



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ KAYNAKLARI VE YÖNETİMİ ANABİLİM DALI

**ISI YALITIMI VE YANMAZLIK ÖZELLİĞİ OLAN FİBER
TAKVİYELİ JEOPOLİMERİK LEVHA ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜRKAN GEZER

Tez Danışmanı

Doç. Dr. UĞUR CENGİZ

ÇANAKKALE – 2022



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ KAYNAKLARI VE YÖNETİMİ ANABİLİM DALI

**ISI YALITIMI VE YANMAZLIK ÖZELLİĞİ OLAN FİBER TAKVİYELİ
JEOPOLİMERİK LEVHA ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Türkan GEZER

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Uğur CENGİZ

Bu çalışma, ÇOMÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon Başkanlığı kurumu tarafından desteklenmiştir.

Proje No: FYL-2019-3084

ÇANAKKALE – 2022



T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



İsim SOYİSMİ tarafından Doç. Dr. Uğur CENGİZ yönetiminde hazırlanan ve 10/05/2022 tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “Isı Yalıtımı ve Yanmazlık Özelliği Olan Jeopolimerik Levha Üretimi” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Enerji Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Doç. Dr. Uğur CENGİZ
(Danışman)

Doç. Dr. Necati KAYA

Doç. Dr. Hikmet OKKAY

.....

.....

.....

Tez No :

Tez Savunma Tarihi : 10/05/2022

.....
Doç. Dr. Yener PAZARCIK
Enstitü Müdürü

.././20..

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

(İmza)

Türkan GEZER

10 /05/2022

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleőtirilmesinde, tüm çalıőmam boyunca benden bir an olsun emeklerini ve fikirlerini esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Uğur CENGİZ'e,

Tez yazım aşamasında ve labaratuvar çalışmaları sırasında bana yardımcı olan arkadaşlarım Damla YILMAZ ve Fatma Gülçin DURMAZ'a

Tüm emeklerini benden esirgemeyen, hayatımın her aşamasında, her baőarisında yanımda olan değerli olan babam Kadir GEZER ve annem Firdevs GEZER'e sonsuz sevgilerimi ve saygılarımı sunar teőekkürü borç bilirim

Türkan GEZER
anakkale, Mayıs 2022

ÖZET

ISI YALITIMI VE YANMAZLIK ÖZELLİĞİ OLAN FİBER TAKVİYELİ JEOPOLİMERİK LEVHA ÜRETİMİ

Türkan GEZER

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman:Doç. Dr. Uğur CENGİZ

10/05/2022, 57

Ülkemizde toplam elektrik enerjisinin %35' i binalarda kullanılmaktadır. Binalarda kullanılan enerjinin çoğu ısıtma ve soğutma işlemlerinde kayıp olan enerjidir. Bu yüzden, günümüzde ısı yalıtımı artan enerji maliyetleriyle çok daha önemli bir hale gelmiştir. Yapı malzemesi olarak ısı yalıtımında en çok EPS ve benzeri polimerik malzemeler, izolasyon boyları ve son zamanlarda taş yünü kullanılmaktadır. EPS benzeri sistemlerin yüksek ısı yalıtım performansı yanında yanıcı olması ve binanın nefes alamamasından dolayı iç duvarlarda küflenme meydana gelmesi bir dezavantajdır. Diğer yandan, yanmaya karşı direnci olan izolasyon boylarında ise ısı yalıtımı istenilen düzeylerde değildir. Taş yününün ise yüksek ısı yalıtımı yanında, A1 sınıfı yanmaz malzeme olması avantajdır. Ancak yüksek yoğunluk (150 kg/m^3) ve üretim esansında $1400-1500 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıklara çıkılması ilave enerji ziyarı ve ek CO_2 salımı yüzünden birer dezavantaj olmaktadır. Bu yüzden biz bu tez çalışmasında, piyasada var olan bu ürünlerden farklı olarak ısı yalıtımı yapan ve yangın geciktirici özelliği olan fiber takviyeli jeopolimer malzeme üretimi ve uygulanmasını amaçlanmıştır. Bu amaçla "Kalekim" ve metakaolin levhalar ile aynı ebatta elyaf takviyeli metakaolin levhaların ısı yalıtım özellikleri araştırılmıştır. Yapılan çalışmalarda ağırlıkça %5,6 cellubor lif içeren metakaolen levhaların lif içermeyen kalekim levhaya göre yaklaşık %75, lif içermeyen metakaolen levhaya göre yaklaşık %55 oranında daha iyi yalıtım özelliği gösterdiği bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Isı Yalıtımı, Çevre Dostu Malzeme, Jeopolimer, Metakaolen



ABSTRACT

PRODUCTION OF FIBERREINFORCEDGEOPOLYMERICSHEETSWITHTHERMALINSULATION ANDEFLAMMABILITY

Türkan GEZER

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Master of Science Thesis in Energy Resources and Management

Advisor: Doç. Dr. Uğur CENGİZ

10/05/2022, 57

In our country, 35% of the total electrical energy is used in buildings. Most of the energy used in buildings is energy lost in heating and cooling processes. For this reason, thermal insulation has become even more important with increasing energy costs. EPS and similar polymeric materials, insulation paints, and recently stone wool are used as building materials. In addition to the high thermal insulation performance of EPS and similar systems, it is a disadvantage that molds occur on the interior walls since they are flammable, and the building cannot breathe. On the other hand, heat insulation is not at the desired levels in insulation paints resistant to burning. In addition to high thermal insulation, stone wool is advantageous in that it is a class A1 fireproof material. However, it has a high density (150 kg/m^3) and cost disadvantages reaching $1400\text{-}1500 \text{ }^\circ\text{C}$ for stone wool production which means energy waste and additional CO_2 emissions. Unlike these products existing in the market, this thesis work has aimed at the production of fiber-reinforced geopolymer materials and sheets that have high strength, heat insulation, and give structure non-flammability. For this purpose, the thermal insulation properties of "Kalekim" and metakaolin sheets and fiber-reinforced metakaolin sheets of the same size were investigated. It was found that the metakaolin sheets having 5.6% cellulose fiber by weight showed better insulation properties by 75% compared to the fiber-free kalekim sheets, and approximately 55% better than the fiber-free metakaolin sheets.

Keywords: Thermal Insulation, Environmentally friendly materials, Geopolymer, Metakaolen



İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
BİRİNCİ BÖLÜM	
GİRİŞ	
	1
İKİNCİ BÖLÜM	
KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	
	3
2.1. Jeopolimer Nedir?	3
2.2. Jeopolimerin Avantajları	6
2.3. Jeopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler	7
2.3.1. Uçucu Kül	7
2.3.2. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)	9
2.3.3. Metakaolen	9
2.3.4. Alkali Aktivatörler	10
Sodyum Hidroksit	11
Sodyum Silikat	11
Potasyum Hidroksit	12
2.4. Takviye Edici Malzemeler	12
2.4.1. Cellubor Lif	12
2.4.2. Polipropilen Fiber	13
2.5. Jeopolimer Mekanizması	14

2.6. Jeopolimer Uygulama Alanları	17
2.7. Önceki Çalışmalar	18

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL YÖNTEM

22

3.1. Materyal	22
3.1.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler	22
Metakaolen	22
Aktivatör Çözelti Bileşenleri	23
Cellubor Fiber	23
Polipropilen Fiber	24
3.1.2. Karakterizasyonda Kullanılan Cihazlar	25
Kalıp	25
Alev Tabancası	25
Termokupl Termometre	26
Alev Testi	27
3.2. Yöntem	28
3.2.1. Jeopolimer Reçetelerinin Formülasyonu	28
3.2.2. Jeopolimerlerin Hazırlanışı	29

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI

32

4.1. Fiber İçermeyen Kalekim ve Jeopolimerik Levha Analizi	32
4.2. Fiber İçeren Jeopolimerik Levha Analizi	34
4.2.1. Cellubor Fiber İçeren Jeopolimerik Levha Analizleri	34
4.2.2. Polipropilen Fiber İçeren Jeopolimerik Levha Analizleri	39
4.2.3. Polipropilen Fiber ve Cellubor Fiber İçeren Jeopolimerik Levha Analizleri	44

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ ve ÖNERİLER

50

KAYNAKÇA	52
ÖZGEÇMİŞ	I

SİMGELER VE KISALTMALAR

Al	Alüminyum
AL ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
ASTM	American Society for Testing and Materials
°C	Santigrad
CB	Cellulose Lif
Ca	Kalsiyum
CaO	Kalsiyum Oksit
CO ₂	Karbondioksit
C-S-H	Kalsiyum Silikat Hidrat
EPS	Expanded Polystyrene Foam
Fe ₂ O ₃	Demir Oksit
K	Potasyum
K ₂ CO ₃	Potasyum Karbonat
K ₂ O	Potasyum Di Oksit
KOH	Potasyum Hidroksit
K ₂ SO ₄	Potasyum Sülfat
NaOH	Sodyum Hidroksit
Na ₂ O	Sodyum Di Oksit
Na ₂ CO ₃	Sodyum Karbonat
Na ₂ SO ₄	Sodyum Sülfat
NaSiO ₃	Sodyum Silikat
M	Molarite
MJ	Megajoule
MgO	Magnezyum Oksit
PP	Polipropilen Lif
Si	Silisyum
SiO ₂ K ₂ O	Potasyum Silikat
SiO ₂ Na ₂ O	Sodyum Su Camı
SO ₂	Kükürt Di Oksit
PO	Portland Çimentosu
PÇ	Portland Çimentosu

Wt

Lif Miktarı



TABLolar DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	Üretilen levhalar ve yapı içerikleri	29
Tablo 2	Lif içermeyen metakaolen ve kalekim levha alev testi sonuçları	34
Tablo 3	Farklı oranlarda CB lif içeren metakaolen levhaların alev testi sonuçları	35
Tablo 4	Farklı oranlarda PP lif içeren metakaolen levhaların alev testi sonuçları	39
Tablo 5	Farklı oranlarda PP+CB lif karışımı içeren metakaolen levhaların alev testi sonuçları	44

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Jeopolimer ve PÇ basınç dayanımı karşılaştırma grafiği (2010 International Concrete Sustainability Conference, Dubai, UAE)	7
Şekil 2	SEM ile çekilmiş mikroskobik uçucu kül yapısı (Terzano, 2005)	8
Şekil 3	Deneylerde kullanılan metakaolen	22
Şekil 4	Deneylerde kullanılan sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı	23
Şekil 5	Deneylerde kullanılan cellubor fiber	24
Şekil 6	Deneylerde kullanılan polipropilen fiber	24
Şekil 7	Deneylerde kullanılan kalıp	25
Şekil 8	Deneylerde kullanılan alev tabancası	26
Şekil 9	Levha üzerindeki termokupl termometre	27
Şekil 10	Alev testi	28
Şekil 11	Jeopolimer üretim şeması	30
Şekil 12	NaOH, sodyum silikat ve saf suyun karıştırıcıda karıştırılması	31
Şekil 13	Karıştırılan harç	31
Şekil 14	Jeopolimer harçla doldurulmuş kalıp	31
Şekil 15	Fiber içermeyen kalekim levha alev testi grafiği	33
Şekil 16	Fiber içermeyen metakaolen levha alev testi grafiği	33
Şekil 17	Cellubor fiber (CB1) içeren metakaolen levha alev testi grafiği	35
Şekil 18	Cellubor fiber (CB2) içeren metakaolen levha alev testi grafiği	36
Şekil 19	Cellubor fiber (CB3) içeren metakaolen levha alev testi grafiği	37
Şekil 20	Cellubor fiber (CB4) içeren metakaolen levha alev testi grafiği	37
Şekil 21	Cellubor fiber (CB5) içeren metakaolen levha alev testi grafiği	38
Şekil 22	Artan CB lif miktarına bağlı metakaolen levha alev geciktirme süresi değişimi	39

Şekil 23	Polipropilen fiber (PP1) içeren metakaolen levha alev testi grafiği	40
Şekil 24	Polipropilen fiber (PP2) içeren metakaolen levha alev testi grafiği	40
Şekil 25	Polipropilen fiber (PP3) içeren metakaolen levha alev testi grafiği	41
Şekil 26	Polipropilen fiber (PP4) içeren metakaolen levha alev testi grafiği	42
Şekil 27	Polipropilen fiber (PP5) içeren metakaolen levha alev testi grafiği	43
Şekil 28	Artan PP lif miktarına bağlı metakaolen levha alev geciktirme süresi değişimi	43
Şekil 29	Polipropilen ve cellubor fiber karışımı içeren (CBPP1) metakaolen levha alev testi grafiği	44
Şekil 30	Polipropilen ve cellubor fiber karışımı içeren (CBPP2) metakaolen levha alev testi grafiği	45
Şekil 31	Polipropilen ve cellubor fiber karışımı içeren (CBPP3) metakaolen levha alev testi grafiği	46
Şekil 32	Polipropilen ve cellubor fiber karışımı içeren (CBPP4) metakaolen levha alev testi grafiği	47
Şekil 33	Polipropilen ve cellubor fiber karışımı içeren (CBPP5) metakaolen levha alev testi grafiği	48
Şekil 34	Artan CB+PP lif karışımına bağlı metakaolen levha alev geciktirme süresi değişimi	49

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

Dünya nüfusu arttıkça enerji tüketimi ve enerjiye olan bağılılıkta artmaktadır. Günümüzde enerji ihtiyacının çoğu fosil yakıtlar kullanılarak karşılanmaktadır. Bu yakıtlar milyonlarca yıl yer kabuğu içerisinde ısı ve basınç farklılaşması ile fosilleşen bitki ve hayvanlarda oluşmuş oldukça yüksek hidrakerbon içeriği olan organik maddelerdir. Doğal olarak belli bir süre sonrası bu yakıtların tükeneceği bir gerçektir. Gelişen dünyada insanların enerji ihtiyacının artan nüfus ve teknoloji ile artması ve aynı zamanda fosil yakıtların belli bir süre sonra kalmayacağından dolayı yenilebilir enerji kaynaklarının önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bununla birlikte enerji tasarrufu da aynı derecede önemli hale gelmektedir. Üretilmesi gün geçtikçe daha kıymetli olan bir maddenin tüketilmesi esnasında ihtiyaçlar doğrultusunda oldukça cimri davranılması günümüzde elzem bir hal almaktadır. Bu amaçla, bu alanda çalışmalar enerji kaynaklarını daha verimli halde kullanıp enerji tasarrufunun ön plana çıkacağı akıllı binalar ve çevre dostu uygulamalar üzerine yoğunlaşmışlardır. Güncel uygulamada binalar ve tüm betonarme yapılarda mükemmel bir bağlayıcı özelliği olan Portland Çimento kullanılmaktadır. Ancak, Portland Çimento üretimi esnasında yüksek oranda sera gazı (CO₂, NO_x, SO₂ vs.) atmosfere salınır ve çok fazla enerji tüketilir (Chindaprasirt vd., 2007).

Bir ton Portland Çimento üretimi aşamasında atmosfere bir ton CO₂ salını yapılmaktadır (Meyer, 2009; Sarker, 2013).

Tüketilen Portland Çimento miktarına bakıldığında zaman, dünya genelinde bir senede sadece Portland Çimento üretimi için atmosfere 1,5 milyar ton CO₂ gazı salınmaktadır. Bu değer dünyada toplam salınan CO₂ gazının yaklaşık olarak %5' ine tekabül etmektedir. Bu kadar yüksek CO₂ salımı ve yüksek enerji ihtiyacı araştırmacıları alternatif bağlayıcı ve yapı malzemeleri araştırmasına itmektedir (Davidovits, 1994; Damtoft vd., 2008).

Portland Çimentoya alternatif çalışmalar 1972 yılında Joseph Davidovits tarafından Jeopolimer kavramının geliştirmesiyle başlamıştır (Davidovits, 1976).

Jeopolimerin alternatif bir yapı malzemesidir. Ana ürünü jeolojik kökenli metakaolen, şamot vb. malzemelerdir. Üretimi esnasında jeopolimerizasyon işlemine tabii tutulurlar. Jeopolimerizasyon reaksiyonunda alkali çözelti olarak NaOH, KOH, SiO₂K₂O çözeltileri kullanılır. Reaksiyonda ana ürün olarak yapısında Al ve Si içeren metakaolen,

Şamot gibi bir maden veya uçucu kül, yüksek sıcaklık curüfü gibi atık malzemeler olabilir (Zhu ve Yao, 2013; Davitovits, 2008).

Uçucu kül, dünyada bol miktarda bulunan, elektrik santrallerinde elektrik elde edilmek için kömürün yanması sonucu oluşan bir üründür. Bu külün bileşimi kullanılan yakıtın cinsine ve kaynağına göre büyük oranda farklılıklar göstermekle beraber ana bileşenleri SiO₂ (%40-60), Al₂O₃ (% 20-30), CaO (% 5-30) ve Fe₂O₃ (% 4-10) şeklindedir. Bununla beraber bu kül yapısında ciddi ağır metaller bulunmaktadır. Bu ağır metal içerisinde bulundurması nedeniyle toprak altında bertarafı hem toprağa hemde suya ağır metal karışımı nedeniyle çevre bakımından ciddi zararlara neden olmaktadır. Bununla birlikte, eğer bu küller açık arazide depolanırsa bu durumda da tozuma ile insan sağlığına direk zararlı olmaktadır. Bu yüzden uçucu küllerin en güzel bertarafı jeopolimeriazasyon reaksiyonları ile kullanılması olmaktadır. Ancak bu durumda da uçucu küllerin ana madde olduğu jeopolimer yapılar yapı malzemesi olarak kullanılmasında sıkıntılar olmaktadır. Bu yüzden bu şekilde ağır metal içeren jeopolimer ana maddeleri, yapı malzemeleri yerine yol yapımında asfalt altına dolgu malzemesi gibi kullanılmaktadır. Aynı problemler fabrika curüflarında da vardır. Bu amaçla daha temiz ve doğal olan metakaolen gibi madenler jeopolimer üretiminde ana girdi olarak kullanılması daha uygun olmaktadır.

Bu tez çalışmasının ana hedefi, piyasadaki ısı yalıtım malzemelerine daha çevreci bir şekilde alternatif bir yapı malzemesi üretilmesi ve bu yapı malzemesinin Portland çimento ile üretilen yapılarla karşılaştırılabilir mukavemette ve üstün ısı yalıtım özelliklerine sahip olmasıdır. Bu amaçla, çalışmada ticari olarak satın alınmış metakaolen girdi olarak kullanılacaktır. Çalışmalarda NaOH, KOH, SiO₂ ve Na₂O kimyasalları ile alkali çözeltiler hazırlanıp oda sıcaklığında jeopolimeriazasyon ile alternatif yapı malzemesi üretilenektir. Jeopolimer ürünün ısı yalıtımının artırılması için yapıya farklı oranlarda fiber takviyesi eklenecektir. Çalışmalar fiber takviyeli jeopolimer levhalar ile Portland çimentodan hazırlanan levhaların ısıl karşılaştırılması ile sonuçlanacaktır. Bu tez çalışmasının nihai hedefi, piyasadaki ısı yalıtım malzemelerin ile rekabet edebilecek fiber takviyeli jeopolimer tabanlı bir yalıtım malzemesinin üretilmesidir.

İKİNCİ BÖLÜM

KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Jeopolimer Nedir?

Jeopolimer tanımı ilk defa Fransız bilim insanı Joseph Davidovits tarafından türetilmiştir.Yapısında silika ve alümina bakımından zengin katıların, polimerlerin çimentoların ve seramiklerin özelliklerini birleştiren, yüksek alkali bir çözeltiyle (NaOH, KOH, $\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$ ve $\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$) tepkimeye girmesiyle elde edilen bir inorganik polimer türüdür(Davidovits, 1994).

Çevre dostu olup ekonomik olarak geliştirilebilir ve teknik özelliklerinin iyi olması nedeniyle, jeopolimerlerin portland çimentonun yerine geçebilecek bu sebepten ötürü beton üretimini yüksek oranda etkisi altına alabilecek; inşaat mühendisliği ve inşaat sektöründe, malzeme mühendisliği ve malzeme sektöründe bir devrimi tetiklemesi beklenmektedir.Portland çimentonun keşfinden çok uzun zamanlar önce Mısırlıların binlerce yıl dayanabilen devasa piramitleri hakkında Davidovits' in yazmış olduğu "Neden firavunlar piramitleri sahte taşlarla inşa ettiler?" adlı eserinde bu piramitlerin ve buna benzer antik kentlerde bulunan yapılarda jeopolimerik malzeme olduğunu ispatlamıştır. Bu gelişim, yeni keşfedilmiş bir ürün olan jeopolimerin başarılı bir sonuç olduğunun göstergesidir (Davidovits, 2009).

Davidovits, 1969-1973 seneleri süresince Avrupa'da oluşan birçok yangınının sonrasında yanmazlık özelliği olan, ateşe dayanıklı, yangın geciktirici niteliği bulunan bu aşamalarda geliştirilebilecek alternatif ürünler araştırmaya başlamış ve 1972'de bugünkü adı Cordi-Géopolymère olan bir Ar-Ge şirketin kurmuştur (Provis vd., 2009; Davidovits, 2002).

J.J. Legrand ile beraber ilk çalışmalarında iki yüzeyde nano-kompozit ile kaplanmış ana gövdesi ahşap olan yangına dayanım gösterebilen kompozit bir yapı malzemesi geliştirmişlerdir. Çalışmada odun yongalarından ürettikleri levhaların yüzeylerini Na-polisialat ile kaplayıp yangına karşı dayanıklılık gösterdiklerini göstermişlerdir (Davidovits ve Legrand, 1974).

Bir başka çalışmasında, ağaç hammedesinden malzemelerin yüzeyi kaolin ve NaOH içeren kompozit karışım ile kaplanmış ve “SILIFACE Q” denen bu levhalar yanmaya karşı dayanım kazanmıştır (Davidovits, 2002).

1983 senesinin başında ise Amerika'nın önde gelen çimento üreticilerinden Lone Star Industries'in başkanı, Shell Petroleum ile birlikte Pyrament adlı bir şirket kurmuşlar ve Shell Petroleum'den organik polimer kimyasalları ile Lone Star'ın mineral agregaları kullanılarak, mineral agregaları organik polimerler ve monomerlerle birleştiren yeni bir malzeme çeşidi olan "organik polimer beton" üretmiştir. 1983 senesinin ortalarında ise Lone Star şirketi hidrolik çimento ve jepolimer oluşumuna ve kimyasının temel alan yüksek dayanıma sahip jeopolimerik birleştiriciler ve çimento tipleri geliştirmeye başlamıştır. Yaptıkları çalışmada hidrolik çimento içerikli bir malzeme olan yüksek fırın cürufunundan poli(sialat) içerikli jeopolimer üretmişlerdir. Bu birleşim sonucunda kütleme zamanında bir hızlanma olduğu ve basınç ile eğilme dayanımında ise önemli ölçüde bir artış olduğu sonucu gözlenmiştir. Davidovits ve Sawyer 1983 yılı ortalarında yapılan çalışmalar ve bulgular doğrultusunda 1985 senesinde "Erken Yüksek Dayanımlı Beton Kompozit" ismi altında bir Avrupa Patenti yayınlanmıştır. Portland çimento günümüzde en çok kullanılan ve tercih edilen mühendislik ve inşaat yapı malzemesidir. İyi derecede termal ve mekanik nicelikleri ile yüksek dayanıklılığı sebebiyle beton bağlayıcısı elemanı olarak kullanılmaktadır. Ancak üretim esnasında yüksek oranda enerji harcaması ve atmosfere CO₂ salınımı yapması nedeniyle alternatif bağlayıcılar araştırılmıştır. Jeopolimer bileşiği üretim aşamasında, portland çimentosunun üretim aşamasından yaklaşık 3,5 kat daha düşük oranda enerji harcamasıyla birlikte, sera gazı olarak 5 kat daha düşük oranda CO₂ gazı atmosfere salınımı yapılmaktadır. 1 ton jeopolimerik çimento üretimi için gereken toplam enerji (kalsinasyon ve ezilme ile) 990 MJ'dür. 1 ton PO üretiminde gereken toplam enerji ise (kalsinasyon ve ezilme ile) 3430 MJ'dür. CO₂ emisyonu; minerallerin kalsinasyonu, öğütme ve karıştırma enerjileri tamamen hesaba katılarak 0,184 ton olarak saptanmıştır (Davidovits, 2015).

Jeopolimerik malzemelere olan ilgi sadece jeopolimerin çevre dostu, yangın geciktirici, ısı ve ses yalıtımı özelliklerinin yanı sıra tehlikeli atık ambalaj malzemeleri ve hammaddelerin kapsüllenmesi ve üretim sürecinde düşük enerji tüketimine sahip olunması nedeniyle. Jeopolimerler, yüksek basınç dayanımı, yüksek oranda sıcaklık kararlılığı, yüksek oranda ısı yalıtımı ve yüksek oranda termal mühendislik çalışmaları gibi çok iyi

geliştirilebilecek niteliklere sahiptir. Jeopolimer malzemelerin yangına dayanıklılık göstergeleri olarak ısı iletkenlik, ısı ışlem sonrası dayanım kabileyeti, yanmazlık ve sıcaklık performansı örnek verilebilir. Jeopolimerler çok yüksek ısı direnci olan ve 800°C ile 1200 °C'ye kadar termal kararlılığı olan bir malzemedir. Yapısal bileşenler ısıtıldığında ve hareket etmeleri engellendiğinde, termal genleşme sonucunda yıkıcı i gerilimler oluşabilir. Genellikle tercih edilen ölçüm yöntemleri, interferometri, dilatometri ve termomekanik analiz termal genleşme ölçüm yöntemidir. Metakaolen bazlı jeopolimerlerin ısı direncini etkileyen faktörler, Si/Al molar oranı ve kullanılan alkali metal katyonlarıdır. Dilatometre ile Duxson ve ark. Çeşitli jeopolimer formülasyonlarının sonuçunda farklı alkali metal katyonlarının ve Si /Al molar oranlarının ısı ışlemi üzerindeki etkisi analiz etmişlerdir. Ayrıca mikro gözeneklerdeki suyun 100 °C'ye kadar klmeye sebebiyet vermeden buharlaştığı gözlemlenmiştir. Viskoz akış nedeniyle 600 °C'nin üzerinde önemli bir klme oluştuğu saptanmıştır (Duxson, 2007).

Kuvvet dayanımı, krleme süresine ile kürlenme sıcaklığına bağlı olup tüm betonlar için aynı olan bir niteliktir. Jeopolimerin katılaşma zamanı ve sıcaklığı uygun ve istenilen aralığa çıktığında, kuvvet dayanımı da artacaktır. Ayrıca kuvvet dayanımı, ağırlıklı olarak jeopolimer içerisinde bulunan metakaolin, kaolin ve yüksek fırın cürufu gibi hammadde tozlarının ince yapısına bağlıdır ve tozun inceliği arttığa kuvvet dayanımı artar. Ek olarak, aktivatörün yapısı ve konsantrasyonu, jeopolimerizasyon reaksiyonunda ana faktörlerdir. Sodyum silikat, reaksiyon ürününe kolayca karıştırılan ve harcın performansını önemli ölçüde artıran znmş ve kısmen polimerize edilmiş silikon içerdiğinden alkali zeltiller için çok uygundur (Rickard, 2010; Bakri, 2012).

Viskoz akış üzerine yapılan çalışmalarda, katyon yapısının (Na⁺ ve K⁺) hem viskoz akışa hemde toplam büzülme oranına etkisi olduğu bulunmuştur. Ayrıca yapıdaki Si/Al oranını ne kadar fazla ise viskoz akışdaki artış o denli yüksek olur. Ek olarak, sodyum hidroksit ve sodyum silikat konsantrasyonundaki yükselme, harç akış hızını yükselmesinde neden olacaktır (Reddy, 2010; Chindaprasirt, 2007).

Isı geçirgenliği, jeopolimerlerin ısı yalıtımı ve ürün bileşenlerinde potansiyel uygulamalar için uygunluğunu değerlendirmek çok önem arz etmektedir. rnek verilirse, jeopolimerlerin mikro yapısı ısı geçirgenliğini etkiler, özellikle jeopolimerlerin içerindeki boşluksal yapının artması ile ısı geçirgenliği önemli ölçüde azalır. Su, normal betonda

gösterdiği davranış şeklini jeopolimerler yapısında göstermektedir. Jeopolimerik beton yapımında su çok önemli bir yer almaktadır. (Bakri, 2012).

2.2. Jeopolimer Avantajları

Jeopolimerler genellikle mükemmel fiziksel, kimyasal ve çevresel niceliklere sahiptir. Bu nicelikleri listelersek;

Çevre dostudur: Portland Çimentosu ile karşılaştırıldığında, üretimi esnasında atmosfere çok daha az miktarda CO₂ salınımı yapar. Davidovits'in (1993) araştırmasına göre, gelenekselleşmiş Portland çimentosunun yaptığı sera gazı (CO₂) emisyonları, jeopolimer çimentonun altı ila dokuz katı arasında olduğunu saptamıştır. Ana hammadde olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve diğer doğa dostu olmayan atık maddeler kullanıldığında, çevre dostu olmayan maddelerden toksik olmayan yapı malzemeleri üretilmektedir. Aslında bu bir geri dönüşüm döngüsü olarak kabul edilebilir.

Yüksek sıcaklık ve yangına dayanıklılık: Jeopolimerler oluşumları gereği yüksek sıcaklıklarda herhangi bir deformeye uğramayıp kütlece bir eksilmeye uğramazlar ve yangınlarda oluşan yüksek sıcaklıkları tersine çevirmeyerek alev karşı dayanıklı malzeme olarak kullanılabilirler (Hardjito vd., 2004).

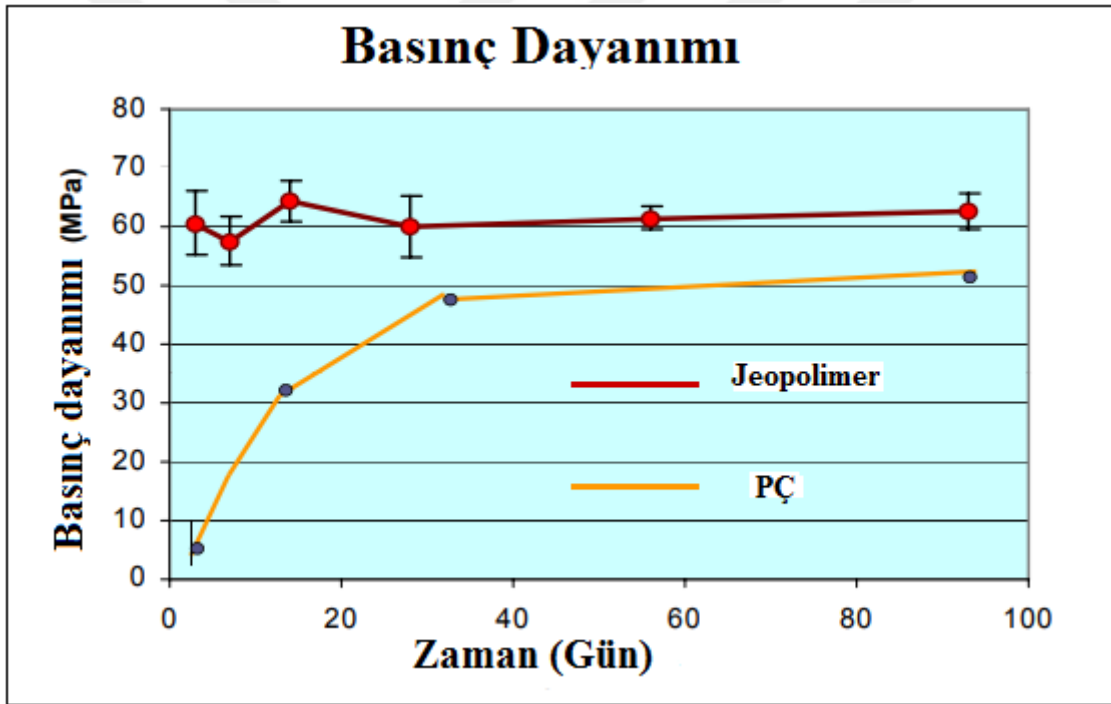
Portland çimentosundan değişken bir özellik olarak su sadece karıştırılabilirliği veya işlenebilirliği kolaylaştırmak için kullanılmaktadır. Kullanılan su jeopolimerin kristal yapısına herhangi bir şekilde etki etmemektedir. Jeopolimerin su penetrasyonuna ve ısı ile yangına karşı daha dirençli olmasında sebebiyet verir. Jeopolimer üretimi hammadde kaynağı açısından cüruf, uçucu kül, metakaolen gibi ciddi geniş bir yelpazeye sahiptir. (Davidovits 2008; Lloyd vd. 2009).

Maliyet ve Enerji Kazanımı: Portland çimento üretimi esnasında yüksek sıcaklıklara ulaşılması gerekir, bu da yüksek enerji tüketimine yol açar. Jeopolimer harçlar da ise kürleme oda sıcaklığında veya biraz daha üzeri sıcaklıklarda (100 °C altı) yapıldığı için enerji gereksinimi azdır. Rangan'a (2008) göre, uçucu kül içerikli jeopolimerik beton Portland Çimento betonundan yaklaşık %3 civarı daha düşük maliyetli olduğu düşünülmektedir.

Erken yaş alma dayanımı; Jeopolimerler üretiminin başlangıcından itibaren, Portland çimentoya nazaran daha yüksek basınç dayanımı sergilediği bilinmektedir. Şekil 1

'de gözüktüğü gibi jeopolimere bakıldığında ilk oluşum esnasında bile yaklaşık olarak 60 MPa oranında kararlı ve devamlı bir dayanım göstermektedir. Fakat Portland çimento zamana bağlı artan bir dayanım sergilemektedir. Jeopolimerlerin erken dayanıklılığından, üretimden sonraki 1-30 gün içinde Portland çimentodan çok daha yüksek oldukları anlaşılmaktadır.

Basit hazırlama süreci: Jeopolimerin hazırlanması sürecinde alkali çözelti ve alümina silikat malzeme bileşimi belirli bir süre karıştırıldıktan sonra istenilen kalıplara dökümü yapılır. Hazırlanan jeopolimer oda sıcaklığı ve düşük kürlenme sıcaklığına sahip olduğu için herhangi bir işleme tabii tutulmazlar. Bu nedenle oldukça basit bir hazırlanma sürecine sahiptir.



Şekil 1. Jeopolimer ve PO basınç dayanımı karşılaştırma grafiği (2010 International ConcreteSustainability Conference, Dubai, UAE)

2.3. Jeopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler

2.3.1. Uçucu Kül

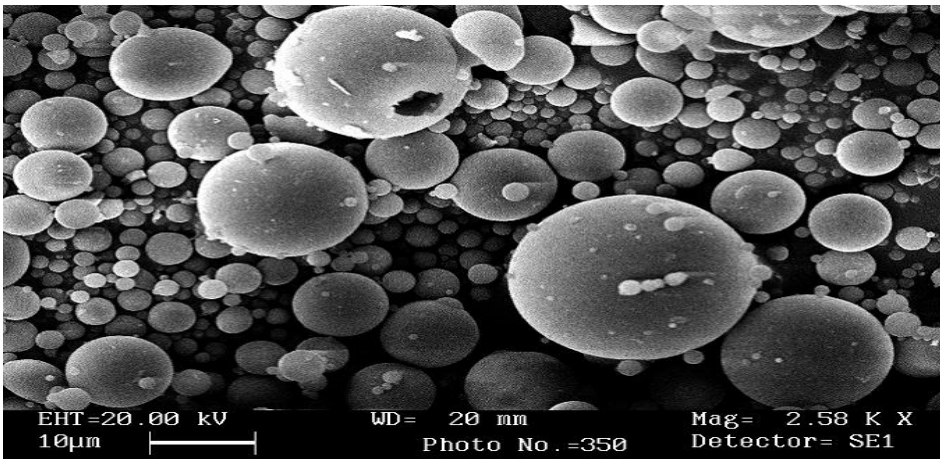
Uçucu küller, demir-çelik santrallerinde yada elektrik santrallerinde enerji veya hammadde elde edilmesi sürecinde kömürün yakılmasıyla oluşan atık bir malzeme

çeşitlidir. Yanma süresi boyunca santral bacasında filtreler yardımıyla tutulan bu küllerin doğaya salınımı engellenir. Salınımı engellenen küller bacadan uzak belirli bir alanda depolanır. Uçucu kül, jeopolimer malzemelerin sentezi için çok gerekli ve önemli hammaddelerden birisidir. Uçucu küllerin geneli heterojen yapıda olup; alüminosilikat, kuvars, silika cam, hematit, mullit ve manyetit dahil olmak üzere düşük miktarda kristalin yapıdan oluşmaktadır (Song vd., 2000).

Şekil 2' de SEM görüntüsü görülen uçucu külün parçacık boyutunun ne kadar farklı olduğu görülmektedir. Bu farklılıkların reaksiyon esnasında reaktivite farklılığı gösterebilmektedir (Terzano, 2005).

Bu reaktivite farklılığında reçete tututmakta zorluklara neden olabilir. Uçucu küllerin yapısında oldukça yüksek miktarda reaktif silika mevcuttur. Bu yüksek oranda silika miktarında alüminosilikat jel oluşumu olasılığını artırır. Bununla doğru orantılı olarak jeopolimerin mekanik mukavemetinin artmasında katkıda bulunmaktadır. Uçucu külün içerisinde bulunan alüminyum, jeopolimer birleştiricisinin sertleştirme performans oranını belirler ve bu performansı ayarlamak için en belirgin faktör olarak kullanılır (Rangan, 2008).

Uçucu külü değerlendirmek üzere geliştirilmiş birkaç farklı yaklaşım çeşidi vardır. En yaygın olan yöntem ise çimento ile beton üretim aşamasında katkı maddesi olarak eklenmesidir. Çimento üretim aşamasında öğütülmüş uçucu kül çimento ana malzemesine eklenerek kullanılabilir. Beton üretiminde kum yerine uçucu kül tercih edildiğinde kum tasarrufu sağlanmış olacaktır. Bir diğer yaklaşımda bu tez çalışmasında anlatılacağı gibi jeopolimer malzemeleri alkali çözeltilerle karıştırarak sentezlemesidir.



Şekil 2. Mikroskobik uçucu külün SEM görüntüsü (Terzano, 2005)

2.3.2. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Yüksek Fırın Cürufları, demir-çelik fabrikalarında elde edilen ana maddenin yapımı sürecinde üretilen endüstriyel bir yan üründür. ASTM C125'e göre, YFC demir "esas olarak kalsiyum silikat ve alüminattan ve diğer alkalilerden oluşan ve erime koşulları altında demir ile aynı işlemlerden geçirilem metal olmayan bir ürün" olarak tanımlanır. Ana bileşenleri alüminosilikat, kalsiyum magnezyum ve camdır. Diğer yandan, hammadde miktarına bağlı, farklı oranlardaki kimyasal bileşime ve üretim esnasındaki değişikliklere bağlı olarak ancak farklılık gösterebilmektedir (Bakharev vd, 2009).

En yaygın kullanılan cüruflardan biri, erimiş çeliğin su ile hızla bir şekilde sıcaklık azaltılmasıyla bir yan ürün olan elde edilen granüllü Yüksek Fırın Cürufu (YFC) 'dur. Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun ana bileşenleri SiO_2 , MgO , CaO ve Al_2O_3 şeklindedir (Petermann vd., 2010).

Beton yapımında ve endüstrisinde ilave bir bireştirici malzeme olarak tercih edilir. Bunun nedeni kimyasal saldırılara karşı ultra dayanıklı olması ve mükemmel termal niceliklere sahip olmasıdır (Dan vd., 2003).

Alkali bir ortamda cüruf aktive edildiğinde jeopolimer yapıları oluşabilir. Seçilen bazlar belirli oranda YFC'ye eklendiğinde bağlanma özellikleri elde edebilirler. Bu sebeple tamamen YFC içeren, içerisinde çimento bulundurmayan beton üretmek tam anlamıyla mümkündür (Collins vd., 2001).

2.3.3. Metakaolen

Beton yapısının dayanımını arttırmak ve beton yapımında kullanılan çimento miktarını en minimum seviyeye indirebilmek için alternatif puzolanik maddeler kullanılır. Bu puzolanik malzemelerin yoğun kısmı endüstriyel yan ürünler veya atık maddelerdir. Metakaolen ise betonun genel performansını yükseltebilen bir maddedir.

Krem beyaz metakaolin, kaolinin kalsine edilmesiyle elde edilen amorf yapıya sahip toz bir malzemedir ve yapısında yüksek konsantrasyonlarda alümina ve silika bulunur. Alümina ve silikanın yanı sıra yapısında eser miktarda Fe_2O_3 , TiO_2 , Na_2O ve K_2O da bulunabilir. Kaolen, 500-600 °C'ye kadar ısıtıldığında yapısındaki nemi ve su içeriğini kaybeder ve metakaolen oluşmuş olur. Bundan sonra betona ilave edilerek performansı

dahada arttırılır. Metakaolinin tepkimeye girme durumu, mineral içerik durumuna, kaolinin çıkarıldığı yere ve üretim koşullarına bağlıdır (Vu, 2004).

Son zamanlarda, metakolin içeren beton malzeme geliştirme ilgi çekici bir konu haline almıştır. Betonda kil esaslı puzolan kullanılmasının ana nedeni, malzemenin çabuk erişilebilir olması ve mukavemet üzerinde pozitif bir etkiye sahip olmasıdır. Ayrıca kalsinasyon sıcaklığı ve kil yapısına bağlantılı olarak betonun erken yaş dayanımında yüksek mukavemet gözlemlenebilir. Metakaolinin dolgu etkisi ve çimento hidrasyonunun arttırılması, betonun erken aşamada yüksek mukavemete sahip olmasını sağlar. Sonraki aşamada metakaolen ile kalsiyum hidroksit arasındaki puzolanik reaksiyon bu etkileri arttırmaktadır (Tevrizci, 2010).

Tıpkı çimentoyla oluşan betonu üretimi gibi, metakaolen ile elde edilen jeopolimer üretimi de başka çok kapsamlı bir araştırma çalışmasıdır. Metakaolin içindeki yüksek oranda bulunan alümina ve silika alkali çözelti ile reaksiyona girerek karıştırılır. Bu birleşimden bir harç meydana gelir. Oluşturulan harç, oda sıcaklığında veya 40 °C ile 100°C arasında kürleşir. Jeopolimerizasyon reaksiyonu sayesinde çimentosuz, yüksek dayanım ile yüksek ısı özellikler veren bir yapı malzemesi oluşmuş olur.

2.3.4. Alkali Aktivatörler

Alkali aktivatörler, jeopolimerlerin sentezine en önemli rol oynayan bileşimlerden birisidir. Ana hammaddeler (uçucu kül, metakaolen, yüksek fırın cürufu vs.) alümina ve silika çeşitlerinin çözeltiliye katılmasıyla reaksiyonun başlangıç mekanizmasını kontrol etmiş olur. Bu da çözeltilide bulunan alüminosilikat maddelerin çökmesine ve kristalleşmesine yol açar. Alkali sistemde bulunan metal katyonları (Na^+ ve / veya K^+), alüminosilikat jeopolimerik yapıdaki jellerle bileşim oluşturur (Part, 2015).

Alüminosilikat hammaddeleri (uçucu kül, metakaolen, yüksek fırın cürufu vs.) alkali ortamda birleştirildiğinde alüminosilikat türünün çözünmesi ve jele dönüşmesi hızla gerçekleşerek kısa sürede kristal bir yapı oluşmasına olanak sağlar. Bu işlemin bitiminde amorf, yarı amorf veya mikrokristalin bir yapı oluşmaktadır (Khale vd., 2007).

Aktivatör konsantrasyonundaki bir artışın, reaksiyon hızında bir yükselişe sebebiyet vereceği, bu da minimum gözeneklilik ve daha dayanıklı bir jeopolimerik yapıya neden olacağına sebebiyet vermektedir. Bununla birlikte, belirli aktivatörlere sahip jeopolimer malzemeler ile optimal bir konsantrasyon sınırı vardır (Khale vd., 2007).

Bu sınırnın aşılması, ters etkiye sahip olacaktır, çünkü aşırı hidroksit, çok erken bir aşamada alüminosilikat jelin çökmesine neden olup, daha düşük dayanıma sahip bir jeopolimer elde edilmiş olacaktır (Part, 2015).

Alkali aktivatörler NaOH, Na₂SO₄, sodyum içeren cam suyu (Na₂SiO₃), Na₂CO₃, K₂CO₃, KOH ve K₂SO₄' tür ve potasyum içeren cam suyu (SiO₂K₂O) 'dur. Bu bileşikler suyla seyreltikten sonra jeopolimerleri sentezlemek için kullanılır (Petermann vd., 2010).

Sodyum Hidroksit

Sodyum hidroksit, jeopolimerlerde OH⁻ iyonlarını elde etmek için yaygın olarak tercih edilen bir alkali aktivatördür. Alkali çözeltideki konsantrasyonu, jeopolimerlerin belirli niteliklerini etkileyecektir. Yüksek oranda sodyum hidroksit konsantrasyonları kimyasal çözünmeyi hızlandıracak ve bağ oluşumu sırasında C-H oluşumunu negatif yönde etkileyecektir. Daha yüksek bir sodyum hidroksit konsantrasyonu, reaksiyonun erken aşamasında dayanımını artıracak olsa da, oluşan ürünlerin heterojen bir morfolojide sebep olan çözeltideki yüksek OH neticesinde aktive edilmiş jeopolimerin dayanımının azalmasına neden olacaktır (Khale vd., 2007).

Hardjito (2004), Na⁺ veya OH⁻ 'nin jeopolimerlerin performansı üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olup olmadığını kontrol etmeyi amaçlayan bir çalışma yürütmüş ve OH⁻ 'nin jeopolimerlerin basınç dayanımını daha çok etkisi olan bileşik olduğunu kanısına varmıştır.

Sodyum Silikat

Silika kumu (SiO₂) ve sodyum karbonatı (Na₂CO₃) 1100 °C 'den daha yüksek bir sıcaklıkta eritip, ürünü yüksek basınçlı cam su denilen yarı viskoz bir sıvı içinde çözerek sodyum silikat üretilir (Fernandez vd., 2005).

Sodyum silikat, bağımsız bir aktivatör olarak nadiren kullanılır çünkü sodyum silikatın kendisi bir puzolanik reaksiyon başlatılması için elverişli OH⁻ aktivasyon potansiyeline erişmemiştir. Takviye edici bir ajan olarak sodyum hidroksit (NaOH) ile karıştırılarak, alkalinite ve mukavemette artış sağlanır. Jeopolimer yapımında genellikle

tercih edilen alkali aktivatör; sodyum hidroksit ile sodyum silikat karışımıdır (Fernandez vd., 2005).

Jeopolimer yapımında NaOH ve Na₂SiO₃ karışımı jeopolimerizasyon sürecine elverişli alkali bir ortam oluşturmaktadır. Alkaliler (Na ve K), Al ile Si'nin negatif değerini ana malzemeden çözer. Polikondensasyon reaksiyonu için iyi bir dizinim oluşturur. Bunun sonucunda ise Al 'nin negatif iyonlarında nötralleşme sağlayarak yapının içerisine dahil eder (Davidovits, 1988; Rees, 2008).

Potasyum Hidroksit

Potasyum içerisinde bulunduran jeopolimerler içerisinde sodyum bulunduran harçlardan daha yüksek mukavemete sahiptirler. Bunun sebebi, içerisinde sodyum bulunduran harçlar daha viskozdur bununla birlikte karıştırılması yani işlenebilirliği daha güçtür. Eşit seviyede kuvvet dayanımı elde etmek için, sodyum çözeltisi miktarı potasyum çözeltisine göre %50 oranında artışı sağlanmalıdır. Bu da sodyum bazlı jeopolimerlerin potasyum bazlı jeopolimerlere göre kullanımının daha güçtür (Davidovits, 2013).

Ek olarak, potasyum daha temel bazik bir yapıda olduğu için KOH bileşimde daha hızlı şekilde çözünür. Daha iri yapıdaolan K⁺ iyonları daha büyük yapıda silikat oligomerlerin oluşmasına sebebiyet verip Al(OH)⁻⁴ ile tercihli bağlanarak güçlü bir polikondensasyon reaksiyonu ile böylece daha büyük bir ağ yapısı oluşumuna neden olur. Bu nedenle, potasyum hidroksit çözümünde daha fazla jeopolimer öncüsü vardır. Potasyum silikat/potasyum hidroksit ile aktifleştirilmiş matris, sodyum silikat / potasyum hidroksit ile aktifleştirilmiş matristen biraz daha yüksek oranlı basınç dayanımına sahiptir (Komnitsas vd., 2007).

2.4. Takviye Edici Malzemeler

2.4.1. Cellubor Lif

Liflerin ilk kullanımı en az 3.500 yıl öncesine kadar dayandığı izlenebilmektedir. Son zamanlarda çimento ürünlerini güçlendirmek için asbest, selüloz, çelik, polipropilen (PP) ve cam fiber gibi farklı fiber türleri kullanılmaktadır (Hannant, 2003).

Liflerin beton üretiminde kullanılması gerilme mukavemetini, darbe mukavemetini, dayanıklılığı ve tokluğu artırmaya ve kırılmayı önlemeye yardımcı olduğu bilinmektedir (Hannant, 2003; Felekoğlu vd., 2009).

Bazalt lifler; dayanım, sıcaklık davranışı ve mukavemet açısından çok iyi davranış sergileyen bir volkanik kayaç türüdür. Bazalt lifler (BF); diğer organik olmayan liflerle karşılaştırıldığında, kolay işlenme, doğal olma, çevre dostu, ucuz ve toksik olmayan avantajlara sahiptir. Bazalt fiberlerin, cam elyaftan daha iyi gerilme mukavemetine ve karbon elyaftan daha yüksek kopma uzamasına sahiptir. Bir kimyasal saldırıya karşı direnç sergilediği, darbe uygulamasına ve yangın olayına dirençli olduğu bilinmektedir (Sim vd., 2005).

Bu tez çalışmamızda kullandığımız diğer bir lif çeşidinde cellubor liftir. Bor birleşimli selülozik yalıtım malzemesi olan Cellubor lif atık olarak kullanılan gazete kâğıtlarının bor madeni kullanılarak değişik işlemlerden geçerek birleşmesinden oluşan koyu yeşil renkli bir malzemedir. Kütlece %70-75 atık kâğıt ve alev geciktirici kabiliyetinde artış sağlamak için % 23 oranında bor bileşikleri bulunmaktadır. Anamaddede atık kâğıtların yanında selüloz da kullanılması tercih edilmiştir. Atık kâğıtlar kullanıldığı için çevre dostu yapıya sahiptir. Mineral elyaf esaslı, çevre dostu bir malzemedir. Aslında cellubor lif ekolojik ve maliyet olarak daha ucuzdur. Tavanlarda, çatı katlarında, zeminlerde ve duvarlarda ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir. Uygulanması oldukça kolay ve pratiktir (Morgül vd., 2016).

2.4.2. Polipropilen Lif

1970'lerin başından beri, polipropilenfiber çeşitleri beton oluşumlu yapılarda da kullanılması tercih edilmiştir. Portland çimentosu; ince agregası, kum, su, akrilik kopolimer, polipropilenfiber çeşitleri ve katkı maddelerinin bileşiminden oluşur. Sıradan beton ile karşılaştırıldığında, beton karışımına eklenen fiberler, daha yüksek eğilme oranına ve çekme dayanımına sahip ürünlerde oluşturduğu gözlemlenmiştir. Polipropilen fiberler doğal malzemelerden elde edildiğinden dolayı ekolojik olarak doğaldır ve insan yaşamı ile yaşayış düzenine herhangi bir zarar oluşturmaz (Branston vd., 2016).

Polipropilen fiber takviyeli betonlar; yüksek eğilme, kırılma ve basınç dayanımına sahiptirler. Aynı zamanda yüksek sıcaklıklara, yüksek kimyasal dirence ve nispeten düşük

yoğunluklu bir yapıya sahiptirler. Bunun yanında polipropilen fiber ürünler de tamamen elektronik, ısı ile ses yalıtım nitelikleri olan bir üründür (Branston vd., 2016).

Polipropilen fiberler; yüksek oranlı gerilme mukavemeti gibi nitelikleri bulundurmakla birlikte jeopolimerlerde çok sık kullanılmamaktadır (Yan vd., 2014).

2.5. Jeopolimer Mekanizması

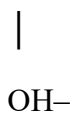
Jeopolimer, alkalın inorganik aktivatörlerin yapısında bulunan alüminosilikatı içeren jeosentetik bir formdur. Bu işlem, oldukça alkali bir ortamda moleküllerin çözünmesi, yer değiştirmesi, yönelmesi ve polikondensasyon (çoklu yoğunlaşma) hareketlerini içeren ekzotermik bir kimyasal işlemdir. Jeopolimer; killerde bulunan alüminatların ve silikatların sentezine dayanır. Bu sentezde alüminatlar ve silikatlar; oksijen atomu elektrotlarından kovalent bağlı bileşikler oluşturmak için oksijen atomu elektronlarını paylaşırlar (Prud'homme vd., 2011).

Glukhovsky (1949), alkali alanda alüminosilikat ürünlerin oluşmasını teyit ve kontrol etme sürecini tanımlayan genel bir model ön görerek jeopolimerizasyonu tanımlamaya çalıştı. Modeller üç aşamadan oluşur bu aşamalar aşağıdaki gibidir;

- Çözünme- topaklanma
- Topaklanma-kondenzasyon
- Kondenzasyon-kristalleşme

Genel anlamda yapılan işlemler, silisyum ve alüminyum minerallerinin alkali ortamda hızlı bir şekilde kimyasal reaksiyon oluşturur. Bunun neticesinde Si-O-Al-O bağlarını bulduran bir polimerik zincir ve halka çeşidi oluşumu ile neticelenir.

İlk adım, katı formda bulunun alüminosilikat ana malzemesi içinde bulunan Si-O-Si, Al-O-Al ve Al-O-Si bağlarını kopararak çözünmesini sağlamaktır. Si-O-Si ve Al-O-Al bağları yalnızca kuvvetli alkali alanda yok edilebilir. Si-O-Si bağının kırılması, alkali alanda, hidroksil (OH⁻) bulunmasından kaynaklanmaktadır:



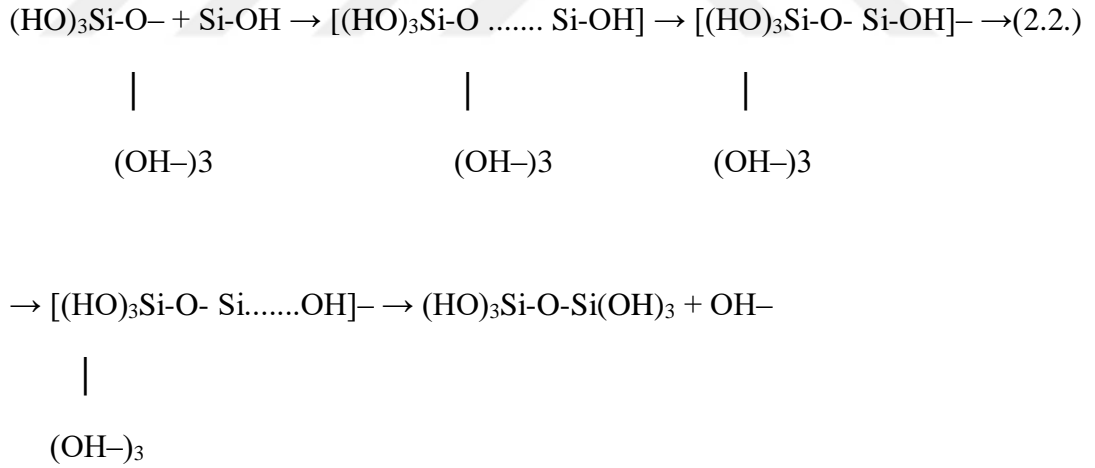
OH⁻ gruplarının sebep verdiği silisyum atomları etrafında bulunan elektronların yeni dizinimi, Si-O-Si bağlarının daha çabuk koparılmasını sağlar (Provis vd., 2005).

Silisyumun hidroksilasyonu ara komplekslerden oluşturur. Bu ara kompleksler; siliska hidroksil türlerine ile Si(OH)₄ ve Si(OH)₃ gibi oligomere ayrışan komplekslerdir (Provis vd., 2005; Rahier vd., 2007).

Alkali bir ortamdaki alkali metal katyonları, oluşan negatif yükleri denge konumuna getirir. Benzer durumda, hidroksil grubu, solüsyondaki alüminatın ve Al-O-Si bağınması olan Al(OH)⁴⁻ kompleksini etkileyecektir. Bu işlem hızlı bir şekilde ısı üretir ve aktivasyon çözeltisinin pH'ı ile doğru orantılıdır (Petermann vd., 2010).

İkinci aşamada, birinci aşamadan gelen liçlenmiş ürünler içerisinde su bulunduran faza eklenir ve polikondenzasyonun olduğu ve topaklanmanın meydana geldiği bir yapı oluşturur (Duxson vd., 2007).

Hidroksilatlanmış Si(OH)₄'ü elde etmek için birinci durumda kopmuş olan Si-O-Si bağı, ikinci durum esnasında yeni bir Si-O-Si bağı oluşturup aşağıdaki denklemleri meydana getirir (Provis vd., 2005):



Birinci durumda yıkım için katalizör görevi olarak hareket sergileyen OH⁻'in ikinci ve üçüncü durumda denklem 2.2. 'de gözüktüğü üzere yapısal bir bileşen olarak görev aldığı ve hareket sergilediği görülmektedir (Provis vd., 2005).

Son durum ise kristalleşme ile kondenzasyondurumdur. Son jeopolimer oluşumunu detaycı olarak anlatabilmek için, birçok yazar Gluhhovsky modeline ve zeolit sentezinde gözlenen modellerle aynı oranda benzerlik gösteren model sergilemiş ve

önermişlerdir (Jimenez vd., 2005; Jimenez vd., 2006; Provis vd., 2005; Deventer vd., 2007). Modelleri zeolit sentezinde bulunan iki durumu içermektedir:

- İlk durum; çekirdeklenme sırasında gerçekleşir. Bu aşamada ama malzemeden gelen alüminosilikatı alkali bir ortamda ayrıştırmak ve bir zeolit öncüsünü oluşturmaktır.

- İkinci durum, birkaç çekirdeğin kritik bir boyuta ulaştığı ve kristallerin oluşmaya başladığı zamandır.

Aşamalar doğrusal görünse de eş zamanlı olarak gerçekleşebildikleri için ayrı ayrı yazılamazlar (Yao ve Zeng, 2009).

Katı partiküllerin ana madde yüzeyinde çözünmesi, jeopolimerizasyon esnasında katı partiküllerin dönüşüme uğramasına neden olan mekanizmadır. Ayrıca bu mekanizmanın alüminosilikat malzemeleri monomer olarak bir alkali çözeltisine dönüştürdüğü de belirtilmelidir (Duxson, 2007).

Bu monomerler, öteki monomerlerle trimerler, tetramerler ve daha yüksek moleküller oluşturmak için diğer monomerlerle reaksiyona girer. Bu reaksiyonun bir sonucu olarak monomerler, poli (silikonat) Si-O-Si-O, poli (sialat) S-O-Al-O ve poli (sialat-disiloxo) Si-O-Al-O-Si-O-Si-O polimer bileşimi olupkovalent bağ oluşumu sağlamaktadır (Provis vd., 2009).

Çözelti aşamasında jelleşme sürecine yol açar. Bu nedenle, çözelti doyma noktasına geldiğinde, alüminosilikat jelin çökmesine neden olur. Oluşmuş birinci jel olan Jel 1, alüminyum bakımından yüksek oranlı jeldir. Reaksiyon sonrasında, katı malzemeden fazla oranda silisyum ayrılır. Ortamdaki silisyum konsantrasyonunda artış neticesi doğrultusunda jel 2 nin meydana gelmesine sebebiyet verir. Bu durum birçok araştırmacını tarafından; sürecin ilk aşamalarında alkali alanda çok sayıda Al^{3+} iyonu varlığının doğruluğunu onaylanmıştır (Oelkers vd., 1994).

Jelleşme gerçekleştikten sonra sistem, yeniden düzenip oluşumuna devam eder. Bu devamlılığın sonucunda ise jel yapının birleşiminde yükselişe ve sonunda ise sertleşmesine yol açar. Bu durum çoğunlukla jeopolimer yapılarda bulunan üç boyutlu bir alüminosilikat ağının oluşmasına sebebiyet verir (Duxson vd., 2005).

2.6. Jeopolimer Uygulama Alanları

Jeopolimerler; inşaat mühendisliği, ileri yapı malzemeleri, refrakter malzemeler, tehlikeli atık immobilizasyonu, yangın geçiktirici ve yangına dayanıklı malzemeler gibi çeşitli endüstrilerde gelecek vaat eden bir malzemedir. Buda jeopolimerlerin özellikleri ve çeşitli işleme yöntemleri sayesinde geniş beklentilere sebebiyet vermektedir. Verilen özellikleri göz önünde bulundurularak, beklenen kullanım düzeyine henüz ulaşmamış jeopolimerler üzerinde büyük ölçekli laboratuvar araştırmaları yapılmaktadır. Bu nedenle jeopolimer malzemeler, Portland çimentosunun kullanıldığı hemen hemen her alanda kullanılabilir. Jeopolimerlerin hızlı bir şekilde hazırlanabilmeleri ve hızlı bir şekilde dayanım kazanması nedeniyle havalimanı pistlerinde hızlı onarım ve kullanıma uygun olduğu düşünülmektedir (Mackenzie vd., 2014).

Düşük teknolojili inşaat uygulamaları için ucuz organik lifler (yün, keten veya kâğıt gibi) jeopolimer kompozitler üretmek için kullanılabilir. Organik fiber jeopolimer kompozitlerin yanması, inorganik jeopolimer matrisin yangın geçiktirici özellikleriyle bağdaştığı için çok zordur (Davidovits, 1991).

Jeopolimer kompozitler, yüksek oranda sıcaklıklarda mağruz kalıp, takım malzemesi biçiminde de kullanılabilir (Comrie vd., 2011).

Jeopolimer kompozit takım malzemeleri, hassas tolerans ayarlama performansına sahiptir. Yüzey boyutunu daha az bir ağırlıkla ayarlayabilir. Ucuz olup yapımı ve bakımı basittir. Yüksek oranlı sıcaklıkta yapım teknolojisi olması gerekmez ve kısa kürlenme süresi olduğu için bulunduğu ortamda inşa edilebilirler. Jeopolimer kompozit malzemeler havacılık sanayisinde (Davidovits, 2008) ve refrakter sanayisinde kullanılmaktadır (Comrie vd., 2003).

Sıcaklık veya yangın güvenliği gerektiren uygulamalarda fiber takviyeli kompozit paneller kullanılmaktadır (Davidovits, 2008).

Aynı şekilde, yarış arabaları için bir ısı kalkanı olarak kullanılmıştır (Lyon vd., 1997). Jeopolimerler ayrıca tehlikeli ve radyoaktif atıkları kapsüllemek için kullanılır. Su arıtma tesislerinde, drenaj havuzlarında ve macunsu atıklarda zehirli, tehlikeli ve radyoaktif çamurların kapsülasyonu ve uzun aşamalı depolanması neticesinde güvenilir olup etkili bir saklama yöntemi sağlar. Geopolymer Enstitüsü tarafından tanınan patentli bu çalışmaya Geopolytech denir. Patentli Geopolytech teknolojisi, ağır metaller, uranyum,

radyum, arsenik ve hidrokarbonlar ve diğer yüksek derecede toksik yapılar için mükemmel koruma sağlar (Geopolymer Institute, 2006).

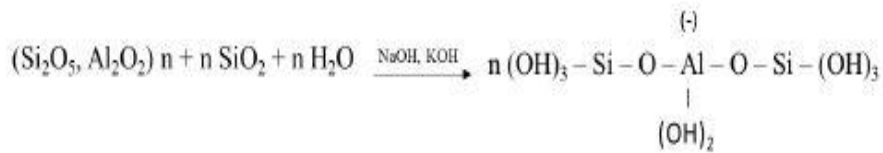
Jeopolimer materyallerin potansiyel uygulamalarından biri zehirli atık yönetimidir, çünkü jeopolimerlerin rolü toksik kimyasal atıkları absorbe etme yetenekleriyle bilinen zeolit materyallere benzerler. Bununla birlikte, zehirli atık yönetimi için jeopolimer teknolojisinin tercihindeki yükselişle GEOPOLYMITE 50 ile yapılan testlerin neticesinde oluşan jeopolimerik ürünlerin atık muhafazası için kullanılabileceğini önermektedir. GEOPOLYMITE 50; Cordi-GeopolymereSA'nın tescilli ticari markasıdır. GEOPOLYMITE 50, alkali sertleştiriciler ile çeşitli alümina-silikatların reaksiyona girmesiyle hazırlanan bir jeopolimerik bağlayıcıdır (Davidovits, 1988b).

Jeopolimerler ayrıca iyi bir ısı direncine sahiptir ve amorf inorganik yapıları nedeniyle ısı yalıtımı gibi uygulamalarda kullanılabilirler. Kanalizasyon malzemeleri, demiryolu traversleri, yangına ile kimyasallara dayanıklı duvar levhaları, çeşitli duvar üniteleri, koruyucu kaplamalar ile tamir malzemeleri, püskürtme beton ile yüksek performanslı fiber takviyeli laminatlar gibi birçok alanda inşaat ürünleri geliştirecek şekilde için kullanılır (Gourley, 2003; Gourley ve Johnson, 2005).

Yapıdaki kalsiyum eksikliğinden dolayı jeopolimerler PO betona göre deniz suyuna daha dayanıklıdır (Zhang vd., 2010a; Zhang vd., 2010b).

2.7. Önceki Çalışmalar

Jeopolimerizasyon işlemi alümino-silikat oksitler (Si_2O_5 , Al_2O_2) ile polimerik Si-O-Al bağları ile alkali polisilikatlar arasındaki kimyasal reaksiyonunu içermektedir (Davidovits, 1991; Jaarsveld ve Deventer, 1996; Wallah ve Rangan, 2006).



(2.3)

Rangan'a göre (2005), yukarıda verilen denklemde (2.3) 2. reaksiyon için, jeopolimerik karışımın yani harcın elde edilmesinde suyun herhangi bir rol almadığı;

sadece harcın yani jeopolimerik karışımının işlenebilirliğini kolaylaştırıp karıştırmada kolaylık sağladığını göstermektedir. Gerçekleştirilmiş deneyler sonucunda; sertleşme ile kurutma aşamalarında dışarıya atılmış su, hidratlaşma sürecinde PO içerikli beton eldesinde yani harcında suyun kimyasal reaksiyonunun zıttı olduğu belirlenmiştir. Düşük oranda kalsiyum ve uçucu kül içeren jeopolimerik betonun uzun vadeli özellikleri ve niceliklerini araştırmışlardır. Gerçekleştirilmiş deneylerin neticesinde ısıyla sertleşmiş uçucu kül içeren jeopolimerik betonun basınç dayanımında jeopolimerleşmeden sonraki süreçte önem arz edecek bir artış olmadığı sonucuna varılmıştır. Fakat bununla beraber laboratuvar ortamında sertleşmiş kül içerikli jeopolimerik betonun zamanla oranlı olarak basınç dayanımında artış sağlandığı görülmüştür. Laboratuvar ortamında sertleştirilmiş jeopolimerin 7. günü kapsayan basınç dayanımının, döküm yapıldıktan sonra ilk bir hafta sürecinde ortamın sıcaklığına göre değişiklik gösterdiği ve ortam sıcaklığının yüksek olması daha yüksek basınç dayanımı verdiği sonucuna varılmıştır. Test neticesinde, ısıyla doğru orantılı sertleşen uçucu kül içerikli jeopolimerik betonun sülfat atağına çok yüksek bir direnç gösterdiği sonucuna varılmıştır. Sodyum sülfat (Na_2SO_4) birleşimine maruz kalan numuneler bir süre sonra yüzeylerinde herhangi bir hasar veya çatlak bir yıla kadar oluşmamıştır. Bu numuneler bir yıl boyunca Sodyum sülfat (Na_2SO_4) birleşimine farklı sürelerde maruz kalmış ve basınç dayanımında herhangi bir değişim olmadığı kanısına varılmıştır. İlave olarak ısı sonucunda sertleşen ve düşük oranda kalsiyum (Ca) ile uçucu kül içeren jeopolimerik betonun ana polimerizasyon maddelerinden alçı yada etringit oluşturacak bir mekanizma belirtilmiştir.

Çevreci ve doğa dostu bir beton olan jeopolimerik beton çeşitlerinin , yanmazlık özelliği bulunduğu için çoğu yapı malzemelerinin yanında çevresel malzemelerde birçok uygulama alanının olabileceği öngörülmüş ve son dönemlerde yapılan çalışmalarda jeopolimerlerin ısıya ve ateşe daha dayanıklı maddeler olarak tercih edilmesi ve kullanılması için birçok gayret gösterilmiştir.

Qi ve diğerleri (2009) yılında matris olarak jeopolimerik, dolgu olarak seçilen TiO_2 ve ısıya dayanıklı malzeme olarak $\text{Al}(\text{OH})_3$ kullanmış kalın (8 mm, geleneksel polimer kaplamadan daha kalın) yangına dayanıklı kaplama geliştirmiştir.

Ashadi ve diğerleri (2010) yılında jeopolimerik beton yapısının deniz suyuna olan dayanıklılığını incelemiştir. Jeopolimerik, yapılarda Kalsiyum (Ca) elementinin bulunmaması sebebiyle kimyasal saldırılara dayanıklı olacağı ön görülmüştür. Mekanik

dayanımı 40 MPa olan jeopolimerik bir beton beton, kaba agregalar ve ince kumlardan oluşmuştur. Bu deneyde % 5 oranında kalsiyum oksit (CaO) bulunduran uçucu küllerden sentezlenen jeopolimerler 56 gün sonunda kuvvetli bir oranda azalma göstermiş, fakat daha sonra bir düşüş gözlemlenmemiştir. Diğer taraftan, kalsiyum (Ca) bulundurmaya kaolin jeopolimerleri, dayanımında herhangi bir düşüş eğilimi bulunmamıştır. Deneylere ilaveten, uçucu kül bulunduran jeopolimerinin yaklaşık 25 °C'de kürlenmesi hızının yavaş olduğu, ancak kuru koşullar altında deniz suyuna batırılrsa bile 28 gün süresince devam ettiği saptanmıştır.

Zhang ve diğerleri (2010a, 2010b); jeopolimer kaplamaları yüzeyi deniz altında korozyon önleme/azaltma uygulamasında kullanmışlar ve Hangzhou Bay (Shanghai) 'daki beton yüzeyler üzerinde oluşturulmuş jeopolimer yüzey kaplama tabakasının sertleşme karakterizasyonunun araştırmıştır. Bu araştırmada karşılaşılan en belirgin sorun dış ortam koşullarında meydana gelen büzülme olduğunu rapor etmişlerdir. Sorunun çözümü için magnezyum içerikli genişleme ajanı ile birlikte yüzey alanını arttırmak için PP lif kullanmışlar.

Bo ve Fang (2011), karbon-fiber takviyeli metakolen içeren jeopolimer betonun dayanımının belirgin oranda arttırdığını ve 15 °C'de 2 saatte sertleşmeye ve 28 günde 51.2 MPa basınç dayanımına sahip olduğunu raporlamıştır.

Zhang ve diğerleri (2012), saha potansiyel uygulama alanlarında oluşan deneyler, jeopolimerik kaplamaya sahip yapıya uygun ayar süresine, yüksek oranlı yapışma kuvveti ile yüksek oranda iyi korozyon özelliklerinin bulunduğu ön görülmüştür. Jeopolimerik yüzey kaplamaların 4 saat içinde katılaşp betonla kuvvetle bağlandığı ve dalgaya direnebildiği saptanmıştır. Yapılan XRD analizlerinden yapıda 6 ay içinde sülfat saptanmamış ancak kalsit modifikasyonu bulunmuştur. Uygulama esnasında saptanan bir problem olan jeopolimerik harcın büyük oranda büzülmesini azaltmak için harca eklenen MgO içerikli genişleme elemanı ile polipropilen (PP) liflere karşın 7 gün geçtikten sonra yüzeylerde mikro düzeyde çatlamlar ve kırılımlar gözlenmiştir. Atmosferin nem seviyesi ile kaplama katmanının kalınlığının kaplamaların yapısını etkisi altına ala iki adet faktör olduğu; jeopolimerlerin deniz suyu altındaki kimyasal reaksiyonunun, beton gibi yapılara yaşanılabirlik ve sürdürülebilir bir koruma oluşturduğu sonucu elde edilmiştir. Katılaşma aşamasında yüksek oranda büzülmenin, MgO içerikli genişleme ajanı ve Polipropilen (PP) liflerin ve katkıların eklenmesiyle indirgenmesi ön görülsede doğal deniz aşamalarında

istenilen seviyede olmadığına saptanmıştır. İlaveten düzenli olarak deniz suyuyla temas eden ve gelgit bölgesinde dalga hareketinin 5 mm kalınlığında kaplamanın en iyi bütünlüğü sergilediği davranış olarak belirtilmiştir.

Wu ve diğerleri (2014), ISO834 standardı baz alınarak kompozit levhaların yangına olan dayanıklılıklarını ve kompozit levhaların yangına olan dayanımı üzerine çöken beton bloklarının yük miktarının ve yanmazlık özelliği olan kaplamanın kalınlığının davranışları test etmiş olup beton bloklardaki bir jeopolimerik kaplamanın (10 mm kalınlığa kadar) yanmaz özelliklerini saptanmıştır. Yangına dayanım gösteren kaplama yüzeyi, özellikle jeopolimer bağlayıcısı olan sodyum silikat içerikli aktivatör tercih edildiğinde, çok iyi derecede ısı yalıtımı davranışgösterdiği ve kompozit olan levhanın, 10 mm kalınlığında yanmazlık özelliği olan bir kaplama ile ateş dayanımı, istenen zamandan yaklaşık 1.5 saat kadar daha uzun bir süre olduğu saptanmıştır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL VE YÖNTEM

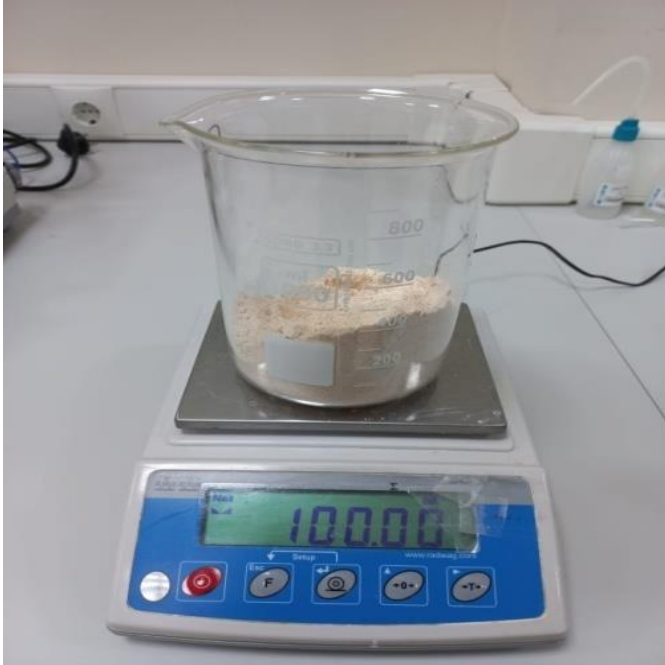
Bu tez çalışması, 2021 yılında Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü Labaratuvarı'nda yürütülmüştür. Belirli oranlarda fiber kullanılarak üretilen jeopolimerik levhaların alev testi sonucunda ulaşılan değerlerin karşılaştırılması yapılmıştır.

3.1. Materyal

3.1.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Metakaolen

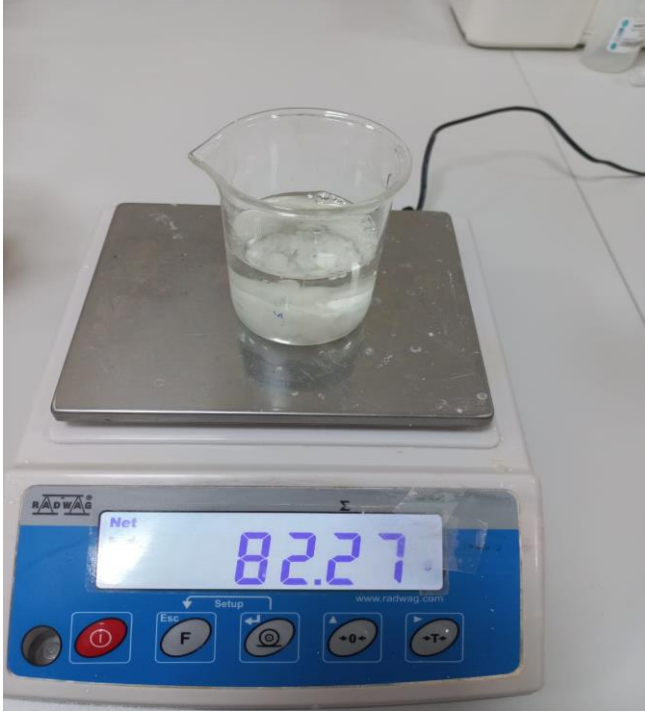
Tez çalışmasında kullanılmakta olan ana malzeme olan metakaolen AVS Mineral şirketinden alınmıştır (Şekil 3).Denemelerimizde her deneme için 100 gram ana madde olan metakaolen kullanılmıştır.



Şekil 3. Deneylerde kullanılan metakaolen

Aktivatör Çözelti Bileşenleri

Hazırlanan aktivatör çözeltimizde su, NaOH ve ağırlıkça %8,9 Na₂O, %28,7 SiO₂ ve %62,4 H₂O içeren ticari sodyum silikattan (Sodel Kimya, Modül:2) oluşmaktadır.(Silikat için Modül, SiO₂/Na₂O oranı şeklinde tanımlanır. NaOH Interlab firmasından alınmıştır. 2 modül diye bilinen alkali cam suyu kullanılmıştır.

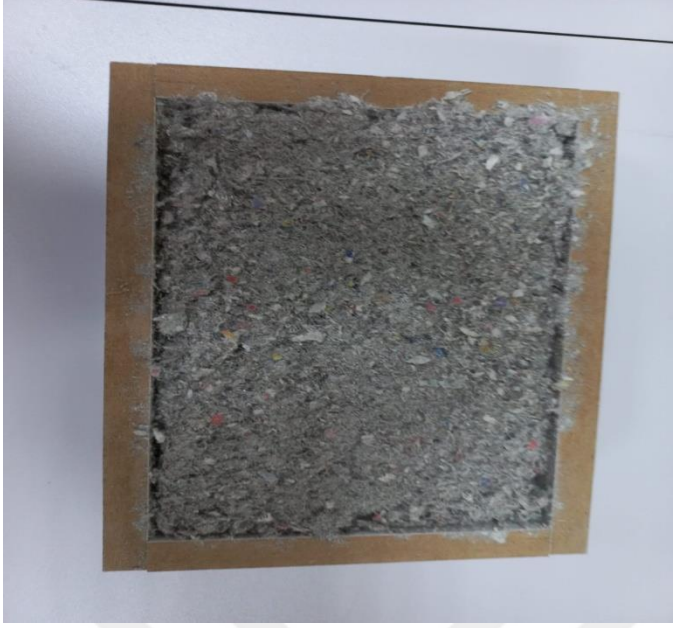


Şekil 4. Deneyler kullanılan sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı

Sentez aşamasında kullanılan aktivatör çözelti alüminasilikatların çözme ve Silisyum-Aluminyum oksit reaksiyonundan kaynaklanan elektriksel yük dengesini sağlama görevlerini sağlar. Tüm çözeltiler saf suda hazırlanmıştır.

Cellubor Lif

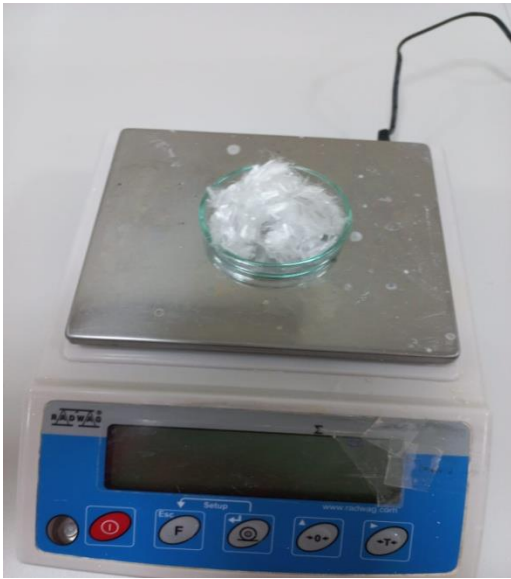
Cellubor Lif, selüloz yünü olarak kabul edilen önemli şekilde ısı, ses ve nem yalıtım yapabilen bir malzemesidir (Şekil 5). Selüloz esaslı olan bu malzeme bor esaslı olup malzemenin %80 oranını geri dönüştürülmüş atık olan gazete kağıtları sağlamaktadır. Atık gazete kağıdından oluşan bu yapı malzemesi, bor esaslı bileşiklerle işleme girerek Cellubor Selüloz Yünü oluşmuştur.



Şekil 5. Deneyleerde kullanılan cellulor fiber

Polipropilen Fiber

Tez çalışmasından Beton Fiber firmasından temin edilen PP-lifler (Beton Fiber BF06 Polipropilen elyaf lif) kullanılmıştır (Şekil 6). Betonun ya da üretilen harcın mukavemetinin, aşınma direncinin, tokluğunun arttırılması ve çatlak oluşumunun engellenmesi amacı ile tercih edilmektedir. Soğuk çekmeli telden ASTM A820 standartına göre üretilmiştir. Harç içerisinde homojen olarak dağılmış polipropilen lif harç tokluğunu enerji yutma kabiliyetini yükselterek yüklenme çatlaklarının önüne geçmeyi hedefler.



Şekil 6. Deneyleerde kullanılan polipropilen fiber

3.1.2. Karakterizasyonda Kullanılan Cihazlar

Yaptığımız çalışmalarda oluşan jeopolimerik levhaların mekanik, ısı, kimyasal bileşim karakter özelliklerini incelemek için farklı analiz çeşitlerinden yararlanılmıştır. Bu tercih edilen cihazlar aşağıda sıralandırılmıştır.

Kalıp

Deneylerimizde oluşturduğumuz harcın donup alev testine tabi tutula bilmesi için istenilen boyutta 15 x 15 x 5 cm³ ebatlarında özel olarak hazırlanmış demirden üretilmiş kalıp kullanılır (Şekil 7). Kalıp içerisine dökülen harç 24 saat atmosferik ortamda bekletileri ve sonrasında levha kalıptan çıkarılır. Kalıptan çıkan levha alev testine maruz bırakılır.



Şekil 7. Deneylerde kullanılan kalıp

Alev Tabancası

Deneylerde kullanılan alev tabancası integra flameboy marka olup, bir düğmeye basarak piezo-eletrik ateşleme sağlayan portatif, el tipi ve pilsiz bir Bunsen brülörüdür (Şekil 8). Alevin boyutunu ve sıcaklığı bir hava ve gaz regülatörü ile kolaylıkla ayarlanabilir.



Şekil 8. Deneylerde kullanılan alev tabancası

Termokupl Termometre

Bu çalışmada kullanılan termokupl termometre UDL 100 markadır. Bu model cihazlar endüstriyel ve laboratuvar ortamlarında yapılan çalışmalarda kullanılan çeşitli verilerin analog sinyallerin sayısal değerlere çevrilerek bilgisayar üzerine taşınmasına sağlayan cihazdır (Şekil 9). Bu cihazlar bilgisayar üzerinden konfigürasyon yani yapılandırılarak kullanılır. Bilgisayar ortamında yapılandırılması ve cihazdan ölçülen sinyal datalarının bilgisayar üzerine kaydolmasını sağlar. Levhamızda ön ve arka yüz sıcaklığını ölçmek için kullanmış bulunmaktayız.



Şekil 9. Levha üzerindeki termokupl termometre

Alev Testi

Bu çalışmada istenilen reçetede elde edilen harçlar kalıplardan çıkartıldıktan sonra levhalar bir gün oda sıcaklığında bekletilir. Daha sonra levhalar Şekil 9' da görüldüğü gibi alüminyum panel arasına sıkıştırılır. Levhaların ön ve arka yüzeyleri bilgisayara bağlı J tipi sıcaklık ölçerlerle saniyenin onda biri hızında kayıt edilir. Levhanın alev gönderilen yüzeyi aynı zamanda kızıl ötesi sıcaklık ölçer ile okunur. Böylece ön yüzeyin sıcaklık takibi aynı anda farklı ölçüm teknikleri ile ölçülür. Yüzeye alev verilip ön ve arka panel sıcaklıkları kayıt edilir.



Şekil 10. Alev testi

3.2. Yöntem

3.2.1. Jeopolimer Reçetelerinin Formülasyonu

Jeopolimerik levhanın oluşturulması ve hazırlama, üretim aşamaları göz önüne alındığında genel anlamıyla basit aşamalardan oluşmaktadır. Üretim şeması Şekil 11.'de belirtilmiştir.

Deney çalışmalarında öncelikli amaç bir temel jeopolimerik levha üretilmesi ve oluşturulan jeopolimerik levhaya cellubor ve polipropilen fiberler ilavesi tercih edilmiştir. Bir sonraki aşamada fiber esaslı levhalar hazırlanmış, ısı deneyleri yapıp elde edilen neticeler ve bulgular ışığında tartışmalar ve sonuçlar oluşmuştur.

İlk aşamada en mükemmel mekanik, ısı ve yapısal özelliklere bulunan temel jeopolimerik levhayı bulmak adına farklı oranlarda bileşiklerin ($\text{Na}_2\text{O}/\text{NaOH}$, $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$) ve liflerin oranları üzerinde değişik reçeteler kullanılarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Başlangıç olarak literatür çalışmaları ve ön denemelerin neticesinde onaltı ayrı ana jeopolimerik levha ve bir adet kalekim levha numunesi oluşturulup hepsinin yedi gün sonrasındaki mekanik özellikleri ve ısıya karşı duyarlılık tepkileri incelenmiştir. Bu doğrultuda en uygun başlangıç reçeteleri tekrar edilmiştir ve jeopolimerik levhaların yedi

gün sonunda ısı yalıtım testleri yapılmıştır. Araştırılan onyediyi numunenin içeriğini oluşturan madde ve liflerin oranları Tablo 1.'de gösterilmiştir.

Tablo 1

Üretilen levhalar ve yapı içerikleri

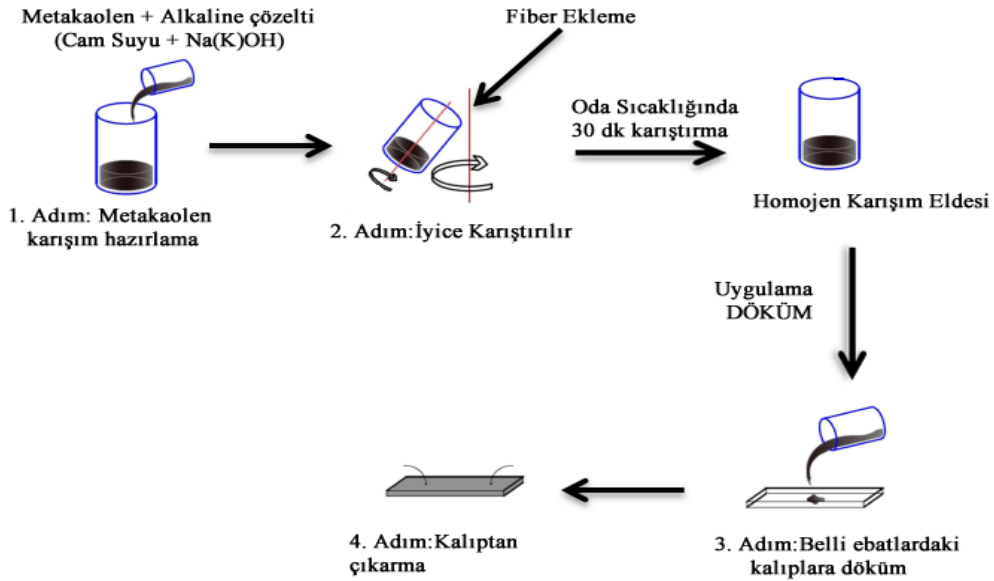
LEVHA ADI	METEKAOLEN (gr)	KALEKİM (gr)	SODYUMSİLİKAT (gr)	NAOH (gr)	SU (gr)	CB LİF (gr)	DAYANIM ARTTIRICI (gr)	PP LİF (gr)	Lif Miktarı (% wt)
KALEKİM LİFSİZ	0	200	-	-	50	-	20	-	0
LİFSİZ	100	-	82,27	18,24	50	-	-	-	0
PP1	100	-	82,27	18,24	50	-	-	0,75	0,74
PP2	100	-	82,27	18,24	50	-	-	1,125	1,11
PP3	100	-	82,27	18,24	50	-	-	1,5	1,47
PP4	100	-	82,27	18,24	50	-	-	1,875	1,84
PP5	100	-	82,27	18,24	50	-	-	2,25	2,2
CB1	100	-	82,27	18,24	50	2	-	-	1,96
CB2	100	-	82,27	18,24	50	3	-	-	2,91
CB3	100	-	82,27	18,24	50	4	-	-	3,84
CB4	100	-	82,27	18,24	50	5	-	-	4,76
CB5	100	-	82,27	18,24	50	6	-	-	5,66
CBPP1	100	-	82,27	18,24	50	2	-	0,75	2,67
CBPP2	100	-	82,27	18,24	50	3	-	1,125	3,96
CBPP3	100	-	82,27	18,24	50	4	-	1,5	5,21
CBPP4	100	-	82,27	18,24	50	5	-	1,875	6,43
CBPP5	100	-	82,27	18,24	50	6	-	2,25	7,62

3.2.2. Jeopolimerlerin Hazırlanışı

Jeopolimerik levha üretim aşaması ana maddenin yani bu tez çalışmada kullanılan metakaolenin alkali ortamda alümina silikat ile birleşimine dayanır. Birinci aşama olarak katı fazda bulunan NaOH bileşiği önceden belirlenmiş hesaplamalar baz alınarak hassas terazide ölçülüp behere aktarılmıştır. Daha sonraki aşamada sırasıyla hesaplanan tutarda Sodyum Silikat ve saf su eklenip karıştırıcıda Sodyum Hidroksit tanecikleri eriyip homojen bir hal alana kadar 10 dakika karıştırılmıştır (Şekil 12.). Karıştırma işlemi bittikten sonra çözelti oda sıcaklığında soğumaya bırakılır ve oda sıcaklığına yani 25°C' ye erişinceye kadar dinlendirilir. Dinlendirme aşaması yapılmazsa çözeltinin metakaolen ile birleşme

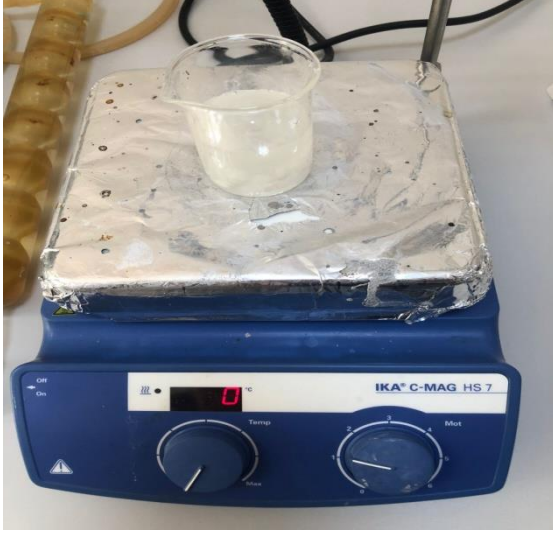
anında oluşan harçta topaklanmalar meydana gelir ve homojen harç elde etmek gitgide zorlaşır (Şekil 14.).

Karıştırma aşamasında çözeltime ısı verilmemektedir bunun nedeni jeopolimerizasyon reaksiyonu ekzotermik bir tepkimedir ve ortama ısı yaymaktadır yani ısı verildiğinde reaksiyon tamamı ile engellenmiş olur. Karıştırma aşamasında çözeltinin üzeri çözeltime suyun buharlaşması için minimum su kaybı sağlamak için kapatılmaktadır. Alkali çözelti 25°C'ye eriştikten sonra reçetesi belirlenmiş ve tartılmış ve hassas terazide ağırlık ölçümü yapılmışa metakaolenin yani ana maddemizin üzerine hafif ve yavaş bir biçimde eklenip karıştırılır. Lif esaslı jeopolimerik levhamıza bu aşamada liflerimizin katılması sağlanmıştır. Karıştırma aşaması metal spatül kaşıkla manuel şekilde elle yapılmıştır. Karıştırma aşaması minimum 10 dakika olacak şekilde sürmelidir yahut elde edilen harçı homojen hale getirmek jeopolimerin termal ve mekanik nicelikleri için en önemli faktörlerdendir.



Şekil 11. Jeopolimer Üretim Şeması

Karıştırılarak homojenize edilmiş jeopolimer harçlar 15 cm x 15cm x 5cm boyutlarındaki metal kalıplara dökülür (Şekil 14). Üzerleri açık bir şekilde 24 saat kürlendikten sonra kalıplardan çıkarılmıştır.



Şekil 12. NaOH, sodyum silikat ve saf suyun karıştırıcıda karıştırılması



Şekil 13. Karıştırılan harç



Şekil 14. Jeopolimerik harçla doldurulmuş kalıp

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

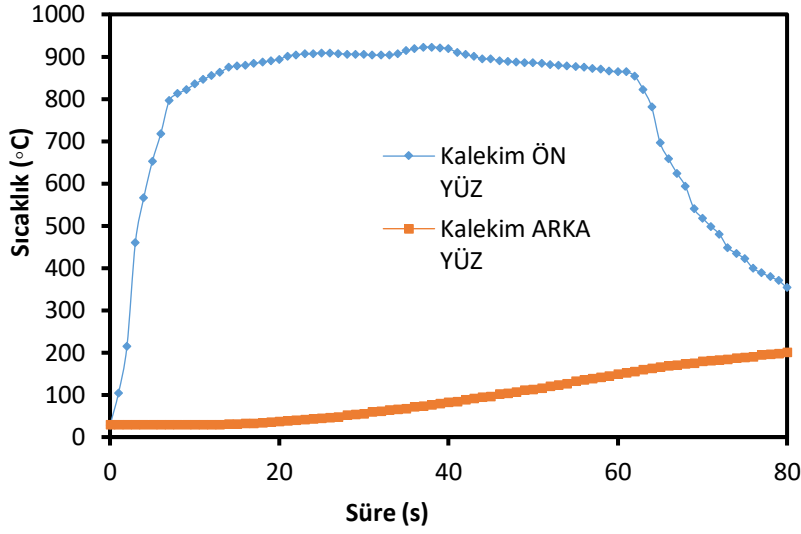
ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu tez çalışmasında içerisinde lif bulunduran ve lif bulunduramayan olmakla birlikte iki tip jeopolimerik levha ve bir adet kalekim levha üretilmiş olup alev testi yapıp tüm levhaların ön ve arka yüzleri arası sıcaklık analizi yapılmıştır. Tezin araştırma aşamasını 2 ana başlıktan oluşmaktadır. Birinci aşama lif içermeyen metakaleon ve kalekim levhaların alev testleri yapıp arka yüz sıcaklığının 50 °C' ye gelme sürelerinin tespitidir. Bu tespit ile diğer lifli levhaların ısı yalıtım ve alev geciktirme özellikleri karşılaştırılacaktır. Tezin ikinci aşamasında lifli levhaların alev testleri ve levhanın arka yüzünün alev geciktirme sürelerinin tespitidir. Çalışmalarda alev testinin sonuçlarının karşılaştırılması için bir prosedür geliştirilmiştir. Buna göre öncelikle ön levhanın maksimum ulaştığı sıcaklık belirlenir ($T_{\text{Ön-Max}}$).

Bu sıcaklık belirlenirlerken arka levhanın sıcaklığının maksimum 24 °C ($\pm 0,5$ °C) civarını geçmeyecek en yüksek değer olarak seçilmektedir. Bunun sebebi arka levhaya ısı transferinin henüz çok fazla olmadığı ilk anın ve en yüksek ön taraf sıcaklığının seçilmesi amacı içindir. $T_{\text{Ön-Max}}$ sıcaklığının belirlendiği andaki levhanın arka sıcaklığı " T_{Arka} " olarak 24 $\pm 0,5$ °C olarak kayıt edilir. Ayrıca alev testinin başladığı andan itibaren bu sıcaklıkların ($T_{\text{Ön-Max}}$ ve T_{Arka}) olduğu ana kadar geçen sürede " t_{Arka} " süresi olarak kaydedilir. T_{Arka} (°C) sıcaklığı ve t_{Arka} (s) süresi arka levhanın ilk sıcaklık ve süresi olarak tanımlanır. Arka levhanın 50 °C' ye geldiği ilk an test kayıtlarına " $t_{\text{Arka}}(s) @ 50$ °C" olarak rapor edilir. Bunun anlamı arka levhanın 50 °C' ye deneyin başlangıç zamanından itibaren ulaştığı süredir. Bu süreye aynı zamanda, levhanın alev testi sonucu arka tarafı sıcaklığı geciktirme ölçüsü, " $\Delta t_{\text{Arka}}(s)$ " olarak ifade edilir ve bu süre levhanın ön yüzü ile arka yüz arası sıcaklığı ne kadar süre geciktirmeli anlamını taşır. Tüm lif denemelerinin ısı yalıtım özellikleri bu sonuç ile karşılaştırılacaktır.

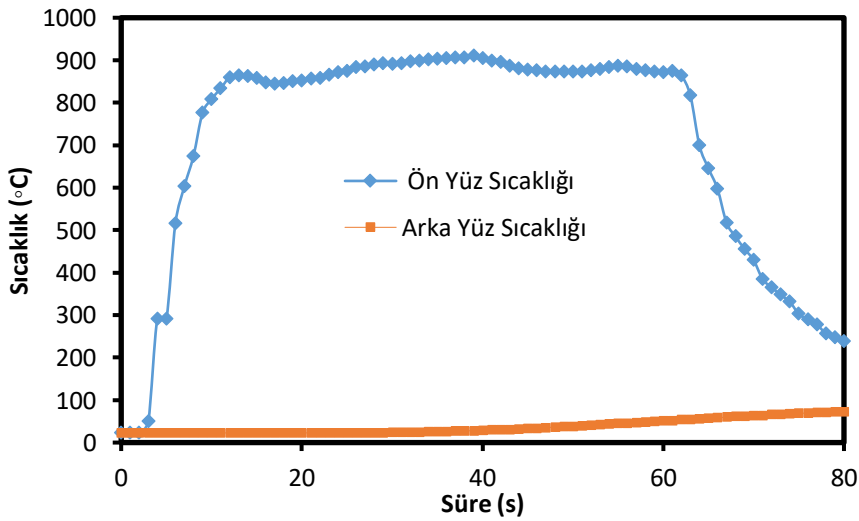
4.1. Fiber İçermeyen Kalekim ve Jeopolimerik Levha Analizi

Şekil 15' de kalekim içeren levhanın alev testi sonrası ön ve arka yüz levha sıcaklıklarının zamanla değişimi görülmektedir.



Şekil 15. Fiber içermeyen kalekim levha alev testi grafiği

Şekil 15’ de, fiber içermeyen kalekim levhanınalev testi sırasında ön ve arka yüz sıcaklıklarının nasıl değiştiğini gösteren grafik görülmektedir. Yapılan analiz sonucunda, kalekim ön yüz sıcaklığının deneme süresinin 16. saniyesinde maksimum ön sıcaklı olan “ $T_{\text{Ön-Max}}$ ” 880 °C’ye ulaştığı görülmüştür. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “ T_{arka} ” 32,2°C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “ $t_{\text{Arka}} (s)@50^{\circ}\text{C}$ ” 28. saniyede ulaştığı görülmüştür. Buna göre arka levhanın 50 °C ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “ Δt_{Arka} ” ise $\Delta t_{\text{Arka}}=28-16=12$ saniye olmaktadır. Şekil 16’ de ise lif içermeyen metakaolen levhanın alev testi sırasında ön ve arka yüz sıcaklıklarının nasıl değiştiğini gösteren grafik görülmektedir.



Şekil 16. Fiber içermeyen metakaolen levha alev testi grafiği

Yapılan analiz sonucunda, fiber içermeyen metakaolen levhanın ön yüz sıcaklığının deneme süresinin 39. saniyesinde maksimum ön sıcaklı olan “T_{Ön-Max}” 909,8 °C’ye ulaştığı görülmüştür. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “T_{Arka}” 27,9 °C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “t_{Arka} (s)@50°C” 60. saniyede ulaştığı görülmüştür. Buna göre arka levhanın 50 °C ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “Δt_{Arka}” ise Δt_{Arka}=60-39=21 saniye olmaktadır.

Lif içermeyen kalekim ve metakaolen levhaların alev testleri sonucunda kalekim levhanın arka yüzünün 50 °C’ ye ulaşma süresi deneme başlama sonrasında 12. saniye olurken aynı deneme lif içermeyen metakaolen levhada 21. saniyede olmaktadır. Aynı ebatlardaki lif içermeyen metakaolen levha, kalekim levhaya göre ısıyı 9. saniye daha geç aktardığı görülmüştür. Tablo 2’ de lif içermeyen levha sonuçları görülmektedir.

Tablo 2

Lif içermeyen metakaolen ve kalekim levha alev testi sonuçları

Kod	T _{Ön-Max} (°C)	T _{Arka} (°C)	t _{Arka} (s)	t _{Arka} (s) (@ 50 °C)	Δt _{Arka} (s)
Metakaolen Levha	909,8	27,9	39	60	21,0
Kalekim Levha	880,2	32,2	16	28	12,0

4.2. Fiber İçeren Jeopolimerik Levha Analizi

Fiber içermeyen levha uygulaması sonrası jeopolimerik harçlar içerisine Cellubor, Polipropilen ve Cellubor+Polipropilen fiber karışımlarından oluşan liflerin karışımı ile oluşan kompozit levhaların ısı dayanımları alev testinde incelenmiştir.

4.2.1. Cellubor Fiber İçeren Jeopolimerik Levha Analizleri

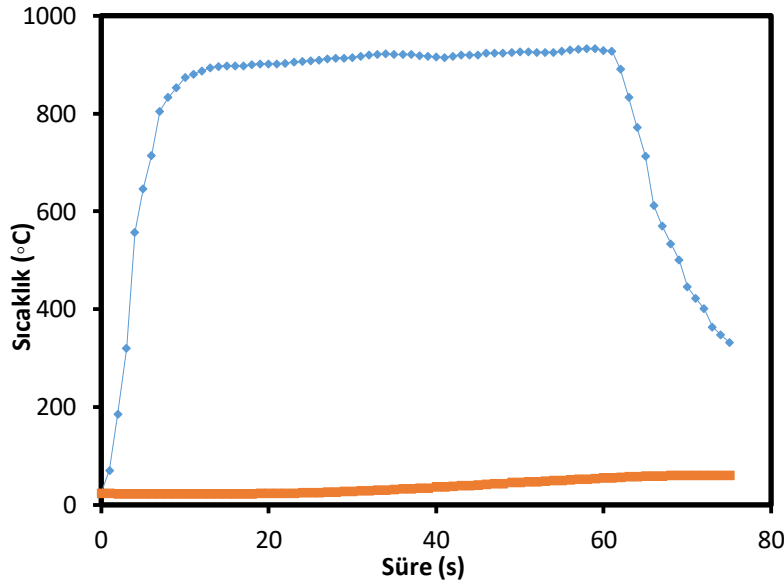
Tablo 3’ de farklı oranlarda cellubor lif içeren CB serisi metakaolen levhaların alev test analiz sonuçları görülmektedir.

Tablo 3

Farklı oranlarda CB lif içeren metakaolen levhaların alev testi sonuçları

Kod	Lif Oranı (Wt, %)	T _{Ön-Max} (°C)	T _{Arka} (°C)	t _{Arka} (s)	t _{Arka} (s) (@ 50 °C)	Δt _{Arka} (s)
CB1	1,96	903	24,6	22	52	30,0
CB2	2,91	860,2	20,3	14	44	30,0
CB3	3,84	890,6	24,1	18	48	30,0
CB4	4,76	873,2	24,4	15	50	35,0
CB5	5,66	851,1	24	17	60	43,0

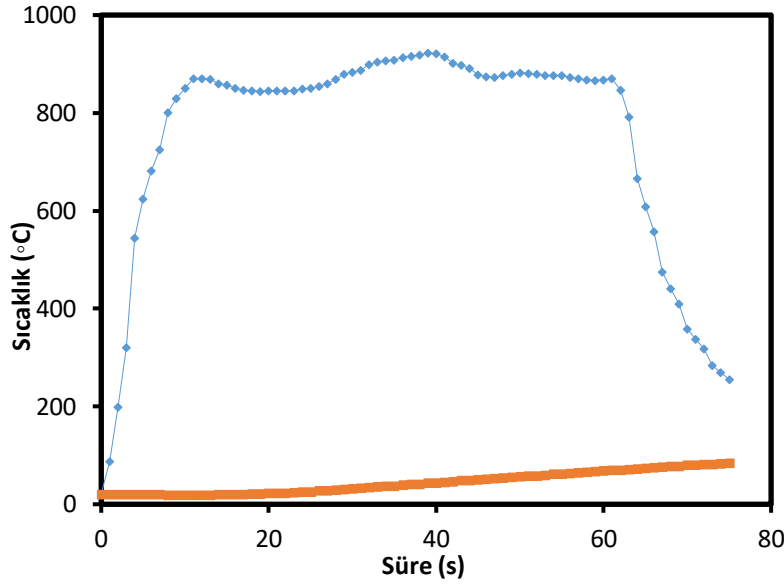
Şekil 17’ de Tablo 3’ de verilen CB1 kodlu içerisinde %1,96 cellubor lif içeren jeopolimer levha alev testi sıcaklık sonucu görülmektedir



Şekil 17. Cellubor fiber (CB1) içeren metakaolen levha alev testi grafiği

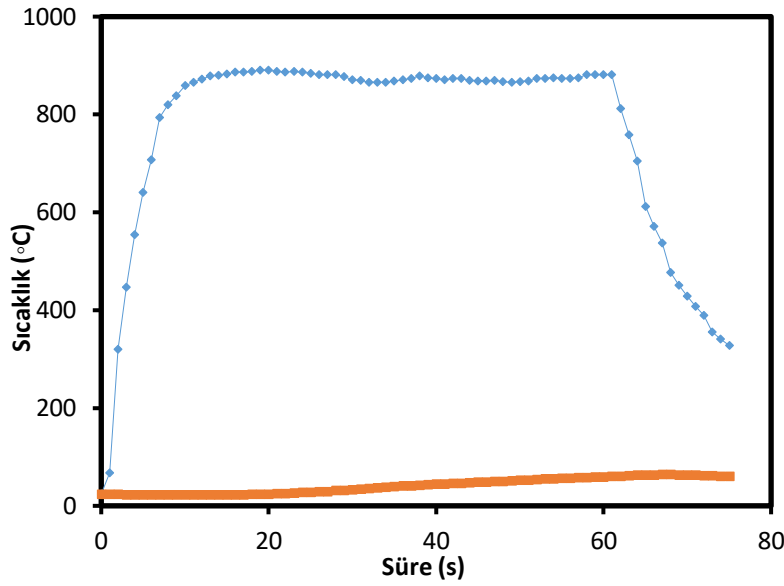
Şekil 17’ de ağırlıkça %1,96 cellubor lif içeren (CB1) levhaların ön yüz sıcaklığı deneme süresinin 34. saniyesinde maksimum ön sıcaklı olan “T_{Ön-Max}” 922 °C’ye ulaşmıştır. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “T_{Arka}” 31,6 °C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “t_{Arka} (s)@50°C” 54. saniyede ulaşmıştır. Buna göre arka levhanın 50 °C ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “Δt_{Arka}” ise Δt_{Arka}=54-34=20 saniye olmaktadır.

Şekil 18’ de ve Tablo 1’ de verilen CB2 kodlu içerisinde %2,91 cellubor lif içeren jeopolimer levha alev testi sıcaklık sonucu görülmektedir.



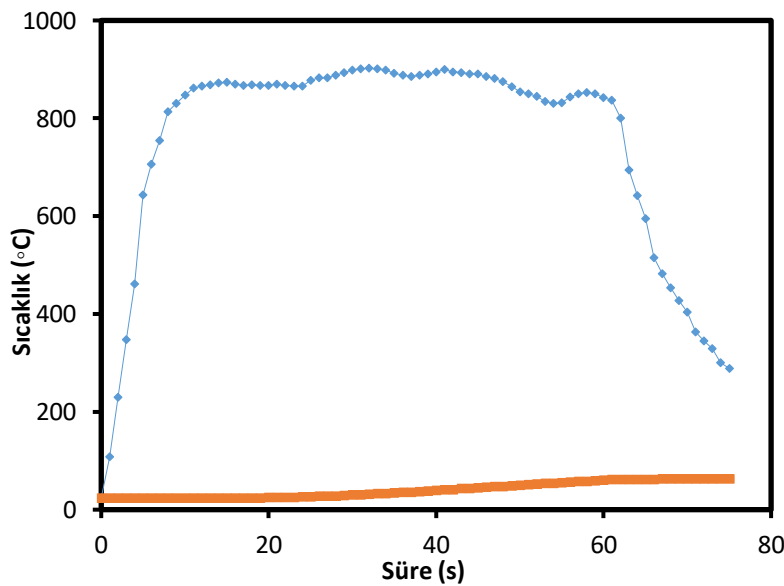
Şekil 18. Cellubor fiber (CB2) içeren metakaolen levha alev testi grafiği

Şekil 18’ de ağırlıkça %2,91 cellubor lif içeren (CB2) levhaların ön yüz sıcaklığı deneme süresinin 14. saniyesinde maksimum ön sıcaklı olan “T_{Ön-Max}” 860 °C’ye ulaşmıştır. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “T_{arka}” 20,3 °C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “t_{Arka} (s)@50°C” 44. saniyede ulaşmıştır. Buna göre arka levhanın 50 °C ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “Δt_{Arka}” ise Δt_{Arka}=44-20,3=23,7 saniye olmaktadır. Şekil 19’ da ve Tablo 1’ de verilen CB3 kodlu içerisinde %3,84 cellubor lif içeren jeopolimer levha alev testi sıcaklık sonucu görülmektedir.



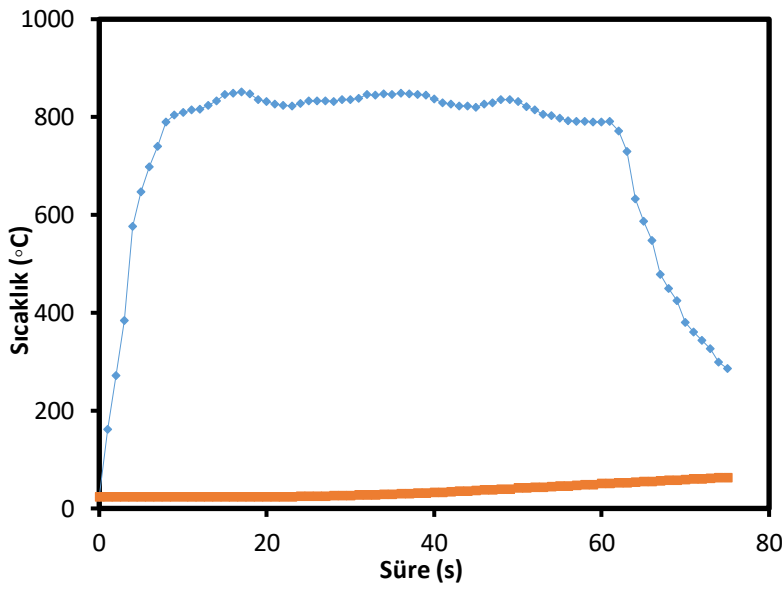
Şekil 19. Cellubor fiber (CB3) içeren metakaolen levha alev testi grafiği

Ağırlıkça %3,84 cellubor lif içeren (CB3) levhaların ön yüz sıcaklığı deneme süresinin 18. saniyesinde maksimum ön sıcaklık olan “ $T_{\text{Ön-Max}}$ ” 890 °C’ye ulaşmıştır. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “ T_{arka} ” 24,1 °C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “ $t_{\text{Arka}}(s)@50\text{ °C}$ ” 48. saniyede ulaşmıştır. Buna göre arka levhanın 50 °C ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “ Δt_{Arka} ” ise $\Delta t_{\text{Arka}}=48-18=30$ saniye olmaktadır. Şekil 20’ de Tablo 1’ de verilen CB3 kodlu içerisinde %4,76 cellubor lif içeren jeopolimer levha alev testi sıcaklık sonucu görülebilmektedir.



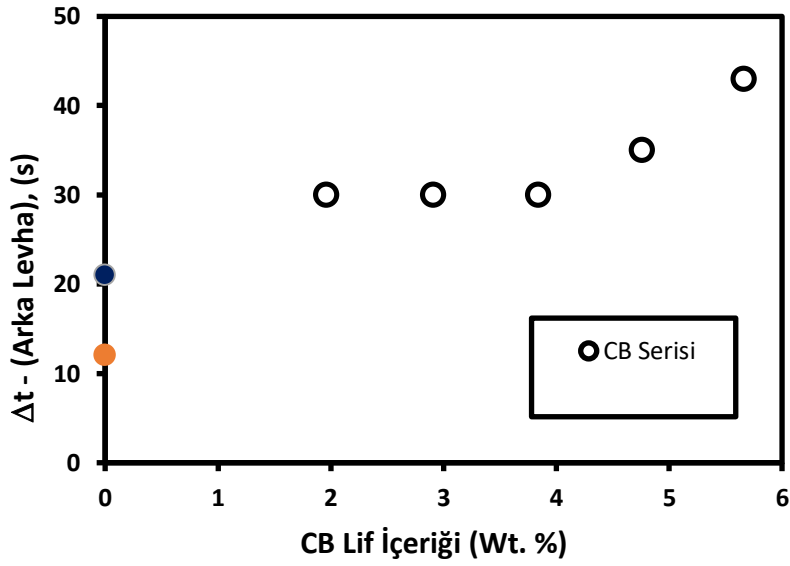
Şekil 20. Cellubor fiber (CB4) içeren metakaolen levha alev testi grafiği

Ağırlıkça %4,76 cellubor lif içeren (CB4) levhaların ön yüz sıcaklığı deneme süresinin 15. saniyesinde maksimum ön sıcaklı olan “T_{Ön-Max}” 873 °C’ye ulaşmıştır. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “T_{arka}” 24,4 °C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “t_{Arka} (s)@50°C” 50. saniyede ulaşmıştır. Buna göre arka levhanın 50 °C ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “Δt_{Arka}” ise Δt_{Arka}=50-15=35 saniye olmaktadır. Şekil 21’ de Tablo 1.’ de verilen CB5 kodlu içerisinde %5,66 cellubor lif içeren jeopolimer levha alev testi sıcaklık sonucu görülmektedir.



Şekil 21. Cellubor fiber (CB5) içeren metakaolen levha alev testi grafiği

Ağırlıkça %5,66 cellubor lif içeren (CB5) levhaların ön yüz sıcaklığı deneme süresinin 17. saniyesinde maksimum ön sıcaklı olan “T_{Ön-Max}” 851 °C’ye ulaşmıştır. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “T_{arka}” 24,0 °C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “t_{Arka} (s)@50°C” 60. saniyede ulaşmıştır. Buna göre arka levhanın 50 °C ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “Δt_{Arka}” ise Δt_{Arka}=60-17=43 saniye olmaktadır. Şekil 22’de farklı oranlarda CB lif içeren metakaolen levhaların lif oranına göre alev geciktirme sürelerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 22. Artan CB lif içereğine bağlı metakaolen levha alev geciktirme süresi değişimi

4.2.2. Polipropilen Fiber İçeren Jeopolimerik Levha Analizleri

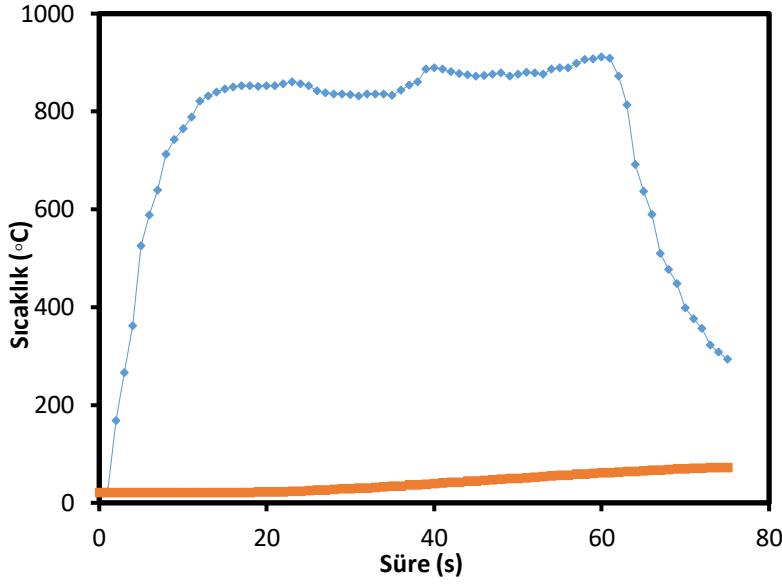
Tablo 4' de farklı oranlarda polipropilen lif içeren PP serisi metakaolen levhaların alev test analiz sonuçları görülmektedir.

Tablo 4

Farklı oranlarda PP lif içeren metakaolen levhaların alev testi sonuçları

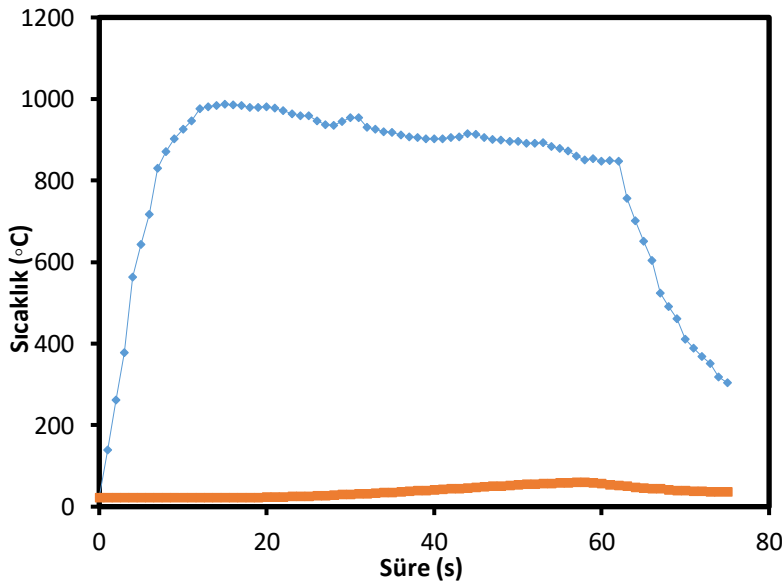
Kod	Lif Oranı (Wt, %)	T _{Ön-Max} (°C)	T _{Arka} (°C)	t _{Arka} (s)	t _{Arka} (s) (@ 50 °C)	Δt_{Arka} (s)
PP1	0,74	852,7	22,8	20	50	30,0
PP2	1,11	986,7	22,5	15	47	32,0
PP3	1,47	772,2	24,4	20	51	31,0
PP4	1,84	872,2	24,1	19	52	33,0
PP5	2,2	828,5	24,6	18	46	28,0

Şekil 23' de Tablo 1' de verilen PP1 kodlu içerisinde %0,74 polipropilen lif içeren jeopolimer levha alev testi sıcaklık sonucu görülmektedir.



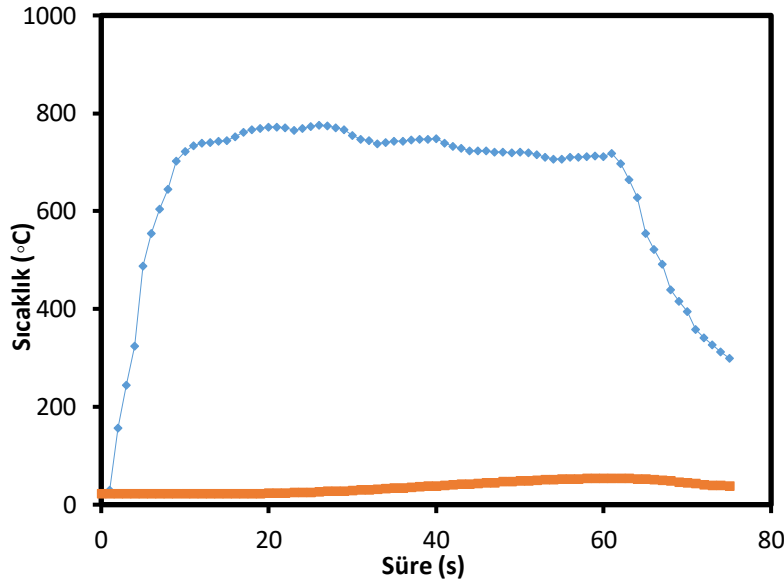
Şekil 23. Polipropilen(PP1) fiber içeren metakaolen levha alev testi grafiği

Ağırlıkça %0,74 polipropilen lif içeren (PP1) levhaların ön yüz sıcaklığı deneme süresinin 20. saniyesinde maksimum ön sıcaklı olan “ $T_{\text{Ön-Max}}$ ” 852 °C’ye ulaşmıştır. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “ T_{arka} ” 22,8 °C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “ $t_{\text{Arka}}(s)@50^{\circ}\text{C}$ ” 50. saniyede ulaşmıştır. Buna göre arka levhanın 50 °C’ ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “ Δt_{Arka} ” ise $\Delta t_{\text{Arka}}=50-20=30$ saniye olmaktadır. Şekil 24’da Tablo 1’ de verilen PP2 kodlu içerisinde %1,11 polipropilen lif içeren jeopolimer levha alev testi sıcaklık sonucu görülmektedir.



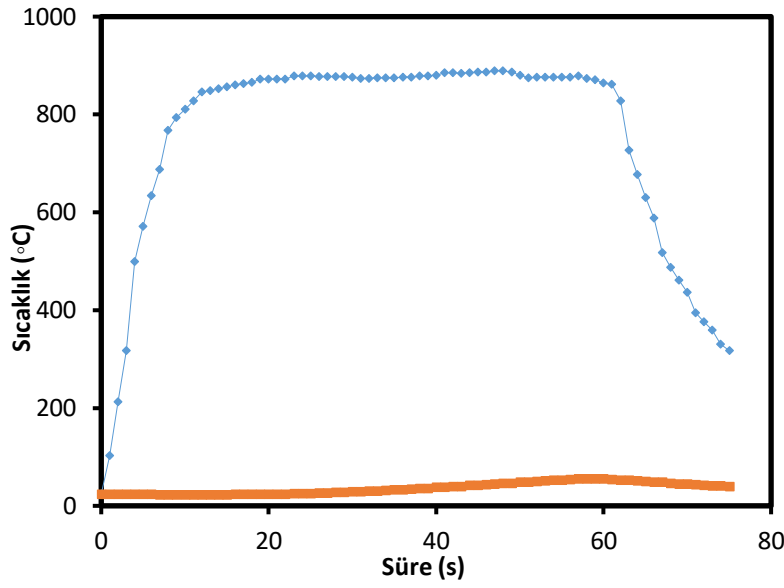
Şekil 24. Polipropilen(PP2) fiber içeren metakaolen levha alev testi grafiği

Ağırlıkça %1,11 polipropilen lif içeren (PP2) levhaların ön yüz sıcaklığı deneme süresinin 15. saniyesinde maksimum ön sıcaklı olan “T_{Ön-Max}” 986 °C’ye ulaşmıştır. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “T_{arka}” 22,5 °C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “t_{Arka} (s)@50°C” 47. saniyede ulaşmıştır. Buna göre arka levhanın 50 °C ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “Δt_{Arka}” ise Δt_{Arka}=47-15=32 saniye olmaktadır. Şekil 25’de ve Tablo 1’ de verilen PP3 kodlu içerisinde %1,47 polipropilen lif içeren jeopolimer levha alev testi sıcaklık sonucu görülmektedir



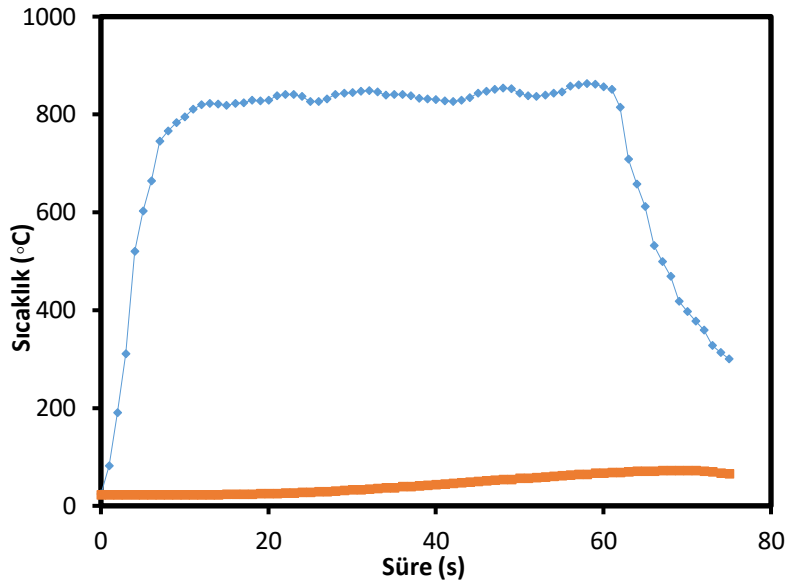
Şekil 25. Polipropilen(PP3) fiber içeren metakaolen levha alev testi grafiği

Ağırlıkça %1,47 polipropilen lif içeren (PP3) levhaların ön yüz sıcaklığı deneme süresinin 20 saniyesinde maksimum ön sıcaklı olan “T_{Ön-Max}” 772 °C’ye ulaşmıştır. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “T_{arka}” 24,4 °C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “t_{Arka} (s)@50°C” 51. saniyede ulaşmıştır. Buna göre arka levhanın 50 °C ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “Δt_{Arka}” ise Δt_{Arka}=51-20=31 saniye olmaktadır. Şekil 26’de Tablo 1’ de verilen PP4 kodlu içerisinde %1,84 polipropilen lif içeren jeopolimer levha alev testi sıcaklık sonucu görülmektedir



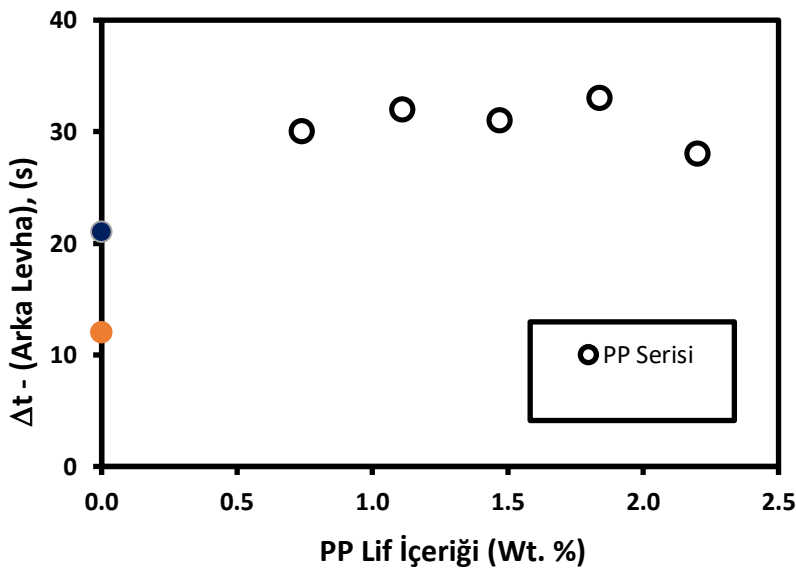
Şekil 26. Polipropilen (PP4) fiber içeren metakaolen levha alev testi grafiği

Ağırlıkça %1,84 polipropilen lif içeren (PP4) levhaların ön yüz sıcaklığı deneme süresinin 19. saniyesinde maksimum ön sıcaklı olan “ $T_{\text{Ön-Max}}$ ” 872 °C’ye ulaşmıştır. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “ T_{Arka} ” 24,1 °C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “ $t_{\text{Arka}} (s)@50^{\circ}\text{C}$ ” 52. saniyede ulaşmıştır. Buna göre arka levhanın 50 °C ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “ Δt_{Arka} ” ise $\Delta t_{\text{Arka}}=52-19=33$ saniye olmaktadır. Şekil 27’de Tablo 1’ de verilen PP5 kodlu içerisinde %2,2 polipropilen lif içeren jeopolimer levha alev testi sıcaklık sonucu görülmektedir.



Şekil 27. Polipropilen (PP5) fiber içeren metakaolen levha alev testi grafiği

Ağırlıkça %2,2 polipropilen lif içeren (PP5) levhaların ön yüz sıcaklığı deneme süresinin 18. saniyesinde maksimum ön sıcaklık olan “ $T_{\text{ön-Max}}$ ” 829 °C’ye ulaşmıştır. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “ T_{arka} ” 24,6 °C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “ $t_{\text{Arka}}(s)@50^{\circ}\text{C}$ ” 46. saniyede ulaşmıştır. Buna göre arka levhanın 50 °C ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “ Δt_{Arka} ” ise $\Delta t_{\text{Arka}}=46-18=28$ saniye olmaktadır. Şekil 28.’de farklı oranlarda PP lif içeren metakaolen levhaların lif oranına göre alev geciktirme sürelerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 28. Artan PP lif içereğine bağlı metakaolen levha alev geciktirme süresi değişim

4.2.3. Polipropilen Fiber ve Cellubor İçeren Jeopolimerik Levha Analizleri

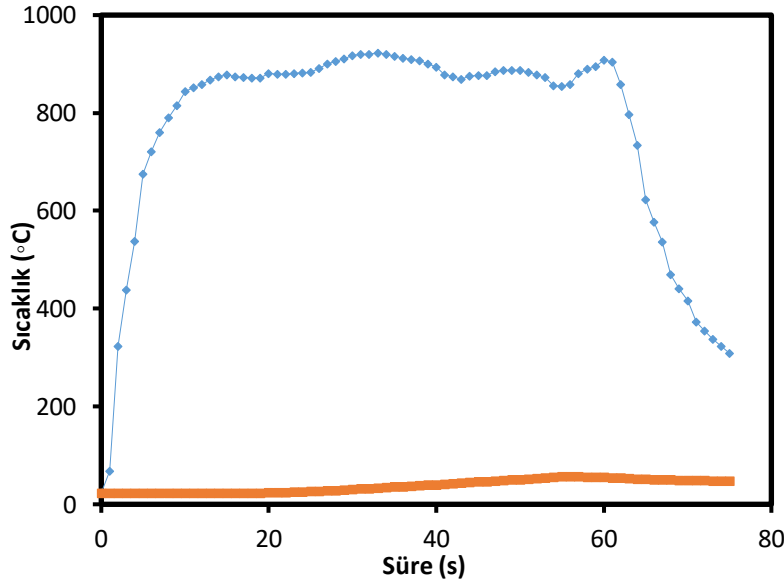
Tablo 5.' de farklı oranlarda cellubor+polipropilen lif karışımı içeren CBPP serisi metakaolen levhaların alev test analiz sonuçları görülmektedir.

Tablo 5

Farklı oranlarda CB+PP lif karışımı içeren metakaolen levhaların alev testi sonuçları

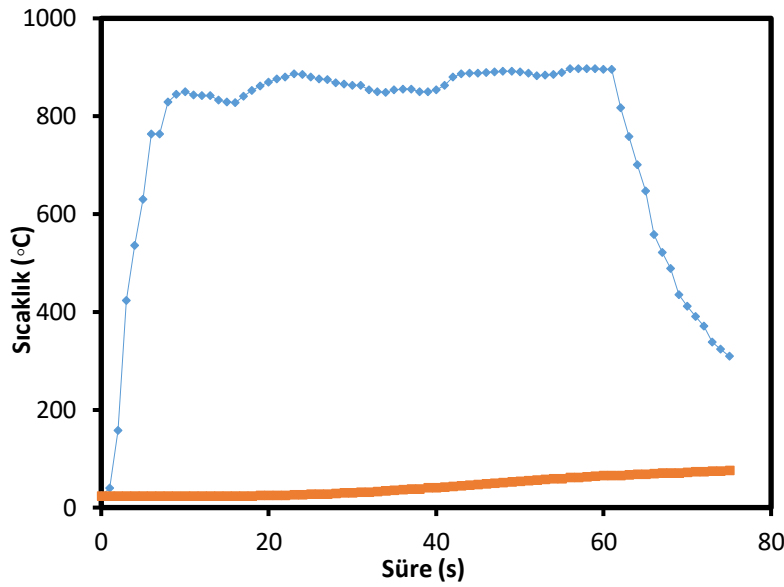
Kod	Lif Oranı (Wt, %)	T _{Ön-Max} (°C)	T _{Arka} (°C)	t _{Arka} (s)	t _{Arka} (s) (@ 50 °C)	Δt _{Arka} (s)
CBPP1	2,67	878,2	23,1	15	49	34,0
CBPP2	3,96	842,7	23,9	12	47	35,0
CBPP3	5,21	815,8	23,9	10	43	33,0
CBPP4	6,43	907,1	23,9	14	52	38,0
CBPP5	7,62	808,2	24	25	62	37,0

Şekil 29.' da Tablo 1' de verilen CBPP1 kodlu içerisinde %2,67 lif karışımı içeren jeopolimer levha alev testi sıcaklık sonucu görülmektedir



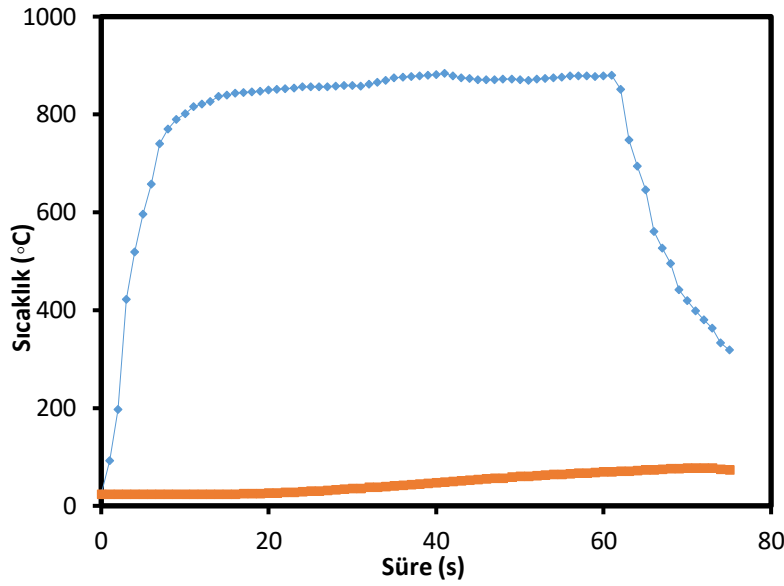
Şekil 29. Polipropilen ve cellubor fiber karışımı içeren (CBPP1) metakaolen levha alev testi grafiği

Ağırlıkça %2,67 fiber karışımı içeren (CBPP1) levhaların ön yüz sıcaklığı deneme süresinin 15 saniyesinde maksimum ön sıcaklı olan “T_{Ön-Max}” 878 °C’ye ulaşmıştır. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “T_{arka}” 23,1 °C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “t_{Arka} (s)@50°C” 49. saniyede ulaşmıştır. Buna göre arka levhanın 50 °C ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “Δt_{Arka}” ise Δt_{Arka}=49-15=34 saniye olmaktadır. Şekil 30’da Tablo 1’ de verilen CBPP2 kodlu içerisinde %3,96 lif karışımı (PP+CB) içeren jeopolimer levha alev testi sıcaklık sonucu görülmektedir.



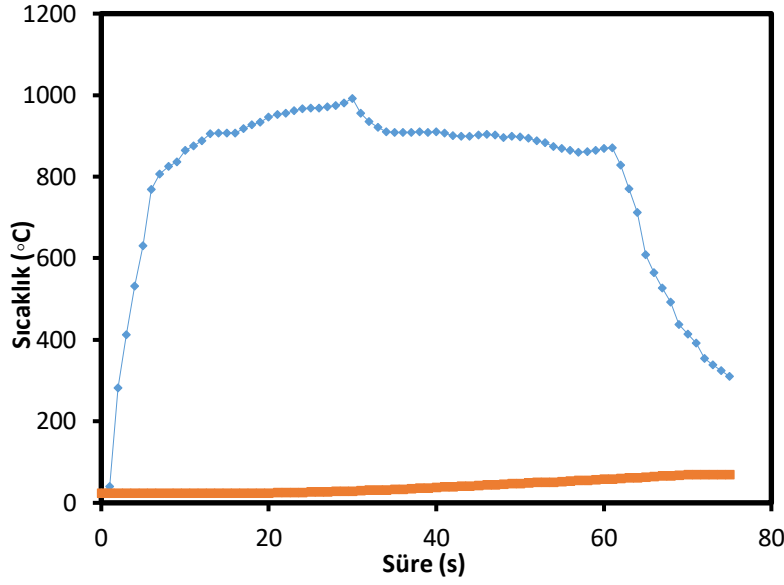
Şekil 30. Polipropilen ve cellubor fiber karışımı içeren (CBPP2) metakaolen levha alev testi grafiği

Ağırlıkça %3,96 fiber karışımı içeren (CBPP2) levhaların ön yüz sıcaklığı deneme süresinin 12. saniyesinde maksimum ön sıcaklı olan “T_{Ön-Max}” 842 °C’ye ulaşmıştır. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “T_{arka}” 23,9 °C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “t_{Arka} (s)@50°C” 47. saniyede ulaşmıştır. Buna göre arka levhanın 50 °C’ ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “Δt_{Arka}” ise Δt_{Arka}=47-12=35 saniye olmaktadır. Şekil 31’de Tablo 1’ de verilen CBPP3 kodlu içerisinde %5,21 lif karışımı (PP+CB) içeren jeopolimer levha alev testi sıcaklık sonucu görülmektedir.



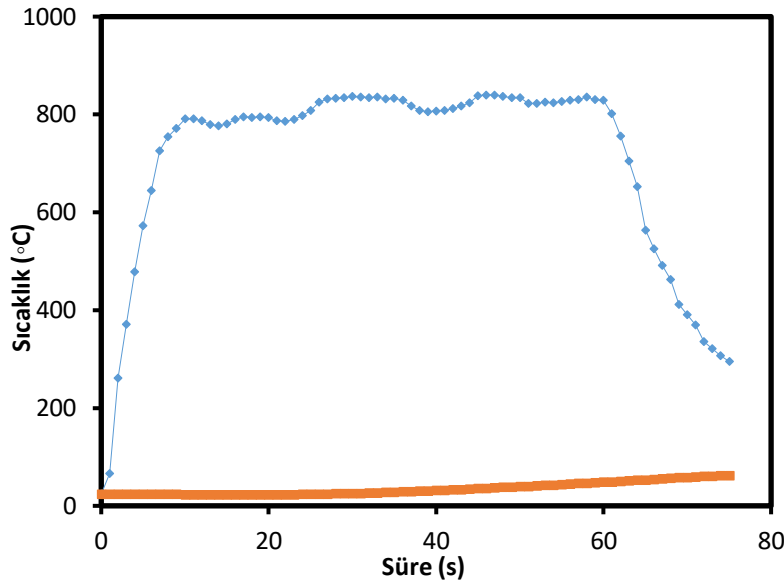
Şekil 31. Polipropilen ve cellubor fiber karışımı içeren (CBPP3) metakaolen levha alev testi grafiği

Ağırlıkça %5,21 fiber karışımı içeren (CBPP3) levhaların ön yüz sıcaklığı deneme süresinin 10. saniyesinde maksimum ön sıcaklı olan “ $T_{\text{Ön-Max}}$ ” 816 °C’ye ulaşmıştır. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “ T_{arka} ” 23,9 °C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “ $t_{\text{Arka}}(s)@50^{\circ}\text{C}$ ” 43. saniyede ulaşmıştır. Buna göre arka levhanın 50 °C’ ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “ Δt_{Arka} ” ise $\Delta t_{\text{Arka}}=43-10=33$ saniye olmaktadır. Şekil 32’de Tablo 1’ de verilen CBPP4 kodlu içerisinde %6,43 lif karışımı (PP+CB) içeren jeopolimer levha alev testi sıcaklık sonucu görülebilmektedir.



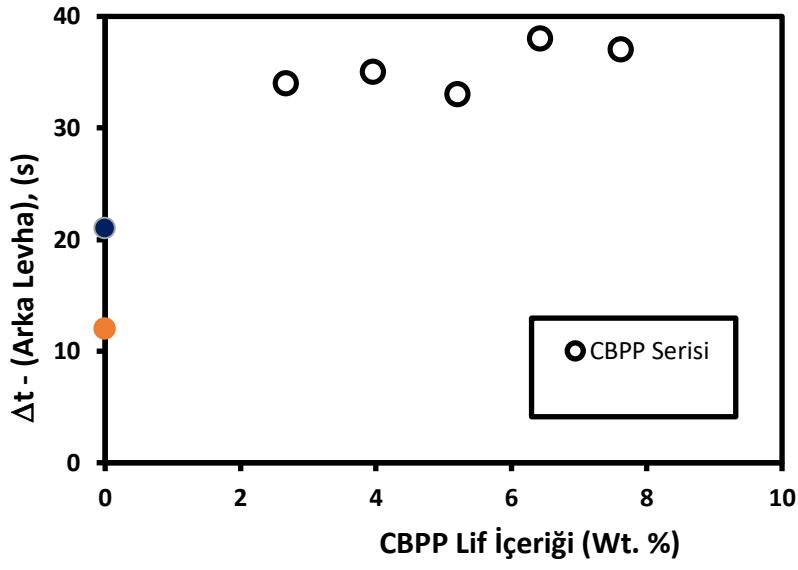
Şekil 32. Polipropilen ve cellubor fiber karışımı içeren (CBPP4) metakaolen levha alev testi grafiği

Ağırlıkça %6,43 fiber karışımı içeren (CBPP4) levhaların ön yüz sıcaklığı deneme süresinin 14. saniyesinde maksimum ön sıcaklı olan “ $T_{\text{Ön-Max}}$ ” 907 °C’ye ulaşmıştır. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “ T_{Arka} ” 23,9 °C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “ $t_{\text{Arka}}(s)@50^{\circ}\text{C}$ ” 52. saniyede ulaşmıştır. Buna göre arka levhanın 50 °C’ ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “ Δt_{Arka} ” ise $\Delta t_{\text{Arka}}=52-14=38$ saniye olmaktadır. Şekil 33’de Tablo 1’ de verilen CBPP5 kodlu içerisinde %7,62 lif karışımı (PP+CB) içeren jeopolimer levha alev testi sıcaklık sonucu görülmektedir.



Şekil 33. Polipropilen ve cellubor fiber karışımı içeren (CBPP5) metakaolen levha alev testi grafiği

Ağırlıkça %7,62 fiber karışımı içeren (CBPP5) levhaların ön yüz sıcaklığı deneme süresinin 25 saniyesinde maksimum ön sıcaklı olan “ $T_{\text{Ön-Max}}$ ” 808 °C’ye ulaşmıştır. Bu andaki arka levha sıcaklığı ise “ T_{arka} ” 24 °C’ dir. Denemede arka levha sıcaklığı 50 °C’ ye “ $t_{\text{Arka}}(s)@50^{\circ}\text{C}$ ” 62. saniyede ulaşmıştır. Buna göre arka levhanın 50 °C’ ye ulaşma süresi (ısı gecikme süresi) “ Δt_{Arka} ” ise $\Delta t_{\text{Arka}}=62-25=37$ saniye olmaktadır.Şekil 34’de farklı oranlarda CBPP lif içeren metakaolen levhaların lif oranına göre alev geciktirme sürelerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 34. Artan CB+PP lif karışımına bağlı metakaolen levha alev geciktirme süresi değişimi

BEŞİNCİ BÖLÜM BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, alışıla gelmiş Portland çimentoya alternatif olarak cellubor ve polipropilen lif esaslı yanmaya karşı dirençli ve ısı yalıtımı yapabilen jeopolimerik levha üretimi aşamaları incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle içerisinde lif içermeyen ve inşaat sektöründe kullanılan kalekim levha alev testi sonuçları yapılmıştır. Buna göre ilk test, aynı ebatlarda dökülen kalekim levha ön yüzüne uygulanan alev sonrası arka yüzünün 50 °C' ye alev testi başladıktan kaç saniye sonra ulaştığının ölçülmesi şeklindedir. Buna göre kalekim levhanın ısı geciktirme süresi 12 saniye olarak bulunmuştur. Aynı deneme içerisinde herhangi bir lif içermeyen metakaolen levha ile yapıldığı zaman, arka levhanın 50 °C' ye 21. Saniyede ulaştığı görülmektedir. Buna göre metakaolen levha kalekim levhaya göre 9 saniye daha uzun süre ısı yalıtımı yapmıştır.

Çalışmanın ikinci aşaması farklı oranlarda Cellübor (CB), Polipropilen (PP) ve CB ile PP karışımı (CBPP) lif içeren metakaolen levhaların alev testi analizleridir. Buna göre öncelikle, farklı oranlarda CB içeren levhaların alev testleri yapılmıştır. Buna göre artan CB oranına bağlı olarak metakaolen levhaların arka kısımlarının 50°C' ye ulaşma sıcaklıkları 20 ile 43 s arasında değiştiği görülmüştür. Ağırlıkça %5,66 oranında CB içeren metakaolen levha fiber içermeyen metakaolen levhaya göre yaklaşık %55 oranda, fiber içermeyen kalekim levhaya göre %72 oranında daha fazla yalıtım özelliği gösterdiği bulunmuştur.

PP içeren metakaolen levhaların alev testi sonuçlarına göre artan PP içeriğine bağlı olarak çok fazla değişmediği ve arka levha 50 °C' ye ulaşma süresinin 31 ± 2 saniye civarında olduğu görülmüştür. Bu sonuç yapıda az miktarda PP varlığının yapıyı belli oranda ısı yalıtımına ulaştıracağı, PP miktarı arttıkça ısı yalıtım özelliğinin çok fazla değişmeyeceğini göstermiştir.

Belli miktarda PP ve CB karışımı lif içeren CBPP serisi metakaolen levhaların alev testi sonuçları ise yalnızca PP içeren levhalara göre nispeten iyi olsa da yalnızca CB içeren levhalara göre kötüdür. Bunun sebebi PP lif alev sonucu erimesi ve CB lifler arasındaki boşluklu yapıyı doldurarak ısı yalıtımını azaltıcı etki gösterdiği düşünülmektedir.

Yapılan denemeler sonucunda yapıda ağırlıkça yaklaşık % 6 civarında CB içeren metakaolen levhaların aleve karşı ciddi dayanımları yanı sıra, ısı yalıtım özelliklerinin

kalekim levhalara göre % 72, lif içermeyen metakaolen levhalara göre % 55 oranında daha iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur. Bu çalışma lif içeren levha üretiminde bir öncü çalışma olup, üretilen levhaların ileriki çalışmalarda hem ısı ve ses yalıtımı özelliklerinin hem de yangın geciktirme özelliklerinin olması nedeniyle inşaat ve endüstri sektöründe yapı malzemesi olarak kullanılması beklenmektedir.



KAYNAKÇA

- Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Bnhussain, M., Nizar, I. K., Rafiza, A. R., & Zarina, Y. (2012). The processing, characterization, and properties of fly ash based geopolymer concrete. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 30(1), 90-97.
- Astutiningsih, S., Nurjaya, D. M., Ashadi, H. W., & Swastika, N. (2010). Durability of geopolymer concretes upon seawater exposure. In *Advances in Science and Technology* (Vol. 69, pp. 92-96). Trans Tech Publications Ltd.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (1999). Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research*, 29(1), 113-120.
- Branston, J., Das, S., Kenno, S. Y., & Taylor, C. (2016). Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 878-886.
- Bo, W., & Shuai, F. (2011). Experiment on properties of metakaolin-based geopolymer used for CFRP strengthened concrete structure [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 4.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., & Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and concrete composites*, 29(3), 224-229.
- Collins, F., & Sanjayan, J. G. (2001). Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete. *Cement and Concrete Composites*, 23(4-5), 345-352.
- Comrie, D. C., & Kriven, W. M. (2003). Composite cold ceramic geopolymer in a refractory application. *Ceramic Transactions*, 153, 211-225.
- Damtoft, J. S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., & Gartner, E. M. (2008). Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and concrete research*, 38(2), 115-127.
- Dan, E., & Janotka, I. (2003). Chemical resistance of Portland cement, blast-furnace slag Portland cement and sulphoaluminate-belite cement in acid, chloride and sulphate solution: some preliminary results. *Ceramics- Silikaty*, 47(4), 141-148.
- Davidovits, J. (1988, June). Geopolymers of the first generation: SILIFACE-Process.

In *Geopolymer* (Vol. 88, No. 1, pp. 49-67).

- Davidovits, J. (1988, June). Soft mineralurgy and geopolymers. In *proceeding of Geopolymer* (Vol. 88, pp. 49-56).
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J., & Davidovics, M. (1991). Geopolymer: ultra-high temperature tooling material for the manufacture of advanced composites. *How Concept Becomes Reality.*, 36, 1939-1949.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J. (1994). Geopolymers: man-made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement. *Journal of Materials education*, 16, 91-91.
- Davidovits, J. (1994). Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World resource review*, 6(2), 263-278.
- Davidovits, J. (2002, October). years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs. In *Geopolymer 2002 conference* (Vol. 28, p. 29). Saint-Quentin, France; Melbourne, Australia: Geopolymer Institute.
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer chemistry and applications*. Institut Géopolymère, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France. ISBN 2-951-14820-1-9.
- Davidovits, J., & Morris, M. (2009). *Why the pharaohs built the Pyramids with fake stones*. Institut Géopolymère.
- Davidovits, J. (2013). Geopolymer cement. *A review*. Geopolymer Institute, *Technical papers*, 21, 1-11.
- Davidovits, J. (2015). False values on CO2 emission for geopolymer cement/concrete published in scientific papers. *Technical paper*, 24, 1-9.
- Dias, D. P., & Thaumaturgo, C. (2005). Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers. *Cement and concrete composites*, 27(1), 49-54.

- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*, 42(9), 2917-2933..
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., Separovic, F., & van Deventer, J. S. (2005). ²⁹Si NMR study of structural ordering in aluminosilicate geopolymer gels. *Langmuir*, 21(7), 3028-3036.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., & Criado, M. (2005). Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. *Cement and concrete research*, 35(6), 1204-1209.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Sobrados, I., & Sanz, J. (2006). The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. *Microporous and Mesoporous materials*, 91(1-3), 111-119.
- Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G., & Valenza, A. (2015). A review on basalt fibre and its composites. *Composites Part B: Engineering*, 74, 74-94.
- Gourley, J. T. (2003, October). Geopolymers; opportunities for environmentally friendly construction materials. In *Materials 2003 Conference: Adaptive Materials for a Modern Society*, Sydney, Institute of Materials Engineering Australia.
- Gourley, J. T., & Johnson, G. B. (2005, June). Developments in geopolymer precast concrete. In *World congress geopolymer* (pp. 139-143). Geopolymer Institute Saint-Quentin, France.
- He, P., Jia, D., & Wang, S. (2013). Microstructure and integrity of leucite ceramic derived from potassium-based geopolymer precursor. *Journal of the European Ceramic Society*, 33(4), 689-698.
- He, P., Jia, D., & Wang, S. (2013). Microstructure and integrity of leucite ceramic derived from potassium-based geopolymer precursor. *Journal of the European Ceramic Society*, 33(4), 689-698.
- Huajun, Z., & Xiao, Y. (2013). Effect of retarder on reaction process of metakaolin-slag-based geopolymer. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 48(3), 1384-1390.

- Hüseyin, D. A. L., & MORGÜL, Ö. K. Using of CelluBOR on Noise Enclosures.
- Karadayı, T. T., & Yüksek, İ. (2016). Yapılarda Isı Yalıtım Malzemeleri Seçimi Üzerine Bir Araştırma. *Tesisat dergisi*, 242, 90-102.
- Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of materials science*, 42(3), 729-746.
- Komnitsas, K., & Zaharaki, D. (2007). Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. *Minerals engineering*, 20(14), 1261-1277.
- Kong, D. L., & Sanjayan, J. G. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and concrete research*, 40(2), 334-339.
- Lloyd, N., & Rangan, V. (2009). Geopolymer concrete-sustainable cementless concrete. In *Proceedings of Tenth ACI International Conference* (pp. 33-53). American Concrete Institute.
- Luga, E. (2015). *Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Jeopolimer Harçların Özellikleri* (Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri).
- Mackenzie, K. J. D., & Welter, M. (2014). Geopolymer (aluminosilicate) composites: synthesis, properties and applications. In *Advances in ceramic matrix composites* (pp. 545-568). Woodhead Publishing.
- Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and concrete composites*, 31(8), 601-605.
- Oelkers, E. H., Schott, J., & Devidal, J. L. (1994). The effect of aluminum, pH, and chemical affinity on the rates of aluminosilicate dissolution reactions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(9), 2011-2024.
- Part, W. K., Ramli, M., & Cheah, C. B. (2015). An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 77, 370-395.
- Petermann, J. C., Saeed, A., & Hammons, M. I. (2010). Alkali-activated geopolymers: a literature review.

- Provis, J. L., Lukey, G. C., & van Deventer, J. S. (2005). Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results. *Chemistry of materials*, 17(12), 3075-3085.
- Prud'Homme, E., Michaud, P., Joussein, E., Clacens, J. M., Aii-Clacens, S., Sobrados, I., ... & Rossignol, S. (2011). Structural characterization of geomaterial foams— Thermal behavior. *Journal of non-crystalline solids*, 357(21), 3637-3647.
- Qi, X., Peng, X., Xu, G., Huang, T., & He, F. (2009). Development of ultra-thick and geopolymeric fire-proofing coating for steel structure. *New Build. Mater*, 36(12), 5-8.
- Rahier, H., Wastiels, J., Biesemans, M., Willem, R., Van Assche, G., & Van Mele, B. (2007). Reaction mechanism, kinetics and high temperature transformations of geopolymers. *Journal of materials science*, 42(9), 2982-2996.
- Rangan, B. V. (2008). Fly ash-based geopolymer concrete.
- Rangan, B. V., Hardjito, D., Wallah, S. E., & Sumajouw, D. M. (2006). Properties and applications of fly ash-based concrete. In *Materials forum* (Vol. 30, pp. 170-175).
- Rees, C. A., Provis, J. L., Lukey, G. C., & Van Deventer, J. S. (2008). The mechanism of geopolymer gel formation investigated through seeded nucleation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 318(1-3), 97-105.
- Rickard, W. D., Riessen, A. V., & Walls, P. (2010). Thermal character of geopolymers synthesized from class F fly ash containing high concentrations of iron and α -quartz. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 7(1), 81-88.
- Sarker, P. K., Haque, R., & Ramgolam, K. V. (2013). Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymer concrete. *Materials & Design*, 44, 580-586.
- Sim, J., & Park, C. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, 36(6-7), 504-512.
- Song, S., Sohn, D., Jennings, H. M., & Mason, T. O. (2000). Hydration of alkali-activated ground granulated blast furnace slag. *Journal of materials science*, 35(1), 249-257.
- Tevrizci, M. M. (2010). *Metakaolin katkılı harçların bazı durabilite özelliklerinin incelenmesi* (Doctoral dissertation, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).

- Terzano, R., Spagnuolo, M., Medici, L., Tateo, F., & Ruggiero, P. (2005). Characterization of different coal fly ashes for their application in the synthesis of zeolite X as cation exchanger for soil remediation. *Fresenius Environmental Bulletin*, 14(4), 263-267.
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., & Schwartzman, A. (1999). The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part II. Material and leaching characteristics. *Minerals Engineering*, 12(1), 75-91.
- Varaprasad, B. S. K. R. J., & Reddy, K. N. K. (2010). Strength and workability of low lime fly-ash based geopolymer concrete. *Indian Journal of Science and Technology*, 3(12).
- Vu, D. D. (2004). Strength properties of metakaolin-blended paste, mortar and concrete.
- Wu, B., Duan, J., & Wen, B. (2014). Preparations of new fireproof coating and fire-resistance tests on composite slabs filled with demolished concrete blocks and fresh concrete. *China Civ. Eng. J*, 47, 82-92.
- Yan, L., Kasal, B., & Huang, L. (2016). A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. *Composites Part B: Engineering*, 92, 94-132.
- Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H., & Chen, Y. (2009). Geopolymerization process of alkali-metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta*, 493(1-2), 49-54.
- Zhang, Z., Yao, X., & Zhu, H. (2010). Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete: II. Microstructure and anticorrosion mechanism. *Applied clay science*, 49(1-2), 7-12.
- Zhang, Z., Yao, X., & Wang, H. (2012). Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete III. Field experiment. *Applied Clay Science*, 67, 57-60.

