

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MİKRODALGA KÜRÜNE İLAVE HAVA KÜRÜ
SÜRESİNİN F SINIFI UÇUCU KÜL GEOPOLİMER
DAYANIMI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

**Hazırlayan
Moath IBRAHİM ALİ KWAMI**

**Danışman
Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ**

Yüksek Lisans Tezi

**Ağustos 2020
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MİKRODALGA KÜRÜNE İLAVE HAVA KÜRÜ
SÜRESİNİN F SINIFI UÇUCU KÜL GEOPOLİMER
DAYANIMI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

**Hazırlayan
Moath İBRAHİM ALİ KWAMI**

**Danışman
Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ**

**Ağustos 2020
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Moath Ibrahim Ali KWAMI



YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI

“ Mikrodalga Kürüne İlave Hava Kürü Süresinin F Sınıfı Uçucu Kül Geopolimer Dayanımı Üzerindeki Etkisi ” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

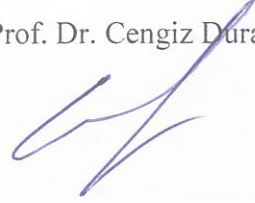
Hazırlayan

Moath Ibrahim Ali KWAMI



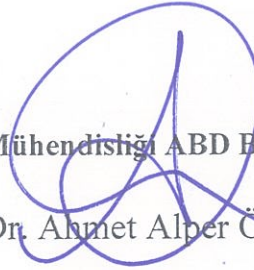
Danışman

Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ



İnşaat Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Ahmet Alper ÖNER



Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ danışmanlığında **Moath Ibrahim Ali KWAMİ** tarafından hazırlanan “ **Mikrodalga Kürüne İlave Hava Kürü Süresinin F Sınıfı Uçucu Kül Geopolimer Dayanımı Üzerindeki Etkisi** ” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında **yüksek lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

/ 08 / 2020

JÜRİ:

Danışman : Unvan İsim SOYİSİM

Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ

Üye : Unvan İsim SOYİSİM

.....

Üye : Unvan İsim SOYİSİM

.....

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun tarih vesayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... / /

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Bana çalışmalarım süresince her türlü yardımı ve fedakârlığı sağlayan, danışmanlığımı üstlenen, çalışmamın gerçekleşmesi için gerekli ortamı sağlayan, çalışmalarımın en küçük ayrıntısına kadar ilgilenen, anlayış ve yardımlarını esirgemeyen, her zaman destek olan hocam sayın Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ'e gönülden teşekkür ederim.

Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarlarındaki çalışmalarımda yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi. Serhan İLKENTAPAR ve Arş. Gör. Uğur DURAK'a teşekkür ederim.

Beni yetiştiren ve hayatımın her kademesinde bana destek olan ve bu seviyeye gelmemde maddi ve manevi yardımlarını hiç bir zaman esirgemyip büyük fedakârlıklarda bulunarak bana daim destek olan sevgili Babama, Anneme ve kardeşlerime teşekkür ederim.

Moath Ibrahim Ali KWAMİ

Ağustus 2020, KAYSERİ

MİKRODALGA KÜRÜNE İLAVE HAVA KÜRÜ SÜRESİNİN F SINIFI UÇUCU KÜL GEOPOLİMER DAYANIMI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Moath Ibrahim Ali KWAMI

**Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2020
Danışman: Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ**

ÖZET

Bu çalışmada, Mikrodalga kürüne ilave hava kürü süresinin geopolimerin dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Geopolimer üretiminde alkali aktifleştirici olarak sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Çalışmada, çeşitli sürelerle mikrodalga ve hava kürünün F sınıfı uçucu kül harçların mekanik ve bazı fiziksel özelliklerine etkisi üzerinde durulmuştur. Geleneksel ısıtma tekniği için, ısı numunede dıştan içe doğru dağıtılır ve bu da istenen sıcaklığa ulaşmak için homojen olmayan ve uzun ısıtma süresine yol açar. Geleneksel ısıtma, 6 saat boyunca yüksek sıcaklık 75 ° C'de uygulanmıştır, Daha sonra mikrodalga kürlemesi farklı sürelerde (15, 30, 45, 60, 75 ve 90 dakika) ve 180 W enerji seviyesinde uygulanmıştır, daha sonra numuneler havada farklı sürelerde kürlenmiştir. Geopolimer harç numuneleri üzerinde eğilme dayanımı, basınç dayanımı, işlenebilirlik ve su emme deneyleri yürütülmüştür. 6 saat boyunca konvansiyonel ısıtma, mikrodalga ve havada farklı süre kür edilmesinin, sadece geleneksel ısıtmada 24 saat boyunca kürlenenlere kıyasla daha yüksek dayanım verdiği görülmüştür. 75° C'de 6 saat geleneksel ısıtmadan sonra mikrodalgada 90 dakika ve havada (23° C'de) 6 ay ilave kür ile 94 MPa civarında basınç dayanımı elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, Geopolimer, Mikrodalga kürü, hava kürü, alkali aktivasyon

**THE EFFECT OF ADDITIONAL AIR CURING TIME TO THE MICROWAVE
CURING ON THE STRENGTH OF F CLASS FLY ASH-BASED
GEOPOLYMER**

Moath Ibrahim Ali KWAMI

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis August 2020

Supervisor: Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ

ABSTRACT

In this study, the effect of air curing time added to the microwave curing on the strength of the geopolymer was investigated. Sodium hydroxide NaOH alkali activator is used in the production of a geopolymer. The study focuses on the effects of microwave and air curing on the mechanical and some physical properties of F class fly ash mortars for various periods. For the conventional heating technique, the heat is dissipated from the outside to the interior in the sample, resulting in inhomogeneous and long heating time to reach the desired temperature. Conventional heating was applied at high temperature 75 ° C for 6 hours, then microwave curing was applied at different times (15, 30, 45, 60, 75 and 90 minutes) and at 180 W energy level, then samples were observed to be cured at different times in the air. Tensile strength, compressive strength, workability, and water absorption experiments were carried out on geopolymer mortar samples. It has been found that curing at different times in conventional heat, microwave, and air for 6 hours gives higher resistance compared to those cured for 24 hours only in conventional heating. After 6 hours of conventional heating at 75 ° C, a compressive strength of around 94 MPa was obtained with additional curing in the microwave for 90 minutes and 6 months in the air (at 23 ° C).

Keywords: Fly ash, Geopolymer, microwave curing, air curing, alkali activation,

İÇİNDEKİLER

MİKRODALGA KÜRÜNE İLAVE HAVA KÜRÜ SÜRESİNİN F SINIFI UÇUCU KÜL GEOPOLİMER DAYANIMI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI.....	iii
ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii

1. BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Literatür Çalışması	4

2. BÖLÜM

AMAÇ ve ÖNEMİ

3. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Malzemeler	9
3.1.1. Uçucu Kül	9
3.1.1.1. Uçucu Kül Kimyasal Bileşimi	10
3.1.1.2 Fiziksel Özellikleri	10
3.1.2. Su	11
3.1.3. Kum	11
3.1.4. Alkali Aktivatör Olarak :Sodyum Hidroksit (NaOH).....	12

3.1.5. Mikrodalga Fırını.....	14
3.2. Karışım Oranları	14
3.3. Kür İşlemleri	16
3.3.1. Geleneksel kürü.....	16
3.3.2. Mikrodalga Kürü	17
3.3.3. Hava kürü	17
3.4. Deneyler	18
3.4.1. İşlenebilirlik Deneyi	18
3.4.2. Basınç dayanımı	19
3.4.3. Eğilme Dayanımı.....	20
3.4.4 Su Emme	21

4. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMALAR

4.1. Basınç dayanımı	22
4.1.1. Geleneksel ısı kürü	23
4.1.2. Mikrodalga kürü	23
4.1.3. Hava kürü	23
4.2. Eğilme dayanımı.....	32
4.2.1. Geleneksel kürleme	32
4.2.2. Mikrodalga kürleme	32
4.2.3. Hava kürleme	32
4.3. Su emme	41
4.4. İşlenebilirlik Deney Sonuçları.....	42

5. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar	44
5.2 Öneriler	45
KAYNAKÇA	46
ÖZGEÇMİŞ.....	49

KISALTMALAR

ABD	: Amerikan Birleşik Devletleri
ACI	: American Concrete Institute
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CEN	: Avrupa Standardizasyon Komitesi
E1	: Referans numunesinin eğilme dayanımı
E2	: Havada kürlemeyen numunesinin eğilme dayanımı
E3	: Havada 3 gün kürleyen numunesinin eğilme dayanımı
E4	: Havada 7 gün kürleyen numunesinin eğilme dayanımı
E5	: Havada 28 gün kürleyen numunesinin eğilme dayanımı
E6	: Havada 90 gün kürleyen numunesinin eğilme dayanımı
E7	: Havada 180 gün kürleyen numunesinin eğilme dayanımı
G1	: Referans numunesinin basınç dayanımı
G2	: Havada kürlemeyen numunesinin basınç dayanımı
G3	: Havada 3 gün kürleyen numunesinin basınç dayanımı
G4	: Havada 7 gün kürleyen numunesinin basınç dayanımı
G5	: Havada 28 gün kürleyen numunesinin basınç dayanımı
G6	: Havada 90 gün kürleyen numunesinin basınç dayanımı
G7	: Havada 180 gün kürleyen numunesinin basınç dayanımı
TS	: Türk Standartları

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1.	Uçucu külün ASTM sınıflandırması için kimyasal kriterler (ASTM 2015)	3
Tablo 1.2.	TS EN 197-1'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması	3
Tablo 3.1.	CEN standart kum granulometrisi	12
Tablo 3.2.	NaOH'un kimyasal kompozisyonu	13
Tablo 3.3.	Karışım oranları	15
Tablo 4.1.	Havada kürlemeyen numunelerin basınç dayanımı	24
Tablo 4.2.	Havada 3 gün kürlenmeden sonra basınç dayanımı	24
Tablo 4.3.	Havada 7 gün kürlenmeden sonra basınç dayanımı	25
Tablo 4.4.	Havada 28 gün kürlenmeden sonra basınç dayanımı	26
Tablo 4.5.	Havada 56 gün kürlenmeden sonra basınç dayanımı	27
Tablo 4.6.	Havada 3 ay kürlenmeden sonra basınç dayanımı	28
Tablo 4.7.	Havada 6 ay kürlenmeden sonra basınç dayanımı	29
Tablo 4.8.	Geopolimer Harcın Basınc Dayanımı Sonuçları	31
Tablo 4.9.	Havada kürlenmeyen numunelerin eğilme dayanımı	33
Tablo 4.10.	Havada 3gün kürlenmeden sonra eğilme dayanımı	33
Tablo 4.11.	Havada 7 gün kürlenmeden sonra eğilme dayanımı	34
Tablo 4.12.	Havada 28 gün kürlenmeden sonra eğilme dayanımı	35
Tablo 4.13.	Havada 56 gün kürlenmeden sonra eğilme dayanımı	36
Tablo 4.14.	Havada 3ay kürlenmeden sonra eğilme dayanımı	37
Tablo 4.15.	Havada 6ay kürlenmeden sonra eğilme dayanımı	38
Tablo 4.16.	Geopolimer Harcın Eğilme Dayanımı Sonuçları	40
Tablo 4.17.	Geopolimer Harcın Su Emme Sonuçları	41

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Uçucu kül F sınıfı	10
Şekil 3.2.	Uçucu kül C sınıfı	13
Şekil 3.3.	4000 büyütmede uçucu kül	11
Şekil 3.4.	2000 büyütmede uçucu kül	14
Şekil 3.5.	CEN standart kum.....	12
Şekil 3.6.	NaOH çözeltisi hazırlanması	13
Şekil 3.7.	Mikrodalga kürlenme için kullanılan mikrodalga fırını	14
Şekil 3.8.	Karışım hazırlanması	15
Şekil 3.9.	Kullanılan kalıp görünümü	16
Şekil 3.10.	Etüvde kür uygulaması	16
Şekil 3.11.	Mikrodalgada kürlenmesi	17
Şekil 3.12.	Numunelerin Havada kürlenmesi	18
Şekil 3.13.	Yayılma tablası görünümü.....	19
Şekil 3.14.	Basınç dayanımı testi.....	20
Şekil 3.15.	Eğilme dayanımı testi	21
Şekil 3.16.	Su emme testi.....	21
Şekil 4.1.	Basınç dayanım testinde kullanılan örnekler	22
Şekil 4.2.	Mikrodalga kürlenmenin, havada kürlenmeyen ve 3 gün havada kürlen numunelerin üzerine etkisi.....	25
Şekil 4.3.	Mikrodalga kürlenmenin, havada kürlenmeyen ve 7 gün havada kürlen numunelerin üzerine etkisi.....	26
Şekil 4.4.	Mikrodalga kürlenmenin, havada kürlenmeyen ve 28 gün havada kürlen numunelerin üzerine etkisi.....	27
Şekil 4.5.	Mikrodalga kürlenmenin, havada kürlenmeyen ve 56 gün havada kürlen numunelerin üzerine etkisi.....	28
Şekil 4.6.	Mikrodalga kürlenmenin, havada kürlenmeyen ve 3 ay havada kürlen numunelerin üzerine etkisi.....	29
Şekil 4.7.	Mikrodalga kürlenmenin, havada kürlenmeyen ve 6 ay havada kürlen numunelerin üzerine etkisi.....	30
Şekil 4.8.	Mikrodalga ve hava kür süresinin basınç dayanıma etkisi.	31
Şekil 4.9.	Mikrodalga kürlenmenin, havada kürlenmeyen ve 3 gün havada kürlen numunelerin eğilme dayanımının üzerine etkisi.....	34

Şekil 4.10.	Mikrodalga kürlemenin, havada kürlemeyen ve 7 gün havada kürlenene numunelerin eğilme dayanımının üzerine etkisi.....	35
Şekil 4.11.	Mikrodalga kürlemenin, havada kürlemeyen ve 28 gün havada kürlenene numunelerin eğilme dayanımının üzerine etkisi.....	36
Şekil 4.12.	Mikrodalga kürlemenin, havada kürlemeyen ve 56 gün havada kürlenene numunelerin eğilme dayanımının üzerine etkisi.....	37
Şekil 4.13.	Mikrodalga kürlemenin, havada kürlemeyen ve 3 ay havada kürlenene numunelerin eğilme dayanımının üzerine etkisi.....	38
Şekil 4.14.	Mikrodalga kürlemenin, havada kürlemeyen ve 6 ay havada kürlenene numunelerin eğilme dayanımının üzerine etkisi.....	39
Şekil 4.15.	Mikrodalga ve hava kür süresinin eğilme dayanıma etkisi.	40
Şekil 4.16.	Mikrodalga ve hava kür süresinin su emmesine etkisi.	42
Şekil 4.17.	İşlenebilirlik testi	43

1. BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Geleneksel beton, esas olarak düşük maliyeti, bulunabilirliği, uzun dayanıklılığı ve aşırı hava koşullarını sürdürme kabiliyeti nedeniyle dünyanın en eski ve en yaygın inşaat malzemelerinden biridir. Dünya çapında beton üretimi tonajlı çeliğin 10 katıdır [1]. Beton, çimento, agrega ve su karıştırılarak yapılmaktadır. Çimento son derece önemli bir yapı malzemesidir. Binalar, köprüler, limanlar ve yollar dahil olmak üzere modern dünyayı oluşturan birçok yapının üretiminde kullanılır. Binalardaki cepheler ve diğer dekoratif özellikler için de kullanılır. Tüm bu yapılara, gittikçe gelişmekte olan ülkelerden gelen sürekli talep, çimentonun dünyada sudan sonra en çok tüketilen ikinci meta olduğu anlamına gelmektedir [2]. Portland çimentosu, dünya genelinde genel olarak kullanılan en yaygın çimento türüdür. Bu çimento, kireçtaşı (kalsiyum karbonat) diğer malzemelerle ısıtılarak yapılır.

Diğer yandan, İklim değişikliği, atmosferdeki artan miktarda sera gazı, yani karbondioksit CO_2 , metan CH_4 ve azot oksit N_2O nedeniyle dünya çapında önemli bir sorun haline gelmiştir [3]. Çimento endüstrisindeki klinker üretim sürecinin, CO_2 gazının atmosfere salınmasıyla sera etkisine katkıda bulunduğu bilinmektedir: her ton klinkerin üretimi sırasında yaklaşık 0.9 ton CO_2 salınır [4]. Lobinin çevresel hareketlerin arkasındaki baskısı, tasarruf enerjisinin dikkate alınması ve çimentonun finansal harcamaları betonda çimento değişimi olarak yan ürün bağlama malzemeleri (silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, vb.) Kullanılarak güçlenir[5].

1979'da Davidovits, alüminosilikat bağlayıcıları alkalın aktivatörleri ile karıştırarak jeopolimer reaksiyonlardan kaynaklanan kompozit malzemelerin sertleştirilmesine yönelik kimyasal mekanizmayı keşfetti [6]. Uçucu kül çevre kirliliğine neden olur ve

uçucu külün depolanma maliyeti çok yüksektir [7]. Elektrik üretimi için yakıt olarak toz haline getirilmiş kömürün artan kullanımı nedeniyle, uçucu kül artık dünyanın birçok yerinde bulunmaktadır. Uçucu kül, 75µm (No. 200) bir elekten geçen yüzde 70-80 incelikte öğütülmüş ve öğütülmüş yanma kömürlerinin bir yan ürünü olarak üretilir. Amerika Birleşik Devletleri'nde yılda yaklaşık 63 milyon ton uçucu kül üretilmektedir [8]. Uçucu kül ve betonda kullanımı hakkında çok fazla bilgi mevcut olmasına rağmen, çok azı, hidrasyon ve tahmin ve iyileştirme için temel oluşturabilecek sertleştirme işlemi sırasında portland çimentosu ve uçucu kül arasındaki etkileşimlerin anlaşılmasına katkıda bulunur. betondaki uçucu külün performansı, uçucu kül içeren harçların ve betonların herhangi bir yaş ve mukavemet kazancı, uçucu külün pozolanik reaktivitesine, karışımın zenginliğine, agreganın karakterine ve derecesine, karışımın su içeriğine ve sertleştirme koşullarına bağlı olacaktır [9].

Geopolimerler şunları sağlamaktadır:

- Yüksek basınç dayanımı sağlamaktadır.
- Düşük sünme ve çok az kuruma rötresi sağlar.
- Sülfat saldırısına karşı dirençlidir.
- Acitlere ve bazı tuzlara karşı yüksek dirençlidir.
- Yangına karşı iyi direnç özelliklerine sahiptir.

Uçucu kül, amorf (camsı) ve kristalin fazların heterojen kombinasyonlarından oluşan karmaşık bir malzemedir. Uçucu külün en büyük kısmı, katı ve içi boş (cenosferler) olmak üzere iki tip camsı küreden oluşur. Bu camsı fazlar tipik olarak toplam uçucu kül kütlelerinin yüzde 60 ila 90'dır ve geri kalan uçucu kül, çeşitli kristalli fazlardan oluşur. Bu iki aşama birbirinden tamamen ayrı ve bağımsız değildir. Daha ziyade, kristal fazlar camsı bir matris içinde mevcut olabilir veya camsı kürelerin yüzeyine tutturulabilir. Bu aşamalar birliği uçucu külü belirli terimlerle sınıflandırmak ve karakterize etmek için karmaşık bir malzeme haline getirir[10].

Uçucu küller, kısmen külün pazarlanabileceği veya kullanılabileceği purpse bağlı olarak çeşitli şemalar altında sınıflandırılabilir. En yaygın standartlarda, TS EN 197-1, ASTM

C618 ve EN450 külü, Tablo 1.1'de özetlenen kriterler kullanılarak Tip F (düşük kireç) veya C (yüksek kireç) olarak sınıflandırılır. F Sınıfı uçucu kül puzolaniktir ve çimentolu bileşikler üretmek için Portland çimentosu veya sulu kireç eklenmesini gerektirir. C Sınıfı uçucu kül, hem puzolaniktir, hem de su varlığında hidrolik olarak çimentolu hidratlar oluşturur. Daha küçük, daha düşük seviyeli kömürlerin, ne jeolojik yaş ne de kömür sıralaması uçucu kül kimyasının mutlak bir öngörücüsü olarak düşünülmemelidir [11].

Tablo 1.1 Uçucu külün ASTM sınıflandırması için kimyasal kriterler (ASTM 2015)[12]

Kimyasal gereklilikler	Uçucu kül F sınıfı	Uçucu kül C sınıfı
Silikon dioksit, <u>Alüminyum dioksit</u> , Demir dioksit ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) , minmum%	70	50
<u>Sülfür trioksit</u> (SO_3), <u>maksimum</u> %	5,0	5,0
Nem muhtevası, maksimum %	3,0	3,0
Akkor kaybı, maksimum %	6,0	6,0

Tablo 1.2. TS EN 197-1'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması [13]

Sınıf	Tanım
V (Silissi)	Reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitden (Al_2O_3) oluşan; gerikalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis (SiO_2) miktarının %25'den fazla olan uçucu küller.
W (Kalkersi)	Reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenlerden oluşan, reaktif kireç (CaO) oranı %10'dan fazla, reaktif silis miktarı da %25'ten fazla olan uçucu küller.

Uçucu kül genellikle alümina ve silika öncüleri elde etmek için alkali çözeltisi ile karıştırılır. Alkali çözeltisi ile temas ettiğinde silikat türlerinin çözünmesi başlar [14]. Alkali çözeltisinin tipi ve konsantrasyonu uçucu külün çözünmesini etkiler. Al_3^+ ve Si_4^+ iyonlarının liçi potasyum hidroksit çözeltisine kıyasla sodyum hidroksit(NaOH) çözeltisi ile genellikle yüksektir. Bu nedenle, alkali konsantrasyonu uçucu kül parçacıklarından alümina ve silika sızmasını, müteakip jeopolimerizasyonu ve

sertleştirilmiş jeopolimerin mekanik özelliklerini kontrol etmede önemli bir faktördür [15].

Bununla birlikte, uçucu külün jeopolimer uygulaması sınırlıdır, çünkü uzun bir ısıl kürlenme süresine (4-96 saat) ihtiyaç duymaktadır [16]. ayrıca, geleneksel ısıl kürlemesi uygulanmasında, ısısının dış kenardan merkeze doğru hareket etmesini sağlamaktadır ve jeopolimerin mekanik özelliklerine etki eden ısı numuneler içinde eşit olmayan bir dağılım ısısı oluşturmaktadır. Geleneksel ısıtmanın aksine, mikrodalga ısıtması esas olarak mikrodalga fırının elektrik alanı bir malzeme ile etkileşime girdiğinde meydana gelir. Sahadaki enerji, malzemelerin moleküler bağlarına aktarılır. Bu enerji transferi, bağların titreşmesine neden olur ve malzeme içinde ısı dağılımına neden olur [17].

1.2. Literatür Çalışması

Khaleel, F., 2019, [18], Bu çalışma, mikrodalgada kürlemenin jeopolimerin dayanım gelişimi üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Geleneksel ısıtma ve mikrodalganın, sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktive edilen F sınıfı uçucu kül üzerindeki etkisi incelenmiştir. Geleneksel ısıtma, 6 ve 24 saat boyunca yüksek sıcaklık 75 ve 90 ° C'de uygulanmıştır, diğer taraftan mikro dalga kürlemesi farklı sürelerde (5-60 dakika) ve farklı enerji seviyelerinde (100,180,300 ve 450 W) uygulanmıştır. Sonuçlar, 6 saat boyunca konvansiyonel ısıl kürlemenin kullanılmasının ardından mikrodalga kürlemenin, sadece geleneksel ısıtmada kürlenenlere kıyasla daha yüksek dayanım (sodyum silikat ile aktive edilen örnekler için) verdiği görülmüştür. 6 saat geleneksel ısıtmadan sonra mikrodalgada 180 W ve 1 saat ilave kür ile 80 MPa seviyesinde basınç dayanımı elde edilmiştir. Öte yandan 24 saat geleneksel ısıtma 40 Mpa mertebesinde dayanım vermiştir. Çalışma sonucunda mikrodalga kürünün ısıl kürü oldukça kısalttığı ve ayrıca tatminkar basınç ve eğilme dayanımı geliştirdiğini rapor etmiştir.

Atiş, C.j, ve diğerleri. 2014 [19], bu çalışmada uçucu kül alkali ve ısı ile aktifleştirilerek jeopolimer harcın mekanik özellikleri üzerine ısıl kür süresinin etkisi araştırılmıştır. Geopolimer harçlar Sugözü F sınıfı uçucu külü, CEN referans kumu, sodyum hidroksit ve içme suyu kullanılarak çimentosuz olarak üretilmiştir. Karışım oranları ağırlıkça, kum/uçucu kül oranı 3, su/uçucu kül oranı 0,29 ve sodyum/uçucu kül oranı 0,1 olarak alınmıştır. Hazırlanan karışımlar 4 saat, 1 gün, 2 gün, 3 gün ve 7 gün süresince 75°C sıcaklıkta kür edilerek deneylere tabi tutulmuştur. Ayrıca eşdeğer karışımlar 4 saat, 1

gün, 2 gün, 3 gün ve 7 gün süresince 75°C sıcaklığında küre tabi tutulduktan sonra toplamda kür süresi 28 gün olacak şekilde laboratuvar ortamında ($23\pm 2^\circ\text{C}$ ve bağıl nemi $\%50\pm 5$) havada kür edilmiş olup, deneylere tabi tutulmuştur. Alkali ile aktive edilen uçucu kül harçların basınç dayanımı, eğilme çekme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı özellikleri ölçülmüştür. Isıl kür süresinin artmasıyla dayanımların önemli oranda etkilenecek arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, 75°C'lik Isıl kür ile 75 MPa mertebesinde basınç dayanımına ulaşılmıştır.

Binici, H., ve diğerleri. 2012 [20], çalışmada, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis kumu ve pomzanın NaOH ile aktive edilerek geopolimer beton üretiminde kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaçla 4x4x16 cm ve 10x10x10 cm boyutlarında geopolimer beton harçlar üretilmiştir. Numuneler 20 saat süresince 100 ve 150 C sıcaklığındaki etüvde bekletilmiştir. Numuneler üzerinde su emme, birim hacim ağırlık, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, ultrasonik ses geçirgenlik ve lineer soğurma katsayısı deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, yüksek fırın cürufu ile elde edilen geopolimerin su emme oranı diğer numunelere göre daha düşük bulunmuştur. Su emme değerleri fazla olan örneklerin Ultrasonik ses geçirgenlik hızları daha düşük bulunmuştur. Ayrıca bu numunelerin eğilme ve basınç dayanımları diğerlerine göre çok daha yüksek bulunmuştur. Ultrasonik ses geçiş hızları ile basınç dayanımı arasında belirli bir ilişki gözlenmiştir. Sonuçlar daha boşluksuz geopolimerlerin basınç dayanımlarının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Lineer soğurma katsayısı en yüksek olan numune yüksek fırın cürufu ile elde edilen geopolimerdir. Radyoaktif geçirgenliği en az olan bu malzeme radyasyon etkisine maruz kalan yapılarda kullanılabilir.

Topçu, İ., ve diğerleri 2009 [21], çalışmada Termik Santral taban külünün alkalilerle aktive edilerek hafif harç üretiminde kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaçla öğütülmüş taban külünün sodyum hidroksit ve sodyum silikat alkali çözeltileri kullanılarak 4x4x16 cm boyutlarında çimentosuz harç karışımları üretilmiştir. Numunelere 20 saat 75 C'de etüvde veya laboratuvarında 20 oC'de havada kür olmak üzere iki farklı kür uygulanmıştır. 1, 7 ve 28. günlerde numunelerin birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımları belirlenmiştir. En uygun numunenin birim ağırlığı 1,59 kg/dm³ ve basınç dayanımı 18,51 MPa, 80 donma-çözülme çevrimi sonucu dayanım kaybı % 11,5 olarak bulunmuş ve numune 400 °C'ye kadar termal stabilitesini korumuştur.

Somarathna, J., ve diğerleri, 2010 [22], bu çalışma, mikrodalga ile sertleştirilmiş NaOH aktifleştirilmiş uçucu kül harçlarının basınç dayanımını ve mikroyapı gelişimini tartışmakta ve bunları, dielektrik özelliklerinin bir fonksiyonu olan malzeme tarafından mikrodalga enerji emilimi ile ilişkilendirmektedir. Mikrodalga kür parametreleri, ısı kaçak etkilerini ortadan kaldıracak şekilde seçilir. 75 ° C'de 48 saat ısı ile kürlenmiş harçlarınkiyle karşılaştırılabilir veya ondan daha yüksek mukavemetler, 120 dakikadan daha az mikrodalga kürlenmesinde elde edilir. Harçlar tarafından enerji emme oranının, iç elektrik alanındaki artıştan dolayı nem kaybının bir sonucu olarak dielektrik kayıp faktörünün düşmesinin telafisine atfedilebilen, mikrodalga kürlenme süresinin önemli bir kısmı için nispeten sabit olduğu bulunmuştur. Basınç dayanımının, özellikle sistemde serbest suyun bulunduğu süre boyunca, numuneler tarafından emilen mikrodalga enerjisiyle ilişkili olduğu gösterilmiştir.

Atiş, C., 2005 [5], Bu çalışmada, Nemli ve kuru kürlenme koşullarında kürlenmiş yüksek hacimli uçucu kül silindiri sıkıştırılmış ve süper plastikleştirilmiş işlenebilir betonun mukavemet özelliklerini değerlendirmek için bir laboratuvar araştırması yapılmıştır. Normal Portland çimentosunun % 0, % 50 ve % 70 oranında iki farklı düşük kireç Sınıf F uçucu külü, iyi ve düşük kalitede değiştirilmesiyle yapılan beton karışımları hazırlanmıştır. Su çimentolu malzeme oranları 0,28 ile 0,43 arasında değişmektedir. Sıkıştırma, eğilme mukavemeti ve silindir bölme çekme mukavemetleri ölçülmüş ve sunulmuştur. Çalışma, yüksek mukavemetli beton üretiminin yüksek hacimli uçucu kül içeriği ile mümkün olduğunu göstermiştir. Tutuşma içeriğindeki kayıp taze betonun su ihtiyacını arttırılmıştır. Yüksek hacimli uçucu kül betonunun kuru kürlenme koşullarına sıradan portland çimentosu betonundan daha savunmasız olduğu bulunmuştur. Yüksek hacimli uçucu kül betonunun hem yapısal hem de kaldırım uygulamaları için yeterli bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır.

Rattanasak, U., ve diğerleri 2013 [23], Bu çalışmada, NaOH çözeltisi ile karıştırılmış uçucu külün süzülmesi ve jeopolimerin hazırlanması için karıştırma prosedürü üzerinde yapılmıştır. SiO₂ ve Al₂O₃'ün liçi, uçucu külün NaOH çözeltisi ile farklı zaman aralıklarıyla karıştırılmasıyla araştırılmış ve sızıntılar silika ve alümina muhtevası açısından analiz edilmiştir. Jeopolimer macunu yapmak için ayrı karıştırma ve normal karıştırma kullanılmıştır. Ayrı karıştırma için, NaOH çözeltisi ilk 10 dakika boyunca uçucu kül ile karıştırılmıştır, daha sonra karışıma sodyum silikat çözeltisi ilave

edilmiştir. Normal karıştırma için uçucu kül, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisi dahil edilmiş ve aynı zamanda karıştırılmıştır. Jeopolimerler, 48 saat boyunca 65 ° C'de kürlenmiştir. Hamurun mikro yapısı ve harcın basınç dayanımı araştırılmıştır. Sonuçlar uçucu külün çözünürlüğünün NaOH konsantrasyonuna ve NaOH ile karıştırma süresine bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Karıştırma prosedürü için, ayrı karıştırma normal karıştırmadan biraz daha iyi mukavemet harcı verdi. Karışım 10 M NaOH ve sodyum silikat: NaOH oranı 1.0 ile formüle edildiğinde ve ayrı karıştırma dizisi kullanıldığında 70.0 MPa'ya kadar yüksek mukavemetli jeopolimer harç elde edilmiştir.

Topçu İ., ve diğerleri 2011 [24] Bu çalışmada, cam ve ekstrüde polistiren ile üretilen 4x4x16 cm kalıplarda mikrodalga kürüne tabi tutulmuş uçucu kül (ağırlıkça% 10, 20 ve 30) harçların 8 saat, 7 ve 28 gün basınç dayanımı araştırılmıştır. 8 saatte mikrodalga sertleştirilmesi (45 dakika, 90 W) ile 23.67 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Cam ve ekstrüde polistiren kalıplar ile karşılaştırıldığında, cam kalıplar 8 saatlik basınç dayanımını% 10-30 arttırmıştır. Cam kalıplarda uçucu kül katkısı% 20, 8 saat, 7 ve 28 günlük basınç dayanımını sırasıyla% 31, 21 ve 16 oranında azaltmıştır.

Al Bakri, A., 2016 [25], Bu çalışmada, farklı kürlenme durumunun jeopolimer harca dayalı uçucu kül özelliklerine etkisi üzerine bir çalışma. Basınç dayanımı, sıcaklık ve sertleştirme işleminin bir fonksiyonu olarak araştırılmıştır. Sıcaklık ve kürlenme süreci, jeopolimer sentezinde kritik bir parametre olarak kabul edilir. Bu çalışmada, farklı kürlenme sıcaklığının ve farklı kürlenme süresinin jeopolimer macununun etkisi incelenmiştir. Bir numunenin basınç dayanımı, istenen sertleştirme sıcaklığı ve süresi ile her geçen gün artacaktır. Daha sonraki yaşlarda bozulma olmadan jeopolimerizasyon reaksiyonunun meydana geldiğini göstermektedir. Bu çalışmadan, 30 dakika ve 3 günlük kürlenme zamanında mikrodalga ile sertleşen küp, uçucu kül jeopolimeri için en uygun durumdur. Bu, mikrodalga kürlenmenin 2.3g/cm³ değerindeki fırın kürüne kıyasla en yüksek yoğunluğu verdiği yoğunluk hesaplamasından görülebilir. Ayrıca su emme testi de vermez. Tüm hedefe ulaşıldığı için çalışmanın sonucu tatmin edici bulunmuştur.

2. BÖLÜM

AMAÇ ve ÖNEMİ

Beton numunesi üretiminde kür süresinin uzun olması zaman kaybına neden olmaktadır. Bu sürenin minimuma inmesi yapılacak araştırmalar için önemli ölçüde avantaj sağlayacaktır. Bu amaçla bu tezde mikrodalga kürü kullanılarak kür süresinde azalma sağlanması hedeflenmektedir.

Geopolimer üretimi, temel olarak amorf kil ve benzeri malzemeler kullanılarak polimerize silikat veya alüminosilikat içeren bileşiklerin alkali ortamda sentezlenmesi yöntemine dayanmaktadır. Yüksek sıcaklıklara çıkılarak ergitme söz konusu değildir. Geopolimer prosesi bir füzyon sinterleme ya da eritme işlemi değil polimerleşme sürecidir. Bu nedenle yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonu açısından benzerlerinden avantajlıdır. Alkali ortamda Si-O-Al ve Si-O-Si kovalent bağ oluşumları ile polimerizasyon ilerler [26].

Uçucu kül kullanımı ile taze ve sertleşmiş betonun özelliklerinde iyileşme sağlanmaktadır [27]. Uçucu kül kullanımı ile çevre kirliliğini önlemek sürdürülebilirliği arttırmak beton özelliklerinin iyileşmesini sağlamak amaçlanmaktadır.

Uçucu kül tabanlı geopolimerlerin üretimi aşamasında genellikle belirli bir süre bir gün veya daha fazla ısıtma işlemi gereklidir. Bu nedenle ısıtma işlemi hızlandırmak amacıyla mikrodalga kullanılacaktır, ancak mikrodalga kürü hızlı olduğundan, mikrodalga küründen sonrada dayanımların devam etmesi beklenmektedir. Mikrodalga küründen sonra ilave kür süresinin içerisinde dayanım gelişiminin takibi ile ilgili çalışmalara yapılmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada mikrodalga kürüne ilave kür süresinin eklenmesiyle dayanımların değişim araştırılacaktır. İlave havada kür süresinin dayanım üzerine nasıl bir etkisi olduğunun araştırılması bu tezin amacıdır.

3. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez konvansiyonel ısıt işlemleri, mikrodalga ve havada kürü süresinin basınç dayanımı üzerindeki etkisini ve aynı zamanda eğilme dayanımını da incelemektedir.

Aynı zamanda, mikrodalga ve havada farklı kürleme süresi için su emme üzerindeki de incelemektedir.

Sonuçlar, 75 ° C'de 24 saat boyunca geleneksel kürleme yöntemiyle kürlenen kontrol numuneleri ve 6 saat boyunca konvansiyonel kürleme sıcaklığına (75 ° C) maruz bırakılıp numuneler farklı süre boyunca (15, 30, 45, 60,75 ve 90 dk.) 180 W'de mikrodalga kürüne maruz bırakıldıktan sonra direk dayanımın sonuçları ile karşılaştırılmaktadır.

3.1. Malzemeler

3.1.1. Uçucu Kül

Bu çalışmada, beton üretmek için Portland veya diğer hidrolik çimento macunu yerine bağlayıcı olarak düşük kalsiyum F Sınıfı uçucu kül bazlı jeopolimer kullanılır. Uçucu kül bazlı jeopolimer macunu, agregatları ve diğer reaksiyona girmemiş malzemeleri, katkı maddeleri olsun veya olmasın, jeopolimer betonu oluşturmak üzere birbirine bağlar [28].

Amerikan beton enstitüsü (ACI) Komitesi 116R'ye göre, uçucu kül 'öğütülmüş veya toz kömürün yanmasından kaynaklanan ve baca gazları tarafından yanma bölgesinden partikül giderme sistemine taşınan ince bölünmüş kalıntı' olarak tanımlanmaktadır [29]. Uçucu kül, atmosfere deşarj edilmeden önce mekanik olarak veya elektrostatik çöktürücüler kullanılarak toz toplama sistemi ile yanma gazlarından uzaklaştırılır.

Uçucu kül parçacıkları tipik olarak küreseldir, Portland çimentosu ve kireçten daha incedir.

3.1.1.1. Uçucu Kül Kimyasal Bileşimi

Dökme kimyasal bileşim, TS EN 197-1 ve ASTM C 618 tarafından uçucu külü Sınıf C ve Sınıf F olmak üzere iki tipte sınıflandırmak için kullanılmıştır. SiO_2 (yüzde 35 ila 60), Al_2O_3 (yüzde 10 ila 30) Fe_2O_3 (yüzde 4 ila 20), CaO (yüzde 1 ila 35) olmak üzere dört ana bileşen miktarında geniş aralıklar mevcuttur. İlk üç bileşenin (SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3) toplamının, ASTM Sınıf F uçucu kül olarak sınıflandırılmak üzere yüzde 70'den fazla olması gerekirken, toplamalarının ASTM Sınıf C olarak sınıflandırılmak için sadece yüzde 50'yi aşması gerekir [10].

3.1.1.2 Fiziksel Özellikleri

Farklı enerji santrallerinde veya farklı kömür kaynaklarına sahip bir tesiste üretilen uçucu küllerin farklı renkleri olabilir. Uçucu kül rengi ve kullanılan miktar, elde edilen sertleşmiş betonun rengini çimento veya ince agrega rengindeki değişikliklerle aynı şekilde etkileyebilir. Uçucu kül rengi, betonla ilgili estetik kaygılar açık betonda düzgün bir renk korunmasını gerektirmedikçe, genellikle bir mühendislik kaygısı değildir.

Bununla birlikte, belirli bir kaynaktan külün rengindeki bir değişiklik, kömür kaynağındaki, karbon içeriğindeki, demir içeriğindeki veya yanma koşullarındaki değişiklikler nedeniyle değişen özelliklerin bir göstergesi olabilir [10].

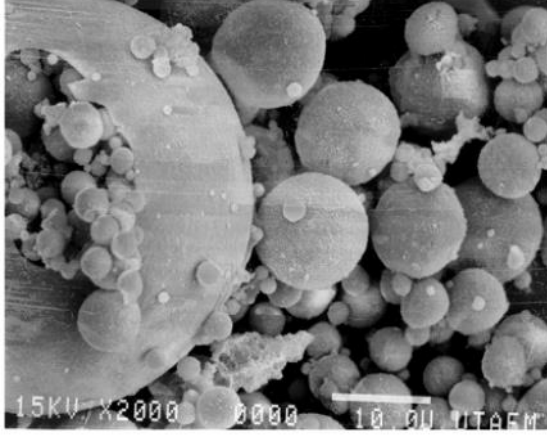


Şekil 3.1. Uçucu kül F sınıfı



Şekil 3.2. Uçucu kül C sınıfı

Uçucu kül parçacıklarının şekli de parçacık boyutunun bir fonksiyonudur. Uçucu kül parçacıklarının çoğu camsı, katı veya içi boş ve küre şeklindedir [30]. Uçucu kül içindeki münferit parçacıkların büyüklüğü 1µm'den ila 1 mm'den daha büyüktür. Mekanik ayırıcıların kullanıldığı daha eski tesislerde, uçucu kül, elektrostatik çöktürücüler veya torba filtreleri kullanan daha modern bitkilerden daha kabadır [10].



Şekil 3.3. 4000 büyütmede uçucu kül [31]



Şekil 3.4. 2000 büyütmede uçucu kül [31]

Katı uçucu kül parçacıklarının yoğunluğu 1.97 ila 3.02 Mg/m³ (123 ila 188 lb / ft³) arasında değişmektedir, ancak normal olarak 2.2 ila 2.8 Mg/m³ (137 ila 175 lb / ft³). Cenosferler gibi bazı uçucu kül parçacıkları su üzerinde yüzebilir. Yüksek yoğunluk genellikle ince parçacıkların bir göstergesidir [32].

3.1.2. Su

Karışım suyu olarak Kayseri şehir şebekesinden alınan içilebilir musluk suyu kullanılacaktır.

3.1.3. Kum

Harç karışımlarının hazırlanmasında TS EN 196-1 ile uyumlu CEN standart kumu kullanılacaktır.

Aşağıdaki tabloda (Tablo3.1) kumun granulometresini göstermektedir.

Tablo 3.1. CEN standart kum granulometrisi

Kare göz açıklığı (mm)	Kümülatif elekte kalan (%)
2,00	0
1,60	7 ± 5
1,00	30 ± 5
0,50	67 ± 5
0,16	87 ± 5
0,08	99 ± 5



Şekil 3.5. CEN standart kum.

3.1.4. Alkali Aktivatör Olarak :Sodyum Hidroksit (NaOH)

Uçucu külü aktivite etmek için NaOH formülüne sahip kimyasal bir bileşen olan sodyum hidroksit kullanılacaktır.

Sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi, pulların veya peletlerin su içerisinde çözündürülmesiyle hazırlandı. Bir çözeltideki NaOH katılarının kütlesi, molar, M cinsinden ifade edilen çözeltinin konsantrasyonuna bağlı olarak değişti. Örneğin, 8M'lik bir konsantrasyona sahip NaOH çözeltisi, $8 \times 40 = 320$ gram NaOH katılarından (pul veya pelet formunda) oluşuyordu. çözeltinin litresi başına, burada 40 NaOH'ın

moleküler ağırlığıdır. NaOH çözeltisinin kütlesinin sadece bir kısmı ıdı ve su, ana bileşendir [28].

Tablo 3.2. NaOH'un kimyasal kompozisyonu.

Kimyasal adı	Sodyum Hidroksit
Kimyasal Förmülü	NaOH
Molekül ağırlığı	40 gr/mol
Asidimetrik	≥ 97
Na ₂ CO ₂	≤ 1
Cl	$< 0,01$
SO ₄	$\leq 0,01$
Ağır Metal	$\leq 0,02$
Al	$\leq 0,02$
Fe	$\leq 0,02$



Şekil 3.6. NaOH çözeltisi hazırlanması

3.1.5. Mikrodalga Fırını

Betonda daha yüksek mukavemet gelişimi, inşaat endüstrisindeki birkaç önemli işlemi büyük ölçüde kolaylaştırabilir. Örneğin, prekast beton ürünlerinin geliştirilmesinde, kalıpların yeniden kullanılabilmesi ve nihai ürünlerin mümkün olan en kısa sürede ele alınması ve tesise gönderilebilmesi için kısa bir süre içinde yeterli mukavemete ulaşmak arzu edilir. Bölmeler, delikler veya ciddi şekilde çatlamış bölgeler gibi beton kaplamalardaki lokal hasarlı bölgelerin onarımında. Yeni betondaki hızlı mukavemet gelişimi, trafik akışındaki kesintileri en aza indirebilir. Isıtma betonun kürünü hızlandırabilir. Buharla sertleştirme gibi geleneksel ısıtma teknikleri, bir numunenin dışından iç kısmına ısı iletimine dayanır. Bu nedenle ısıtma eşit değildir ve gerekli sıcaklığa ulaşmak için uzun bir ısıtma süresi gereklidir. Elektromanyetik alanlardaki moleküler dipollerin uyarılması ile ilişkili iç enerji dağılımına dayanan mikrodalga ısıtma, daha hızlı ve daha homojen bir ısıtmaya izin verir. Dolayısıyla, yüksek erken mukavemet sağlamak için kısa bir işlem süresi yeterlidir[33].

Mikrodalga kürlemesi için ev tipi mikrodalga (Samsung MW71B) 100-800W enerji aralığında ve 2,45 GHz frekansında kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Mikrodalga kürleme için kullanılan mikrodalga fırını

3.2. Karışım Oranları

Numuneler 80 gr NaOH ve 135 gr su ile karıştırılarak hazırlandı ve 1 gün soğumaya bırakılmıştır, ardından NaOH ve su karışımı, 450 gr Uçucu kül ve 1350 gr CEN standart

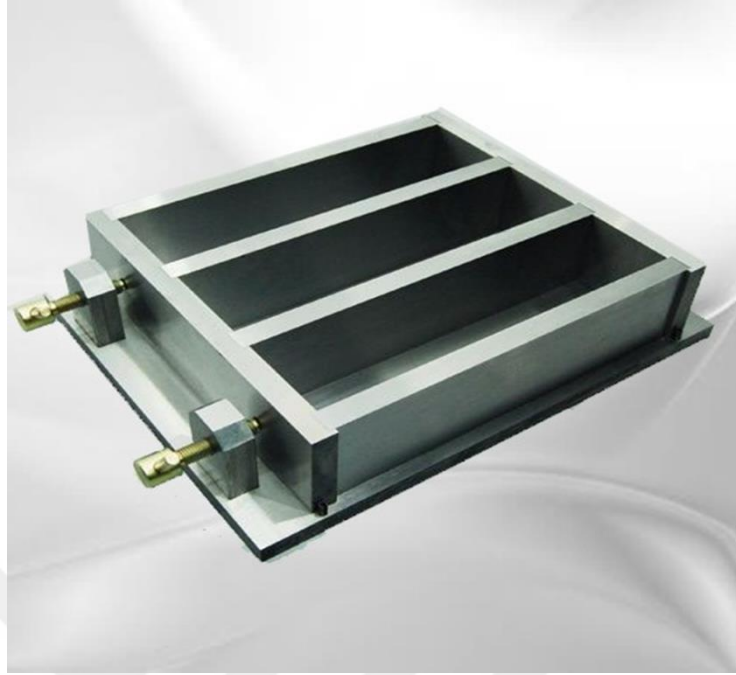
kum ile 10 dakika boyunca Hobart karıştırıcısı ile karıştırılmıştır. Daha sonra, karışım 40x40x160 mm (3hücrelik) kalıba dökülmüş ve 2 dakika boyunca titreşmiştir.

Tablo 3.3. Karışım oranları

Karışım	Uçucu kül(gm)	NaOH(gm)	Su(ml)	Kum (gr)
Tüm numuneler	450	80	135	1350



Şekil 3.8. Karışım hazırlanması



Şekil 3.9. Kullanılan kalıp görünümü

3.3. Kür İşlemleri

3.3.1. Geleneksel kürü

1. Numuneler 75 ° C'de 6 saat boyunca etüvde kürlenmiştir.
2. Kontrol numuneleri 75 ° C'de 24 saat boyunca etüvde kürlenmiştir.



Şekil 3.10. Etüvde kür uygulaması

3.3.2. Mikrodalga Kürü

Üretilen geopolimer harç numunelerine 6 saat 75°C'de geleneksel kürlemeden sonra mikrodalga fırında 180W'ta farklı sürelerde (15, 30, 45, 60, 75, ve 90 dakika) uygulanmıştır.

Mikrodalgada numuneler, her prizmatik numune aşağıda gösterildiği gibi tek başına kürlenecek şekilde kürlenmiştir.



Şekil 3.11. Mikrodalgada kürlenmesi

3.3.3. Hava kürü

Hazırlanan karışımlar harç kalıpları ile birlikte 6 saat boyunca 75°C'de kür edilerek, kalıptan çıkarılan numuneleri tek tek mikrodalga 180 W'ta (15, 30, 45, 60, 75, 90 dakika) kürülendikten sonra 3gün, 7gün, 28gün, 56gün, 3ay ve 6ay tamamlanacak şekilde laboratuvar ortamında ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ve bağıl nemi $\%50\pm 5$) havada kür edilmiştir.



Şekil 3.12. Numunelerin Havada kürlenmesi

3.4. Deneyler

3.4.1. İşlenebilirlik Deneyi

Uçucu kül harçlarının karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra kalıplara doldurulmadan önce, hazırlanan harçların işlenebilirliğini test etmek amacıyla TS EN 1015-3 Standardı'na uygun olarak yayılma tablası deneyi yapılır. Şekil 3.13'de görülen yayılma tablası yöntemi deneyi yapılmıştır. 300 mm çaplı tablanın üzerine yüksekliği 60 mm, taban çapı 100 mm ve üst çapı 70 mm olan kesik koni şeklindeki kalıp yerleştirilerek her tabakaya 10 vuruş olacak şekilde 40 mm çaplı 0,250 kg ağırlığındaki tokmak ile 2 tabaka halinde sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Taze harçla doldurulan kalıp düzgünce kaldırıldıktan sonra taze harç, saniyede 1 kez olacak şekilde 15 kez düşürülerek yayılma çapı ölçülür.



Şekil 3.13. Yayılma tablası görünümü

3.4.2. Basınç dayanımı

Eğilme dayanımı testinden iki kırılmış parça üzerinde basınç dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Test TS EN 196-1 standartlarına göre 2000 kN kapasiteli ATOM TEKNİK (20 ton basınç dayanım cihazı) hidrolik test makinesinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yarım numuneler 40×40 mm cihaz başlığı arasına yerleştirilerek 500 N/s hızında yük uygulanarak kırılmıştır.. Şekil3.14'te gösterildiği gibi yükleme alanı 40 x 40 mm olan 4 parçanın ortalamasını alarak sonuçlar elde edilmiştir.

$$BS = \frac{P_N}{A} \text{ (Mpa)}$$

BS: Basınç dayanımı (Mpa)

P_N: Kırılma anındaki yük (Newton)

A: Basınç uygulanan numune alanı (mm²)



Şekil 3.14. Basınç dayanımı testi

3.4.3. Eğilme Dayanımı

Sertleştirilmiş uçucu kül harcı üzerindeki eğilme dayanımı testleri TS EN 1015-11 (2000) standartlarına göre 2000 kN kapasiteli ATOM TEKNİK (20 ton basınç dayanım cihazı) hidrolik test makinesinde gerçekleştirilmiştir. Eğilme testinde 40x40x160 mm numuneler kullanılmıştır. Numuneler mikrodalga veya geleneksel kürlemeden çıkarılmıştır ve birkaç saat soğumaya bırakılmıştır, daha sonra üç nokta yük altında (100 mm mesnetlerin arasındaki boşluk) eğilme testi yapılmıştır. Şekil ve Tablolarda verilen sonuçlar bu değerlerin 2 prizmatik numunenin ortalamasıdır. Numuneler kalıptan çıkarılan yan yüzleri üzerine mesnet silindirleri üstüne dik şekilde yerleştirilip yükleme uygulanmıştır. Yükleme sırasında ani sıçrama olmaksızın kırılma gerçekleşecek şekilde 50 N/s yükleme hızı seçilmiştir.

$$\sigma_e = 3.F \cdot L / 2b.d^2$$

σ_e : Eğilme Dayanımı (Mpa)

F : Kırılmaya neden olan yük (Newton)

L : Deney numunesinin mesnetler arasındaki mesafesi (100 mm).

b : Deney numunesinin genişliği (40 mm).

d : Deney numunesinin kalınlığı, (40 mm).



Şekil 3.15. Eğilme dayanımı testi

3.4.4 Su Emme

Su emme deneyinde, UTW-0643 Dijital Terazi marka 0,01 gr hassasiyete sahip analitik terazi, ve TS EN 932-5, 1097-5 standartlarına göre , UTEST UTD-1300 marka 200±5 °C' ye kadar ayarlanabilen etüv kullanılmıştır . Numuneler oda sıcaklığında içi damıtılmış su ile dolu bir kap içerisine yerleştirilmiştir. 24 saatin sonunda numuneler sudan çıkarılmış ve yüzeylerindeki kaba su alındıktan sonra hassas terazide tartılmıştır (Ms). Doymuşluğa ulaşıldığında emilen toplam suyu belirlemek için numuneler, sudan çıkarılıp, 105±5 °C' de 24 saat süresince kurutulmuş ve tartılmıştır (Mk). Kuru ağırlık ile doymuş ağırlık arasındaki fark, doyma noktasındaki emilen su olarak tanımlanmaktadır. Suyu doymuş numunenin ağırlığı (Ms), 24 saat kurutulup, oda sıcaklığında soğutulan numunenin ağırlığı (Mk) ve ağırlıkça su emme oranı (SA), aşağıdaki formülden hesaplanmıştır. Deney TS 704 ve TS 699' a göre yapılmıştır.

$$\text{Su emme oranı \% (SA)} = [(Ms - Mk) / Mk] * 100 \%$$



Şekil 3.16. Su emme testi

4. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMALAR

4.1. Basınç dayanımı

Bu çalışmada, konvansiyonel kürleme, mikrodalga kürleme ve havada kürlemesiyle birlikte NaOH ile aktive edilen uçucu kül geopolimer harcının dayanım özellikleri üzerindeki etkisini araştırılmıştır.

Sonuçlar, 24 saat boyunca geleneksel kürleme yöntemiyle kürlenmiş kontrol numuneleri ile karşılaştırılmıştır.

Basınç dayanımı testi için, eğilme dayanımı testinden sonra tutulan iki kırık parça kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Basınç dayanım testinde kullanılan örnekler

Sonuçlar aşağıda gösterildiği gibi üç bölüme ayrılacaktır:

1. 75 °C'de etüv kürleme.
2. Numuneler 75 °C'de etüvde kür edildikten sonra farklı sürelerde mikrodalga kürü yapılmıştır.
3. Yukarıda verilen kürlere ilave olarak yapılan hava bekleme kürlemesi.

4.1.1. Geleneksel ısı kürü

Geleneksel ısı kürlemesinde, numuneler 75 °C'de 6 saat boyunca kürlenmiştir, sonra örnekler 2 saat boyunca oda sıcaklığına soğutulmuştur, sonra iki parçanın (eğilme dayanımı testinden sonra) üzerine basınç testi yapılmıştır.

75°C'de 24 saat boyunca kürlenen numunelerin basınç dayanımı 40,1 MPa (kontrol numunesi G1) sağlanmıştır.

4.1.2. Mikrodalga kürü

Mikrodalga küründe ev tipi mikrodalga (Samsung MW71B) 100-800W enerji aralığında ve 2.45 GHz frekansında kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler 75 °C'de 6 saat boyunca geleneksel ısıyla kürleyip iki saat oda sıcaklığına soğutulduktan sonra mikrodalgada 180W enerji ile kürlenmiştir.

4.1.3. Hava kürü

75 °C'de etüvde 6 saat boyunca ve farklı süre mikrodalgada kür edilen numuneler havada ($23\pm2^{\circ}\text{C}$ ve bağıl nemi $\%50\pm5$) kür edilmiştir.

Numunelerin sonuçları aşağıda gösterildiği gibi hava kürleme süresine göre yedi bölüme ayrılmaktadır:

A. Havada kürlemeyen numuneler.

Tablo 4.1. Havada kürlemeyen numunelerin basınç dayanımı

Zaman (Dakika)	G2 (Mpa)
15	7.9
30	25.0
45	52.6
60	69.0
75	76.9
90	80.9

Tablo 4.1.'den görüleceği üzere mikrodalga kürleme süresindeki artışı basınç dayanımını arttırdığını göstermektedir. 30 dakikalık mikrodalga kürü, 24 saatlik (kontrol numunesi G1) basınç dayanımının %62'ine ulaşmıştır. Diğer yandan 45, 60, 75 ve 90 dakikalık mikrodalga kürü, basınç dayanımını ,kontrol numunesinin (G1) sırasıyla %131, %172, %192 ve %202 oranında artırmıştır. En yüksek basınç dayanımı 80 Mpa civarında olmuştur. İlk 15 dakikada önemli dayanım gelişmesi olmamıştır.

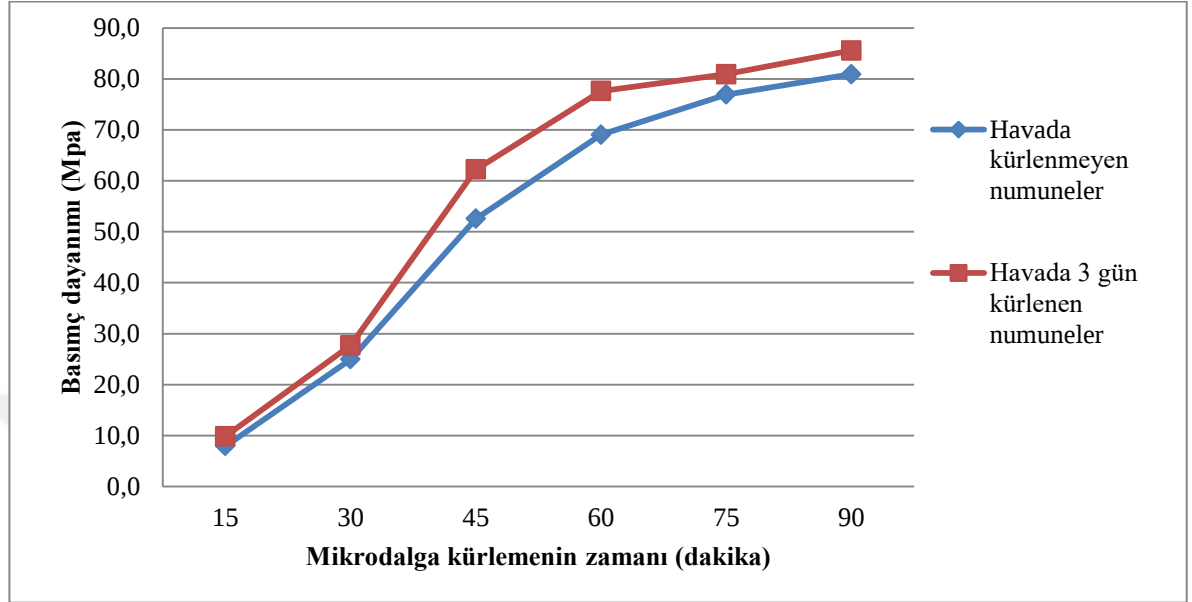
B. 3 gün hava kürlenen numuneler:

Tablo 4.2. Havada 3 gün kürlenmeden sonra basınç dayanımı

Zaman (Dakika)	G3 (Mpa)
15	9.9
30	27.7
45	62.2
60	77.6
75	80.9
90	85.6

Tablo 4.2.'den görüleceği üzere hava kürünün süresindeki artışı basınç dayanımını arttırdığını göstermektedir. Bununla birlikte, basınç dayanımın gelişimi, 30 dakikalık mikrodalga kürünün 24 saatlik (kontrol numunesi G1) basınç dayanımının %69'ine ulaşmıştır. Aynı zamanda 45, 60, 75, ve 90 dakikalık mikrodalga kürü, basınç dayanımını, 24 saatlik (kontrol numunesi G1) basınç dayanımının sırasıyla %155,

%194, %202 ve %213 oranında artmıştır. 3 gün havada kürlenene numunelerin en yüksek basınç dayanımı 86 Mpa civarında olmuştur.



Şekil 4.2. Mikrodalga kürlemenin, havada kürlemeyen ve 3gün havada kürlenene numunelerin üzerine etkisi.

Şekil4.2.'de havada kürlemeyen numuneler ve 3gün havada kürlenene numunelerin kıyaslaması yapılmıştır. Mikrodalga kürüne ilave 3 gün hava kürü numunelerin, havada kürlemeyen numunelere göre biraz daha yüksek dayanım vermiştir.

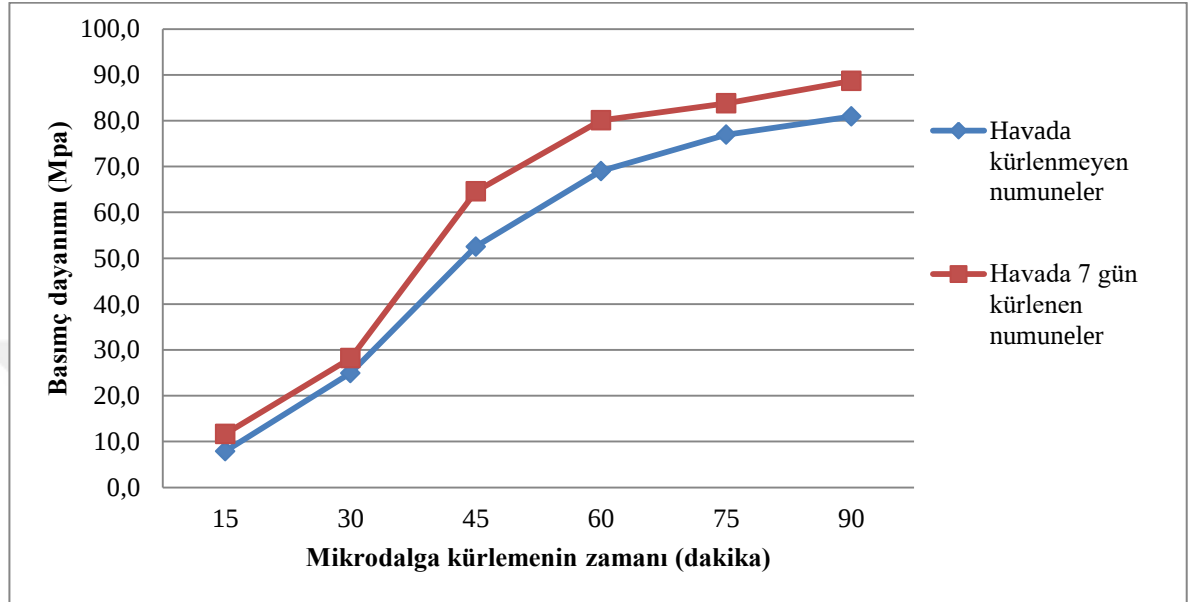
C. 7 gün hava kürlenene numuneler:

Tablo 4.3. Havada 7 gün kürlenmeden sonra basınç dayanımı

Zaman (Dakika)	G4 (Mpa)
15	11.7
30	28.2
45	64.6
60	80.1
75	83.8
90	88.7

7 gün hava kürü için, 30 dakikalık mikrodalga kürünün 24 saatlik (kontrol numunesi G1) basınç dayanımının %70'ine ulaşmıştır. Aynı zamanda 45, 60, 75, ve 90 dakikalık mikrodalga kürü, basınç dayanımını, 24 saatlik (kontrol numunesi G1) basınç dayanımının sırasıyla %161, %200, %209 ve %221 oranında artmıştır. Tablo4.3.'te

görülebileceği üzere, hava kürleme süresinin artışı, geopolimerin basınç dayanımında artışa neden olduğunu göstermektedir. 7 gün havada kürlenen numunelerin en yüksek basınç dayanımı 89 Mpa civarında olmuştur.



Şekil 4.3. Mikrodalga kürlemenin, havada kürlemeyen ve 7 gün havada kürlenen numunelerin üzerine etkisi.

Şekil 4.3.'de havada kürlemeyen numunelerin, 7 gün havada kürlenen numuneleri ile kıyasla basınç dayanımı daha yüksek olduğu göstermektedir.

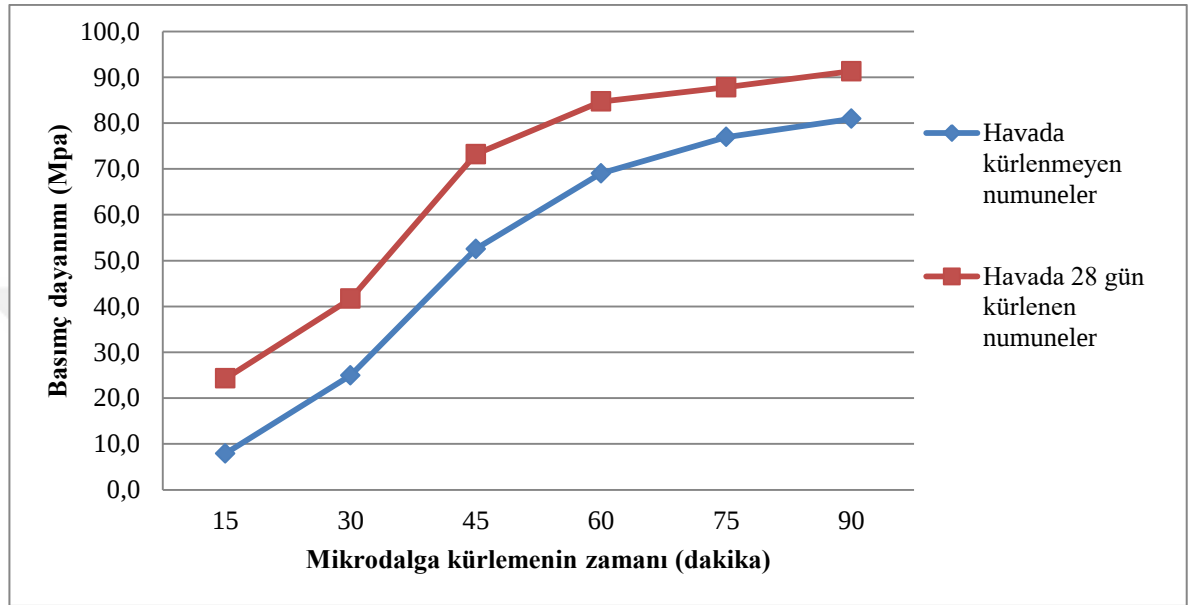
D. 28 gün hava kürlenen numuneler:

Tablo 4.4. Havada 28 gün kürlenmeden sonra basınç dayanımı

Zaman (Dakika)	G5 (Mpa)
15	24.3
30	41.7
45	73.2
60	84.7
75	87.8
90	91.3

Tablo 4.4'ten görüleceği üzere 15 dakikalık mikrodalga kürü, basınç dayanımını kontrol numunesinin (G1) %61'ine ulaşmıştır. Havada 28 gün kürlenen numunelerden 30 dakikalık mikrodalga kürü, ilk defa 24 saatlik (kontrol numunesi G1) basınç

dayanımında çok hafif bir artış olduğunu göstermektedir. 30, 45, 60, 75, ve 90 dakikalık mikrodalga kürü, basınç dayanımını, 24 saatlik (kontrol numunesi G1) basınç dayanımının sırasıyla %104, %183, %211, %219 ve %228 oranında artırmıştır. 28 gün havada kürlenenden numunelerin en yüksek basınç dayanımı 91 Mpa civarında olmuştur.



Şekil 4.4. Mikrodalga kürlemenin, havada kürlenmeyen ve 28 gün havada kürlenenden numunelerin üzerine etkisi.

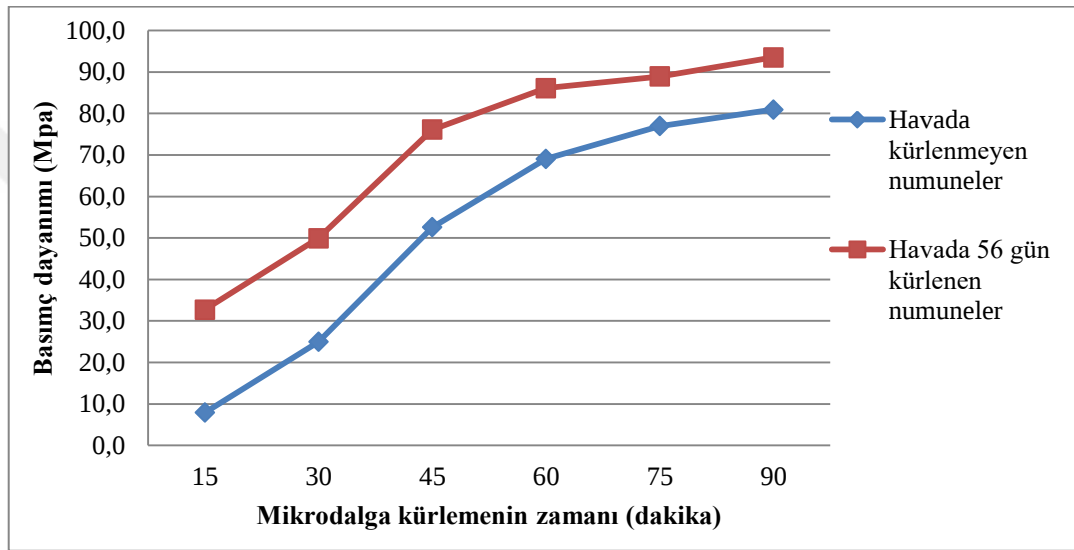
Şekil 4.4.'den görüleceği üzere, havada kürlenmeyen numuneler ve 28 gün havada kürlenenden numunelerin kıyaslaması yapılmıştır. Havada 28 gün kürlenenden, havada kürlenmeyen numunelerden basınç dayanımında büyük bir artış olduğunu göstermektedir.

E. 56 gün hava kürlenenden numuneler:

Tablo 4.5. Havada 56 gün kürlenmeden sonra basınç dayanımı

Zaman (Dakika)	G6 (Mpa)
15	32.7
30	49.9
45	76.1
60	86.1
75	88.9
90	93.5

56 gün hava kürü için, 15 dakikalık mikrodalga kürünün 24 saatlik (kontrol numunesi G1) basınç dayanımının %82'ine ulaşmıştır. Aynı zamanda 30,45, 60, 75, ve 90 dakikalık mikrodalga kürü, basınç dayanımını, 24 saatlik (kontrol numunesi G1) basınç dayanımının sırasıyla %124, %190, %215, %222 ve %233 oranında artmıştır. Tablo4.5'ten görüleceği üzere hava kürlenme süresinin artışı geopolimerin basınç dayanımında artışa neden olduğunu göstermektedir. 56 gün havada kürlenen numunelerin en yüksek basınç dayanımı 93 Mpa civarında olmuştur.



Şekil 4.5. Mikrodalga kürlemenin, havada kürlemeyen ve 56 gün havada kürlenen numunelerin üzerine etkisi.

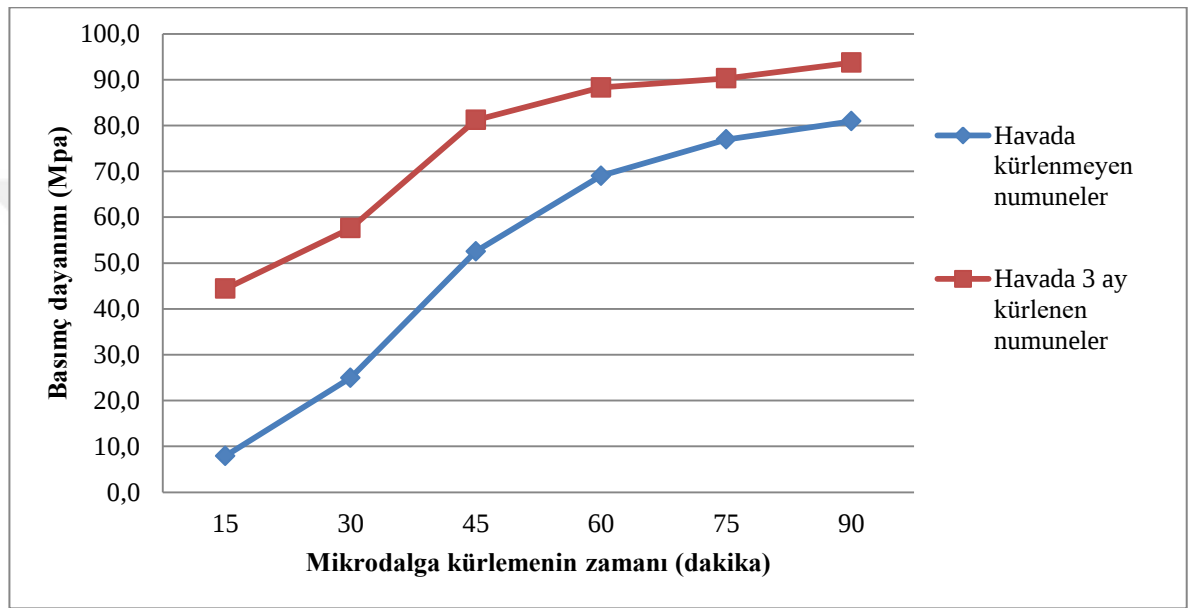
Şekil 4.5.'de havada kürlemeyen numuneler ve 56 gün havada kürlenen numunelerin kıyaslaması yapılmıştır. Mikrodalga kürüne ilave olarak 56 gün hava kürü numunelerinin hava kürlemeyen numunelere göre daha yüksek dayanım verdiği gözlemlenmiştir.

F. 3 ay hava kürlenen numuneler:

Tablo 4.6. Havada 3 ay kürlenmeden sonra basınç dayanımı

Zaman (Dakika)	G7 (Mpa)
15	44.4
30	57.6
45	81.2
60	88.3
75	90.3
90	93.7

Tablo 4.6'ta havada 3 ay kürlenen numunelerden 15 dakikalık mikrodalga kürü, ilk defa 24 saatlik (kontrol numunesi G1) basınç dayanımında çok hafif bir artış olduğunu göstermektedir. 15, 30, 45, 60, 75 ve 90 dakikalık mikrodalga kürü, basınç dayanımını, 24 saatlik (kontrol numunesi G1) basınç dayanımının sırasıyla %111, %144, %202, %220, %225 ve %234 oranında artmıştır. 3 ay havada kürlenen numunelerin en yüksek basınç dayanımı 94 Mpa civarında olmuştur.



Şekil 4.6. Mikrodalga kürlemenin, havada kürlemeyen ve 3 ay havada kürlenen numunelerin üzerine etkisi.

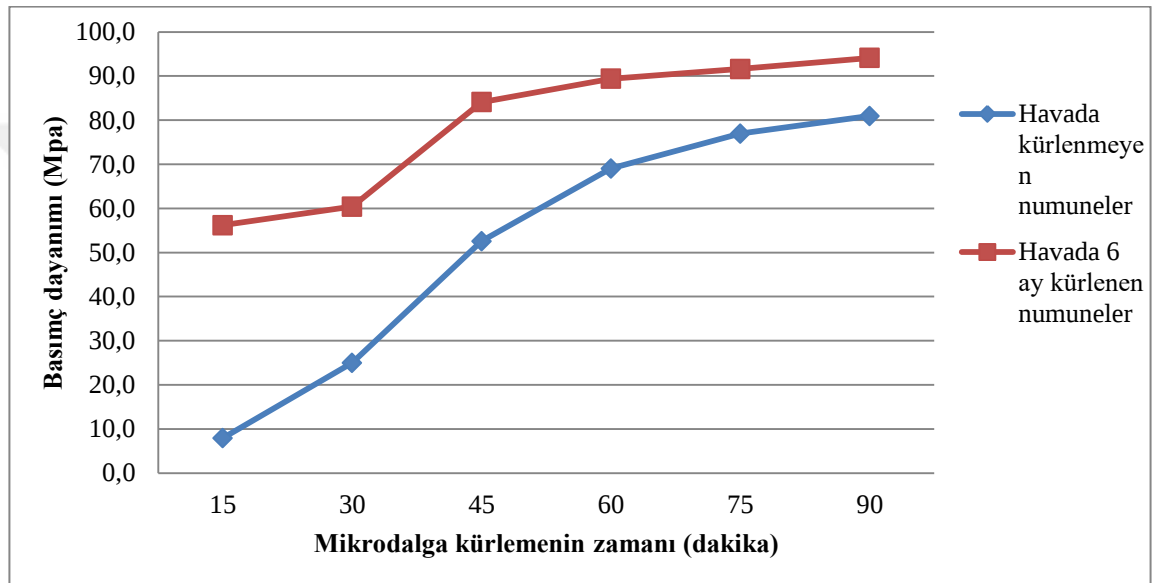
Şekil 4.6.'den görüldüğü üzere hava kür süresi arttıkça basınç dayanımının arttığı tesbit edilmiştir. Aynı zamanda hava kür süresi arttıkça basınç dayanımının artışlarını da önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir.

G. 6 ay hava kürlenen numuneler:

Tablo 4.7. havada 6 ay kürlenmeden sonra basınç dayanımı

Zaman (Dakika)	G8 (Mpa)
15	56.2
30	60.4
45	84.1
60	89.4
75	91.6
90	94.1

Mikrodalgada farklı sürede kürünen numunelerin havada 6 ay kürü ilave olarak, basınç dayanımında önemli bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda geopolimerazyonun 6 ay sonra bile devam ettiğini göstermektedir. 15, 30, 45, 60, 75 ve 90 dakikalık mikrodalga kürü, basınç dayanımını, 24 saatlik (kontrol numunesi G1) basınç dayanımının sırasıyla %140, %151, %210, %223, %228 ve %235 oranında artmıştır. 6 ay havada kürlenene numunelerin en yüksek basınç dayanımı 94 Mpa civarında olmuştur.

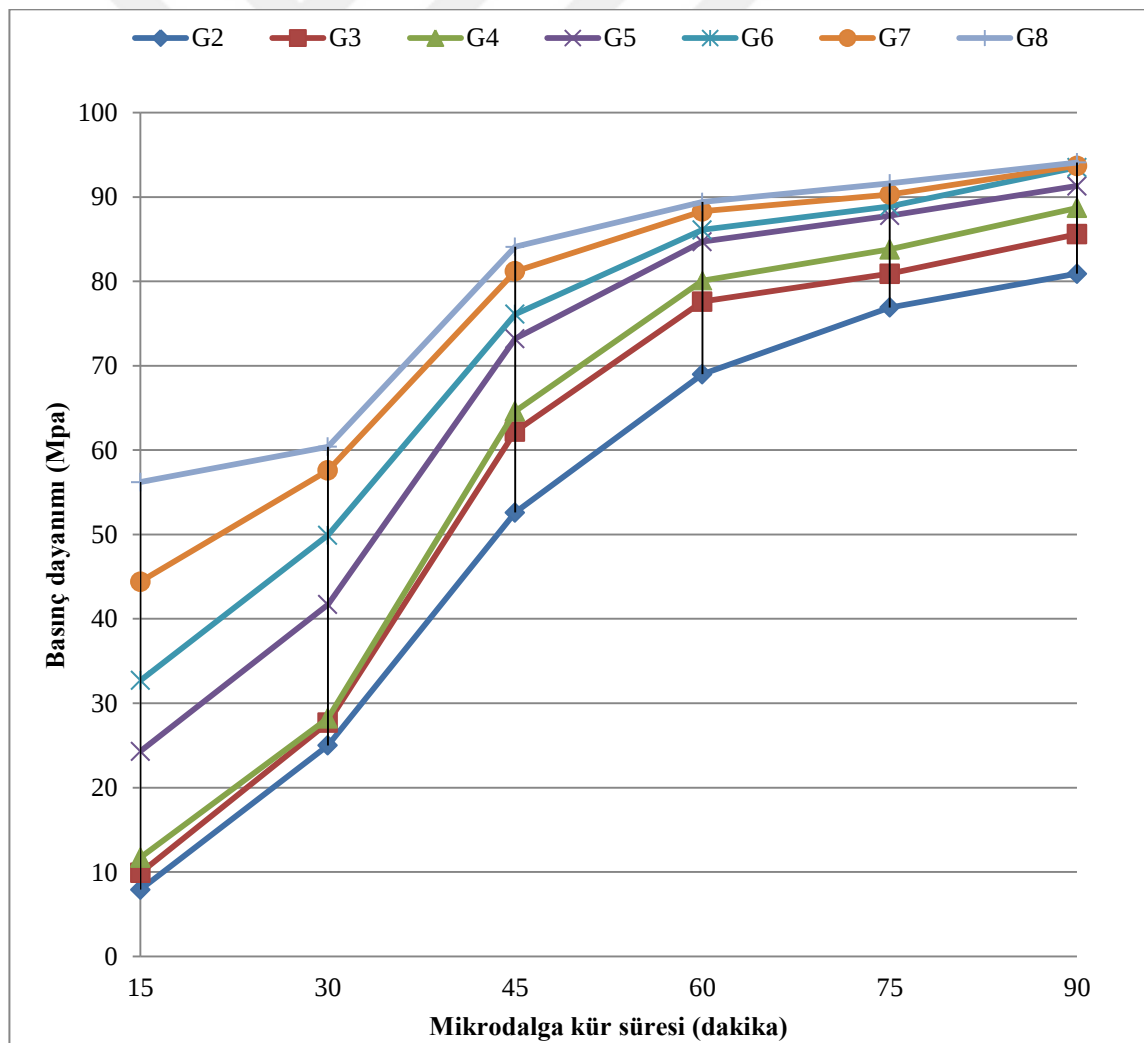


Şekil 4.7. Mikrodalga kürlemenin, havada kürlemeyen ve 6 ay havada kürlenene numunelerin üzerine etkisi.

Mikrodalgada sırasıyla 15, 30, 45, 60, 75 ve 90 dakika kür edilen numunlere ilave olarak havada kürlemeyen numuneler ile havada 6 ay kürlenene numunelerin basınç dayanımları karşılaştırıldığında kendi içinde dayanım artışları sırasıyla yaklaşık %86, %59, %38, %23, %16 ve %14 hesaplanmıştır.

Tablo 4.8. Geopolimer Harcın Basıncı Dayanımı Sonuçları

Hava kür süresi	Mikrodalga kür süresi (dakika)					
	15	30	45	60	75	90
	Basıncı dayanımı (Mpa)					
0	7.9	25.0	52.6	69.0	76.9	80.9
3 gün	9.9	27.7	62.2	77.6	80.9	85.6
7 gün	11.7	28.2	64.6	80.1	83.8	88.7
28 gün	24.3	41.7	73.2	84.7	87.8	91.3
56 gün	32.7	49.9	76.1	86.1	88.9	93.5
3 ay	44.4	57.6	81.2	88.3	90.3	93.7
6 ay	56.2	60.4	84.1	89.4	91.6	94.1



Şekil 4.8. Mikrodalga ve hava kür süresinin basınç dayanıma etkisi.

4.2. Eğilme dayanımı

Uçucu külünün sodyum hidroksit (NaOH) ile aktifleştirilen ve farklı kür süresine tabi tutulduktan sonra yapılan eğilme dayanımı deney sonuçları sunulacaktır.

Mesnetler arasında 100 mm boşluk bırakılarak numuneler üzerinde eğilme dayanımı testi yapılmıştır.

Sonuçlar, 75 °C'de ve 24 saat boyunca geleneksel kürleme yöntemiyle kürlenen kontrol numuneleri (E1) ile karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar aşağıda gösterildiği gibi üç bölüme ayrılacaktır:

4.2.1. Geleneksel kürleme

NaOH ile aktive edilen numuneler 6 saat 75 ° C'de kürlenmiştir. sonra örnekler 2 saat boyunca oda sıcaklığına soğutulmuştur.

Referans olarak belirlenen 75°C'de 24 saat boyunca etüvde kür edilen numunesinin eğilme dayanımı (E1) 6.63 MPa sağlanmıştır.

4.2.2. Mikrodalga kürleme

NaOH ile aktive edilen numuneler 6 saat 75 °C'de geleneksel ısı ile kürleme işleminden sonra numuneleri kalıptan çıkarılmıştır ve 2 saat soğumaya bırakılmıştır, daha sonra numuneleri tek tek mikrodalgada (15, 30, 45, 60, 75 ve 90 dakika) kürlenmiştir.

4.2.3. Hava kürleme

Basınç dayanımında bahsedildiği gibi 75 °C'de etüvde 6 saat boyunca ve farklı süre mikrodalgada kür edilen numuneler havada ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ve bağıl nemi $\%50\pm 5$) kür edilmiştir.

Numunelerin sonuçları aşağıda gösterildiği gibi hava kürleme süresine göre yedi bölüme ayrılmaktadır:

A. Havada beklemeyen numuneler.

Tablo 4.9. Havada kürlenmeyen numunelerin eğilme dayanımı

Zaman (Dakika)	E2 (Mpa)
15	3.3
30	5.0
45	8.4
60	10.6
75	12.0
90	13.1

Tablo 4.9.'de Mikrodalga'nın kürlenme süresindeki artışı eğilme dayanımını arttırdığını göstermektedir. 15 ve 30 dakikalık mikrodalga kürü, 24 saatlik geleneksel kürlemede (kontrol numunesi E1) eğilme dayanımının sırasıyla %50 ve %75'ine ulaşmıştır. 45, 60, 75 ve 90 dakikalık mikrodalga kürü, eğilme dayanımını ,kontrol numunesinin (G1) sırasıyla %126, %160, %181 ve %198 oranında artırmıştır. En yüksek eğilme dayanımı 13 Mpa civarında olmuştur.

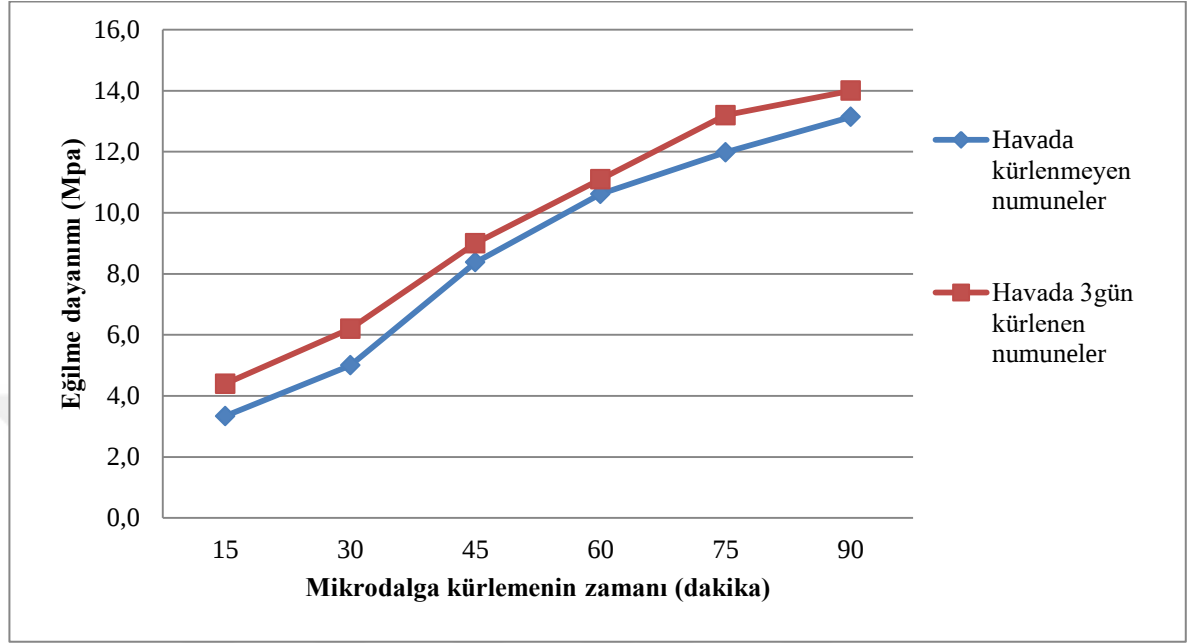
B. 3gün hava kürlenen numuneler:

Tablo 4.10. Havada 3gün kürlenmeden sonra eğilme dayanımı

Zaman (Dakika)	E3 (Mpa)
15	4.4
30	6.2
45	9.0
60	11.1
75	13.2
90	14.0

Tablo 4.10.'da hava kürünün süresindeki artışı eğilme dayanımını arttırdığını göstermektedir. Bununla birlikte, eğilme dayanımın gelişimi, 15 ve 30 dakikalık mikrodalga kürünün 24 saatlik (kontrol numunesi E1) eğilme dayanımının sırasıyla %66 ve %94'ine ulaşmıştır. Aynı zamanda 45, 60, 75, ve 90 dakikalık mikrodalga kürü, eğilme dayanımını, 24 saatlik (kontrol numunesi E1) eğilme dayanımının sırasıyla

%137, %167, %199 ve %211 oranında artmıştır. 3 günlük mikrodalga kürlenen numunelerin en yüksek eğilme dayanımı 14 Mpa olmuştur.



Şekil 4.9. Mikrodalga kürlemenin, havada kürlemeyen ve 3 gün havada kürlenen numunelerin eğilme dayanımının üzerine etkisi.

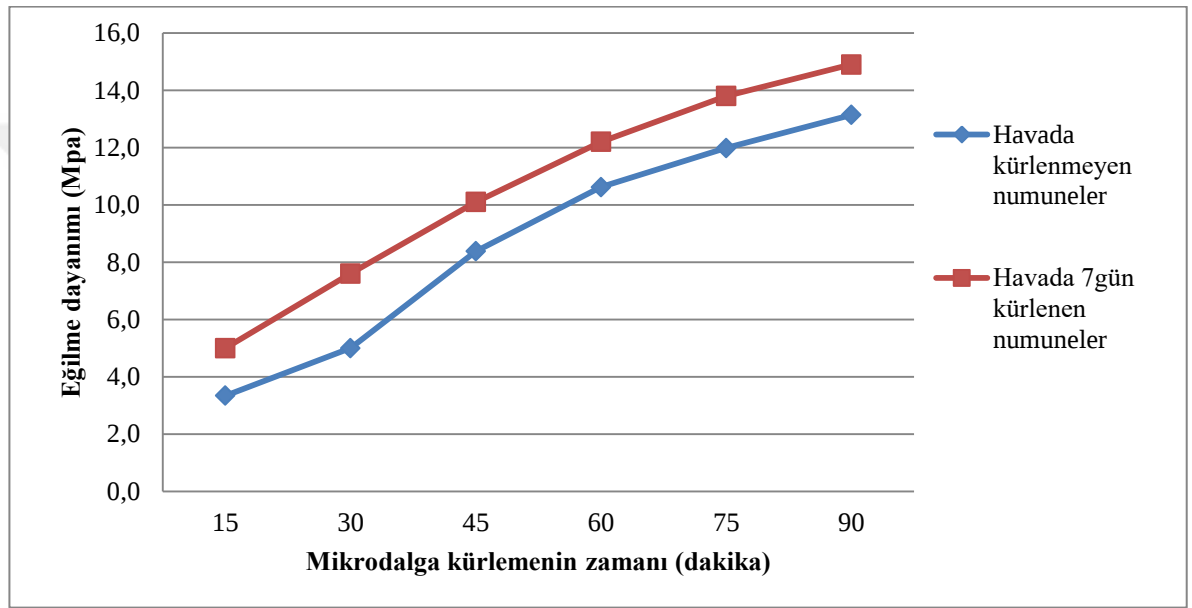
Şekil 4.9.'de havada kürlenen farklı olan numunelerin (havada kürlenmeyen numuneler ve 3gün havada kürlenen numuneler) kıyaslaması yapılmıştır. Şekil 4.9'den görüleceği üzere havada kürlenmeyen numuneler ve 3gün havada kürlenen numunelere göre biraz daha yüksek eğilme dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir.

C. 7gün hava kürlenen numuneler:

Tablo 4.11. Havada 7 gün kürlenmeden sonra eğilme dayanımı

Zaman (Dakika)	E4 (Mpa)
15	5.0
30	7.6
45	10.1
60	12.2
75	13.8
90	14.9

Sonuçlar, 15 dakikalık mikrodalga kürünün 24 saatlik (kontrol numunesi E1) eğilme dayanımının %75'ine ulaşmıştır. Aynı zamanda 30, 45, 60, 75, ve 90 dakikalık mikrodalga kürü, eğilme dayanımını, 24 saatlik (kontrol numunesi E1) eğilme dayanımının sırasıyla %115, %152, %184, %208 ve %225 oranında artmıştır. Tablo 4.11'te görüleceği üzere, hava kürlenme süresinin artışı geopolimerin eğilme dayanımında artışa neden olduğunu göstermektedir. 7 günlük mikrodalga kürlenen numunelerin en yüksek eğilme dayanımı 15 Mpa civarında olmuştur.



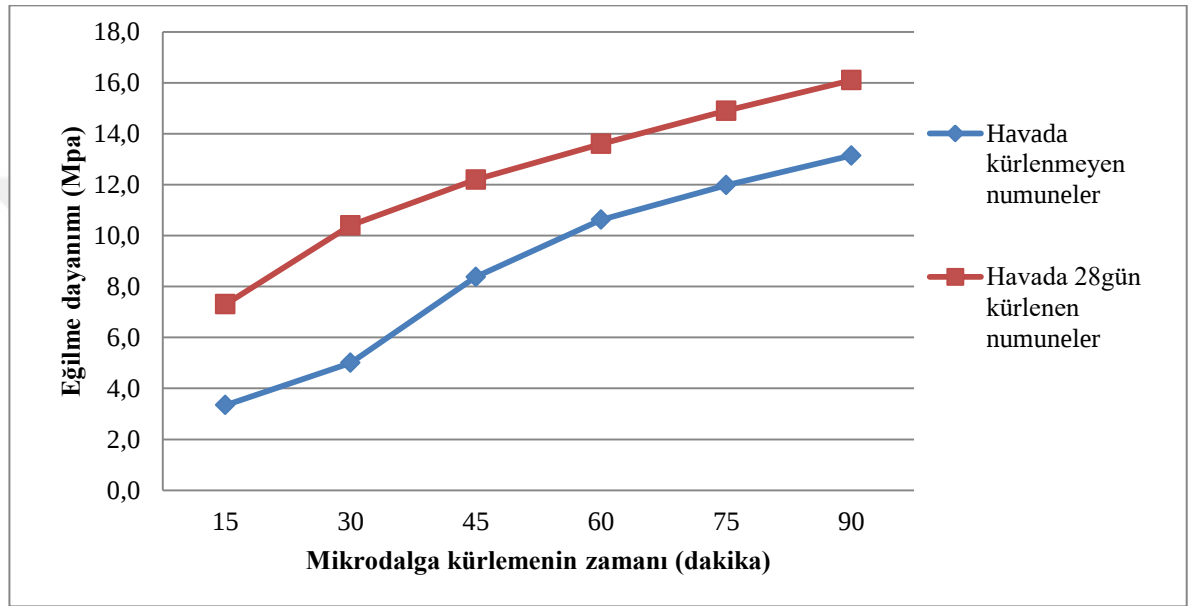
Şekil 4.10. Mikrodalga kürlemenin, havada kürlemeyen ve 7 gün havada kürlenen numunelerin eğilme dayanımının üzerine etkisi.

D. 28gün hava kürlenen numuneler:

Tablo 4.12. Havada 28 gün kürlenmeden sonra eğilme dayanımı

Zaman (Dakika)	E5 (Mpa)
15	7.3
30	10.4
45	12.2
60	13.6
75	14.9
90	16.1

Havada 28 gün kürlenenden numunelerden 15 dakikalık mikrodalga kürü, ilk defa 24 saatlik (kontrol numunesi E1) eğilme dayanımında %10 artış olduğunu göstermektedir. 15, 30, 45, 60, 75, ve 90 dakikalık mikrodalga kürü, eğilme dayanımını, 24 saatlik (kontrol numunesi E1) eğilme dayanımının sırasıyla %110, %157, %184, %205, %225 ve %243 oranında artmıştır. Havada 28 gün kürlenenden numunelerin en yüksek eğilme dayanımı 16 Mpa civarında olmuştur.



Şekil 4.11. Mikrodalga kürlemenin, havada kürlenmeyen ve 28 gün havada kürlenenden numunelerin eğilme dayanımının üzerine etkisi.

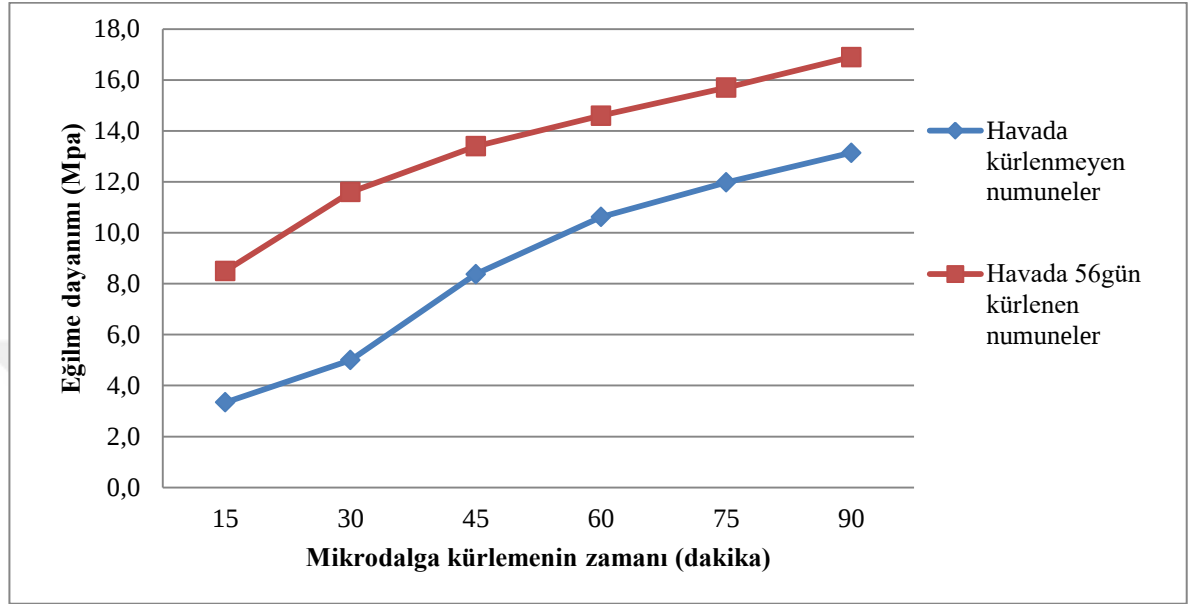
E. 56 gün hava kürlenenden numuneler:

Tablo 4.13. Havada 56 gün kürlenmeden sonra eğilme dayanımı

Zaman (Dakika)	E6 (Mpa)
15	8.5
30	11.6
45	13.4
60	14.6
75	15.7
90	16.9

Tablo 4.13'te 56 gün havada kürünen numunelerin önemli bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. 15, 30, 45, 60, 75, ve 90 dakikalık mikrodalga kürü, eğilme

dayanımını, 24 saatlik (kontrol numunesi E1) eğilme dayanımının sırasıyla %128, %175, %202, %220, %237 ve %255 oranında artmıştır. Havada 56 gün kür edilen numunelerin en yüksek eğilme dayanımı 17 Mpa civarında olmuştur.



Şekil 4.12. Mikrodalga kürlemenin, havada kürlemeyen ve 56 gün havada kürlenen numunelerin eğilme dayanımının üzerine etkisi.

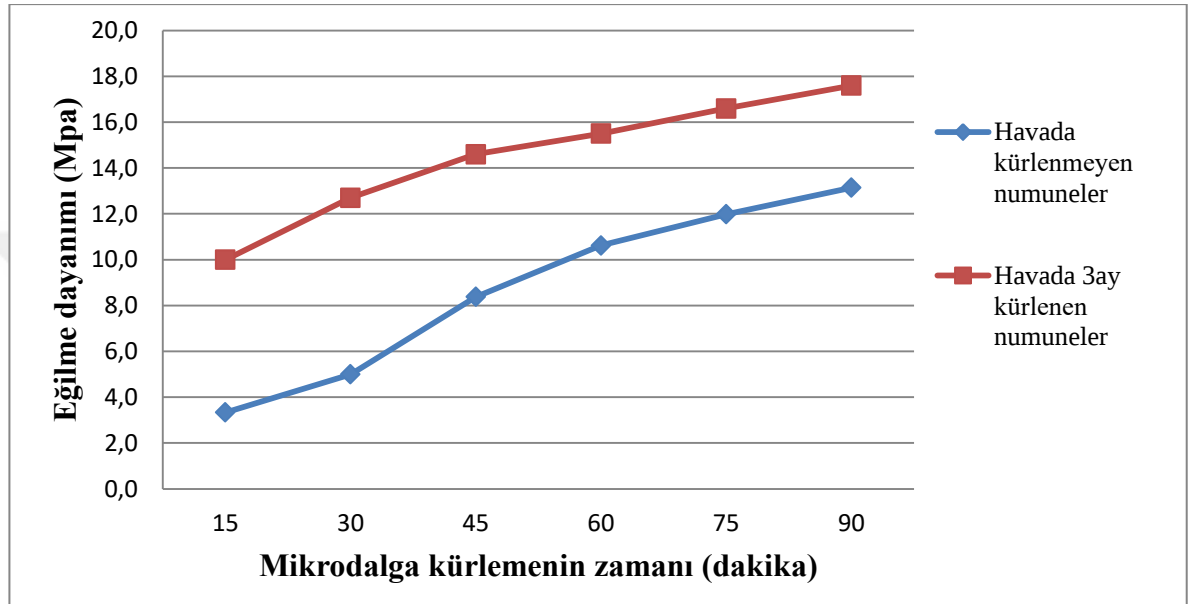
Şekil 4.12’de havada 56 gün kürlenen numunelerin, havada kürlenmeyen numunelerine göre eğilme dayanımı erken yaşlardan itibaren arttığını ve artan oranın 30 dakikalık mikrodalga kürüne kadar yükseldiği görülmüştür. Aynı zamanda 30. dakikadan sonra artan oranın eğilme dayanımında sabit olduğu gözlemlenmiştir.

F. 3ay hava kürlenen numuneler:

Tablo 4.14. Havada 3ay kürlenmeden sonra eğilme dayanımı

Zaman (Dakika)	E7 (Mpa)
15	10.0
30	12.7
45	14.6
60	15.5
75	16.6
90	17.6

Tablo 4.14’de hava kürlenme süresindeki artışı eğilme dayanımını arttırdığını göstermektedir. 15, 30, 45, 60, 75 ve 90 dakikalık mikrodalga kürü, 24 saatlik geleneksel kürlemede (kontrol numunesi E1) eğilme dayanımının sırasıyla %151, %192, %220, %234, %250 ve %265’ine ulaştığı görülmüştür. En yüksek eğilme dayanımı 18 Mpa civarında olmuştur.



Şekil 4.13. Mikrodalga kürlemenin, havada kürlemeyen ve 3 ay havada kürlenen numunelerin eğilme dayanımının üzerine etkisi.

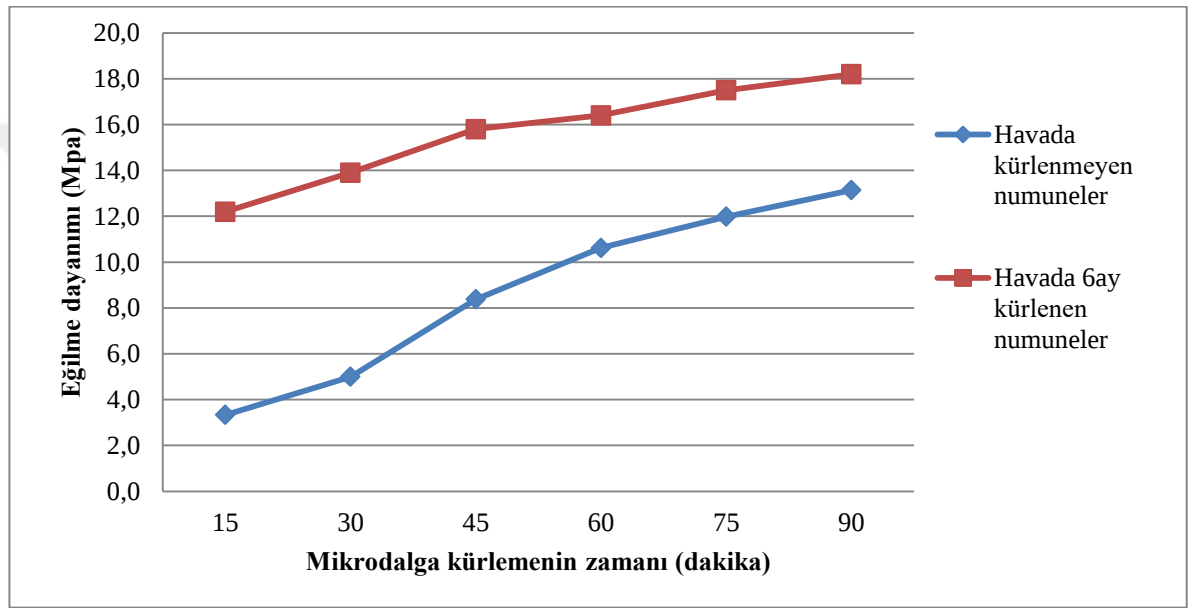
Şekil 4.5’den görüldüğü üzere basınç dayanımı görüldüğü gibi hava kür süresi arttıkça eğilme dayanımının arttığı tesbit edilmiştir. Aynı zamanda hava kür süresi arttıkça eğilme dayanımının artışlarını da önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir.

G. 6ay hava kürlenen numuneler:

Tablo 4.15. Havada 6ay kürlenmeden sonra eğilme dayanımı

Zaman (Dakika)	E8 (Mpa)
15	12.2
30	13.9
45	15.8
60	16.4
75	17.5
90	18.2

Mikrodalgada farklı sürede kürünen numunelerin havada 6 ay kürü ilave olarak, eğilme dayanımında önemli bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda geopolimerazyonun 6 ay sonra bile devam ettiğini göstermektedir. 15, 30, 45, 60, 75 ve 90 dakikalık mikrodalga kürü, eğilme dayanımını, 24 saatlik (kontrol numunesi E1) eğilme dayanımının sırasıyla %184, %210, %238, %247, %264 ve %275 oranında artmıştır. 6 ay havada kürlenene numunelerin en yüksek eğilme dayanımı 18 Mpa civarında olmuştur.

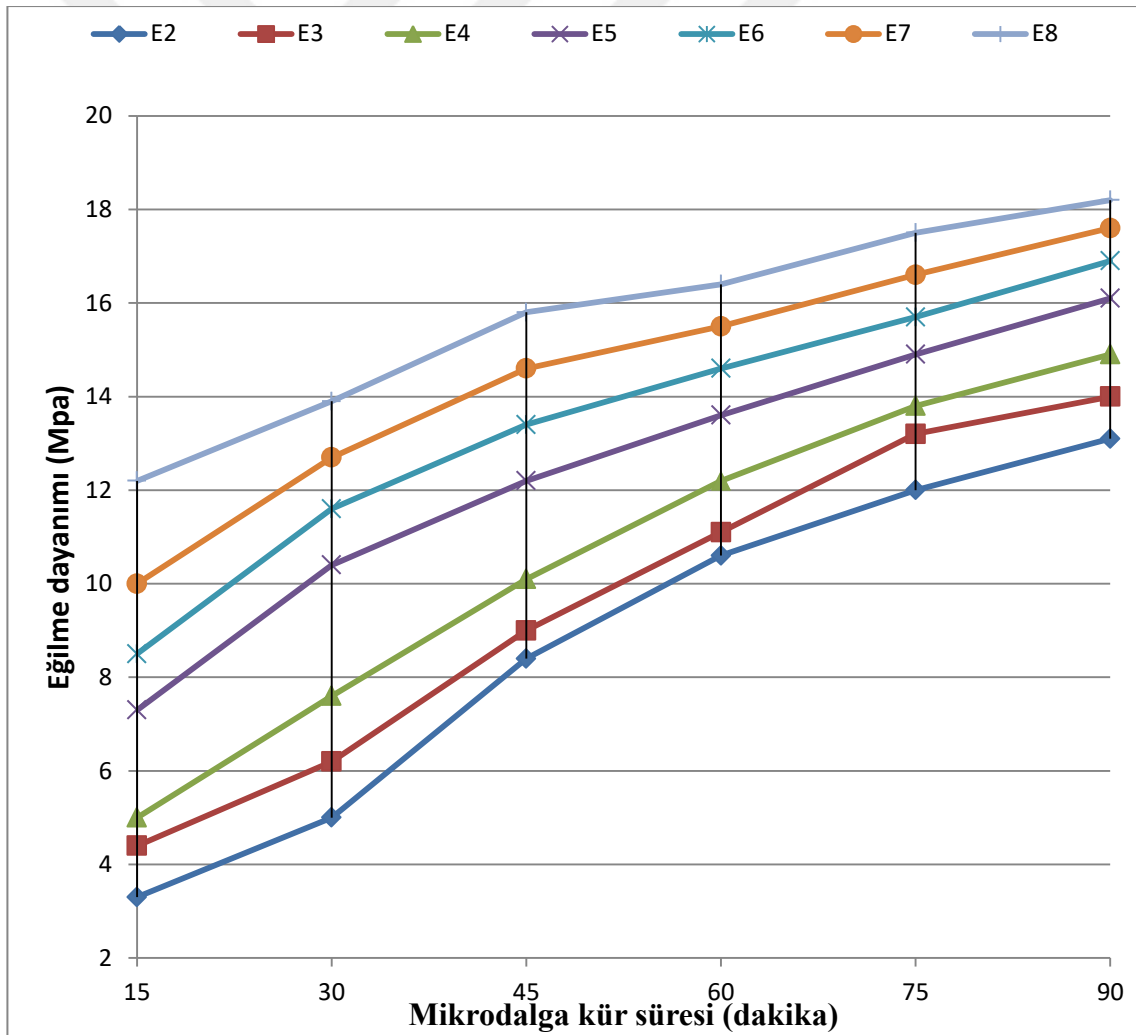


Şekil 4.14. Mikrodalga kürlemenin, havada kürlemeyen ve 6 ay havada kürlenene numunelerin eğilme dayanımının üzerine etkisi.

Şekil 4.14.'te havada 6 ay kürlenene numunelerin, havada kürlenmeyen numunelerine göre eğilme dayanımı erken yaşlardan itibaren arttığını ve artan oranın 30 dakikalık mikrodalga kürüne kadar sabit olduğu görülmüştür. Aynı zamanda 30. dakikadan sonra artan oranın eğilme dayanımında azaldığı gözlemlenmiştir.

Tablo 4.16. Geopolimer Harcın Eğilme Dayanımı Sonuçları

Hava kür süresi	Mikrodalga kür süresi (dakika)					
	15	30	45	60	75	90
	Eğilme dayanımı (Mpa)					
2 saat	3.3	5.0	8.4	10.6	12.0	13.1
3 gün	4.4	6.2	9.0	11.1	13.2	14.0
7 gün	5.0	7.6	10.1	12.2	13.8	14.9
28 gün	7.3	10.4	12.2	13.6	14.9	16.1
56 gün	8.5	11.6	13.4	14.6	15.7	16.9
3 ay	10.0	12.7	14.6	15.5	16.6	17.6
6 ay	12.2	13.9	15.8	16.4	17.5	18.2



Şekil 4.15. Mikrodalga ve hava kür süresinin eğilme dayanıma etkisi.

4.3. Su emme

Geopolimer numunelerinin etüv kurusu ağırlıkları 105°C de 24 saat ısıtılma sonrasında oda sıcaklığına soğuduktan sonra en az 24 saat suda bekletilerek havadaki doymuş yüzey kuru ağırlıkları tartılmış. Ölçülen ağırlıklar kullanılarak su emme oranı tayin edilmiştir. Kontrol numunesinin (G1) su emme oranı 7,76% bulunmuştur.

NaOH ile aktifleştirilen geopolimerler ile üretilen numunelerin su emme Tablo 11’de sunulmuştur.

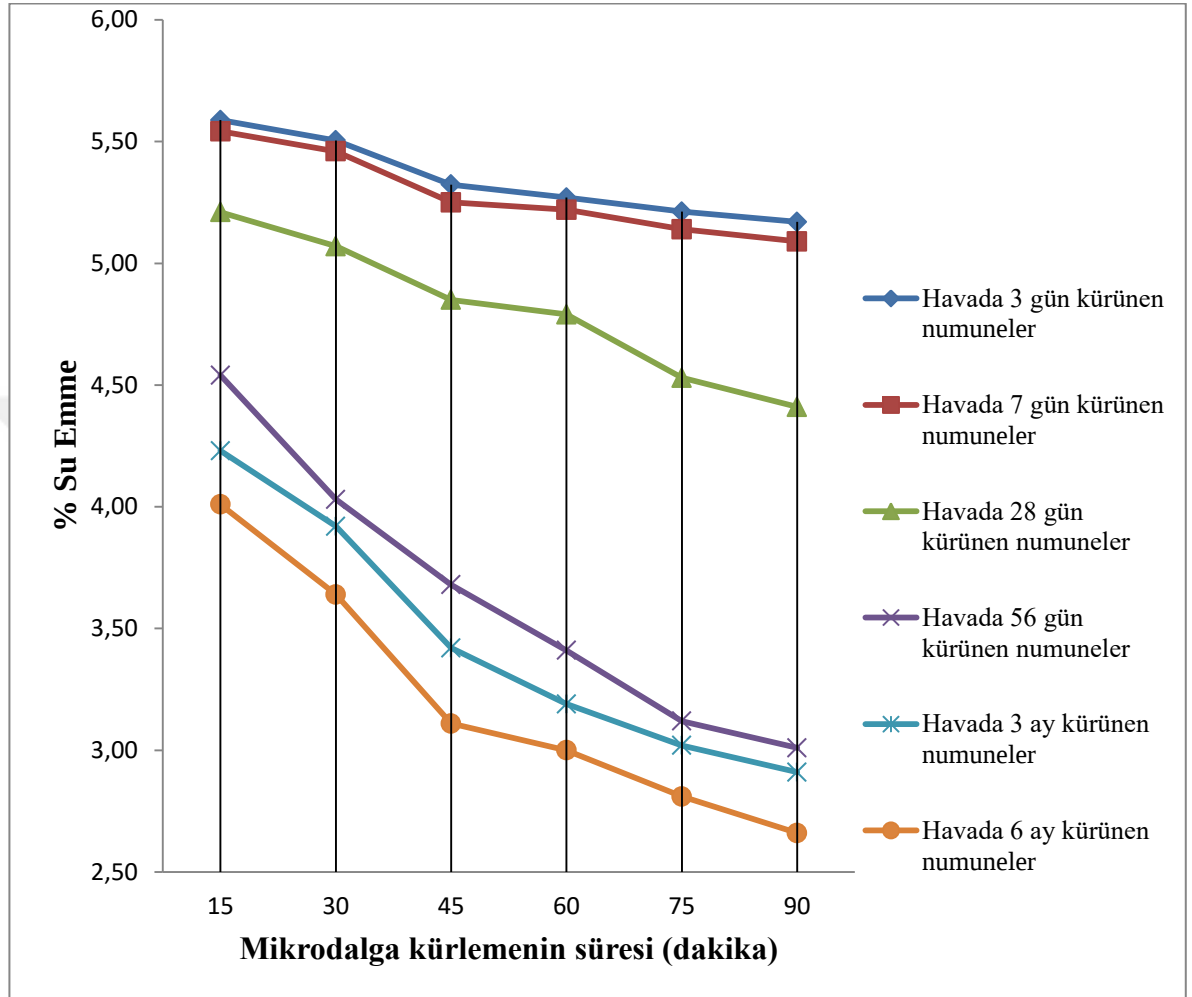
Tablo 4.17. Geopolimer Harcın Su Emme Sonuçları

<i>Hava kür süresi</i>	<i>Mikrodalga kür süresi (dakika)</i>					
	15	30	45	60	75	90
	<i>Su Emme %</i>					
2 saat	5.72	5.61	5.47	5.35	5.29	5.23
3 gün	5.59	5.50	5.32	5.27	5.21	5.17
7 gün	5.54	5.46	5.25	5.22	5.14	5.09
28 gün	5.21	5.07	4.85	4.79	4.53	4.41
56 gün	4.54	4.03	3.68	3.41	3.12	3.01
3 ay	4.23	3.92	3.42	3.19	3.02	2.91
6 ay	4.01	3.64	3.11	3.00	2.81	2.66

Çalışmada üretilen geopolimer betonların su emme oranları dikkate alındığında ise havada kür edilen örneklerde kür süresini artışıyla su emme oranlarında azaldığı bulunmuştur. Bünyedeki içyapı gelişiminin daha iyi olduğu düşünülen bu örneklerde su emme oranlarının daha düşük seviyelerde kaldığı düşünülmektedir [33]. Hava kür süresi arttıkça genellikle su emme oranlarında düşmektedir. Bunun nedeni geopolimerlerin daha boşluksuz bir yapı oluşması ile açıklanmıştır. Bu eğilim tüm örnekler için lineer bir davranış olmasa da benzerlik göstermektedir.

Tablo 4.17.’dan görüleceği üzere Genel olarak, 15, 30, 45, 60, 75 ve 90 dakikalık mikrodalga kürüne ilave olarak havada farklı süre kürünen numunelerin, referans numunesinden sırasıyla (%28 ila %48), (%29 ila %53), (%31 ila %60), (%32 ila %62), (%33 ila %64) ve (%34 ila %67) oranında daha düşük bulunmuştur. En düşük su emme oranı 90 dakikalık mikrodalgada ve 6 ay havada kürünen numunede (%2,66)

bulunmuştur. Malzemelerde su emme önemli bir fiziksel özelliktir ve düşük su emme oranına sahip malzemelerin kullanılması tercih edilmektedir.



Şekil 4.16. Mikrodalga ve hava kür süresinin su emmesine etkisi.

4.4. İşlenebilirlik Deney Sonuçları

Çalışmada üretilen sodyum hidroksit ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer taze harç numunelerinin yayılma değeri, yayılan harç numunenin ortalama çapının ölçülmesiyle belirlenmiştir. TS EN 1015-3'e göre yapılan yayılma tablası deneyine ait kıvam değeri 103 mm ölçülmüştür. Taze harç kıvamını çok az olduğu görülmüştür. Bunun nedeni sodyum hidroksit reaksiyonu sonucu açığa çıkacak su miktarının karışıma dışardan girecek su miktarından düşülmesidir [25].

Bu çalışmada tüm karışımın oranları aynı olduğu için işlenebilirlik deney sonuçları da benzer olduğu görülmüştür.



Şekil 4.17. İşlenebilirlik testi

5. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada elde edilen verilerden, mikrodalga kürüne ilave hava kürü uygulamanın geopolimer dayanımını nasıl etkilidiği ile ilgili bazı sonuçlara ulaşılmıştır. Bu sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Etüvde 75 °C'de 6 saat boyunca geleneksel ısı ve mikrodalga ile 15 ve 30 dakika kürlenen numunelerin ilk 7 günde nispeten düşük dayanım sonuçları göstermiştir. Ancak ilave olarak 28 gün kürlemeden sonra, basınç ve eğilme dayanımı büyük ölçüde artmıştır ve ilk gün dayanımın iki katına ulaşabilmiştir. Bunun nedeni, geleneksel fırın ve mikrodalga ile kürünün polimerizasyon işlemini tamamlamak için yeterli olmamasıdır ve numuneler dayanım kazanması devam ettiği görülmüştür.
- 45, 60, 75 ve 90 dakika mikrodalga ile kür edilen numuneler büyük ölçüde yüksek sonuçlar vermiştir. Dayanım kazanma süreci neredeyse düzenli bir şekilde olduğu tesbit edilmiştir ve ilk 30 dakikada olduğu gibi 3 gün ile 28 gün arasında dayanım kazanmada anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir.
- Hava kürlenme süresinin gelişimi ve mukavemet gelişimi uyumlu olduğu bulunmuştur, ve geopolimerik reaksiyonu devam ettirmek ve daha yüksek mukavemet elde edilebilmek için hava kürlenme süresi artmasının olumlu etkisi tespit edilmiştir.
- Su emme testinde hava kürlenme süresi artıkça su emme oranı azaldığı tesbit edilmiştir. Aynı zamanda 3 ve 7 gün havada kür edilen numunelerin arasında çok büyük bir fark gözlemlenmemiştir.

5.2 Öneriler

- Türkiye’de üretilen külün çok az bir kısmı kullanılabildiği için, daha fazla kül kullanımı teşvik etmek adına geopolimer beton üretimi desteklenmelidir.
- Mikrodalga ısıtma altında çalışan kalıplar kullanarak geleneksel kürleme uygulamadan önce örnekleri mikrodalgada kürlenebilir.
- Bu araştırmada, numuneler 6 aylık bir süre boyunca hava ile kür edilmiştir ve numunelerin geopolimerasyonu 6 ay sonra bile devam ettiği için hava kürü daha uzun bir süre de araştırabilir.

KAYNAKÇA

- [1] Z. Li, 2011. Advanced concrete technology: John Wiley & Sons.
- [2] F. Ridi, 2010. "Hydration of cement: Still a lot to be understood," **La Chim. L'Industria**, vol. 3, pp. 110-117.
- [3] L. Marmo, 2008. "EU strategies and policies on soil and waste management to offset greenhouse gas emissions," **Waste Management**, vol. 28, pp. 685-689.
- [4] P. K. Mehta, 2009. "Global concrete industry sustainability," **Concrete international**, vol. 31, pp. 45-48.
- [5] C. D. Atış, 2005. "Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete, and influence of curing condition," **Cement and Concrete Research**, vol. 35, pp. 1112-1121.
- [6] J. Davidovits, 1991. "Geopolymers: inorganic polymeric new materials," **Journal of Thermal Analysis and calorimetry**, vol. 37, pp. 1633-1656.
- [7] I. B. Topcu and M. Canbaz, 2007. "Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash," **Construction and Building Materials**, vol. 21, pp. 1486-1491.
- [8] M. Kamon, T. Katsumi, and Y. Sano, 2000. "MSW fly ash stabilized with coal ash for geotechnical application," **Journal of Hazardous Materials**, vol. 76, pp. 265-283.
- [9] D. Hobbs, 1983. "Influence of fly ash upon the workability and early strength of concrete," **Special Publication**, vol. 79, pp. 289-306.
- [10] S. Islam, 2010. "Study on rate of strength gain of concrete mix prepared with locally available composite cements,".
- [11] M. Thomas, M. Shehata, and S. Shashiprakash, 1999. "The use of fly ash in concrete: classification by composition," **Cement, concrete and aggregates**, vol. 21, pp. 105-110.
- [12] M. Thomas, 2007. Optimizing the use of fly ash in concrete vol. 5420: Portland Cement Association Skokie, IL.

- [13] P. Türker, B. Erdoğan, F. Katnaş, and A. Yeğınobalı, 2009. "Türkiye'deki Uçucu Küllerin Siniflandırılması Ve Özellikleri," Ankara, Tçmb.
- [14] D. C. Comrie and W. M. Kriven, 2004. "Composite cold ceramic geopolymer in a refractory application," in *Advances in Ceramic Matrix Composites IX*, Proceedings, pp. 211-225.
- [15] J. van Jaarsveld and J. Van Deventer, 1999. "Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 38, pp. 3932-3941.
- [16] D. Hardjito and B. V. Rangan, 2005. "Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete,".
- [17] N. Makul, P. Rattanadecho, and D. K. Agrawal, 2014. "Applications of microwave energy in cement and concrete—a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 37, pp. 715-733.
- [18] F. Khaleel, 2019. "Mikrodalga Kürünün F Sinifi Uçucu Kül Geopolimer Harcin Dayanım Gelişimi Üzerine Etkisinin Araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Erciyes üniversitesi, Kayseri Türkiye.
- [19] S. İ. Cengiz Duran Atış, Okan Karahan, Ela Bahşude Görür, 2014. "Alkali İle Aktifleştirilen Uçucu Kül Geopolimer Harcın Mekanik Özellikleri Üzerine Isıl Kür Süresinin Etkisi," *Ulusal Beton Kongresi*, p. 7. Kayseri, Türkiye.
- [20] H. binici, M. Eken, and O. Aksoğan, 2012. "Cüruf, Uçucu Kül, Silis Kumu ve Pomza Esaslı Geopolimerlerin Fiziksel, Mekanik Ve Radyasyon Geçirgenlik Özellikleri," *Electronic Journal of ConstructionTechnologies*, vol. 8, pp. 12-25.
- [21] İ. B. Topçu, M. U. Toprak, and D. Akdağ, "Mikrodalga Kür Yöntemi ile Beton Dayanımın Erken Belirlenmesi," **Teknik Dergi**, vol. 19, pp. 4539-4544.
- [22] J. Somaratna, D. Ravikumar, and N. Neithalath, 2010. "Response of alkali activated fly ash mortars to microwave curing," **Cement and Concrete Research**, vol. 40, pp. 1688-1696.
- [23] U. Rattanasak and P. Chindapasirt, 2009. "Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer," **Minerals Engineering**, vol. 22, pp. 1073-1078.

- [24] İ. B. Topçu and Y. Ö. Topkara, "Mikrodalga Kürün Uçucu Küllü Harçların Basınç Dayanımına Etkisi," **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi**, vol. 24, pp. 109-118.
- [25] M. M. Al Bakri Abdullah, M. F. Mohd Tahir, K. Hussin, M. Binhussain, and J. J. Ekaputri, 2016. "Effect of Microwave Curing to the Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymer Mortar," in Materials Science Forum, pp. 193-199.
- [26] T. Aydın and Z. O. Pehlivanlı, 2017. "Jeopolimer esaslı gözenekli hafif yapı malzemelerinin geliştirilmesi," **Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi**, vol. 8, pp. 227-236.
- [27] S. Subaşı, B. işbilir, and İ. Ercan, 2011. "Uçucu kül ikameli çimento numunelerinin mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkisi," **Politeknik Dergisi**, vol. 14, pp. 141-148.
- [28] B. V. Rangan, D. Hardjito, S. E. Wallah, and D. M. Sumajouw, 2005. "Studies on fly ash-based geopolymer concrete," in Proceedings of the World Congress Geopolymer, Saint Quentin, France, pp. 133-137.
- [29] I. Concrete, "Farmington Hills, Michigan, ACI Committee 232. 2004." Use of Fly Ash USA, American Concrete Institute, vol. 41.
- [30] J. Best, 1982. "Properties and use of fly ash in Portland cement concrete," **Concrete International**, vol. 4, pp. 81-92.
- [31] L. Malvar, G. Cline, and D. Burke, "Preventing alkali-silica reaction," in Airfield Pavements: Challenges and New Technologies, ed, 2004, pp. 378-389.
- [32] W. I. Luke, 1961. "Nature and distribution of particles of various sizes in fly ash," Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Miss.
- [33] R. Prommas and T. Rungsakthaweekul, 2014. "Effect of microwave curing conditions on high strength concrete properties," **Energy Procedia**, vol. 56, pp. 26-34.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Moath Ibrahim Ali KWAMI
Uyruğu: Irak (IQ)
Doğum Tarihi ve Yeri: 01.04.1994 - Kerkük
Medeni Durum: Bekar
e-mail: moathalobaidy@yahoo.com
Yazışma Adresi: Mevlâna mah, Şehit Ali Örnek Cad., Ermiş Sok.,
Talas/Kayseri

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü	2020
Lisans	Kerkük Üniversitesi, Civil Engineer Department	2016
Lise	Alıraq lisesi, kirkük	2012

YABANCI DİL

Arapça (ana dili), İngilizce, Türkçe