera, G., Wakili, K. G., Stahl, T., Brunner, S., Galliano, R., Monticelli, C., Aliprandi, S., Zanelli, A., & Elesawy, A. (2017). Development of a super-insulating, aerogelbased textile wallpaper for the indoor energy retrofit of existing residential buildings. *Procedia Engineering*, 180, 1139–1149. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.274>
- Mermer, N.K., & Pişkin, S. (2018). Synthesis of aerogel using of sand by ultrasonically assisted sol-gel method, characterization and thermal insulation plaster application. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*.
- Michel, A., Aegerter, N.L., & Matthias, M.K. (2011). *Hydrophobic silica aerogels: review of synthesis, properties and applications*. Aerogel Handbook, advances in sol-gel derived Materials And Technologies, 47-74.
- Mohanan, J.L., & Brock, S.L. (2004). A new addition to the aerogel community: unsupported CdS aerogels with tunable optical properties. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 350, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2004.05.020>
- Mousa, A., Mahgoub, M., & Hussein, M. (2018). Lightweight concrete in America: presence and challenges. *Sustainable Production Consumption*, 15 (2018) 131–144. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.06.007>
- MTA. (2005). Bayburt Doğal Taş Potansiyeli Maden Jeolojisi Raporu.
- Nayır S., (2021). *Pomza ve perlit agregası içeren mineral katkılı taşıyıcı hafif betonların enerji performansı açısından değerlendirilmesi* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 705257)
- Nejat, P., Jomehzadeh, F., Taheri, M. M., Gohari, M., & Muhd, M. Z. (2015). A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 843–862. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.066>
- Ng, S., Jelle, B. P., & Sandberg, L. I. C. (2015). Experimental investigations of aerogel incorporated ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 77 (2015) 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.064>
- Niu, L., Xie, J., Chen, P., Li, G., & Zhang, X. (2021). Quasi-static compression properties of graphene aerogel. *Diamond & Related Materials*, Volume 111, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108225>
- Öksüzer, N. (2016). *Farklı inceliklere sahip mermer ve bayburt taşı atıklarının lif donatılı geopolimer bağlayıcılı sistemlerde kullanılması* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 444948)

- Önenç, A. İ., Altınbaş, A. F., & Tulukçu, A. (2005). Bayburt Taşı ve Doğal Taş Potansiyeli Maden Jeolojisi. Ankara: MTA Genel Müdürlüğü Derleme Raporu.
- Özdişçi, A.İ. (2019). *İzmir-Alaçatı taşı agregalı hafif beton özelliklerinin irdelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 617158)
- Pierre, A.C., & Pajonk, G.M. (2002). Chemistry of aerogels and their applications. *Chemical Reviews*, 102 (11), 4243 – 4266. <https://doi.org/10.1021/cr0101306>
- Pimraksa, K., & Chindapasirt, P. (2009). Lightweight bricks made of diatomaceous earth, lime and gypsum. *Ceramics International*, 35 (1), 471-478. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2008.01.013>
- Posi, P., Lertnimoolchai, S., Sata, V., Phoongernkham, T., & Chindapasirt, P. (2014). Investigation of properties of lightweight concrete with calcined diatomite aggregate. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18 (5), 1429 – 1435.
- Prapid, B.S., Jong-Kil, K., & Hee, T.K. (2010). Production of low density sodium silicate-based hydrophobic silica aerogels beads by a novel fast gelation process and ambient pressure drying process. *Solid State Sciences*, 911-918. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2010.01.032>
- Radha, M. (2008). *Atık sularda karbon aerojel ile ağır metal tutunması* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 233868).
- Rahmani A, Nazemi F, & Davoudi M. Preparation, (2018). Characterization, and application of silica aerogel for adsorption of phenol: an in-depth isotherm study. *Health Scope*. 7(3):e15115. <https://doi.org/10.5812/jhealthscope.15115>
- Ramakrishnan, S., Sanjayan, J., Wang, X., Alam, M., & Wilson, J. (2015). A novel paraffin/expanded perlite composite phase change material for prevention of PCM leakage in cementitious composites. *Applied Energy*, 157 (2015), 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.019>
- Rao, A.V., & Wagh, P.B. (1998). Preparation and characterization of hydrophobic silica aerogels. *Materials Chemistry and Physics*, Volume 53, Issue 1, Pages 13-18. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(97\)02047-6](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(97)02047-6)
- Rashad, A.M. (2018). Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview. *Construction and Building Materials*, 170 (2018), 757-775. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009>
- Ratke, L. (2008). Herstellung und Eigenschaften eines neuen Leichtbetons: Aerogelbeton *Beton- Stahl betonbau*, 103 (4), 236-243. doi:10.1002/best.200700608
- Real, S., Bogas, J.A., & Ferrer, B. (2016). Service life of reinforced structural lightweight aggregate concrete under chloride-induced corrosion. *Materials and Structures*, 50, 17.
- Reynolds, J.G., Coronado, P.r., & Hrubesh, L.W. (2001). Hydrophobic aerogels for oil-spill clean up – synthesis and characterization. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 292 (1), 127-137. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(01\)00882-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(01)00882-1)

- Ries, J., Speck, J., & Harmon, K. (2010). Lightweight aggregate optimizes the sustainability of concrete, Concrete Sustainability Conference. *National Ready Mixed Concrete Association*.
- Roberz, F., Loonen, R.C.G.M., & Hensen, J.L.M. (2017). Ultra-lightweight concrete: Energy and comfort performance evaluation in relation to buildings with low and high thermal mass. *Energy Building*, 138, 432–442. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.049>
- Rostami, J., Khandel, O., Sedighardekani, R., Sahneh, A. R., & Ghahari, S. A., (2021). Enhanced workability, durability, and thermal properties of cementbased composites with aerogel and paraffin coated recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126518. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126518>
- Saadatkah, N., Garcia, A.C., Ackermann, S., Leclerc, P., Latifi, M., Samih, S., Patience, G.S. & Chaouki, J. (2020). Experimental methods in chemical engineering: Thermogravimetric analysis-TGA. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98(1), 34-43. <https://doi.org/10.1002/cjce.23673>
- Samson, G., Phelipot-Mardel , A., & Lanos, C. (2017). A review of thermomechanical properties of lightweight concrete. *Magazine of Concrete Research*, 69, 201–216. [doi:10.1680/jmacr.16.00324](https://doi.org/10.1680/jmacr.16.00324)
- Samuel, T.R., Pignatiello, J.J., Jr., & Calvin, J.A. (1998). Identifying the time of a step change with control charts. *Quality Engineering*. 10 (3), 521–527. <https://doi.org/10.1080/08982119808919166>
- Saraç, N. (2018). *Silika esaslı doğal hammadde ve atıklardan aerogel tozu üretimi ve karakterizasyonu* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 52678).
- Sarawade, P.B., Shao, G., & Kim, H.T. (2013). Effect of various structure directing agents on the physicochemical properties of the silica aerogels prepared at an ambient pressure. *Applied Surface Science*. 287, 84–90. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.09.072>
- Schmidt, M., & Schwertfeger, F. (1998). Applications for silica aerogel products. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 225, 364 – 368. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(98\)00054-4](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(98)00054-4)
- Sehaqui, H., Qi, Z., & Berglund, L.A. (2011). High - porosity aerogels of high specific surface area prepared from nanofibrillated cellulose (NFC). *Composites Science and Technology*, 71 (13), 1593 – 1599. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.07.003>
- Serencam, H. & Uçurum, M. (2019). Taguchi deney tasarımı kullanılarak uçucu kül ile ni ( ) gideriminde bazı adsorpsiyon parametrelerinin etkinliğinin irdelenmesi. *Niđde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (1), 336-344. [doi:10.28948/ngumuh.517135](https://doi.org/10.28948/ngumuh.517135)
- Serinoğlu, Y.N. (2011). *Normal ve süper akışkanlaştırıcı katkı miktarının taze beton ve sertleşmiş beton üzerindeki etkileri* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 284510)

- Sezer, F. Ş. (2005). Türkiye’de ısı yalıtımının gelişimi ve konutlarda uygulanan dış duvar ısı yalıtım sistemleri, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Dergisi*, 10 (2), 79-85.
- Shafi, S., Tian, J., Navik, R., Gai, Y., Ding, X., & Zhao, Y. (2019). Fume silica improves the insulating and mechanical performance of silica aerogel/glass fiber composite. *Journal of Supercrit Fluids*, 148, 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.02.027>
- Shah, S.N., Mo, K.H., & Radwan, M.K.H. (2021). Effect of micro-sized silica aerogel on the properties of lightweight cement composite. *Construction and Building Materials*, 290.123229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123229>
- Shah, S.N., Mo, K. H., Yap, S. P., Radwan, M. K. H., & El-Shafie, A., (2023). Chemically treated silica aerogel for the use in lightweight cementitious composite. *Case Studies in Construction Materials*, Volume 18, e 01742. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01742>
- Shaikh, F.U.A. (2016). Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5, 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.05.009>
- Sikora, P., Rucinska, T., Stephan, D., Chung, S.Y., Elrahman, M.A. (2020). Evaluating the effects of nanosilica on the material properties of lightweight and ultra-lightweight concrete using image-based approaches. *Construction and Building Materials*, 264 (2020), 120241. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120241>
- Ślosarczyk, A., Garbalińska, H., & Strzałkowski, J., (2023). Lightweight alkali-activated composites containing sintered fly ash aggregate and various amounts of silica aerogel. *Journal of Building Engineering*, Volume 74, 2023, 106879. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106879>
- Smirnova, I., Suttiruengwong, S., & Arlt, W. (2004). Feasibility study of hydrophilic and hydrophobic silica aerogels as drug delivery systems. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 350, 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2004.06.031>
- Smith, D.M., Maskara, A., & Boes, U. (1998). Aerogel-based thermal insulation. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 225, 254-259. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(98\)00125-2](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(98)00125-2)
- Stahl, T., Brunner, S., Zimmermann, M., & Wakili, K.G. (2012). Thermo-hygric properties of a newly developed aerogel based insulation rendering for both exterior and interior applications. *Energy and Buildings*, 44(2012), 114-117. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.041>
- Sütçü, M., Alptekin, H., Erdogmus, E., Er, Y., & Gencel, O., (2015). Characteristics of fired clay bricks with waste marble powder addition as building materials. *Construction and Building Materials*, 82, 1-8.
- Syaiful, S. (2021). Additional betonmix to increase the strength of concrete press. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 16(15), 1-16.
- Şahin, H. (2018). *Bayburt taşı olarak bilinen tüflerin çimento üretiminde mineral katkı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi’nden edinilmiştir. (Tez No. 534524)

- Tabata, M., Adachi, I., Hatakeyama, Y., Kawai, H., Morita, T., & Sumiyoshi, T. (2016). Large-area silica aerogel for use as cherenkov radiators with high refractive index, developed by supercritical carbon dioxide drying. *The Journal of Supercritical Fluids*, 110, 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.11.022>
- Tamon, H., & Ishizaka, H. (1999). Preparation of organic mesoporous gel by supercritical/freeze drying. *Drying Technology*, 17 (7–8), 1653-1665. <https://doi.org/10.1080/07373939908917643>
- Tayeh, B.A., Zeyad, A.M., & Amin, M. (2021). Effect of elevated temperatures on mechanical properties of lightweight geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials* 15(2021) e00673. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00673>
- Tchamdjou, WHJ., Cherradi, T., Larbi Abidi, M., Luiz, A., & Oliveira, P. (2018). Mechanical properties of lightweight aggregates concrete made with cameroonian volcanic scoria: destructive and non - destructive characterization. *Journal of Building Engineering*, 16 (2018), 134 – 145. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.01.003>
- Tezel, H. (2020). *Pomza agregası kullanılarak üretilen hafif beton özelliklerinin borik asit katkısıyla iyileştirilmesi üzerine deneysel bir araştırma* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 651389)
- Thienel, K.C., & Peck, M. (2007). Die Renaissance leichter Betone in der Architektur. *Detail*, 47, 522–534.
- Thienel, K.C., Haller, T., & Beuntner, N. (2020). Lightweight concrete—from basics to innovations. *Materials* 13 (5), 1120. <https://doi.org/10.3390/ma13051120>
- TS 2511, (2017). Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları, Türk Standartları, Ankara.
- TS 699. (2009). Doğal yapı taşları – İnceleme ve Laboratuar Deney Yöntemleri. Türk Standartları, Ankara.
- TS 825. (2013). Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 206-1, (2002). Beton – Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772-1, (2012). Kâgir birimler - Deney yöntemleri - Bölüm 1: Basınç dayanımının tayini, Türk Standartları, Ankara.
- TS EN 772-4, (2000). Kâgir birimler- Deney metotları- Bölüm 4: Tabii taş kâgir birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile boşluksuz ve boşluklu birim hacim kütlelerinin tayini, Türk Standartları, Ankara.
- TS EN 772-6, (2004). Kâgir birimler - Deney metotları - Bölüm 6: Beton kâgir birimlerin eğilmede çekme dayanımının tayini, Türk Standartları, Ankara.
- TSE CEN/TS 12390-9, 2017, Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 9: Buz Çözücü Tuzlarla Donma-Çözünme Direnci – Ölçeklendirme. Ankara
- Tsioulou, Q., Ayegbusi, J., & Lampropoulos, A. (2017). Experimental investigation on thermal conductivity and mechanical properties of a novel Aerogel concrete. *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*, 125-131.

- Türkmenoğlu, Z.F. (2017). *Endüstriyel atık katkılı kendiliğinden yerleşen hafif beton üretilirliğinin araştırılması* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 486786)
- Uçurum, M., Özdemir, A., & Tekin, İ. (2021). A novel approach to finding optimum operating conditions of design factors for the grinding experiment. *Particulate Science and Technology*, 39:2, 204-212, doi:10.1080/02726351.2019.1683663
- University of Illinois, Department of materials science and engineering. (2020). Available at: <http://matse1.matse.illinois.edu/concrete/concrete.html>. Accessed 25.11.2020.
- Uyanık, O., Çatlıoğlu, B., Sabbağ, N., Öncü, Z., Uyanık, N.A. (2012). Kayaçların fiziksel özellikleri ile sismik ultrasonik hızlar arasındaki ilişkilendirmeler. 1. *Yerbilimleri Sempozyumu*, Isparta.
- Vdovin E. A. & Stroganov V. F. (2020). Properties of cement-bound mixes depending on technological factors. *Magazine of Civil Engineering*, 93(1): 147-155.
- Wang, L., Liu, P., Jing, Q., Liu, Y., Wanga, W., Zhanga, Y., & Li, Z. (2018). Strength properties and thermal conductivity of concrete with the addition of expanded perlite filled with aerogel. *Construction and Building Materials*, 188, 447-457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.054>
- Wang, L., Schiraldi, D.A., & Sánchez-Soto, M. (2014). Foamlike xanthan gum/clay aerogel composites and tailoring properties by blending with agar. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53 (18), 7680-7687. <https://doi.org/10.1021/ie500490n>
- Wang, Y., Huang, J., Wang, D., Liu, L., Zhao, Z., & Liu, J. (2019). Experimental investigation on thermal conductivity of aerogel incorporated concrete under various hygrothermal environment. *Energy*, 188, 115999. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115999>
- Wei T. Y., Lu S. Y., & Chang Y. C. (2009). A new class of opacified monolithic aerogels of ultralow high-temperature thermal conductivities. *The Journal of Physical Chemistry C - ACS Publications*, 113(17), 7424–7428. <https://doi.org/10.1021/jp900380q>
- Wei, G., Wang, L., Xu, C., Du, X., & Yang, Y. (2016). Thermal conductivity investigations of granular and powdered silica aerogels at different temperatures and pressures. *Energy Building*, 118, 226-231. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.008>
- Wei, J., Zhu, P., & Sun, H. (2022). Ambient-Dried Silica Aerogel Powders Derived from Coal Gangue by Using One-Pot Method. *Materials* 15, 1454. <https://doi.org/10.3390/ma15041454>
- Welsch, T., Held, M.S., & Milow B. (2017). *High performance aerogel concrete*. Proc. 12th Conference on Advanced Building Skins, Bern 2017, 591-9.
- Westgate, P., Paine, K., & Ball, R. J. (2018). Physical and mechanical properties of plasters incorporating aerogel granules and polypropylene monofilament fibres. *Construction and Building Materials*, 158, 472–480. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.177>
- Wu, H., Zhang, H., Zhang, G., Liu, J., Liu, Z., & Du, F. (2023). Study on preparation and performance of advanced aerogel foamed concrete with ultra-light aerogel.

- Wu, X., Fan, M., McLaughlin, J. F., Shen, X., & Tan, G. (2018). A novel low-cost method of silica aerogel fabrication using fly ash and trona ore with ambient pressure drying technique. *Powder Technology*, 323, 310–322. doi:10.1016/j.powtec.2017.10.022
- Xie, J., Niu, L., Qiao, Y., Chen, P., & Rittel, D. (2022). Impact energy absorption behavior of graphene aerogels prepared by different drying methods. *Materials & Design*, Volume 221, 110912, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110912>.
- Xie, Y., Li, J., Lu, Z., Jiang, J., & Niu, Y. (2019). Preparation and properties of ultra - lightweight EPS concrete based on pre - saturated bentonite. *Construction and Building Materials*, 195, 505 – 514. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.091>
- Yamamoto, T., Sugimoto, T., Suzuki, T., Mukai, S.R., & Tamon, H. (2002). Preparation and characterization of carbon cryogel microspheres. *Carbon*, 40 (8), 1345-1351. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(01\)00294-9](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(01)00294-9)
- Yang, J., He, F., Wu, H., Liang, Y., Wang, Y., & Sun, Z. (2018). Engineering surface and optical properties of TiO₂-coated electrospun PVDF nanofibers via controllable selfassembly. *Nanomaterials*, 8(741), 1–17. doi:10.3390/nano8090741
- Yılmaz, H. (2017). *Çimento türü ve pomza agregasının beton karakteristiklerine etkisi*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 88031)
- Yu, H., Liang, X., Wang, J., Wang, M., Yang, S., (2015). Preparation and characterization of hydrophobic silica aerogel sphere products by co-precursor method. *Solid State Sciences*, Volume 48, Pages 155-162, ISSN 1293-2558.
- Yücel, S., Karakuzu, B., Terzioğlu, P., & Temel, T. (2016). Influence of gel aging time on the properties of various silica aerogels synthesized from water glass. *Materials Science Forum*, 866: 176-180. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.866.176
- Zhang, H., Yang, J., Wu, H., Fu, P., Liu, Y., & Yang, W. (2020). Dynamic thermal performance of ultra-light and thermal-insulative aerogel-foamed concrete for building energy efficiency. *Solar Energy*, 204, 569-576. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.092>
- Zhang, J., Cao, Y., & Wu, P. (2012). Graphene-oxide-sheet-induced gelation of cellulose and promoted mechanical properties of composite aerogels. *The Journal of Physical Chemistry C - ACS Publications*, 116 (14), 8063–8068.
- Zhou, T., Gong, L., Cheng, X., Pan, Y., Li, C., & Zhang, H. (2018). Preparation and characterization of silica aerogels from by-product silicon tetrachloride under ambient pressure drying. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 499, 387–393. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2018.05.036
- Zhu, P., Brunner, S., Zhao, S., Griffa, M., Leemann, A., Toropovs, N., Malekos, A., Koebel, M.M., & Lura, P. (2019). Study of physical properties and microstructure of aerogel-cement mortars for improving the fire safety of high-performance concrete linings in tunnels. *Cement and Concrete Composites* (104), 103414. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103414>

ÖZ GEÇMİŞ

İlk öğrenimini Erzincan'da, orta ve lise eğitimlerini İzmir'de tamamladıktan sonra Fırat Üniversitesi Yapı Öğretmenliği Bölümü'nde Lisans eğitimini tamamladı. Sonrasında Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Programında eğitimine başladı. Evli ve iki çocuk babasıdır.

