

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ÖĞÜTÜLMÜŞ VERMİKÜLİT KULLANILARAK ÜRETİLEN
KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLARIN YÜKSEK
SICAKLIK DİRENCİ**

Hasan Anıl TOPRAK

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Yapı Bilim Dalı

OCAK 2020

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**ÖĞÜTÜLMÜŞ VERMİKÜLİT KULLANILARAK ÜRETİLEN
KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLARIN YÜKSEK SICAKLIK
DİRENCİ**

Tez Yazarı

Hasan Anıl TOPRAK

Danışman

Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ

OCAK 2020

ELAZIĞ

T. C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Öğütülmüş Vermikülit Kullanılarak Üretilen Kendiliğinden Yerleşen
Harçların Yüksek Sıcaklık Direnci

Yazarı: Hasan Anıl TOPRAK

İlk Teslim Tarihi: 6.12.2019

Savunma Tarihi: 17.1.2020

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğretim Üyesi Ahmet BENLİ Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza
Prof. Dr. Soner ÖZGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Öğütülmüş Vermikülit Kullanılarak Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Harçların Yüksek Sıcaklık Direnci” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

17/1/2020

Hasan Anıl TOPRAK



ÖNSÖZ

Yapmış olduğum tez çalışmamda bilgi birikimi ve deneyimiyle bana her türlü desteği sağlayan, zamanını ayırıp bu tezin ortaya çıkmasında büyük emeği olan Saygıdeğer Hocam Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ'a, deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Laboratuvar Teknisyeni Sayın Seyfettin ÇİÇEK'e, deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde çok büyük katkısı olan İnşaat Mühendisi arkadaşım Sayın Furkan ARSLAN'a, katkılarından dolayı Bingöl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Dr. Öğretim Üyesi Sayın Ahmet Benli'ye, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Arş. Gör. Sayın Ozan İNCE'ye, Arş. Gör. Sayın Muhammed ULUCAN'a ve her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Hasan Anıl TOPRAK

ELAZIĞ, 2020

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇ	5
2.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton Tanımı ve Tarihiçesi.....	5
2.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Özellikleri.....	6
2.3. Kendiliğinden Yerleşen Betonda Kullanılan Malzemeler	6
2.3.1. Çimento	7
2.3.2. Agrega	7
2.3.3. Su	8
2.3.4. Mineral Katkılar	8
2.3.5. Kimyasal Katkılar	9
3. MİNERAL KATKI MADDESİ OLARAK VERMİKÜLİT.....	11
3.1. Vermikülitin Tanımı ve Özellikleri	11
3.2. Dünya’da ve Türkiye’deki Mevcut Durumu	14
3.3. Genleştirilmiş Vermikülitin Üretim Metodu ve Ürün Standartları	16
3.4. Genleştirilmiş Vermikülitin Kullanım Alanları	17
4. MATERYAL VE METOT	19
4.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	19
4.1.1. Portland Çimentosu	19
4.1.2. Agrega	20
4.1.3. Mineral Katkılar	21
4.1.4. Kimyasal Katkılar	22
4.1.5. Karışım Suyu.....	22
4.1.6. KYH Karışım Oranları ve Deneyler.....	23
4.2. Taze Harç Deneyleri.....	24
4.2.1. Mini Çökme-Yayılma Deneyi.....	24
4.2.2. Viskozimetre Deneyi.....	26
4.2.3. KYH Karışımlarının Kalıplara Yerleştirilmesi ve Kürü.....	27
4.3. Sertleşmiş Harç Deneyleri	29
4.3.1. Üç Noktalı Eğilme ve Basınç Deneyi.....	29
4.3.2. Toplam Su Emme ve Porozite Deneyleri	30
4.3.3. Kapiler (Kılcal) Su Emme Deneyi	32
4.3.4. Yüksek Sıcaklık Deneyi	33
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	36
5.1. Taze Harç Deney Sonuçları	36

5.1.1. Mini Çökme-Yayılma Deney Sonuçları	36
5.1.2. Viskozite Deneyi Sonuçları	37
5.2. Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları	39
5.2.1. Üç Noktalı Eğilmede Çekme ve Basınç Deneyi Sonuçları	39
5.2.2. Yüksek Sıcaklık Deney Sonuçları	43
5.2.3. Kapiler Su Emme, Toplam Su Emme ve Porozite Deney Sonuçları	47
6. SONUÇLAR.....	53
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Öğütülmüş Vermikülit Kullanılarak Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Harçların Yüksek Sıcaklık Direnci

Hasan Anıl TOPRAK

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2020, Sayfa: xii + 059

Bu tez çalışmasında amaç kendiliğinden yerleşen harç (KYH) üretiminde mineral katkı maddesi kullanımının dayanım ve durabilite özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. KYH'lerin işlenebilirlik özelliklerini belirlemek için taze harç deneyleri, dayanım ve durabilite özelliklerini belirlemek için sertleşmiş harç deneyleri uygulanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda, KYH üretiminde agrega olarak 0-2 mm ve 2-4 mm dere agraması kullanılmıştır. Mineral katkı olarak öğütülmüş haldeki genleştirilmiş vermikülit (GV) %5, %10, %15, %20 oranlarında CEM I 42,5 N çimento yerine ikame edilmiştir. Ham vermikülit (HV) ise %5, %10, %15, %20 oranlarında CEM I 42,5 N çimento yerine, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında agrega yerine ikame edilmiştir. KYH karışımlarında bağlayıcı miktarı 630 kg/m³, süper akışkanlaştırıcı 6 ile 8 kg/m³ miktarında sabit tutulurken su/bağlayıcı oranı değişmiştir. Kontrol numunesiyle birlikte 13 farklı karışım hazırlanmıştır. Tüm KYH karışımlarının taze haldeki özelliklerini belirlemek için mini çökme-yayılma ve viskozimetre deneyleri gerçekleştirilmiştir. KYH'lerin sertleşmiş haldeki özelliklerini belirlemek için 40x40x160 mm prizmatik numunelere eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık deneyleri uygulanmıştır. 50x50x50 mm küp numunelere yoğunluk, porozite, toplam su emme ve kılcal su emme deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre mineral katkı kullanılan KYH'lerin taze haldeki özellikleri kendiliğinden yerleşebilirlik kriterlerine uymaktadır. GV katkı kullanımı su emme değerlerini arttırırken mekanik özellikleri zayıflatmıştır. Kullanılan mineral katkı maddesi çeşit ve miktarı yüksek sıcaklık direncini etkilemiştir.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden Yerleşen Harç, Genleştirilmiş Vermikülit, Ham Vermikülit, Eğilmede Çekme Dayanımı, Basınç Dayanımı.

ABSTRACT

High Temperature Resistance of Self Compacting Mortars Made with Ground Vermiculite

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

January 2020, Pages: xii + 059

The aim of this thesis is to investigate the effect of mineral additive use on strength and durability properties of self-compacting mortar (SCM) production. Fresh mortar experiments and hardened mortar experiments were used to determine the workability properties and strength and durability characteristics of SCMs, respectively. In experimental studies, 0-2 mm and 2-4 mm river aggregates were used in the production of SCM. Grinded expanded vermiculite (EV) as mineral additive was replaced by CEM I 42.5 N cement at 5%, 10%, 15%, 20%. Raw vermiculite (RV) was replaced by CEM I 42.5 N cement at 5%, 10%, 15%, 20%, and 10%, 20%, 30% and 40% instead of aggregates. While the amount of binder and the super plasticizer was kept constant with 630 kg/m³ and 6 to 8 kg/m³, respectively, the water/binder ratio was changed. 13 different mixtures were prepared including control sample. In order to determine the fresh properties of all SCM mixtures, mini-slump flow and viscosity experiments were performed. Flexural, compressive strength and high temperature experiments were applied to determine the hardened properties of SCMs to 40x40x160 mm prismatic samples. Density, porosity, total water absorption and capillary water absorption experiments were applied to 50x50x50 mm cube samples. According to experiment results, the fresh properties of the mortars with the mineral additive have complied with the criteria of self compactability. While expanded vermiculite additive has increased water absorption values, the mechanical properties have weakened. The type and amount of mineral additive used affected the high temperature resistance.

Keywords: Self-Compacting Mortar, Expanded Vermiculite, Raw Vermiculite, Flexural Strength, Compressive Strength.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Ham Vermikülit.....	12
Şekil 3.2. Genleştirilmiş Vermikülit.....	13
Şekil 3.3. GV esaslı harçların yangından korunma amaçlı çelik yapılara uygulanması	17
Şekil 3.4. GV'nin seracılıkta kullanımı	18
Şekil 3.5. GV esaslı hafif betonların çatı şapı olarak uygulanması	18
Şekil 4.1. Kullanılan agreganın granülometri eğrisi	20
Şekil 4.2. Genleştirilmiş vermikülit ve ham vermikülit.....	21
Şekil 4.3. Mini çökme-yayılma deneyi aparatı ve düzeneği	25
Şekil 4.4. Mini çökme-yayılma çapının ölçümü.....	26
Şekil 4.5. Brookfield DV-E model viskozimetre cihazı	27
Şekil 4.6. 40x40x160 mm'lik prizmatik ve 50x50x50 mm'lik küp kalıplar.....	27
Şekil 4.7. KYH'lerin kalıba yerleştirilmesi	28
Şekil 4.8. Numunelerin kür ortamı	28
Şekil 4.9. Üç noktalı eğilme deneyi.....	29
Şekil 4.10. Basınç deneyi	30
Şekil 4.11. Arşimed terazisi.....	31
Şekil 4.12. Etüvde kurutulmuş numuneler	31
Şekil 4.13. Yan yüzeyleri izole edilmiş küp numuneler	33
Şekil 4.14. İzole edilmiş küp numunelerin su emmesi	33
Şekil 4.15. Numunelerin yüksek sıcaklık fırınına yerleştirilmesi	34
Şekil 4.16. Yüksek sıcaklık uygulamasından sonra numunelerin durumu	34
Şekil 4.17. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin yakın görünümü	35
Şekil 4.18. Yüksek sıcaklık uygulanan numunelerin üç noktalı eğilme ve basınç deneyi.....	35
Şekil 5.1. Bağlı çökme-yayılma grafiği.....	37
Şekil 5.2. KYH karışımlarının viskozite grafiği.....	38
Şekil 5.3. Üç noktalı eğilmede çekme dayanımı grafiği.....	40
Şekil 5.4. Basınç dayanımı grafiği.....	41
Şekil 5.5. Yüksek sıcaklık sonrası eğilmede çekme dayanımı grafiği.....	44
Şekil 5.6. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı grafiği	45
Şekil 5.7. Kapiler su emme katsayıları grafiği	48
Şekil 5.8. Toplam su emme kapasitesi değişimleri.....	51

Şekil 5.9. Porozite değişimleri.....	51
---	----



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Mineral katkıların su ile reaksiyonlarına göre sınıflandırılması	8
Tablo 3.1. Çeşitli vermikülitlerin kimyasal bileşenleri	11
Tablo 3.2. Vermikülitin tane boyutuna göre sınıflandırılması	13
Tablo 3.3. Amerika’da kullanılan, ham vermikülitin tane boyutu ve yoğunluğuna göre sınıflandırılması ..	14
Tablo 3.4. Amerika’da kullanılan, genleştirilmiş vermikülitin tane boyutu ve yoğunluğuna göre sınıflandırılması	14
Tablo 3.5. Dünya vermikülit kaynakları dağılımı	15
Tablo 3.6. Dünyada son yıllardaki vermikülit üretimi	15
Tablo 4.1. CEM I 42,5 N tipi portland çimentonun kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri	20
Tablo 4.2. Genleştirilmiş vermikülit kimyasal bileşenleri	21
Tablo 4.3. Genleştirilmiş vermikülit fiziksel özellikleri	22
Tablo 4.4. SA kimyasal katkının özellikleri.....	22
Tablo 4.5. KYH karışım bileşenleri ve oranları	24
Tablo 5.1. Mini çökme-yayılma deney sonuçları.....	36
Tablo 5.2. KYH karışımlarının farklı açılarda hızlardaki viskozite değerleri	38
Tablo 5.3. Eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri	39
Tablo 5.4. Yüksek sıcaklık sonrası eğilmede çekme ve basınç dayanım değerleri	44
Tablo 5.5. Yüksek sıcaklık sonucunda eğilmede çekme ve basınç dayanım kayıpları	46
Tablo 5.6. KYH numunelerinin etüv kurusu, su içindeki ve doymuş kuru yüzey ağırlıkları	49
Tablo 5.7. 50x50x50 mm boyutlu küp numunelerin yoğunlukları.....	50
Tablo 5.8. 50x50x50 mm boyutlu küp numunelerin toplam su emme kapasitesi ve porozite değerleri	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Su ile temas eden alan (cm ²)
A	: 1 m ³ betonda bulunacak dere agregası (kg)
cP	: Viskozite Değerleri
Ç	: 1 m ³ betonda çimento miktarı (kg)
d	: Deney sonucu elde edilen ortalama yayılma çapı (mm)
d ₀	: Kesik koninin alt çapı (mm)
H	: Betondaki havanın hacmi (cm ³)
K	: Kapiler (kılcal) su emme katsayısı (cm/s ^{1/2})
n	: Çimento yerine kullanılacak mineral katkı yüzdesi (gr)
Q	: Emilen su miktarı (cm ³)
Rpm	: Açısal Hız
S	: 1 m ³ betondaki suyun miktarı (kg)
SA	: 1 m ³ betonda kimyasal katkı miktarı (kg)
t	: Geçen zaman (s)
W ₁	: Numunenin etüv kurusu ağırlığı (gr)
W ₂	: Numunenin sudaki ağırlığı (gr)
W ₃	: Numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı (gr)
µm	: Mikrometre (1 mm = 1x10 ³ µm)
ρ _a	: Agreganın özgül ağırlığı (gr/cm ³)
ρ _ç	: Çimentonun özgül ağırlığı (gr/cm ³)
ρ _v	: Mineral katkı özgül ağırlığı (gr/cm ³)
ρ _{sa}	: Kimyasal katkı özgül ağırlığı (gr/cm ³)
Γ _m	: Bağlı çökme-yayılma değeri

Kisaltmalar

ASTM	: Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
C ₃ A	: Kalsiyum Alüminat (3CaOAl ₂ O ₃)
CaCO ₃	: Kalsiyum Karbonat
CaO	: Kalsiyum Oksit
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum Hidroksit
C-S-H	: Kalsiyum Silika Hidrat Jel (xCaOSiO ₂ .yH ₂ O)
EFNARC	: European Federation of National Associations Representing for Concrete
GV	: Genleştirilmiş Vermikülit
HV	: Ham Vermikülit
KSB	: Kendiliğinden Sıkışan Beton
KYB	: Kendiliğinden Yerleşen Beton
KYH	: Kendiliğinden Yerleşen Harç
PÇ	: Portland Çimentosu
SA	: Süper Akışkanlaştırıcı
SCC	: Self Compacting Concrete-Self Consolidating Concrete
SLC	: Self Levelling Concrete
TS EN	: Türk Standartları Enstitüsü
VAK	: Viskozite Arttırıcı Katkı

1. GİRİŞ

Yapı alanının temel malzemelerinden biri olan beton agrega, çimento, su ve katkı maddelerinin bileşimiyle oluşan kompozit bir malzemedir. Günümüzde binalar, yollar, barajlar, santraller, köprüler, istinat duvarları, su depoları, arıtma tesisleri, altyapı hatları, hava alanları, limanlar vb. birçok farklı yapıda en yaygın kullanılan yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır [1]. Teknolojik gelişmelerle birlikte günümüzde betonun dayanım ve durabilite yönünden avantaj sağlayacak şekillerde üretilmesi ihtiyacı doğmuştur. Bundan dolayı geleneksel beton yerine özel beton türleri geliştirilip üretilmiştir. Bu üretimlerden en yaygın olanı kendiliğinden yerleşen betondur (KYB).

Japonya’da 1980’li yılların başında yapılarda kalıcılık problemlerinin en başında taze betona yeteri kadar sıkıştırma işlemi uygulanmadan yerleştirilmesi olduğu öngörülmüştür. KYB’nin çıkış noktası bu gelişme olmuştur. Kalifiye işçi yetersizliğinden kaynaklı taze betonun yeteri kadar sıkıştırılamaması sonucu beton kalitesi olumsuz etkilenmektedir. Fakat işçi ne kadar eğitilmiş olursa olsun, işlenebilirliği düşük betona homojen sıkıştırma yapmak pratikte mümkün değildir. Bu problemin çözüm yolu olarak sıkıştırma işlemi gerektirmeden kendi ağırlığıyla sıkışarak yerleşebilen özel bir beton tasarlanmıştır [2].

KYB, vibrasyon işlemi gerektirmeden kendi ağırlığıyla donatı kalıplarının her tarafına yayılıp sıkışabilen, terleme ve segregasyon gibi problemleri çok az yaşayan akıcı kıvamlı, dayanım ve dayanıklılığı yüksek, özel bir beton türüdür. Geleneksel betondan farklı olarak KYB’nin bu önemli özellikleri kimyasal ve mineral katkı maddeleri ile sağlanır. Bu maddelerin oransal olarak seçimi ve uygun beton tasarımı için deneysel yöntemler ve standartlar geliştirilmektedir [2].

KYB yüksek akışkanlığa sahip, ayrışma direnci iyi olan yüksek performanslı bir beton türüdür. Geçmişte betonu akıcı kıvamlı hale getirmek için karışım hesaplarında su/çimento oranını arttırma yoluna gidilmiştir. Bu da betonda terleme ve segregasyon problemlerine yol açarak betonun yüksek performans göstermesini engellemiştir. Günümüzde KYB üretiminde kullanılan süper akışkanlaştırıcı (SA) katkılar, dayanım kaybı yaşamadan akıcılık, viskozitenin korunmasını ve segregasyonun önlenmesini sağlamaktadırlar. SA’lar bunu çimento tanelerini yayararak taneler arasındaki sürtünmeyi azaltıp su miktarındaki azalmayla gerçekleştirirler [3]. KYB’nin yüksek akışkanlık özelliğini kazanabilmesi için SA kimyasal katkı kullanımının yanısıra iri agrega miktarının sınırlandırılması ve 0,125 mm boyutu ve altındaki ince malzeme oranının arttırılması gerekmektedir [4]. Bundan dolayı kimyasal katkıya ek olarak puzolanik veya inert mineral katkı maddeleri kullanarak portland çimentosundan tasarruf sağlanıp hem maliyet azaltılabilir hem de daha performanslı betonlar elde edilebilir.

Puzolanlar ince toz halde bulunan kendi kendine bağlayıcılık özelliği hiç olmayan ya da çok az olan ancak sulu ortamda kalsiyum hidroksitle (Ca(OH)_2) tepkimeye girdiğinde bağlayıcılık

özelliği kazanan ürünler ortaya çıkaran, silisli veya silisli alüminli maddelerdir [5]. KYB’de mineral katkı olarak elde edilmesi kolay olan yüksek fırın cürufu, silis dumanı, uçucu kül ve kireçtaşı tozu gibi yapay puzolanlar ile kaolin, pomza, volkanik tuf, vermikülit gibi doğal puzolanlar kullanılabilir. Puzolanik malzemelerden beton üretiminde iki şekilde yararlanılmaktadır. Birincisi, mineral katkı maddesi olarak portland çimentosunun yerine belirli ağırlık oranında ikincil bağlayıcı işlevinde ilave edilebilirler. Böylece çimento azaltma yoluyla maliyet artışı engellenebilir. İkincisi ise puzolanik malzeme ilavesiyle katkılı çimento üretiminde kullanılarak çimentonun dayanım ve durabilite özelliklerini geliştirirler.

Doğal puzolanik mineral malzemelerden biri de vermikülitir. Vermikülit; endüstriyel olarak genleşme özelliği gösteren mika grubu minerallerini (flogopit, biotit ve hidrobiotit) kapsayan bir terimdir. Fiziksel olarak yeşil, sarımsı, kahve ve siyah renkte olabilir. Mohs ölçeğine göre sertliği 1,2 ile 2,0 arasında değişir. Özgül ağırlığı 2,5 civarındadır. Vermikülit yüksek sıcaklık altında ısı şokuna tabi tutulduğunda uzayıp genleşmektedir. Genleşme meydana geldikten sonra $0,8 \text{ g/cm}^3$ olan mineralin yığın yoğunluğu 10 kat azalarak $0,08 \text{ g/cm}^3$ ’e düşmektedir. Yığın yoğunluğundaki 10 katlık bu azalış malzemenin kalitesine ve genleştirme yapan fırının özelliğine göre 30 kata kadar çıkabilmektedir [6,7]. Vermikülit endüstriyel alanda ham hali yerine daha çok geliştirilmiş şekliyle kullanılmaktadır. Bunun sebebi, ısı yalıtımında ve hafif yapı malzemelerinin yapımında portland çimentosuyla geliştirilmiş vermikülit kullanıldığında iyi sonuçlar vermektedir. Ham veya geliştirilmiş vermikülit ateşe karşı direnç sağladığından, hafifliğinden ve yalıtım özelliklerinden dökümhane ve çelik fabrikalarında kullanılır. Yapılarda panel duvar ve beton duvar yapımında ateşe dayanıklılık sağlar. Sıcak dökümlerin taşınmasında ve erimiş metallerin örtülmesinde geliştirilmiş vermikülit dolgu malzemesi olarak veya başka bağlayıcılarla beraber kullanılır [8,9].

Yapılarda dayanımı ve durabiliteyi olumsuz etkileyen faktörlerden biri de yüksek sıcaklıktır. Yapının kullanılamaz hale gelerek servis dışı kalmasına, can ve mal kaybına sebep olur. Koruyucu önlemler alınıp bu etkinin ortadan kaldırılması ile hasarlar en aza indirilebilir [10]. Yüksek sıcaklığın beton ve betonarme yapılar üzerindeki olumsuz etkisi 1922’den günümüze araştırılmaktadır. Eski çalışmalarda yüksek sıcaklığın normal dayanımlı beton üzerinde etkisine bakılmaktaydı [11]. Ancak günümüzde çoğu yapının inşasında mineral ve kimyasal katkılı yüksek dayanımlı ve performanslı betonlar kullanılmaktadır. Bu betonların boşluk oranı az ve yapısı daha yoğun olduğundan yüksek sıcaklık etkisiyle normal dayanımlı betondan daha az performans gösterirler [12].

Medri vd. [13] hafif agreaga olarak geliştirilmiş vermikülit ve geopolimer bağlayıcılarla üretilen hafif kompozit panelleri incelemişlerdir. Metakaolin ve alümina bazlı geopolimer bağlayıcılar ile iki farklı boyutta geliştirilmiş vermikülit bileşimleri test edilmiştir. Üretilen kompozitler termal ve mekanik testlerin yanı sıra mikroyapı analizlerine tabi tutulmuştur.

Yoğunluklar 700 kg/m^3 ile 900 kg/m^3 arasında değişirken ortalama dayanım yaklaşık 2 MPa ve ısı iletkenliği $0,2 \text{ W/mK}$ çıkmıştır. Sonuçlar yapı sektöründe kullanılan alçıpan ve köpük betonlarla kıyaslandığında, hafif kompozitlerin yoğunluk ve mekanik özellikleri tatmin edici düzeydedir.

Divya vd. [14] agreganın beton hacminin %60-80'ini kapladığını, karışım özelliklerini ve ekonomisini etkilediğini, bu yüzden vermikülit kullanımının betonda büzülme ve çatlama direncini arttırdığını, yangına karşı direnç sağladığını, çevresel etkiyi ve maliyeti azalttığını belirtmişlerdir. Agregaya yerine %40, %50, %60 oranında ikame edilen vermikülitin betonun dayanım özelliklerine etkisinin araştırılması çalışmanın asıl amacıdır. 7, 21 ve 28 gün süreli kürden sonra yapılan dayanım testlerinde optimum dayanımın %50 vermikülit, %50 agregaya içeren karışımlar tarafından sağlandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Chandra vd. [15] agregaya yerine %33, %50, ve %100 vermikülit, çimento yerine %0, %10, %20 ve %30 uçucu kül ikame ederek hazırladıkları vermikülitli hafif betonların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Karışım oranlarını belirlemek için su/çimento oranı 0,60 ile 1,65 aralığında denenmiştir. 7, 14 ve 28 gün kürde bekletilen numunelerin su emmesi, yoğunluğu ve basınç dayanımı belirlenmiştir. Hafif betondaki vermikülit içeriği arttıkça yoğunluk ve dayanım azalmıştır. %10 ve %20 uçucu kül kullanımı optimum yoğunluk ve basınç dayanımı değerleri sağlamıştır. Uçucu külün vermikülit içeriği yüksek olan hafif beton üzerinde etkisi çok azdır.

Köksal vd. [16] yaptıkları çalışmada, değişik miktarlarda genleştirilmiş vermikülit içeren dört farklı karışımın 300°C , 600°C , 900°C ve 1100°C yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. 28 gün süreyle kürde bekletilen numunelerin birim ağırlık, su emme, porozite, basınç ve çekme dayanımı, ultrasonik hız, mikro yapı incelemeleri gibi özellikleri belirlenmiştir. Karışımlardaki vermikülit oranı arttıkça birim ağırlık değeri 1332 kg/m^3 'ten 1078 kg/m^3 'e düşmüş, görünür porozite %29,9'dan %37,4'e, su emme değeri %24,4'ten %34,6'ya yükselmiştir. Dayanım kaybının kritik olduğu yüksek sıcaklık 900°C ve üzeri olarak bildirilmiştir. 1100°C 'de basınç dayanımı %73-100, çekme dayanımı %71-100 aralığında değer kaybetmiştir.

Sharmila ve Vijayan [17], yapının ölü yük ağırlığını azaltmak ve ısıya dayanıklı yapısal hafif beton elde etmek için doğal vermikülit kullanmışlardır. Vermikülit ince agregaya yerine %5, %10, %15 oranlarında ikame edilirken su/çimento oranı 0,45'te sabit tutulmuştur. Kür işleminden sonra $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ küp numunelere basınç dayanımı, $300 \times 150 \text{ mm}$ silindir numunelere çekme dayanımı testi uygulanmıştır. Vermikülit oranı arttıkça basınç dayanımı değerleri $23,1 \text{ MPa}$ 'dan, $19,4 \text{ MPa}$ 'a, çekme dayanımı da aynı şekilde $3,39 \text{ MPa}$ 'dan, $3,26 \text{ MPa}$ 'a düşmüştür. Ayrıca $50 \times 70 \times 25 \text{ cm}$ ebatlarında yapı modelleri oluşturulup dışı vermikülitli karışımlarla sıvanarak sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Çevre sıcaklığının yüksek olduğu durumda, vermikülit oranı arttıkça yapının iç kısmı oda sıcaklığına daha yakın çıkmıştır.

Karataş ve Benli [18] yaptıkları çalışmada, portland çimentosu yerine farklı oranlarda uçucu kül ve silis dumanı ikame ederek üretilen KYH'lerin dayanım ve durabilite özelliklerini incelemişlerdir. Toplam bağlayıcı miktarı 630 kg/m^3 sabit tutulurken su/bağlayıcı oranı 0,39 ile 0,44 arasında kalan 6 farklı karışım üretilmiştir. KYH'lerin taze haldeki özelliklerini ölçmek için slump çapı ve V hunisi akış hızı değerleri tespit edilmiştir. $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ boyutlu sertleşmiş KYH numunelerinin 28 ve 90 gün kür süreli basınç ve çekme dayanımları, $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$ küp numunelerin 28 gün kür süreli toplam su emme, porozite ve yoğunluk değerleri bulunmuştur. Sonuç olarak %10 uçucu kül, %6 silis dumanı içeren karışımların en iyi basınç ve çekme dayanımı değerlerini sağladığı görülmüştür.

KYB'nin geleneksel betondan hacimce %30 oranında daha az agregası içermesi KYB'nin harç karakteristiklerini ön plana çıkarmaktadır ve ayrıca harçta deney yapmak daha kolaydır [19]. Ancak agregası taneleri betonun reolojik özellikleri üzerinde önemli düzeyde etkiye sahiptir ve beton reolojisinde büyük değişimlere sebep olmaktadır. Bundan dolayı harçlar KYB'nin işlenebilirlik özelliklerinin temelini oluşturmakta ve bu özellikler kendiliğinden yerleşen harçların (KYH) incelenmesiyle değerlendirilmektedir. KYB tasarımının ayrılmaz parçalarından birinin KYH'lerin özelliklerinin değerlendirilmesinin olduğu belirtilmektedir [20].

Bu çalışmada amaç, geçmişten beri yapıları ısıya karşı korumada yalıtım malzemesi olarak kullanılan, doğal puzolanik bir mineral katkı malzemesi olan vermikülitin yüksek sıcaklık dirençli KYH üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Kendiliğinden yerleşen harç (KYH) karışımları hazırlanırken çimento ve agregası yerine belirli oranlarda genleştirilmiş ve ham vermikülit mineral katkı olarak ikame edilmiştir. Taze harç deney yöntemleriyle karışım oranları belirlenmiştir. Belirlenen karışım oranlarıyla hazırlanan $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ boyutlu prizmatik numuneler 3, 28 ve 90 gün süreyle kür edilmiştir. Kürden çıkarılan sertleşmiş prizmatik numunelere üç noktalı eğilme ve basınç deneyleri uygulanmış ve dayanımları tespit edilmiştir. Buna ek olarak prizmatik numuneler 28 gün süreyle kür edilip 300°C , 600°C ve 900°C yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra üç noktalı eğilme ve basınç deneyleri tekrarlanmıştır. Böylece yüksek sıcaklıkların dayanıma etkisine bakılmıştır. Ayrıca belirlenen karışım oranlarında $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$ 'lik küp numuneler de hazırlanmıştır. 28 ve 90 gün kür süresi sonunda küp numunelerin toplam su emme, kapiler su emme, porozite ve yoğunluk değerleri ölçülerek dayanıklılık özellikleri tespit edilmiştir. Tüm deneyler gerçekleştirildikten sonra elde edilen veriler üzerinde karşılaştırmalar yapılmış ve çıkan sonuçlar tartışılmıştır.

2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇ

Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB), kendi ağırlığı sayesinde sık donatılı, dar ve derin yerlere vibrasyon işlemi gerektirmeden yerleşebilen, ayrışma ve terleme gibi betonun kohezyonunu (stabilitesini) bozan problemler yaşatmayan, bu özelliklerini bünyesine giren süper akışkanlaştırıcılar ve mineral katkı maddeleri ile kazanan akıcı ve işlenebilirliği yüksek özel bir beton türüdür [21]. Geleneksel beton tasarımından farklı olarak KYB özelliklerini süper akışkanlaştırıcılar, viskozite artırıcı katkıları (VAK), puzolanik veya inert mineral katkıların tamamı veya birkaçının kullanılması ile kazanmaktadır [22].

2.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton Tanımı ve Tarihçesi

Beton yapılarda dayanıklılık sorunu 1983 yılından itibaren Japonya’da önemli bir konu haline gelmiştir. Dayanıklı beton yapılar yapabilmek için kalifiyeli işçiler tarafından yeterli sıkıştırma yapılması gerekir. Bununla birlikte, Japon inşaat endüstrisindeki kalifiyeli işçi sayısındaki azalmalar, inşaat işlerinin kalitesinde de düşüşe neden olmuştur. Dayanıklı beton yapılar elde edebilmek için inşaat işinin kalitesinden bağımsız bir çözüm olarak kalıbın her köşesine kendi ağırlığı ile yerleşebilen, titreşimli sıkıştırma gerektirmeden sıkıştırılabilen kendiliğinden yerleşen betonun kullanılmasıdır. Bu tip betonun gerekliliği 1986 yılında Okamura tarafından önerilmiştir. Temelinde betonun işlenebilirliği ile ilgili çalışmaları içeren kendiliğinden yerleşen betonu geliştirme çalışmaları, Tokyo üniversitesinde Ozawa ve Maekawa tarafından gerçekleştirilmiştir [23].

KYB’nin ilk örneği 1988’de piyasada mevcut malzemeler kullanılarak tamamlandı. Bu prototip kuruma büzülmesi, hidrasyon ısısı, yoğunluk ve diğer özellikler bakımından tatmin edici bir düzeydeydi. KYB üzerine ilk makale 1989 Ocak ayında Ozawa tarafından yapısal mühendislik ve inşaat konulu İkinci Doğu Asya ve Pasifik Konferansı’nda (EASEC-2) sunuldu [23].

Ozawa tarafından Mayıs 1992’de sunulan CANMET ve ACI Uluslararası Konferansı İstanbul’da gerçekleşti. Konferans, KYB kavramının dünyaya yayılmasını hızlandırdı [24].

Kasım 1994’te yüksek performanslı beton üzerine gerçekleşen Bangkok ACI Çalıştayı ile KYB, dünya çapında araştırmacılar ve mühendisler tarafından ortak çalışma alanı haline geldi [25].

KYB literatürde farklı şekillerde adlandırılmaktadır. Literatürde genellikle Kendiliğinden Yerleşen Beton (Self-Compacting Concrete-SCC) adıyla kullanılmaktadır. Ayrıca Kendiliğinden Yüzeylenen Beton (Self-Levelling Concrete-SLC) ve Kendiliğinden Konsolide Beton (Self-Consolidating Concrete-SCC) adıyla da kullanılmaktadır. Türkiye’de yaygın olarak Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) terimi tercih edilmekle beraber Kendiliğinden Sıkışan Beton (KSB) olarakta adlandırılmaktadır [26].

2.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Özellikleri

KYB klasik beton tasarımına göre yüksek akıcılık, yüksek ayrışma direnci ve şekil değiştirebilme yeteneği gibi üstün özelliklere sahiptir. Yüksek akıcılık, akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddeleri (süper akışkanlaştırıcılar) ile sağlanır. Ayrışmaya karşı direnç ise ince malzeme miktarının artırılması ve viskozite arttırıcı katkı maddeleri (VAK) kullanılarak sağlanır. Kimyasal katkıların kullanımı sayesinde beton üretiminde kullanılan su miktarının azalması betonun dayanımını artırır. Taşıma ve yerleşme işlemlerinde oluşabilecek ayrışma ve terleme problemlerini aşmak için betonun yeterli kohezyona sahip olması gerekir. Bu nedenle KYB karışım hesabı iyi yapılmalıdır. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımından dolayı oluşabilecek ayrışma problemini ortadan kaldırmak için iri agrega miktarını azaltıp nispeten ince agrega miktarını arttırmak yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bununla birlikte ince agrega miktarının arttırılarak en büyük agrega boyutunun azaltılması yeterli kohezyonu sağlarken çimento miktarının artmasına dolayısıyla maliyetin artmasına ve hidrasyon ısısının yükselmesine sebep olmaktadır. KYB'nin doldurma yeteneğine sahip olması yetmemekte aynı zamanda sık ve dar donatıların arasına da yerleşebilmesi gerekmektedir. Betonun kolayca şekil değiştirebilmesi kayma eşiğinin düşük olması anlamına gelmektedir. Bu özelliği sağlarken su miktarının artırılması betonun kararlılığını bozmakta ve ayrışmaya karşı direncini azaltmaktadır [27,28].

KYB kendi kütlesi sayesinde vibrasyon işlemi gerektirmeden ayrışma ve su kasma göstermeyerek kalıpları doldurabilir. KYB'nin en yaygın kullanım alanı vibratörlerin ulaşamadığı sık donatılı bölgelerdir. Yüksek perdelerin üretimi ve betonarme yapıların güçlendirilme projeleri bu kullanıma örnektir. KYB'lerin ayrışmaya karşı gösterdiği direnç su altı beton dökümüne de imkan vermektedir. KYB üretimine ilham olan gelişme bu olmuştur. KYB sayesinde yüzeyi düz kesitler üretilmesi ve doldurma işleminde vibratör kullanımına gerek duyulmadığından son yıllarda prefabrik sektöründe ön plana çıkmıştır.

KYB'ler bu özelliklerinin yanı sıra inşaat sahasında vibratör kullanılmadığından yerleşim yerlerinde gürültünün zararlı etkilerinden koruma olanağı sağlar. Yerleşim bölgelerinde gece üretim yapılması gereken durumlarda KYB kullanılabilir. İşçiliğin azalmasıyla hata oranı düşerken maliyet ucuzlar ve daha kaliteli üretim ortaya çıkar [21].

2.3. Kendiliğinden Yerleşen Betonda Kullanılan Malzemeler

KYB tasarım ve özellikleri bakımından geleneksel betona göre farklılıklar göstermektedir. KYB tasarım amacına uygun malzemelerin seçimi, fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıda verilmiştir.

2.3.1. Çimento

Geleneksel beton üretiminde kullanılan portland çimentoları KYB üretiminde de uygunluk gösterir. Ancak CEM I 42,5 N gibi portland çimento (PÇ) tipleri KYB üretiminde daha iyi sonuç vermektedir [27]. KYB’de çimento tipi seçimi yapılırken dayanım ve dayanıklılık esasları göz önüne alınmalıdır. C₃A (kalsiyum alüminat) içeriği %10’un üzerinde olan çimentolar hızlı etrenjit oluşumuna ve hidrasyon ısı artışından kaynaklı su buharlaşmasına sebep olacağından işlenebilirliği olumsuz etkiler. İşlenebilirliğin azalmasıyla KYB’de sıkışabilme ve yerleşip doldurabilme problemleri görülür. KYB’nin içeriğindeki çimento miktarının 350-450 kg/m³ olması tavsiye edilmektedir. Çimento dozajı 500 kg/m³’ün üzerinde ise rötreye sebep olabilmektedir. 350 kg/m³’ün altında kullanımlarda ise, ilave filler ya da VAK maddeleriyle kullanılması uygundur aksi halde betonda ayrışma problemi görülebilir [4].

2.3.2. Agregası

Beton üretiminde yaklaşık %75 hacim agrega tarafından oluşturulduğundan çimentoya göre ucuz olan bu malzeme betonda ekonomiye katkı sağlamaktadır. Ayrıca betonda kullanılan agreganın yüksek dayanım gücü betonda gerekli dayanımın sağlanmasına yardımcı olur. Agregası, sertleşen betonun hacim değişikliğini (büzülme) önlemekte bu da betonun dayanıklılığını arttırmaktadır [29].

Geleneksel betonda kullanılan agregalar KYB üretiminde de kullanılabilir. KYB’de kullanılacak agrega gradasyonun ince seçilmesine özen gösterilmelidir. Kesikli gradasyon iç sürtünmeyi azaltıp akışı kolaylaştırdığından sürekli gradasyona göre daha avantajlıdır. KYB tasarımında en büyük agrega çapı için farklı görüşler mevcut olsa da taze betonun donatılar arasında geçiş yeteneği dikkate alındığında üst sınır 16-20 mm arasındadır. Ayrıca kullanılan agregaların 0,125 mm elek altında kalan ince malzeme miktarı karışım hesabında toz malzemelere ilave edilmeleri gerekmektedir [30,31].

KYB üretiminde kullanılacak agrega, mineralojik köken olarak geleneksel betonda kullanılan özellikte olmalıdır. İri agrega olarak betonda kırma kireçtaşı kullanılabilir. Doğal kum işlenebilirlik bakımından kırma kuma göre daha iyi sonuç verir. Ayrıca dere çakılının iri agrega olarak kullanılması içsel sürtünmeyi azalttığından akışkanlığı artırır [4].

Taze betonun kendiliğinden yerleşmesini etkileyen önemli etkenlerden biri de iri agrega/kum oranıdır. Bu oran düştükçe içsel sürtünme katsayısı da azalır. Geleneksel betona göre daha çok kum ve daha az iri agrega kullanımı donatılar arası geçiş yeteneğini iyileştirir [32].

Agregası şekil bakımından genellikle küre veya kübik biçimde olmalıdır. Uzun silindir ve yassı disk şeklindeki agrega taneleri KYB’nin işlenebilirlik kabiliyetini düşürdüğünden miktarca sınırlandırılmalıdır [33].

2.3.3. Su

KYB üretiminde kullanılabilecek en iyi karışım suyu çeşitli standartlarda ve şartnamelerde belirtilen içme suyudur [34]. Beton malzemesinin önemli bileşenlerinden biri olan karışım suyunun içinde bulunabilecek eriyik ve askıdaki maddeler, betonun dayanımını, çimentonun priz süresini ve işlenebilirliği etkileyebileceği gibi beton yüzeyinde çiçeklenme ve donatı korozyonuna sebep olabilmektedir. Bu yüzden karışım suyunda KYB özelliklerini olumsuz yönde etkileyecek yabancı madde bulunmamalıdır [35].

2.3.4. Mineral Katkılar

KYB’de üretim esnasında bazı eksikliklerin giderilerek betonun kendine has özellikler kazanmasında ve beton ekonomisine olumlu yönde katkı sağlaması açısından mineral katkı maddeleri kullanılır. Mineral katkıları, uçucu kül ve silis dumanı gibi doğal olarak ince taneli halde olup ya da granüle yüksek fırın cürufu ve doğal puzolanlar gibi öğütülerek ince taneli hale getirilirler [36].

Mineral katkı ilavesiyle azalan çimento kullanımı sonucu hidrasyon ısı azalır ve su kaybı engellenmiş olur. Ayrıca mineral katkıları KYB’nin kohezyon ve ayrışmaya karşı direnç artışı gibi özellikleri göstermesini sağlar. Mineral katkıları TSE 206’da ifade edildiği gibi su ile reaksiyon kapasitelerine göre inert (Tip I) ve puzolanik/hidrolik (Tip II) olarak ikiye ayrılır [30] (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Mineral katkıların su ile reaksiyonlarına göre sınıflandırılması (EFNARC 2005)

Tip I	İnert veya yarı inert	Mineral filler (Kalker, dolomit vs.)
		Pigmentler
Tip II	Puzolanik	Uçucu kül (EN 450’ye uygun)
		Silis dumanı (EN 13263’e uygun)
	Hidrolik	Yüksek fırın cürufu

Genellikle betonun reolojik özelliklerini iyileştiren kalsiyum karbonat (CaCO_3) içerikli mineral katkıları kullanılır. 0,125 mm tane çapı altındaki malzemeler toz malzeme olarak adlandırılabilir [30].

Geleneksel betona göre KYB’de daha fazla kullanılan toz malzeme karışımdaki boşlukları doldurarak betonu daha kompakt hale getirir. Toz malzemelerin tanecik boyutu küçüldükçe tanecikler arası etkileşim artar ve bu etkileşim KYB’de viskoziteyi artırır. Karışımdaki boşlukların dolması ve daha iyi bir sıkışma sağlanabilmesi için toz malzeme miktarının 400 kg/m^3 ile 650 kg/m^3 arasında olması tavsiye edilmektedir [32].

2.3.5. Kimyasal Katkılar

Betonun kendiliğinden yerleşebilirliğini geliştirmek, taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini değiştirmek için karılma işlemi öncesinde veya karılma işlemi esnasında beton karışımına TS EN 934-2 [37] standartına göre çimento kütlesinin %5'ini geçmeyecek şekilde eklenen malzemelerdir.

TS EN 934-2'ye göre kimyasal katkı maddesi tipleri şu şekildedir;

- Su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkı
- Yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkı
- Su tutucu katkı
- Hava sürükleyici katkı
- Priz hızlandırıcı katkı
- Sertleşmeyi hızlandırıcı katkı
- Priz geciktirici katkı
- Su geçirimsizlik katkısı
- Priz geciktirici / su azaltıcı / akışkanlaştırıcı katkı
- Priz geciktirici / yüksek oranda su azaltıcı / süper akışkanlaştırıcı katkı
- Priz hızlandırıcı / su azaltıcı / akışkanlaştırıcı katkı [37].

Günümüz beton teknolojisinde çeşitli problemleri aşma isteği ve artan ihtiyaçlar için kimyasal katkıların kullanımı önemli hale gelmiştir. Kimyasal katkı maddeleri ile beton basınç dayanımının artması, erken priz alma, sıcak, soğuk havalarda veya su içinde beton döküm imkanı gibi avantajlar sağlanmıştır. Fakat kimyasal katkıların aşırı kullanımı veya hatalı uygulamalar betonda olumsuz sonuçlara neden olabilmektedir [38].

Kimyasal katkıları, betonun temel özelliklerinden olan dayanım, durabilite ve işlenebilirlik özelliklerini güçlendirmek için kullanılır. Beton üretiminde akışkanlaştırıcı katkıların kullanımıyla birlikte düşük su/çimento oranı sağlanarak zor kalıplara dahi iyi yerleşebilen yüksek ayrışma dirençli, yüksek dayanım ve durabilite özellikli yüksek performanslı betonlar elde edilmiştir [39].

Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımıyla eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitede azalma meydana gelir. Özellikle yüksek su/çimento oranında plastik viskozite azalması daha belirgindir. Bu durumda çok az miktarda kimyasal katkı ilavesi bile viskoziteyi hızla düşürüp ayrışmaya sebep olabilir. Düşük su/çimento oranında kimyasal katkı ilavesinin akışkanlığı artırıcı etkisi daha yavaştır [40].

Akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları su kesme yeteneklerine göre; lignosülfonat bazlı normal akışkanlaştırıcılar (%10-15 arası su kesebilme), melamin ve naftalin sülfona formaldehit bazlı süper akışkanlaştırıcılar (%15-30 arası su kesebilme) ve polikarboksilat bazlı hiper akışkanlaştırıcılar (%30'dan fazla su kesebilme özelliği) şeklinde sınıflandırılırlar [41].

Süper akışkanlaştırıcılar beton karışım suyunda eriyip çimento taneleri tarafından yüzeyine bağlanarak ince bir tabaka oluştururlar. Bu tabaka dışa doğru negatif yüklendiğinden tanelerin birbirlerini itmesine yani dağılmaya (dispersiyon) yol açar. Böylece betonun akıcılığının artmasını sağlarlar. Normal akışkanlaştırıcılar, hava sürükleyerek ve çimento tanelerinin topaklaşmasını önleyerek etkili olurlar. Süper akışkanlaştırıcılar suyun yüzey gerilimini fazla düşürmediklerinden, normal akışkanlaştırıcılar kadar hava sürüklemeyizler. Bundan dolayı daha yüksek oranlarda kullanılabilirler [42].

Yeni nesil hiper akışkanlaştırıcılar günümüzde çok yaygın kullanım alanı bulan melamin ve naftalin bazlı süper akışkanlaştırıcılara göre çok daha iyi su kesme özeliğine sahiptir. Bu katkıların kullanımıyla çimentonun beton içindeki dağılımı (dispersiyonu), süper akışkanlaştırıcılarda olduğu gibi sadece elektriksel etki ile değil aynı zamanda uzun dallar içeren polimer zincirleri sayesinde çimento tanecikleri etrafında birbirini iten fiziksel bir etki oluşturması ile de sağlanır. Fiziksel etki (sterik etki) sayesinde çimento taneleri dağılarak kararlı hale gelir. Böylece beton yüksek oranda su kesme özelliği kazanıp uzun süre boyunca ayrıışmadan ve titreşim gerektirmeden kendiliğinden yerleşme sağlayabilir [39].

3. MİNERAL KATKI MADDESİ OLARAK VERMİKÜLİT

Doğal puzolanik bir mineral katkı maddesi olan vermikülitin özellikleri, rezerv durumu, üretim metodu, ürün standartları ve kullanım alanları aşağıda verilmiştir.

3.1. Vermikülitin Tanımı ve Özellikleri

Mineralojik olarak tek başına farklı bir grubu temsil eden vermikülit, endüstriyel bakımdan genleşme özelliğine sahip tüm mika grubu minerallerini (flogopit, biotit ve hidrobiotit) kapsayan genel bir ifade olarak kullanılmaktadır. Vermikülit ayrıca sulu magnezyum, alüminyum, demir silikat olarak da tanımlamak mümkündür. Dünyadaki en önemli vermikülit işletmelerinden bazılarının ait cevher numunelerinin kimyasal bileşenleri Tablo 3.1’de verilmektedir [43].

Tablo 3.1. Çeşitli vermikülitlerin kimyasal bileşenleri [44]

Bileşen	LİBBY (ABD) %	ENOREE (ABD) %	PALABORA (Güney Afrika) %
SiO ₂	40,16	39,77	39,37
MgO	20,63	18,32	23,37
Al ₂ O ₃	12,01	13,88	12,08
Fe ₂ O ₃	13,00	12,84	5,45
FeO	-	-	1,17
K ₂ O	5,93	5,11	2,46
CaO	1,54	1,02	1,46
TiO ₂	1,44	2,07	1,25
H ₂ O	5,29	6,99	11,20
Toplam	100,00	100,00	97,81

Vermikülit uzun bir süre trioktahedral mika mineralinin bir çeşidi olarak bilinmiştir. Hızlı bir şekilde ısıtıldığında yapraklara ayrılır ve biçimsel olarak küçük kurtçuklara benzer. Bu özelliğinden dolayı vermikülit terimi, Latince ‘vermiculare’den türetilmiş ve 2:1 genleşebilen, tabaka yükü simektikinden büyük olan ve mikaya benzeyen mineraller için kullanılmıştır. Doğada oluşum şekline ve bulunduğu ortamlara göre; toprak (kil), otijenik, metamorfik ve makroskopik olmak üzere dört tipine rastlanmıştır [45]. Şekil 3.1’de işlenmemiş ham vermikülit görülmektedir.



Şekil 3.1. Ham Vermikülit [46]

Vermikülit, monoklinik sistemde kristallenebilen, minarellerin tanınmasına yarayan fiziksel özellikleri yani dilinimi muntazamdır. Yeşil, sarımsı kahve ve siyah renkte olabilir. Sertliği Mohs ölçeğine göre 1,2 ile 2 arasında değişir ve özgül ağırlığı $2,5 \text{ gr/cm}^3$ 'dür. Yüksek sıcaklıklarda aniden ısı şokuna maruz bırakıldığında C eksenini boyunca akordiyon gibi uzamaktadır. Meydana gelen bu genişlemenin vermiculitin yapısında bulunan kristal suyunun aniden buharlaşmasıyla oluşan buhar basıncından dolayı olduğu düşünülmektedir. Ağırlıkça aynı miktarda su ihtiva eden numunelerin bile farklı oranlarda genişmesi, ısısal genişleme olayının tam olarak açıklanamamasının sebebidir. Kimyasal bileşim ve yapraklar arasında bulunan su moleküllerinin hangi bağlarla yapıya tutunduğu genişleme olayını etkileyen diğer önemli parametrelerdir. Genleşme meydana gelmeden önce malzemenin yığın yoğunluğu $0,8 \text{ g/cm}^3$ iken, genişleme sonucunda malzemenin yığın yoğunluğu yaklaşık 10 kat azalarak $0,08 \text{ g/cm}^3$ 'e düşmektedir. Yığın yoğunluğundaki düşüş, vermiculitin kalitesine ve genişletirmenin yapıldığı fırın performansına bağlı olmakta ve ısıtılma işlemi sonucunda yaklaşık 30 katlık bir genişleme sağlanabilmektedir [6,7]. Şekil 3.2'de genişleştirilmiş vermiculit görülmektedir.



Şekil 3.2. Genleştirilmiş Vermikülit [47]

Vermikülit kalitesini belirleyen çeşitli sınıflandırmalar mevcuttur. Bu sınıflandırmalar tüketici/üretici ülkelere göre değişmektedir. Türkiye'de kaliteyi belirleyen ve TSE tarafından standartları belirlenen, tane boyuna göre yapılan sınıflandırma esas alınmaktadır. Bu sınıflandırma Tablo 3.2'de verilmektedir [45,48].

Tablo 3.2. Vermikülitin tane boyutuna göre sınıflandırılması [48]

Kare Gözlü Elek Üzerinde Biriken Miktar (Ağırlıkça %)							
Sınıflar	Elek Göz Açıklığı (mm)						
	9,50 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	0,60 mm	0,30mm	0,15mm
1.Sınıf	30-80		80-100				
2. Sınıf	0-10			90-100			
3. Sınıf		0-10	45-90		95-100		
4. Sınıf			0-10		90-100		
5. Sınıf				0-5		60-98	90-100

Önemli üretici/tüketici ülkelerden biri olan ABD'de tane boyutu ve yoğunluğa göre ham vermikülitin sınıflandırılması Tablo 3.3'te, genleştirilmiş vermikülitin sınıflandırılması Tablo 3.4'te verilmiştir [49].

Tablo 3.3. Amerika’da kullanılan, ham vermikülitin tane boyutu ve yoğunluğuna göre sınıflandırılması

Sınıflar	Tane Boyutu (μm)	Yoğunluk (kg/m ³)
1	6.680-1.700	800-1.040
2	2.360-1.180	800-1.040
3	1.700-425	800-1.040
4	600-212	720-1.040
5	-425	640-800

Tablo 3.4. Amerika’da kullanılan, genleştirilmiş vermikülitin tane boyutu ve yoğunluğuna göre sınıflandırılması

Kare Gözlü Elek Üzerinde Biriken Miktar (Ağırlıkça %)							
Sınıflar	Elek Göz Açıklığı (mm)						
	9,50 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	0,60 mm	0,30mm	0,15mm
1.Sınıf	0-10	30-60	65-95	85-100			
2. Sınıf		0-5	20-80	75-99	90-100		
3. Sınıf			0-10	20-60	65-95	75-98	90-100
4. Sınıf				0-5	15-65	60-98	90-100
5. Sınıf					0-10	10-50	55-85

3.2. Dünya’da ve Türkiye’deki Mevcut Durumu

Dünyada önemli vermikülit rezervlerine sahip ülkeler; Güney Afrika Cumhuriyeti (GAC), Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Rusya ve Avustralya’dır. Bu ülkelerin dışında Türkiye dahil olmak üzere, Arjantin, Brezilya, Çin, Mısır, Hindistan, Meksika, Kanada, Bulgaristan, Şili, Finlandiya, Fransa, Japonya, Kore, Cezayir, İspanya, Sri Lanka, Tanzanya, Kazakistan, Uganda ve Zimbabve’de de vermikülit yatakları vardır. Vermikülit rezerv miktarı hakkında detaylı bilgi elde etmek mümkün değildir fakat dünya vermikülit rezervinin 50 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir [50]. ABD, dünya vermikülit rezervinin büyük kısmı olan %50’sine yani 25 milyon tonuna sahiptir ve en büyük rezervi Libby, Montana’da bulunmaktadır. Dünya vermikülit rezervinde ikinci sırada yer alan GAC, rezervin %40’ına yani 20 milyon tonuna sahipken en büyük vermikülit yatağı olan Palabora burada bulunur. Dünya vermikülit kaynaklarının 200 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir [45]. Tablo 3.5’te dünya vermikülit rezervlerinin ülkelere göre dağılımı verilmiştir [51].

Tablo 3.5. Dünya vermikülit kaynakları dağılımı (1000 ton)

ÜLKELER	REZERV	BAZ REZERV
ABD	25.000	100.000
GAC	20.000	80.000
Diğer Ülkeler	5.000	20.000
Dünya Toplamı	50.000	200.000

Dünyada vermikülit üretiminde 2017 yılı esas alındığında 166.084 ton üretimle GAC ilk sırada gelmektedir. ABD 100.000 ton ile ikinci, Breziya ise 50.050 ton üretimle üçüncü sırada yer almaktadır. Dünyada 2017 yılı itibariyle önemli vermikülit üreticilerinin toplam üretimi 424.228 ton/yıl seviyesindedir. Dünyada son yıllardaki vermikülit üretimi Tablo 3.6’da verilmiştir [52].

Tablo 3.6. Dünyada son yıllardaki vermikülit üretimi (ton)

ÜLKELER	2013	2014	2015	2016	2017
Arjantin	120	90	90	60	-
Avustralya	9.091	-	-	-	-
Brezilya	60.379	56.444	54.250	53.330	50.050
Çin	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000
Mısır	2.750	2.700	3.000	3.000	3.000
Hindistan	11.851	15.327	23.279	9.042	6.055
İran	1.200	1.200	1000	1000	-
Kenya	400	440	410	100	-
Meksika	425	226	299	310	-
Rusya	20.900	21.000	21.000	20.000	20.000
GAC	127.658	143.007	138.290	166.483	166.084
Türkiye	1.604	716	425	1.050	1.618
Uganda	2.296	2.661	1.213	3.295	4.119
ABD	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Zimbabve	28.808	30.740	30.868	29.312	23.302
TOPLAM	417.482	424.551	424.124	436.982	424.228

Türkiye’de mevcut vermikülit yataklarının varlığı fazla bilinmemektedir ancak yapılan jeolojik çalışmalar sırasında ofiyolit kuşaklarında vermikülit oluşumlarına rastlanmıştır [45]. Türkiye’de en önemli vermikülit yatakları Malatya-Darende-Kuluncak’ta olmak üzere Sivas-Yıldızeli-Karakoç, Eskişehir-Sarıcakaya ve Elazığ-Harpüt-Arduçluk bilinen diğer zuhurlardır [43].

Malatya-Darende-Kuluncak vermikülit cevherleşmeleri MTA tarafından etüt edilmiş ve genleşme oranları oldukça düşük olan (~2 kat) cevherin ekonomik değere ulaşmadığı tespit

edilmiştir. Bu bölgede yapılan rezerv hesapları zuhurlarda 6-7 milyon ton arasında değişen muhtemel rezervin olduğunu göstermektedir [53].

Sivas-Yıldızeli-Karakoç vermikülit zuhurunda yapılan incelemeler, bu cevherleşmenin de jenetik açıdan Kuluncak sahasıyla benzerlik gösterdiğini ortaya koymuştur. MTA Genel Müdürlüğü tarafından yapılan saha gözlemleri ve değerlendirmeler sonucunda genleşme özelliği daha iyi olan 2.750.000 ton muhtemel rezervli tüvenan vermikülit ile düşük kaliteli 2.475.000 ton muhtemel rezervli tüvenan vermikülit cevheri belirlenmiştir [43]. Sivas-Yıldızeli-Karakoç vermikülit zuhurunda yapılan teknolojik testlerde genleşme oranı ortam koşullarına göre 13 ile 18 kat arasında değişmiştir. Genleştirme sonucu elde edilen malzemenin yığın yoğunluğuna göre yapılan sınıflandırmaya göre 2. sınıf malzeme kalitesinde olduğu belirlenmiştir [54].

3.3. Genleştirilmiş Vermikülitin Üretim Metodu ve Ürün Standartları

Dünya vermikülit üretimi mevcut yatlardan açık ocak işletmeciliği ile gerçekleştirilmektedir. Vermikülit kalite, tenör ve miktar gibi önemli parametreler bakımından ekonomik sınırlar dahilinde ise cevher zenginleştirme ünitesinde gerekli zenginleştirme ve arkasından genleştirme işlemine tabi tutulur [43]. Ocaktan çıkarılan cevher öncelikle primer kırıcıdan geçirilip daha sonra yaş elek yöntemi ile harmanlama yapılarak fraksiyonlarına ayrılır. Harmanlama işlemi bittikten sonra vermikülit konsantreleri toplanır, kurutulur ve boyutlarına ayrılarak genleştirme ünitesine gönderilir. Genleşme ünitesinde, 900-1000 °C'de düşey fırınlarda 4-8 saniye bekletilerek ani ısı etkisiyle genleştirilir ve genleşmemiş kısımlar harmanlama ile genleşenlerden ayrılır. Elde edilen genleşmiş ürün, torbalanarak pazarlanmaya hazır hale getirilir [45].

Genleştirilmiş vermikülitin kullanım alanına göre değişik özelliklere sahip olması istenmekle birlikte genleşmiş malzemede aranan genel özellikler şu şekilde sıralanabilir;

- Düşük yığın yoğunluğuna sahip olarak yapının ölü yükünü azaltmalı ve fiziksel taşıma işlerine yardımcı olmalı,
- Isı ve ses izolasyon özellikleri son derece yüksek olmalı,
- Malzeme ateşe karşı dayanıklı olmalı ve erime noktası altındaki alev sıcaklıklarında fiziksel değişikliklere uğramamalı,
- Dayanıklı olmalı ve kullanım yerine ulaşınca kadar mekanik bozunmaya uğramamalıdır [43].

3.4. Genleştirilmiş Vermikülitin Kullanım Alanları

Ham vermikülit kullanımının oldukça az olmasından dolayı endüstride daha çok genleştirilmiş şekliyle kullanılır. Vermikülit 1950'li yıllara kadar sadece inşaat sektöründe değerlendirilmiştir. Isı yalıtım özelliği nedeniyle dolgu malzemesi ve blok olarak kullanılırken, alçı ve sıvalara hafif agrega olarak eklenmiştir. 1950'li yıllarda vermikülitin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin üzerinde çalışılması ile diğer alanlarda da kullanılabileceği belirlenmiştir.

ABD, en fazla vermikülit üretim ve tüketimine sahip olan ülkelerden biri olup genleştirilmiş vermikülit genellikle inşaat ve tarım alanlarında kullanılmaktadır. Bazı yapılarda önemli olan akustik ve ısı yalıtımını sağlamak için hafif yapı malzemeleri kullanılmaktadır. Bu malzemeler ayrıca tavan ve duvar dekoratif süslemelerinde, yüzme havuzu tabanlarında da kullanılmaktadır. Hafif yapı malzemesi üretiminde vermikülit ile portland çimento birlikte kullanıldığında iyi sonuç vermektedir. Ham veya genleştirilmiş vermikülit içeren alçı ve karışımlar; hafifliği, yalıtım özellikleri, erime özelliğinin olmaması, kolay uygulanması ve ucuz maliyeti sebebi ile ateşe dirençli koruma elemanı göreviyle dökümhane ve çelik fabrikalarında tercih edilir.

Genleştirilmiş vermikülit tavan, duvar ve taban yalıtımında dolgu malzemesi olarak petrol rafinerileri, çimento fabrikaları ve güç santrallerinde sıklıkla kullanılır. Yapılarda, ateşe dayanıklı panel duvar ve beton duvar olarak kullanıldığı gibi ara duvar bölmeleri arasında ve dış cephelerde dolgu malzemesi olarak kışın su kaybını önlemede kullanılır [45]. Ayrıca dolgu malzemesi olarak ve başka bağlayıcılar ile birlikte sıcak dökümlerin taşınmasında, erimiş metalin üzerinin örtülmesinde, erimiş malzemenin paketlenmesi ve taşınmasında, kimyasalların maddelerin taşınmasında kullanılan sıcak borular ve buhar borularının yalıtımında da genleştirilmiş vermikülit kullanılır [8,9]. Şekil 3.3'te genleştirilmiş vermikülit esaslı harçların yangından korunma amaçlı çelik yapılara uygulanması gösterilmektedir [55].



Şekil 3.3. GV esaslı harçların yangından korunma amaçlı çelik yapılara uygulanması [55]

Genleştirilmiş vermikülitin başlıca kullanım alanları şu şekildedir [55];

- Gevşek yalıtım dolguları
- Seracılık ve bahçecilik (Şekil 3.4)

- Malzemelerin paketlenmesi
- Hayvan yemi olarak
- Yangına karşı koruyucu malzeme olarak
- Isı ve yüksek sıcaklık izolasyonu
- Hafif betonlar ve harçlar (Şekil 3.5)
- Vermikülit plakalar
- Sürtünme balataları
- Özel kaplama conta ve keçeler
- Yüzme havuzu astarları



Şekil 3.4. GV'nin seracılıkta kullanımı [55]



Şekil 3.5. GV esaslı hafif betonların çatı şapı olarak uygulanması [55]

4. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, mineral katkı maddesi olarak genleştirilmiş ve ham vermikülit kullanılarak hazırlanan taze ve sertleşmiş haldeki KYH numunelerinin dayanım ve dayanıklılık özellikleri belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda dozajı 630 kg/m^3 olan kontrol numunesi dahil toplam 13 karışım hazırlanmıştır. Bu karışımlardan her deney için üçer adet numune dökülmüştür. KYH'lerde genleştirilmiş vermikülit ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ham vermikülit ağırlıkça %5, %10, %15, %20 oranlarında portland çimentosu yerine ikame edilerek ayrıca ham vermikülit ağırlıkça %10, %20, %30, %40 oranlarında agrega yerine ikame edilerek üç ayrı karışım hazırlanmıştır. KYH'lerin taze haldeki özellikleri mini çökme-yayılma ve viskozite ölçümleri ile belirlenmiştir. Harçların akışkanlığı EFNARC (European Federation of National Trade Associations) standartlarına uygun olacak şekilde mini çökme-yayılma deneyi ile 240-260 mm arasında tutulup su/bağlayıcı oranı belirlenmiştir. Karışım oranları belirlendikten sonra 40x40x160 mm ebatlarındaki kalıba her bir kür süresi için üçer adet numune dökülmüştür. Sertleşmiş haldeki prizmatik numunelerin 3, 28 ve 90 gün süre ile $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kür havuzunda bekletildikten sonra üç noktalı eğilme ve basınç dayanımları, buna ek olarak 28 günlük kür işleminin ardından $300 \text{ }^\circ\text{C}$, $600 \text{ }^\circ\text{C}$, $900 \text{ }^\circ\text{C}$ yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki dayanımları hesaplanmıştır. Her karışım oranından 50x50x50 mm ebatlarında üçer adet küp numunesi hazırlanmıştır. Küp numunesi için kalıp olarak XPS (Ekstrüde Polistiren) yalıtım malzemesi kullanılmıştır. Sertleşmiş küp numunelerinin 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda toplam su emme, kapiler su emme, porozite ve yoğunluk değerleri ölçülerek dayanıklılık özellikleri incelenmiştir.

4.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Deneyisel çalışma kapsamında KYH üretiminde kullanılan portland çimentosu, dere agregası, mineral ve kimyasal katkıları ile karışım suyuna ait özellikler aşağıda verilmiştir.

4.1.1. Portland Çimentosu

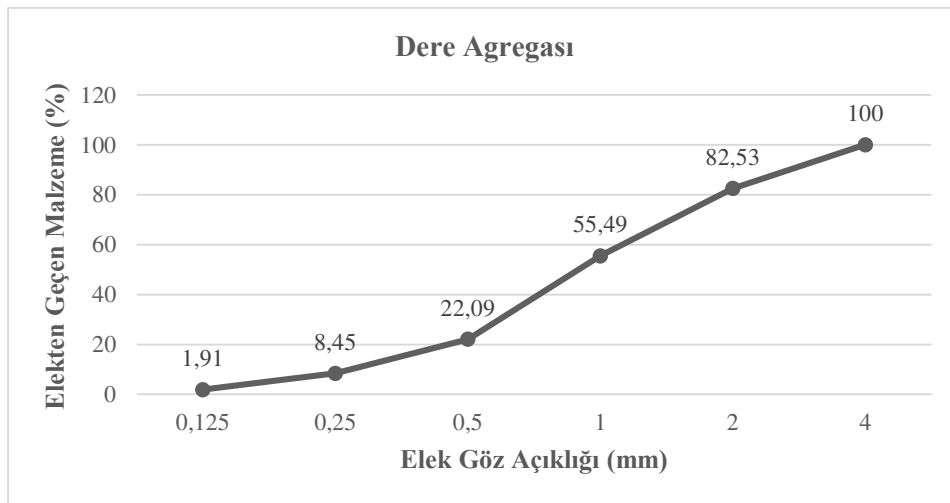
Bu tez çalışması kapsamında Ergani Limak Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. fabrikasında üretimi yapılan CEM-I 42.5 N tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentoya ait fiziksel özellikler ve kimyasal bileşenler Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. CEM I 42,5 N tipi portland çimentonun kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşen (%)	Portland Çimentosu
SiO ₂	21,12
Al ₂ O ₃	5,62
Fe ₂ O ₃	3,24
CaO	62,94
MgO	2,91
SO ₃	2,48
Na ₂ O	0,58
K ₂ O	0,62
Cl	0,0131
Serbest CaO	0,76
Kızdırma Kaybı	3,52
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,03
Özgül Yüzey (cm ² /g)	3430

4.1.2. Agregat

Bu tez çalışmasında dane çapı 0-2 mm ve 2-4 mm aralığında olan Elazığ Murat Nehrinden temin edilen iki ayrı çapta dere agregası kullanılmıştır. Agreganın su emmesi %1,96, doymun kuru yüzey özgül ağırlığı 2,63 gr/cm³ olarak bulunmuştur. Agregaya ait elek analizi sonucunda elde edilen granülometri eğrisi Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Kullanılan agreganın granülometri eğrisi

4.1.3. Mineral Katkılar

Deneysel çalışmalarda mineral katkı olarak karışıma genleştirilmiş ve ham vermikülit eklenerek KYH üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır (Şekil 4.2). Çalışmalarda kullanılan vermikülit Antalya bölgesinden Agrekal Tarım Girdileri Üretim İnşaat ve Ticaret firmasından temin edilmiştir. Genleştirilmiş ve ham vermikülit %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento yerine ikame edilerek, ham vermikülit %10, %20, %30 ve %40 oranlarında agrega yerine ikame edilerek kullanılmıştır. Genleştirilmiş vermikülitin kimyasal özellikleri Tablo 4.2’de, fiziksel özellikleri Tablo 4.3’te verilmiştir.

Tablo 4.2. Genleştirilmiş vermikülit kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşen	Ağırlıkça Yüzdesi (%)
SiO ₂	38-46
Al ₂ O ₃	10-16
MgO	16-35
CaO	1-5
K ₂ O	1-6
Fe ₂ O ₃	6-13
TiO ₂	1-3
H ₂ O	8-16
Diğer	0,2-1,2



Şekil 4.2. Genleştirilmiş vermikülit ve ham vermikülit

Tablo 4.3. Genleştirilmiş vermikülit fiziksel özellikleri

Genleştirilmiş Vermikülit Fiziksel Özellikleri	
Renk	Altın-Gri
Şekil	Akordiyon
pH	6-9
Su Tutma Kapasitesi	%200-325 Ağırlık, %20-50 Hacim
Katyon Değişim Oranı	50-150 me/100 gr
Isı İletkenliği	0,065-0,062 watt/m/ °C
Geçirgenlik	%95
Sinterleme Noktası	1150-1250 °C
Öz Isı	0,20-0,26 kcal/kg °C

4.1.4. Kimyasal Katkılar

Bu tez çalışması kapsamında KYH karışımları hazırlanırken kimyasal katkı olarak 1.06 gr/cm³ yoğunluğa sahip Sika ViscoCrete Hi-Tech 36 modifiye polikarboksilat esaslı polimer yapılı süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanılmıştır. Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. firmasından temin edilen SA karışımlara 6 ile 8 kg/m³ olmak üzere iki farklı miktarda eklenmiştir. Kullanılan SA kimyasal katkının özellikleri Tablo 4.4’te verilmiştir [56].

Tablo 4.4. SA kimyasal katkının özellikleri

Kimyasal Yapı	Modifiye Polikarboksilat Esaslı Polimer
Yoğunluk	1,06 (gr/cm ³)
Ph Değeri	3-7
Donma Noktası	-4 (°C)
Suda Çözünebilir Klorür (%)	En fazla %0.1 (TS EN 934-2)
Alkali Miktarı (% Na₂O Eşdeğeri Olarak)	En Fazla %3 (TS EN 934-2)

4.1.5. Karışım Suyu

Deneyisel çalışmalarda KYH karışımlarının hazırlanmasında ve kür uygulamalarında Elazığ (Merkez) şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

4.1.6. KYH Karışım Oranları ve Deneyler

Deneysel çalışmalarda kontrol numunesi dahil olmak üzere 13 ayrı harç karışımı agrega, çimento, genleştirilmiş vermikülit, ham vermikülit, süper akışkanlaştırıcı ve su kullanılarak hazırlanmıştır. Karışımlarda bağlayıcı malzeme miktarı 630 kg/m^3 olarak sabit tutulmuştur. Bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42.5 N portland çimentosu ve çimentonun yerine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında genleştirilmiş ve ham vermikülit kullanılmıştır. Ayrıca çimento miktarı sabit tutularak agrega yerine %10, %20, %30 ve %40 oranlarında ham vermikülit ikame edilerek karışımlar da hazırlanmıştır. Maksimum agrega boyutu 4 mm olup, agreganın %80'i 0-2 mm, %20'si 2-4 mm çapında olan dere agregasından oluşmaktadır. Her bir yüzdelik için karışım oranları hesaplanmıştır. Karışım hesabı yapılırken toplam bağlayıcı miktarı 630 kg/m^3 , SA miktarı 6 ile 8 kg/m^3 miktarında sabit tutularak su, agrega ve su/çimento oranı her bir karışım için yeniden hesaplanmıştır.

KYH karışım oranlarını veren bir standart metot henüz yoktur. Ancak birçok akademik kuruluş ve hazır beton firmaları kendi karışım oranlarını geliştirmiştir. Agregalar arasındaki boşlukların tamamen doldurulması ihtiyacının öneminden, karışım tasarımları yapılırken genellikle hacim parametresi kullanılır [57]. Bu çalışmada KYH karışım hesapları mutlak hacim metodu kullanılarak yapılmıştır. KYH'nin EFNARC tasarım kriterlerine uygunluğu deneme yanılma yoluyla belirlenmiştir. Bu doğrultuda karışım hesabı yapılırken 1 m^3 harçtaki agrega miktarı Denklem 4.1'e göre hesaplanmıştır.

$$\frac{A}{\rho_a} = 1000 - \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{SA}{\rho_{sa}} + H + S + \frac{C \times \%n}{\rho_v} \right) \quad (4.1)$$

- A : 1 m^3 betonda bulunacak dere agregası (kg)
 ρ_a : Agreganın özgül ağırlığı (gr/cm^3)
C : 1 m^3 betonda çimento miktarı (kg)
 ρ_c : Çimentonun özgül ağırlığı (gr/cm^3)
SA : 1 m^3 betonda kimyasal katkı miktarı (kg)
 ρ_{sa} : Kimyasal katkı özgül ağırlığı (gr/cm^3)
S : 1 m^3 betondaki suyun miktarı (kg)
H : Betondaki havanın hacmi (cm^3)
%n : Çimento yerine kullanılacak mineral katkı yüzdesi (gr)
 ρ_v : Mineral katkı özgül ağırlığı (gr/cm^3)

Denklem 4.1'e göre hesaplanan KYH karışım oranları Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5. KYH karışım bileşenleri ve oranları

Karışım Kodu	MUHTEVA								
	(kg/m ³)					Hi-Tech 36 (%)			
	PÇ	GV/HV	Agr.	Su	Net Su	Su / Bağ.	Su/Toz Ağırlıkça	Su/Toz Hacimce	
KONTROL	630	0	1308	283,5	259	6	0,41	0,39	1,22
5HV	598,5	31,5	1294	283,5	259	6	0,41	0,40	1,20
10HV	567	63	1262	289,8	266	6	0,42	0,41	1,21
15HV	535,5	94,5	1215	302,4	279	6	0,44	0,44	1,26
20HV	504	126	1200	302,4	279	6	0,44	0,44	1,24
10HV(AGR.)	630	99,1	1139,8	296,1	274	8	0,38	0,37	1,08
20HV(AGR.)	630	183,4	962,6	321,3	303	8	0,37	0,38	1,05
30HV(AGR.)	630	261,4	827,6	333,9	318	8	0,36	0,37	0,99
40HV(AGR.)	630	330,8	703,2	346,5	333	8	0,35	0,36	0,95
5GV	598,5	31,5	1129	315	293	8	0,47	0,45	1,23
10GV	567	63	1004	327,6	308	8	0,49	0,48	1,16
15GV	535,5	94,5	880	340,2	323	8	0,51	0,51	1,10
20GV	504	126	755	352,8	338	8	0,54	0,54	1,05

Karışım oranları belirlendikten sonra KYH'lere mini çökme yayılma, viskozimetre gibi taze harç deneylerinin yanı sıra basınç, üç noktalı eğilme, yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra basınç ve üç noktalı eğilme, toplam su emme deneyleri gibi sertleşmiş harç deneyleri uygulanmıştır. Bu amaçla her karışımdan on sekizer adet olmak üzere toplamda 234 adet 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numune, her karışımdan altışar adet olmak üzere 78 adet 50x50x50 mm boyutlarında kübik numune dökülmüştür.

4.2. Taze Harç Deneyleri

KYH karışımlarının işlenebilirlik özellikleri EFNARC kriterlerine göre mini çökme yayılma deneyi ile belirlenmiş ve karışımların viskozimetre ölçümleri yapılmıştır.

4.2.1. Mini Çökme-Yayılma Deneyi

KYH'nin doldurma kabiliyeti ve akıcılığını yani işlenebilirliğini ölçmek için EFNARC tarafından önerilen mini çökme-yayılma deneyi uygulanmıştır. Bu deney metodunda, alt çapı 100 mm, üst çapı 70 mm ve yüksekliği 60 mm boyutlarında olan kesik koni kalıp kullanılır (Şekil 4.3). Kesik koni kalıbın geniş ağzı harcın akabileceği düz, pürüzsüz ve temiz bir yüzeye yerleştirilir. Karışım oranı belirlenen harç, kalıbın dar ağızlı kısmından şişlenmeden ve sarsmadan tamamen

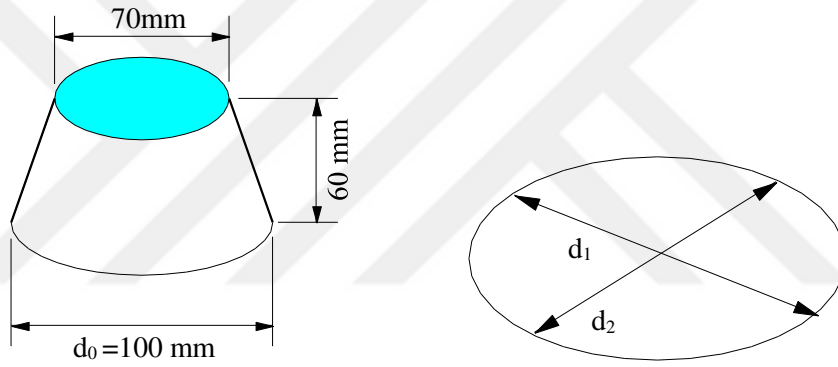
doldurulur. Daha sonra kesik koni kalıp yukarı doğru kaldırılır ve harcın bulunduğu yüzeyi sarsmadan kendiliğinden yayılması beklenir. Yayılan harcın çapı iki ayrı noktadan birbirine dik olacak şekilde ölçülür ve aritmetik ortalamaları alınarak yayılma çapı bulunur. Bu değerin 240 ile 260 mm arasında olması gerekmektedir (Şekil 4.4). Bulunan ortalama yayılma çapından yararlanarak Denklem 4.2’de verilen formülle bağıl çökme-yayılma değeri hesaplanır [4].

$$\Gamma_m = \left[\frac{d}{d_0} \right]^2 - 1 \quad (4.2)$$

Γ_m : Bağıl çökme-yayılma değeri

d : Deney sonucu elde edilen ortalama yayılma çapı (mm)

d_0 : Kesik koninin alt çapı (100 mm)



Şekil 4.3. Mini çökme-yayılma deneyi aparatı ve düzeneği



Şekil 4.4. Mini çökme-yayılma çapının ölçümü

4.2.2. Viskozimetre Deneyi

Karışım oranları belirlenen KYH'ler karıştırma işleminden sonra cam beher içine dökülmüştür. KYH'lerin viskozite değerlerini bulmak için Brookfield DV-E model cihaz kullanılmıştır (Şekil 4.5). Cihazın daire şeklindeki dönel ucunun çapı (4 mm) numuneye göre belirlenmiştir. Harcın içindeki karıştırıcı uç 1, 2.5, 5, 10, 20, 50 ve 100 devir/dk açısal hızlarla döndürülüp dönel uca karşı harcın oluşturduğu burulma momenti (tork) ölçülmüştür. Uçun açısal hızı arttıkça cihazda okunan değerler doğrultusunda viskozite değişimleri belirlenmiştir. 100 devir/dk dönme hızından sonra hız kademeli azaltılarak aynı ölçümler tekrar yapılmıştır. Farklı açısal hızlardaki viskozite değerleri (cP) belirlenen KYH karışımlarının viskozite-açısal hız grafiği çizilmiştir.



Şekil 4.5. Brookfield DV-E model viskozimetre cihazı

4.2.3. KYH Karışımlarının Kalıplara Yerleştirilmesi ve Kürü

Üç noktalı eğilme ve basınç deneylerinde kullanılmak üzere 40x40x160 mm boyutlu prizmatik kalıplar, su emme deneylerinde kullanılmak üzere 50x50x50 mm boyutlu küp kalıplar kullanılmıştır (Şekil 4.6). Kalıplar yağlandıktan sonra karışım oranları belirlenmiş KYH numuneleri kendi ağırlıklarıyla kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.6. 40x40x160 mm'lik prizmatik ve 50x50x50 mm'lik küp kalıplar



Şekil 4.7. KYH'lerin kalıba yerleştirilmesi

Harçlar kalıplara döküldükten sonra priz alıncaya kadar üstü cam yüzey ile korunmuştur. Hava sıcaklığına göre 24 ile 48 saat priz süresi sonunda numuneler kalıplardan çıkarılmıştır. Daha sonra numuneler 3, 28 ve 90 gün süreli deney günlerine kadar 20 ± 2 °C sıcaklığındaki şehir şebeke suyuyla kür edilmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Numunelerin kür ortamı

4.3. Sertleşmiş Harç Deneyleri

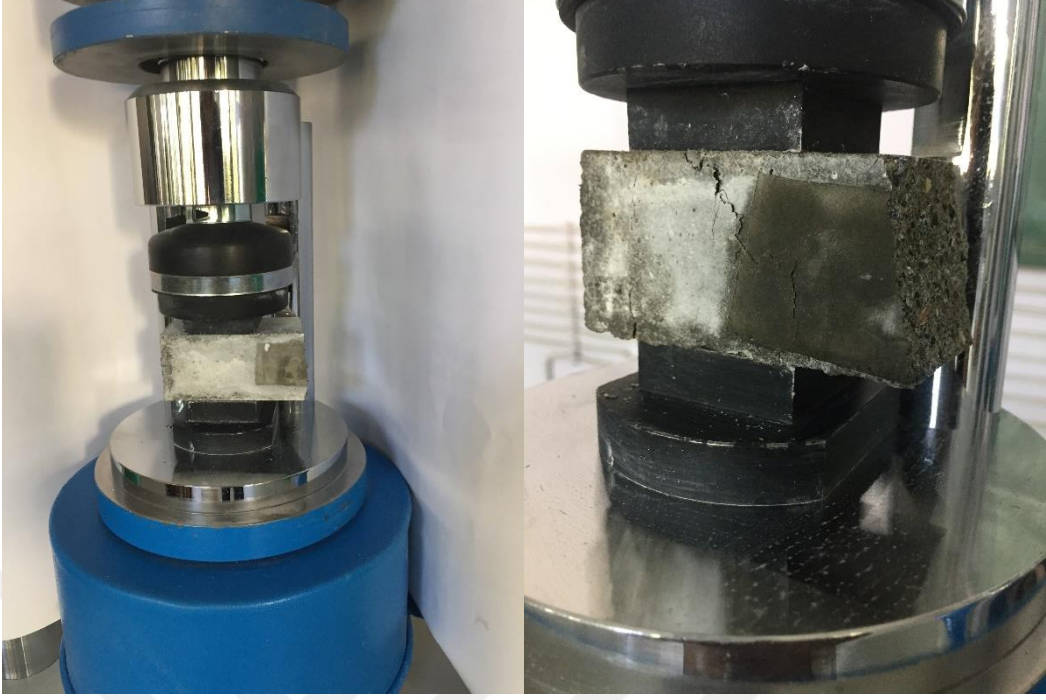
Belirli süreler kür ortamında bekletilen numuneler üzerinde bazı sertleşmiş harç deneyleri uygulanmıştır.

4.3.1. Üç Noktalı Eğilme ve Basınç Deneyi

Karışım oranları taze harç deneyleriyle belirlenen 13 ayrı KYH karışımı her birinden üçer adet olmak üzere 40x40x160 mm prizmatik kalıplara dökülmüştür. Numuneler kirece doymun halde bulunan 20 ± 2 °C sıcaklıktaki Elazığ şehir şebeke suyunda 3, 28 ve 90 gün süreli kürde bekletilmiştir. Kür sonunda toplam 117 adet numuneye TS EN 196-1 [58]'e göre üç noktalı eğilme ve basınç deneyleri yapılarak dayanımları hesaplanmıştır. Üç noktalı eğilme ve basınç deneyleri UTEST UTCM 6420 makinesi kullanılarak yapılmıştır. Her karışımdan üçer numune ilk önce 0,2 KN/sn yükleme hızıyla üç noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur (Şekil 4.9). Bu deney sonucunda ikiye ayrılan numunelerin her birine yükleme hızı 2,4 KN/sn olacak şekilde basınç testi uygulanmıştır (Şekil 4.10). Her iki deney sonucunda elde edilen dayanım değerlerinin ortalamaları alınmıştır.



Şekil 4.9. Üç noktalı eğilme deneyi



Şekil 4.10. Basınç deneyi

4.3.2. Toplam Su Emme ve Porozite Deneyleri

Her karışımdan üçer tane olmak üzere 50x50x50 mm'lik küp numunelerden 39 tane hazırlanmıştır. Numuneler TS EN 12390-7 [59] standartına göre 24 saat su içinde bekletilerek doymun hale geldikten sonra Arşimet terazisinde (Şekil 4.11) havada ve su içerisinde asılı ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra 105 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde değişmez ağırlığa gelene kadar kurutulan numunelerin etüv kuru ağırlıkları ölçülmüştür (Şekil 4.12). Denklem 4.3-4.7 ile tüm karışımların etüv kuru yoğunluk, doymun kuru yüzey yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam su emme ve porozite değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.11. Arşimet terazisi



Şekil 4.12. Etüvde kurutulmuş numuneler

$$\text{Etüv Kuru Yoğunluk} = \frac{W_1 - W_3}{W_2} (\text{gr/cm}^3) \quad (4.3)$$

$$\text{Doygun Kuru Yüzey Yoğunluk} = \frac{W_3}{W_3 - W_2} (\text{gr/cm}^3) \quad (4.4)$$

$$\text{Görünür Yoğunluk} = \frac{W_1}{W_1 - W_2} (\text{gr/cm}^3) \quad (4.5)$$

$$\text{Toplam Su Emme (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (4.6)$$

$$\text{Porozite (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} \times 100 \quad (4.7)$$

W_1 : Numunenin etüv kuru ağırlığı (gr)

W_2 : Numunenin sudaki ağırlığı (gr)

W_3 : Numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı (gr)

4.3.3. Kapiler (Kılcal) Su Emme Deneyi

Her karışımdan üçer tane olmak üzere hazırlanan toplam 78 adet 50x50x50 mm'lik küp numunenin 39'u 28 gün, 39'u 90 gün süreli kürde bekletilmiştir. Kür süreleri sonunda numuneler 105±5 °C sıcaklığındaki etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletilip etüv kuru ağırlıkları hesaplanmıştır. Etüvden çıkarılarak soğumaya bırakılan küp numunelerin tabanından 5 mm boşluk kalacak şekilde yan yüzeyleri bantla izole edilip ağırlıkları ölçülmüştür (Şekil 4.13). Numuneler daha sonra tabanından itibaren 5 mm batacak şekilde suya yerleştirilip 0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 ve 1440 dakikalık sürelerde, numunelerin yüzeyindeki serbest su nemli bir bezle silinerek 0,01 gr hassasiyetli tartıda ağırlıkları ölçülmüştür (Şekil 4.14). Numunelerin başlangıçtaki izole bantlı etüv kuru ağırlıkları ile belirli süre su emmiş ağırlıklarından yararlanılarak kapiler su emme değerleri bulunmuştur. Kapiler su emme deneyi, TS 4045 [60] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Denklem 4.8'deki formül ile kapiler su emme katsayıları hesaplanmıştır.

$$K = \frac{Q^2}{A^2 \cdot t} \quad (4.8)$$

K: Kapiler (kılcal) su emme katsayısı (cm/s^{1/2})

Q: Emilen su miktarı (cm³)

t : Geçen zaman (s)

A: Su ile temas eden alan (cm²)



Şekil 4.13. Yan yüzeyleri izole edilmiş küp numuneler



Şekil 4.14. İzole edilmiş küp numunelerin su emmesi

4.3.4. Yüksek Sıcaklık Deneyi

Her karışımdan üçer tane olmak üzere toplamda 39 adet, 3 ayrı sıcaklık uygulaması için toplamda 117 adet 40x40x160 mm prizmatik numune 28 gün kürde bekletilmiştir. Kür sonunda 105 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletilen numuneler, yüksek sıcaklık fırınında 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık deneyinde ısınma hızı 6°C/dakika olan 1200°C kapasiteli Protherm HLF 150 laboratuvar tipi fırın kullanılmıştır. Fırın hedef sıcaklığa

ulaştığında 1 saat daha çalışıp otomatik olarak kapanmış ve numuneler oda sıcaklığına alınarak soğumaya bırakılmıştır (Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17). Yüksek sıcaklığa maruz kalan tüm numunelere üç noktalı eğilme ve basınç deneyleri uygulanmıştır (Şekil 4.18). Yüksek sıcaklık deneyleri TS EN 1363-1 [61] ve TS EN 1363-2 [62] standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.15. Numunelerin yüksek sıcaklık fırınına yerleştirilmesi



Şekil 4.16. Yüksek sıcaklık uygulamasından sonra numunelerin durumu



Şekil 4.17. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin yakın görünümü



Şekil 4.18. Yüksek sıcaklık uygulanan numunelerin üç noktalı eğilme ve basınç deneyi

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, hazırlanan 13 adet farklı karışımın özellikleri taze ve sertleşmiş harç deneyleriyle incelenmiştir.

5.1. Taze Harç Deney Sonuçları

KYH'lerin taze haldeki işlenebilirlik, kıvam ve akışkanlık özelliklerini belirlemek için uygulanan deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

5.1.1. Mini Çökme-Yayılma Deney Sonuçları

Hazırlanan taze harç karışımlarının işlenebilirlik ve kıvam özelliklerini tespit edebilmek için mini çökme-yayılma deneyi yapılmıştır.

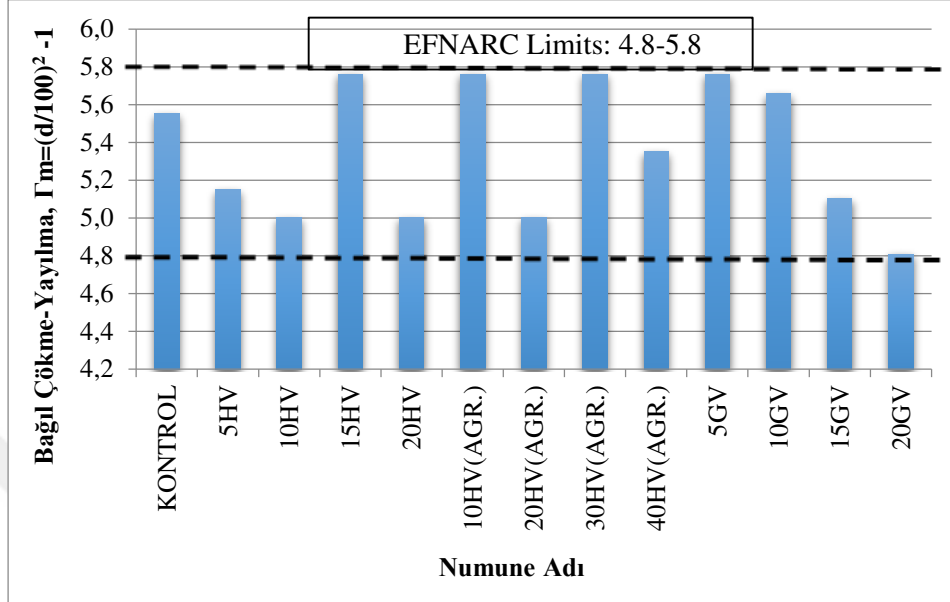
KYH karışımları hazırlanırken toplam bağlayıcı miktarı 630 kg/m^3 , SA ise 6 ile 8 kg/m^3 miktarında sabit tutulmuştur. Agreg a miktarı ve su/bağlayıcı oranı değiştirilerek karışım oranları belirlenmeye çalışılmıştır. Harçların karışım oranları belirlenirken ERNARC (2002)'ın önerdiği çökme-yayılma referans değerleri (24-26 cm) aralığında kalmasına dikkat edilmiştir.

Toplam bağlayıcı miktarının sabit tutulup çimento miktarı azaltılarak GV ve HV'nin ek bağlayıcı olarak ilave edildiği karışımların yanı sıra agreg a miktarı azaltılarak HV'nin eklendiği KYH karışımları üzerinde yapılan mini çökme-yayılma deneyleri sonucunda bulunan değerler Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Mini çökme-yayılma deney sonuçları

Karışım Kodu	Çökme-Yayılma (mm)	Bağlı Çökme-Yayılma
KONTROL	256	5,6
5HV	248	5,2
10HV	245	5,0
15HV	260	5,8
20HV	245	5,0
10HV(AGR.)	260	5,8
20HV(AGR.)	245	5,0
30HV(AGR.)	260	5,8
40HV(AGR.)	252	5,4
5GV	260	5,8
10GV	258	5,7
15GV	247	5,1
20GV	241	4,8

Mini çökme-yayılma deneyi sonucu bulunan Tablo 5.1'deki değerler kullanılarak Denklem 4.2'ye göre hesaplanan bağıl çökme-yayılma değerleri Tablo 5.1'de ve Şekil 5.1'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 5.1. Bağıl çökme-yayılma grafiği

Bağıl çökme-yayılma grafiği incelendiğinde, tüm değerlerin EFNARC (2002) tarafından verilen sınır değerleri arasında olduğu görülmektedir.

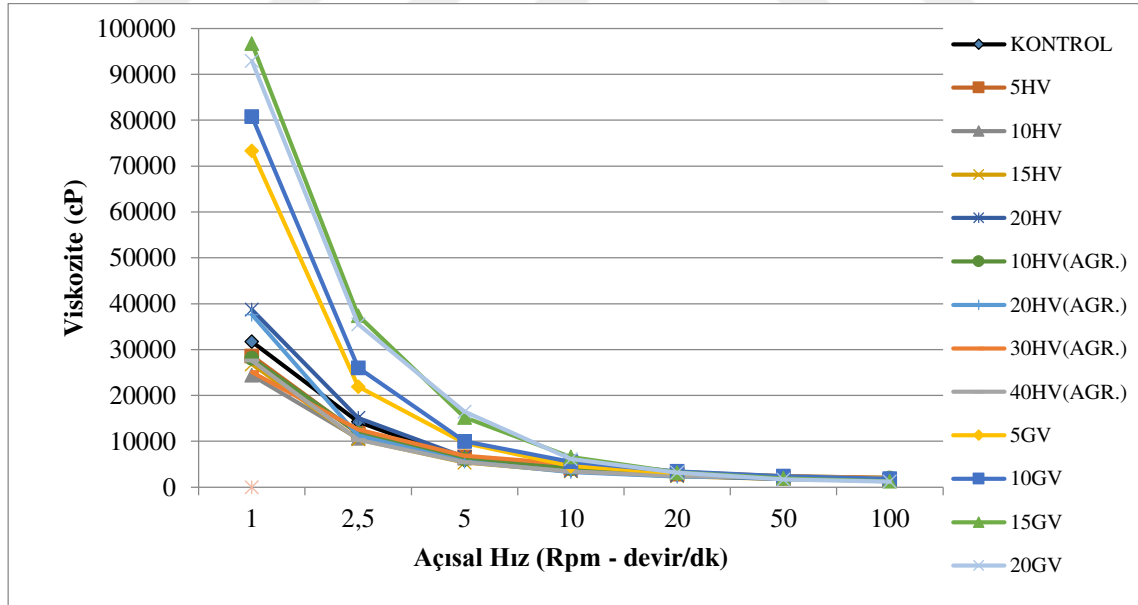
5.1.2. Viskozite Deneyi Sonuçları

Bütün KYH karışımları hazırlandıktan sonra 1, 2.5, 5, 10, 20, 50 ve 100 devir/dk açısal hızlarda viskozite ölçümleri yapılmıştır. Farklı açısal hızlardaki viskozite değerleri (cP) bulunan KYH karışımlarının viskozite-açısal hız grafiği çizilerek işlenebilirlik ve akışkanlık özellikleri belirlenmiştir. Bulunan değerler Tablo 5.2 ve Şekil 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. KYH karışımlarının farklı açısız hızlardaki viskozite değeri

KARIŞIM KODU	Açısız Hız (Rpm)						
	1	2,5	5	10	20	50	100
KONTROL	31700	14280	5880	3810	2830	2348	1907
5HV	28600	11680	6620	4070	2825	1906	1522
10HV	24400	10640	6300	4480	3375	2190	1747
15HV	26800	10440	5380	3460	2415	1773	1561
20HV	38700	15120	6600	3610	2535	1734	1473
10HV(AGR.)	28100	11800	6140	4090	3055	2376	2019
20HV(AGR.)	37600	11280	5580	3330	2305	2010	1674
30HV(AGR.)	25100	12560	6860	5060	3285	2386	2069
40HV(AGR.)	27600	10320	5460	3460	2485	2036	1819
5GV	73300	21920	9660	4610	3055	2312	1856
10GV	80800	26040	9980	5540	3450	2396	1859
15GV	96700	37400	15200	6600	3200	1912	1294
20GV	92900	35520	16460	6130	3185	1668	1231

Tablo 5.2 incelendiğinde dönel ucun açısız hızının artmasıyla viskozite değeri azaldığı görülür. Şekil 5.2’deki grafiğe bakıldığında viskozite eğrii X eksenine doğru asimptotik bir yaklaşım göstermiştir.



Şekil 5.2. KYH karışımlarının viskozite grafiği

Şekil 5.2 incelendiğinde HV’nin çimento ve agrega yerine kullanımıyla elde edilen numunelerin, kontrol numunesi ile başlangıç açısız hız hariç benzer viskozite değeri sahip olduğu görülmektedir. Ancak GV’nin çimento yerine kullanım oranının artmasıyla özellikle

başlangıç değerlerinde viskozitenin çok yüksek olduğu, açısal hızın artmasıyla viskozite değerlerinin kontrol numunesi değerlerine yaklaştığı görülmektedir.

5.2. Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları

Belirli süreler kür edildikten sonra dayanım kazanan KYH'lere uygulanan bazı sertleşmiş harç deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

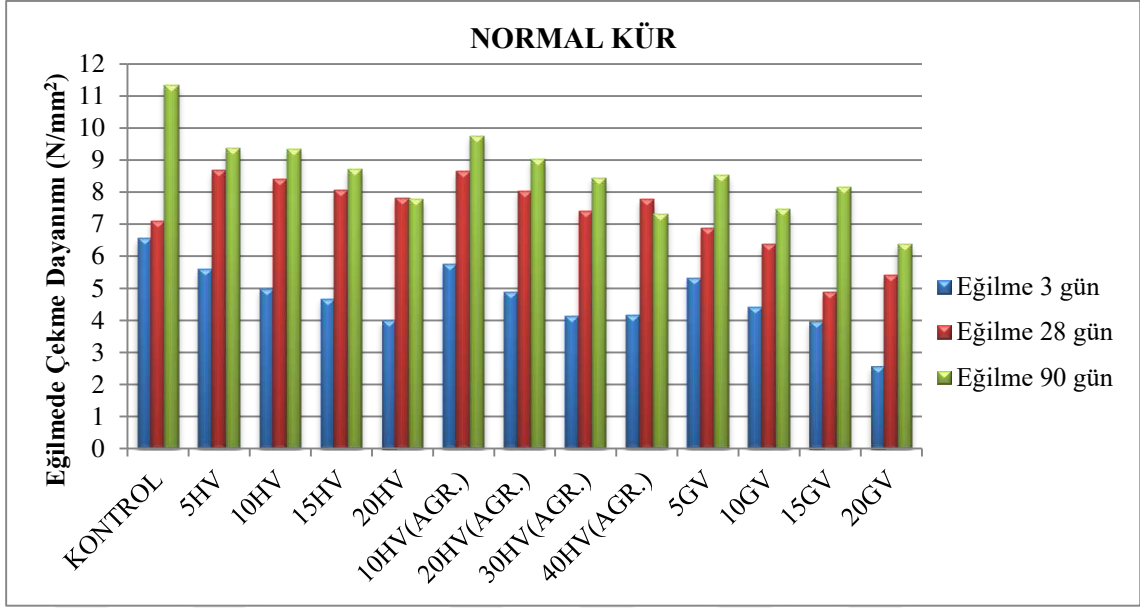
5.2.1. Üç Noktalı Eğilmede Çekme ve Basınç Deneyi Sonuçları

40x40x160 mm'lik prizmatik KYH numunelerinin 3, 28 ve 90 gün süreli kür sonunda üç noktalı eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri

NORMAL KÜR DEĞERLERİ						
Karışım Kodu	Eğilmede Çekme Dayanımı (N/mm ²)			Basınç Dayanımı (N/mm ²)		
	3 gün	28 gün	90 gün	3 gün	28 gün	90 gün
KONTROL	6,556	7,099	11,340	33,416	62,279	78,211
5HV	5,598	8,667	9,369	31,237	50,378	67,260
10HV	4,981	8,402	9,324	22,466	46,863	56,805
15HV	4,661	8,068	8,706	18,942	39,639	50,774
20HV	3,993	7,822	7,763	14,624	36,031	49,486
10HV(AGR.)	5,758	8,644	9,759	27,654	43,483	60,326
20HV(AGR.)	4,885	8,035	9,016	20,500	37,005	45,221
30HV(AGR.)	4,144	7,417	8,440	16,156	35,005	42,536
40HV(AGR.)	4,162	7,769	7,303	17,601	29,949	40,513
5GV	5,304	6,860	8,525	21,216	47,977	57,109
10GV	4,397	6,371	7,466	14,871	34,196	46,631
15GV	3,970	4,858	8,159	12,980	25,959	31,332
20GV	2,565	5,389	6,374	11,856	20,688	23,798

Tablo 5.3'te kür süreleri ve ikame oranlarına göre değişen eğilmede çekme dayanımı değerleri verilmiştir. Bu değerlere göre Şekil 5.3'teki eğilmede çekme dayanımı grafiği çizilmiştir.



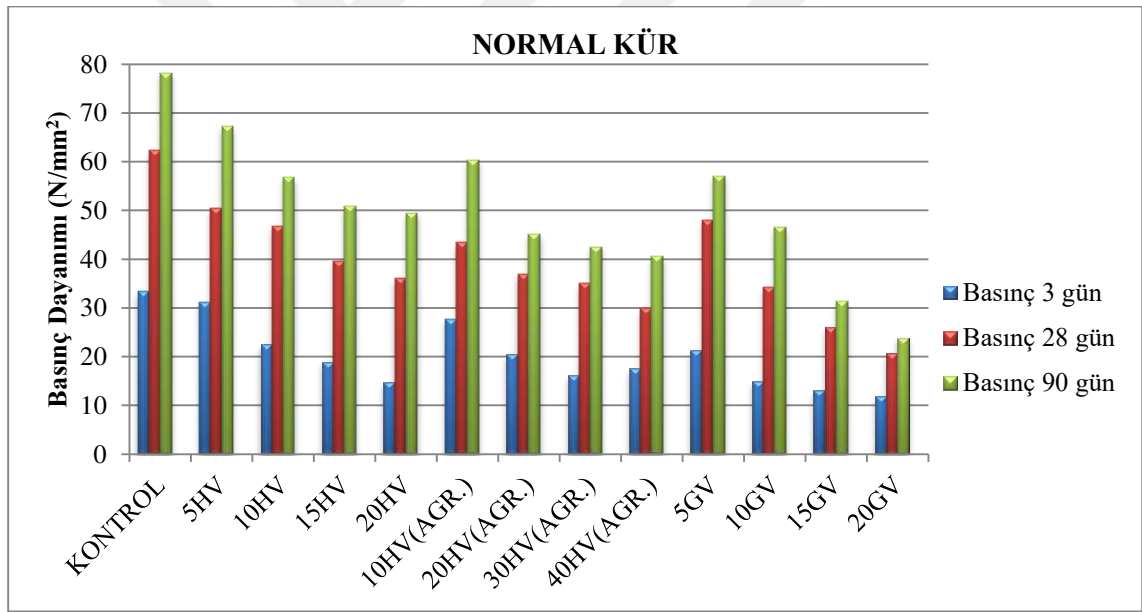
Şekil 5.3. Üç noktalı eğilmede çekme dayanımı grafiği

Şekil 5.3'te çimento yerine ham vermikülit ikameli harçlar incelendiğinde, 3 ve 90 günlük numunelerde eğilmede çekme dayanımının ikame oranının artmasıyla kontrol harcına göre azaldığı ve %20 ham vermikülit ikameli 20HV'de en düşük eğilmede çekme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. 28 günlük numunelerde ise ham vermikülit eklenen harçlar kontrol harcına göre daha yüksek eğilmede çekme dayanımı sağlamıştır. 3 günlük numunelerde en yüksek eğilmede çekme dayanımına 5,598 MPa değeriyle 5HV harcı, en düşük eğilmede çekme dayanımına ise 3,993 MPa değeriyle 20HV harcı sahiptir. 28 günlük numunelerde en yüksek eğilmede çekme dayanımına 8,667 MPa değeriyle 5HV harcı, en düşük eğilmede çekme dayanımına 7,822 MPa değeriyle 20HV harcı sahiptir. 90 günlük numunelerde en yüksek eğilmede çekme dayanımına 9,369 MPa değeriyle 5HV harcı, en düşük eğilmede çekme dayanımına 7,763 MPa değeriyle 20HV harcı sahiptir. 3 ve 90 günlük numunelerde eğilmede çekme dayanım kayıpları sırasıyla %14.61-39.09, %17.38-31.54 aralığındayken 28 günlük numunelerde %10.18-22.09 aralığında eğilmede çekme dayanım artışı olmuştur.

Şekil 5.3'te agrega yerine ham vermikülit ikameli harçlar incelendiğinde, çimento ikameli ham vermikülit gibi 3 ve 90 günlük numunelerde eğilmede çekme dayanımı kontrol harcına göre azalırken 28 günlük numunelerde kontrol harcına göre artış göstermiştir. En yüksek eğilmede çekme dayanımı 3, 28 ve 90 günlük numunelerde en az ikame oranlı 10HV(AGR.) harcına aittir. En düşük eğilmede çekme dayanımı ise 3 ve 28 günlük numunelerde 30HV(AGR.) harcına aitken 90 günlük numunede 40HV(AGR.) harcına aittir. 3 ve 90 günlük numunelerde eğilmede çekme dayanım kayıpları sırasıyla %12.17-36.79, %13.94-35.60 aralığındadır. 28 günlük numunelerde ise %4.48-21.76 aralığında eğilmede çekme dayanım artışı olmuştur.

Şekil 5.3'te çimento yerine genleştirilmiş vermikülit ikameli harçlar incelendiğinde, 3, 28 ve 90 günlük numunelerde eğilmede çekme dayanımı kontrol harcına göre azalmıştır. En yüksek eğilmede çekme dayanımı tüm kür sürelerinde en az ikame oranlı 5GV harcına aittir. En düşük eğilmede çekme dayanımı ise 3 ve 90 günlük numunelerde 20GV harcına aitken 28 günlük numunede 15GV harcına aittir. 3, 28 ve 90 günlük numunelerde dayanım kayıpları sırasıyla %19.09-60.88, %3.37-31.57, %24.82-43.79 aralığındadır.

Ham vermikülit katkısının çimento veya agrega yerine kullanımında, erken (3 gün) ve nihai (90 gün) eğilmede çekme dayanımlarını düşürdüğü görülmüştür. Ancak 28 günlük eğilmede çekme dayanımını artırıcı bir etki göstermiştir. Ham vermikülit kullanım oranının artmasıyla eğilme dayanımı genellikle olumsuz etkilenmiştir. Genleştirilmiş vermikülit katkısının çimento yerine kullanımında ise 3, 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımlarını arttıracak bir etki göstermemiştir. Genleştirilmiş vermikülit ikame oranının artmasıyla eğilme dayanımı genellikle olumsuz etkilenmiştir.



Şekil 5.4. Basınç dayanımı grafiği

Şekil 5.4'te çimento yerine ham vermikülit ikameli harçlar incelendiğinde, tüm numunelerde ham vermikülit oranı arttıkça basınç dayanımı kontrol harcına göre düşüş göstermiştir. 3, 28 ve 90 günlük numunelerde en yüksek basınç dayanımları 5HV harcında elde edilmiş ve değerleri sırasıyla 31.237, 50.378 ve 67.260 MPa'dır. 3, 28 ve 90 günlük numunelerde en düşük basınç dayanımları ise 20HV harcında elde edilmiş ve değerleri sırasıyla 14.624, 36.031 ve 49.486 MPa'dır. Ham vermikülit eklenen tüm harçlar kontrol harcına göre basınç dayanımını kaybetmiş ve bu kayıp 3 günlük numuneler için %6.52-56.24, 28 günlük numuneler için %19.11-42.15, 90 günlük numuneler için %14-36.73 aralığındadır.

Şekil 5.4'te agrega yerine ham vermikülit ikameli harçlar incelendiğinde, tüm numunelerde ham vermikülit oranı arttıkça basınç dayanımı kontrol harcına göre düşüş göstermiştir. 3 günlük numunede en yüksek basınç dayanımı 27,654 MPa değeriyle 10HV(AGR.) harcına aitken en düşük basınç dayanımı 16,156 MPa değeriyle 30HV(AGR.) harcına aittir. 28 ve 90 günlük numunelerde en yüksek basınç dayanımları 43,483 ve 60,326 MPa değerleriyle 10HV(AGR.) harcına, en düşük basınç dayanımları ise 29,949 ve 40,513 MPa değerleriyle 40HV(AGR.) harcına aittir. Agrega yerine ham vermikülit kullanılan tüm harçlarda kontrol harcına göre basınç dayanımı azalmıştır. Bu dayanım kaybı 3, 28 ve 90 günlük numuneler için sırasıyla %17.24-51.65, %30.18-51.91 ve %22.87-48.2 aralığındadır.

Şekil 5.4'te çimento yerine geliştirilmiş vermikülit ikameli harçlar incelendiğinde, tüm numunelerde geliştirilmiş vermikülit oranı arttıkça basınç dayanımı kontrol harcına göre düşüş göstermiştir. 3, 28 ve 90 günlük numunelerde en yüksek basınç dayanımı en az ikame oranlı 5GV harcına aitken en düşük basınç dayanımı en çok ikame oranlı 20GV harcına aittir. Basınç dayanım kayıpları 3 günlük numunede %36.51-64.52, 28 günlük numunede %22.96-66.78 ve 90 günlük numunede ise %26.98-69.57 aralığındadır.

Genleştirilmiş ve ham vermikülit katkı kullanımı basınç dayanımını arttıracak bir etki göstermemiştir. İkame oranlarının artmasıyla tüm kür sürelerinde basınç dayanımı olumsuz etkilenmiştir.

Sairam ve Sailaja [63] yaptıkları çalışmada, çeşitli oranlarda vermikülitte ince agrega yerine ikame ettirerek 7 ve 28 günlük dayanımlarını bulmuştur. Tüm numuneler hazırlanırken su/çimento oranı 0,42 olarak sabit tutulmuştur. 150x150x150 mm boyutlu küp numunelere yapılan basınç dayanımı testinde vermikülit ikame oranı arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. 150 mm çap, 300 mm yüksekliğe sahip silindir numunelere uygulanan çekme dayanımı testinde vermikülit oranı arttıkça çekme dayanımı azalmıştır. Bir başka deneyde çimento yerine %10 silis dumanı, %15 uçucu kül ikameli numuneler optimum dayanımı sağlamıştır. İki çalışmayı birleştirip çimento yerine %10 silis dumanı ve %15 uçucu külün kullanıldığı vermikülitli betonlar daha iyi basınç ve çekme dayanımı elde edilmesini sağlamıştır.

Shoukry vd. [64] yaptıkları çalışmada, hacimce yüksek oranda geliştirilmiş vermikülit ve beyaz portland çimentosu içeren hafif betonun GV miktarını azaltıp %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında nano metakaolin ekleyerek fiziksel, mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin değişimini bulmuşlardır. 28 gün kürde bekletilen 50x50x50 mm ve 40x40x160 mm boyutlu numunelerin yoğunluk, ısı iletkenliği, kapiler su emme, basınç ve eğilme dayanımları ASTM standartlarına göre belirlenmiştir. GV yerine kullanılan metakaolin miktarı arttıkça basınç ve eğilme dayanımlarında sırasıyla %57-59 artış meydana gelmiştir. Nano metakaolin miktarı arttıkça kapiler su emme oranı genellikle azalmıştır. Yüksek hacimli geliştirilmiş vermikülit ve beyaz çimentolu kompozitlerde

nano metakaolin katkısının kapiler su emmeyi düşürmede ve mekanik performansı arttırmada çok etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

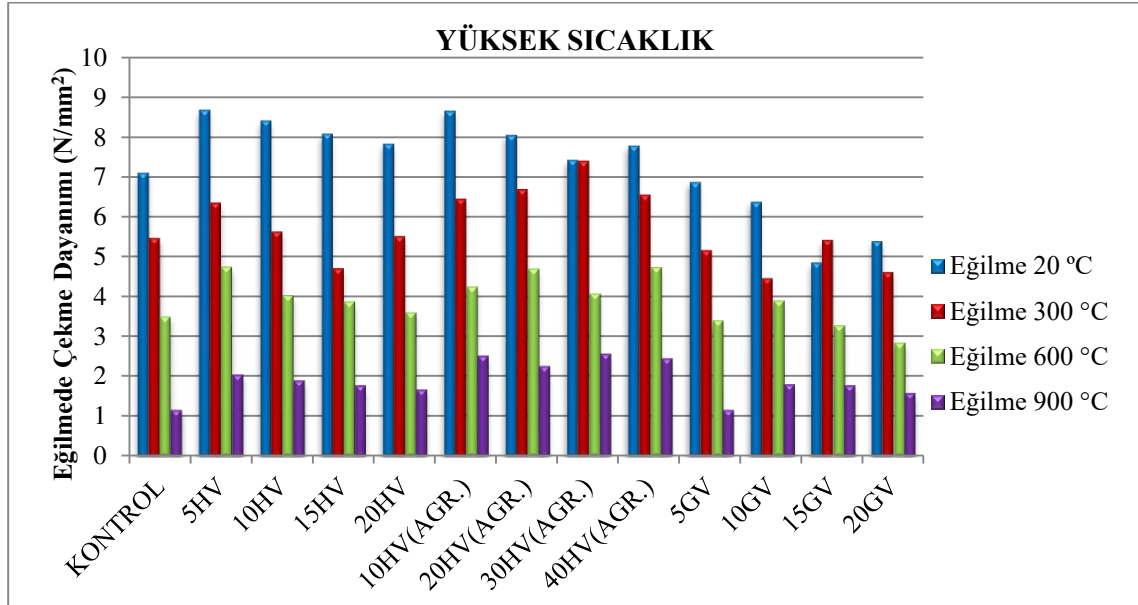
Schackow vd. [65] vermikülit ve genleştirilmiş polistirenle birlikte üretilen hafif betonların ısı ve mekanik özelliklerinin değişimini hava sürükleyici ve SA katkı maddesi kullanarak bulmuşlardır. Vermikülit karışıma eklenmeden önce 24 saat suda bekletilip doygun hale getirilmiştir. Vermikülit ve genleştirilmiş polistiren hafif agrega olarak toplam beton hacminin %55 ve %65'i oranında eklenmiştir. SA'nın yanı sıra ağırlıkça %0,5 ile %1 oranında hava sürükleyici katkı maddesi kullanılarak hafif betonların basınç dayanımı, ısı iletkenliği, yoğunluğu, su emmesi ve boşluk oranları bulunmuştur. 28 günlük kürden sonra vermikülit ve polistiren kullanılan numunelerin basınç dayanımları sırasıyla 6,31-14,80 MPa ile 7,74-15,55 MPa aralığında değişmiştir. Düşük miktarda hava sürükleyici katkı ve daha az miktarda hafif agrega kullanımı dayanımı olumlu etkilemiştir. Vermikülit ile üretilen hafif betonların boşluk oranı vermikülitin gözenekli yapısından dolayı daha yüksek çıkmıştır. Su emme değerleri her iki katkı maddesinde %65 kullanımda daha yüksektir. Vermikülit ile üretilen hafif betonların ısı iletkenliği genleştirilmiş polistirene göre daha düşüktür. Dolayısıyla ısı yalıtımı gerektiren betonlarda hafif agrega olarak vermikülit kullanımı daha uygundur.

5.2.2. Yüksek Sıcaklık Deney Sonuçları

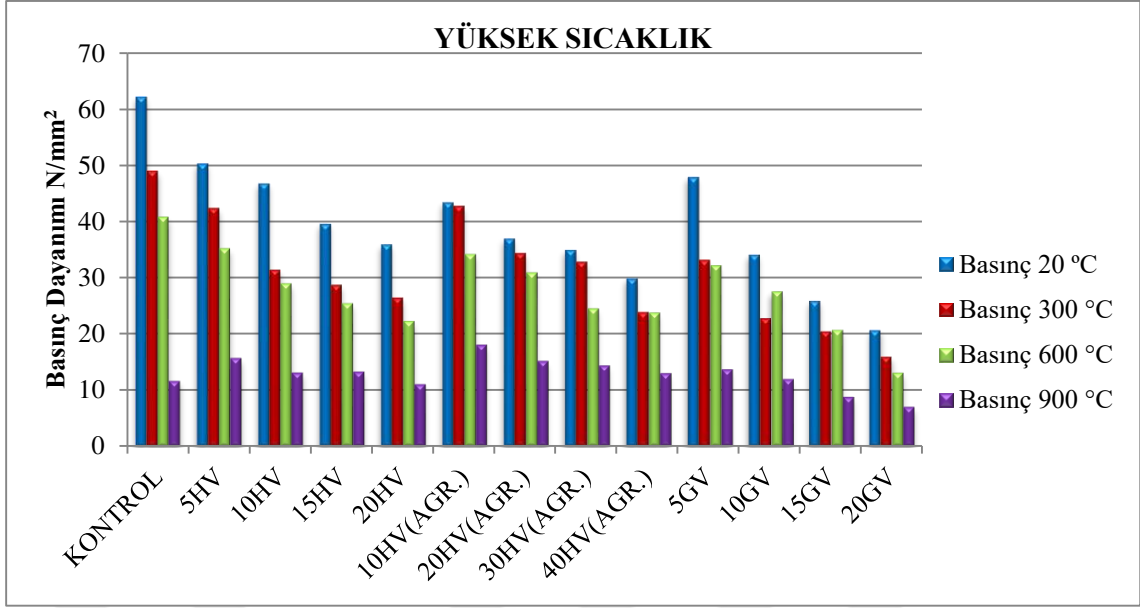
Her karışımından üçer adet 40x40x160 mm prizmatik 28 günlük KYH numuneleri 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra üç noktalı eğilme ve basınç deneyleri uygulanmıştır. Deney sonucunda elde edilen eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri Tablo 5.4'te, yüksek sıcaklıkla değişen değerlerin grafiği ise Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.4. Yüksek sıcaklık sonrası eğilmede çekme ve basınç dayanım değerleri

Karışım Kodu	Eğilmede Çekme Dayanımı (N/mm ²)				Basınç Dayanımı (N/mm ²)			
	20 °C	300 °C	600 °C	900 °C	20 °C	300 °C	600 °C	900 °C
KONTROL	7,099	5,461	3,478	1,153	62,279	48,935	40,762	11,501
5HV	8,667	6,347	4,715	2,025	50,378	42,346	35,146	15,583
10HV	8,402	5,619	4,007	1,880	46,863	31,379	28,936	13,011
15HV	8,068	4,703	3,850	1,764	39,639	28,721	25,380	13,181
20HV	7,822	5,508	3,583	1,655	36,031	26,406	22,237	10,920
10HV(AGR.)	8,644	6,443	4,223	2,490	43,483	42,742	34,105	17,881
20HV(AGR.)	8,035	6,682	4,663	2,234	37,005	34,349	30,880	15,071
30HV(AGR.)	7,417	7,390	4,043	2,545	35,005	32,782	24,471	14,276
40HV(AGR.)	7,769	6,546	4,707	2,428	29,949	23,841	23,706	12,859
5GV	6,860	5,160	3,384	1,149	47,977	33,157	32,114	13,576
10GV	6,371	4,455	3,878	1,788	34,196	22,761	27,510	11,860
15GV	4,858	5,410	3,261	1,764	25,959	20,430	20,671	8,716
20GV	5,389	4,607	2,833	1,567	20,688	15,935	13,066	6,948



Şekil 5.5. Yüksek sıcaklık sonrası eğilmede çekme dayanımı grafiği



Şekil 5.6. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı grafiği

Şekil 5.5 ve 5.6'daki grafikler incelendiğinde tüm KYH numunelerinde sıcaklığın artmasıyla eğilmede çekme ve basınç dayanımlarının düştüğü görülmektedir. Genleştirilmiş ve ham vermikülit ilavesiyle genellikle eğilmede çekme dayanımı artarken basınç dayanımı kontrol numunesine göre düşüş göstermiştir. Çimento yerine ham vermikülit ikameli harçlar incelendiğinde en yüksek eğilmede çekme ve basınç dayanımlarının 5HV harcında elde edildiği ve ikame oranının artmasıyla dayanımların düştüğü görülmektedir. Agrega yerine ham vermikülit ikameli harçlar incelendiğinde en yüksek eğilmede çekme dayanımı 300 ve 900 °C'de 30HV(AGR.) harcına, 600 °C'de 40HV(AGR.) harcına aittir. En yüksek basınç dayanımı 300 °C, 600 °C ve 900 °C'de 10HV(AGR.) harcına, en düşük basınç dayanımı ise 40 HV(AGR.) harcına aittir. Sonuç olarak ham vermikülit ikameli harçların eğilmede çekme dayanımı kontrol numunesine göre yüksek sıcaklıkla artarken basınç dayanımı 900 °C sıcaklık haricinde genellikle azalmıştır.

Şekil 5.5 ve 5.6'da çimento yerine genleştirilmiş vermikülit ikameli harçlar incelendiğinde 300 °C'de en yüksek eğilmede çekme dayanımı 15GV harcına aitken en düşük eğilme dayanımı 10GV harcına aittir ve tüm harçların eğilmede çekme dayanımı kontrol numunesine göre düşüş göstermiştir. 600 °C'de en yüksek eğilmede çekme dayanımı 10GV harcında, en düşük eğilmede çekme dayanımı 20GV harcında elde edilmiştir ve sadece 10GV harcı kontrol numunesinden daha yüksek eğilme dayanımına sahiptir. 900 °C'de en yüksek eğilmede çekme dayanımı 10GV harcına aitken en düşük eğilme dayanımı 5GV harcına aittir ve sadece 5GV harcının eğilme dayanımı kontrol numunesine göre düşüş göstermiştir. Genleştirilmiş vermikülit ikameli harçların 300 °C, 600 °C ve 900 °C'de en yüksek basınç dayanımları 5GV harcına aitken, en düşük basınç dayanımları 20 GV harcına aittir. 300 °C ve 600 °C'de tüm harçlar kontrol numunesine göre daha düşük basınç dayanımına sahipken 900 °C'de 5GV ve 10GV harcı kontrol numunesine göre daha

yüksek basınç dayanımına sahiptir. Sonuç olarak genişletilmiş vermikülit ikameli harçların eğilmede çekme ve basınç dayanımları kontrol numunesine göre yüksek sıcaklık altında 900 °C haricinde genellikle azalmıştır.

Tablo 5.5. Yüksek sıcaklık sonucunda eğilmede çekme ve basınç dayanım kayıpları (%)

Karışım Kodu	Eğilmede Çekme Dayanımı (N/mm ²)			Basınç Dayanımı (N/mm ²)		
	300 °C	600 °C	900 °C	300 °C	600 °C	900 °C
KONTROL	23,07	51,01	83,76	21,43	34,55	81,53
5HV	26,77	45,60	76,64	15,94	30,24	69,07
10HV	33,12	52,31	77,62	33,04	38,25	72,24
15HV	41,71	52,28	78,14	27,54	35,97	66,75
20HV	29,58	54,19	78,84	26,71	38,28	69,69
10HV(AGR.)	25,46	51,15	71,19	1,70	21,57	58,88
20HV(AGR.)	16,84	41,97	72,20	7,18	16,55	59,27
30HV(AGR.)	0,36	45,49	65,69	6,35	30,09	59,22
40HV(AGR.)	15,74	39,41	68,75	20,39	20,85	57,06
5GV	24,78	50,67	83,25	30,89	33,06	71,70
10GV	30,07	39,13	71,94	33,44	19,55	65,32
15GV	-11,36	32,87	63,69	21,30	20,37	66,42
20GV	14,51	47,43	70,92	22,97	36,84	66,42

Tablo 5.5 incelendiğinde sadece 300 °C’de 15GV harcının eğilme dayanımı artışı sağladığı diğer tüm harçların yüksek sıcaklık altında büyük dayanım kayıplarına uğradığı görülmektedir. Sıcaklık artışıyla beraber dayanım kayıpları da artmıştır ancak 10GV ve 15GV harcında sıcaklığın 300 °C’den 600 °C yükselmesiyle dayanım kayıpları azalmıştır.

Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonların dayanımını malzeme faktörlerinin yanı sıra çevresel faktörler de etkilemektedir. Bunlar; en yüksek sıcaklık derecesi, en yüksek sıcaklığa ulaşma hızı, bu sıcaklığa maruz kalma süresi, soğutma hızı ve şekli, yükleme koşullarıdır [66]. 120 °C’ye kadar sıcaklığın artmasıyla dayanım azalmakta ve bu durum çimento hamurundaki su tabakalarının şişmesi sonucu bağların zayıflamasından kaynaklanmaktadır. Dayanımın 300 °C’ye kadar yeniden kazanılması, kimyasal olarak bağlı olmayan buharlaşabilen suyun kaybıyla (termal kuruma) ilgilidir. Sıcaklık 300 °C’yi aştığında C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) jelinin dehidrasyonu ile sülfaloalüminattan gelen kimyasal bağ suyunun bir kısmının kaybedilmesiyle mikro çatlaklar oluşur ve mekanik özellikler bozulur [67]. 400 ile 600 °C arasındaki sıcaklıklar sertleşmiş çimento hamurunda bir takım reaksiyonlar meydana getirir. Bu reaksiyonlar boşlukların tamamen

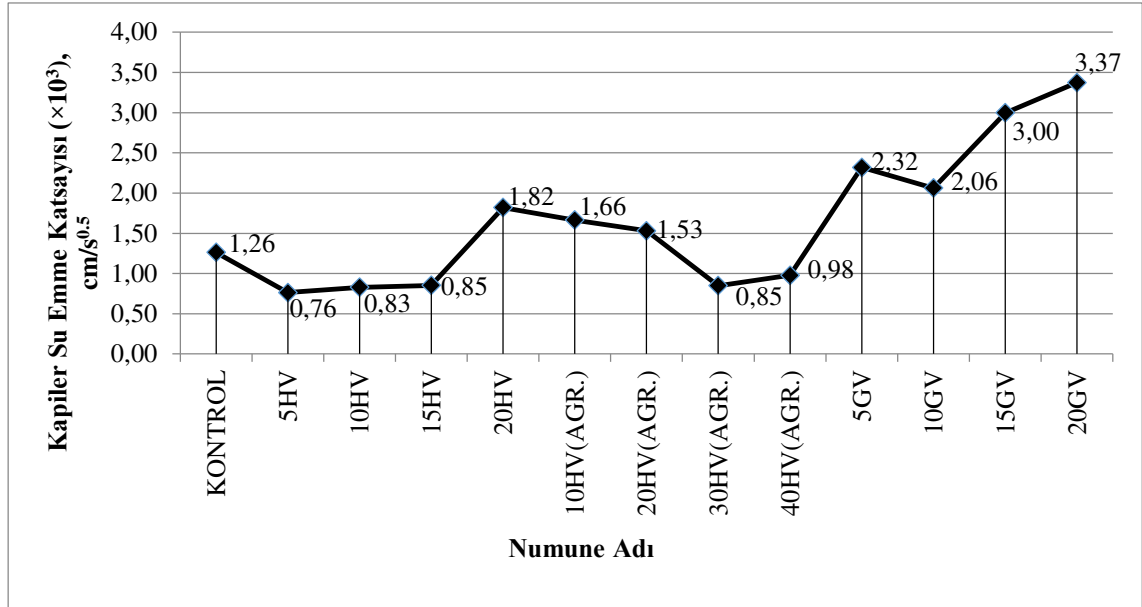
kurumasıyla başlar, hidratasyon ürünlerinin ayrışması ve C-S-H jellerinin parçalanmasıyla devam eder [68]. $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 530 °C civarında sönmemiş kirece (CaO) dönüşür ve %33'e yakın bir büzülme meydana gelir. Bu sıcaklıklardan sonra beton büyük dayanım kayıplarına uğrar [69]. CSH'nin tamamen ayrışması ve kimyasal olarak bağlı suyun kaybı 900 °C civarında gerçekleşir [67,68].

Köksal vd. [70] genleştirilmiş vermikülit ve silis dumanı ile üretilen çimento esaslı harçların yüksek sıcaklık ortamındaki özelliklerini incelemişlerdir. Harçlar hacimce 4, 6 ve 8 genleştirilmiş vermikülit/çimento oranına göre üretilip her karışıma %0, %5, %10, %15 oranında silis dumanı eklenmiştir. Toplamda 114 adet 40x40x160 mm harç numunesi 28 gün kürde bekletilmiştir. Kür işleminden sonra sertleşmiş harçların birim ağırlıkları 780 ile 1200 kg/m³ arasında olup vermikülit miktarı arttıkça birim ağırlıkları azalmıştır. Su emme değerleri %24,2 ile %40,6 aralığında değişmiştir. Vermikülitin gözenekli yapısından dolayı su emme değerleri ve porozite vermikülit miktarıyla orantılı olarak artmıştır. Silis dumanı çok ince parçacıklar içerdiğinden ilave edilmesiyle mikro boşlukları doldurup porozite ve su emmeyi azaltmıştır. Numuneler 6 saat boyunca 300, 600 ve 900 °C yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Genleştirilmiş vermikülit içeren harçların silis dumanı katkısıyla dayanım ve durabilite özelliklerinin iyileştiği ancak sıcaklık yükseldikçe basınç ve eğilme dayanımlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Genleştirilmiş vermikülit agregası kullanılarak üretilen harçlar mekanik dayanımın yüksek sıcaklığa karşı korunması bakımından iyi bir performans göstermiştir. Genleştirilmiş vermikülitin yangına dayanıklı malzeme olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

El-Gamal vd. [71] vermikülit ve genleştirilmiş vermikülit içeren sertleşmiş betonların yüksek sıcaklık altındaki durabilite ve termal kararlılık özelliklerini incelemişlerdir. Her iki tip vermikülit ağırlıkça %2,5, %5 ve %10 oranında kullanılarak ayrıca %5 vermikülit katkısına %10 silis dumanı eklenerek farklı karışımlar hazırlanmıştır. Her karışım 28 günlük hidratasyondan sonra 300, 600 ve 800 °C sıcaklığa 3 saat süreyle maruz bırakılmıştır. Ardından kademeli olarak havada soğutma ve hızlıca soğuk suda soğutma olmak üzere iki model soğutma işlemi uygulanmıştır. Su ile soğutulan numuneler hava ile soğutulan numunelere göre daha büyük dayanım kaybına uğramıştır. Vermikülitin kullanılması, portland çimentosu ile üretilen betonlara göre ısı direncini geliştirmiş olup GV, genleştirilmemiş vermikülite göre daha iyi ısı direnci göstermiştir. Tüm yüksek sıcaklıklarda en iyi performansı ağırlıkça %5 ikame edilen numuneler sağlamıştır. Ayrıca silis dumanının vermikülit ile birlikte kullanımı betonun performansını geliştirmiştir.

5.2.3. Kapiler Su Emme, Toplam Su Emme ve Porozite Deney Sonuçları

Kapiler su emme deneyi sonucunda Denklem (4.8) kullanılarak elde edilen kapiler (kılcal) su emme katsayıları Şekil 5.7'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 5.7. Kapiler su emme katsayıları grafiği

Şekil 5.7 incelendiğinde çimento yerine ham vermikülit ikameli harçlar içerisinde en düşük kapiler su emme katsayısı 5HV harcına, en yüksek kapiler su emme katsayısı 20HV harcına aittir. 20HV harcı haricinde tüm karışımların kapiler su emme katsayıları kontrol numunesinden düşüktür. Agregaya yerine ham vermikülit ikameli harçlara bakıldığında ikame oranının artmasıyla kapiler su emme katsayısında düşüş gözlenmiştir. En düşük kapiler su emme katsayısı 30HV(AGR.) harcına, en yüksek kapiler su emme katsayısı 10HV(AGR.) harcına aittir. Ham vermikülitin agregaya yerine kullanılması kapiler su emmesinin daha yüksek olmasını sağlamıştır. Ayrıca su/çimento oranının artmasıyla kapiler su emme artmıştır.

Şekil 5.7'deki grafiğe bakıldığında genleştirilmiş vermikülit ikameli harçların kapiler su emme katsayısının ham vermikülit ikameli harçlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir. 5GV harcı en düşük kapiler su emme katsayısına sahipken en yüksek değere 20GV harcı sahiptir.

KYH numunelerinin etüv kuru ağırlıkları, su içindeki ağırlıkları ve doymun kuru yüzey ağırlıkları Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6. KYH numunelerinin etüv kurusu, su içindeki ve doymun kuru yüzey ağırlıkları

KARIŞIM KODU	Etüv Kuru Ağırlık (W₁, gr)	Su İçindeki Ağırlık (W₂, gr)	DKY Ağırlık (W₃, gr)
KONTROL	268,60	156,63	277,20
5HV	278,67	158,73	283,07
10HV	272,67	153,37	277,50
15HV	274,47	152,77	279,30
20HV	265,37	153,03	277,07
10HV(AGR.)	273,23	157,33	282,07
20HV(AGR.)	264,80	147,17	272,03
30HV(AGR.)	257,37	136,50	260,80
40HV(AGR.)	251,63	133,53	256,43
5GV	267,67	154,60	280,13
10GV	253,40	137,30	264,93
15GV	248,93	135,00	266,03
20GV	225,10	117,67	246,20

Tablo 5.6'daki değerler doğrultusunda denklem (4.4), (4.5), (4.6) ve (4.7) kullanılarak KYH numunelerinin yoğunlukları, toplam su emme kapasiteleri (%) ve poroziteleri (%) bulunmuş ve bu değerler Tablo 5.7 ve Tablo 5.8'de verilmiştir.

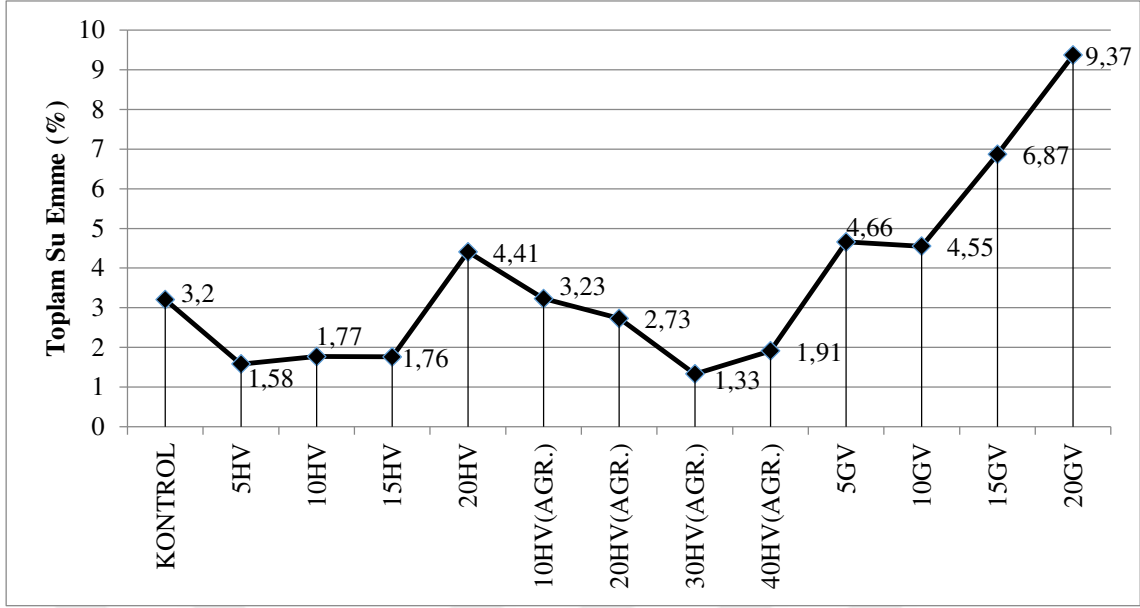
Tablo 5.7. 50x50x50 mm boyutlu küp numunelerin yoğunlukları

KARIŞIM KODU	DKY Yoğunluk (gr/cm ³)	Görünür Yoğunluk (gr/cm ³)
KONTROL	2,30	2,40
5HV	2,28	2,32
10HV	2,24	2,29
15HV	2,21	2,26
20HV	2,23	2,36
10HV(AGR.)	2,26	2,36
20HV(AGR.)	2,18	2,25
30HV(AGR.)	2,10	2,13
40HV(AGR.)	2,09	2,13
5GV	2,23	2,37
10GV	2,08	2,18
15GV	2,03	2,18
20GV	1,92	2,10

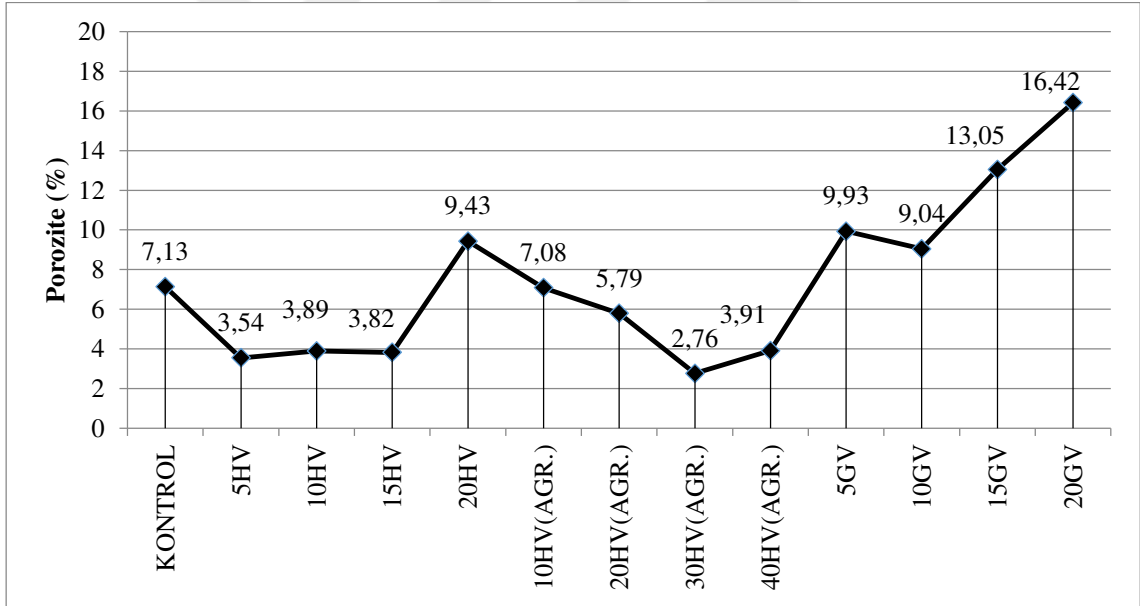
Tablo 5.8. 50x50x50 mm boyutlu küp numunelerin toplam su emme kapasitesi ve porozite değerleri

KARIŞIM KODU	Toplam Su Emme Kapasitesi (%)	Porozite (%)
KONTROL	3,20	7,13
5HV	1,58	3,54
10HV	1,77	3,89
15HV	1,76	3,82
20HV	4,41	9,43
10HV(AGR.)	3,23	7,08
20HV(AGR.)	2,73	5,79
30HV(AGR.)	1,33	2,76
40HV(AGR.)	1,91	3,91
5GV	4,66	9,93
10GV	4,55	9,04
15GV	6,87	13,05
20GV	9,37	16,42

Tablo 5.8’deki değerlere göre KYH numunelerinin toplam su emme ve porozite grafikleri sırasıyla Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.8. Toplam su emme kapasitesi değişimleri



Şekil 5.9. Porozite değişimleri

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 incelendiğinde toplam su emme ve porozite grafikleri Şekil 5.7'deki kapiler su emme grafiğiyle benzerlik göstermektedir. Ham vermikülit ikameli harçların toplam su emme ve porozite değerleri kontrol harcının değerlerinden genellikle düşükken genişletilmiş vermikülit ikameli harçlar yüksek su emme ve porozite değerlerine sahiptir. KYH numunelerinin birim hacim ağırlıkları arttıkça toplam su emme ve porozite değerleri artış göstermiştir. Porozitenin

artmasıyla birlikte harçlarda oluşan yerleşme boşlukları dayanım ve durabilite özelliklerini olumsuz etkileyebilir.

Gencel vd. [72] vermikülit kullanılarak elde edilen betonların ısı iletkenliğini yapay sinir ağları yaklaşımıyla belirlemişlerdir. Bu çalışmayı yaparken öncelikle 28 gün kürde bekletilen yüksek sıcaklığa maruz kalmamış numunelerin birim ağırlık, görünür porozite ve su emme gibi fiziksel özelliklerini tespit etmişlerdir. Vermikülit/çimento oranının artmasıyla, birim ağırlık azalırken görünür porozite ve su emme artmıştır. Tüm serilerde birim ağırlık 1,078 kg/m³ ile 1,332 kg/m³ arasında değişmiştir. Diğer yandan görünür porozite %29,9-37,4 ve su emme %24,4-34,6 aralığında değişmiştir. Bu sonuçlar geliştirilmiş vermikülit ilavesinin artışı sebebiyle artan boşluk oranına bağlanmıştır.

Sütçü [73] yaptığı çalışmada, ağırlıkça %2.5, %5, %7.5, %10 oranında geliştirilmiş vermikülit katkı maddesi ilave ederek gözenekli kil tuğlalar imal etmiştir. Farklı oranlarda vermikülit içeren karışımlar kurutulup ardından iki saat boyunca 900 °C ve 1000 °C yüksek sıcaklıklarda bekletilmiştir. Daha sonra bu numunelerin yoğunluğu, su emmesi, porozitesi, basınç dayanımı, ısı iletkenliği gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir. %10 geliştirilmiş vermikülit ilavesi, yoğunluğu 1,76 gr/cm³'ten 1,34 gr/cm³'e düşürmüştür. Geliştirilmiş vermikülit kullanılmayan numunelerde porozite ve su emme değerleri sırasıyla %31,3 ile %17,8 çıkarken, %10 vermikülit ilavesi bu değerleri %45,2 ve %33,6'ya yükseltmiştir. Kil tuğlaların yoğunluğu vermikülit katkısı arttıkça azalırken porozite ve su emme değerleri artmıştır. Su emme değerleri arttıkça tuğlaların dayanıklılığı azalmıştır. Sonuç olarak su emiliminin kil tuğlaların dayanıklılığını etkileyen önemli faktörlerden olduğu tespit edilmiştir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada mineral katkı maddesi olarak genleştirilmiş ve ham vermikülit çimento ve agrega yerine kullanılarak KYH numuneleri üretilmiştir. KYH numunelerinin işlenebilirlik ve kıvam özelliklerini belirlemek için mini çökme-yayılma ve viskozimetre deneyleri; mekanik özelliklerini belirlemek için eğilme çökme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Ek olarak tüm karışımlara ait numunelerin toplam su emme ve porozite değerleri bulunmuştur. Numunelerin dayanıklılık özelliklerinin tespiti için kapiler su emme deneyi uygulanarak kapiler su emme katsayısı hesaplanmıştır. Son olarak KYH numunelerine yüksek sıcaklık deneyi uygulanmıştır. Yapılan tüm deneylere göre elde edilen veriler değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Karışımların bağıl çökme-yayılma değerleri EFNARC (2002)'ın önerdiği referans değerler aralığında kalmıştır. GV ve HV miktarının artmasıyla karışımların su tutma kapasitelerinin de arttığı belirlenmiştir. Bu sebeple bağıl çökme yayılma değerlerinin EFNARC (2002)'ta belirlenen değerleri sağlaması için karışımların su/bağlayıcı oranları arttırılmıştır.
- Bağıl çökme yayılma değerleri birçok uygulama için kıvam ve işlenebilirlik açısından kabul edilebilir düzeydedir. GV ve HV katkılı KYH'ler, düşük yoğunluk ve ısı yalıtımı gibi önemli özelliklere sahip hafif beton üretiminde kullanılabilir [74].
- KYH karışımlarında GV kullanımı viskoziteyi arttırırken HV kullanılan numunelerin viskozite değerleri kontrol numunesiyle birbirine yakın çıkmıştır.
- KYH numunelerinin 3 ve 90 günlük kür sürelerinde eğilme dayanımları kontrol numunesine göre düşük çıkmıştır. 28 günlük kür süresinde HV kullanımı eğilme dayanımını arttırmış, GV kullanımı ise azaltmıştır.
- Çimento yerine HV katkılı numunelerin en yüksek eğilme dayanımları tüm kür sürelerinde %5 ikameli 5HV harcına, agrega yerine HV katkılı numunelerde en yüksek eğilme dayanımları %10 ikameli 10HV(AGR.) harcına aittir.
- KYH numunelerinin 3, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde basınç dayanımları kontrol numunesine göre düşüş göstermiştir. GV ve HV katkılı numunelerde ikame oranının artmasıyla basınç dayanımında azalma görülmüştür. En yüksek basınç dayanımları çimento yerine %5 oranında katkı kullanılan 5GV ve 5HV harçlarına aittir. Agrega yerine kullanılan HV katkılarında ise %10 ikame oranlı 10HV(AGR.) harçları en yüksek basınç dayanımına sahiptir.
- GV veya HV ilavesi KYH'lerde yoğunluğu azalttığından daha düşük basınç ve eğilme dayanımına yol açmaktadır. HV ile üretilen harçlarda basınç dayanım azalması, vermikülitin

gözenekli ve yumuşak yapısı ile zayıf dayanımlı olmasına bağlanabilir. Zayıf agrega çatlak yayılımına karşı daha düşük direnç sağlar ve harçların yük taşıma kapasitesini azaltır [74].

- 28 günlük kür süresi sonunda yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış GV ve HV ikameli KYH numunelerinde sıcaklık artışıyla beraber eğilme dayanımlarının azaldığı görülmüştür. HV ikameli numunelerde tüm yüksek sıcaklıklarda eğilme dayanımları kontrol numunesine göre artış göstermiştir. HV ikame oranının artmasıyla eğilme dayanımı azalmıştır. 300 °C, 600 °C ve 900 °C yüksek sıcaklıklarda sırasıyla 6,347 MPa, 4,715 MPa ve 2,025 Mpa değerleriyle en yüksek eğilme dayanımları %5 ikame oranlı 5HV harcına aittir.
- HV ikameli KYH'lerin en yüksek eğilme dayanım kayıpları 300 °C'de %41,71 oranıyla 15HV karışımına aitken, 600 °C ve 900 °C'de %54,19 ile %78,84 değerleriyle 20HV karışımına aittir. HV ikamesiyle eğilme dayanım kayıpları kontrol numunesine göre 300 °C ve 600 °C'de artarken, 900 °C'de eğilme dayanım kaybı azalmıştır.
- 28 günlük kür süreli HV ikameli numunelerin basınç dayanımlarında tüm yüksek sıcaklıklarda 20 °C oda sıcaklığındaki numunelere göre azalma meydana gelmiştir. 300 °C ve 600 °C'de tüm HV numunelerinin basınç dayanımları kontrol numunesine göre azalırken 900 °C'de 20HV harcı hariç artmıştır. En yüksek basınç dayanımları 300 °C, 600 °C ve 900 °C'de 5HV harcına ait olup değerleri sırasıyla 42,346 MPa, 35,146 MPa ve 15,583 MPa'dır.
- HV ikameli numunelerin basınç dayanım kayıpları 300 °C ve 900 °C'de %33,04 ve %72,24 değerleriyle 10HV karışımına aitken, 600 °C'de %38,28 değeriyle 20HV karışımına aittir. Basınç dayanım kaybı kontrol numunesine göre 900 °C'de azalmıştır.
- GV ikameli numunelerin eğilme dayanımları kontrol numunesine göre 300 °C'de azalırken, 600 °C'de 10GV karışımı hariç azalmıştır. 300 °C'de en yüksek eğilme dayanımı 5,410 MPa değeriyle 15GV karışımına, 600 °C'de ise 3,878 MPa değeriyle 10GV karışımına aittir. 900 °C'de GV katkılı numunelerin eğilme dayanımları kontrol numunesinden yüksek çıkmış olup en yüksek dayanım 1,788 MPa değeriyle 10GV karışımında elde edilmiştir.
- GV ikameli numunelerin en yüksek eğilme dayanım kayıpları 300 °C'de 10GV karışımında, 600 °C ve 900 °C'de 5GV karışımında gözlemlenmiştir. 300 °C, 600 °C ve 900 °C'de en yüksek eğilme dayanım kayıpları sırasıyla %30,07, %50,67 ve %83,25 oranındadır. 300 °C'de eğilme dayanım kaybı kontrol numunesine göre 5GV ve 10GV karışımlarında artarken, 15GV ve 20GV karışımlarında azalmıştır. 600 °C ve 900 °C'de eğilme dayanım kayıpları kontrol numunesine göre azalmıştır.
- GV ikameli tüm numunelerin 20 °C'deki basınç dayanımları yüksek sıcaklıkla beraber düşüş göstermiştir. Tüm yüksek sıcaklıklarda GV katkılı numunelerin basınç dayanımları kontrol numunesine göre azalmış olup en yüksek basınç dayanımları %5 ikameli 5GV karışımında elde edilmiştir. Bu değerler 300 °C, 600 °C ve 900 °C'de sırasıyla 33,157 MPa, 32,114 MPa ve 13,576 MPa'dır.

- GV ikameli numuneler tüm yüksek sıcaklıklarda basınç dayanımı kaybına uğramıştır. En yüksek dayanım kayıpları 300 °C’de %33,44 değeriyle 10GV karışımında, 600 °C’de %36,84 değeriyle 20GV karışımında, 900 °C’de %71,70 değeriyle 5GV karışımında görülmüştür.
- KYH karışımlarının, hem HV hem de GV miktarı arttıkça yüksek sıcaklıktan daha fazla etkilendiği görülmüştür.
- Basınç dayanım değerleri ile su emme kapasiteleri arasında güçlü bir ilişki var olduğu söylenebilir. Bunun nedeni GV ve HV katkılı KYH’lerin katmanlar arasındaki suyu serbest bırakmaması ve vermikülit yapısındaki sudur [74].
- KYH numuneleri için yapılan kapiler su emme deney sonuçlarına göre su/bağlayıcı oranı arttıkça geçirimlilikte artmıştır. HV katkılı numunelerin 20HV harcı hariç diğer karışımlarda kapiler su emme katsayısında düşüş olmuştur. En yüksek kapiler su emme katsayısı 20HV karışımında, en düşük kapiler su emme katsayısı 5HV karışımında görülmüştür. HV’nin agrega yerine kullanıldığı karışımlarda ikame oranı arttıkça su/bağlayıcı oranı azaldığı için kapiler su emme katsayısı azalmıştır.
- GV katkılı numunelerin kapiler su emme katsayıları kontrol numunesinden daha fazla olup, en yüksek kapiler su emme katsayısı 20GV karışımında, en düşük ise 10GV karışımında elde edilmiştir. GV ikameli karışımların kapiler su emme katsayılarının artması, geçirimliliği arttırmış ve dayanımı olumsuz etkilemiştir.
- HV ve HV(AGR.) ikamesiyle elde edilen karışımların porozite ve toplam su emme oranları kontrol numunesi değerleriyle benzerken, GV ikameli karışımların porozite ve toplam su emme oranları kontrol numunesinden yüksektir. GV kullanımı karışımların su emme oranını arttırmıştır.
- KYH karışımlarının geçirimliliği arttıkça poroziteleri dolayısıyla toplam su emme değerleri de artmıştır.
- Yüksek porozite değerleri, vermikülitin gözenekli yapısı ve yüksek su emme kapasitesinden kaynaklanmıştır [74].

KAYNAKLAR

- [1] Topçu, İ.B., Canbaz, M., Karakurt, C. (2006). Beton üretiminde kimyasal katkı kullanımı, Gazi Üniversitesi, Politeknik Dergisi, Cilt 9, Sayı 1, 59-63
- [2] Okamura, H., Ouchi M. (1999). Self-compacting concrete. Development, present use and future. Proceedings of the First International RILEM Symposium, Edited by A.Skarendahl and Ö. Petersson, p., 3-14
- [3] Şengül, C. (2005). Kendiliğinden Yerleşen Çelik Lif Donatılı Betonların Mekanik Davranışına Su/İnce Malzeme Oranı ile Lif Dayanımının Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] EFNARC, (2002). "Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete", Association House, 99 West Street, Farnham, Surrey GU9 7EN, UK.
- [5] ASTM C618, (1998). Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, No.4.
- [6] Strand, P.R. (1983). Vermiculite, Industrial Minerals And Rocks, ed: Lefond S. J., Vol: 2, AIME, 1375-81.
- [7] Loughbrough, R. (1991). Minerals in Lightweight Insulation, Industrial Minerals, October, 21-35.
- [8] Potter, M.J. (1991). Vermiculite. Ceramic Bulletin, 70(5), 887-888
- [9] Potter, M.J. (1992). Vermiculite. Ceramic Bulletin, 71(5), 820.
- [10] Aydın, S. ve Baradan, B. (2003). Yüksek sıcaklığa dayanıklı harç geliştirilmesi, DMO, 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-3 Ekim, İstanbul, 451-460.
- [11] Khoury, G.A. (2003). "Fire & Assessment", International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- [12] Schrefler, B.A., Gawin, D., Khoury, G.A. and Majorana, C.E. (2003). Course on effect of heat on concrete, Physical, Mathematical & Numerical Modelling, International Centre for Mechanical Sciences, Udine/Italy.
- [13] Medri, V., Papa, E., Mazzocchi, M., Laghi, L., Morganti, M., Francisconi, J., Landi, E. (2015). Production and characterization of lightweight vermiculite/geopolymer-based panels, Mater. Des. 85, 266-274
- [14] Divya, M.R., Rajalingam, M., George, S. (2016). "Study on Concrete with Replacement of Fine aggregates by Vermiculite", International Journal of New Technology and Research, Volume 2, Issue-5, pages 87-89.
- [15] Chandra, S.G., Ch, H.K., Manikanta, V., Simhachalam, M. (2016). Effect of fly ash on mechanical properties of light weight vermiculite concrete, Int. J. Innovative Res. Sci., Eng. Technol. (IJIRSET) 5 (3), 4106-4112.
- [16] Koksall, F., Gencel, O., Brostow, W., Lobland, H.E.H. (2012). Effect of high temperature on mechanical and physical properties of lightweight cement based refractory including expanded vermiculite, Mater. Res. Innovations 16 (1), 7-13.
- [17] Sharmila, S., Vijayan, L. (2016). Experimental Investigation on Thermo Proof Construction Using Vermiplast, World Journal of Engineering Research and Technology, Vol. 2, Issue-3, pages 96-101.
- [18] Karataş, M., Benli, A. (2019). Uçucu kül ve silis dumanı ikameli üçlü karışımlardan üretilen kendiliğinden yerleşen harçların durabilite ve dayanım özellikleri, DÜMF Mühendislik Dergisi, 10:1, s. 335-345.

- [19] Jin, J., Domone, P.L. (2002). Relationships between the fresh properties of SCC and its mortar component, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete.
- [20] Sağlam, A.F. ve Özkul, M.H. (2006). Kendiliğinden yerleşen betonların reolojik özelliklerine bileşim parametrelerinin etkisi, İTÜ Dergisi, 5, 239-25.
- [21] Okamura, H. and Ouchi, M. (2003). Self compacting concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 5-15.
- [22] Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Özbay, E. (2007). Mineral Katkılar Kullanılarak Elde Edilen Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri, 7. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 28-30 Kasım, s. 87-98.
- [23] Ozawa, K., Maekawa, K., Kunishima, M., Okamura, H. (1989). "Development of High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures", In Proceedings of the Second East-Asia and Pasific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), Vol. 1, January, pp. 445-450.
- [24] Ozawa, K., Tagtermsirikul, S. and Maekawa, K. (1992). "Role of Materials on the Filling Capacity of Fresh Concrete", In Proceedings of the Fourth CANMET and ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, American Concrete Institute, May, pp. 212-137.
- [25] Okamura, H. & Ozawa, K. (1994). Self-compactable high- performance concrete in Japan, SP-169, pp.31-44, ACI , November.
- [26] Rols, S., Ambroise, J., Pera, J. (1999). Effect of Different Viscosity Agents on The Properties of Self-Leveling Concrete, Cement and Concrete Research, 29, 2, 261-266.
- [27] Sağlam, A.R., Parlak, N., Doğan, Ü.A. ve Özkul, M.H. (2004). Kendiliğinden Yerleşen Beton ve Katkı-Çimento Uyumu", Beton 2004 Kongre Bildiri, İstanbul.
- [28] Neville, A.M. (1995). Properties of Concrete. Lorigrnan, NewYork
- [29] Erdoğan, T.Y. (1995). 'Betonu Oluşturan Malzemeler-Agregalar' Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını, İstanbul.
- [30] EFNARC, (2005). The European Guidelines for Self Compacting Concrete Specification, production and use, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC), pp. 68.
- [31] Ouchi, M. (1999). "Self-compacting concrete - Development, applications and investigations", Nordic Concrete Research Committee Publications, 5p.
- [32] Sari, M., Prat, E., Labastire, J.F. (1999). "High strength self-compacting concrete - Original solutions associating organic and inorganic admixtures", Cem. Concr. Res., Vol: 29, pp. 813-818.
- [33] Khurana, R., Topçu, O. (2000). "Role of Superplasticizers in the development of self compacting concrete", Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s, Volume I, Istanbul, Turkey, pp. 473-482.
- [34] TS EN 1008, (Nisan 2003). Beton - Karma Suyu - Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [35] Açar, E., Sütas, İ., Öztas, G. (1998). " Beton Yollar", İTÜ, İstanbul.
- [36] Erdogan, T.Y. (2003). Beton, ODTÜ Gelistirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.S Yayını. <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf> EFNARC 2005, European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification and Production and Use. 20 Mart 2013.

- [37] TS EN 934-2, (2002). Kimyasal Katkılar -Beton, Harç ve Şerbet için- Bölüm 2: “Beton Katkıları Tariler, Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [38] Kandemir, G., Mutlu, M., Sağlam, A.R., Parlak, N. (2003). Aşırı Dozda Katkı Kullanımının Beton Özelliklerine Etkileri, 5. Ulusal Beton Kongresi, Betonun Dayanıklılığı, İstanbul, Sf. 133-142
- [39] Doğan, Ü.A. (2000). Yeni Kuşak Süper Akışkanlaştırıcıların Harç ve Beton Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [40] Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., Matsuhisa, M. (2000). “Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer”, Cem. Concr. Res., Vol: 30, pp. 197-207
- [41] Uyan, M., Pekmezci, B.Y. ve Yıldırım, H. (2003). Akışkanlaştırıcı Katkı Kür ve Koşullarının Betonun Geçirimlilik Özellikleri Üzerine Etkileri, Sika Teknik Bülten, 1, 10–14.
- [42] Uyan, M. (1982). ııl İşlem Uygulaması ile Birlikte Katkı Kullanımının Beton Özelliklerine Etkisi, Doçentlik Tezi, İnşaat Fakültesi, İSTANBUL
- [43] Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, (2001). Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri III, Pomza-Perlit-Vermikülit-Flogopit-Genleşen Killer, Çalışma Grubu Raporu, DPT: 2617 - ÖİK: 628, Ankara.
- [44] Meisinger, C.A. (1985). Vermiculite, Mineral Facts and Problems, Vol: 1, US Bureau of Mines, 917-922.
- [45] Toksoy, F. (1997). Vermikülit : Mineraloji, Jeolojik Oluşum, Endüstriyel Kullanım ve Türkiye’deki Durumu, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, Dokuz Eylül Üniversitesi, 16-17 Ekim, İzmir, Türkiye, 123-139.
- [46] URL-1 <http://www.cnvermiculite.com/Vermiculite-Product/Vermiculite/vermiculite.html> Son Erişim 03.01.2020
- [47] URL-2 <http://www.cnvermiculite.com/Vermiculite-Product/Vermiculite/215.html> Son Erişim 03.01.2020
- [48] TS-5763, (1988). Vermikülit-Isı Yalıtımında Gevşek Dolgu Olarak Kullanılan, 13 Sayfa (İptal edilmiş standart)
- [49] Harben, P.W., Kuzvart, M. (1996). Industrial Minerals, Global Geology. Ind. Mins. Inf. Ltd. Metal Bulletin, Pic, 462 p., London.
- [50] Potter, M.J. (1994). American Ceramic Society Bulletin, 73(6), 137-138.
- [51] Mineral Commodity Summaries, (2000). U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- [52] Reichl, C., Schatz, M., World Mining Data, (2019). Iron and Ferro-Alloy Metals Non-Ferrous Metals Precious Metals Industrial Minerals, Mineral Fuels, Vol:34., p. 262.
- [53] Aras, A., (1984). Malatya-Darende-Kuluncak-Darılı Vermikülit Zuhuru Jeoloji Raporu, MTA Rapor No: 1725.
- [54] Üçgül, E. (1997). Sivas-Yıldızeli-Karakoç Flogopit Cevherinin Isısal ve Kimyasal Genleşme Özellikleri, H.Ü. Yüksek Mühendislik Tezi, 71 s.
- [55] URL-3 <https://www.vermiculite.org/> Son Erişim 03.01.2020
- [56] <http://tur.sika.com/tr> SikaViscoCreteHi-Tech 36, Yüksek Performanslı Hiper Akışkanlaştırıcı Beton Katkısı, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. Teknik Bilgi Föyü.
- [57] Karataş, M. (2007). Mineral Katkı Dozajının ve Türünün Kendiliğinden Sıkışan Betondaki Donatı Aderansına Etkisi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- [58] TS EN 196-1, (2002). Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [59] TS EN 12390-7, (2010). Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [60] TS 4045, (1984). Yapı malzemelerinde kapiler su emme tayini, TSE, Ankara.
- [61] TS EN 1363-1, (2001). Yangına Dayanıklılık Deneyleri - Bölüm 1:Genel Kurallar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [62] TS EN 1363-2, (2002). Yangına Dayanıklılık Deneyleri - Bölüm 2: Alternatif ve İlave İşler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [63] Sairam, A.V.V., Sailaja, K. (2017). An Experimental Study on Strength Properties of Vermiculite Concrete Using FlyAsh as Partially Replacement of Cement and Silica Fume As Mineral Admixture, International Research Journal of Engineering and Technology, Vol. 04, No. 05, pp. 659-664.
- [64] Shoukry, H., Kotkata, M.F., Abo-EL-Enein, S.A., Morsy, M.S., Shebl, S.S. (2016). Enhanced Physical, Mechanical and Microstructural Properties of Lightweight Vermiculite Cement Composites Modified with Nano Metakaolin, Construction and Building Materials, Vol. 112, pp. 276-283.
- [65] Schackow, A., Effting, C., Folgueras, M.V., Güths, S., Mendes, G.A. (2014). Mechanical and Thermal Properties of Lightweight Concretes with Vermiculite and EPS Using Air-Entraining Agent, Construction and Building Materials, Vol. 57, pp. 190-197.
- [66] Sarshar, R. and Khoury, G.A. (1993). Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures, Magazine of Concrete Research, 45, 162, 51-61.
- [67] Mehta, P.K., Monterio, P.J.M. (1997). Concrete microstructure, Properties and materials, Indian Concrete Institute, 548 p.
- [68] Lin W.M., Lin, T.D., Powers-Couche, L.J. (1996). Microstructures of fire damaged Concrete, ACI Materials Journal, 93, No:3, 199-205 p.
- [69] Akman, S. (2000). Yapı hasarları ve onarım ilkeleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi.
- [70] Köksal, F., Gencel, O., Kaya, M. (2015). Combined Effect of Silica Fume and Expanded Vermiculite on Properties of Lightweight Mortars at Ambient and Elevated Temperatures, Construction and Building Materials, Vol. 88, pp. 175-187.
- [71] El-Gamal, S.M.A., Hashem, F.S., Amin, M.S. (2012). Thermal Resistance of Hardened Cement Pastes Containing Vermiculite and Expanded Vermiculite, J. Therm. Anal. Calorim., Vol. 109, pp. 217-226.
- [72] Gencel, O., Koksall, F., Sahin, M., Durgun, M.Y., Hagg Lobland, H.E., Brostow, W. (2013). Modeling of thermal conductivity of concrete with vermiculite by usingartificial neural networks approaches, Experimental Heat Transfer 26, 360–383.
- [73] Sutcu, M. (2015). Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks, Ceram. Int. 41, 2819–2827.
- [74] Karataş, M., Benli, A., Toprak, H.A. (2019). Effect of incorporation of raw vermiculite as partial sand replacement on the properties of self-compacting mortars at elevated temperature, Construction and Building Materials, Vol. 221, 163-176.

ÖZGEÇMİŞ

Hasan Anıl TOPRAK

KİŞİSEL BİLGİLER

Doğum Yeri : Elazığ
Doğum Yılı : 1993
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Adres : İller Bankası A.Ş. Diyarbakır Bölge Müdürlüğü
E-posta : atoprak@ilbank.gov.tr
Yabancı Diller : İngilizce

EĞİTİM BİLGİLERİ

Lisans : Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2016
Lise : Elazığ Anadolu Lisesi, Elazığ, 2011

İŞ DENEYİMİ

B. YIL – ... : 2018 – Devam ediyor.

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. Karataş, M., Benli, A., Toprak, H.A. (2019). Effect of incorporation of raw vermiculite as partial sand replacement on the properties of self-compacting mortars at elevated temperature, Construction and Building Materials, Vol. 221, 163-176.
2. Karataş, M., Benli, A., Toprak, H.A. (2020). Mechanical characteristics of self-compacting mortars with raw and expanded vermiculite as partial cement replacement at elevated temperatures, Construction and Building Materials, Vol. 239, No:117895.