



**İSKENDERUN TEKNİK**

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**SÜPER EMİCİ MALZEME  
KULLANILARAK ÜRETİLEN  
ALKALİLERLE AKTİVE  
EDİLMİŞ CÜRUFU HARÇLARIN  
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Büşra Sinem GENÇ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

OCAK 2023





**SÜPER EMİCİ MALZEME KULLANILARAK ÜRETİLEN ALKALİLERLE  
AKTİVE EDİLMİŞ CÜRUFU HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Büşra Sinem GENÇ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2023**

Büşra Sinem GENÇ tarafından hazırlanan “SÜPER EMİCİ MALZEME KULLANILARAK ÜRETİLEN ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ CÜRUFU HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....  
.....

**Başkan:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....  
.....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....  
.....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....  
.....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....  
.....

Tez Savunma Tarihi: ...../...../...

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
  - 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 beyan ederim.

İmza

Büşra Sinem GENÇ

...../...../.....

SÜPER EMİCİ MALZEME KULLANILARAK ÜRETİLEN ALKALİLERLE AKTİVE  
EDİLMİŞ CÜRUFU HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Büşra Sinem GENÇ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Günümüzde Portland çimentosunun ekonomik ve çevresel açıdan oluşturduğu tahribat göz önüne alındığında, alternatif nitelikte olan geopolimer harçlara ilgi giderek artmaktadır. İskenderun bölgesindeki demir-çelik fabrikalarında demir üretimi sırasında çeşitli yan ürünler oluşmaktadır. Tez çalışmasında yan ürünlerden biri olan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC) alkalilerle aktifleştirilerek geopolimer harçlar hazırlanmış ve ilave su kaynağı olan sodyum poliakrilat katkısı eklenerek üretilen numunelerin mekanik, geçirimsizlik ve kimyasal etkilere karşı direnci incelenmiştir. Çalışmada ASTM C109 standartına uygun olarak belirlenen cüruf/agrega/çözelti oranı ile %6 sodyum konsantrasyon ve 1,5 silikat modülü ile hazırlanan geopolimer harçlara, 50 gr süper emici polimer (SEP) eklenerek karışımlar hazırlanmıştır. Karışım tasarımında kür süresi, kür yöntemi, SEP'in hazırlanma yöntemi (SEP-1, SEP-2) ve karışım suyu sıcaklığı deney değişkenleri olarak belirlenmiştir. 40x40x160 mm kalıplarda SEP katkılı ve katkısız 6 çeşit karışım hazırlanmıştır. Çalışmada numunelere ortam, etüv ve 1, 7, 28 gün sıvı (su ve çözelti) içerisinde kür yöntemleri uygulanmıştır. Farklı kürlerde bekletilen numunelerin SEP katkısı sonucu oluşturduğu boşluklu yapı, boşluklar arasındaki bağlantı ve buna bağlı olarak geçirimsizlik özelliklerinin incelenmesi amacıyla birim ağırlık, su emme, mevcut su durumu, kapillarite vb. testler uygulanmıştır. 28, 56 ve 90 gün ortam şartlarında bekletilen numunelere eğilme, basınç, ultrasonik dalga hızı, rezonans frekansı, karbonatlaşma, ıslanma-kuruma deneyleri yapılmıştır. Ayrıca %5 oranında sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) ve sodyum sülfat ( $Na_2SO_4$ ) kullanılarak 1 ay süre ile asit ve sülfat dirençleri deneyleri yapılmış ve veriler incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarını kıyaslamak amacıyla ayrıca korelasyon katsayısı kullanılarak istatistiksel analiz verileri oluşturulmuştur. Sonuçlara göre, C ve D numunelerinin yapılan testlerde daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. SEP içerisine su yerine alkali aktivatör çözeltisi eklenerek jel kıvamına getirilen bu karışımların, ayrıca kür koşullarında hazırlanan çözelti içerisinde bekletilmesinin harcın yoğunluğunu arttırarak gözenekliliği azalttığı görülmüştür. Cürufun aktivasyon sürecinde içten kürlenme yaparak ilave aktivatör katkısı sağlanması ile hem dayanım hemde kimyasal dayanıklılık açısından olumlu katkılar sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Süper emici poliakrilat, İçten kürlenme, Cüruf, Alkali aktivatör, Harç, Geopolimer

Sayfa Adedi : 151

Danışman : Prof. Dr. Umur Korkut SEVİM

INVESTIGATION OF ALKALI ACTIVATED SLAG MORTAR PROPERTIES OF  
PRODUCED USING SUPER ABSORBENT MATERIALS

(M. Sc. Thesis)

Büşra Sinem GENÇ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

January 2023

ABSTRACT

Considering the economic and environmental damage caused by Portland cement, interest in alternative geopolymer mortars is increasing day by day. Various by-products are formed during iron production in iron and steel factories in the Iskenderun region. In the thesis study, geopolymer mortars were prepared by activating ground granulated blast furnace slag (OGYFC), one of the by-products, with alkalis, and the mechanical, permeability and resistance to chemical effects of the samples produced by adding sodium polyacrylate, which is an additional water source, were investigated. In the study, mixtures were prepared by adding 50 gr super absorbent polymer (SAP) to geopolymer mortars prepared with slag/aggregate/solution ratio determined in accordance with ASTM 109C standard, 6% sodium concentration and 1,5 silicate modulus. Curing time, curing method, SAP solution method (SAP-1, SAP-2) and mixing water temperature were determined as experimental variables in the mixture design. 6 kinds of mixtures with and without SAP additives were prepared in 40x40x160 mm molds. In the study, curing methods were applied to the samples in medium, oven and liquid (water and alkaline solution) for 1, 7, 28 days. In order to examine the porous structure, the connection between the voids and the permeability properties of the samples, which are kept in different cures as a result of the SAP additive, unit weight, water absorption, current water condition, capillarity etc. tests were applied. Bending, pressure, ultrasonic wave velocity, resonance frequency, carbonation, wetting-drying tests were performed on the samples, which were kept under ambient conditions for 28, 56 and 90 days. In addition, 5% sulfuric acid ( $H_2SO_4$ ) and sodium sulphate ( $Na_2SO_4$ ) were used for 1 month acid and sulfate resistance tests and the data were analyzed. In order to compare the experimental results obtained, statistical analysis data were also created by using the correlation coefficient. According to the results, it was observed that the C and D samples gave better results in the tests. Instead of water, into the SAP, also keeping the mortar in the solution prepared under curing conditions reduces the porosity by increasing the density of the mortar.

Key Words : Super absorbent polyacrylate, Internal curing, Slag, Alkaline activator, Mortar, Geopolymer  
Page Number : 151  
Supervisor : Prof. Dr. Umur Korkut SEVİM

## TEŞEKKÜR

Tez çalışma sürecimde bana bilgisi ve birikimleri ile her konuda yol gösteren, tez konumun belirlenmesinde, araştırmasında ve yazım sürecinde yardımlarını esirgemeyen, tüm sorularıma sabırla cevap veren ve her türlü desteği sağlayan, kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Umur Korkut SEVİM'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Tez ve makale çalışmam esnasında desteğini ve ilgisini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini paylaşarak takıldığım tüm noktalarda beni çözüme ulaştıran, çalışmalarından örnek aldığım saygıdeğer hocam Arş. Gör. Dr. Müzeyyen BALÇIKANLI BANKİR'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım. Özellikle laboratuvar çalışmalarım sırasındaki bana yardımcı olan sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Murat ÖZTÜRK'e ve yüksek lisans eğitimi aldığım süre içerisinde bilgilerini paylaşan, değerli tüm hocalarıma teşekkür ederim. Deneyler sırasında bana yardımcı olan diğer arkadaşlarıma teşekkür ederim. Aynı zamanda bilgi birikimleri ile bana destek olan sayın meslek büyüklerim Hakan USLU'ya ve Nimi BERBEROĞLU'na da teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Beni bu günlere getiren; her konuda beni destekleyen, hayatta aldığım kararlarda her koşulda maddi ve manevi olarak yanımda olan, en büyük destekçilerim sevgili Annem Selma Genç ve Babam Mimar Recep Genç'e, tez sürecinde yardımları ile beni destekleyen ve tüm süreçte birlikte güzel zamanlar geçirdiğimiz Ablam Mimar Merve Gizem GENÇ'e ve eşi Gemi Mühendisi Hayrettin DEMİRHAN'a sonsuz sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçların, konuyla ilgili yapılacak diğer çalışmalara yardımcı olmasını dilerim.

Büşra Sinem GENÇ  
İnşaat Mühendisi

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....	xiv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xvi
1.GİRİŞ.....	19
1.1.Yan ürün oluşumu ve geri dönüşüm .....	21
1.2.Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu.....	25
1.3.Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun hidrasyonu.....	27
1.4.Geopolimerlerin yapısı.....	28
1.5.Cürufun alkali aktivasyonu .....	29
1.6.Sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).....	31
1.7.Sodyum hidroksit (NaOH) .....	31
1.8.Süper emici polimer (Sodyum poliakrilat).....	32
2.LİTERATÜR ÇALIŞMASI .....	35
3.MATERYAL VE YÖNTEM .....	47
3.1.Ön Çalışma Karışım Tasarımı.....	47
3.2.Malzemeler ve Özellikleri.....	49
3.2.1. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC).....	49
3.2.2. Agrega .....	49
3.2.3. Su .....	50
3.2.4. Alkali aktivatörler .....	51
3.2.5. Sodyum poliakrilat ( $\text{C}_3\text{H}_3\text{NaO}_2$ ) <sub>n</sub> .....	52



3.3.Deney Tasarımı .....	53
3.4.Deney Yöntemleri .....	59
3.4.1. Yayılma tablası deneyi.....	59
3.4.2. Birim hacim ağırlık deneyi .....	60
3.4.3. Su emme kapasitesi.....	60
3.4.4. Mevcut su durumu .....	61
3.4.5. Kılcal su emme deneyi.....	62
3.4.6. Eğilme dayanımı .....	64
3.4.7. Basınç dayanımı .....	65
3.4.8. Ultrasonik dalga hızı (UDH).....	65
3.4.9. Rezonans Frekansı (RF).....	67
3.4.10. Islanma-kuruma .....	67
3.4.11. Asit direnci deneyi.....	68
3.4.12. Sülfat direnci deneyi.....	69
3.4.13. Karbonatlaşma derinliği .....	70
4.ARAŞTIRMA BULGULARI .....	72
4.1.Ön çalışmaya ait araştırma bulguları.....	73
4.2.Araştırma Bulguları.....	79
4.2.1. Yayılma tablası deneyi.....	79
4.2.2. Birim hacim ağırlık .....	80
4.2.3. Su emme kapasitesi.....	92
4.2.4. Mevcut su durumu .....	96
4.2.5. Kılcal su emme (Kapilarite).....	101
4.2.6. Eğilme dayanımı .....	105
4.2.7. Basınç dayanımı .....	108
4.2.8. Ultrasonik dalga hızı (UDH).....	111

**Sayfa**

4.2.9. Rezonans frekansı (RF).....	113
4.2.10. Islanma-kuruma .....	116
4.2.11. Asit direnci deneyi.....	119
4.2.12. Sülfat direnci deneyi.....	120
4.2.13. Karbonatlaşma derinliği .....	122
4.3. DeneY Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	125
4.3.1. Su emme-basınç dayanımı ilişkisi.....	126
4.3.2. Eğilme-basınç dayanımı ilişkisi.....	128
4.3.3. Ultrasonik dalga hızı-basınç dayanımı ilişkisi.....	130
4.3.4. Asit-sülfat dirençlerinin karşılaştırılması.....	131
4.3.5. Kılcal su emme katsayısı-su emme oranı ilişkisi .....	132
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	135
5.1. Sonuçlar.....	135
5.2. Öneriler.....	141
KAYNAKLAR.....	142
DİZİN .....	151

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 1. 1. Farklı ülkelere ait YFC kimyasal kompozisyonu .....	26
Çizelge 1. 2. Alkalilerle aktive edilmiş cürufların avantaj ve dezavantajları .....	30
Çizelge 3. 1. Çalışmada kullanılan karışım oranı (1 dm <sup>3</sup> için) .....	47
Çizelge 3. 2. Ön çalışmada uygulanan karışım tasarımı ( 1 dm <sup>3</sup> için karışım oranları ).....	48
Çizelge 3. 3. Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu.....	49
Çizelge 3. 4. İnce agreganın elekten geçme oranları (%) .....	50
Çizelge 3. 5. Sodyum hidroksit kimyasal kompozisyonu.....	51
Çizelge 3. 6. Sodyum silikat kimyasal kompozisyonu .....	52
Çizelge 3. 7. Sodyum poliakrilat kimyasal kompozisyonu.....	53
Çizelge 3. 8. Deney tasarımında kullanılan numune kodları .....	54
Çizelge 3. 9. B, D, F numunelerine ait karışım sıcaklık dereceleri .....	56
Çizelge 3. 10. Çalışmada uygulanan deney tasarımı .....	58
Çizelge 3. 11. Ultrasonik ses hızı değerlerinin harçların kalitesi ile ilişkisi.....	66
Çizelge 4. 1. A, B, C, D, E, F taze harç numunelerinin kıvam sonuçları.....	79
Çizelge 4. 2. Grafiklerde gösterilen numunelere ait kısaltmaların açıklaması .....	79
Çizelge 4. 3. Min. ve max. kuru birim hacim ağırlıklarına sahip A, B, C, D numuneleri ....	83
Çizelge 4. 4. Min. ve max. kuru birim hacim ağırlıklarına sahip IK numuneleri.....	85
Çizelge 4. 5. Min. ve max. kuru birim hacim ağırlıklarına sahip asit-sülfat numuneleri ....	86
Çizelge 4. 6. Min. ve max. doygun birim hacim ağırlıklarına sahip numuneler .....	87
Çizelge 4. 7. Min. ve max. doygun birim hacim ağırlıklarına sahip IK numuneleri .....	90
Çizelge 4. 8. Asit- sülfat numunelerinin min-max doygun birim hacim ağırlıkları .....	91
Çizelge 4. 9. Karışımların 28, 56, 90 günlük su emme oranları (%) .....	94
Çizelge 4. 10. A,B,C,D numunelerine ait min ve max mevcut su durumu yüzdeleri.....	99
Çizelge 4. 11. En düşük kılcal su emme katsayısına sahip olan numuneler .....	103
Çizelge 4. 12. 28, 56, 90 günlük kılcal su emme katsayıları .....	104
Çizelge 4. 13. En yüksek eğilme dayanımına sahip A, B, C, D numune değerleri .....	108
Çizelge 4. 14. En yüksek basınç dayanımına sahip A, B, C, D numune değerleri .....	111
Çizelge 4. 15. 28, 56, 90 günlük ultrases dalga hızı değerleri .....	112
Çizelge 4. 16. Numunelerin 28 ve 56 günlük rezonans frekansları .....	114
Çizelge 4. 17. En düşük karbonatlaşma derinliğine sahip olan A, B, C, D numuneleri ....	123

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4. 18. Karbonatlaşmanın en çok ve en az görüldüğü numuneler.....	124
Çizelge 4. 19. Korelasyon katsayı aralığı ve ilişki düzeyi.....	126



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1. 1. Demir-çelik endüstrisi genel üretim aşamaları .....	22
Şekil 1. 2. Yüksek fırın cürufu üretim akış şeması .....	23
Şekil 1. 3. YFC'nin granülasyon yöntemi ile soğutulma işlemi .....	24
Şekil 1. 4. YFC'nin peletleme yöntemi ile soğutulma yöntemi .....	24
Şekil 1. 5. ABD'de cürufların kullanım alanları .....	25
Şekil 1. 6. Cürufun camsı yapısının şematik açıklaması .....	26
Şekil 1. 7. Geopolimerlerin kimyasal yapısı .....	29
Şekil 1. 8. Alkaliler ile aktifleştirilen yüksek fırın cürufunun reaksiyon aşamaları .....	31
Şekil 1.9. Sodyum poliakrilat kimyasal yapısı .....	32
Şekil 1. 10. Sodyum poliakrilatın su ile tepkimesi. ....	33
Şekil 1. 11. Sodyum poliakrilat'ın bünyesine almış olduğu su sonucu hacimsel değişimi .33	33
Şekil 3. 1. Agrega tane dağılımı eğrisi.....	50
Şekil 3. 2. Agrega tane dağılımı.....	50
Şekil 3. 3. SEP'in su ile etkileşimi.....	53
Şekil 3. 4. Deney numunelerinin üretim süreci.....	56
Şekil 3. 5. A, B, C, D, E, F numunelerinin işlenebilirliklerinin kıyaslanması.....	59
Şekil 3. 6. Numunelere su ve etüv uygulaması.....	61
Şekil 3. 7. Kapilarite deney düzeneği ve zaman içerisindeki su emme miktarı gösterimi .63	63
Şekil 3. 8. 6 saatlik deney sonrası bazı numunelerin kılcal su emme miktarları .....	63
Şekil 3. 9. 3 noktalı eğilme dayanım testi.....	64
Şekil 3. 10. Basınç dayanımı deney düzeneği.....	65
Şekil 3. 11. Ultrasonik dalga hızı deney düzeneği.....	66
Şekil 3. 12. Rezonans frekansı ölçüm düzeneği .....	67
Şekil 3. 13. 30 gün asit tankında bekletilen numuneler .....	68
Şekil 3. 14. Asite maruz kalan numuneler .....	69
Şekil 3. 15. 30 gün sülfat tankında bekletilen numuneler.....	70
Şekil 3. 16. Sülfat numunelerinin yüzeyinde oluşan beyaz tortular .....	70
Şekil 3. 17. Karbonatlaşma derinliği ölçümü.....	71
Şekil 4. 1. Ön çalışmaya ait yayılma çapı değerleri .....	73
Şekil 4. 2. Ön çalışmaya ait su emme miktarları .....	74

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4. 3. Ön çalışmaya ait eğilme dayanımı grafiği .....	75
Şekil 4. 4. Ön çalışmaya ait basınç dayanımı grafiği.....	76
Şekil 4. 5. Ön çalışmaya ait eğilme-basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	77
Şekil 4. 6. Ön çalışmaya ait su emme-basınç dayanımı arasındaki ilişki .....	77
Şekil 4. 7. A, B, C, D, E, F taze harç numunelerinin kıvam grafiği .....	80
Şekil 4. 8. 28 günlük kuru birim hacim ağırlık grafiği .....	81
Şekil 4. 9. 56 günlük kuru birim hacim ağırlık grafiği .....	81
Şekil 4. 10. 90 günlük kuru birim hacim ağırlık grafiği .....	82
Şekil 4. 11. Islanma-kuruma numunelerinin kuru birim hacim ağırlık grafiği.....	84
Şekil 4. 12. Asit-sülfat numunelerinin kuru birim hacim ağırlık grafiği .....	85
Şekil 4. 13. 28 günlük doymuş birim hacim ağırlık grafiği.....	88
Şekil 4. 14. 56 günlük doymuş birim hacim ağırlık grafiği.....	89
Şekil 4. 15. 90 günlük doymuş birim hacim ağırlık grafiği.....	89
Şekil 4. 16. Islanma-kuruma numunelerine ait doymuş birim hacim ağırlık grafiği.....	90
Şekil 4. 17. Asit-sülfat numunelerine ait doymuş birim hacim ağırlık grafiği.....	91
Şekil 4. 18. 28 günlük numunelerin su emme oranları .....	93
Şekil 4. 19. 56 günlük numunelerin su emme oranları .....	93
Şekil 4. 20. 90 günlük numunelerin su emme oranları .....	93
Şekil 4. 21. Islanma-kuruma numunelerin su emme oranları .....	96
Şekil 4. 22. Asit-sülfat numunelerin su emme oranları .....	96
Şekil 4. 23. 28 günlük mevcut su durumu grafiği.....	98
Şekil 4. 24. 56 günlük mevcut su durumu grafiği.....	98
Şekil 4. 25. 90 günlük mevcut su durumu grafiği.....	98
Şekil 4. 26. Islanma-kuruma numunelerin mevcut su durumları.....	100
Şekil 4. 27. 28 günlük numuneler ile ıslanma-kuruma numuneleri arasındaki ilişki .....	101
Şekil 4. 28. Asit-sülfat numunelerin mevcut su durumları .....	101
Şekil 4. 29. 28, 56 ve 90 günlük kılcal su emme katsayıları.....	104
Şekil 4. 30. 28, 56, 90 günlük eğilme dayanımları .....	106
Şekil 4. 31. 28, 56, 90 günlük basınç dayanımları.....	109
Şekil 4. 32. Numunelerin 28, 56, 90 günlük ultrasonik dalga hızları .....	112
Şekil 4. 33. 28 ve 56 günlük rezonans frekans değerleri .....	116
Şekil 4. 34. Islanma kuruma numunelerinin eğilme dayanımı ile kütle kaybı ilişkisi.....	118

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4. 35. Islanma kuruma numunelerinin basınç dayanımı ile kütle kaybı ilişkisi .....	118
Şekil 4. 36. Islanma-kuruma deneyinde basınç dayanımı- ultrases dalga hızı ilişkisi.....	119
Şekil 4. 37. Asit etkisindeki A,B,C,D,E,F numunelerinin ağırlık ve basınç değişimleri...	120
Şekil 4. 38. Sülfat etkisindeki A,B,C,D,E,F numunelerinin ağırlık ve basınç değişimleri	121
Şekil 4. 39. 28 günlük karbonatlaşma derinlikleri .....	124
Şekil 4. 40. 56 günlük karbonatlaşma derinlikleri .....	124
Şekil 4. 41. 90 günlük karbonatlaşma derinlikleri .....	125
Şekil 4. 42. Islanma-kuruma karbonatlaşma derinlikleri .....	125
Şekil 4. 43. 28 günlük basınç dayanımları ile su emme oranları arasındaki ilişkisi .....	127
Şekil 4. 44. 56 günlük basınç dayanımları ile su emme oranları arasındaki ilişkisi .....	127
Şekil 4. 45. 90 günlük basınç dayanımları ile su emme oranları arasındaki ilişkisi .....	128
Şekil 4. 46. 28 günlük eğilme-basınç dayanımları arasındaki ilişkisi.....	129
Şekil 4. 47. 56 günlük eğilme-basınç dayanımları arasındaki ilişkisi.....	129
Şekil 4. 48. 90 günlük eğilme-basınç dayanımları arasındaki ilişkisi.....	130
Şekil 4. 49. Ultrasonik dalga hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki .....	130
Şekil 4. 50. Asit ve sülfat korelasyon eğrisi.....	131
Şekil 4. 51. Asit ve sülfat etkisindeki numunelerinin basınç dayanımları.....	132
Şekil 4. 52. 28 günlük su emme ile kılcal su emme arasındaki ilişkisi.....	133
Şekil 4. 53. 56 günlük su emme ile kılcal su emme arasındaki ilişkisi.....	133
Şekil 4. 54. 90 günlük su emme ile kılcal su emme arasındaki ilişkisi.....	134

## 1. GİRİŞ

Beton üretimi amacıyla, inşaat sektöründe en yaygın şekilde kullanılan malzeme çimentodur. Artan nüfus ve kentleşme sebebiyle çimentoya daha çok ihtiyaç duyulmakta ve günden güne talep artmaktadır. Bu üretim ihtiyacının artması günümüzde çimentonunun, çevresel faktörler ele alındığında en çok tartışılan ve araştırılan konular arasında yer almasına neden olmuştur. Çevre kirliliği, CO<sub>2</sub> salınımının arttırması ve insan sağlığına karşı olumsuz etkileri nedeniyle, çimentoya alternatif olarak kullanılacak malzeme arayışı artmaya başlamıştır. 2018 verilerine göre; çimento sektörü %7'lik oran ile 3. sırada endüstriyel enerji kullanımına neden olmuş ve %27'lik bir oran ile endüstriyel CO<sub>2</sub> emisyonlarında salınım oranıyla dünya çapında 2. sırada yer aldığı açıklanmıştır (International Energy Agency (IEA), 2018). Bu etkiler göz önüne alındığında yapılan çalışmalarda çimento kullanımının azaltılması, dış etkilere karşı dayanım etkilerini arttırmak ve daha ekonomik çözümler elde etmek amacıyla geopolimer beton ve harç üretimi önemli bir yere sahiptir. Puzolanik etkiye sahip olan cüruf, silis dumanı, uçucu kül vb. gibi atık malzemeler çimento ile beraber veya alkali aktivatörler kullanılarak bağlayıcılık özelliği kazanması sonucunda tek başlarına kullanılmaktadır.

Mineral katkı malzemelerinin artan talebi karşılamadaki yeri önemli şekilde artmış ve araştırmalara dahil edilmiştir. Davidovits 1991'de geopolimer kavramını, yarı kristal veya amorf yapıda olabilen, alümino-silikat esaslı inorganik polimerlerin alkali çözeltiler ile reaksiyonu sonucunda oluşan malzeme şeklinde açıklamıştır. Bu kavram yan ürün kullanımı ile sürdürülebilir, çevre dostu ve ekonomik kavramlar başlığında ele alınmaktadır. Sanayi sektöründe ham madde üretimleri sırasında oluşan yan ürünlerin değerlendirilmesi sonucu geopolimer beton ve harçlar elde edilir. Geopolimerizasyon reaksiyonu için kullanılan alkali aktivatörler ( Na<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, NaOH, KOH) ile cüruf, uçucu kül vs. gibi katı alüminasilikat oksitlerin bağlayıcılık özelliği kazanmasında temel katkılarıdır.

Demir-çelik sanayisinde yan ürün olarak elde edilen cürufun geri dönüştürülmesi önemli bir konudur. Cüruflar farklı üretim proseslerine göre elde edilen ürüne bağlı olarak çeşitli şekilde sınıflandırılmaktadır. Oluşan cürufun büyük bir kısmını yüksek fırın cürufu ile çelik cürufu içerse de bunlar dışında alaşımlı çelik ve ferro alyaj cürufu da yer almaktadır



(Öcal, 2014). 2018 verilerinde Avrupa’da cüruf üretiminin 25,2 milyon ton olduğu belirtilmiştir (Euroslag, 2018). Kullanılmayan cüruf atıkları çevresel riskler taşımakta ve gün geçtikçe atık yığınları artmaktadır. 2012 yılında Avrupa Cüruf birliği tarafından YFC’nin %66 oranında çimento üretiminde ve beton katkı malzemesi olarak, %23 oranında ise yol temel ve alt temel ile dolgu malzemesi gibi alanlarda kullanıldığı açıklanmıştır (Euroslag, 2014). Cüruf katkılı geopolimer harçlar ile yapılan çalışmalarda; klorlu su, deniz suyu, sülfatlı sularda ve asit etkisi gibi zararlı kimyasallara maruz kaldıklarında daha yüksek dayanıluluk özellikleri gösterdikleri bununla birlikte maliyet açısından avantaj sağlaması, yangına karşı dayanıklılık, düşük büzülme gibi önemli avantajlarının olması geopolimer malzemelerin günümüzdeki gelişimine neden olmuştur. Ancak geopolimer harçlarda kullanım ve geri dönüşüm alanlarını genişletmek, oluşan mikro çatlak ve büzülmelere karşı etkilerini arttırmak amacıyla çalışmalar devam etmektedir.

Yüksek fırın cürufu katkılı geopolimer harçlar kullanılarak sürdürülebilir ve enerji tasarrufu sağlayacak çözümler üretmek için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan ön çalışmada sürdürülebilir geopolimer beton kavramı ele alınarak su emme kabiliyeti yüksek boşluklu harç üretmek amacıyla sodyum poliakrilat kullanılmıştır. İçten küremeye katkı sağlayan SEP bünyesine kendi ağırlığının 100-200 katı su alarak şişebilen bir malzemedir. Belirli oranlarda SEP katkısı ile çalışılan deneyde su emme miktarı yüksek boşluklu yapıya sahip ve dayanım özellikleri açısından iyi performans gösteren deney karışımı elde edilmiştir.

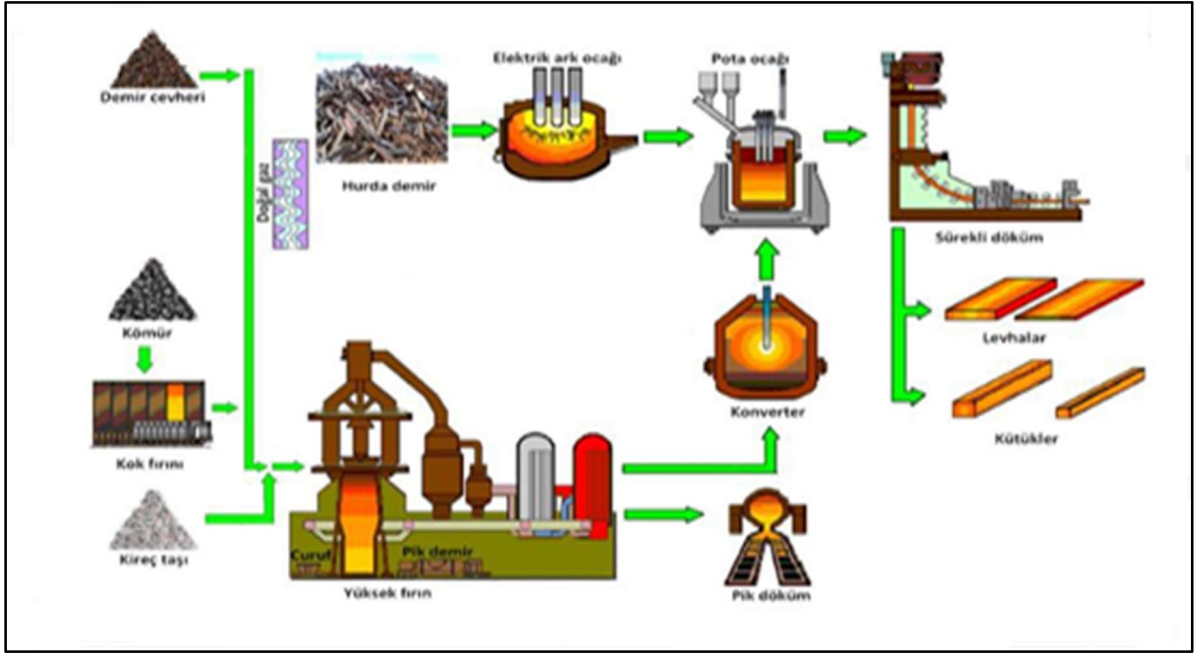
Bu tez çalışmasında; sodyum poliakrilat malzemesi kullanılarak geopolimer harçlar içerisinde çatlak kontrolünü sağlamak, boşluklu bir yapı oluşturan SEP katkısının mekanik ve kimyasal etkilere karşı davranışını incelemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Daha önce yapılan ön çalışma verileri referans alınarak 50 gr SEP katkılı yüksek fırın cürufu harçlar NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> ile aktive edilerek hazırlanmıştır. 23 ve 100 °C karışım suyu sıcaklığı ve SEP’ye su ve alkali çözelti eklenerek 6 farklı karışım hazırlanmıştır. A, B, C, D olarak adlandırılan SEP katkılı numunelerde sodyum poliakrilata su (SEP-1) ve alkali çözelti (SEP-2) emdirilerek şişmesi sağlanmış ardından karışımlara eklenmiştir. E ve F numuneleri ise referans numunesi olarak belirlenmiştir. 40x40x160 mm boyutlarında hazırlanan numuneler ortam ve etüv şartlarında ve 1, 7, 28 gün su ve çözelti havuzlarında

kür edilmiştir. Kür sürelerini tamamlayan numuneler 28, 56, 90 gün boyunca ortamda bekletilmelerinin ardından sıcaklık etkileri, SEP davranışı, ultrases hızları, rezonans frekansları, kılcal su emme, eğilme ve dayanım etkilerinin yanı sıra, asit, sülfat ve ıslanma-kurumaya karşı davranışları gözlemlenmiştir.

### **1.1. Yan ürün oluşumu ve geri dönüşüm**

Demir-çelik endüstrisinde ham madde üretimi aşamasında farklı kalite ve özellikte çeşitli yan ürünler oluşmaktadır. Küresel olarak demir üretiminin artmasıyla beraber yüksek oranda oluşan yan ürünlerin geri dönüşüm süreci çevresel faktörler, doğal kaynak tüketiminin korunması, enerji tüketimi ve maliyet konuları göz önüne alındığında konuyla ilgili çözüm yollarının aranması büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla araştırmacılar endüstriyel atık yönetimi açısından pek çok çalışma yapmakta, oluşan atıkların sürdürülebilirlik, ekonomik ve çevresel boyutunu incelemektedir. Demir-çelik endüstrisinde yan ürünlerinin geri dönüştürülmesi, malzeme verimliliği açısından dünya çapında %97,5'lik oranda bir katkıya sahiptir (World Steel Association, 2018). Bu süreçte birçok alanda kullanılan çelik, demir cevherine bağlı olarak, işlenmemiş halde bulunmaktadır. Demir-çelik sanayisinde farklı üretim prosesleri uygulanmaktadır. Bu üretim prosesleri Şekil 1.1'de gösterilmektedir. Bunlar (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017) ;

- 1- Yüksek fırınlar
- 2- Bazık oksijen fırını
- 3- Elektrik ark ocağı
- 4- Elektrik ark ocağı doğrudan indirgeme
- 5- Elektrik ark ocağı ergitme indirgenmesi şeklindedir.

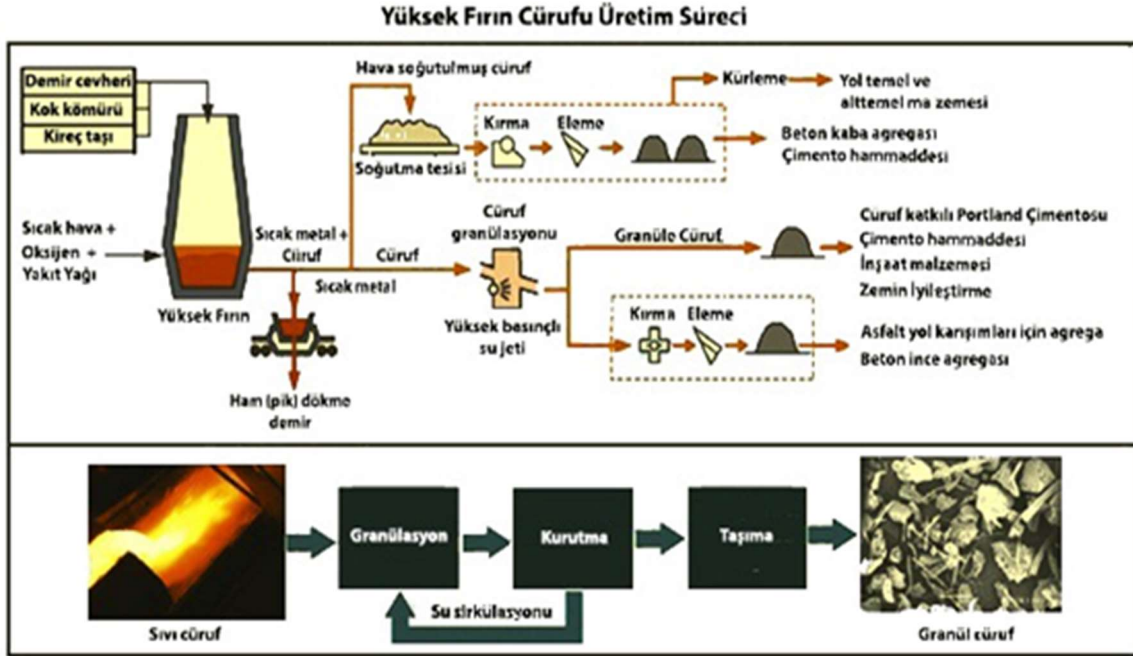


Şekil 1. 1. Demir-çelik endüstrisi genel üretim aşamaları (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2020)

Pik demir üretimi yüksek fırınların içerisinde demir cevheri, katkı maddeleri, yakıt ve hava katılarak yapılmaktadır. Ham demir içerisinde %90-95 arası demirin yanı sıra %3,0-4,5 arası karbon, % 0,7-3,5 silisyum, % 0,5-0,8 mangan % 0,1-0,9 fosfor, % 0,02-0,12 kükürt içermektedir. Yüksek fırınlarda demir oksitin sıvı metale indirgenme süreci birincil çelik üretimi olarak adlandırılmaktadır. İndirgenme sonucu pik demirin çeliğe dönüşüm aşamasında bazik oksijen fırınları kullanılmaktadır. Bu fırınlarda ham demire oksijen veya hava üfletilerek saflaştırma işlemi uygulanır ve karbon uzaklaştırılır. Bu işlemde amaç karbon oranını belli bir düzeye indirmek,  $Mn < \%0,8$  ve  $Si < \%0,5$  değerlerinde olacak şekilde düşürmek, kükürt seviyesini en düşük değerde tutmak ve fosforu cürufa katmaktır. Ayrıca çeliğe alaşım elementinin katılması amaçlanır (Savaşkan, 2017).

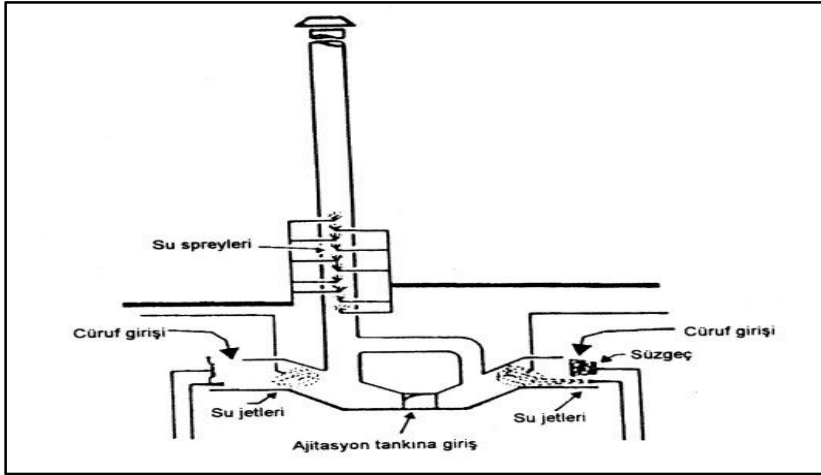
Demir cevheri içerisinde  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ ,  $Fe_3O_4.nH_2O$  ve  $FeCO_3$  gibi demir oksit birleşenleri bulunmaktadır. Birincil çelik üretimi sırasında demir cevherinden ham demir elde edilebilmesi amacıyla yakıt olarak kok kömürü kullanılır, yüksek sıcaklıklardaki fırınlarda demir cevheri kalker taşı dahil edilerek ısıtılır, yabancı maddelerden (Si, Mn, P, S) arındırılır ve demir oksitin içerisindeki oksijen karbondioksit ve karbon monoksit dönüşerek çıkarılması sağlanır. Demir oksitin ayrışması sonucunda eriyik haldeki demir ve cüruf kalır. Eriyik haldeki demir, fırının alt bölümünde toplanır. YFC, demir cevherinin yüksek fırınlarda üretimi sırasında öz kütle farkından dolayı eriyiğin üst bölümünde toplanan yan üründür. Yaklaşık olarak 1400-1600 °C sıcaklıkta bulunan cüruf ham demir

sıcaklığına (1700-1800 °C) yakın bir değerdedir. Şekil 1.2’de YFC üretim aşaması şematik olarak gösterilmiştir. İkincil çelik üretim yöntemi ise hurdanın, bir Elektrik Ark Ocağı'nda (EAO) eritilmesi ile elde edilen çelik hurdasına dayalıdır (Öcal, 2014).



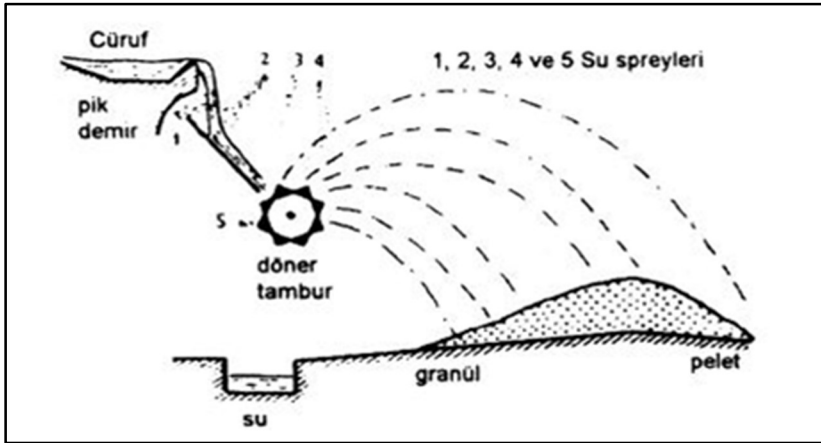
Şekil 1. 2. Yüksek fırın cürufu üretim akış şeması (Sarna, 2013).

Genel olarak demir-çelik sanayisinde nihai ürünlerin üretimi sonucunda oluşan yan ürünlerin kütle olarak %90'ı cüruf, tozlar, değirmen tortuları ve çamurdur (World Steel Association, 2018). Oluşan cürufun yeniden kullanım aşamasında üretim koşullarına göre puzolanik özellik gösteren (nikel, bakır vb. cürufları) ve bağlayıcılık özelliği gösteren cüruflar (yüksek fırın cürufu) kullanım alanlarına uygun olarak değerlendirilir. Cürufların kullanılabilmesi için soğutulması gerekmektedir. Bu amaçla yüksek fırınlardan elde edilen cüruflar hava soğutmalı, peletlenmiş ve granüle (tanecikli) şeklinde 3 farklı yöntemle soğutulmaktadırlar (Öcal, 2014). Şekil 1.3 ve Şekil 1.4’de bu yöntemler gösterilmiştir.



Şekil 1. 3. YFC'nin granülasyon yöntemi ile soğutulma işlemi (Tokyay & Erdoğan, 2003).

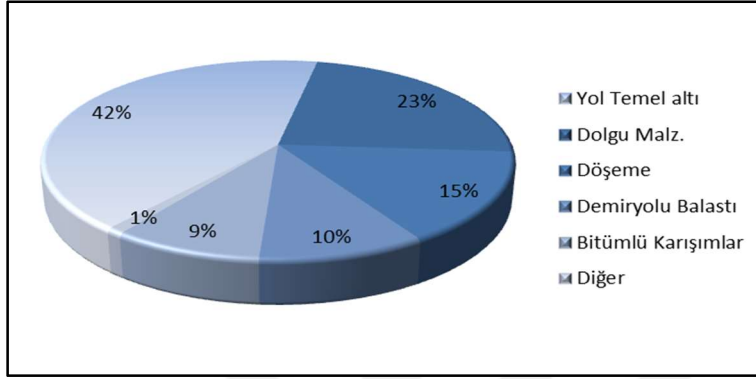
Yavaş soğutulan (hava soğutmalı) cüruflar kristal yapı oluşturur. Bağlayıcılık özellikleri bulunmayan bu cüruflar genellikle temel ve alt temel uygulamalarında, beton agregası olarak, yumuşak zemin stabilizasyonunda ve demiryolu balastı gibi alanlarda kullanılmaktadır. Granülasyon ve peletleme yöntemi ile ani soğutulan cüruflar amorf (camsı) yapı kazanmakta ve bağlayıcılık özelliğine sahip olmaktadır. Öğütülerek toz hale getirilen cüruflar Portland çimentosu veya alkali aktivasyonu ile bağlayıcılık özelliği kazanarak çimentosuz beton üretiminde kullanılabilir (Erdoğan, 1993).



Şekil 1. 4. YFC'nin peletleme yöntemi ile soğutulma yöntemi (Tokyay & Erdoğan, 2003)

ABD'de cürufların kullanım alanlarına ait grafik Şekil 1.5'de verilmiştir. Granülasyon yönteminde; fırından çıkarılan eriyik haldeki cüruf yüksek basınçlı su jeti aracılığıyla 10/1 oranında su/cüruf kullanılarak ani şekilde soğutulur ve inceliği kum boyutunda olan granül cüruflar oluşturulur. Farklı tane boyutuna ve yapıya sahip olan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun (ÖGYFC) reaksiyonu; kimyasal yapısına, inceliğine ve suyun sıcaklığına

bağlı olarak değişebilmektedir. Peletlenmiş yüksek fırın cürufu üretiminde; dönen tambur üzerindeki cürufa, havanında etkisiyle basınçlı jet yardımıyla su püskürtülerek soğutma işlemi yapılır. Peletleme yöntemi ile soğutulan cürufların bünyesinde bulundurduğu su miktarı granülasyon yöntemine oranla daha azdır. Bu yöntemlerde ne kadar hızlı soğutma işlemi gerçekleştirilirse o oranda reaktif ürün oluşumu (amorf yapıda) sağlanır.



Şekil 1. 5. ABD’de cürufların kullanım alanları (Moranville-Regourd & Kamali-Bernard, 2019)

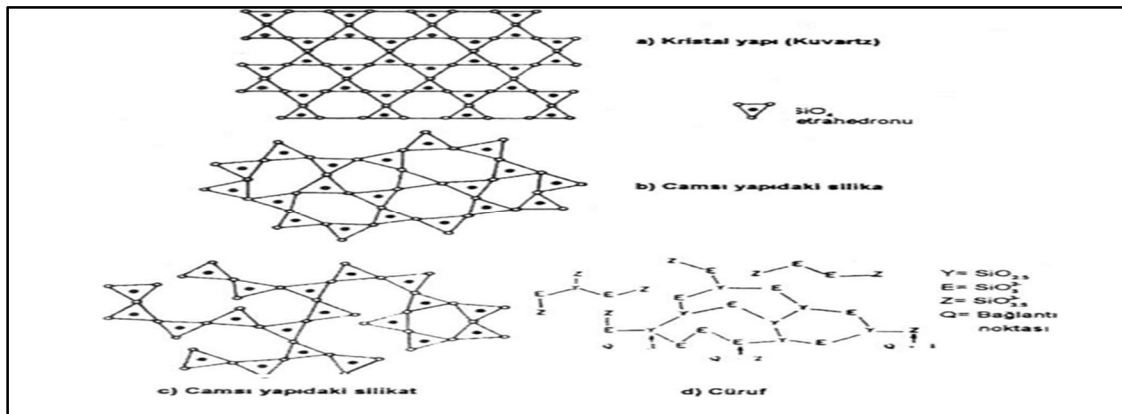
## 1.2. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu

Son yıllarda çevresel sorunlar göz önüne alındığında çimentoya olan talebi azaltmak ve atıkların bertaraf edilmesini sağlamak amacıyla demir-çelik üretiminde elde edilen esas ürünün yanı sıra, oluşan yan ürünlerin geri dönüşümü önem teşkil etmektedir. ÖGYFC, demir-çelik sanayisinde ham demir üretimi sırasında yüksek fırınlarda indirgeme işlemi sonucu oluşmaktadır. Fırınlardan elde edilen yüksek sıcaklıktaki cüruf daha sonrasında hızlı soğutma yöntemi ile soğutularak ince taneli amorf yapı oluşturur. Şekil 1.6’da cürufun kristal ve amorf haldeki kimyasal yapısı verilmiştir. Granül haldeki ürünler çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. ÖGYFC, ince öğütülmesi sonucunda Portland çimentosu ile birlikte veya alkalilerle aktifleştirilerek harç ve beton üretiminde kullanılabilir. Yüksek bağlayıcılık özelliği için cürufların inceliği önemli bir parametredir. Öğütülen cürufların özgül yüzeyinin en az  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$  olması gerektiği belirtilmiştir (Newman & Choo, 2003). ÖGYFC; silika, kalsiyum oksit, alüminyum, magnezyum oksit, kireç ve demir içermektedir. Farklı ülkelerde üretilen cürufların kimyasal kompozisyonu Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1. 1. Farklı ülkelere ait YFC kimyasal kompozisyonu (Moranville-Regourd & Kamali-Bernard, 2019)

Kimyasal Birleşim (%)	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	S	SO <sub>3</sub>
ABD	41	34	10	11	0.8	0.5	1.3	-
İngiltere	40	35	16	6	0.8	0.6	1.7	-
Kanada	40	37	8	10	1.2	0.7	2.0	-
Fransa	43	35	12	8	2.0	0.5	0.9	-
Almanya	42	35	12	7	0.3	0.8	1.6	-
Rusya	39	34	14	9	1.3	1.1	1.1	-
Japonya	43	34	16	5	0.5	0.6	0.9	-
Güney Afrika	41	33	16	14	1.7	0.5	1.0	-
Türkiye	34-41	34-36	13-19	3.5-7	0.3-2.5	1-2.5	1-2	-

GYFC'nin içerisinde bulunan bileşenlerde CaO, MgO ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği arttıkça hidrolik aktivitenin arttığı, SiO<sub>2</sub> içeriği arttıkça bağlayıcılığın azaldığı belirtilmiştir. ÖGYFC'lerin birleşimine bağlı olarak bazik durumda olması ve alkali aktivatörler ile birlikte hidrolik aktivitesinin aynı oranda artması nedeniyle kimyasal kompozisyonu önem arz etmektedir. Bağlayıcılık özelliği dikkate alındığında baziklik indeksi olarak kalsiyum oksit/silisyum oksit oranının 1'den büyük olması gerektiği belirtilmiştir (Moranville-Regourd & Kamali-Bernard, 2019). CaO/SiO<sub>2</sub> oranının yüksek olması hidrolik özelliği artırır ancak CaO bileşiminin çok yüksek değerlere ulaşması hidrolik özelliğinde azalmasına neden olabilir buna ek olarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> artışında cüruf aktivasyonu artabilir. Demir ve mangan oksit gibi bileşimlerin miktarlarının fazla olması ise dayanım özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir (Tokyay & Erdoğan, 2003).



Şekil 1. 6. Cürufun camsı yapısının şematik açıklaması (Tokyay & Erdoğan, 2003)

### 1.3. Ögütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun hidratasyonu

Hidratasyon, çimentonun su ile tepkimesi sonucu oluşan kimyasal bir reaksiyondur. Reaksiyonu etkileyen önemli faktörler su ve sıcaklıktır. ÖGYFC, Portland çimentosuyla benzer reaksiyon özellikleri göstermektedir. ÖGYFC’de bulunan kalsiyum oksitin çoğu Portland çimentosunda olduğu gibi, kalsiyum silikat, kalsiyum alüminat ve kalsiyum alüminosilikat olarak bağlanır. Bu birleşikler Portland çimentosu hidratasyonunun yan ürünlerinden biri olan kalsiyum hidroksit (kireç) tarafından aktive edildiğinde hidratlanırlar. Portland çimentosunun hidratasyonu sonucunda C-S-H jeli, CH kristalleri ve ısı açığa çıkmaktadır. C-S-H jeli oluşumu çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandırmaktadır. Portland çimentosundan çıkan ısı ve çimentonun sertleşmesi durumu hidratasyon sürecinin bir göstergesidir. Bu süreç Portland çimentosunda hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Bunun yanı sıra ÖGYFC’de kendi başına suyla tepkimesi sırasında; Portland çimentosuna kıyasla daha yavaş gelişse de hidratasyon işlemi gerçekleşmektedir. Cürufun camsı faz içeriği, parçacık boyutu dağılımı kireç, alümina ve magnezyum miktarları, hidrolik reaktivite derecesini belirleyen faktörlerdir (Islam vd., 2011). Cüruf hidratasyonu tanımlanırken yüksek fırın cürufunun su içerisinde belli bir miktarda erimesi sonucu C-S-H, hidrate alüminatlar ve hidrate silika alüminatların çökmesi ile hidratasyonunun gerçekleştiği belirtilmektedir (Kaya, 2010).

Cürufların azda olsa bağlayıcılık özelliği gösterdiği oluşturduğu reaksiyon sonucu görülebilmektedir. İlk hidratasyon aşamasında cürufun içerisindeki silikat iyonları eriyiğe geçmektedir. Bunun sonucunda C-S-H’ in çökmesi ile eriyiğin kireç konsantrasyonunda artış olmaktadır. Sonrasında alümina konsantrasyonunda, hidrate alüminat kristallerinin oluşumuna kadar artış görülmektedir. Çalışmalarda YFC hamurundaki hidrate fazlarında CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O dördü ana sistemin içerisinde C-S-H, C<sub>2</sub>ASH ve C<sub>4</sub>AH<sub>13-19</sub> bileşenlerini oluşturduğu belirtilmiştir (Kaya, 2010). Hidratasyon işleminin yavaş gerçekleşmesi cüruf reaksiyonunu etkilediğinden bu işlemi hızlandırmak için ihtiyacı olan kalsiyum hidroksiti karşılayan Portland çimentosu kullanılabilen bu işlemi hızlandırmak için ihtiyacı olan çimento kullanılmadan, çeşitli aktivatörler ile de hidratasyon işlemi gerçekleştirilerek harç veya beton üretilmektedir. Gelişmiş yapıdaki ve dayanıklılıktaki ÖGYFC’ nin beton içerisinde çimento yerine kullanımı arttıkça, çevre dostu ve ekonomik malzeme özelliği sağlamaktadır.



#### 1.4. Geopolimerlerin yapısı

Geopolimer beton üretiminde önemli gelişmeler 1982 yılında Davidovits'un yapmış olduğu çalışmalar sonucunda ortaya çıkmıştır. Davidovits geopolimer ve geopolimerleşme üzerine yaptığı çalışmada geopolimeri düşük sıcaklıklarda üretilen yarı kristalli seramik benzeri inorganik polimer olarak açıklamıştır. Kovalent bağlar ile bağlanmış doğal haldeki mineral molekülleri zincir veya üç boyutlu ağlardan oluşmaktadırlar. Geopolimerler alümino-silikat malzemeler sınıfında yer almaktadır (Davidovits, 2013). Geopolimerleşme düşük sıcaklıkta, 100 °C'nin altında veya oda sıcaklığında gerçekleşmektedir bu sayede hızlı ve dayanıklılığı yüksek malzeme üretilmektedir. Zhang vd. (2016) yüksek sıcaklıkta geopolimer harç üzerinde yapmış olduğu deneyde 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda dehidrasyon kaynaklı mikro yapısında bozulmalar, mukavemet ve kütle kayıpları görülebildiğini belirtmiştir. Geopolimerleşme sırasında silis ve alümin elementleri oksijen ile reaksiyona girer kovalent bağlı yapıyı oluşturur. Üç boyutlu ağ yapısına sahip olan SiO<sub>2</sub> alkali ortamda yapısı zayıflayarak geopolimerin ana yapısının da bulunan Si-O-Al ve Si-O-Si bağlarını oluşturur. İşlemi hızlandırmak için sıcaklık kullanılabilir. Geopolimerler amorf ve kristal yapı özelliği gösterebilirler. Si/Al oranına bakılarak geopolimerleşme sürecinde malzeme özellikleri belirlenebilmektedir. Si/Al oranı arttıkça daha amorf yapıdaki akışkan geopolimer elde edilirken, oranın azaltılması sonucu daha kristal bir yapı oluşmaktadır (Şinik, 2019).

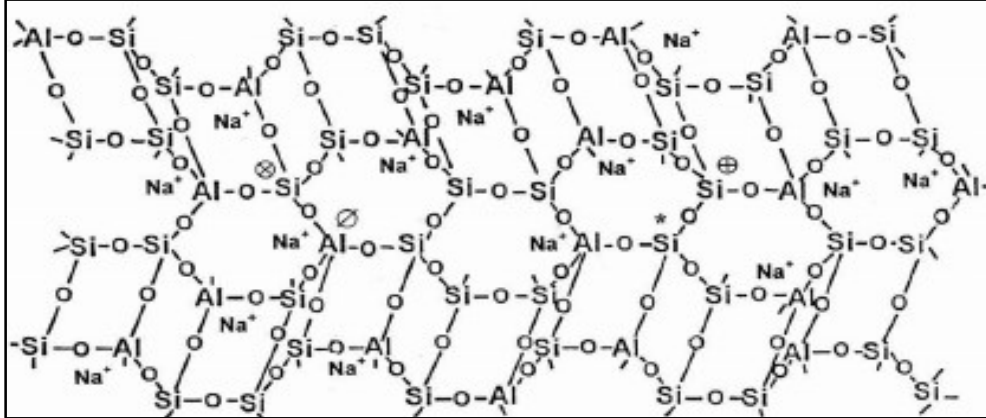
Lie ve ark. (2004) tarafından yapılan çalışmada geopolimer kullanımının olumlu etkileri doğal kaynak tüketiminin olmaması ve endüstriyel üretim sonucunda yan ürünlerin kullanılması, geopolimerlerin düşük enerji tüketimine bağlı olarak daha az karbon salınımı gerçekleştirmesi, Portland çimentosuna kıyasla düşük rötre gerçekleştirmesi ve kısa sürede yüksek basınç dayanımına sahip olması şeklinde sıralanmıştır. Literatür de teorik olarak alkalilerin aktivasyonunun, silika ve alümina içeren tüm malzemelerle sağlanabileceğini belirtilmiştir. Bu malzemelere amorf silika, alümino-silikatlar, uçucu küller, yüksek fırın cürufu, metakaolin, kaolinitik killer örnek olarak verilebilmektedir. Geopolimerlerin sertleşme süreci tam olarak bilinmemektedir ancak kimyasal reaksiyon süreci iki farklı şekilde gerçekleşmektedir.

- Malzemenin yüzeyinde silika ve alümina jeli oluşturmak için hammaddelerin alkali çözelti içinde çözünmesi
- Kovalent bağlı ağ şeklindeki yapıyı oluşturmak için polimerleşme reaksiyonu gerçekleştirme

Geopolimerlerin reaksiyon sırasında ve sonrasında oluşturduğu kimyasal gruplar aşağıda sıralanmıştır (Davidovits, 2008a), (Davidovits, 2008b).

- Si-O-Si-O- silokso, poli(silokso),
- Si-O-Al-O-sialat, poli(sialat),
- Si-O-Al-O-Si-O-sialat-silokso, poli(sialat-silokso),
- Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialat-disilokso, poli(sialat-disilokso),
- (R)-Si-O-Si-O-(R) organo-silokso, poli-silikon,
- Al-O-P-O-alümino-fosfo, poli(alümino-fosfo),
- Fe-O-Si-O-Al-O-Si-O- ferro-sialat, poli(ferro-sialat)

Davidovits çalışmalarında geopolimeri tanımlamış ve geopolimer zincir yapısını Şekil 1.7' deki gibi göstermiştir (Davidovits, 1976).



Şekil 1. 7. Geopolimerlerin kimyasal yapısı (Davidovits, 1976)

### 1.5. Cürufun alkali aktivasyonu

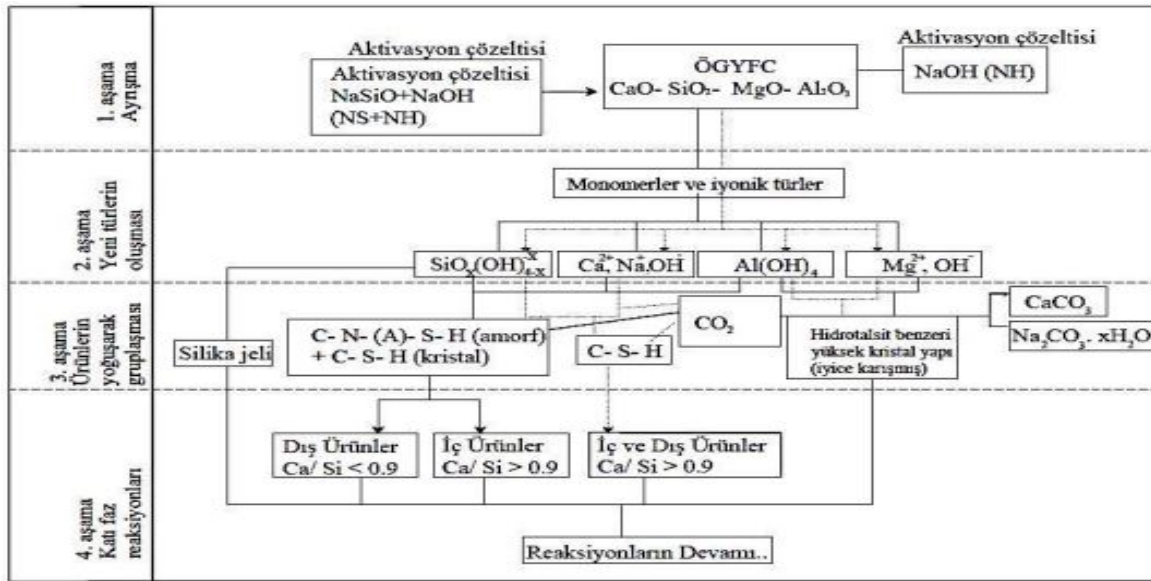
Portland çimentosunun üretim aşamasında büyük miktarlarda CO<sub>2</sub> salınımına neden olması, hidrasyon sırasında yüksek ısı ihtiyacının olması, enerji tüketimi ve taşıma sorunları gibi nedenlerden alternatif çözümler aranmaktadır. Alkaliler ile aktifleştirilmiş cürufur hakkındaki ilk çalışma cürufun 1939-1940 yıllarında Feret ve Purdon tarafından

kullanılmasıyla başlamıştır. Daha sonra Glukhovsky 1957 yılında alkali aktivasyon ile cüruf çimentosunu icat etmiştir. Geopolimer üretiminde Ikeda (1998) tarafından yapılan araştırmada karışım içerisinde ham maddeler (taban külü, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı vb.), aktif olmayan dolgu maddesi (kaolinit veya metakaolinit) ve alkali sıvısının (NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltileri) bulunması gerektiği belirtilmiştir.

Çizelge 1. 2. Alkalilerle aktive edilmiş cürufların avantaj ve dezavantajları (Wang ve ark, 1995)

Avantaj	Dezavantaj
Düşük ısı iletkenlik	Mikro Çatlaklar
Kimyasal Etkilere Karşı Dayanıklılık	Ani Priz
Hacim Sabitliği	Çiçeklenme
Düşük kür sıcaklığı	Alkali-Agrega Reaksiyonu Olasılığı
Çevreci	Mukavemet Değişimleri
Ekonomik	

Aktivasyon sırasında mekanik mukavemeti arttırmak ve bağlayıcılık özelliklerini geliştirmek için farklı tür aktivatörler kullanılmaktadır. Bu aktivatör türleri 2 ana başlıkta toplanmaktadır. Bunlar; soda, kireç, sodyum veya potasyum hidroksit, sodyum silikat gibi alkali aktivatörler ile alçı, anhidrit gibi sülfat aktivatörleridir. Aktivatörler hidrasyon ürünlerinin oluşumunu hızlandırmaktadır. Alkaliler ile aktive edilmiş cürufların Ca/Si oranının 0,8, sülfat ile aktive edilmiş cürufların ise 1,4 olabileceği belirtilmiştir (Haha ve ark, 2011). Aktivasyonun ilk aşamasında aktivatör içerisinde çözünen cüruf, amorf yapı bağlarını kırar daha sonraki aşamada (C-(A)-S-H) içeren kalsiyum silikat hidratlar, hidrotalsit ((C,M)<sub>4</sub> AH<sub>13</sub>) benzeri faz ve stratlingit (C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub>) içeren hidrasyon ürünlerini oluşturmaktadır (Roy vd., 1992 ; Lothenbach vd., 2007). Cüruf aktivasyonunda yaygın olarak kullanılan aktivatörlerin başında sodyum silikat gelmektedir. Bunun yanı sıra birçok çalışmada NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ve KOH gibi diğer aktivatörler de kullanılmaktadır Dört aşamada gerçekleşen cüruf aktivasyonu Şekil 1.8’de gösterilmiştir. Cüruf içerisine katılan aktivatör türü fark etmeksizin aktivatör miktarı arttıkça dayanımlarda da artış görülmektedir. Bunun yanı sıra aktivatör oranı aktivasyon hızını, bağlayıcılığını ve gözenekli yapıyı etkilemektedir. Reaksiyon sonucu aktivatör içerisinde çözünen cürufun pH değeri yükselmektedir. Araştırmacılar tarafından 13-14 pH aralığının dayanım için en uygun aralık olduğu belirtilmiştir (Peterman vd., 2010). Dayanıma etkileri incelendiğinde sırasıyla Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>+NaOH>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>>NaOH şeklinde kullanılan aktivatörlerin iyi sonuç verdiği belirtilmiştir (Fernández-Jiménez vd.,1999).



Şekil 1. 8. Alkaliler ile aktifleştirilen yüksek fırın cürufunun reaksiyon aşamaları (Burciaga-Diaz vd., 2013; Balçıkanlı, 2016)

### 1.6. Sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)

Endüstri, tekstil, otomotiv gibi birçok alanda kullanılan sodyum silikat bunlar dışında aktivasyon sürecinde de yaygın olarak kullanılan bir kimyasaldır. Renksiz, kokusuz yapıda bulunan sodyum silikat akışkan sıvı halde bulunan cam türü bir aktivatördür. Cam suyu olarak adlandırılan sodyum silikatın kimyasal formülü Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>'tür. Beton/harç üretiminde priz hızlandırıcı olarak kullanılmaktadır. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>'in tek başına kullanımı az görülmektedir. Genellikle başka aktivatör ile birlikte kullanılır. Bu sayede reaksiyonun başlaması ve bağlayıcılığın oluşumu sağlanmaktadır. En çok NaOH ile kullanılır bunun nedeni Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> içerisinde bulunmayan OH<sup>-</sup> iyonunun NaOH 'tan karşılaşmasıdır. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanımı geopolimer reaksiyonundaki bağların güçlenmesinde aktif rol oynamaktadır (Zhang ve ark., 2008).

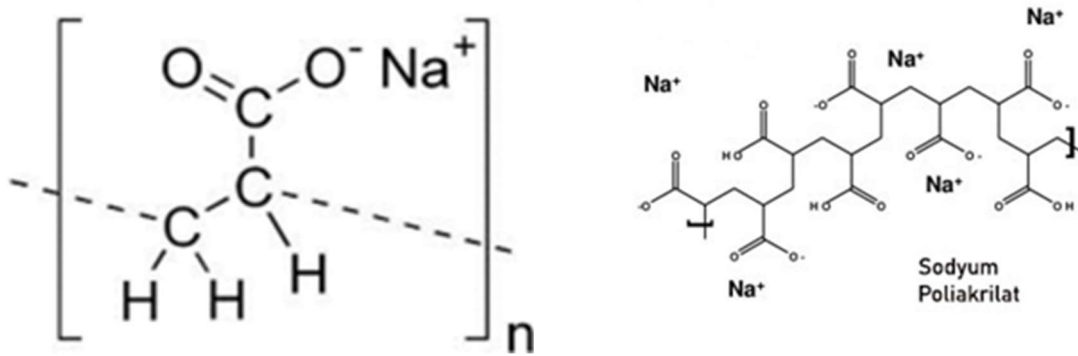
### 1.7. Sodyum hidroksit (NaOH)

Sodyum hidroksit beyaz, katı granül formda hidrojen ve klor üreten sodyum klorür çözeltisinin elektrolizi ile üretilen bir kimyasaldır. Kostik soda olarak bilinen kimyasal aktivasyon sürecinde priz hızlandırıcı olarak kullanılır. Geopolimer üretiminde artan NaOH çözelti miktarı geopolimerin mikro yapısını ve dayanımını önemli oranda etkilemektedir. Hardjito ve ark. (2004) araştırmasında belirttiği gibi NaOH

konsantrasyonunun artması betonun basınç dayanımı arttırmaktadır. Bunun yanı sıra yüksek oranda kullanılması çiçeklenmeye neden olabilir. NaOH suda çok iyi çözünür ve erimesi sonucu yüksek ısı açığa çıkarır. NaOH'ın erime derecesi 318°C ve kaynama noktası 1388°C'dir. Çözünen NaOH sonucu alkali aktivasyonu için gereken molarite elde edilir. Sodyum hidroksit oranı arttıkça ısının artması ile vizkozite de bir miktar azalma görülebilir (Elibol, 2012). Sodyum hidroksitin ılık suda iyice çözüldürülmesi gerekmektedir. Çözünmemesi sonucu ani sıcaklık değişimleri görülebilir.

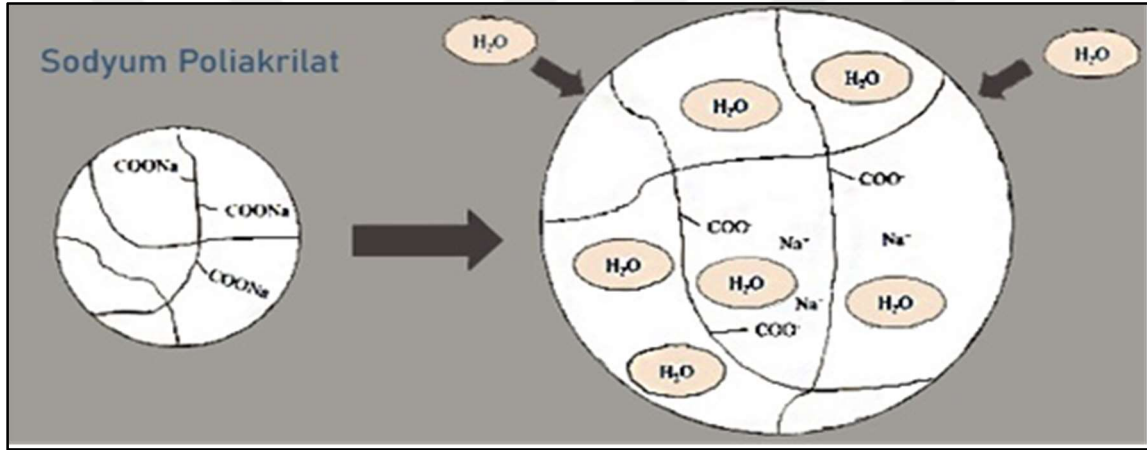
### 1.8. Süper emici polimer (Sodyum poliakrilat)

Süper emici polimerler 1960'lı yıllarda tarım alanında sulama sistemlerini iyileştirmek amacıyla ABD tarım bakanlığı tarafından yapılan araştırmalar sonucu ortaya çıkmıştır. 1970'lerden itibaren polimerler yaygın olarak hijyenik ürünlerde bunun dışında kaplamalarda, inşaat ve petrol endüstrisi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Piyasada bulunan polimerlerin yanı sıra gelişmiş süper emici lifler tıbbi cihazlarda, ambalajlama gibi çeşitli alanlarda da kullanılır hale gelmiştir. Sodyum poliakrilat yüksek su emme özelliğine sahip olan granül haldeki hidrojellerdir. Beyaz toz haldeki poliakrilat, hidrofilik özellikteki gruplarla üç boyutlu kovalent bağlı uzun zincir yapılardan oluşur. Sodyum poliakrilatın kimyasal yapısını Şekil 1.9'de verilmiştir. Polimer su ile reaksiyona girmez, suyu bünyesine alarak şişme özelliği gösterirler (Sohn & Kim, 2003). Değişken olmakla beraber kendi ağırlığının yaklaşık 200-300 katına kadar şişmesi sonucu jel formunu almaktadır. Üretimine ve zamana bağlı olarak daha yüksek oranlarda da bünyesine su alabildiği araştırmacılar tarafından belirtilmiştir. SEP'in kimyasal formülü  $C_3H_3NaO_2$  şeklindedir.



Şekil 1.9. Sodyum poliakrilat kimyasal yapısı (Al-Nasra ve ark., 2013; Hubbe ve ark., 2016)

Sodyum Poliakrilat çok sayıda su bazlı akrilat molekülünden oluşan zincir yapıdaki bileşiklerdir. Hidrofilik gruptan oluşan SEP dışarıdan almış olduğu su sonucu iyonize olmaktadır. Bu sırada sodyum ( $\text{Na}^+$ ) iyonları bileşikten ayrılarak serbest hareket etmeye başlar. Kalan karboksil iyonları negatif yüklerinden dolayı ve iyonlaşma etkisi ile etrafa dağılarak birbirinden uzaklaşmaları sonucu alanlarını genişletirler. ( $\text{Na}^+$ ) atomları difüzyon yoluyla suyu zamanla kendisine çeker. SEP doymuş hale ulaşmaya kadar bu süreç devam eder. Dahili kütleme sağlamak için yeni bir bağıl nem gradyanı oluştuğunda doygunluğa ulaşması sonucu suyunu serbest bırakır. SEP aynı zamanda üç boyut etkisi veren çapraz bağlara sahiptir (Yang vd., 2022). SEP'in suyu emmesi sonucu göstermiş olduğu yapısal değişiklik Şekil 1.10 ve Şekil 1.11'de verilmiştir.



Şekil 1. 10. Sodyum poliakrilatın su ile tepkimesi (Matsumoto, 2018)



Şekil 1. 11. Sodyum poliakrilat'ın bünyesine almış olduğu su sonucu hacimsel değişimi

SEP emmiş olduğu suyu bünyesinde tutar. Beton veya harca eklenen SEP içerisinde bulunan suyu salarak betonun içerisinde boşluklu yapı oluşturur. SEP'in harca eklenmesi sonucu içyapıda büyük izole boşluklar oluşmaktadır. Ancak polimer harç içerisindeki kılcal ve jel boşlukları doldurarak avantaj sağlayabilir (Yang vd., 2022). Genellikle çalışmalarda SEP katkısı yetersiz kütleme işlemi sonucunda oluşan yüzey çatlaklarını önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Betonu daha plastik hale getiren SEP'in ayrıca işlenebilirliği ve beton dayanıklılığını arttırdığı bunun dışında donma-çözünme etkilerine karşı direnç gösterebildiği araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Al-Nasra ve ark., 2015). Sodyum poliakrilat zararlı bir yapıya sahip değildir.



## 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Bu bölümde yüksek fırın cürufunun üretimi, alkali aktivatörler ile kullanımı ve etkileri, yapılan deneylerin fiziksel ve mekanik dayanım sonuçları ile farklı çalışmalarda kullanılan süper emicinin beton içerisinde davranışları hakkındaki araştırma ve çalışmalar ele alınmıştır.

Bakharev vd. (1999) tarafından yapılan çalışmada, farklı aktivatörler kullanılarak yüksek fırın cürüflü harçlar hazırlanmıştır. Yapılan deneyde sodyum silikatın en etkili aktivatör olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, sodyum silikatla aktive olan tüm karışımların mukavemetinin, erken yaşta benzer su/bağlayıcı oranındaki Portland çimentosu harçlarından daha yüksek olduğu şeklinde tanımlanmıştır. Bunun dışında, sodyum konsantrasyonu ile dayanım artışının ve işlenebilirliğinin düşük olması nedeniyle, alkali ile aktifleştirilmiş betonda sodyum silikat/cüruf karışımlarında  $M_s = 0.75$  ve %4  $Na^+$  içeren bir oranda kullanılması gerektiği bildirilmiştir. Yüksek alkali konsantrasyon oranında sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilen cürufun yüksek bir büzölmeye sahip olduğu ve hızlı sertleşen bir çimento gibi davrandığı araştırmacı tarafından bulunmuştur. Isıl işlemin cüruf harçlarının mukavemet gelişimi üzerinde önemli bir hızlandırıcı etkisi olduğu gözlenmiştir.

Fernández-Jiménez vd. (1999), alkali ile aktifleştirilmiş cüruf çimentosunun mekanik gelişimi üzerine yaptıkları çalışmada, cüruf özgül yüzeyi, kür sıcaklığı, kullanılan aktivatörün konsantrasyonu ve türü gibi bir dizi faktörün etkisini incelemiş ve harçların mekanik davranışını farklı yaşlarda dikkate alarak matematiksel modeller oluşturulmuştur. Mekanik dayanımların gelişimi üzerinde çalışılan en önemli etkilerin sırası belirtilmiştir. Bunlar; alkali aktivatörün doğası > aktivatör konsantrasyonu > kürlenme sıcaklığı  $\approx$  cürufun spesifik yüzeyi şeklindedir. Çalışmada  $Na_2SiO_3 \cdot nH_2O + NaOH$  ile aktive edilen harçların en yüksek dayanımları verdiği ifade edilmiştir. Kür sıcaklığının incelendiği çalışmada sıcaklık artışının cüruf aktivasyonu sürecini hızlandırdığı ve erken yaşlarda dayanımların gelişimini daha fazla etkilediği doğrulanmıştır. Ancak daha sonraki yaşlarda reaksiyon süresi arttıkça kürlenme sıcaklığı artışının olumsuz etki yaparak nihai dayanım değerlerinde azalmaya neden olacağı belirtilmiştir.



Collins vd. (2000), çalışmasında alkaliler ile aktive edilen cüruf betonunun Portland çimentolu betona göre kuruma büzölmelerinin daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Alkalilerle aktive edilmiş cürufllu betonun, Portland çimentolu betondan daha düşük elastik modöülü ve daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğunu ve bu birleşik etkilerin çatlama eğilimini azaltabileceğini saptamışlardır.

Collins vd. (2001) tarafından yapılan çalışmada, farklı kür koşullarında alkaliler ile aktive edilmiş ÖGYFC'lu beton karışımları hazırlanmıştır. Basınç dayanımları ve mikro çatlama seviyeleri araştırılan çalışmada açık havada bekletilen numunelerin yüzeylerinde görünür şekilde mikro çatlaklar oluştuğı ve zamanla çatlak genişliklerinin arttığı gözlenmiştir. Buna ek olarak bu numunelerin yüksek su alımına sahip olduğu belirtilmiştir. Oda sıcaklığında % 50 nemli ortamda bekletilen alkaliler ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu betonların dayanımlarının standart su kürü uygulanan betonların dayanımlarına göre %50 civarında azaldığı gözlemlenmiştir. Deneyde, açıkta kürlenene numunelerde oluşan birbirine bağılı mikro çatlak ağının daha düşük basınç dayanımına neden olduğu belirtilmiştir.

Bakharev vd. (2002) yapmış olduğu çalışmada; alkali aktivasyonu ile hazırlanan cüruf betonunun sülfat içerisinde bekletilmesi sonucu dayanıklılığı araştırılmıştır. Yapılan deneyler sırasında numuneler iki farklı halde hazırlanan ( %5 magnezyum sülfat ve %5 sodyum sülfat) çözeltiler içerisinde bekletilmiş ve basınç dayanımları, bozunma ürünleri ve mikroyapısal değışikleri araştırılmıştır. Sodyum sülfat çözeltisinde 12 ay süre ile bekletilen betonların dayanım düşüş oranları alkali aktif cüruf (AAS) betonu için %17 ve Portland çimentosu (OPC) için %25 olduğu tespit edilmiştir. Magnezyum sülfat çözeltisinde ise aynı sürede basınç dayanımı düşüşünün OPC için %37 ve AAS için %23 olduğu çalışmada belirtilmiştir. Çözeltilerde bekletilen numunelerde bozulmalar meydana gelmiştir. Portland çimentosunda bozulma nedeni etrenjit ve alçıtaşı oluşmasıdır. AAS'de ise sadece alçı taşından dolayı bozulmalar meydana gelmiştir. Çalışmada OPC numunelerinde genleşme, çatlama ve beton kaybı göröldüğü, AAS numunelerinin test esnasında genleşmediğı ancak çatladığı gözlenmiştir. Deneyde devam eden hidrasyon nedeniyle AAS betonunun mukavemetinde bir miktar artış kaydedilmiştir. Çalışma sonucunda AAS numunelerinin sülfat etkisine maruz kaldığında benzer derecedeki OPC betondan daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir.

Bakharev ve ark. (2003) çalışmalarında asit çözeltilisine maruz kalan alkaliler ile aktifleştirilmiş cüruf (AAS) betonunun dayanıklılığı, bozunma ürünleri ve mikroyapısal değişiklikleri araştırılmıştır. Çalışmada OPC betonuna göre AAS betonunun asitli ortamda yüksek bir dirence sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak AAS betonu, OPC'ye göre daha çok karbonatlaşmaya maruz kalmaktadır. Çalışmada 4 pH'lık bir asetik asit çözeltilisinde ilk olarak 4 ay boyunca daha sonra 6, 9 ve 12 ay bekletilerek deney yapılmış ve basınç dayanımları ölçülmüştür. Çalışma incelendiğinde AAS numunelerinin görünümünde herhangi bir değişiklik olmadığı ve kütlelerinde küçük bir artış olduğu tespit edilmiştir. AAS beton numunelerinin yüzey tabakasında bir miktar yumuşama ve beyaz tortuların olduğu ancak hasarın OPC betondakinden daha az olduğu belirtilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; 12 ay boyunca asit çözeltilisinde bekletilen OPC numunelerinde yaklaşık % 47 ve AAS yaklaşık % 33 mukavemet kaybı görüldüğü belirtilmiştir. Asit çözeltilisine maruz kaldığında AAS betonunun OPC betonundan daha iyi performans gösterdiği açıklanmıştır.

Živica (2007) çalışmasında farklı aktivatörler kullanarak hazırlanmış olduğu alkali cüruf çimento karışımlarının priz süreleri ve işlenebilirliğinin aktivasyona etkilerini incelemiştir. Çalışmada aktivatör kullanımının priz sürelerini önemli ölçüde hızlandırdığı ve sodyum silikatın diğer aktivatörlere göre daha etkili olduğu belirtilmiştir. Ancak sodyum silikatta işlenebilirlik kaybının yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Karışımların ilk ve son priz sürelerine bakılmış, 20-31 °C ortam sıcaklığındaki artışın numuneler üzerinde etkisi incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde sodyum hidroksit ile aktive edilen cüruf çimentolarının, sıcaklık ve su/cüruf oranı, sodyum hidroksit miktarı ile kümülatif ısı artışları gözlenmiş ayrıca kütleme sıcaklığından bağımsız olarak önemli bir indüksiyon süresi göstermediği belirtilmiştir. Artan sodyum silikat dozu ve sıcaklığı incelendiğinde indüksiyon süresini kısalttığı, ısı oluşum hızını hızlandırdığı ve ilk 24 saat boyunca kümülatif hidrasyon ısını arttırdığı belirtilmiştir.

Topçu ve Canbaz (2008) yapmış oldukları çalışmada alkaliler ile aktifleştirilmiş YFC harçlarının asit etkisindeki davranışlarını incelemek amacıyla % 0, 25, 50, 75, 100 oranlarında YFC kullanarak numuneler üzerinde birim ağırlık, basınç, ultrases geçiş hızı ve rezonans deneyleri uygulamıştır. Numuneler 28 gün standart kür şartlarında bekletilmiş daha sonrasında H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde 56, 90 ve 250 gün bekletilerek kontrol harçlarına göre dayanım ve numuneler üzerinde fiziksel etkileri incelenmiştir. Çalışmada 3 farklı aktivatör karışımı uygulanmıştır. Bunlar; I, NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; II, NaOH+Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>; III, Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> şeklindedir. Sonuçları incelendiğinde; düşük oranda kullanılan YFC'nin asit dayanıklılığının az olduğu, YFC miktarının artması ile karışım içerisinde homojen olarak dağılması nedeniyle asit direncinin arttığı belirtilmiştir. YFC miktarının artması ile harçların birim ağırlıklarının genel olarak arttığı, harçlarda H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözelti etkisi ile numunelerin kimyasal yapısında YFC'nin homojen bir dağılım sergilemesi nedeniyle bozulma olmadığı ve belirgin oranda ağırlık kaybına yol açmadığı görülmüştür. Bu durumun oluşan boşluk miktarının azalması ile ultrases geçiş hızındaki kayıpları azalttığı ve harçların bağıl basınç dayanımlarını genel olarak arttırdığı belirtilmiştir. YFC'de kalsiyum oksitlerin bağlanması ile oluşan tuz miktarının azaldığı ve genel olarak mekanik ve fiziksel özelliklerde azalmaya neden olduğu belirtilmiştir. Asit etkisinde birim ağırlık ve ultrases geçiş hızı açısından en avantajlı sonuçlar % 100 YFC katkılı NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ile aktive edilen numunelerde, basınç dayanımı açısından en uygun aktivatör karışımı ise NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kombinasyonunda olduğu belirtilmiştir. Çalışmaya göre asit etkisine karşı dayanıklılığını arttırmada YFC kullanım miktarını arttırmak için aktivasyonda kullanılan alkali türünün oldukça önemli olduğu belirtilmiş ve NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> kombinasyonlarının kullanılması önerilmiştir.

Atış vd (2009) tarafından yapılan çalışmada alkali ile aktive edilmiş cürüflu harçların priz süreleri, kuruma rötresi, basınç ve eğilme dayanımları üzerinde, kullanılan aktivatör tipinin etkisi incelenmiştir. Çalışmada 3 farklı aktivatör (sıvı sodyum silikat, sodyum hidroksit ve sodyum karbonat) kullanılarak cüruf aktivasyonu yapılmış, elde edilen karışımların 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları ile birlikte kuruma rötresi ölçümleri incelenmiştir. Basınç ve eğilme dayanımları kıyaslandığında sıvı sodyum silikat ile hazırlanan karışımların en iyi dayanım değerlerine sahip olduğu; sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile hazırlanan cürüflu harçların rötresinin Portland çimentosuna göre sırasıyla 3 ve 6 kat olduğu belirtilmiştir. Çalışmada sodyum konsantrasyon artışının alkali ile aktive olan cürüflu harçların priz sürelerini azalttığı görülmüştür.

Schlangen vd. (2010) çalışmalarında betonda oluşan çatlakların karbonatlaşma ve donatı korozyonu gibi olumsuz etkilerini iyileştirmek amacıyla; işlenmiş çimentolu kompozitlere (EEC), SEP katarak deney numuneleri hazırlamıştır. Çalışmada otojen büzülme ve kendi kendini iyileştirme özelliğine karşı etkili olacağı belirtilen SEP katkısı ıslanma-kuruma döngüsü üzerinden incelenmiştir. 7 ve 28 gün laboratuvar şartlarında ve 1 saat boyunca 20 °C suya daldırılıp ardından 3 gün laboratuvar şartında kurutulan numunelerin ıslak-kuru döngüsü sonrası eğilme dayanımları ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde SEP katkısı içeren karışımların ıslak-kuru döngüsünde SEP katkısı olmayan karışıma göre önemli oranda kendini iyileştirebildiği tespit edilmiştir. %0.5 SEP katkısı ile hazırlanan karışımın, %1 içeren karışıma kıyasla daha iyi mukavemet kazandığı bildirilmiştir. SEP katkılı numunelerin ıslak-kuru döngüdeki eğilme mukavemetleri incelendiğinde, son kürde eğilme dayanımları ilk günden daha yüksek çıkmıştır.

Craeye ve ark. (2011) yapmış olduğu çalışmada erken yaşta köprü döşemeleri üzerinde yüksek performanslı betonun, otojen büzülme nedeniyle oluşturduğu deformasyonları önlemek amacıyla beton içerisine SEP katkısı eklenerek davranışını araştırmıştır. İçten kürlenme amacıyla eklenen SEP, ilave kür suyu sağlaması ile kimyasal büzülme ve kendiliğinden kurumayı önlemektedir. Buna bağlı olarak betonda otojen büzülme önleyebildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca SEP eklenerek betonun işlenebilirliği de iyileştirilmektedir. Ancak, SEP tarafından eklenen ekstra su betonun basınç dayanımında düşüşe neden olmaktadır. Çalışmada maksimum otojen büzülmenin azalması ve minimum mukavemet kaybı amaçlanmaktadır. Sonlu elemanlar hesaplamaları ile yapılan simülasyonlar ile ortaya çıkan erken yaştaki çatlama riski üzerindeki etki incelenmiştir. Sertleşme gerçekleştikten hemen sonra ortaya çıkan deformasyonlardan kaynaklanan çatlama riskinin dahili kür yöntemi ile önenebileceği gözlenmiştir.

Elibol (2012) çalışmasında alkaliler ile aktive edilen YFC katkılı harçların dayanımları üzerinde araştırma yapmıştır. Çalışmada sabit su/bağlayıcı oranı ile hazırlanan karışımlarda aktivatör olarak %2,5, %5, %7,5 ve %10 sodyum/cüruf kütle oranlarında belirlenmiştir. Harç içerisinde YFC oranları ise %100 ve %75 olarak kullanılmıştır. Harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları ölçülmüştür. Çalışma kapsamında 7. gün dayanımları düşük seyreden harçlar, 40 °C, 60 °C ve 80 °C sıcaklıkta kür havuzlarında bekletilmiş, dayanımları 20 °C sıcaklık etkisi ile kıyaslanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde aktivasyon sürecinde en iyi mekanik özelliği gösteren aktivatörler

sıralanmıştır. Bunlar; Sodyum Hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) > Sodyum Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) > Sodyum Karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) şeklinde belirtilmiştir. Sıcaklık kürünün erken yaş dayanımlarını arttırmak için etkili olduğu çalışma sonucunda tespit edilmiştir. Kür suyu sıcaklığı ve bekleme süresinin artışı basınç dayanımlarının da artışa neden olmuştur. Çalışmada çimento ile karıştırılan harçlara oranla oluşturduğu boşluklu yapı ve hızlı priz nedeniyle %100 YFC ile çalışmanın daha uygun olduğu belirtilmiştir.

Komljenović vd (2013) çalışmalarında alkali ile aktifleştirilmiş cürufun (AAS) mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerinde harici sülfat saldırısının (%5  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisi) etkilerini analiz etmektedir. Portland cüruf çimentosu referans malzeme olarak kullanılmıştır. Çalışmada sülfat saldırısının, AAS'nin aksine CEM II'nin mukavemetinde azalmaya yol açtığı görülmüştür. Araştırılan deney koşulları altında, AAS, CEM II kıyaslaması ile ilgili olarak sülfat saldırısına karşı önemli ölçüde daha yüksek direnç gösterdiği şeklinde açıklanır. AAS sülfat saldırısına karşı çok belirgin bir dirence sahiptir. Sülfatlarla reaksiyonunda portlanditin (CH) olmaması, C-S-H(I) ve hidrotalsit jellerinde bulunan alüminyumun bulunmamasının etkili olduğu söylenmektedir. CEM II'nin mukavemet kaybının, etrenjit ve alçı oluşumu gibi yapısal değişikliklerle bağlantılı olduğu ancak AAS'nin ne hidrotalsit jelde ne de C-S-H jelde silikon ikamesi için alüminyum seviyesinde önemli yapısal değişiklik göstermediği şeklinde açıklanmıştır.

Chen ve ark. (2014) yapmış olduğu çalışmada cüruf katkılı geopolimerler de %0, %0.25 %0.5 %0.75 %1 oranlarında kullanılan sodyum poliakrilat (SP) dozajının mekanik özelliklerine etkilerini araştırmak için çekme ve basınç deneyleri yapılmıştır. Çalışmada cüruf aktivasyonu için kullanılan alkali aktivatör oranı %12, silikat modülü ise 1 oranında kullanılmıştır. Geopolimerlerin mukavemet üzerindeki etkileri 3 ve 28 günlük dayanımlarına bakılarak belirlenmiştir. Sonuçları incelendiğinde; SP oranı %0.25 ve %0.5 olan geopolimerlerin kopma ve basınç mukavemeti referans numunelerine kıyasla daha düşükken, %0.75 ve %1 SP oranındaki geopolimerler de kopma mukavemetinin referans numunelerine göre daha iyi olduğu ancak basınç dayanımının düşük olduğu belirtilmiştir. Deney numunelerinin 28 günlük basınç mukavemetlerinin referans numunelerine yakın olduğu ancak sodyum poliakrilat miktarının doğrusal olarak artmasıyla referans numunesinin kopma mukavemetinin değişmediğini sonucuna varılmıştır. Çalışma sonucunda 3 günlük mukavemetlerin belirgin sonuçlar vermediği, 28 günlük sertleştirme etkisinin daha açık olduğu belirtilmiştir. Sodyum poliakrilat katkısı ile hazırlanan

numunelerin 28 günlük kopma mukavemetinin referans numuneden önemli ölçüde daha yüksek olduğu ve kopmanın basınç mukavemetine oranının arttığı gözlemlenmiştir. Öte yandan SP dozajının artmasıyla cüruf bazlı geopolimerin kalitesi üzerindeki sodyum poliakrilat etkisi ve cüruf bazlı geopolimerin mekanik özelliklerinin doğrusal olmadığı belirtilmiştir.

Snoeck vd. (2014) yapmış olduğu çalışmada düşük çekme mukavemetinden dolayı oluşan çatlakları kontrol altına alabilmek için mikro lifler kullanmıştır. Buna ek olarak çatlak sızdırmazlığını arttırmak amacıyla beton içerisine süper emici polimerler eklenmiştir. SEP, iç kürleme yoluyla çatlak oluşumu sırasında kendi kendini iyileştirme kabiliyetini arttırması ve mekanik özelliklerin yeniden kazanılmasına yol açması nedeniyle kullanılmıştır. Çalışmada beton içerisine iki tip SEP bulunmaktadır. Beton içerisinde SEP katkısının emdiği suyu geri vermesi ile hidrasyonu sürdürebildiği ve  $\text{CaCO}_3$ 'ün çökeltmesi için su sağlayabildiği belirtilmiştir. Çatlama sırasında SEP partikülleri nemli bir ortama maruz kaldığında polimerin şiştiği ve zamanla su geçirgenliğinin azalması ile çatlağı kapattığı tespit edilmiştir. Beton içerisine katılan mikrofiberlerin ve süper emici polimerlerin kombinasyonunun, çatlakların kendi kendine iyileşmesine yol açtığı belirtilmiştir. Çalışmada SEP kullanımının neredeyse hiç yağış almayan bölgelerde veya doğrudan yağışa maruz kalmayan yapılar için faydalı olabileceği belirtilmiştir. Bunun nedeninin düşük miktarda emdikleri nemi çimentolu karışımın iyileşmesi için kullanacağı belirtilmiştir. Ayrıca ıslak/kuru döngülerin olduğu bölgelerde, kurak dönemlerde SEP içerisine su kaldığı bu nedenle, kendi kendini iyileştirme açısından her zaman geçerli olabileceği belirtilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, SEP miktarının çimento ağırlığının % 1'inden 2'sine veya % 4 ne arttırılması ile hem ilk çatlama mukavemetinde hem de en yüksek mukavemet değerinde bir azalma ile sonuçlandığı tespit edilmiştir.

Balçıkınlı vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, %0, %50, %100 oranlarıyla cüruf katkılı geopolimer harçlar üzerinde deneyler yapılmıştır. Numuneler 40, 60 ve 80°C kür sıcaklıklarındaki etüvde 6, 12 ve 24 saat bekletilmiştir. 28 gün suda kürlenmiş numuneler üzerinde eğilme ve basınç deneyi incelemelerinde %100 alkali aktivatörler ile üretilen YFC numunelerin çimento yerine kullanılabilirliği tespit edilmiştir. Deneyde % 100 oranında YFC içeren harç numunelerin basınç dayanımları, sıcaklık kürüne maruz bırakıldıklarında, % 0 YFC'li numunelere göre daha yüksek değerler almıştır. Her karışım için, en yüksek basınç dayanımı 60°C ve 6 saat ısı kürüne maruz bırakıldığında elde

edilmiştir. Deneyler sonucunda sıcaklık kürü uygulamasının belli koşullara kadar numune üzerinde olumlu etkisi olduğunu görülmüştür. Çalışmada YFC eklenen numunelerin dayanımlarının kontrol numunelerine oranla düşük olduğu görülmüştür.

Manzur vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada olumsuz koşullar nedeniyle (sıcaklık, bağıl nem, yetersiz vasıflı işçi, kalite kontrol eksiklikleri vb.) betonun uygun şekilde kürlenmemesi sonucu oluşan düşük dayanım performansına karşı alternatif çözümler aranmaktadır. Bu nedenle çalışmada süper emici polimer malzemenin dahili kürlenme maddesi olarak iç kürlenme ile betonda oluşan sorunlara çözüm olabileceği düşünülmüştür. Çalışmada SEP'nin absorpsiyon ve desorpsiyon özelliklerinin, dahili kürlenme maddesi olarak etkinliklerini belirlemek için önemli olduğu belirtilmiştir. Bu amaçla deneyde nem giderici kullanılmıştır. Kullanılan nem alma cihazı, hidrasyon sırasında geleneksel beton karışımlarında mevcut olan iç sıcaklığı ve bağıl nemi simüle edebildiği belirtilmiştir. Ayrıca SEP'nin beton karışımında dahili kür maddesi olarak etkinliğini araştırmak için basınç dayanımı, elastisite modülü, su geçirgenliği ve klorür geçirgenlik testleri yapılmıştır. Test sonuçları incelendiğinde; desorpsiyon testinden, SEP'nin suya daldırıldığında kendi ağırlığından daha fazla suyu emdiği ve emilen suyu nispeten yüksek sıcaklık ve düşük bağıl nemde serbest bıraktığı tespit edilmiştir. Basınç dayanımı ve elastisite modülü sonuçlarında ise SEP betonunun, tüm kürlenme koşullarında, kontrol numunelerinkinden daha yüksek basınç dayanımı ve elastisite modülüne sahip olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada dışarıdan ilave su olmadığı durumlarda betonda SEP katkısının dahili kürlenme ile olumsuz kürlenme şartları göz önüne alındığında referans numunelerine kıyasla yüksek dayanım ve daha düşük geçirgenlik açısından performansının iyi olacağı sonucuna varılmıştır.

Al-Nasra ve ark. (2015) çalışmalarında süper emici polimerin taze ve sertleşmiş betondaki dayanımını ve su tutma kabiliyetini araştırmak amacıyla çeşitli testler yapmışlardır. Erken aşamalarında betonun iç kürlenme işlemine yardımcı olan SEP, sonraki aşamalarda beton içerisindeki boşluklar ve çatlaklardan su akışını engellemeye yardımcı olan jel formunda suyu tutma özelliğine de sahiptir. Çalışmada üç örnek karışım hazırlanmıştır. Bunlar %0 SEP ile kontrol betonu, %0,15 ve %0,30 SEP ile karıştırılmış beton şeklindedir. Su, taze betondaki hidrasyon işlemi ve sertleşmiş betondaki kür işlemi için erken aşamalarında ihtiyaç duyulan temel etken olarak açıklanmıştır. Taze betona ilave edilen fazla miktarda su, genel olarak beton işlenebilirliğini ve sertleşmiş betonun kuruma rötresini arttırırken,

beton dayanımını azaltmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda kontrol betonu (%0 SEP) ile hazırlanan numunede 27 ml/dk civarında sabit su akışı ölçülmüştür. %0,15 SEP ile hazırlanan numune ise su akış hızında düşüş göstermiştir. Bu numunedeki akış hızı, yaklaşık 20 gün sonunda saatte birkaç damlaya düşmüştür. %0,30 SEP ile hazırlanan numuneler su tıkanması açısından çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Su akışının yaklaşık 72 saat (3 gün) içinde tamamen durduğu tespit edilmiştir. Beton karışımında kullanılan SEP miktarındaki artışın betonun su blokaj özelliğini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. SEP, 72 saatte karışımında kullanılan çimentonun %0,30'u gibi nispeten düşük bir yüzdeyle beton çatlaklarından su akışını engellemiş, betonun sızdırmazlık özelliği ve jelin sürekli genişmesi nedeniyle zamanla iyileşme göstermiştir. SEP'in fazla eklenmesinin su akış süresini önemli ölçüde kısaltmada, beton içerisinde daha fazla boşluk oluşturarak dayanımı azalttığı belirtilmiştir.

Snoeck vd. (2016) çalışmasında deformasyon ile sertleşen çimentolu kompozitlerin (Strain-Hardening Cementitious) SEP katkısı sonucu oluşturduğu otojen büzülmelelere karşı iyileşme özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada özellikle otojen iyileşmeye bağlı olarak ilk iyileştirmeden sonra tekrarlanabilirlik üzerinde durulmuştur. Çalışmada mikro fiber eklenerek hazırlanan ve gerinim ile sertleşen, SEP katkılı ve katkısız çimento esaslı malzemeler, eğilme testine tabi tutulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde; mikro fiber nedeniyle çoklu çatlamlar görülmüştür. Çatlak oluşumu sırasında SEP moleküllerinin içerisindeki suyu salarak, kendi kendini iyileştirmesi sonucu çatlakları önleyebileceği ve yüzeysel çatlakları kapatabildiği açıklanmıştır. Süper emici polimer içermeyen düz malzemede, ilk iyileşme döngüsünden sonra ilk çatlama mukavemetinin %46'sını geri kazanabildiği belirtilmiştir. İkinci iyileşme döngüsünden sonra, bu geri kazanımın %28 oranında olduğu tespit edilmiştir. SEP katkılı karışımlarda ise geri kazanım oranları ilk iyileşmede %75, ikinci iyileşmede %66 oranında olduğu bulunmuştur. Bu artışın gözenek sıvısından ve çatlak boyunca azalan nüfuzdan kaynaklanabileceği şeklinde açıklanmıştır. Çatlağın iyileşmesi ve kapanmasının, genel olarak zararlı maddelerin daha az girmesini sağlayacağı belirtilmiştir. Çalışma sonucunda SEP katkısının çatlakta şişme etkisi ve ardından kristalleşme nedeniyle yapıların dayanıklılığını ve hizmet ömrünü artırabileceği belirtilmiştir.



Gök ve Kılınç (2017) tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile ürettikleri geopolimer beton üzerinde 7 ve 28 günlük basınç dayanımları ve ortam koşulları incelenmiştir. Basınç dayanım testi uygulanmadan önce numunelere herhangi bir kürlenme yapmadan laboratuvar şartlarında ve dış ortamda bırakılmıştır. Deney sonuçlarına göre dış ortam koşulları, numunelerin erken yaşta basınç dayanımında artış sağlarken, laboratuvar koşullarında 28. günde daha yüksek basınç dayanımı sağladığı belirtilmiştir. Yüksek fırın cürufunun miktarı arttıkça geopolimer betonun basınç dayanımında artış görüldüğünü, YFC'nin çimento ağırlığının %25 oranında kullanıldığında basınç dayanımının 67 MPa gibi yüksek değerlere çıkabileceği belirtilmiştir.

Madhuri vd. (2018) çalışmasında, alkali aktif cüruf betonu (AASC) ve geleneksel betonun (CC) sülfürik asit saldırısına karşı performansları, basınç dayanımları, ağırlık değişimleri ve penetrasyon derinliği gibi parametrelerini araştırmıştır. Numuneler, ortam kuru ve ısı kuru olmak üzere iki kür yöntemi ile bekletilmiştir. Numuneler %2,5, %5 ve %10 konsantrasyon oranlarında hazırlanan sülfürik asit çözeltilerinde 56, 90 ve 180 gün bekletilmiştir. Isıyla kürleneler ise 24 saat süreyle 60 °C sıcaklıkta tutulduğu belirtilmiştir. Deney sonuçlarına göre AASC numunelerinin sülfürik asit çözeltisine maruz kalması durumunda ağırlık kaybının ve penetrasyon derinliğinin CC numunelerinden önemli ölçüde daha az olduğunu belirtilmiştir. AASC numunelerinin basınç dayanımı, CC numunelerine kıyasla daha fazla olduğu açıklanmıştır. Asit çözeltisinin konsantrasyonu arttıkça, korozyon derinliğindeki artışın maruz kalma süresine de bağlı olduğu belirtilmiştir. AASC numunelerinin CC numunelerine göre daha az bozulmaya uğradığı açıklanmış ve bazı AASC numunelerinde hafif renk değişiklikleri gözlemlendiği belirtilmiştir.

Thunuguntla vd. (2018) yaptıkları çalışmada alkaliler kullanılarak hazırlanmış olduğu yüksek fırın cürufu betonun mekanik ve dayanıklılık performansını incelemişlerdir. %5 oranında çeşitli çözeltiler hazırlanarak (sülfat, klorür ve nitrat) AASC'nin asit atağı 56 günlük süreçte test edilmiştir. Sonuçlara göre aktivatör konsantrasyonunun, AASC'nin mekanik mukavemeti ve alkali çözelti/bağlayıcı oranı üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğunu bulunmuştur. Asit saldırı testi ve XRD'den elde edilen sonuçlara göre, AASC'nin iyi bir dayanıklılığı olduğunu belirtilmiştir. AASC'nin mekanik dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerinde en etkili parametrenin NaOH konsantrasyonu olduğu ve alkali çözelti/bağlayıcı oranı olduğu belirtilmiştir. AASC, su emmeye karşı yüksek direnç

göstermesine rağmen kılcal emiciliğinin düşük olduğu tespit edilmiştir. XRD analizi sonucunda,  $H_2SO_4$  çözeltisine bekletilen AASC numunelerinde alçıtaşı oluştuğunu ve alçıtaşı oluşumunun; ağırlık, UDH ve basınç mukavemetinde azalmaya neden olduğu belirtilmiştir. Sülfürik asitte bekletilen AASC numunelerinin bozulmasının köşelerden başlayıp içe doğru ilerlediği gözlenmiştir.

Afridi vd. (2019) çalışmasında uçucu kül katkılı geopolimer harçlara süper emici polimer (SEP) eklenmesi sonucunda numunelerin kimyasal etkilere karşı dayanıklılığını araştırmıştır. Çalışmada numuneler öncelikle  $80^\circ C$  etüvde, daha sonra 24 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. Kimyasal etkilerini incelemek için hazırlanan numuneler 180 gün boyunca %5 hidroklorik asit (HCl), %5 sodyum sülfatın ( $Na_2SO_4$ ) ve %5 kalsiyum klorür ( $CaCl_2$ ) içerisinde bekletilmiş ve deney sonunda numunelerin ağırlık ve basınç dayanımındaki değişimler değerlendirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, SEP katkılı geopolimerlerin kontrol numunelerine kıyasla sülfata karşı çok iyi direnç gösterdiği bunun nedeninin elde edilen karışımın mikro yapısının yoğun ve kompakt olması olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca basınç ve ağırlık kayıplarının düşük olduğu ve asit ve klorür saldırısına karşıda iyi direnç gösterdiği belirtilmiştir. Geopolimer harçlarda SEP katkısı kılcal gözeneklerden asit ve klor gibi zararlı sıvıların içeriye alınmasını kısıtladığı için kimyasal etkilere karşı daha dirençli olduğu belirtilmiştir.

De Meyst vd. (2021) yapmış olduğu çalışmada düşük su-çimento oranının ( $<0,35$ ) yüksek performanslı harç ve betonların dayanımını azalttığı ve otojen büzölmelere yol açtığı belirtilmiştir. Bu büzölmeler sonucu beton ve harçlarda çatlamlar gözlenmektedir. Çalışmada yüksek performanslı harç ve betona iki farklı SEP ilavesi yapılmış ve SEP katkısının otojen büzölmeleri azaltma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu etkileri incelemek amacıyla harçta oluklu boru testi ve beton için kısıtlanmış halka testleri yapılmıştır. Çimento esaslı malzemelere eklenen SEP'in sertleşmiş betonda büyük gözenekler oluşmasına neden olduğu belirtilmiştir. Bu boşluklar nedeniyle SEP eklenen karışımlarda her yaşta basınç dayanımlarında düşüş tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra SEP miktarının artmasıyla karışım içerisinde daha fazla dahili kütleme suyu bulunduğu belirtilmiştir. Dahili kür suyunun yüksek bağıl nemi korumasıyla betonun kendi kendine kurummasını önlediği ve bunun sonucunda otojen büzölmeleri azalttığı bulunmuştur. Ayrıca SEP katkısı ile nihai priz süresinde çimento içeren malzemelerde, referans karışımına kıyasla bir gecikme gözlemlendiği belirtilmiştir. Çalışma sonuçları incelendiğinde; poliakrilat

içeren SEP karışımlarının 7 günün sonundaki otojen büzülmesinin SEP katkısı olmayan referans karışımlara oranla %97 azaldığı tespit edilmiştir. Çimento hamurunda ise 7 günün sonunda otojen büzülmelerin tamamen azaldığı ve genleşmenin meydana geldiği belirtilmiştir. Çalışmada SEP miktarı %0,257 m'den %0,38 m'ye ve çimento kurşun ağırlığına göre %0,57 m'ye yükselttilerek çalışma yapılmıştır. Buna göre 7 gün sonunda otojen büzülmelerin betonda sırasıyla %80, %85 ve %89 oranında ve harçta sırasıyla %19, %20 ve %70 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. Kısıtlanmış büzülme halkası testi incelendiğinde poliakrilat katkılı SEP'lerde oluşan gerilmelerin referansa kıyasla %88 oranında azaldığı ve halkaların çatlamasını engellediği görülmüştür. Araştırmacılar tarafından çimento esaslı malzemelerin işlenebilirliği ve basınç dayanımı üzerindeki bazı olumsuz etkilere rağmen, doğru miktarda SEP kullanılmasının yüksek performanslı harç ve yüksek performanslı betonda otojen büzülme azaltabileceği belirtilmiştir.

Yang vd. (2022) çalışmalarında, süper emici polimer katkısı ile hazırlanan alkali ile aktifleştirilmiş cüruf (AAS) harcının sıvı-bağlayıcı oranı ve karıştırma sırasındaki etkileri üzerinde araştırma yapmışlardır. SEP'in sıvı-bağlayıcı oranının artırılması akışkanlığın artmasını sağladığını ancak SEP katkısı ile AAS harcının mukavemetini düşüğü tespit edilmiştir. Çalışmada 0,03, 0,06 ve 0,09 oranlarında katılan ekstra sıvı-bağlayıcı miktarı içerisinde, 0,09 sıvı-bağlayıcı oranı dahili olarak kürlenmiş numunelerin mukavemetinin referans numunelerinden daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar tarafından SEP kaynaklı büyük boşlukların olmasına rağmen, kılcal ve jel gözenekliliğinin dahili kürlenme ile iyileştirilebileceği açıklanmıştır. SEP içeren karışımların daha yüksek basınç dayanımının ölçülmesi bu nedenden dolayı olabildiği belirtilmiştir. AAS harcının otojen büzülmesinin, SEP'in dahil edilmesiyle önemli ölçüde azaltıldığı görülmüştür. Sıvı-bağlayıcı oranının artmasıyla hafifletici etkisinin sınırladığı belirtilmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında; ön çalışma kapsamında belirlenen numune karışımı baz alınarak çalışma geliştirilmiş ve yöntem belirlenmiştir. Ön çalışmada yapılan dayanım ve su emme kapasitesi ölçümleri sonucu %6 sodyum konsantrasyonuna sahip 60 °C etüvde kurlenmiş ve SEP miktarı 50 gr olan BS-2/50 gr/60 °C karışımı ideal karışım şartlarında olması nedeniyle tez çalışmasında konunun geliştirilmesi amacıyla referans karışım olarak seçilmiştir. Geopolimer harç üretiminde kullanılan malzemelere ek olarak yüksek su emme kapasitesine sahip sodyum poliakrilat olarak adlandırılan süper emici polimer eklenmiştir. YFC alkali aktivasyonu ve SEP'in uygulandığı çözeltili karışımlar için literatür çalışmasına uygun olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. ASTM C109 standardında uygun şekilde çalışmada kullanılan YFC:agrega:alkali çözelti oranı belirlenmiştir. Bu oran 1:2,75:0,485 şeklindedir. Tez çalışmasında kullanılan karışım oranı Çizelge 3.1'de verilmiştir. Çalışma kapsamında sıvı karışım oranı, sodyum konsantrasyonu (%6) ve silikat modülü (1,5) sabit tutulmuş, karışım suyu sıcaklığı, SEP sıvı içerisinde emdirilme yöntemi (SEP-1, SEP-2), kür yöntemi ve kür süresi değişken faktörler olarak belirlenmiştir. Harç numuneleri bu değişkenlere göre 6 farklı şekilde hazırlanmıştır. Üretilen numuneler 1, 7 ve 28 gün ayrı ayrı su ve çözelti havuzlarında bekletilmiştir. Sertleşmiş harç numunelerinin 28, 56, 90 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Numunelere ayrıca 1 ay süre ile asit-sülfat ve ıslanma-kuruma deneyleri uygulanmıştır.

Çizelge 3. 1. Çalışmada kullanılan karışım oranı (1 dm<sup>3</sup> için)

Numune Kodu	Cüruf	Agrega	Su	NaOH	(Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )
BS-2/ 50 gr SEP / 60 °C	520	1420	117	27	223

#### 3.1. Ön Çalışma Karışım Tasarımı

Tez çalışmasında, yapılan ön çalışmadan yararlanılmıştır. Çalışma kapsamında işlenebilirlik artarken içten kurlenme etkisi ile kuruma çatlaklarının azalması ve dayanım gelişimine katkı sağlanması amacıyla SEP katkılı harçlar üretilmiştir. Çıkan sonuçlar ile tez çalışmasında kullanılacak karışım oranı belirlenmiş, izlenecek yol için ön bilgi edinilmesini amaçlanmıştır. İlgili açıklamalar bu bölümde ve 4.1. Ön çalışma araştırma bulguları ve 5.1. Ön çalışma sonuçları bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır.

Yapılan ön çalışmada sodyum poliakrilat ilavesinin alkaliler ile aktive edilmiş geopolimer harçlarda oluşturduğu boşluklu yapı ile su emme kapasitesi, dayanım ve çatlaklara etkileri araştırılmıştır. YFC aktivasyonu için, NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılmıştır. ASTM C109 standartına uygun şekilde karışımın çözelti oranı 1:2,75:0,485 ( YFC:agrega:alkali ) olarak belirlenmiştir. Yüksek fırın cürufu hidrasyonunu ve mekanik dayanımına etkilerinden dolayı sodyum konsantrasyonu %4, %6, %8 oranlarında ve aktivatör çözeltisinin silikat modülü (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O) oranı 1,5 olarak belirlenerek karışımlar hazırlanmıştır. Çalışmada ayrıca geopolimer harçlara 50, 100 ve 150 gr oranlarında SEP eklenerek karışım tasarımı geliştirilmiştir. 40x40x160 mm boyutlarında üretilen kiriş numunelere 23 °C ve 60 °C etüvde olmak üzere iki farklı grupta kür uygulanmıştır. Ön çalışmada adlandırılan MH-1, MH-2, MH-3 referans numunelerini, BS-1, BS-2, BS-3 ise SEP eklenen numuneleri ifade etmektedir. Çalışmaya ait karışım oranları Çizelge 3.2’ de verilmiştir. Elde edilen karışımların taze halde yayılma çapı ve sertleşmiş halde eğilme ve basınç dayanımları ile su emme kapasiteleri ölçülmüştür (Genç, Sevim, & Balçıkanlı Bankir, 2022).

Çizelge 3. 2. Ön çalışmada uygulanan karışım tasarımı ( 1 dm<sup>3</sup> için karışım oranları )

	Silikat Modülü	Numune Kodu	Sodyum Konst.	Deney Sınıflandırma	Kür Sıcaklığı	YFC (gr)	Agrega (gr)	Su (gr)	NaOH (gr)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (gr)	SEP Oranları(gr)		
Katkısız (Referans) Numuneler	1,5	MH-1	4	MH-1/23 °C	23°C	520	1420	165	18	150	0		
				MH-1/60 °C	60°C	520	1420	165	18	150	0		
		MH-2	6	MH-2/23 °C	23°C	520	1420	117	27	223	0		
				MH-2/60 °C	60°C	520	1420	117	27	223	0		
		MH-3	8	MH-3/23 °C	23°C	520	1420	70	36	298	0		
				MH-3/60 °C	60°C	520	1420	70	36	298	0		
		Katkılı Numuneleri (Stiper Emici)	1,5	BS-1	4	BS-1/23 °C/(50 gr)	23°C	520	1420	165	18	150	50
						BS-1/23 °C/(100 gr)		520	1420	165	18	150	100
						BS-1/23 °C/(150 gr)		520	1420	165	18	150	150
BS-1/60 °C/(50 gr)	520					1420		165	18	150	50		
BS-1/60 °C/(100 gr)	60°C					520		1420	165	18	150	100	
BS-1/60 °C/(150 gr)	520					1420		165	18	150	150		
BS-2	6			BS-2/23 °C/(50 gr)	23°C	520	1420	117	27	223	50		
				BS-2/23 °C/(100 gr)		520	1420	117	27	223	100		
				BS-2/23 °C/(150 gr)		520	1420	117	27	223	150		
				BS-2/60 °C/(50 gr)		60°C	520	1420	117	27	223	50	
				BS-2/60 °C/(100 gr)			520	1420	117	27	223	100	
				BS-2/60 °C/(150 gr)			520	1420	117	27	223	150	
BS-3	8			BS-3/23 °C/(50 gr)	23°C		520	1420	70	36	298	50	
				BS-3/23 °C/(100 gr)			520	1420	70	36	298	100	
				BS-3/23 °C/(150 gr)			520	1420	70	36	298	150	
BS-3	8	BS-3/60 °C/(50 gr)	60°C	520	1420	70	36	298	50				
		BS-3/60 °C/(100 gr)		520	1420	70	36	298	100				
		BS-3/60 °C/(150 gr)		520	1420	70	36	298	150				

### 3.2. Malzemeler ve Özellikleri

Tez çalışmasında ön çalışma sonucunda elde edilen verilere uygun olarak belirlenmiş YFC, agrega, su ve alkali aktivatör oranları kullanılmıştır. SEP oranı ise katkısız numuneler olan E ve F numuneleri hariç 50 gr olarak sabitlenmiştir. Kullanılan malzemeler ile ilgili detaylar aşağıda verilmiştir.

#### 3.2.1. Ögütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC)

Çalışmada kullanılan ÖGYFC İskenderun Demir-Çelik Fabrikası'ndan temin edilmiştir. ÖGYFC'nin özgül ağırlığı  $2,89 \text{ g/cm}^3$ , özgül yüzey alanı ise  $540 \text{ m}^2/\text{kg}$ 'tir. Kullanılan cürufun kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'de detaylı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3. 3.Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu (Türker ve ark., 2016)

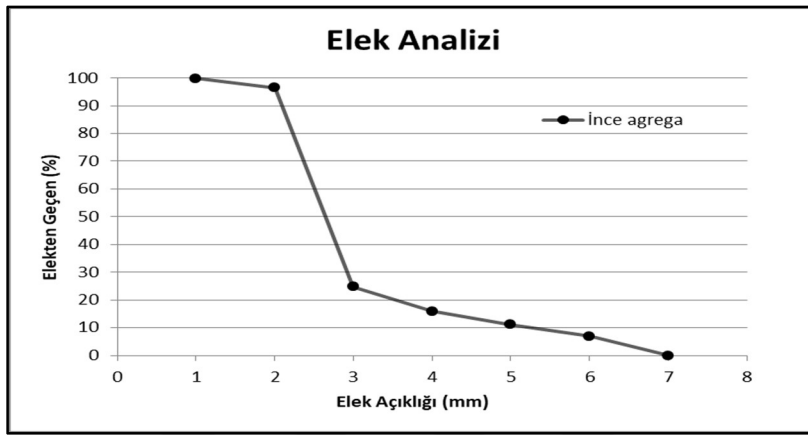
Bileşen	Analiz Sonuçları (%)
SiO <sub>2</sub>	43,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,93
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,74
CaO	36,24
MgO	6,10
SO <sub>3</sub>	0,60
S <sup>-2</sup>	0,51
Na <sub>2</sub> O	0,28
K <sub>2</sub> O	0,74
Na <sub>2</sub> O+0.658K <sub>2</sub> O	0,76
Kızdırma Kaybı	0,01
Serbest Kireç	-

#### 3.2.2. Agrega

Tez çalışmasında kullanılan 0-4 mm boyutlarındaki ince agrega İskenderun bölgesindeki taş ocaklarından temin edilmiştir. Agreganın incelik modülü 3,5, özgül ağırlığı  $2,6 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$  olarak bulunmuştur. Karışımda kullanılan ince agreganın sınır değerleri Çizelge 3.4 ve granülometri eğrisi Şekil 3.1' de verilmiştir. Kullanılan agreganın elek analizi sonrası tane dağılımı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 4. İnce agreganın elekten geçme oranları (%)

Elek Boyutu (mm)	Elekten geçen (%)
	İnce Agregası (0-4 mm)
8	99,8
4	96,5
2	24,7
1	15,8
0.5	11,1
0.25	6,9
İncelik Modülü	3,5



Şekil 3. 1. Agregası tane dağılımı eğrisi



Şekil 3. 2. Agregası tane dağılımı

### 3.2.3. Su

Taze betonda hidratasyon işlemi ve erken aşamalarında sertleşmiş betonda kütleme amacıyla gerekli olan karışım suyu ve kür suyu İskenderun şehir şebeke suyudur.

### 3.2.4. Alkali aktivatörler

YFC, UK gibi puzolanların bağlayıcılık özelliğini arttırmak amacıyla NaOH, KOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> gibi alkaliler kullanılmaktadır. Puzolanların yapısındaki Ca ve Si birleşenlerinin aktivatörler ile reaksiyonu sonucunda aktif hale gelmektedir. Puzolanların bağlayıcılık özelliği kazanması ile yüksek mukavemetli, hızlı priz alabilen, dayanıklı çimentosuz beton üretimi yapılabilmektedir. Çalışmada bu amaçla Sodyum Hidroksit (NaOH) ve Sodyum Silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) kullanılmıştır. Ön çalışmada; SEP katkılı numunelerde basınç ve su emme değerleri %6 oranında kullanıldığında iyi sonuçlar vermesi sonucu tez çalışmasında bu oran sabitlenerek üretim sırasında alkali çözelti, Na<sup>+</sup> konsantrasyonu %6, silikat modülü de 1,5 oranında hazırlanmıştır. Wang ve ark. (1994), alkali aktivasyonunda kullanılan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranının en iyi %1- 1,5 aralığında olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada aktivatörler yüksek fırın cürufu aktivasyonu, SEP'in çözelti içerisinde emdirilmesi ve numuneler için kür havuzu oluşturmak amacıyla 3 farklı şekilde kullanılmıştır.

#### **Sodyum hidroksit (NaOH)**

Kostik soda olarak ta bilinen sodyum hidroksit ZAG Kimya firmasından temin edilmiştir. NaOH katı formda ve beyaz renkli, suda iyi çözünen bir kimyasaldır. Sodyum hidroksit'in suda iyi çözünmesi için iyi karıştırılmış olması önemlidir ve çözünmesi sonucu yüksek derecede ısı açığa çıkmaktadır. Yüksek fırın cürufu aktivasyonu ve sodyum konsantrasyon oranını ayarlamak için kullanılmıştır. Sodyum hidroksitin yoğunluğu 2,13 g/cm<sup>3</sup>, erime noktası 318 °C'dir. Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'de detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 3. 5. Sodyum hidroksit kimyasal kompozisyonu

<b>Parametre</b>	<b>Birim</b>	<b>Değer</b>
Toplam alkalinite (NaOH)	g/kg	≥990
Sodyum Karbonat (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	g/kg	≤4
Sodyum Sülfat (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	mg/kg	≤80
Sodyum Klorit (NaCl)	mg/kg	≤200
Demir (Fe)	mg/kg	≤10
Civa (Hg)	mg/kg	≤0,1
Arsenik (As)	mg/kg	≤1
Kadmiyum (Cd)	mg/kg	≤1



Çizelge 3.5. (Devam) Sodyum hidroksit kimyasal kompozisyonu

Parametre	Birim	Değer
Krom (Cr)	mg/kg	≤1
Kurşun (Pb)	mg/kg	≤0,5
Antimon (Sb)	mg/kg	≤5
Selenyum (Se)	mg/kg	≤5
Nikel (Ni)	mg/kg	≤2

### **Sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)**

Sodyum silikat (Cam suyu) Bereket Kimya firmasından temin edilmiştir. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> katı veya sıvı, renksiz veya yeşil renkte olabilmektedir. Çözündüğünde şurupsu koyu renkte görünmektedir. Yüksek fırın cürufu aktivasyonu ve sodyum konsantrasyon oranını ayarlamak için kullanılmıştır. Sodyum silikatın kimyasal özellikleri Çizelge 3.6'da detaylı olarak verilmiştir.

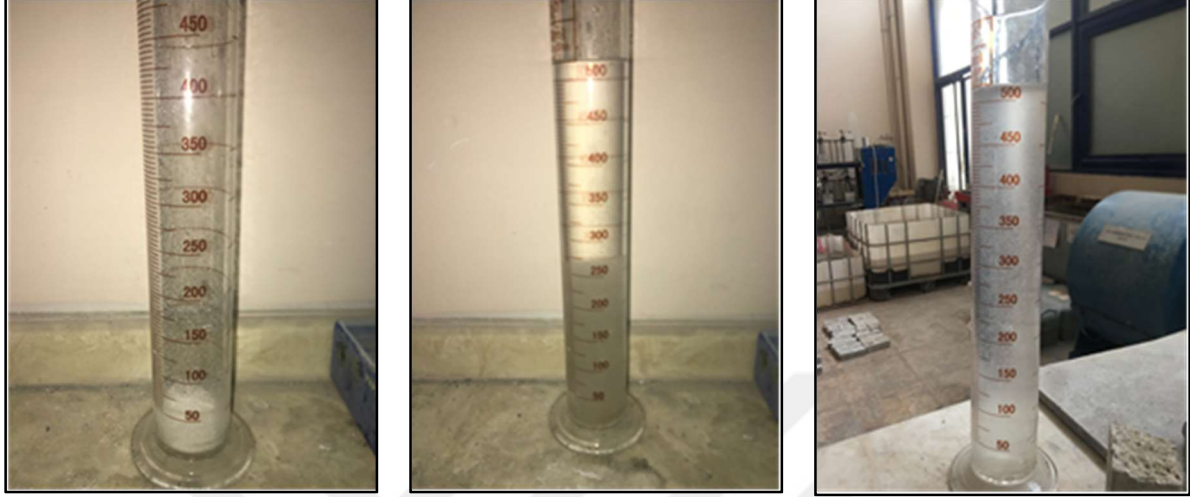
Çizelge 3. 6. Sodyum silikat kimyasal kompozisyonu

Parametre	Birim	Değer
Görünüşü		Renksiz,berrak,kıvamlı sıvı
Ağırlıkça Modül (SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O)		3,19
Moleküler Modül (SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O)		3,30
Bome (20 °C)	*BE	39,4
Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	1,373
Na <sub>2</sub> O	%	8,52
SiO <sub>2</sub>	%	27,09

### **3.2.5. Sodyum poliakrilat (C<sub>3</sub>H<sub>3</sub>NaO<sub>2</sub>)<sub>n</sub>**

Süper emici poliakrilat olarak da adlandırılan Sodyum Poliakrilat ZAG Kimya firmasından temin edilmiştir. C<sub>3</sub>H<sub>3</sub>NaO<sub>2</sub> olarak geçen süper emici poliakrilatın su emiciliği kendi ağırlığının 200-300 katına çıkabilen bir yapıya sahiptir. Beyaz, katı formda ince granül yapıdaki yüksek su emme kapasitesine sahip bu polimerler su emdikten sonra Şekil 3.3'de görüleceği gibi hacmini arttırarak jelimsi bir kıvam almaktadır. Çalışmada kullanılan Sodyum poliakrilat'a ait kimyasal özellikler Çizelge 3.7'de verilmiştir. SEP'in su emme kapasitesi değişkenlik gösterebilmektedir. Bunu etkileyen faktörler, polimerin saflık değeri ve partikül boyutuna göre farklılık gösterebilmektedir. Sodyum poliakrilat su apsorbiyonu

sonucu şişer, sıcaklık etkisinde veya kuru ortamlarda ise geri dönüşümlü olacak şekilde büzülür (Lokeshwari ve ark., 2021).



Şekil 3. 3. SEP'in su ile etkileşimi

Çizelge 3. 7. Sodyum poliakrilat kimyasal kompozisyonu

Parametre	Standart	Değer
Görünüş	Beyaz granül	Beyaz granül
Rutubet (wt %)	Maks. 5,0	3,2
Tutma Kapasitesi (g/g)	Min. 30	33,6
Yük Altında Emilim (0,7 psi) (ml/g)	Min. 22,0	23,5
Kalan Monomer (ppm)	Maks. 500	350
Dökme Yoğunluğu (g/ml)	0,6-0,7	0,64
pH	5,6-6,7	6,1
Parçacık Boyut Dağılımı (%)		
	850 µm üstü	Maks. 2,0
	150 µm'ye kadar	Maks. 6,0

### 3.3. Deney Tasarımı

Bu tez çalışmasında sodyum poliakrilat ilavesi ile hazırlanan geopolimer harçların davranışlarını araştırmak amacıyla çeşitli deney içerikleri oluşturulmuştur. A,B,C,D,E,F olarak adlandırılan numuneler SEP'in ortam, su ve etüv kür şartlarını araştırmak, içerisine katılan malzemelere karşı davranışı incelemek amacıyla deney tasarımı 6 farklı şekilde hazırlanmıştır. E ve F olarak isimlendirilen numuneler referans numunesi olarak belirlenmiştir. A, B, C, D numuneleri ise SEP katkısı ile hazırlanan deney numuneleridir.

Sodyum poliakrilat ile hazırlanan numuneler içerisinde çözdürüldükleri sıvıya göre 2'ye ayrılmıştır. SEP oranı sabit tutulan bu numuneler suda (SEP-1) ve alkali aktivatör (SEP-2) çözeltisi içerisinde çözdürülmüştür. Numuneler içerisine katılan karışım suyu sıcaklığına göre de 23 ve 100 °C olmak üzere 2'ye ayrılmıştır. %6 sodyum konsantrasyon oranına sahip 50 gr SEP katkısı ile hazırlanan numuneler karışım suyu sıcaklığı, SEP içerisinde emdirilme yöntemi, kür yöntemi ve kür süresi değişken faktörler olarak belirlenmiştir. Değişken faktörlere göre hazırlanan 270 adet harç karışımı 40x40x160 mm kiriş numunesi standart sapmaları en aza indirilmesi amacıyla 3'er adet toplam 810 numune üretilmiştir. Hazırlanan numuneler uygulanan yöntemlere göre kodlanmıştır. Numune kodlarına ait açıklama Çizelge 3.8'de gösterilmiştir.

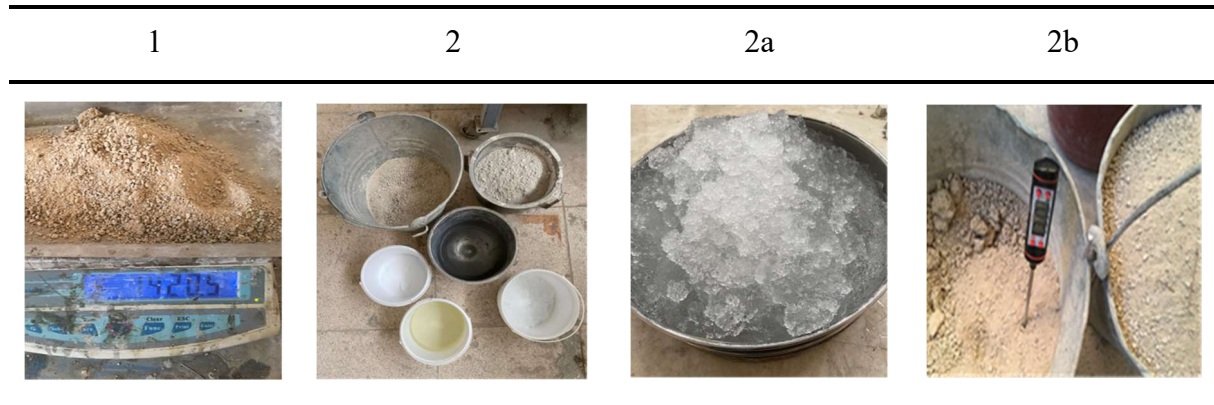
Çizelge 3. 8. Deney tasarımında kullanılan numune kodları

AS-13 /7/ 28 X	Açıklama
<i>A, B, C, D, E, F</i>	Karışım Kodu
<i>Ortam, S, Ç, E</i>	(Ortam, Su, Çözelti, Etüv)
<i>1- 48</i>	Numune sayısı
<i>0, 1, 7, 28</i>	Suda kür süreleri
<i>28, 56, 90</i>	Ortam kür süreleri
IK	Islanma-kuruma
A	Asit deneyi
S	Sülfat deneyi
<i>X, Y, Z</i>	Kontrol numuneleri

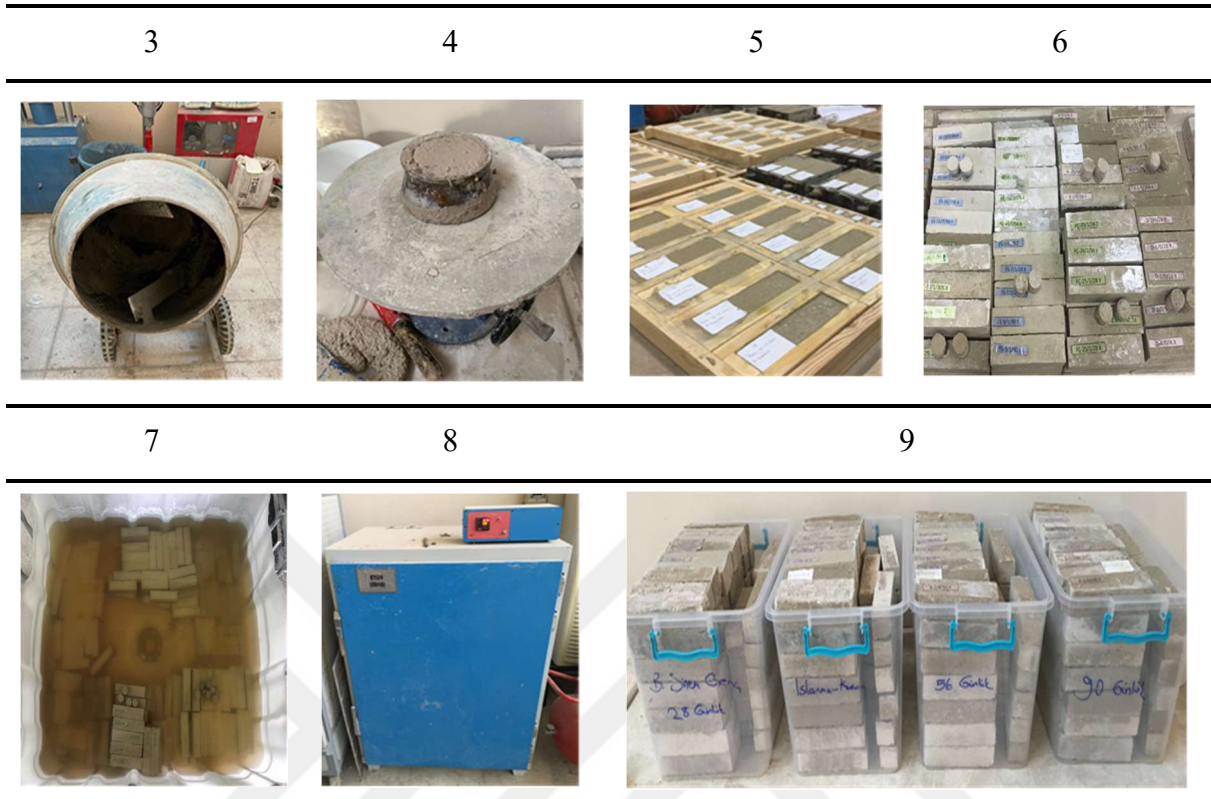
Numunelerin hazırlık aşamasında öncelikle harca eklenen karışım suyundan bağımsız olarak SEP'nin ayrı bir su (SEP-1) ve çözelti (SEP-2) içerisinde jel kıvamına gelmesi sağlanmıştır. SEP'in suyu emme kapasitesini incelemek amacıyla, 1 lt su içerisinde 5 gr sodyum poliakrilat eklenerek şişmesi beklenmiş daha sonra hacim alan SEP süzülerek suyu emme miktarı belirlenmiştir. Sodyum poliakrilatın su emme oranı 1 gramı için %0,87 olarak hesaplanmıştır. Deney sırasında A ve B numuneleri SEP-1 içerisine su eklenerek; C ve D numuneleri ise SEP-2 içerisine harç karışımından bağımsız olarak karışım tasarımında

belirlenen aktivator oranı ile aynı oranda çözelti ( Su + NaOH + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ) eklenerek hazırlanmıştır. E ve F numunelerinde SEP katkısı bulunmamaktadır. Numunelerin üretim süreci Şekil 3.4' deki gibi gerçekleşmektedir.

A numunesi oda sıcaklığında 50 gr SEP-1 eklenerek standart olarak hazırlanan karışım numunesidir. Burada ön çalışma tekrarlanarak numuneler hazırlanmıştır. Karışımı hazırlarken öncelikle kuru karışımlar tartılmıştır. Mikser yardımıyla kuru malzemeler ( agrega + cüruf ) karıştırıldıktan sonra ayrı bir kaptaki sıvı karışımlar karıştırılmıştır ( 23 °C Su + NaOH+ Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) ve kuru karışıma ilave edilmiştir. Son olarak A numunesi için hazırlanmış olan 50 gr SEP-1 eklenerek karışım tamamlanmıştır. B numunelerinde A karışımından farklı olarak sıvı karışım için kullanılan alkali aktivatörler 100 °C sıcaklıktaki su içerisinde hazırlanarak karışıma eklenmiştir. C ve D numunelerinin SEP oranı A ve B numuneleri ile aynıdır ancak su ile değil alkali aktivatör çözeltisinde (SEP-2) emdirilerek hazırlanmıştır. Burada SEP için hazırlanan alkali aktivatör karışımı harç içerisine eklenen aktivatörden ve karışım suyundan ayrı olarak hazırlanmış ve SEP'nin çözeltiyi alarak jel kıvamına gelmesi sağlanmıştır. Harçlar hazırlanırken C numunesinin karışım suyu 23 °C sıcaklıkta, D numunesi ise 100 °C'de eklenmiştir. Yayılma tablası deneyinin ardından numuneler kalıplara yerleştirilmiş ve priz alması için 1 gün bekletilmiştir. E ve F katkısız numunelerdir. E numunesinde A ve C' nin referans numunesi olarak belirlenmiştir. Bu aşamada numuneler hazırlanırken sıvı karışım içerisine 23 °C'deki su eklenmiştir. F numunesi ise B ve D numunelerin katkısız halidir. Burada alkali aktivatörlü karışım 100 °C kaynamış su eklenerek hazırlanmış ve kuru karışıma ilave edilmiştir. Her iki karışımda da SEP eklenmeden karışım mikser yardımıyla karıştırılmış ve kalıplara dökülmüştür.



Şekil 3. 4. Deney numunelerinin üretim süreci



Şekil 3. 4. (Devam) Deney numunelerinin üretim süreci

B, D, F numuneleri sıvı karışım için alkali aktivatörlere sıcak su eklenerek hazırlanmıştır. İşlem sırasında agrega, YFC ve aktivatörlerin sıcaklıkları tek tek ölçülerek karışıma katılmıştır. Burada kış aylarında düşük sıcaklıklara maruz kalan malzemeler 30-35 °C'lere kadar etüvde ısıtılarak karışıma eklenmiştir. Karışımlara eklenecek olan malzemelerin yaklaşık olarak ısıtıldıkları dereceler Çizelge 3.9'da detaylı olarak verilmiştir. Daha yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerde hidratasyon hızının artması sonucu ani priz olarak katılaştığından kalıplara dökülemediği Bu nedenle dereceler bu şekilde belirlenmiştir.

Çizelge 3. 9. B, D, F numunelerine ait karışım sıcaklık dereceleri

	Sıcaklık Değerleri (°C)
Ortam Sıcaklığı	22-23
Agrega	30-33
Cüruf	30-33
Su	97-100
<b>Karışım Sonrası</b>	
Sıvı Karışım	49-51
Harç	33-36

Hazırlanan tüm karışımlar 1 günlük kür işleminden sonra kalıplardan çıkarılmış ve ağırlıkları tartılmıştır. Etüv ve ortam şartlarında bekletilen numuneler haricinde diğer numuneler 1, 7, 28 gün boyunca su ve çözelti havuzlarında kürlenmeye bırakılmıştır. 28. günün sonunda tüm numunelerin 80 °C etüvde tamamen kuruması sağlanmıştır. Tekrar ortama alınan numuneler 28, 56, 90 gün dayanımları ölçülmesi amacıyla ortamda bekletilmiştir. Günlerini tamamlayan numuneler tartılmalarının ardından UDH, RF, kapilarite, basınç ve eğilme deneylerine yapılmıştır. Sonuçlar kaydedilmiş ve 'Araştırma Bulguları' bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır.

A,B,C,D,E,F numunelerine ayrıca asit, sülfat ve ıslanma-kuruma deneyleri uygulanmıştır. 1 ay boyunca ayrı hazırlanan asit ( $H_2SO_4$ ) ve sülfat ( $Na_2SO_4$ ) çözelti tanklarında numuneler bekletilmiştir. İşlem öncesi ve sonrasında ağırlıkları tartılmış olan numunelere daha sonrasında UDH, kapilarite, basınç ve eğilme deneyleri uygulanmıştır. Islanma-kuruma deneyinde 30 gün süre ile su - etüv döngüsü uygulanmıştır. Her 5 çevrimde bir ağırlıkları tartılan numunelerin deney sonunda UDH, kılcal su emme, basınç ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Basınç deneylerinin ardından karbonatlaşma derinliğini incelemek amacıyla her numuneden alınan parçalar ortamda bekletilmiş ve daha sonra %1 oranında hazırlanan fenoltaleyn çözeltisi numunelerin hava ile temas etmeyen kısımlarına püskürtülmesi sonucu karbonatlaşmış yüzey ölçümleri yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Deney tasarımına ait karışım parametreleri Çizelge 3.10'da verilmiştir.

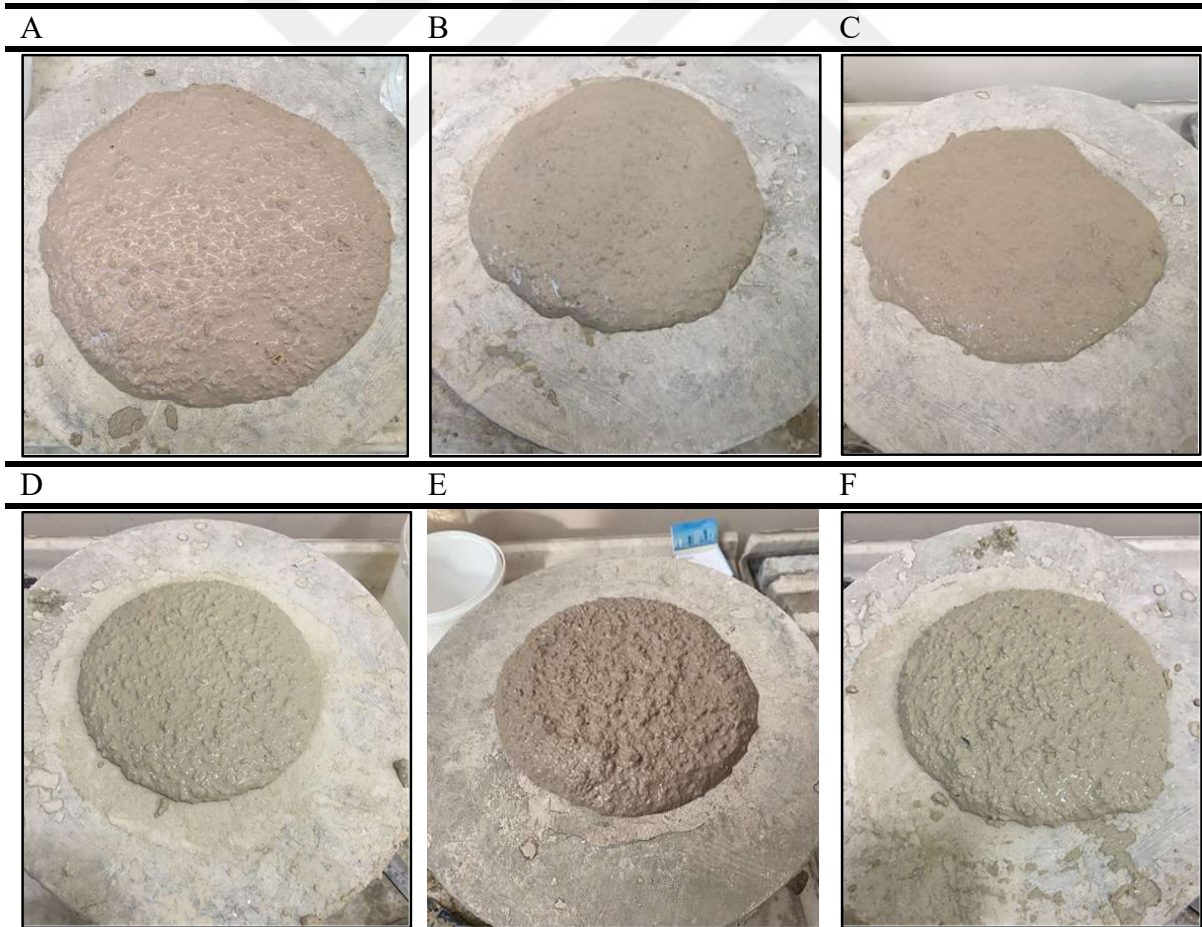
Çizelge 3. 10. Çalışmada uygulanan deney tasarımı

Numune Türü	Karışım İçeriği	Karışım Suyu	SEP Katkısı	SEP Miktarı (gr)	Kür Yöntemi	Kür Süresi
A		23 °C	SEP-1 Su	50	Suda	0 1 7 28
					Çözeltide	1 7 28
					Etüvde	6 saat (80 °C)
B		100 °C	SEP-1 Su	50	Suda	0 1 7 28
					Çözeltide	1 7 28
C	Cüruf -520gr- + Agrega -1420gr- + Su -117gr- + NaOH -27gr- + Na <sub>2</sub> SiO -223gr-	23 °C	SEP-2 (SM 1,5, %6 NaOH Çözelti Emmiş)	50	Suda	0 1 7 28
					Çözeltide	1 7 28
					Etüvde	6 saat (80 °C)
D		100 °C	SEP-2 (SM 1,5, %6 NaOH Çözelti Emmiş)	50	Suda	0 1 7 28
					Çözeltide	1 7 28
E		23 °C	-	0	Suda	0 1 7 28
					Çözeltide	1 7 28
					Etüvde	6 saat (80 °C)
F		100 °C	-	0	Suda	0 1 7 28
					Çözeltide	1 7 28

### 3.4. Deney Yöntemleri

#### 3.4.1. Yayılma tablası deneyi

Taze haldeki harç numunelerinin kıvamını test etmek amacıyla TS EN 1015-3 standardına uygun olarak yayılma tablası deneyi yapılmıştır. Deneyde 300 mm çaplı tabla üzerine; taban çapı 100 mm, üst çapı 70 mm ve yüksekliği 60 mm olan kesik koni şeklinde kalıp yerleştirilerek, harç karışımı kalıba her tabakaya tokmak ile 10 kez vurulmak sureti ile 2 tabaka halindeki yerleştirilir. Taşan malzeme sıyrılıp alındıktan sonra kesik koni kalıbı kaldırılır. Tablannın manuel olarak 15 kez düşürülmesinin ardından yayılan harcın her iki dik doğrultuda yayılma çapları ölçülür. Ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak sonuçlar değerlendirilir. A,B,C,D,E,F karışımlarının kıvamları Şekil 3.5’de görülmektedir.



Şekil 3. 5. A, B, C, D, E, F numunelerinin işlenebilirliklerinin kıyaslanması



### 3.4.2. Birim hacim ağırlık deneyi

Çalışmada sertleşmiş numunelerin doygun birim hacim ağırlıkları ( $\gamma_{dyk}$ ) ile kuru birim hacim ağırlıkları ( $\gamma_k$ ) hesaplanmıştır. Prizini alan sertleşmiş harçların ağırlığının (içerisindeki boşluklu yapısı dahil edilerek) hacmine bölünmesi sonucu birim hacim ağırlık hesabı yapılmaktadır. 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler çalışmada belirlenen kür koşullarına ve kür süresine bağlı olarak su ve çözelti tanklarında bekletilmiştir. Deney ölçümleri yapılırken kür sürelerini tamamlayan numunelerin doygun haldeki birim hacim ağırlıklarını hesaplamak için ağırlıkları ölçülmüş ve veriler not edilmiştir. Daha sonra 48 saat süreyle etüvde 80 °C’de kurutulan numunelerin ağırlıkları ölçülmüştür. Elde edilen ağırlıklar hem  $\gamma_{dyk}$  hem de  $\gamma_k$  hesabı için hacimlerine bölünerek (3.1) ve (3.2) formüllerine uygun şekilde bulunmuştur.

$$\gamma_{dyk} = \frac{W_{dyk}}{V} \quad (3.1)$$

$$\gamma_k = \frac{W_k}{V} \quad (3.2)$$

$\gamma_{dyk}$  = Doygun birim hacim ağırlık (gr /cm<sup>3</sup>)

$\gamma_k$  = Kuru birim hacim ağırlık (gr /cm<sup>3</sup>)

V = Numune hacmi (cm<sup>3</sup>)

W: = Numune ağırlığı (gr)

### 3.4.3. Su emme kapasitesi

Taze halde 40x40x160 mm boyutlarında kalıplanan harç numuneleri 24 saat boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Sertleşen harcın mevcut ağırlığı ( $W_{ortam}$ ) hassas terazide tartılmıştır. Numuneler belirlenen kür sürelerine göre 1, 7, 28 gün boyunca su ve çözelti havuzlarında kürlenmiştir. Çalışmada çözelti havuzunda kullanılan çözelti/su oranı %6 olarak belirlenmiştir. Kür süreleri tamamlanan numunelerin yüzeyi kurutulduktan sonra doygun yüzey kuru ağırlıkları  $W_{dyk}$  belirlenmiştir. Tüm numunelerin 48 saat süreyle

etüvde 80 °C sıcaklıkta tamamen kurumaları beklenmiştir ve ağırlıkları  $W_k$  olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.6' da suda ve etüvde bekletilen numuneler görülmektedir.

Elde edilen veriler sonucunda su emme oranları ASTM C109 standardına uygun olarak (3.3) denkleminde gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Bu deney sonuçları suda ve çözeltilde kür edilen numuneler için geçerlidir.

$$\text{Su Emme Kapasitesi (\%)} = \frac{W_{dyk} - W_k}{W_k} \times 100 \quad (3.3)$$



a) Suda bekletilen numuneler



b) Etüvde bekletilen numuneler

Şekil 3. 6. Numunelere su ve etüv uygulaması

#### 3.4.4. Mevcut su durumu

Çalışma kapsamında harç içerisinde sodyum poliakrilat bulunduran numunelerin kür sürelerine bağlı olarak su durumunu incelemek amacıyla bu hesap yapılmıştır. Hazırlanan karışımlar kalıplarda 1 gün bekletildikten sonra mevcut ağırlıkları  $W_{ortam}$  olarak ölçülmüştür. Kür yöntemine göre ortamda bekletilen numuneler tüm süreç boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. Su ve çözeltilde bekleyen numuneler 1, 7, 28 gün boyunca kür edilmiştir ve sudan çıkan numunelerin doymuş yüzey kuru ağırlıkları  $W_{dyk}$  belirlenmiştir. Etüv yöntemine göre kürlenmiş numuneler  $W_{ortam}$  ağırlıkları ölçüldükten sonra 1 gün boyunca 60 °C fırında kurutulmuştur.

İşlemler sonucunda tüm numuneler 48 saat süreyle etüvde 80 °C sıcaklıkta tamamen kurumaları için beklenmiş ve ağırlıkları  $W_k$  olarak hesaplanmıştır. Kür yöntemlerine göre yapılan uygulamalar sonucunda süper emici malzemenin miktarını kıyaslamak amacıyla aşağıdaki formül (3.4) kullanılarak numuneler arasındaki mevcut su durumu hesaplanmıştır.

$$\text{Mevcut Su Durumu (\%)} = \frac{W_{\text{Ortam}} - W_k}{W_k} \times 100 \quad (3.4)$$

### 3.4.5. Kılcal su emme deneyi

Ortam kür süreleri ( 28, 56, 90 gün ) tamamlanan 40 x 40 x 160 mm boyutlarındaki A, B, C, D, E, F numunelerinin işlem öncesi ilk ağırlıkları ölçülmüştür. Numunelerin suyu sadece 40x40 mm olan alt taban kesitinden almasını sağlamak için yan yüzeyleri parafinlenerek su girişi engellenmiştir. Parafinlenen numunelerin ağırlıkları tekrar ölçülmüştür. Numuneler; içerisinde belirli bir seviyeye kadar su bulunan cam kaba dik pozisyonda, cam bilyeler üzerine dikkatli bir şekilde dizilmiştir. 6 saat boyunca karekökü tam sayı olan dakikalarda (1., 4., 9., 16., 25., 36., 49.,..... 361.) numuneler suya konup-çıkarılarak hassas terazi yardımı ile ağırlıkları ölçülmüştür. Deney düzeneği Şekil 3.7’de gösterilmiştir. SEP katkılı ve katkısız olarak hazırlanan harç numuneleri su içerisinde bekletilmiş ve elde edilen veriler sonucunda dakikada emdikleri su miktarı belirlenmiştir. İçerisinde bulundurduğu kılcal boşluklardan suyu emerek yükseldiği gözlenen numunelerin boşluk yapısı ve kılcal su emme miktarları hakkında veriler elde edilmesi amacıyla (3.5)’te verilen formüle uygun olarak kapilarite katsayıları hesaplanmıştır. Her karışım için 3’er adet hazırlanan X, Y, Z numunelerinde k değerlerinin ortalaması alınarak karışımın kapilarite katsayısını belirlenir. Şekil 3.8’de 6 saatin sonunda numunelerin kılcal su emme miktarları görülmektedir.

$$Q/A = \sqrt{k * t} \quad (3.5)$$

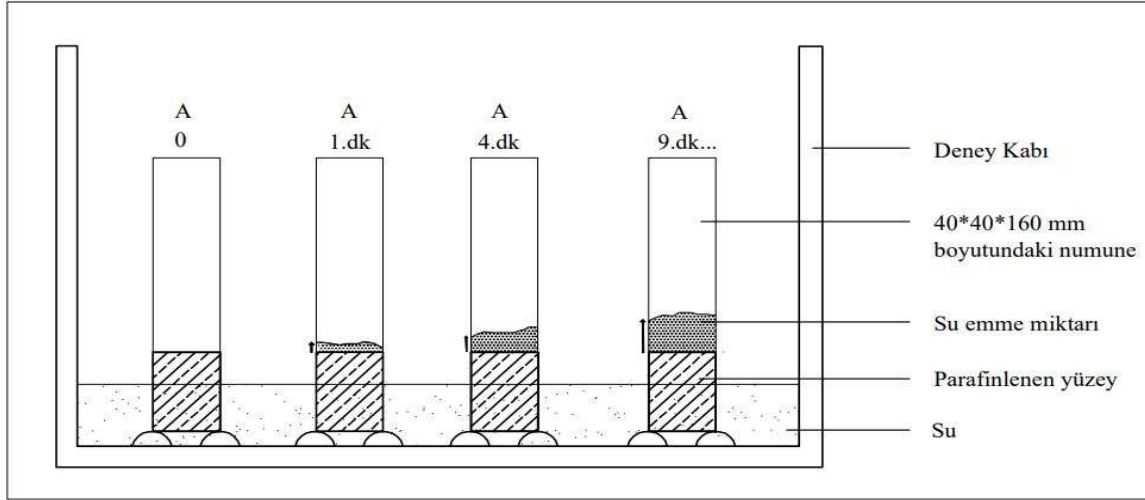
$Q$  = Birim zamanda emilen su miktarı ( $\text{cm}^3$ )

$A$  = Numunenin suya temas eden kesit alanı ( $\text{cm}^2$ )

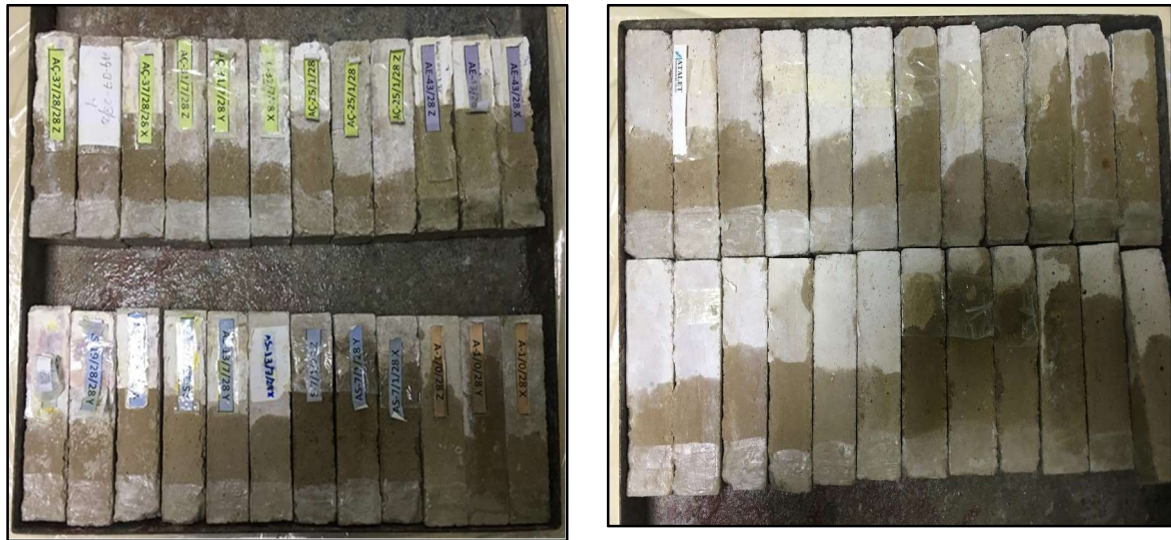
$k$  = Kapilarite katsayısı ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$t$  = Geçen zaman (sn)

Süre-ağırlık arasında değişim ilişkilendirilerek numunelerin su emme miktarları ( $Q$ ) hesaplanmıştır.  $Q$  değerinin, numunelerin su ile temas ettiği yüzey alanına bölünmesi sonucu  $Q/A$  oranı hesaplanır. Bu oran ile sürenin karekök değeri ilişkilendirilir ve grafik oluşturulur. Grafikte oluşan doğrunun eğimi alınarak numunenin kılcal su emme katsayısı ( $k$ ) bulunmuştur.



Şekil 3. 7. Kapilarite deney düzeneği ve zaman içerisindeki su emme miktarı gösterimi



Şekil 3. 8. 6 saatlik deney sonrası bazı numunelerin kılcal su emme miktarları

### 3.4.6. Eğilme dayanımı

Eğilme deneyi için üretilen 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik kiriş numuneler TS EN 196- 1'e standardına uygun şekilde test edilmiştir. Çalışmada 28, 56, 90 gün kür edilmiş numuneler ile asit-sülfat ve ıslanma-kuruma deneyleri için hazırlanan toplam 810 adet numuneye bu test uygulanmıştır. Üç noktalı çekme dayanımı deney cihazında numune iki mesnet üzerinde yerleştirilmiştir (Şekil 3.9). 5 kN/s'lik yükleme hızı ile düşey yönde uygulanan yük ile kırılmalar gözlenmiştir. Her bir karışım için 3'er adet üretilen X, Y, Z numuneleri kırılma anındaki en yüksek değerleri kN cinsinden alınmıştır. Bu değerler MPa cinsine çevrilerek kaydedilmiştir. Verilere göre aritmetik ortalaması alınan numunelerin standarda uygun şekilde (3.6) formülüne göre hesabı yapılmıştır.

$$3 \text{ Noktalı Eğilme Dayanımı } \sigma_e = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad (3.6)$$

- $\sigma_e$  = Eğilme Dayanımı (N/mm<sup>2</sup>)  
 F = Kırılmaya neden olan yük (N)  
 L = Mesnet silindirleri arasındaki açıklık (mm)  
 b,d = Numunenin enkesit boyutları (mm)



Şekil 3. 9. 3 noktalı eğilme dayanımı testi

### 3.4.7. Basınç dayanımı

28, 56, 90 günlük numuneler ile asit-sülfat ve ıslanma-kuruma deney numunelerine TS EN 196- 1'e uygun olarak basınç testi uygulanmıştır. Eğilme deneyi sonrası 40 x 40 x 160 mm boyutlarında hazırlanan kiriş numuneleri iki parçaya bölünmüştür. Parçalanan numuneler press cihazına Şekil 3.10'daki gibi yerleştirilmiştir. Uygulanan 2,4 kN/s'lik sabit yükleme hızı ile numunelere basınç uygulanmıştır. Kırılan numunelerin en yüksek basınç değeri alınmıştır. Her numune için hazırlanan üç adet X, Y, Z numunelerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Elde edilen veriler MPa cinsinden yazılarak basınç değerlerinin hesaplanması için Denklem (3.7) kullanılmıştır.

$$\text{Basınç Dayanım Formülü} \quad P = \frac{F}{A} \quad (3.7)$$

P = Basınç Dayanımı (N/mm<sup>2</sup>)

F = Kırılmaya neden olan yük (N)

A = Basınç plakasının kenar uzunluğu (mm)



Şekil 3. 10. Basınç dayanımı deney düzeneği

### 3.4.8. Ultrasonik dalga hızı (UDH)

28, 56, 90 günlük numuneler ile asit-sülfat ve ıslanma-kuruma numunelerine kürlenme sürelerinin sonunda ultrasonik dalga (ses) hızı deneyi uygulanmıştır. Deney yöntemine göre hazırlanan 40x40x160 mm boyutlarında numunelere Şekil 3.11'deki düzenekte

görüldüğü gibi ses dalgaları gönderilerek yayılma hızı tespit edilmiştir. Numune içerisinde geçiş süresinin belirlenmesinde alıcı uçtan verici uca gönderilen ses dalgası ile boşluk yapısı hakkında bağlantı kurulur. Boşluk miktarı yüksek olan düşük yoğunluktaki numunelerin bir uçtan diğer uca dalga geçiş hızı daha uzundur. Deney esnasında ultrason jeli sürülen numune uç bölgelerine ses dalgası gönderilerek ölçüm yapılır. Dalga hızı verileri m/s cinsinden kaydedilmektedir. Her karışım için 3'er adet hazırlanan X, Y, Z numunelerinden elde edilen değerlerin aritmetik ortalamaları alınarak veriler kaydedilir. Verilerin kıyaslanabilmesi amacıyla Whitehurst, 1951 tarafından oluşturulan Çizelge 3.11'deki dalga hızı ve harç kalite aralıkları kullanılmıştır.

Çizelge 3. 11. Ultrasonik ses hızı değerlerinin harçların kalitesi ile ilişkisi (Whitehurst, 1951)

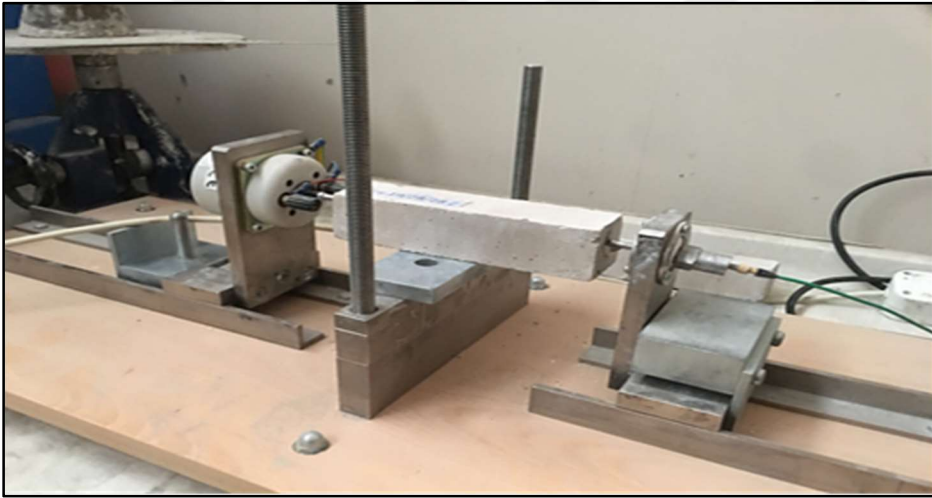
Ultrasonik Ses Hızı (m/sn)	Harç Kalitesi
>4500	Çok iyi
3500-4500	İyi
3000-3500	Orta
2000-3000	Kötü
<2000	Çok Kötü



Şekil 3. 11. Ultrasonik dalga hızı deney düzeneği

### 3.4.9. Rezonans Frekansı (RF)

Sertleşmiş A, B, C, D, E, F prizmatik harç numunelerine tahribatsız bir yöntem olan rezonans frekansı deneyi ASTM C215 standardına uygun olarak yapılmıştır. Çalışmada numunelere 3000-5000 Hertz (Hz) aralığında alıcı uçtan verici uca titreşim gönderilmiştir. Erudite MKIV PC1004 cihazı ile otomatik modda yapılan deneyde ultrason jeli iki uca sürülerek frekans aralığında titreşim gönderilir (Şekil 3.12). Uygulanan doğal titreşim frekansı, dinamik elastisite modülü hesabında kullanılan ve numunenin yoğunluğu ile ilişkilendirilen bir deney yöntemidir. Ölçümler sırasında her numuneye 3 kez deney uygulanır ve rezonans frekansı ( $F_r$ ) değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak sonuçlar değerlendirilir.



Şekil 3. 12. Rezonans frekansı ölçüm düzeneği

### 3.4.10. Islanma-kuruma

40 x 40 x 160 mm boyutlarında hazırlanan A, B, C, D, E, F numuneleri ortamda bekletilenler ile 1, 7, 28 gün suda ve çözültide bekletilen numuneler, ıslanma-kuruma deneyine tabii tutulmuştur. 1 ay boyunca numuneler 12 saat süre ile 100 °C etüv sıcaklığında ardından 12 saat boyunca oda sıcaklığında suda bekletilmiştir. Su-etüv döngüsünde 30 çevrim şeklinde yapılan deneyde her 5 çevrimde bir numunelerin ağırlıkları tartılmıştır. Elde edilen verilerin ilk ve son ağırlıkları göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Deney sonunda numunelere ayrıca ultrases geçiş hızı deneyi ve basınç deneyi yapılarak testler tamamlanmıştır.



### 3.4.11. Asit direnci deneyi

Ortam, 1, 7, 28 gün suda ve çözeltilerde kür edilen A, B, C, D, E, F numunelerinin asit etkisine karşı dayanıklılıkları test edilmiştir. Numuneler 1 ay süre ile %5 oranında sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) çözeltisinde bekletilmiştir. Asitten çıkarılan numuneler  $80\text{ }^\circ\text{C}$  etüvde 6 saat kurutulup ağırlıkları tartılmıştır. Asite maruz kalan numune ağırlıkları ( $m_{as}$ ) ile ilk ağırlıkları ( $m_{aö}$ ) Eş (3.8)'deki formül kullanılarak ağırlık değişimleri hesaplanmıştır. Numunelerin asitten çıkarıldıktan sonraki görünüşleri Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'de verilmiştir. Numunelere ayrıca ultrasonik dalga hızı deneyi, eğilme ve basınç deneyleri uygulanmıştır. Basınç dayanımı değişimleri Eş (3.9) kullanılarak belirlenmiştir.

$$\text{Ağırlık Değişimi} = \frac{m_{as} - m_{aö}}{m_{aö}} \times 100 \quad (3.8)$$

$$\text{Dayanım değişimi} = \frac{\sigma_{as} - \sigma_{aö}}{\sigma_{aö}} \times 100 \quad (3.9)$$

$\sigma_{as}$ : numunenin asitten sonraki basınç dayanımını (MPa),

$\sigma_{aö}$ : numunenin asitten önceki basınç dayanımını (MPa),

$m_{as}$ : numunenin asitten sonraki ağırlığını (g),

$m_{aö}$ : numunenin asitten önceki ağırlığını (g)



Şekil 3. 13. 30 gün asit tankında bekletilen numuneler



Şekil 3. 14. Asite maruz kalan numuneler

### 3.4.12. Sülfat direnci deneyi

40x40x160 mm boyutlarındaki A, B, C, D, E, F numune karışımları 1 ay boyunca %5 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (sodyum sülfat) çözelti konsantrasyonu ile hazırlanan tanklarda bekletilmiştir (Şekil 3.15). Numunelerin sülfat saldırısına karşı dayanıklılıkları araştırılan deneyde ağırlık ve dayanım değişimleri incelenmiştir. İlk ağırlıkları ve etüv sonrası (80°C) ağırlıkları ölçülen numuneler dayanım testine kadar ortamda bekletilmiştir. Numunelerin ultrasonik dalga hızı ve basınç testleri yapılarak veriler incelenmiştir. Denklem (3.10) ve (3.11)'deki formüle göre ağırlık ve dayanım değişimleri hesaplanmıştır. Sülfatta bekletilen numunelerin yüzeylerinde Şekil 3.16'da görüleceği gibi beyaz tüylenmeler olmuştur.

$$\text{Ağırlık Değişimi} = \frac{m_{ss} - m_{sö}}{m_{sö}} \times 100 \quad (3.10)$$

$$\text{Dayanım değişimi} = \frac{\sigma_{ss} - \sigma_{sö}}{\sigma_{sö}} \times 100 \quad (3.11)$$

$\sigma_{ss}$ : numunenin asitten sonraki basınç dayanımını (MPa),

$\sigma_{sö}$ : numunenin asitten önceki basınç dayanımını (MPa),

$m_{ss}$ : numunenin asitten sonraki ağırlığını (g),

$m_{sö}$ : numunenin asitten önceki ağırlığını (g)



Şekil 3. 15. 30 gün sülfat tankında bekletilen numuneler



Şekil 3. 16. Sülfat numunelerinin yüzeyinde oluşan beyaz tortular

### 3.4.13. Karbonatlaşma derinliği

40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik kiriş numuneler deney gününe kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Karbonatlaşma derinliği TS EN 14360 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney için %1 oranında fenolftaleyn, saf alkolde çözdürülmüştür. Ortamda bekletilen numuneler, hava ile temas etmeyen yüzeyler elde etmek amacıyla deney sırasında kesilip ikiye bölünmüştür. Hazırlanan indikatör karışımı, kesilen yüzey temizlendikten sonra püskürtülmüştür.

Fenolftaleyn püstürtülen yüzeylerde renk değişimi gözlenmiştir. Karbonatlaşma derinliği tespitinde karbonatlaşmış kısım reaksiyon sonucu kırmızı-mor renge dönüşürken, karbonatlaşmanın görülmediği kısımlar renksiz kalmaktadır (Şekil 3.17). Renksiz bölge kalınlıkları ölçölüp not edilmiştir.



Şekil 3. 17. Karbonatlaşma derinliği ölçümü

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Tez çalışmasında öncelikle bir ön deneme çalışması planlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Deneme çalışmasından elde edilen sonuçlara göre çalışmanın boyut ve kapsamı belirlenmiştir. Bu bölümde hem deneme çalışması hemde ana çalışma sonucunda elde edilen bulgular yer almaktadır.

Ön çalışmada %4, %6 ve %8 oranlarında SEP katılarak hazırlanan geopolimer harçların dayanım ve su emme kapasiteleri incelenmiştir. Ön çalışma kapsamında üretilen karışımların tasarımı Çizelge (3.2) (Sayfa 48)'de verilmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında SEP katkılı numuneler SEP'in oluşturduğu boşluklu yapı nedeniyle referans numunelerine oranla daha düşük dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Ancak veriler içerisinde, SEP katkısının hem dayanım hemde su emme açısından, yüksek olduğu numune seçilerek tez çalışmasının temel karışımı belirlenmiştir. Ön çalışmaya ek olarak SEP davranışını daha iyi gözlemleyebilmek ve çalışmayı geliştirmek amacıyla çeşitli deney tasarımları hazırlanmıştır. SEP, kendi bünyesinde bulunan suyu salarak betonun su ihtiyacını karşılamaktadır. Bu sayede hem literatür çalışmalarında hem de yapılan ön çalışmada çatlakların önlenmesinde, SEP katkısının önemi anlaşılmıştır. (Genç, Sevim, & Balçıkanlı Bankir, 2022).

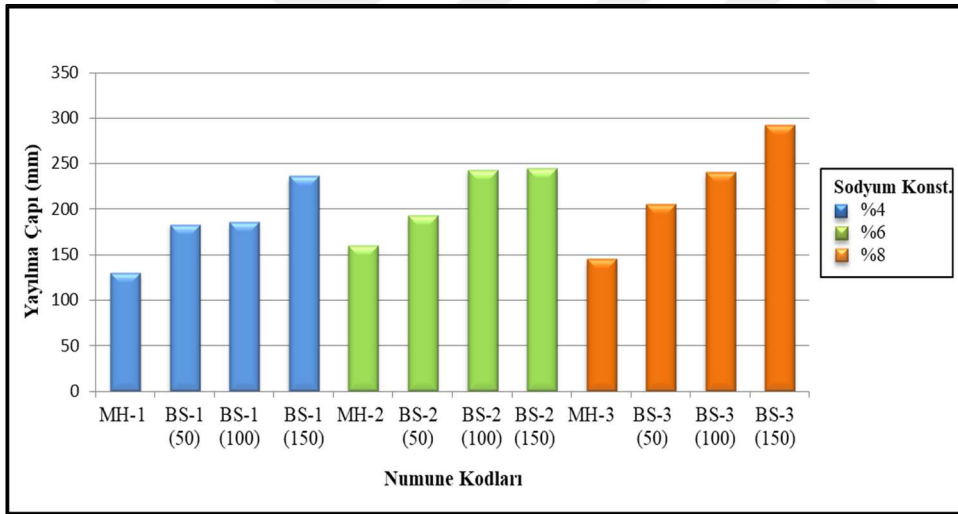
Bu tez çalışmasında; SEP içerisine su karışımının haricinde, su yerine alkali aktivatör ile hazırlanan çözeltili karışımının emdirilmesi sağlandı ve harç içerisindeki davranışları araştırılarak sonuçlar incelendi. Ayrıca numuneler üzerinde oluşabilecek değişiklikleri gözlemlemek amacıyla karışıma eklenecek malzemelerin yaz-kış koşullarındaki sıcaklık dengesini sağlaması için laboratuvar ortamında malzemeler belli sıcaklıklara kadar ısıtılarak karışımlar hazırlandı. Çalışmada numunelere etüv işlemine gerek duymadan sıcaklık etkisi ile kür uygulamak amacıyla ön hazırlık aşamasında malzemeler ısıtıldı ve 100 °C' de karışım suyu eklenerek harçlar hazırlandı. Üretim aşamasında yüksek sıcaklıkta su eklenen harçların ani priz almasından kaynaklanan sorunlarla karşılaşıldı ve hızla sertleşen harçların kalıba alınamaması nedeniyle sıcaklık dereceleri tekrardan değerlendirilerek uygun sıcaklık aralığı belirlendi. Normal şartlarda alkaliler ile aktive edilen cürufu harçlar erken dayanım kazanmaktadır. Çalışmada erken dayanım etkilerinin dışında çözeltili ve su katkılı SEP karışımlarının, 28, 56, 90 gün dayanımlarını belirlemek amacıyla numuneler ortamda bekletilmiş ve deneyler yapılmıştır.

#### 4.1. Ön çalışmaya ait araştırma bulguları

Deneyle sonuçunda elde edilen veriler tez çalışmasında referans olabilmesi amacıyla kısaca belirtilmiştir.

##### Yayılma tablası deneyi

Ön çalışmada 50, 100, 150 gr SEP eklenerek hazırlanan taze haldeki geopolimer harçların kıvamlarını belirlemek amacıyla yayılma tablası deneyi yapılmıştır. SEP miktarı arttıkça; karışım içerisindeki su miktarı da doğru orantılı olarak artmıştır. Şekil 4.1’de görüldüğü üzere referans numuneleri ile kıyaslandığında bu artış harcın işlenebilirliğini arttırmıştır. Ancak 150 gr ve üzerinde eklenen SEP, sulu bir karışım oluşturarak harçta kismaya neden olduğundan bu miktarın üzerinde SEP katkısı kullanılmamıştır.

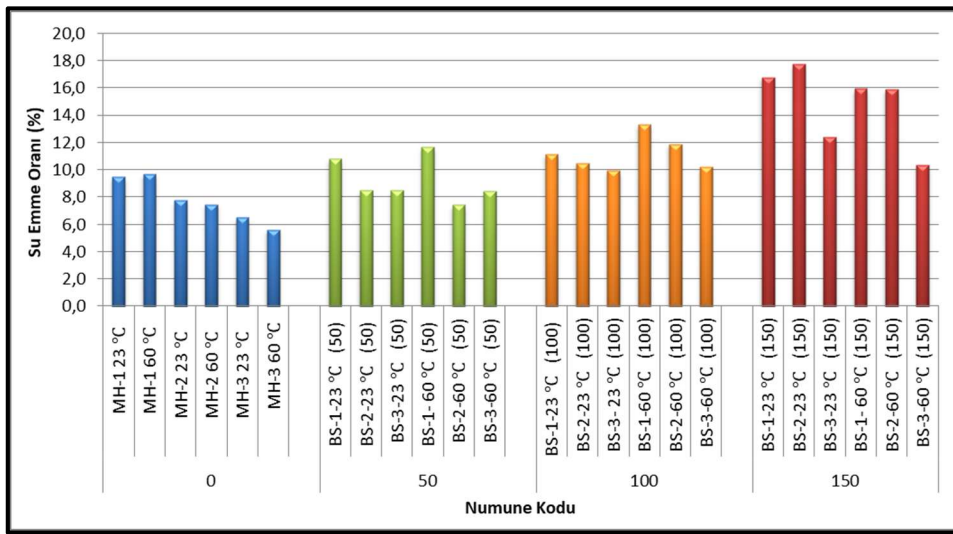


Şekil 4. 1. Ön çalışmaya ait yayılma çapı değerleri

##### Su emme oranı

Numunelere ait veriler incelendiğinde SEP ilave edilmemiş olan referans numunelerinde (MH-1, MH-2 ve MH-3), Na<sup>+</sup> konsantrasyon oranlarının artması cüruf aktivasyonunu hızlandırarak boşlukların azalmasına, buna bağlı olarak su emme oranının düşmesine neden olmuştur. Katkılı karışımlarda ise SEP miktarının artması ile su emme oranlarının da arttığı görülmüştür. Şekil 4.2’de ön çalışmadaki su emme oranları verilmiştir. Çalışma kapsamında 50 gr SEP katkıli BS1 karışımlarında su emme oranları yüksekken, Na<sup>+</sup> konsantrasyonu artışı ile BS-2 ve BS-3 numunelerinde su emme oranının düştüğü

görülmüştür. Karışımlar içerisinde BS-2/23°C/150 gr numunesinin en yüksek su emme kapasitesine sahip olduğu görülmüş, ancak sodyum konsantrasyonu artışı ile bu oran düşmüştür. Genel olarak incelendiğinde referans numunelerine kıyasla kür sıcaklığının artması, su emme oranlarının da artmasına neden olmuştur. Burada sıcaklığın artması ile beraber su buharlaşmaya başlamış ve numunenin en kuru durumdaki ağırlığı ile doymuş haldeki ağırlığı arasındaki fark açılmıştır. Katkılı numunelerde SEP'in, bünyesine almış olduğu su, hızlıca numune içerisinde salındığından içten kürlenme hızlanmıştır. Ön çalışmada SEP katkısının harç içerisindeki suyun buharlaşması sonucu oluşturduğu kuruma çatlaklarının önleme konusunda etkili olduğu görülmüştür.

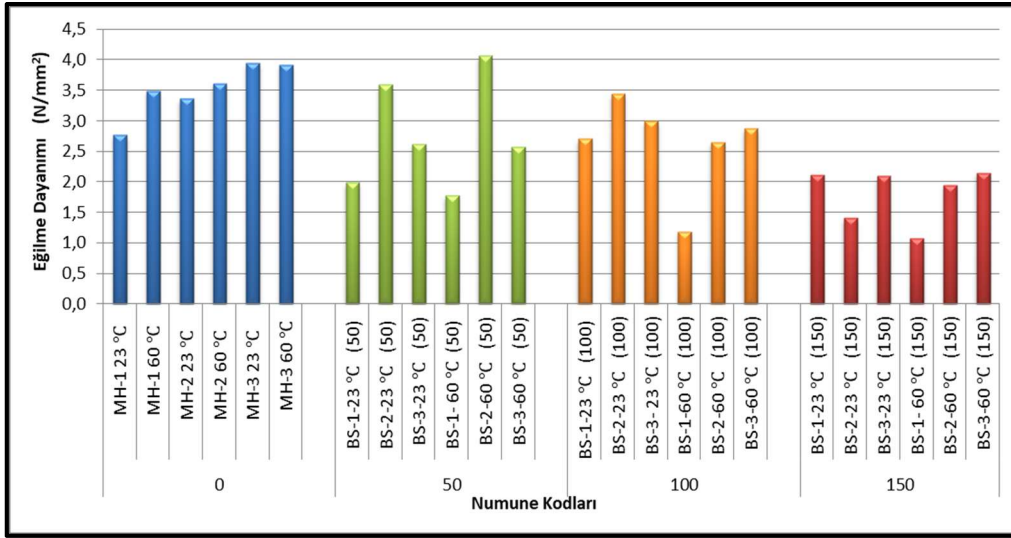


Şekil 4. 2. Ön çalışmaya ait su emme miktarları

### **Eğilme dayanımı**

Sonuçlar incelendiğinde; SEP oranındaki artış genel olarak eğilme dayanımlarını düşürmüştür. Şekil 4.3'de ön çalışmaya ait eğilme dayanımı grafiği gösterilmiştir. SEP ilavesi ile numunelerde sıcaklık artışına bağlı olarak %4 Na<sup>+</sup> konsantrasyonuna sahip numunelerin eğilme dayanımının düştüğü, %6'da oranında sodyum numunelerde genel olarak dayanımın arttığı ve %8 sodyum oranında numune dayanımlarının değişim göstermediği belirlenmiştir. Verilere göre; cürufun alkali atıvasyonu için gerekli olan alkali ortamı %6 sodyum konsantrasyonunda daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Kür sıcaklıkları incelendiğinde; 60 °C sıcaklıkta kür edilen numunelerin eğilme dayanımları 23 °C kür edilen numunelere kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklığın artışı ile beraber suyun buharlaşması ya da SEP bünyesindeki suyun yavaş yavaş salınması ile SEP'in kapladığı hacmin küçülmesi neticesinde yerini boşluğa bırakması nedeniyle olduğu

düşünülmektedir. Boşluklu bir yapının alkali aktivasyonunun ilk evrelerinde meydana gelmiş olması numunenin eğilme ve basınç dayanımlarının düşük olmasına sebebiyet vermiştir. SEP oranı düşük olan BS-2/23°C/50 ve BS-2/60°C/50 numunelerinin eğilme dayanımlarının kontrol numunelerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. BS-2/60°C/50 numunesinin eğilme dayanımı 4,1 MPa iken kontrol numunesinin eğilme dayanımı 3,6 MPa'dır. De Meyst vd. (2021) yaptığı çalışmada SEP katkılı harçlarda suyun salınması ile çatlak oluşumunun gecikmesinden kaynaklı dayanım artışının meydana geldiği ifade edilmiştir.



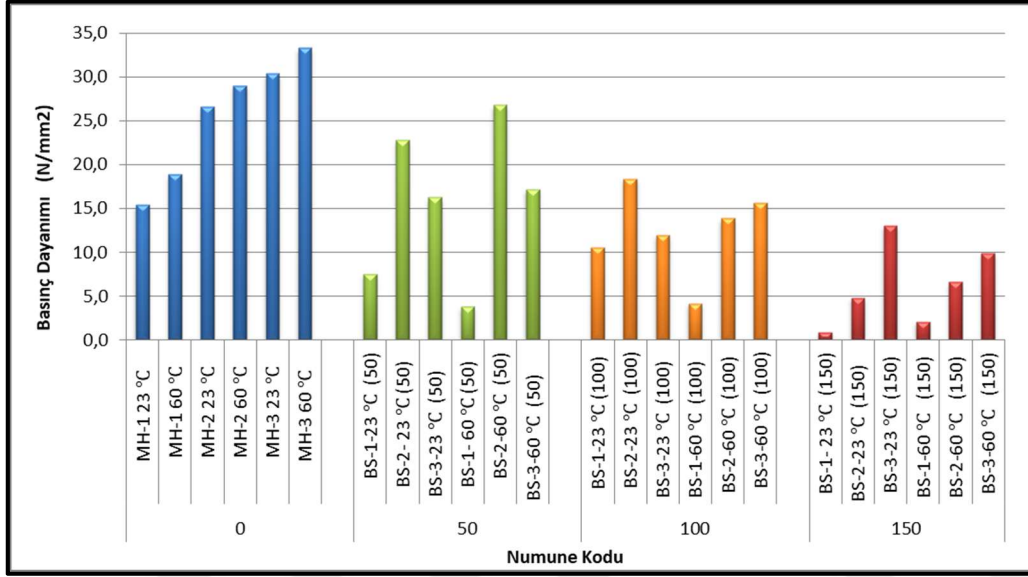
Şekil 4. 3. Ön çalışmaya ait eğilme dayanımı grafiği

### **Basınç dayanımı**

Çalışmada sodyum konsantrasyonundaki ve kür sıcaklığındaki artış, referans numunelerinin (MH-1, MH-2, MH-3) basınç dayanımını arttırmıştır. %4, %6, %8 oranındaki sodyum konsantrasyonu seviyelerine bakıldığında SEP miktarı arttıkça basınç dayanımlarının azaldığı görülmüştür (Şekil 4.4). SEP katkılı karışımlarda, sıcaklığın artmasına bağlı olarak %4 oranında sodyum katkılı numunelerin basınç dayanımlarının düştüğü, %6 oranında hazırlanan karışımlarda ise genel olarak artış gözlemlendiği ve %8 sodyum oranına sahip numunelerin değişim göstermeden benzer dayanıma sahip olduğu görülmüştür. SEP'deki artış sonucunda numune içindeki boşluk miktarının artması basınç dayanımını her iki kür sıcaklığında da önemli ölçüde azaltmıştır. Bunun nedeninin, SEP katkısı ile sertleştirilmiş harçlardaki makro gözeneklerin oluşumu ve boşluk miktarının artmasının sonucu olduğu belirtilmiştir (De Meyst vd., 2021). %4 sodyum konsantrasyonuna sahip 50 gr ve 100 gr SEP içeren karışımlarda sıcaklıkla birlikte



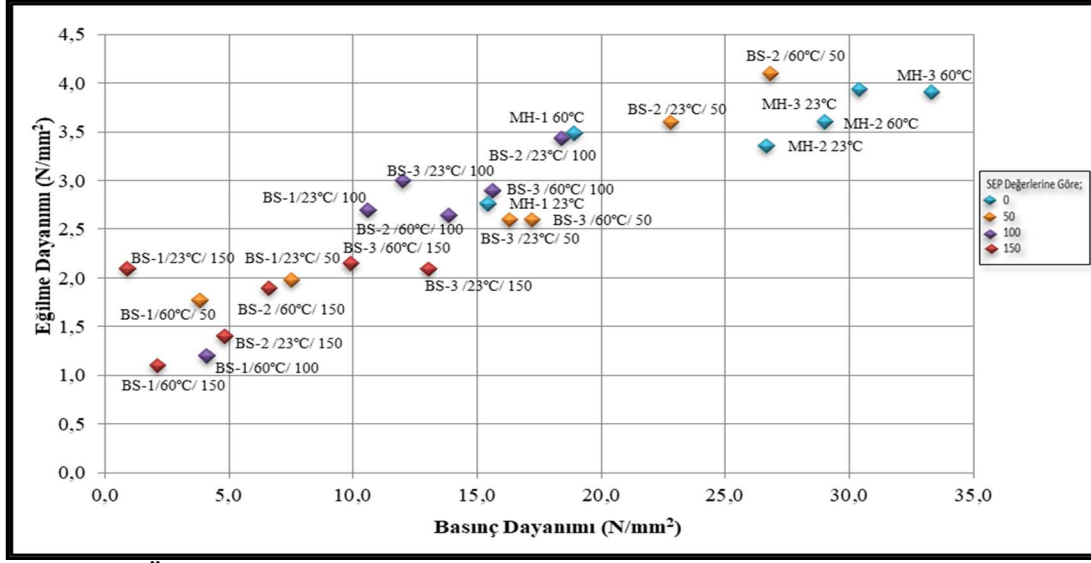
dayanımda azalma meydana gelirken, 150 gr SEP içeren karışımlarda artış gerçekleştirmiştir. Bunun nedeninin SEP bünyesinde bulunan suyun harç içerisine salınımı ile büzülme çatlaklarının önlenmesi ve mikro çatlakların sınırlandırılması ile hidrasyonun gelişimine katkı sağlanması olarak düşünülmektedir. En düşük dayanım BS-1/23 °C /150 gr'lık numunesinde ölçülürken (0,9 MPa), en yüksek basınç dayanımı BS-2/60 °C/ 50 gr (26,8 MPa) numunesi olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 4. Ön çalışmaya ait basınç dayanımı grafiği

### **Eğilme – basınç dayanımı.**

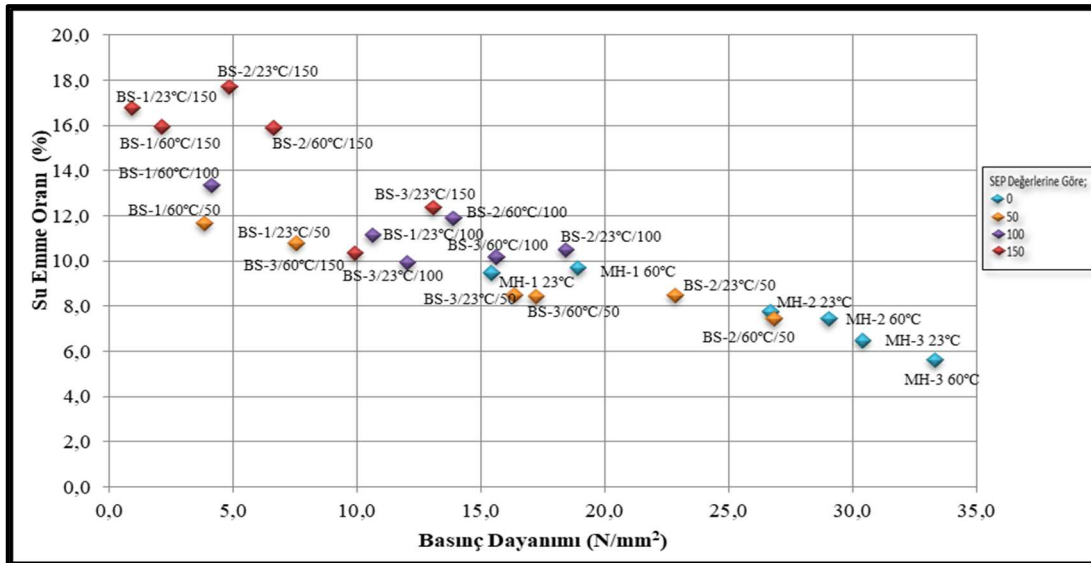
Eğilme-basınç değerleri kıyaslandığında tüm kontrol numunelerinde eğilme dayanımları artarken sıcaklığa bağlı olarak basınç dayanımları da artmıştır. Katkılı numunelerde ise SEP oranı arttıkça hem eğilme hem de basınç dayanımlarının azaldığı ve bunun nedeninin artan boşluk miktarı olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 4.5'deki grafikte eğilme-basınç dayanımları arasındaki ilişki görülmektedir. Kontrol numunelerinde genel olarak eğilme dayanımı 2,5-4 MPa aralığında iken, basınç dayanımları 15-35 MPa aralığındadır. Sıcaklık kürü uygulanan numunelerin dayanımı 23 °C sıcaklıkta bekletilen numunelere kıyasla daha düşük değerlerde seyretmektedir. Sıcaklık kürü sebebi ile meydana gelen çatlaklar SEP katkısı ile önlenmiştir.



Şekil 4. 5. Ön çalışmaya ait eğilme-basınç dayanımı arasındaki ilişki

### Su emme - basınç dayanımı

Deneysel çalışma sonucunda farklı oranlarda SEP katkısıyla hazırlanan numunelerde basınç ve su emme oranına bakıldığında aralarında ters bir ilişki olduğu belirtilmiştir. Şekil 4.6'da basınç dayanımının azaldığı, SEP miktarı ile ilişkili olarak su emme kapasitesinin arttığı görülmüştür. Bunun asıl nedeni sodyum poliakrilat katkısının harçta oluşturduğu boşluk yapısıdır. Boşlukların artmasıyla harcın basınç etkilerine karşı gösterdiği direnç azalır (Awolusi ve ark., 2021).



Şekil 4. 6. Ön çalışmaya ait su emme-basınç dayanımı arasındaki ilişki

Yapılan ön çalışmada yüksek fırın cürüflü harçlarda SEP ilavesinin su emme kapasitelerini arttırdığı görülmüştür. Eğilme ve basınç deneyleri sonucunda ise SEP katkısının artması ile beraber dayanımları düşmüştür. %4, %6 ve %8 sodyum konsantrasyonu ile hazırlanan karışımlarda genel olarak dayanımın azaldığı ancak %6 sodyum konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde su emme oranı ve dayanımlarının diğer karışımlara oranla daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Çalışmada sıcaklık etkisiyle oluşan yüzeysel çatlakların SEP katkısı sonucunda daha az oluştuğu görülmüştür.

Genel olarak SEP katkısının 150 gr ve üzeri olması dayanımı çok düşüreceğinden ve taze harçta kismaya neden olacağından bu oranın üstünde kullanılmasının uygun olmadığı görülmüştür. Kıvam ve dayanım açısından 50 gr SEP katkısının çalışma için ideal değerde olduğu tespit edilmiştir.

Tüm karışımlar içerisinde 60 °C etüv kütürünün alkali aktivasyonu hızlandırması ve buna bağılı olarak dayanım etkisini arttırdığı görülmüştür. SEP miktarının referans numunelerine kıyasla düşmesine rağmen çalışma da BS2 /50 gr 60 °C numunesinin 26,8 MPa basınç dayanımı ve 4,1 MPa eğilme dayanımı ölçülmüştür. Hem dayanım hemde su emme kapasitesinin diğer karışımlara oranla yüksek olması tez çalışmasında bu numune karışımının kullanılmasında etkili olmuştur.

Tez çalışmasında; sıcaklığın etkisi göz önüne alındığında, bu etkinin etüve gerek duymaksızın içerisine katılan sıcak su ile ön hazırlık aşamasında dayanım ve hidrasyon etkileri incelemek, çalışmada SEP'in su absorbiyonunun dayanıma etkilerinin yanında bünyesine alkali çözelti karışımı alması sonucu sertleşmiş haldeki numunelerin mekanik etkilerinin incelenmek ve son olarak su ve çözelti kütürü etkisiyle SEP katkısının oluşturduğu boşluklu yapının zamana bağılı olarak dayanıma etkilerini araştırmak amacıyla çalışması yapılmıştır. Çalışma genelinde SEP katkılı numunelerin davranışlarını incelemek amacıyla eğilme, basınç, UDH, RF, kılcal su emme, kapilarite gibi testler uygulanmıştır. Ayrıca dış etkilere karşı dayanıklılığını incelemek amacıyla numuneler asit ve sülfat ve ıslanma-kuruma deneylerine tabii tutulmuştur.

## 4.2. Araştırma Bulguları

### 4.2.1. Yayılma tablası deneyi

Alkaliler ile aktive edilen yüksek fırın cürüflü harçlarda SEP katkılı ve katkısız (referans) numunelerinin işlenebilirliğini belirlemek amacıyla yayılma tablası deneyi yapılmıştır. Deneye ait değerler Çizelge 4.1 ve Şekil 4.7’de verilmektedir. Sonuçlar, ortalamaları alınarak değerlendirilmiştir. Referans numunelerinin yayılma çapı 150-155 mm ve 50 gr SEP eklenen numunelerin çapı ise 160-190 mm aralığında ölçülmüştür. E ve F referans numunesine göre kıyaslanan A, B, C, D karışımları, içerisine SEP eklenmesi sonucu ilave su kaynağı sağlamakta ve oluşturduğu boşluklu yapı ile vizkoziteyi azaltarak, plastisiteyi ve işlenebilirliği arttırmaktadır (Al-Nasra vd., 2015; Madduru vd., 2020). SEP miktarı arttıkça işlenebilirliğin artması ön çalışma verilerini destekler niteliktedir (Genç, Sevim, & Balçıkanlı Bankir, 2022). Karışımlar içerisinde su yoğunluğu fazla olan A ve B numunelerinin yayılma çapları, çözelti katkılı numunelere oranla daha yüksek değerdedir. Ayrıca karışım sıcaklığı göz önüne alındığında sıcaklık artışı, harç içerisindeki suyun daha hızlı buharlaştırması nedeni ile işlenebilirliği bir miktar düşürmüştür. Çizelge 4.2’de grafiklerde kullanılan numune kodları açıklanmıştır.

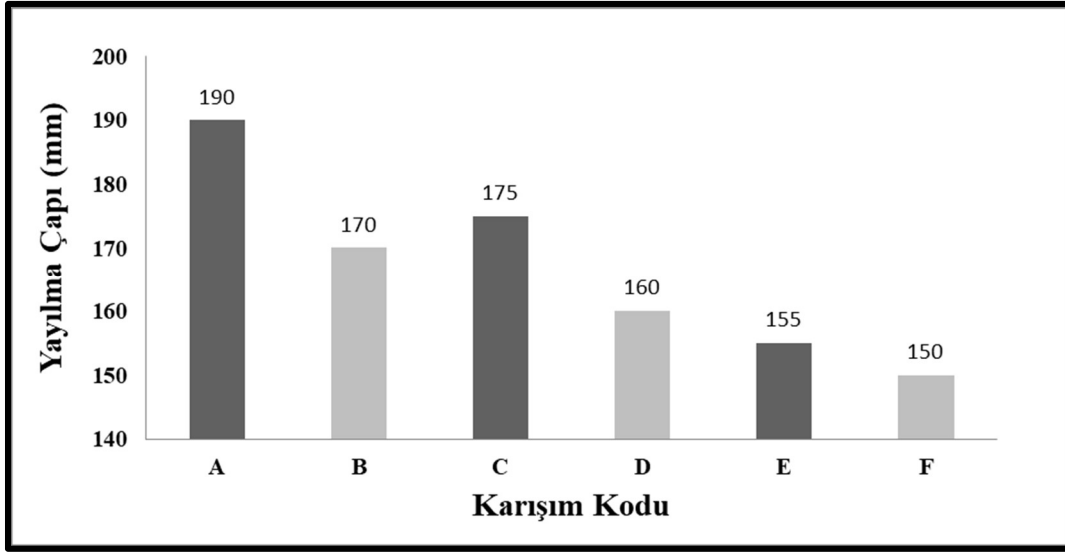
Çizelge 4. 1. A, B, C, D, E, F taze harç numunelerinin kıvam sonuçları

Numune Kodu	Katkılı Numuneler				Referans Numuneleri	
	A	B	C	D	E	F
Yayılma Çapı (mm)	190	170	175	160	155	150

Çizelge 4. 2. Grafiklerde gösterilen numunelere ait kısaltmaların açıklaması

A0	Ortamda bekletilen A karışımı
AS1	Suda 1 gün bekletilen A karışımı
AS7	Suda 7 gün bekletilen A karışımı
AS28	Suda 28 gün bekletilen A karışımı
AÇ1	Çözeltide 1 gün bekletilen A karışımı
AÇ7	Çözeltide 7 gün bekletilen A karışımı
AÇ28	Çözeltide 28 gün bekletilen A karışımı
AE*	Etüvde bekletilen A karışımı

\*B, D, F numunelerinde etüv kürü uygulanmamıştır.



Şekil 4. 7. A, B, C, D, E, F taze harç numunelerinin kıvam grafiği

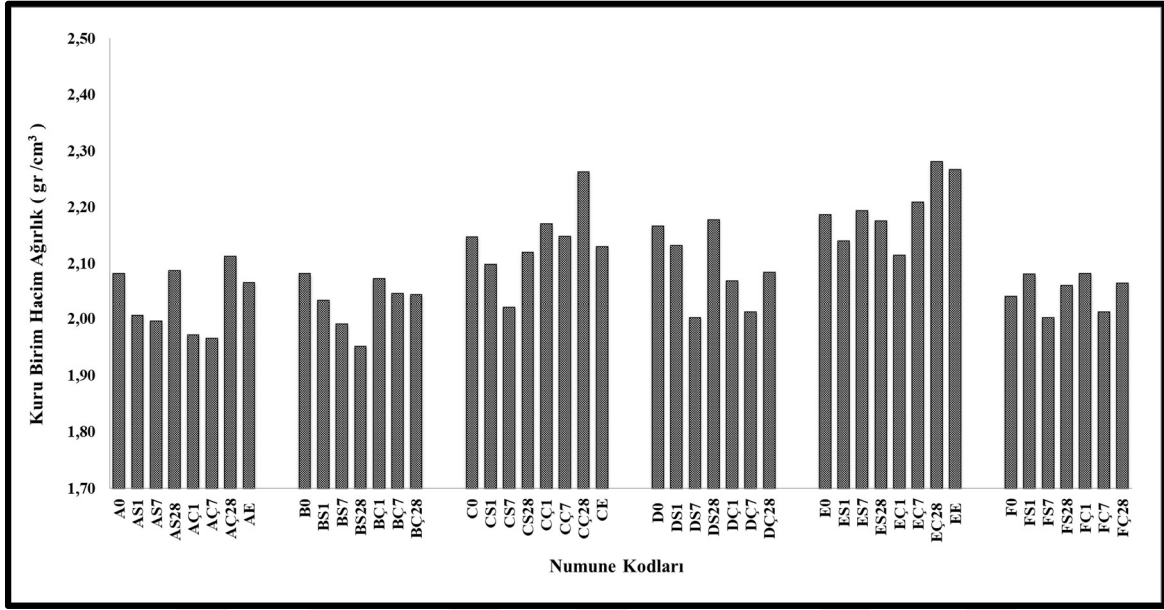
#### 4.2.2. Birim hacim ağırlık

A, B, C, D karışımlarının kuru ve doymuş birim hacim ağırlıklarına ait sonuçlar aşağıda açıklanmış ve referans numuneleri ile (E ve F) kıyaslanmıştır. Birim hacim ağırlıkları ile ilgili veriler aşağıda verilmiştir. Doymuş birim hacim ağırlıkları hesabına ortam ve etüv numuneleri dahil edilmemiştir.

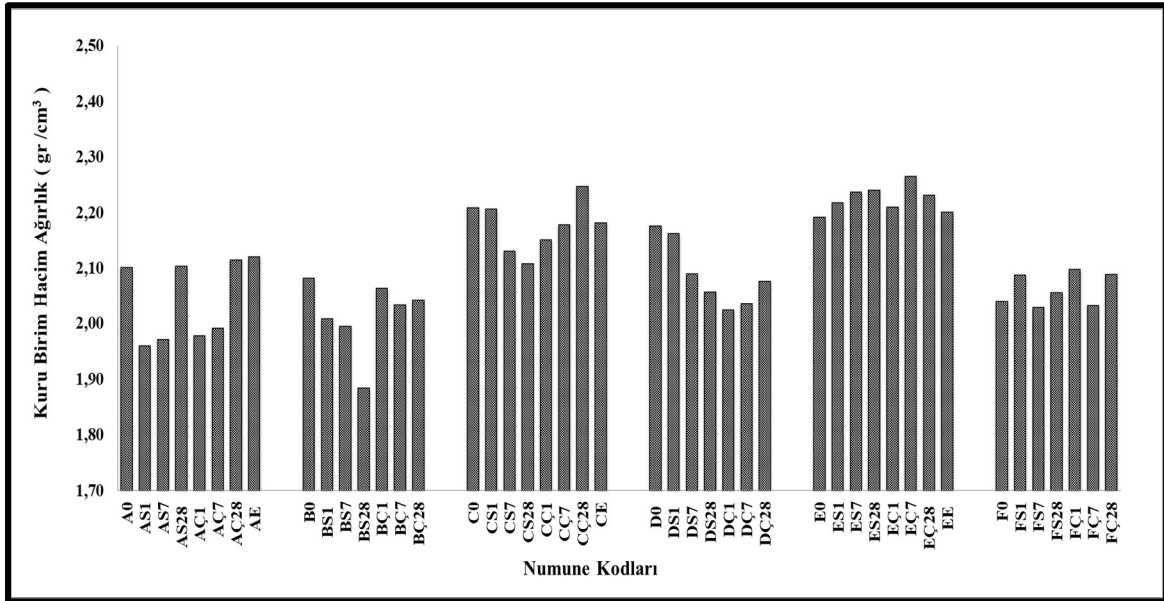
#### Kuru birim hacim ağırlık

Yapılan tüm deneylerde numuneler etüvde kurutulmuş ve etüv sonrası ağırlıkları ( $W_k$ ), hacimlerine bölünerek kuru birim hacim ağırlıkları bulunmuştur. 28, 56 ve 90 gün kuru birim hacim ağırlıklarına ait veriler Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir. A, B, C, D karışımları referans numuneleri ile kıyaslandığında; genel olarak yakın değerlerde olduğu ve tüm kür şartlarında SEP eklenmesi sonucunda  $\gamma_k$  değerlerinin düştüğü görülmüştür. Boşluk miktarının ve su emme oranlarının artması numunelerin birim hacim ağırlıklarının düşmesine neden olmaktadır (Arslan, 2019). İlave çözelti katkısı sonucu C ve D karışımlarında, harç içerisindeki kuru ağırlık artmıştır. Karışıma SEP yoluyla eklenen alkali aktivatör ilavesi harçta daha yoğun bir yapı oluşturarak, boşlukları doldurmuş ve su ile hazırlanan A ve B karışımlarına kıyasla kuru birim hacim ağırlık değerlerini daha yüksek çıkmasına neden olmuştur. A, B, C, D numunelerinde en yüksek kuru birim hacim ağırlıklarına sahip numuneler Çizelge 4.3'de sıralanmıştır. Kür şartlarına bakıldığında numunelerin sıvı içerisinde bekleme süreleri arttıkça, B numuneleri dışındaki karışımlarda

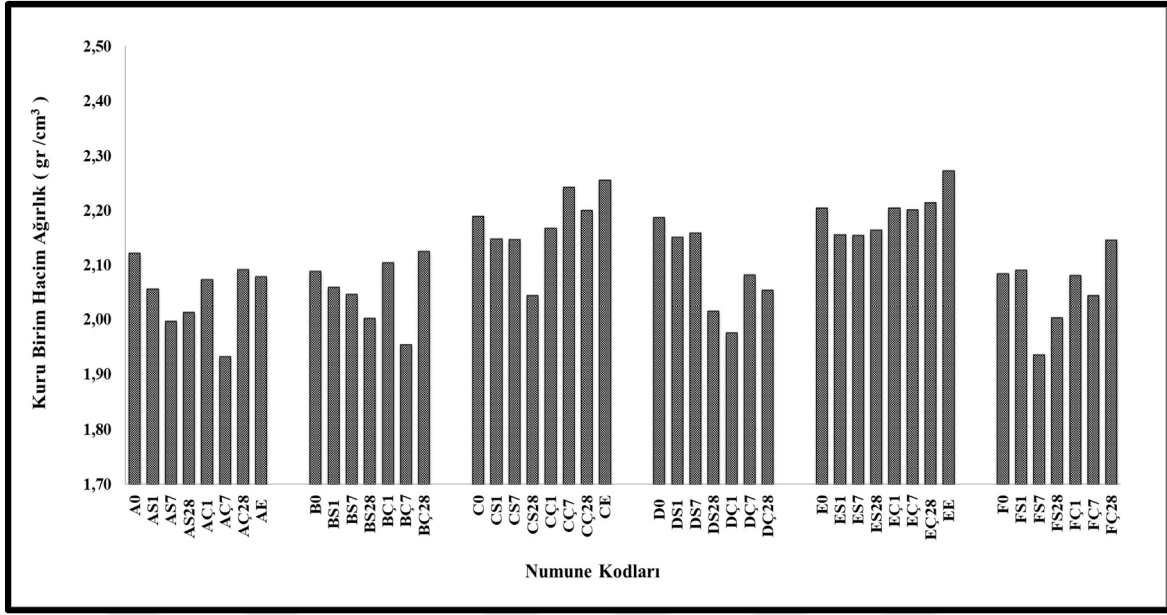
7.günde azalma, 28.günde ise tekrar ağırlık artışları tespit edilmiştir. Birim hacim ağırlık değeri; C numunelerinde diğer karışımlara oranla daha yüksektir. Bu durum alkali aktivatör yoğunluğu ile ilişkilendirilmektedir. 28, 56, 90 gün ortam kürü uygulanan numunelerde 90.gün kuru birim hacim ağırlıklarındaki en çok artış %6-7 oranlarında CS7 DS7 numunelerinde görülmüştür.



Şekil 4. 8. 28 günlük kuru birim hacim ağırlık grafiği



Şekil 4. 9. 56 günlük kuru birim hacim ağırlık grafiği



Şekil 4. 10. 90 günlük kuru birim hacim ağırlık grafiği

A numunelerinin kuru birim hacim ağırlık aralığı  $1,93-2,12 \text{ g/cm}^3$  olup, E ve C numunelerine göre daha düşük değerlere sahiptir. Referans numunelerine oranla, A numunesinde % 7 oranında azalma olmuştur. B karışımlarında azalmanın en çok görüldüğü numune % 6 oranında BS-15/7/90 numunesidir. B numuneleri arasında  $\gamma_k$  değerleri  $1,88-2,13 \text{ g/cm}^3$  aralığındadır. C numunelerinde  $\gamma_k$  aralığı  $2,02-2,26 \text{ g/cm}^3$  olarak hesaplanmıştır. Karışım içerisinde CÇ-37/28/28 ve CE-45/90 numuneleri en yüksek kuru birim hacim değerine sahip numunelerdir. D karışımında su kürü uygulaması sonucu numunelerin tamamında artış gözlemlenmiştir. Genel olarak  $\gamma_k$  aralığı ise  $1,98-2,19 \text{ g/cm}^3$  olarak belirlenmiştir. D numunelerinde çözelti yoğunluğunun ve ortamda bekleme süresinin artması F referans numunelerine göre DS-15/7/90 numunesinin kuru ağırlığını yaklaşık %12 oranında arttırmıştır.

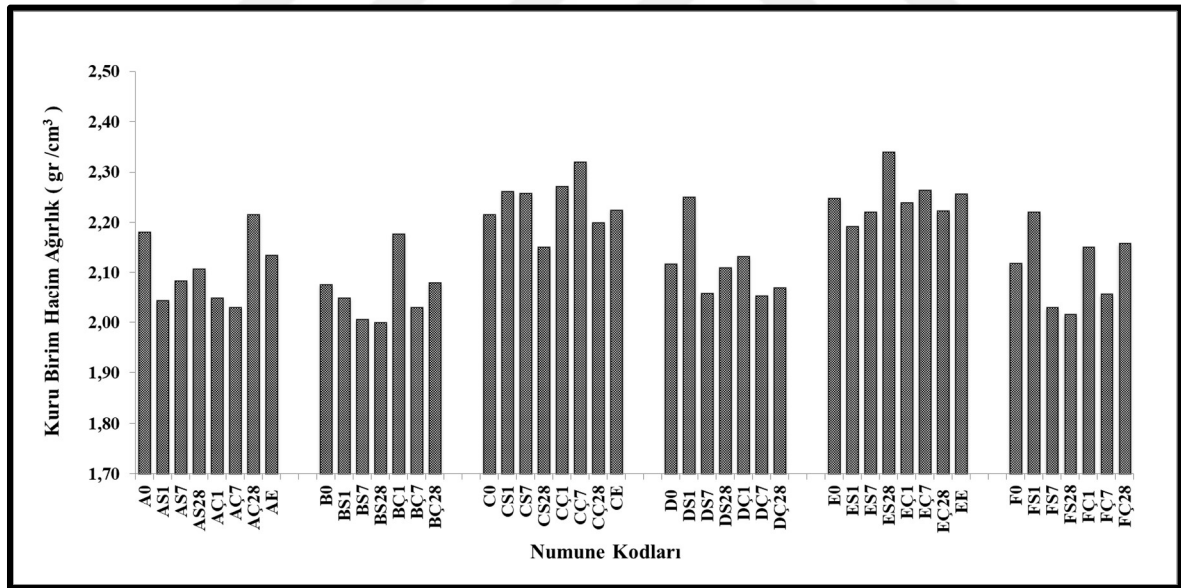
100 °C karışım suyu sıcaklığı ile hazırlanan B ve D karışımlarının, A ve C (23 °C) karışımlarına göre daha düşük birim hacim ağırlık değerlerinde seyrettiği gözlemlenmiştir. Genel olarak ortamda bekleme sürelerinin ve sıcaklığın artması sonucu harç içerisindeki suyun buharlaşması, hidrasyon sürecinde boşluk miktarının arttırarak kuru birim hacim ağırlıklarını azaltmıştır.

Çizelge 4. 3.Min. ve max. kuru birim hacim ağırlıklarına sahip A, B, C, D numuneleri

En yüksek		En düşük		
Numune Kodu (A)	Y <sub>kmax</sub>	Numune Kodu (A)	Y <sub>kmin</sub>	
1	AE-44/56 A-3/0/90	2,12	AÇ-33/7/90	1,93
2	AÇ-37/28/28 AÇ-38/28/56	2,11	AS-8/1/56	1,96
3	A-2/0/56 AS-20/28/56	2,10	AÇ-25/1/28 AÇ-31/7/28 AS-14/7/56	1,97
4	AS-19/28/28 AÇ-39/28/90	2,09	AÇ-26/1/56	1,98
5	A-1/0/28 AE-45/90	2,08	AÇ-32/7/56	1,99
Numune Kodu (B)	Y <sub>kmax</sub>	Numune Kodu (B)	Y <sub>kmin</sub>	
1	BÇ-39/28/90	2,13	BS-20/28/56	1,88
2	BÇ-27/1/90	2,10	BS-19/28/28 BÇ-33/7/90	1,95
3	B-3/0/90	2,09	BS-13/7/28 BS-14/7/56	1,99
4	B-1/0/28 B-2/0/56	2,08	BS-21/28/90	2,00
5	BÇ-25/1/28	2,07	BS-8/1/56	2,01
Numune Kodu (C)	Y <sub>kmax</sub>	Numune Kodu (C)	Y <sub>kmin</sub>	
1	CÇ-37/28/28 CE-45/90	2,26	CS-13/7/28	2,02
2	CÇ-38/28/56	2,25	CS-21/28/90	2,04
3	CÇ-33/7/90	2,24	CS-7/1/28	2,10
4	C-2/0/56 CS-8/1/56	2,21	CS-20/28/56	2,11
5	C-3/0/90	2,19	CS-19/28/28	2,12
Numune Kodu (D)	Y <sub>kmax</sub>	Numune Kodu (D)	Y <sub>kmin</sub>	
1	D-3/0/90	2,19	DÇ-27/1/90	1,98
2	DS-19/28/28 D-2/0/56	2,18	DS-13/7/28	2,00
3	D-1/0/28	2,17	DÇ-31/7/28 DS-21/28/90	2,01
4	DS-8/1/56 DS-15/7/90	2,16	DÇ-26/1/56	2,02
5	DS-9/1/90	2,15	DÇ-32/7/56	2,04



Çalışmada ıslanma-kuruma (IK) numunelerine ait veriler Şekil 4.11’de verilmiştir. 23 °C karışım suyu eklenerek hazırlanan A, C ve E karışımları, sıcak su eklenen karışımlar ile (B, D, F) kıyaslandığında 28. gündeki  $\gamma_k$  oranları daha yüksek çıkmıştır. IK etkisinde A, C, E karışımlarının bünyesindeki suyu hızlı şekilde saldı, B, D, F numunelerinin ise çözelti yoğunluğunun fazla olması ve içerisindeki suyu tutması sonucu kuruma etkilerini azaltması ile olduğu düşünülmektedir. IK etkisinde A, B, C, D numuneleri içerisinde birim hacim ağırlığı en yüksek olan numune CÇ/34/7/IK 2,32 g/cm<sup>3</sup> numunesidir. Genel olarak ortamda bekletilen numunelere oranla, sıvı içerisinde kürlenmeleri sonucu  $\gamma_k$  değerlerinde düşüş görülmüştür. Ancak özellikle C numunelerinin davranışı diğer karışımlara göre farklı ilerlemiş ve bazılarında artış gözlenmiştir. SEP katkısı ile genel olarak su emme miktarı ve gözeneklilik artmakta buna karşılık kuru birim hacim ağırlıkları düşmektedir. Ancak SEP içerisinde alkali aktivatör katkısının eklenmesi harç yoğunluğu arttırmaktadır. Geopolimer harçlarda sıcaklık ve kür süresindeki artışın birim hacim ağırlıklarının düşmesine neden olduğu belirtilmiştir (Atabey, 2017). Max ve min. IK değerleri Çizelge 4.4’de verilmiştir.

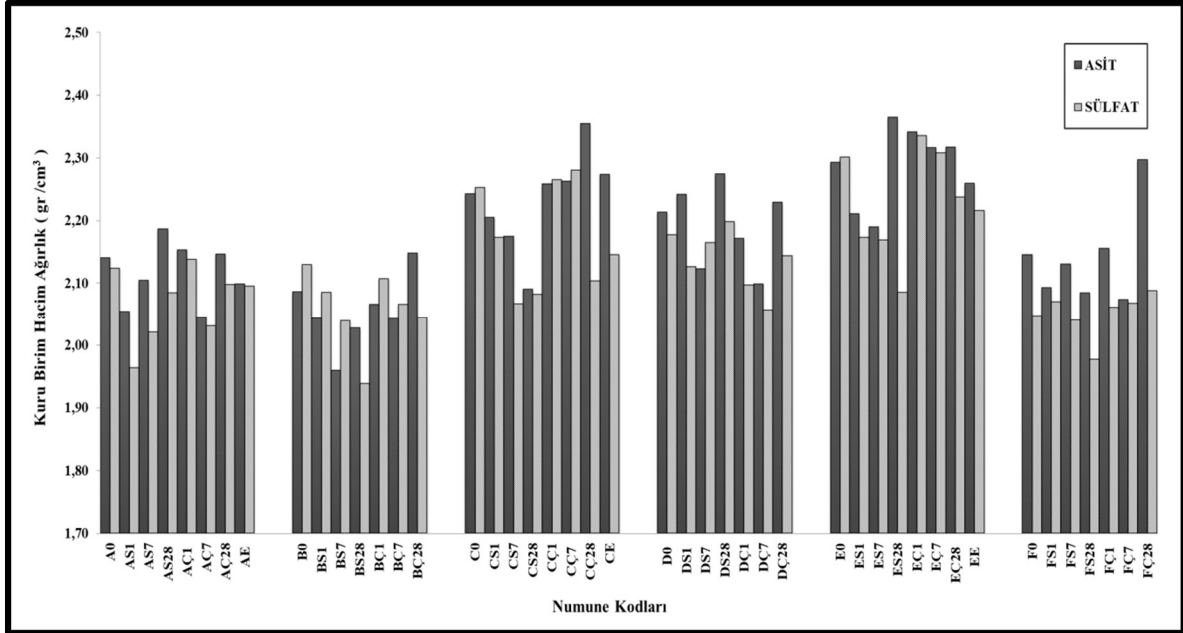


Şekil 4. 11. Islanma-kuruma numunelerinin kuru birim hacim ağırlık grafiği

Çizelge 4. 4. Min. ve max. kuru birim hacim ağırlıklarına sahip İK numuneleri

	En yüksek	Y <sub>kmax</sub>	En düşük	Y <sub>kmin</sub>
1	CÇ/34/7/İK	2,32	BS/22/28/İK	2,00
2	CÇ/28/1/İK	2,27	BS/16/7/İK	2,01
3	CS/10/1/İK CS/16/7/İK	2,26	AÇ/34/7/İK BÇ/34/7/İK	2,03
4	DS/10/1/İK	2,25	AS/10/1/İK	2,04
5	AÇ/40/28/İK C/4/0/İK CE-46/İK/	2,22	AÇ/28/1/İK BS/10/1/İK DÇ/34/7/İK	2,05

Asit ve sülfat çözeltilerinin içerisinde 1 ay bekletilen numunelerin kuru birim ağırlıklık ortalamalarında 28 gün suda bekletilen numunelere kıyasla sırasıyla %4 ve %2'lik artışlar gözlenmiştir. Hem asit hemde sülfat deneyinde A, B, C ve D numuneleri içerisinde kuru birim ağırlığı 28 güne göre en çok artan numune 1 gün çözeltide bekletilmiş AÇ/29/1/30A ve AÇ/30/1/30S numuneleridir. SEP-2 çözelti katkısı ile hazırlanan C ve D numunelerinde suda bekletilenlere oranla kuru birim hacim ağırlıkları daha yüksek çıkmıştır. Asit ve sülfat numunelerine ait veriler Çizelge 4.5 ve Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4. 12. Asit-sülfat numunelerinin kuru birim hacim ağırlık grafiği

Çizelge 4. 5. Min. ve max. kuru birim hacim ağırlıklarına sahip asit-sülfat numuneleri

En yüksek		En düşük	
Numune Kodu (Asit)	$\gamma_{kmax}$	Numune Kodu (Asit)	$\gamma_{kmin}$
1 CÇ/41/28/30A	2,35	BS/17/7/30A	1,96
2 CE/47/30A DS/23/28/30A	2,27	BS/23/28/30A	2,03
3 CÇ/29/1/30A CÇ/35/7/30A	2,26	AÇ/35/7/30A BS/11/1/30A BÇ/35/7/30A	2,04
4 C/5/0/30A DS/11/1/30A	2,24	AS/11/1/30A	2,05
5 DÇ/41/28/30A	2,23	BÇ/29/1/30A	2,07
Numune Kodu (Sülfat)	$\gamma_{kmax}$	Numune Kodu (Sülfat)	$\gamma_{kmin}$
1 CÇ-36/7/30S	2,28	BS/24/28/30S	1,94
2 CÇ-30/1/30S	2,27	AS/12/1/30S	1,96
3 C-6/0/30S	2,25	AS/18/7/30S	2,02
4 DS/24/28/30S	2,20	AÇ/36/7/30S	2,03
5 D-6/0/30S	2,18	BS/18/7/30S BÇ/42/28/30S	2,04

### **Doymun birim hacim ağırlık**

SEP katkılı numunelerinin doymun birim hacim ağırlık hesabında, sıvı tanklarında, belirlenen sürelerde kürlenmiş numunelerin kür süresini tamamlaması sonucunda ıslak ağırlıkları, hacimlerine bölünerek harç içerisindeki su doymunluğu tespit edilmiştir. Numuneler 1, 7, 28 gün su ve çözelti tanklarında bekletilmiş, daha sonra 28, 56, 90 gün dayanım kazanmaları için ortama bırakılmıştır. Bünyesine aldıkları su miktarları ve suya doymunlukları incelendiğinde; 90. günde  $\gamma_{dyk}$  değerlerinde artış görülmüştür. SEP katkılı numunelerde polimerin bünyesine su almaya devam ettiği ve buna bağlı olarak  $\gamma_{dyk}$  değerlerinin arttığı düşünülmektedir. 28. gün  $\gamma_{dyk}$  değerleri ile kıyaslandığında 56. günde en çok artışın görüldüğü numune CS-14/7/56, 90 günlük numunelerde ise en çok artış DS-15/7/90 numunesinde olmuştur. 28, 56 ve 90 günlük doymun birim hacim ağırlık değerleri Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilmiştir.

Numuneler referans numunelerine göre incelendiğinde; SEP-1 ve 23 °C karışım suyu eklenerek hazırlanan A karışımlarının doymun birim hacim ağırlıkları yaklaşık olarak 2,15-2,26 g/cm<sup>3</sup> aralığındadır. A numuneleri arasında  $\gamma_{dyk}$  değeri en yüksek olan AÇ-27/1/90 (2,26 g/cm<sup>3</sup>) numunesidir.

Daha sonra sırası ile AÇ-37/28/28, AÇ-38/28/56 ve AÇ-39/28/90 numuneleridir. Genel olarak 28 gün çözeltide bekletilen numunelerin karışım serisi içerisinde  $\gamma_{dyk}$  miktarlarının diğer ortamlara göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

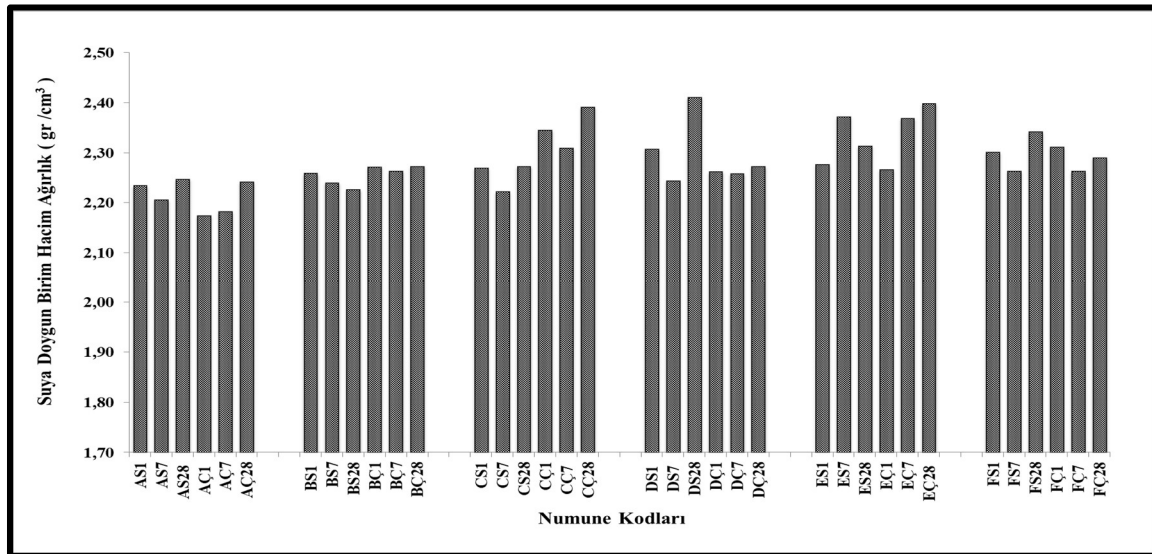
A numunelerinde olduğu gibi B ve C numunesinde de çözelti içerisinde bekletilen numuneler en yüksek  $\gamma_{dyk}$  değerlerine ulaşmıştır. B numunesinin  $\gamma_{dyk}$  aralığı 2,13-2,35 g/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. C numunelerinde  $\gamma_{dyk}$  aralığı 2.18-2.40 g/cm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. C numunelerinde genel olarak E referans numunelerine oranla artışlar görülmüştür. Özellikle çözelti içerisinde bekletilen numunelerin arttığı, bu artışın en çok görüldüğü numunenin ise CÇ-33/7/90 olduğu tespit edilmiştir. D numunelerinin doygun birim hacim ağırlığı 2,19-2,43 g/cm<sup>3</sup> aralığındadır. D numunelerin de genel olarak F referans numunelerine göre artış gözlemlendiği ve bu artışın genellikle su içerisinde bekletilen numunelerde olduğu belirlenmiştir. En çok artış DS-15/7/90 (2,43 g/cm<sup>3</sup>) numunesinde olup bu numune aynı zamanda en yüksek  $\gamma_{dyk}$  değerine sahip olan numune olarak belirlenmiştir. Genel olarak çözelti katkısı ve sıcaklık etkisi ile doygun birim hacim ağırlıkları artmıştır. Suyu doygun birim hacim ağırlığı en yüksek ve en düşük olan değerler Çizelge 4.6'da verilmiştir. Çizelgeye göre çözeltide bekleyen numunelerin en yüksek  $\gamma_{dyk}$  değerine sahip olduğu bunun reaksiyon sonucu oluşturdukları C-S-H jelleri nedeniyle daha yoğun olması ve suya olan ihtiyacın azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Atabey (2017) çalışmasında, Na konsantrasyonunun artması ile kuru ve doygun birim hacim ağırlıklarının bir miktar arttığını belirtmiştir. SEP katkısının genel olarak  $\gamma_{dyk}$  değerlerini arttırdığı ancak kür şartları ve karışım yöntemleri sonucunda etkilerinin azaldığı düşünülmektedir.

Çizelge 4. 6. Min. ve max. doygun birim hacim ağırlıklarına sahip numuneler

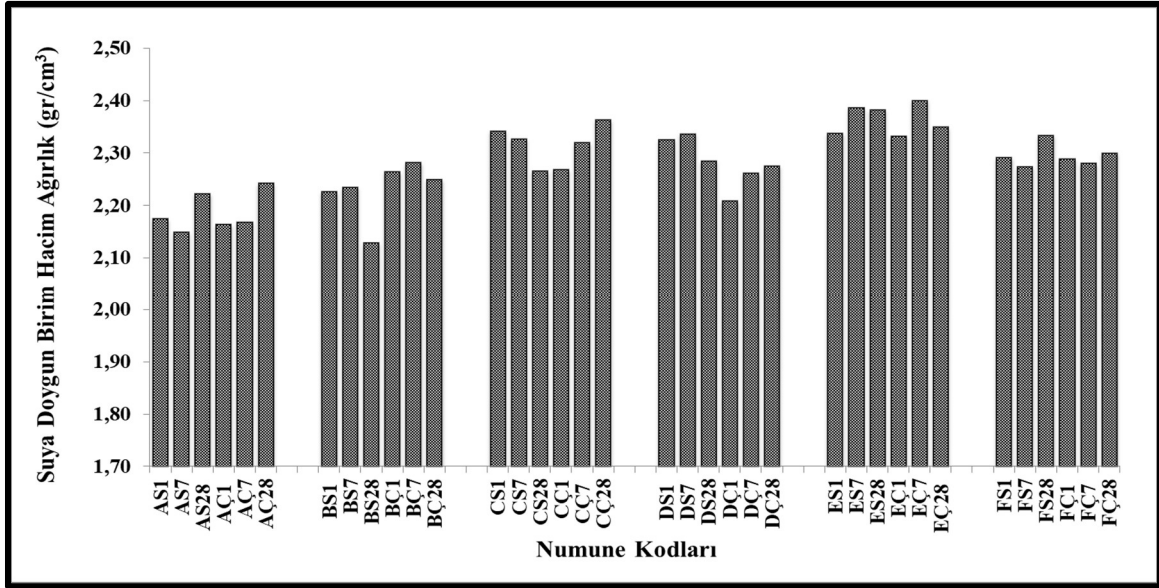
En yüksek		En düşük		
Numune Kodu (A)	$\gamma_{dykmax}$	Numune Kodu (A)	$\gamma_{dykmin}$	
1	AÇ-27/1/90	2,26	AS-14/7/56 AÇ-33/7/90	2,15
2	AS-19/28/28	2,25	AÇ-26/1/56 AÇ-25/1/28	2,16
3	AÇ-37/28/28 AÇ-38/28/56	2,24	AS-8/1/56 AÇ-32/7/56 AS-15/7/90	2,17
4	AS-7/1/28	2,23	AÇ-31/7/28	2,18
5	AS-20/28/56 AS-9/1/90 AÇ-39/28/90	2,22	AS-13/7/28 AS-21/28/90	2,21

Çizelge 4.6.(Devam) Min. ve max. doygun birim hacim ağırlıklarına sahip numuneler

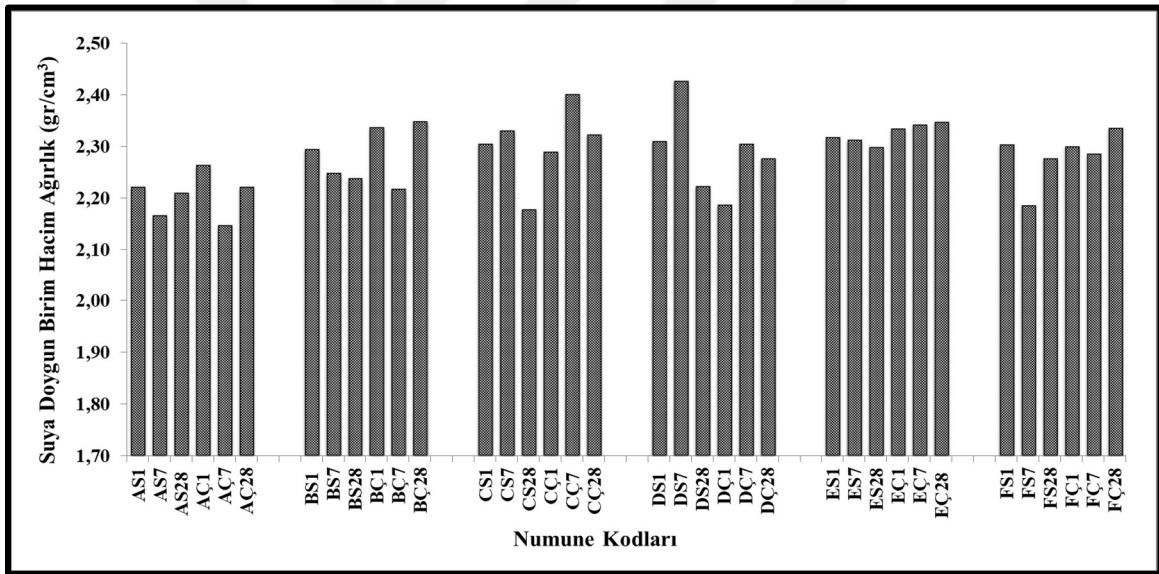
	Numune Kodu (B)	Ydykmax	Numune Kodu (B)	Ydykmin
1	BÇ-39/28/90	2,35	BS-20/28/56	2,13
2	BÇ-27/1/90	2,34	BÇ-33/7/90	2,22
3	BS-9/1/90	2,29	BS-19/28/28	2,23
			BS-8/1/56	
4	BÇ-32/7/56	2,28	BS-13/7/28	2,24
			BS-14/7/56	
			BS-21/28/90	
5	BÇ-25/1/28	2,27	BÇ-38/28/56	2,25
	BÇ-37/28/28		BS-15/7/90	
	Numune Kodu (C)	Ydykmax	Numune Kodu (C)	Ydykmin
1	CÇ-33/7/90	2,40	CS-21/28/90	2,18
2	CÇ-37/28/28	2,39	CS-13/7/28	2,22
			CS-7/1/28	
3	CÇ-38/28/56	2,36	CS-19/28/28	2,27
			CS-20/28/56	
			CÇ-26/1/56	
4	CÇ-25/1/28	2,35	CÇ-27/1/90	2,29
5	CS-14/7/56	2,33	CÇ-31/7/28	2,31
	CS-15/7/90		CS-9/1/90	
	Numune Kodu (D)	Ydykmax	Numune Kodu (D)	Ydykmin
1	DS-15/7/90	2,43	DÇ-27/1/90	2,19
2	DS-19/28/28	2,41	DÇ-26/1/56	2,21
3	DS-14/7/56	2,34	DS-21/28/90	2,22
4	DS-8/1/56	2,33	DS-13/7/28	2,24
			DÇ-25/1/28	
5	DS-7/1/28	2,31	DÇ-31/7/28	2,26
	DS-9/1/90		DÇ-32/7/56	



Şekil 4. 13. 28 günlük doygun birim hacim ağırlık grafiği

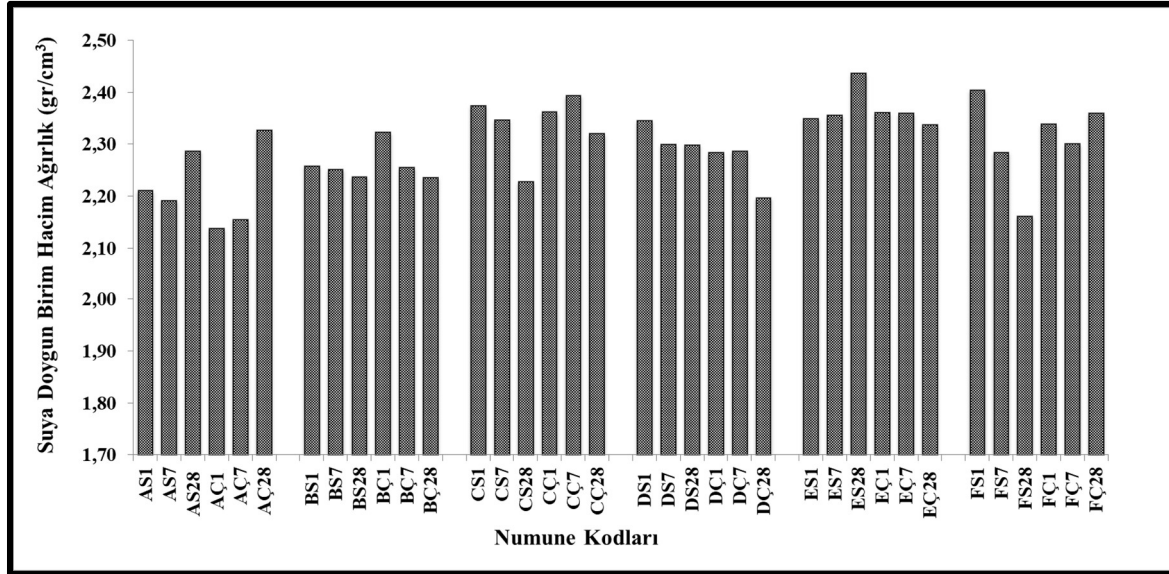


Şekil 4. 14. 56 günlük doymuş birim hacim ağırlık grafiği



Şekil 4. 15. 90 günlük doymuş birim hacim ağırlık grafiği

İK numunelerinin doymuş birim hacim ağırlık durumlarını gösteren grafik eklenmiş olup; numunelerin referans numunelerine göre ve kendi aralarında gösterdikleri birim hacim ağırlık farkları incelenmiştir (Şekil 4.16).



Şekil 4. 16. Islanma-kuruma numunelerine ait doymun birim hacim ağırlık grafiği

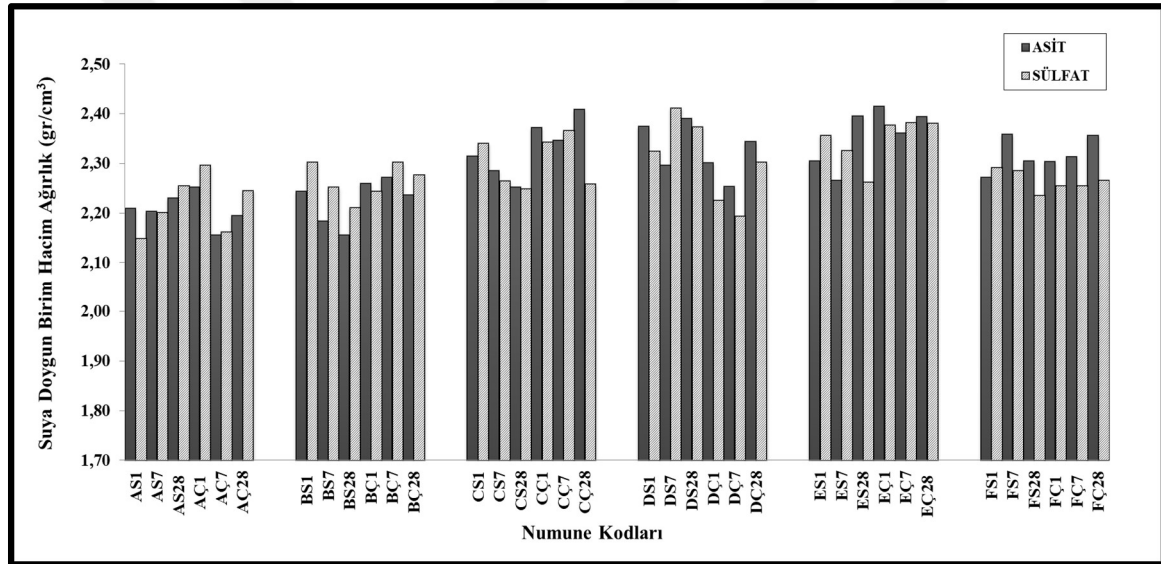
İK deneyinde A, C, E numunelerinin kür ortamları ve bekleme sürelerine bakıldığında aynı trendde seyretmediği görülmüştür. C karışımları A, B ve D karışımlarına göre daha yüksek  $\gamma_{dyk}$  değerlerine sahiptir. B, D, F numuneleri içerisindeki ilişkide her iki sıvı küründe bekletilmiş numunelerde, 1.gün numunelerinin doymun su miktarlarının 28.güne göre daha fazla olduğu ve gün geçtikçe doymun su miktarında azalma olduğu görülmüştür. Numunelerden elde edilen en yüksek ve en düşük değerler Çizelge 4.7’de eklenmiştir. A numuneleri hariç tüm karışımlarda 28 gün sıvı kürü sonrası sıcaklık ve çözelti yoğunluğu nedeniyle B, C, D numunelerinde suyu doymunluk düşmüş, A numunelerinde artmıştır.

Çizelge 4. 7. Min. ve max. doymun birim hacim ağırlıklarına sahip İK numuneleri

En yüksek	$\gamma_{dykmax}$	En düşük	$\gamma_{dykmin}$	
1	CÇ/34/7/İK	2,39	AÇ/28/1/İK	2,14
2	CS/10/1/İK	2,38	AÇ/34/7/İK	2,16
3	CÇ/28/1/İK	2,36	AS/16/7/İK	2,19
4	CS/16/7/İK	2,35	AS/10/1/İK	2,21
5	AÇ/40/28/İK	2,33	CS/22/28/İK	2,23

Asit ve sülfat içerisinde bekletilmiş numunelerin doymun birim hacim ağırlık değerleri Şekil 4.17’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde; SEP-1 katkısı ile hazırlanan A ve B karışımlarının  $\gamma_{dyk}$  değerleri düşük iken SEP-2 çözelti katkılı numunelerin  $\gamma_{dyk}$  değerleri daha yüksek çıkmıştır. Alkali aktivatör katkısı ile daha yüksek  $\gamma_{dyk}$  değerlerine sahip olan karışımlar ile yapılan diğer deney sonuçları benzerlik göstermektedir. Çalışma verilerinde;

asit içerisinde bekletilen A ve C numuneleri E numunesi ile kıyaslandığında daha düşük değerler aldığı Şekil 4.17'deki grafikte görülmektedir. Numuneler sıvı içerisindeki kür sürelerine göre incelendiğinde; sıvıda bekleme sürelerinin her birinde farklı davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Genel olarak F referans numunesine göre B numunesi 1, 7 ve 28 günlük periyotlarda daha düşük değer alırken, D numunesinin 1 ve 7. günkü numunelerinin F'ye göre daha yüksek değerler aldığı görülmüştür. Aynı şekilde F numunesinin sıvı ortamına göre B ve D ile kıyaslamasında B'nin su numunelerinde, D'nin ise çözelti ortamındaki numunelerinde daha yüksek değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. 23 °C'de hazırlanan numunelerde referans numunesine göre suya doygunlukları C ile yakın değerlerde seyretmiş, A numunelerinde ise düşmüştür.



Şekil 4. 17. Asit-sülfat numunelerine ait doygun birim hacim ağırlık grafiği

Çizelge 4. 8. Asit- sülfat numunelerinin min-max doygun birim hacim ağırlıkları

En yüksek		En düşük		
Numune Kodu (Asit)	Ydykmax	Numune Kodu (Asit)	Ydykmin	
1	CÇ/41/28/30A	2,41	AÇ/35/7/30A BS/23/28/30A	2,16
2	DS/23/28/30A	2,39	BS/17/7/30A	2,18
3	CÇ/29/1/30A DS/11/1/30A	2,37	AS/17/7/30A AÇ/41/28/30A	2,20
4	CÇ/35/7/30A	2,35	AS/11/1/30A	2,21
5	DÇ/41/28/30A	2,34	AS/23/28/30A	2,23



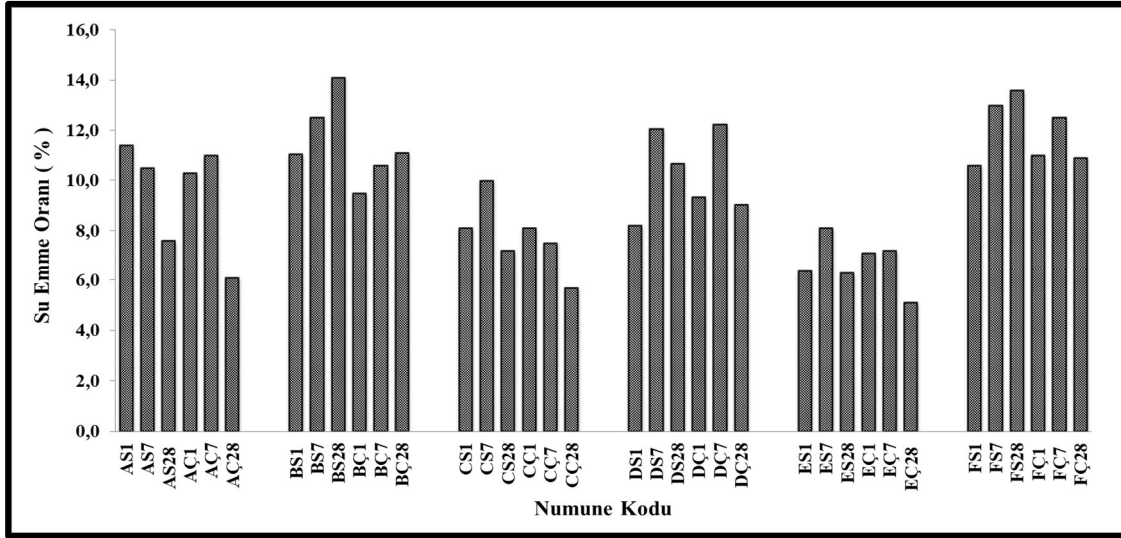
Çizelge 4. 8. (Devam) Asit- sülfat numunelerinin min-max doygun birim hacim ağırlıkları

	Numune Kodu (Sülfat)	Y <sub>dykmax</sub>	Numune Kodu (Sülfat)	Y <sub>dykmin</sub>
1	DS/18/7/30S	2,41	AS/12/1/30S	2,15
2	CÇ-36/7/30S DS/24/28/30S	2,37	AÇ/36/7/30S	2,16
3	CS-12/1/30S CÇ-30/1/30S	2,34	DÇ/36/7/30S	2,19
4	DS/12/1/30S	2,32	AS/18/7/30S	2,20
5	AÇ/30/1/30S BS/12/1/30S BÇ/36/7/30S DÇ/42/28/30S	2,30	BS/24/28/30S	2,21

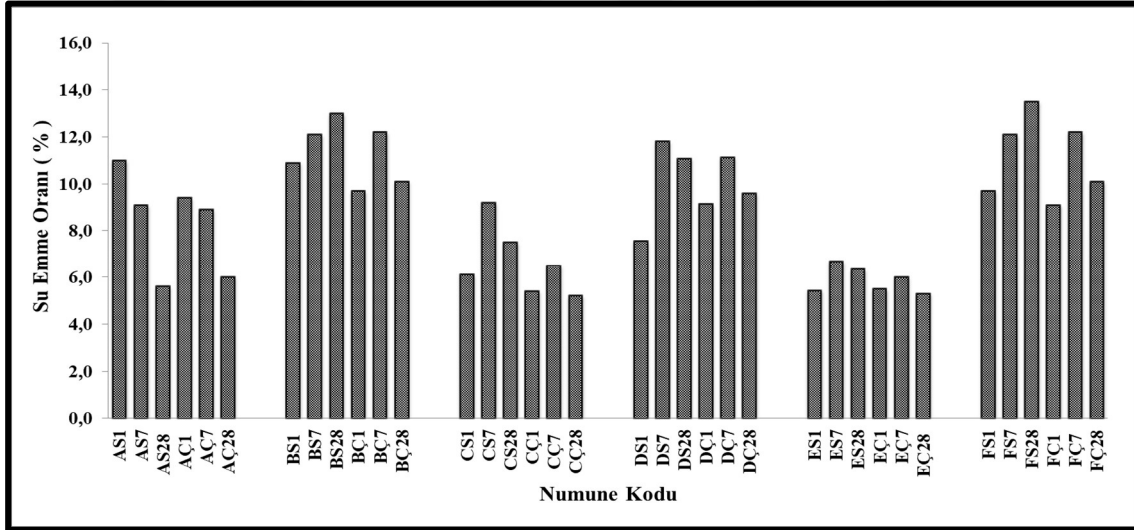
#### 4.2.3. Su emme kapasitesi

SEP katkılı ve katkısız olarak hazırlanan numunelerin su emme oranları ait veriler Çizelge 4.9'da verilmiştir. Su emme oranları incelenen A, B, C, D, E, F karışımları, kür süreleri, karışım sıcaklıkları ve SEP miktarlarına göre kendi içlerinde ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. 28, 56, 90 günlük numuneler içerisinde; 28 gün ortamda beklemiş numunelere göre, 56. günde azalma görüldüğü, 90. günde ise su emmenin arttığını gözlenmiştir (Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20). Bu artışın 28 günlük numunelere kıyasla daha düşük miktarda olduğu yapılan incelemeler sonucunda görülmüştür.

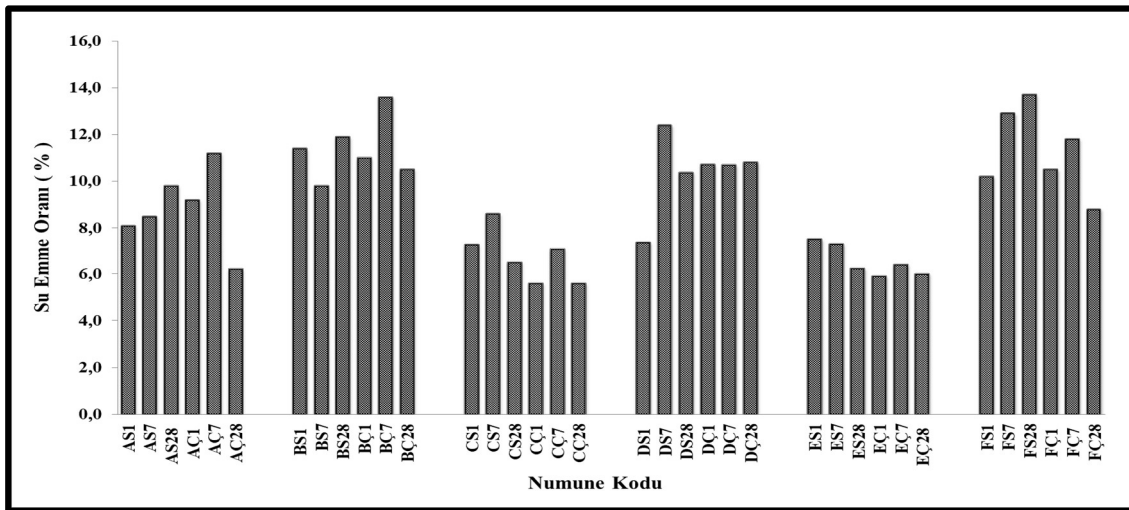
Çalışmada genel olarak sıcaklığın artması su emme oranlarını arttırmıştır (B, D, F). Sıcak su ilavesinin aktivasyon hızını artırması sonucunda su emme oranların arttığı düşünülmektedir. Buna ek olarak SEP-2 (çözelti katkılı) ile hazırlanan numunelerin (C ve D) su emme miktarları, SEP-1 (su katkılı) ile hazırlanan A ve B karışımlarına göre daha düşük oranlarda ölçülmüştür. Grafikler incelendiğinde, alkali aktivatör miktarının artması su emme oranlarını düşürmüştür. Balçıkankılı (2016), çalışmasında sodyum konsantrasyonu ve silikat modülündeki artışın su emme oranlarını düşürdüğü belirtilmiştir.



Şekil 4. 18. 28 günlük numunelerin su emme oranları



Şekil 4. 19. 56 günlük numunelerin su emme oranları



Şekil 4. 20. 90 günlük numunelerin su emme oranları

Karışımlar içerisinde su emme miktarları yüksek olanlar BS-19/28/28 ve BS-24/28/30S numuneleridir. En az su emme oranına sahip numune ise AS-23/28/30A'dır. F referans numunesi ile B ve D numuneleri arasında su emme miktarları kıyaslandığında BS-22/28/IK numunesi F referans numunesi göre en çok su emen numunedir. D numuneleri içerisinde en fazla su emen numune ise DÇ-41/28/30A numunesidir. Yine referans numunesine göre en az su emen numuneler BS-23/28/30A ile DS-23/28/30A numuneleridir. E referans numunesi ile A ve C numuneleri su emme miktarları bakımından kıyaslandığında genel olarak su emme miktarlarında artış görülmüştür. Ancak en çok artış AÇ/30/1/30S ve CS-23/28/30A numunelerinde gözlemlenmiştir. En fazla su kaybı ise yine referans numunesine kıyasla AÇ/41/28/30A ve CS/16/7/IK numunelerinde tespit edilmiştir. Çalışmada 1, 7, 28 gün sıvı içerisinde kür edilen numunelerin 28. günün sonunda su emme oranlarının düştüğü, buna karşılık suya doygunluklarının genel olarak attığı görüldüğünden, harçların belirli kür süresinden sonra doygunluklarının artmasıyla ilgili bünyesine aldıkları su emme miktarlarının ve hızlarının düşmesine neden olduğu düşünülmektedir.

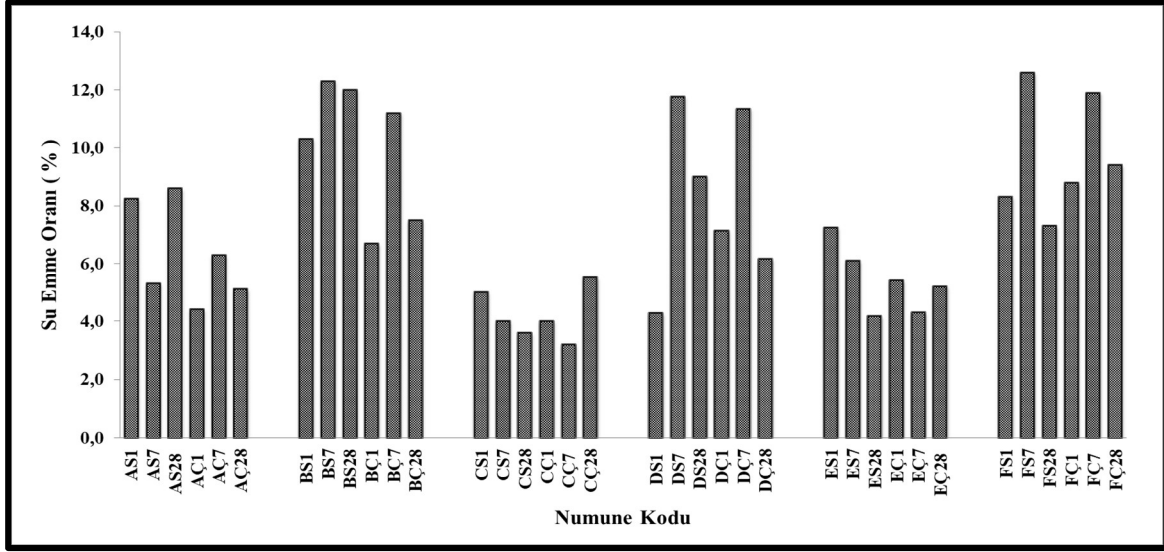
Çizelge 4. 9. Karışımların 28, 56, 90 günlük su emme oranları (%)

Numune Kodu (28)	(%)	Numune Kodu (56)	(%)	Numune Kodu (90)	(%)
AS-7/1/28	11,4	AS-8/1/56	11,0	AS-9/1/90	8,1
AS-13/7/28	10,5	AS-14/7/56	9,1	AS-15/7/90	8,5
AS-19/28/28	7,6	AS-20/28/56	5,6	AS-21/28/90	9,8
AÇ-25/1/28	10,3	AÇ-26/1/56	9,4	AÇ-27/1/90	9,2
AÇ-31/7/28	11,0	AÇ-32/7/56	8,9	AÇ-33/7/90	11,2
AÇ-37/28/28	6,1	AÇ-38/28/56	6,0	AÇ-39/28/90	6,2
BS-7/1/28	11,0	BS-8/1/56	10,9	BS-9/1/90	11,4
BS-13/7/28	12,5	BS-14/7/56	12,1	BS-15/7/90	9,8
BS-19/28/28	14,1	BS-20/28/56	13,0	BS-21/28/90	11,9
BÇ-25/1/28	9,5	BÇ-26/1/56	9,7	BÇ-27/1/90	11,0
BÇ-31/7/28	10,6	BÇ-32/7/56	12,2	BÇ-33/7/90	13,6
BÇ-37/28/28	11,1	BÇ-38/28/56	10,1	BÇ-39/28/90	10,5
CS-7/1/28	8,1	CS-8/1/56	6,1	CS-9/1/90	7,3
CS-13/7/28	10,0	CS-14/7/56	9,2	CS-15/7/90	8,6
CS-19/28/28	7,2	CS-20/28/56	7,5	CS-21/28/90	6,5
CÇ-25/1/28	8,1	CÇ-26/1/56	5,4	CÇ-27/1/90	5,6
CÇ-31/7/28	7,5	CÇ-32/7/56	6,5	CÇ-33/7/90	7,1
CÇ-37/28/28	5,7	CÇ-38/28/56	5,2	CÇ-39/28/90	5,6
DS-7/1/28	8,2	DS-8/1/56	7,6	DS-9/1/90	7,4
DS-13/7/28	12,1	DS-14/7/56	11,8	DS-15/7/90	12,4
DS-19/28/28	10,7	DS-20/28/56	11,1	DS-21/28/90	10,4
DÇ-25/1/28	9,3	DÇ-26/1/56	9,1	DÇ-27/1/90	10,7
DÇ-31/7/28	12,2	DÇ-32/7/56	11,1	DÇ-33/7/90	10,7
DÇ-37/28/28	9,0	DÇ-38/28/56	9,6	DÇ-39/28/90	10,8

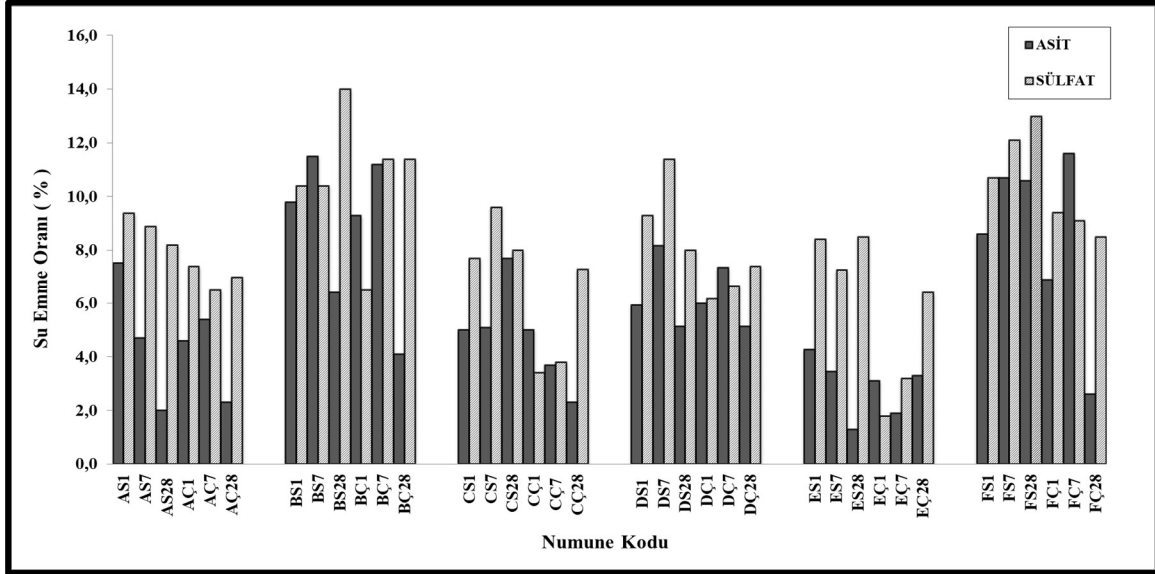
Çizelge 4. 9. (Devam) Karışımların 28, 56, 90 günlük su emme oranları (%)

Numune Kodu (28)	(%)	Numune Kodu (56)	(%)	Numune Kodu (90)	(%)
ES-7/1/28	6,4	ES-8/1/56	5,4	ES-9/1/90	7,5
ES-13/7/28	8,1	ES-14/7/56	6,7	ES-15/7/90	7,3
ES-19/28/28	6,3	ES-20/28/56	6,3	ES-21/28/90	6,2
EÇ-25/1/28	7,1	EÇ-26/1/56	5,5	EÇ-27/1/90	5,9
EÇ-31/7/28	7,2	EÇ-32/7/56	6,0	EÇ-33/7/90	6,4
EÇ-37/28/28	5,1	EÇ-38/28/56	5,3	EÇ-39/28/90	6,0
FS-7/1/28	10,6	FS-8/1/56	9,7	FS-9/1/90	10,2
FS-13/7/28	13,0	FS-14/7/56	12,1	FS-15/7/90	12,9
FS-19/28/28	13,6	FS-20/28/56	13,5	FS-21/28/90	13,7
FÇ-25/1/28	11,0	FÇ-26/1/56	9,1	FÇ-27/1/90	10,5
FÇ-31/7/28	12,5	FÇ-32/7/56	12,2	FÇ-33/7/90	11,8
FÇ-37/28/28	10,9	FÇ-38/28/56	10,1	FÇ-39/28/90	8,8

Asit – sülfat ve IK deneyi ile ilgili grafikler Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Genel olarak B, D, F numunelerinin su emme oranları A, C, E karışımlarına oranla daha yüksek çıkmıştır. Bu durum diğer kür koşulları ile benzer trenddedir. IK numuneleri, asit-sülfat deneyine kıyasla daha yüksek su emme oranlarına sahiptir. Asit ve sülfat deneyinde harç içerisindeki boşlukların kimyasallar ile dolması, SEP etkilerininin kısıtlandığı düşünülmektedir. Asit- sülfat deneyinde A, B, C karışımlarının referans numunesine kıyasla arttığı, D karışımının ise özellikle asit-sülfat deneylerinde düştüğü görülmüştür. D numuneleri sıcaklık ve çözelti miktarı bakımından en yüksek numune olduğu için su emme miktarlarının azaldığı görülmüştür. Bunun nedeninin karışım içerisinde bulunan sodyum poliakrilatların; karışıma ve SEP içerisine eklenen çözelti ve sertleşmiş harçların çözelti içerisinde kür edilmesi nedeniyle polimerde çözelti miktarının çok fazla artmasından dolayı su geçirgenliğinin azalması olduğu düşünülmektedir. IK deneyi sonrası, su emme miktarları incelendiğinde; tüm numuneler içerisinde hem yüksek sıcaklık hemde SEP katkısının su ile hazırlandığı B karışımı en yüksek su emme miktarlarına sahiptir. C karışımında tüm koşullarda referans numunesine göre su emme miktarının arttığı görülmüştür. B ve D karışımları için; referans numunesi olan F ile yakın değerlerde olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 21. Islanma-kuruma numunelerin su emme oranları



Şekil 4. 22. Asit-sülfat numunelerin su emme oranları

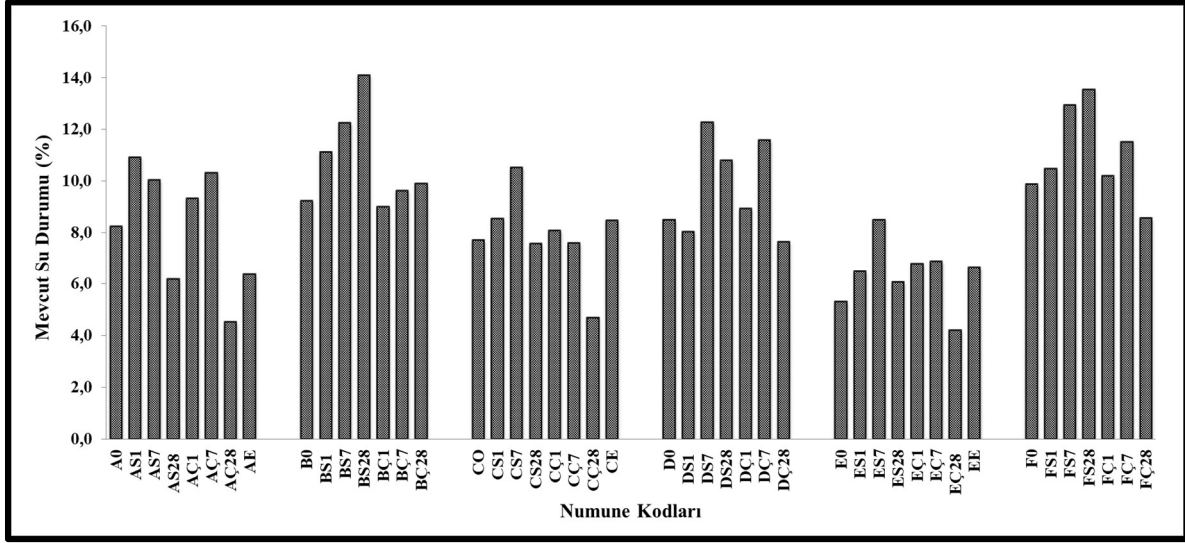
#### 4.2.4. Mevcut su durumu

Sıvı içerisinde (su+çözelti) kütleme süresi tamamlanan numunelerin, sıvı içerisinde çıkarıldıktan sonra ağırlıkları tartılarak kaydedilmiştir. Daha sonra numunelerin tamamı etüvde kurutulmalarının ardından ağırlıkları ölçülmüştür. Elde edilen değerler  $((W_{\text{ortam}} - W_{\text{kuru}}) / W_{\text{kuru}}) * 100$  formülü kullanılarak mevcut su emme miktarları bulunmuştur. Elde edilen veriler sonucunda mevcut su durumları ile su emme oranları uyumludur.

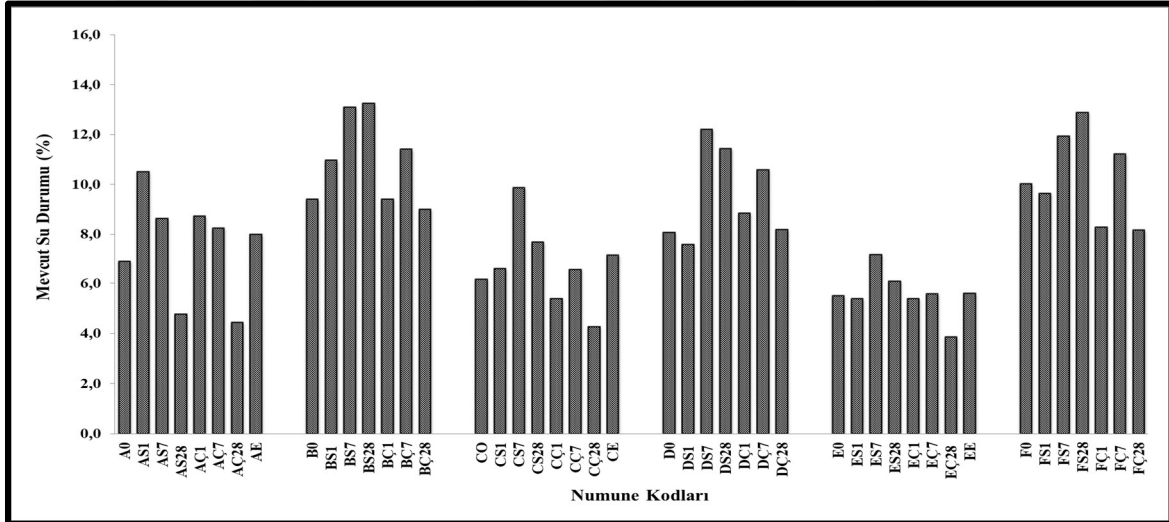
Kürlenme sıcaklıkları açısından kıyaslandığında yüksek sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin daha fazla mevcut su miktarına sahip olduğu görülmüştür. Sıcaklık dışındaki diğer bir etken olan SEP miktarlarına bakıldığında; SEP katkısı mevcut su durumlarını arttırmıştır. Ancak D numunelerinin SEP katkılı olmasına rağmen F referans numunelerine göre düştüğü gözlenmiştir. Bunun nedeninin karışım içerisinde sıcaklığın yükselmesi ve çözelti yoğunluğundaki artış olduğu düşünülmektedir. İçerisinde bulunan aktivatörler reaksiyon sürecinde su miktarını kısıtlamakta ve boşlukların çözelti ile dolması sonucu daha az miktarda su emme eğilimi gösterdiği düşünülmektedir. Tüm numuneler incelendiğinde su içerisinde bekletilen numunelerin genel olarak mevcut su durumları, çözelti içerisinde bekletilenlere göre daha fazladır. Bu durumun nedeninin çözelti katkılı karışımlarda reaksiyon gelişiminin daha iyi olması ve buna bağlı olarak jel oluşumunu artırması ile boşlukları azalttığı düşünülmektedir. Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'deki grafikler incelendiğinde tüm karışımlarda ortam numunelerinin; su, çözelti ve etüvde bekletilen numuneler göre daha düşük değerlere sahip olduğu görülmüştür.

Asit içerisinde bekletilen numunelerin mevcut su durumunun, diğer kür şartlarında bekletilen numunelerden düşük olduğu bilinmektedir. Asit numunelerinin kendi içerisinde kıyaslandığında özellikle etüv ve çözelti içerisinde bekletilen numunelerde en düşük seviyelerde olduğu gözlenmiştir. Asit-sülfat numunelerine ait mevcut su durumları Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Bu durumun asitli ortama alınmadan önce; su içerisinde kürlenmiş numunelerinin, çözelti ve etüvde bekletilenlere göre içerisinde tuttuğu su miktarının fazla olması ile doğru orantılı olduğu düşünülmektedir. Etüvdeki numunelerde sıcaklık nedeni ile azalan su miktarının asitin etkisi ile daha düşük değerlere indiğini söylemek mümkündür. Kür ortamları içerisinde diğerlerine göre yüksek değerlere sahip olanlar 28 gün ve sülfat içerisinde bekletilen numuneleridir.

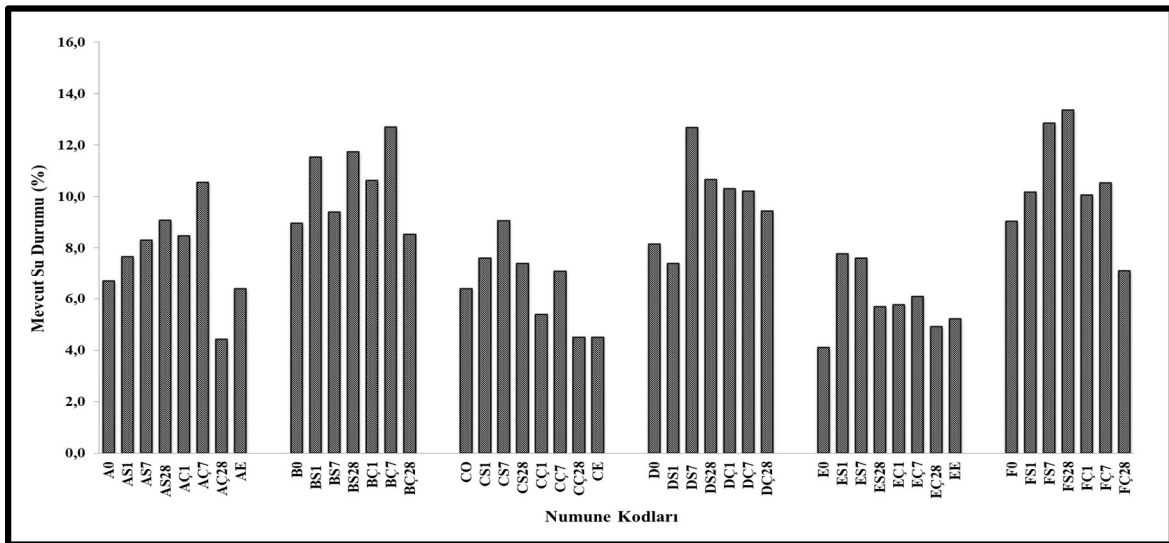
Genel olarak bakıldığında; su ve çözelti havuzlarında bekletilen numuneler, ortam ve etüv numunelerine göre daha doygun haldedir. Su içerisinde bekletilen numunelerin çözelti ve diğer ortamlara bulunanlara göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür. B numunelerinde ise mevcut su durum miktarları tüm numunelerden daha yüksektir.



Şekil 4. 23. 28 günlük mevcut su durumu grafiği



Şekil 4. 24. 56 günlük mevcut su durumu grafiği



Şekil 4. 25. 90 günlük mevcut su durumu grafiği

Karışımlar içerisinde mevcut su durumu en yüksek ve en düşük olan numuneler Çizelge 4.10'da verilmiştir.

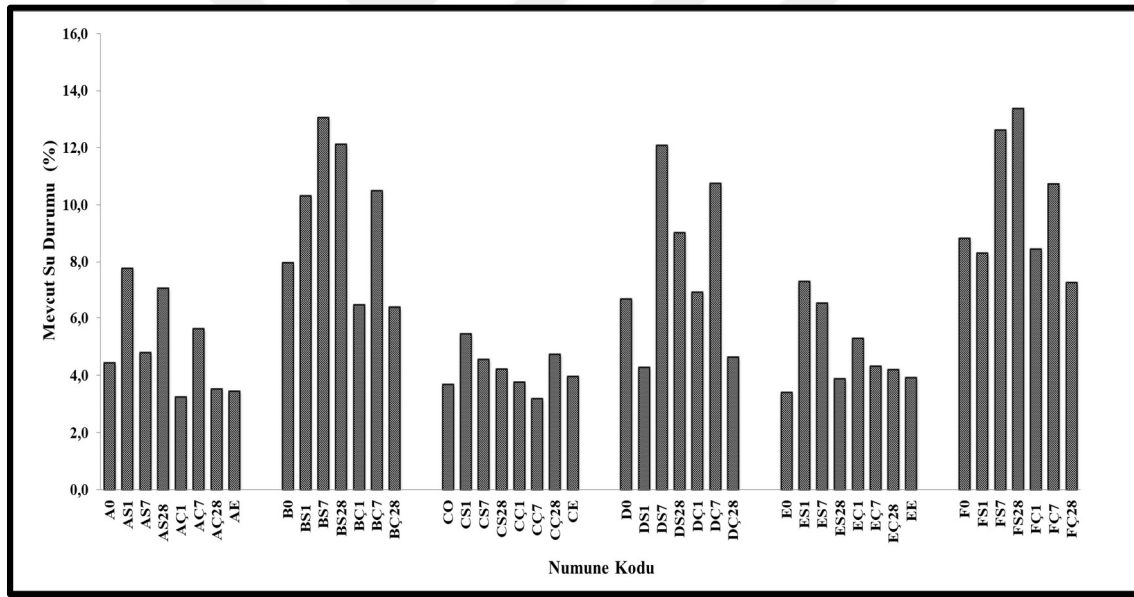
Çizelge 4. 10. A,B,C,D numunelerine ait min ve max mevcut su durumu yüzdeleri

	En yüksek	(%)	En düşük	(%)
<b>A</b>				
1	AS-7/1/28	10,9	AS-23/28/30A	0,8
2	AS-8/1/56 AÇ-33/7/90	10,5	AÇ-41/28/30A	0,9
3	AÇ-31/7/28	10,3	AE/47/30A	2,4
4	AS-13/7/28	10,0	AÇ/28/1/IK	3,2
5	AÇ-25/1/28	9,3	AE-46/IK/	3,4
<b>B</b>				
1	BS-19/28/28 BS-24/28/30S	14,1	BÇ-41/28/30A	2,8
2	BS-20/28/56	13,2	B-6/0/30S	6,1
3	BS-14/7/56	13,1	BS/23/28/30A BÇ/40/28/IK	6,4
4	BS/16/7/IK	13,0	BÇ/28/1/IK	6,5
5	BÇ-33/7/90	12,7	BÇ/30/1/30S	6,6
<b>C</b>				
1	CS-13/7/28 CS-18/7/30S	10,5	CÇ-41/28/30A	1,2
2	CS-14/7/56	9,9	C-5/0/30A CE-47/30A	1,8
3	CS-15/7/90	9,1	C-6/0/30S	2,3
4	CE/48/30S	8,8	CÇ-30/1/30S CÇ/34/7/IK	3,2
5	CS-7/1/28 CS-24/28/30S	8,6	CÇ/35/7/30A	3,6
<b>D</b>				
1	DS-15/7/90	12,7	D-5/0/30A DÇ-41/28/30A	3,9
2	DS-13/7/28	12,3	D-6/0/30S	4,2
3	DS-14/7/56	12,2	DS/10/1/IK	4,3
4	DS/16/7/IK	12,1	DÇ/40/28/IK	4,6
5	DS/18/7/30S	11,8	DS/23/28/30A	5,2

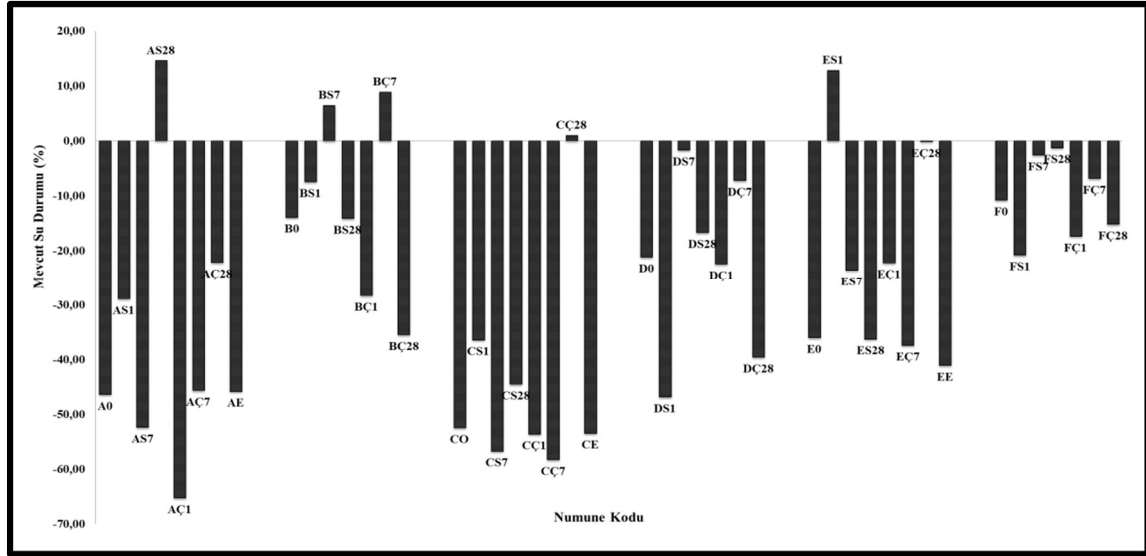


İK numunelerinde; referans numunesine göre, A, B, C, D karışımlarının tümünde su emme miktarlarında azalma olmuştur (Şekil 4.26). 100 °C’de hazırlanan numunelerin mevcut su miktarlarının 23 °C’ye göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeninin sıcaklık etkisinde birlikte boşluk miktarlarındaki artış olduğu düşünülmektedir. Farklı kür koşullarında hazırlanan numunelerde su kürü sonucu numunelerin yapısındaki suyun diğer kür şartlarına göre daha fazla olduğu belirtilmiştir. En az su içeriğine sahip numuneler etüvde kür edilenler olarak ölçülmüştür.

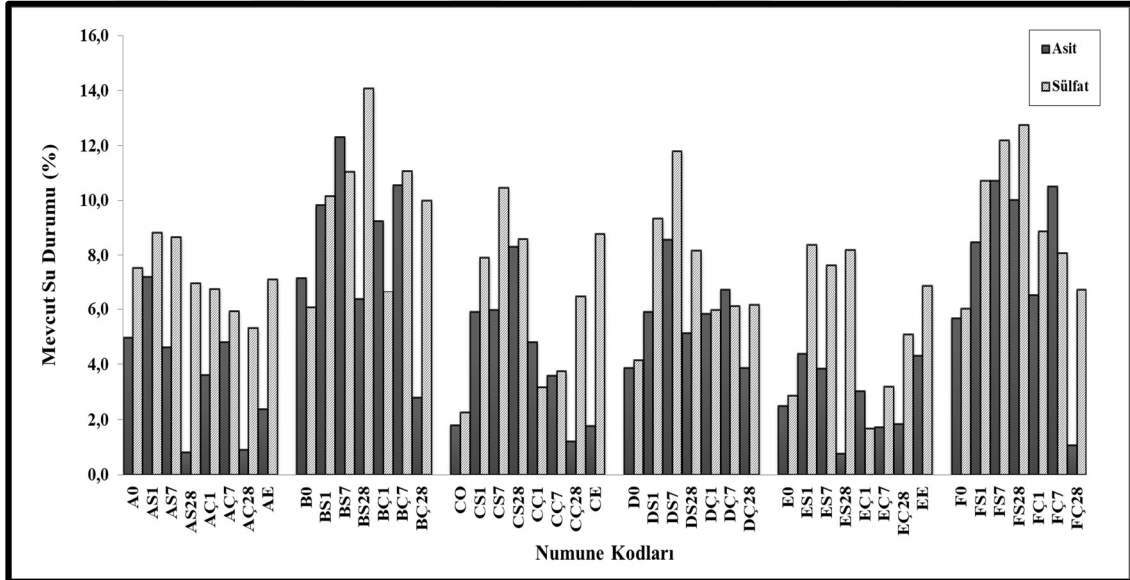
İK uygulaması sonucunda mevcut su durumlarına bakıldığında; 28 gün kür edilen numunelere oranla tüm karışımların değerleri düşmüştür (Şekil 4.27). 28 günlük mevcut su durumlarına oranla en çok azalma çözelti içeren numunelerde olmuştur. 23 °C’deki numunelerin mevcut su durumlarındaki azalmalar 100 °C kür sıcaklığına sahip numunelere göre daha yüksek oranlarda seyretmiştir.



Şekil 4. 26. Islanma-kuruma numunelerin mevcut su durumları



Şekil 4. 27. 28 günlük numuneler ile ıslanma-kuruma numuneleri arasındaki ilişki



Şekil 4. 28. Asit-sülfat numunelerin mevcut su durumları

#### 4.2.5. Kılcal su emme (Kapilarite)

28, 56 ve 90 günlük numunelerin kılcal su emme katsayıları genel olarak incelendiğinde en yüksek değerlerin 100 °C sıcak su ile hazırlanan B, D ve F numuneleri olduğu görülmüştür. Deneysel tasarımda açıklanan Çizelge 3.9'daki B, D, F karışımları için belirtilen sıcaklık aralığında tüm malzemeler ısıtılmıştır ve karışıma 100 °C sıcak su eklenmiştir. Bir çalışmada içten kürlenme sırasında önceden ıslatılmış hafif agreganın sıvı desorpsiyonundan sorumlu olduğuna belirtilmiştir (Schröfl vd., 2022).

Yapılan tez çalışmasında kapiler su emme katsayıları yaş aldıkça azalma göstermiştir. Özellikle 90 günlük numunelerde bu oranlar çok düşük seyretmektedir. Çünkü numune yaşının artması ile birlikte kapiler boşluk miktarı azalmaktadır. 28, 56, 90 günlük numunelerin kılcallık katsayılar incelendiğinde D numuneleri genel olarak F referans numunelerine oranla hep düşüş göstermiştir. Bunun nedeninin çözelti yoğunluğu ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Deney sonuçlarına göre 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121, 144, 169, 196, 225, 256, 289, 324, 361 dakikalık ölçüm süresi boyunca kılcal su emme miktarlarının tüm karışımlar için giderek arttığı tespit edilmiştir. Çalışmada sodyum konsantrasyonu arttıkça kılcallık katsayısında genel olarak azalma gözlenmiştir. Balçıkanlı (2016), sodyum konsantrasyondaki artış ile karışım içerisinde oluşturduğu yoğunluğu bağlı olarak kılcal su emmenin azaldığını belirtmiştir. Özellikle SEP-2 çözelti eklenerek hazırlanan karışımların, çözelti havuzlarında bekletilenlerinde bu azalma daha açık bir şekilde görülmüştür. Buna ek olarak kılcal su emme deneyi, su emme miktarları ile kıyaslandığında sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.12 ve Şekil 4.29'da görüldüğü gibi 28 günlük A ve C karışımları E referans numunesine göre kıyaslandığında kılcal su miktarı artmıştır. Çalışmada B numunesinin D ve F numunelerine göre daha yüksek değerlere sahip olmasının SEP-1 su katkısı sonucu gözenekliliği daha fazla olması ve birbiri ile bağlantılı olmasından kaynaklanabilmektedir. Çözelti katkısı, daha yoğun bir yapı oluşturarak boşluklar arası geçirimsizliği düşürdüğü tahmin edilmektedir.

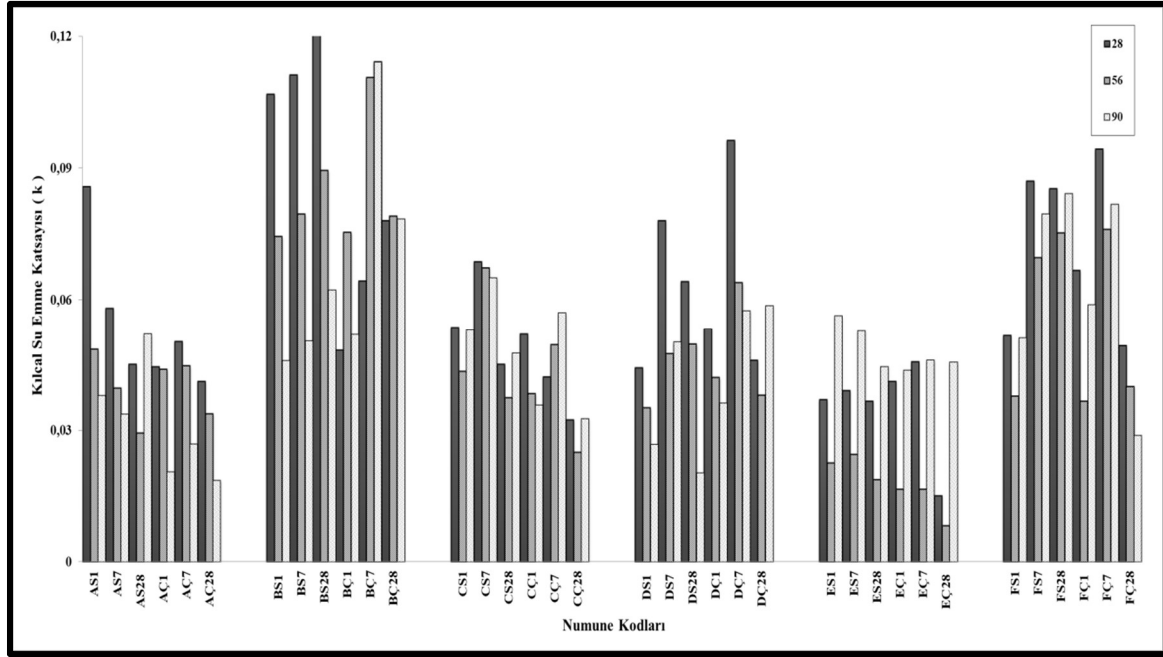
D numunelerinde, sıcaklığın hidratasyonu hızlandırması ile içerisinde oluşturduğu daha fazla jel harcın yoğunluğunu artmıştır. Buna bağlı olarak kılcal su emme katsayısı B ve F numunelerine kıyasla düşmüştür. Referans karışımlarına göre en yüksek artışın olduğu karışımın %51 oranı ile A numunesi olduğu tespit edilmiştir. Tüm numuneler içerisinde çözültide kür edilen numunelerin katsayılarının suda kür edilen numunelere göre daha düşük olduğu görülmektedir. C ve D karışımlarının da çözültüli SEP kullanılmasının numuneler üzerinde olumlu etki yarattığı düşünülmektedir. Oda sıcaklığında bekletilen su katkısı ile hazırlanan A, C, E numunelerinde ise genel katsayı düşüktür ancak referans numunesine kıyasla görülen artışın SEP katkısı nedeniyle olduğu görülmektedir. 28 günlük numuneler kıyaslandığında A, C, E numunelerinde referans numunesine kıyasla SEP miktarının artmasının kılcal su emme katsayısını arttırdığı görülmüştür.

56 günlük A, C, E numunelerinin kılcal su emme katsayılarına bakıldığında E referans numunelerine kıyasla her iki karışımda da artış görülmüştür. C numuneleri A numunesine göre daha yüksek su emme katsayısına sahiptir. E numunelerine kıyasla A ve C numunelerinde %100'ün üzerinde artış olmuştur. B, D, F numunelerinde de aynı durum geçerlidir. F referans numunesine kıyasla D numunesinde %18 oranında azalma görülürken B numunesinde %52 oranında bir artış vardır. Ancak grafik incelendiğinde genel olarak B ve F karışım numunelerinin değerleri diğer karışımlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Hidratasyon derecesi ve yaş arttıkça kapiler boşluklarda azalma meydana gelmesi beklenir. Hidratasyon sonucu oluşan C-S-H jeli kılcal boşlukları arasındaki bağı giderek azaltır. 90 günlük numunelerde kılcal su emme her iki sıcaklıktaki karışım içinde giderek en düşük seviyelere gelmiştir. Bu düşüşün bir diğer nedeninin, içerisindeki çözelti konsantrasyonunun artışıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Numunelerin içerisinde kılcal su emme katsayıları en düşük olanlar Çizelge 4.11'de verilmiştir. A, C, E numunelerinde referans numunesine göre içerisinde SEP bulduran A ve C numunelerine göre azalma göstermiştir. B, D, F numunelerinde ise B numunesi D'ye göre daha yüksek kılcal su emme katsayısına sahiptir. Sıcaklık etkisiyle 28 günlükler ile aynı sonuçları vermiştir. En çok düşüş %48 oranı ile D numunesinde görülmüştür. 90 günlük numunelere ait grafik incelendiğinde B, E ve F numuneleri diğer karışımlara göre daha yüksek değerlere sahiptir. E numunelerinde 90. gün bekleme süreleri sonucunda 28 ve 56 günlük ortam şartlarına göre de ortalama olarak daha yüksek bir artış eğrisi göstermiştir.

Çizelge 4. 11. En düşük kılcal su emme katsayısına sahip olan numuneler

	28	(cm <sup>2</sup> /s)	56	(cm <sup>2</sup> /s)	90	(cm <sup>2</sup> /s)
1	EÇ-37/28/28	0,0151	EÇ-38/28/56	0,0082	AÇ-39/28/90	0,0186
2	CÇ-37/28/28	0,0325	EÇ-26/1/56 EÇ-32/7/56	0,0166	DS-21/28/90	0,0203
3	ES-19/28/28	0,0367	ES-20/28/56	0,0187	AÇ-27/1/90	0,0205
4	ES-7/1/28	0,0371	ES-8/1/56	0,0225	DS-9/1/90	0,0268
5	ES-13/7/28	0,0392	ES-14/7/56	0,0245	AÇ-33/7/90	0,0269



Şekil 4. 29. 28, 56 ve 90 günlük kılcal su emme katsayıları

Çizelge 4. 12. 28, 56, 90 günlük kılcal su emme katsayıları

Numune Kodu	Kılcal Su Emme Katsayısı (%)		
	28	56	90
AS1	0,0858	0,0485	0,0380
AS7	0,0581	0,0396	0,0337
AS28	0,0452	0,0294	0,0521
AÇ1	0,0446	0,0439	0,0205
AÇ7	0,0504	0,0447	0,0269
AÇ28	0,0412	0,0338	0,0186
BS1	0,1069	0,0744	0,0459
BS7	0,1113	0,0795	0,0504
BS28	0,1225	0,0895	0,0622
BÇ1	0,0484	0,0754	0,0520
BÇ7	0,0644	0,1106	0,1142
BÇ28	0,0781	0,0790	0,0784
CS1	0,0537	0,0435	0,0530
CS7	0,0687	0,0673	0,0650
CS28	0,0452	0,0374	0,0477
CÇ1	0,0521	0,0384	0,0358
CÇ7	0,0423	0,0496	0,0570
CÇ28	0,0325	0,0250	0,0327
DS1	0,0444	0,0352	0,0268
DS7	0,0781	0,0475	0,0502
DS28	0,0642	0,0497	0,0203
DÇ1	0,0534	0,0421	0,0362
DÇ7	0,0963	0,0639	0,0575
DÇ28	0,0461	0,038	0,0587

Çizelge 4.12. (Devam) 28, 56, 90 günlük kılcal su emme katsayıları

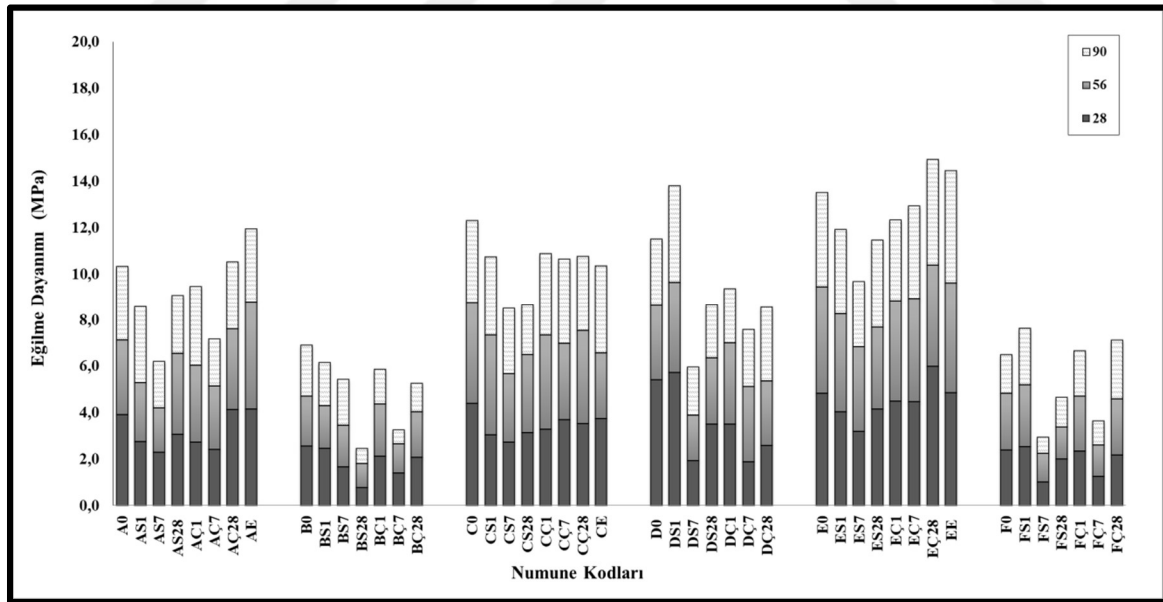
Numune Kodu	Kılcal Su Emme Katsayısı (%)		
	28	56	90
ES1	0,0371	0,0225	0,0563
ES7	0,0392	0,0245	0,0528
ES28	0,0367	0,0187	0,0446
EÇ1	0,0413	0,0166	0,0438
EÇ7	0,0458	0,0166	0,0461
EÇ28	0,0151	0,0082	0,0456
FS1	0,0518	0,0378	0,0512
FS7	0,0871	0,0696	0,0796
FS28	0,0854	0,0752	0,0842
FÇ1	0,0668	0,0366	0,0589
FÇ7	0,0944	0,0760	0,0818
FÇ28	0,0495	0,0400	0,0288

#### 4.2.6. Eğilme dayanımı

Çalışma kapsamında 40\*40\*160 mm boyutlarındaki numunelere üç noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır. Referans numunelerinin SEP katkılı numuneler ile kıyaslanması amacıyla 28, 56 ve 90 günlük eğilme dayanımları Şekil 4.30'daki grafikte incelenmiştir. Genel olarak bakıldığında E referans numunesine kıyasla SEP katkısı ile hazırlanan A ve C numunelerinin tamamının dayanımlarının düştüğü görülmüştür. Eğilme dayanımlarındaki düşüşün, SEP katkılı numunelerde daha yüksek gözenek hacmi nedeniyle olduğu, SEP'nin içten kürlenme sırasında su desorpsiyonu sırasında büzülüp, hava boşlukları bırakabileceği belirtilmiştir (Mechtcherine vd., 2014). Bunun aksine 100 °C sıcak su ile hazırlanan B ve D numuneleri, F numunesine göre artmıştır. B ve D numunelerinin dayanımları düşüktür ancak SEP katkısı eğilme dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. Çözelti yoğunluğu fazla olan C ve D numunelerinde 28 günlük eğilme dayanımına bakıldığında, su içeriği fazla olan A ve B numunelerine oranla eğilme dayanımları daha yüksektir. Harç içerisine eklenen SEP-2 çözelti katkısının hidrasyon sürecinde ilave aktivatör kaynağı olarak içten kürlenmeyi desteklemesi numunelerin dayanımlarına olumlu etki yaptığı düşünülmektedir. Çalışmada 1, 7, 28 gün su ve çözelti tanklarında bekletilen tüm numunelerde 1 ve 7 gün kür süresine bağlı olarak dayanımlar düşerken, 28. günün sonunda dayanımlar tekrar artışa geçmiştir. Ortam ve etüv numuneleri sıvı içerisindeki numunelere kıyasla daha fazla dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Bu koşullarda numunelerin, sıvı ortama daha az maruz kalması ve SEP bünyesine aldığı sıvı miktarı belli seviyede kaldığından, içerisindeki su miktarına bağlı olarak dayanımının yüksek olduğu düşünülmektedir.

Yapılan bir çalışmada farklı kütleme yöntemleri karşılaştırılmış ve SEP'ye su kürü uygulandığında dayanımlarda daha fazla düşüş görülürken, laboratuvar şartlarında beklenen numunelerin SEP katkısı sonucu dayanıma etkilerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. İçten kütleme, betonun dayanımı açısından kuru depolama koşullarında daha avantajlı olduğu belirtilmiştir. Yaygın olarak su kürü hidrasyon süreci için daha etkili olduğunu belirten çalışmada mevcut olup genel olarak SEP katkısı içerisinde uygulanan koşullara göre farklılık gösterebileceği düşünülmektedir. (Mechtcherine vd., 2014)

56 günlük eğilme dayanımları 28. güne göre genel bir artış göstermiştir. Özellikle A ve C numunelerinde bu artış daha belirgindir. Referans numuneleri ile kıyaslanan deney numuneleri içerisinde B serisinde F'ye göre dayanımlarında düşüş gözlenirken çözeltili ilaveli D numunelerinde dayanım artmıştır. SEP katkısı ile numunelerin içten kütleme yaparak dayanımlara etkilediği düşünülmektedir. 90 günlük dayanımlarda ise 56.gün dayanımlarına göre düşüşler gözlenmiştir. Özellikle A ve B numunelerindeki azalmanın daha fazla olduğu tespit edilmiştir. C numunelerinde ise numune yaşı arttıkça dayanımda bir miktar düşüş gözlenmiştir.



Şekil 4. 30. 28, 56, 90 günlük eğilme dayanımları

A numunelerinin tamamında referans numunesine oranla eğilme dayanımlarında azalma görülmüştür. A karışımında en yüksek dayanım değerlerine sahip olan numune AE-44/56 (4,6 MPa) numunesidir.

B numunelerinin genel dayanımları çok düşüktür. 100 °C su katılarak hazırlanan referans numunesi ile kıyaslanan B numunelerinde, en çok artışın görüldüğü numune BS-15/7/90 numunesidir. En çok düşüş gösteren B numunesi ise BÇ-39/28/90 numunesi olarak tespit edilmiştir. Çözelti içerisinde bekleyen numunelerin, eğilme dayanımları 1 ve 28. Gün çözeltide bekleyenlerde artış olurken, 7 günlük numunelerde azalma eğilimi göstermiştir. B numunesinin eğilme dayanımı açısından en fazla olduğu numune B-1/0/28 (2,6 MPa) numunesidir.

C numuneleri referans numunesi olan E numunesi ve 23 °C'de karışım sıcaklığına sahip A numunesi ile kıyaslandığında eğilme dayanımları açısından aralarındaki ilişki;  $E > C > A$  şeklinde sıralanmaktadır. A numunesinde olduğu gibi SEP katkılı C numunesinde de dayanımlar düşmüştür. Genel olarak boşluk oranının artması dayanımların düşmesine neden olmuştur. C numunelerinde 4,4 MPa değer ile en yüksek dayanıma sahip olan numuneler C-1/0/28 ve C-2/0/56 olarak belirlenmiştir.

D numunelerinin tamamında referans numunesine kıyasla artış görülmüştür. Numuneler içerisindeki en büyük artış 3,0 MPa değeri ile D-1/0/28 numunesinde gözlenmiştir. 28 ve 56 günlük eğilme dayanımına bakıldığında her iki sıvı ortam içerisinde bekletilen numunelerin 1, 7, 28 günlük numunelerinde, 1 gün bekletilenler diğer kür koşullarına göre daha iyi dayanım göstermiş, buna ek olarak 7 günlük dayanımları düşmüştür. F referans numunesi ile kıyaslandığında D numunesinin eğilme dayanımı açısından en fazla dayanım kazanan numune 5,7 MPa ile DS-7/1/28 numuneleridir. Tüm ortamlar içerisinde D ve B karışımı referans numunesi olan F numunesine kıyasla 100 °C sıcaklık ile hazırlanan karışımlar içerisinde en iyi performansa sahiptir. Çizelge 4.13'de numunelere ait en yüksek eğilme dayanıma değerlerinin verilmiştir. Bu tablo incelendiğinde; D numunelerinin eğilme dayanım oranları diğer numunelerden yüksek çıkmaktadır. A ve C yakın değerlerde seyrederken, en düşük değerler B numunelerinde ölçülmüştür. SEP-2 çözelti katkılı D numunelerinde sıcaklık etkisinde ve çözelti katkısında reaksiyonun hızlanması, boşlukları doldurarak dayanımı arttırmaktadır. B karışımlarında aktivatör miktarının düşük olması nedeniyle dayanımlarında düşük seyretmektedir. Venkateswarlu ve ark. (2020) çalışmasında erken yaşlarda (7 ve 14 gün) içten kürlenmiş numunelerin eğilme dayanımında geleneksel betona göre düştüğünü belirtmiştir. Yaşın artması ile birlikte eğilme hem geleneksel betonlarda hemde SEP'li karışımlarda mukavemetinin artabileceğini açıklamışlardır. Ayrıca SEP'in kendi kendine içten kürlenme ile kurumayı azaltarak eğilme performansını iyileştirebileceği belirtilmiştir.



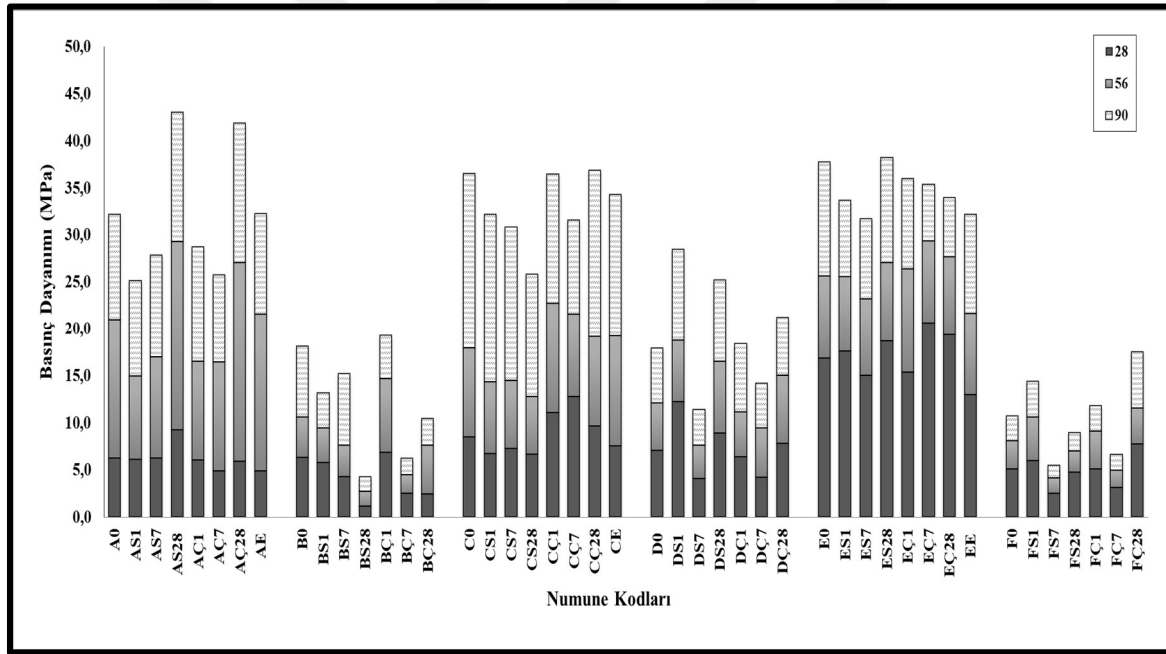
Çizelge 4. 13. En yüksek eğilme dayanımına sahip A, B, C, D numune değerleri

No	Numune Adı	Değeri (Mpa)	Numune Adı	Değeri (Mpa)
<b>A</b>			<b>C</b>	
1	AE-44/56	4,6	C-1/0/28 C-2/0/56	4,4
2	AE-43/28 AÇ-37/28/28	4,1	CS-8/1/56	4,3
3	A-1/0/28	3,9	CÇ-26/1/56 CÇ-38/28/56	4,0
4	AS-20/28/56 AÇ-38/28/56	3,5	CE-43/28 CE-45/90	3,8
5	AS-9/1/90 AÇ-26/1/56	3,3	CÇ-31/7/28 CÇ-33/7/90	3,7
<b>B</b>			<b>D</b>	
1	B-1/0/28	2,6	DS-7/1/28	5,7
2	BS-7/1/28	2,5	D-1/0/28	5,4
3	B-3/0/90 BÇ-26/1/56	2,2	DS-9/1/90	4,2
4	B-2/0/56 BÇ-25/1/28 BÇ-37/28/28	2,1	DS-8/1/56	3,9
5	BS-15/7/90 BÇ-38/28/56	2,0	DS-19/28/28 DÇ-25/1/28 DÇ-26/1/56	3,5

#### 4.2.7. Basınç dayanımı

SEP katkılı A, B, C, D numuneleri ile katkısız E ve F numunelerinin zamana bağlı basınç dayanımlarını ölçmek amacıyla numuneler 28, 56, 90 gün boyunca ortamda bekletilerek dayanım kazanmaları sağlanmıştır. Basınç dayanımları arasındaki ilişki Şekil 4.31'deki grafik üzerinden incelenmiştir. 28. gün dayanımları incelendiğinde 23 °C su katılarak hazırlanan A ve C numuneleri SEP katkısı ile referans numunesine oranla bir miktar düşmüştür. Çözelti yoğunluğu fazla olan C numunelerinin dayanımı A numunelerine göre, 100°C'lik SEP-2 çözelti katkılı D numunesi ise B numunelerine göre daha iyi dayanım göstermiştir. Harç içerisine SEP eklendikçe basınç dayanımının azalttığı genel olarak araştırmalarda belirtilmiştir. Bunun temel nedeninin, SEP'nin suyu emdikten sonra oluşturduğu hidrojel hali ve harç içerisinde oluşturduğu boşluklu yapıdır (Mechtcherine vd., 2014). Ancak alkali aktivatör katkısı içten kürlenme sırasında oluşturduğu yoğun çözelti yapısı ile SEP katkısının boşlukları doldurarak, gözenekliliği azaltması ve desorpsiyonun daha yavaş gerçekleşmesi sonucunda betonun dayanıklılığını arttırdığı düşünülmektedir.

56 günlük dayanımlara bakıldığında; referans numunelerinin dayanımında 28.güne göre düşüş yaşanırken, A ve C numunelerinde artış görülmüştür. B ve D numuneleri, F referans numuneleri ile aynı trendi göstererek 56. günde dayanımlarının düştüğü gözlenmiştir. Sıcaklık etkisiyle düşük dayanım gösteren karışımlarda kür süresi arttıkça SEP katkısı sonrası dayanımlarında arttığı görülmüştür. 23 °C suda hazırlanan A ve C numunelerinde ise 28. günde dayanımları düşük seyrederken, 56 ve 90.günde numuneler dayanım kazanmıştır. Tüm karışımların 90 günlük dayanımları 56 günlük dayanım oranları ile kıyaslandığında A numunelerinin dayanımlarında bir miktar düşüş gözlenirken, diğer numunelerin basınç dayanımları 28. güne göre artmıştır. Süper emici polimerlerin içten kütleme etkisi ile büzülme azaltabileceği ve dayanıklılığı arttırabileceğini belirtmiştir (Venkateswarlu, 2020).



Şekil 4. 31. 28, 56, 90 günlük basınç dayanımları

A numunelerinde 28.gün sıvı kürü sonrası dayanımlarında artış olduğu gözlenmiştir. A karışımında tüm kür şartlarında içerisinde AÇ-38/28/56 21,1 MPa en yüksek dayanıma sahip olan numunedir. Bu karışımın içten kütleme etkisiyle dayanım kazanmaya devam ettiği, hem çözeltilde hemde suda kür edilen A numunesinin 56. gün dayanımlarının yüksek değerlerde olduğu gözlenmiştir. Alkaliler ile aktifleştirilmiş betonlarda SEP'lerin iç bağl nemi düşürdüğü ve otojen büzülme azalttığı belirtilmiştir.

SEP'ler emilen suyu hidrasyon sırasında yavaş yavaş serbest bırakarak, erken yaş basınç dayanımını azaltsa da, 7 gün ile 28 gün arasındaki süreçte SEP içeren numunelerin referans numunelerine göre basınç dayanımındaki artış gösterdiği belirtilmiştir. (Song ve ark., 2016)

B numunelerinde 28. gün dayanımları oldukça düşüktür. 56 ve 90. günlerde bir miktar dayanım kazanmıştır. En yüksek dayanıma sahip olan numuneler 7,8 MPa değerindeki BÇ-26/1/56 ile 7,6 MPa B-3/0/90 ve BS-15/7/90 numuneleridir. Genel olarak ortamda ve 1 gün sıvı içerisinde bekletilen B numunelerinin dayanımları diğer koşullara göre daha fazladır.

C numunelerinin dayanımları numune yaşı ile doğru orantılı olarak artmıştır. Ortam şartlarında kür edilen 90 günlük C-3/0/90 (18,6 MPa ) numunesi karışım içerisinde en yüksek dayanıma sahip olan numunedir. Dayanım artışının, numunelerin SEP katkısı sonucu içten kürlenme ile daha fazla hidrasyon reaksiyonu gerçekleştirmesi olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.31'de görüldüğü gibi D numunelerinin dayanımları A, C ve E numunelerine göre daha düşüktür. En yüksek dayanıma sahip DS-7/1/28 (12,2 MPa) numunesi aynı zamanda referans numunesine oranla en çok artışın görüldüğü numunedir. D numunelerinin dayanımlarına bakıldığında 28, 56 ve 90 günlük periyotta numuneler 56. gün düşüş gösterirken, 90. günde tekrar artış göstermiştir.

E referans numuneleri, 28, 56 ve 90 gün kür süresince giderek dayanımları azalmıştır. A ve C karışımlarında ise aynı süreler içerisinde E referans numunesinin tersine bekleme süreleri arttıkça dayanımları da artmıştır. Karışımlara eklenen SEP dozajı arttıkça tüm numunelerin dayanımları azaltılmaktadır. Ancak, numune yaşı arttıkça SEP içeren numunelerde, SEP katkısı olmayan numunelere göre dayanımları daha fazla olduğu, bunun emilen SEP'in suyu serbest bırakarak numunelerin hidrasyonunun devam etmesine yardımcı olan içten kürlenme etkisinden dolayı olabileceği belirtilmiştir. (Bakharev ve ark., 2003, Song ve ark., 2016).

F referans numune dayanımları sıcaklık etkisi ile E numunelerine oranla düşük değerlerde ölçülmüştür. Çözelti katkılı D numunelerinde içten kürlenme etkisi nedeniyle dayanımları B ve F numunelerine oranla daha yüksektir. Basınç dayanımı en yüksek olan numuneler Çizelge 4.14'de verilmiştir.

Çizelge 4. 14. En yüksek basınç dayanımına sahip A, B, C, D numune değerleri

No	Numune Adı	Değeri (Mpa)	Numune Adı	Değeri (Mpa)
<b>A</b>			<b>C</b>	
1	AÇ-38/28/56	21,1	C-3/0/90	18,6
2	AS-20/28/56	20,1	CS-9/1/90 CÇ-39/28/90	17,8
3	AE-44/56	16,7	CS-15/7/90	16,4
4	AÇ-39/28/90	14,9	CE-45/90	15,1
5	A-2/0/56	14,7	CÇ-27/1/90	13,7
<b>B</b>			<b>D</b>	
1	BÇ-26/1/56	7,8	DS-7/1/28	12,2
2	B-3/0/90 BS-15/7/90	7,6	DS-9/1/90	9,8
3	BÇ-25/1/28	6,9	DS-19/28/28	8,9
4	B-1/0/28	6,3	DS-21/28/90	8,7
5	BS-7/1/28	5,8	DÇ-37/28/28	7,8

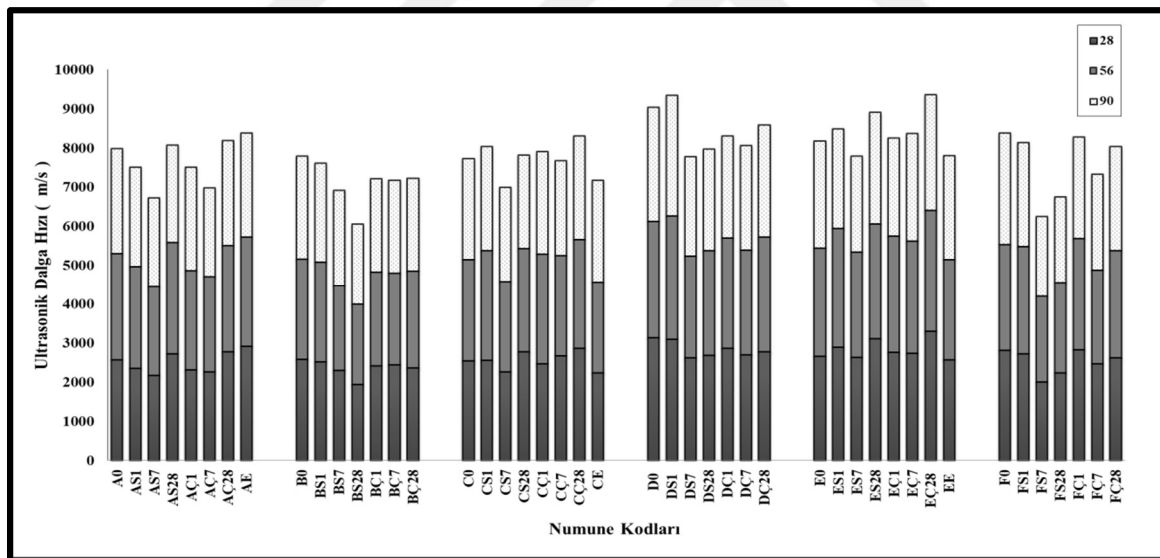
#### 4.2.8. Ultrasonik dalga hızı (UDH)

A, B, C, D, E, F numunelerine ait deney sonuçları Çizelge 3.11’de verilen harç kalitesi tablosu referans alınarak kıyaslanmıştır. Çalışma sonuçları Çizelge 4.15 ve Şekil 4.32’ye göre incelendiğinde; referans numunelerine kıyasla numunelerin çoğunda ultrasonik dalga hızında düşüş gözlenmiştir. Bu düşüşün nedeninin SEP eklenmesi sonucu oluşan boşluklu yapı nedeni ile olduğu düşünülmektedir. Betonun yapısındaki boşlukların tayin edilmesinde ultrases geçiş hızı değerleri; betonun dayanımı hakkında bilgi vermektedir. Boşluklu yapıya sahip olan betonda ses dalgalarının boşlukların etrafında dolaşması sonucunda dalga geçiş süresinin artıp, geçiş hızını azalttığı. ultrasonik dalga hızının 3000 m/sn’den küçük olması betonun çok boşluklu olduğu ve mukavemeti düşürdüğü ifade edilmektedir (Kuloğlu, 2003).

28, 56 ve 90 gün ortamda dayanım kazanmaları beklenen SEP katkılı numunelerin UDH aralıkları 1948- 3174 m/s arasında değişmektedir. E ve F referans numunelerinde bu değer aralığı 2015-3317 m/s olarak ölçülmüştür. Numunelerde 100 °C sıcak su ile hazırlanan F numuneleri E numunelerine oranla düşük dalga hızına sahiptir. Ancak çözelti katkılı D numunesi referans numunesi ile kıyaslandığında DS-9/1/90 numunesinde UDH değeri %16

oranında artmıştır. A ve C numunelerinde ise SEP'in oluşturduğu boşluklu yapı sonucu UDH değerleri daha düşük çıkmıştır. SEP katkısı sonucunda D numunesi hariç katkısız numunelere kıyasla UDH düşmüştür. Boşluk miktarının artmasına rağmen, D karışımının UDH değerinin yüksek olmasının sebebi; çözeltili yoğunluğundaki artışın boşluklu yapı arasındaki bağlantının azalmasına neden olmasıdır. 28, 56 ve 90 gün dayanım kazanmaları için bekletilen numunelerde A, B ve C numunelerinin kötü harç kalitesine sahip olduğu görülmüştür. D numuneleri içerisinde ortam ve su kürü uygulananların bir kısmında UDH değerinin orta kalite olduğu tespit edilmiştir.

28 günlük ultrasonik dalga hızı verileri kıyaslandığında B karışım numunelerinde 1, 7, 28 gün kür süresi arttıkça UDH değerleri giderek düşmüştür. Diğer karışımlarda ise 7. Gün düşüş yaşanmış ancak 28 gün sıvı (su ve çözeltili) içerisinde bekleyen numunelerin değerleri tekrar artmıştır. Aynı davranışın genel olarak 56. ve 90. gün ölçülen UDH değerleri içinde benzer şekilde olduğu görülmüştür. En yüksek UDH değerine sahip numuneler; DS-8/1/56 (3174 m/s), D-1/0/28 (3143 m/s), DS-7/1/28 (3103 m/s) ve DS-9/1/90 (3072 m/s)'dir.



Şekil 4. 32. Numunelerin 28, 56, 90 günlük ultrasonik dalga hızları

Çizelge 4. 15. 28, 56, 90 günlük ultrases dalga hızı değerleri

Numune Kodu (28)	UDH (m/s)	Numune Kodu (56)	UDH (m/s)	Numune Kodu (90)	UDH (m/s)
A-1/0/28	2585	A-2/0/56	2724	A-3/0/90	2679
AS-7/1/28	2356	AS-8/1/56	2619	AS-9/1/90	2544
AS-13/7/28	2183	AS-14/7/56	2274	AS-15/7/90	2282
AS-19/28/28	2730	AS-20/28/56	2864	AS-21/28/90	2490
AÇ-25/1/28	2328	AÇ-26/1/56	2545	AÇ-27/1/90	2641
AÇ-31/7/28	2274	AÇ-32/7/56	2452	AÇ-33/7/90	2265
AÇ-37/28/28	2790	AÇ-38/28/56	2725	AÇ-39/28/90	2680
AE-43/28	2920	AE-44/56	2810	AE-45/90	2659

Çizelge 4.15 (Devam) 28, 56, 90 günlük ultrases dalga hızı değerleri

Numune Kodu (28)	UDH (m/s)	Numune Kodu (56)	UDH (m/s)	Numune Kodu (90)	UDH (m/s)
B-1/0/28	2592	B-2/0/56	2579	B-3/0/90	2625
BS-7/1/28	2530	BS-8/1/56	2560	BS-9/1/90	2525
BS-13/7/28	2311	BS-14/7/56	2167	BS-15/7/90	2455
BS-19/28/28	1948	BS-20/28/56	2051	BS-21/28/90	2075
BÇ-25/1/28	2424	BÇ-26/1/56	2407	BÇ-27/1/90	2387
BÇ-31/7/28	2451	BÇ-32/7/56	2357	BÇ-33/7/90	2370
BÇ-37/28/28	2370	BÇ-38/28/56	2497	BÇ-39/28/90	2369
C-1/0/28	2556	C-2/0/56	2607	C-3/0/90	2567
CS-7/1/28	2560	CS-8/1/56	2823	CS-9/1/90	2656
CS-13/7/28	2277	CS-14/7/56	2319	CS-15/7/90	2408
CS-19/28/28	2784	CS-20/28/56	2659	CS-21/28/90	2386
CÇ-25/1/28	2482	CÇ-26/1/56	2812	CÇ-27/1/90	2620
CÇ-31/7/28	2680	CÇ-32/7/56	2576	CÇ-33/7/90	2435
CÇ-37/28/28	2875	CÇ-38/28/56	2793	CÇ-39/28/90	2647
CE-43/28	2251	CE-44/56	2327	CE-45/90	2613
D-1/0/28	3143	D-2/0/56	2994	D-3/0/90	2913
DS-7/1/28	3103	DS-8/1/56	3174	DS-9/1/90	3072
DS-13/7/28	2631	DS-14/7/56	2614	DS-15/7/90	2545
DS-19/28/28	2701	DS-20/28/56	2686	DS-21/28/90	2587
DÇ-25/1/28	2869	DÇ-26/1/56	2838	DÇ-27/1/90	2600
DÇ-31/7/28	2707	DÇ-32/7/56	2692	DÇ-33/7/90	2670
DÇ-37/28/28	2779	DÇ-38/28/56	2958	DÇ-39/28/90	2852
E-1/0/28	2673	E-2/0/56	2784	E-3/0/90	2728
ES-7/1/28	2906	ES-8/1/56	3053	ES-9/1/90	2530
ES-13/7/28	2639	ES-14/7/56	2709	ES-15/7/90	2448
ES-19/28/28	3113	ES-20/28/56	2960	ES-21/28/90	2844
EÇ-25/1/28	2774	EÇ-26/1/56	2987	EÇ-27/1/90	2498
EÇ-31/7/28	2746	EÇ-32/7/56	2888	EÇ-33/7/90	2739
EÇ-37/28/28	3317	EÇ-38/28/56	3102	EÇ-39/28/90	2949
EE-43/28	2583	EE-44/56	2574	EE-45/90	2653
F-1/0/28	2819	F-2/0/56	2723	F-3/0/90	2844
FS-7/1/28	2740	FS-8/1/56	2756	FS-9/1/90	2649
FS-13/7/28	2015	FS-14/7/56	2192	FS-15/7/90	2051
FS-19/28/28	2251	FS-20/28/56	2311	FS-21/28/90	2205
FÇ-25/1/28	2838	FÇ-26/1/56	2853	FÇ-27/1/90	2592
FÇ-31/7/28	2479	FÇ-32/7/56	2407	FÇ-33/7/90	2448
FÇ-37/28/28	2637	FÇ-38/28/56	2755	FÇ-39/28/90	2659

#### 4.2.9. Rezonans frekansı (RF)

Çalışmada 28 ve 56 günlük numunelerin rezonans frekans ölçümleri ve kıyaslaması yapılmıştır. Deneye ait veriler Çizelge 4.16 ve Şekil 4.33'e göre incelendiğinde; 28 günlük numunelerde, referans numunesine kıyasla A ve C numunelerinin tümünde azalma görülürken, F referans numunesine oranla B ve D numunelerinin frekanslarında artış

görülmüştür. B numunesinde en çok artış %26 oranında BÇ-37/28/28 numunesinde, D numunesinde ise DS-7/1/28 numunesinde % 37 oranında ölçülmüştür. Referans karışımlarına kıyasla frekansları en çok azalan A ve C numuneleri ise sırasıyla AE-43/28 (%13), CÇ-25/1/28 (%23) şeklindedir.

Sıcaklığın artışı çatlak oluşumunu etkileyen faktörlerdendir. 28 günlük rezonans frekanslarına bakıldığında 100 °C sıcak su ilavesi ile hazırlanan B ve D numunelerinin referans numunesine (F) oranla frekanslarında artış olduğu görülmüştür. Sıcaklık etkisi nedeniyle düşük olan F numunesi değerleri, SEP katkısının oluşturduğu yoğunluk sonucu olumlu yönde etkilenmiştir. Topçu ve Canbaz (2008), yüksek fırın cürufunun kullanılmasının mikro yapıda doygunluk sağladığını ve oluşan çatlak miktarı ve genişliği azalarak rezonans frekanslarındaki düşmeleri azalttığı belirtilmiştir.

A ve C numunelerinde ise E referans numunesine oranla rezonans frekansında düşüş olduğu görülmüştür. A numunesi B numunesine yakın değerlerde seyretmektedir ancak referans numunesine oranla düşmesi standart sıcaklıkta hazırlanan karışımlarda yoğunluğunun düşük olduğunu ifade etmektedir.

Çizelge 4. 16. Numunelerin 28 ve 56 günlük rezonans frekansları

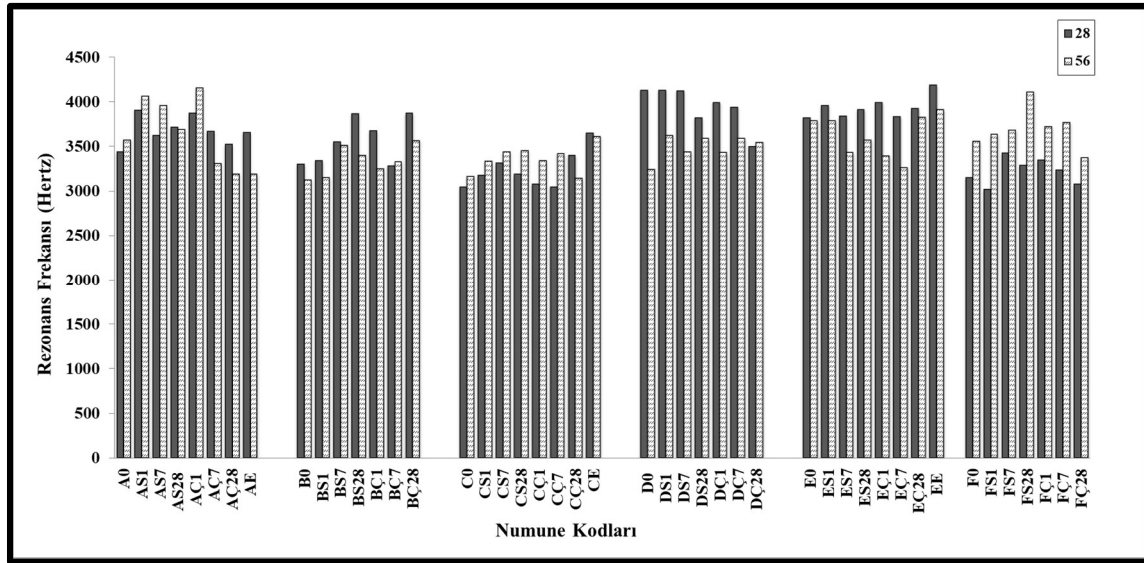
Rezonans Frekansı (Hertz)			
Numune Kodu	28	Numune Kodu	56
A-1/0/28	3443	A-2/0/56	3578
AS-7/1/28	3911	AS-8/1/56	4068
AS-13/7/28	3629	AS-14/7/56	3961
AS-19/28/28	3719	AS-20/28/56	3695
AÇ-25/1/28	3874	AÇ-26/1/56	4159
AÇ-31/7/28	3670	AÇ-32/7/56	3314
AÇ-37/28/28	3526	AÇ-38/28/56	3194
AE-43/28	3660	AE-44/56	3193
B-1/0/28	3307	B-2/0/56	3130
BS-7/1/28	3344	BS-8/1/56	3154
BS-13/7/28	3554	BS-14/7/56	3518
BS-19/28/28	3872	BS-20/28/56	3407
BÇ-25/1/28	3680	BÇ-26/1/56	3251
BÇ-31/7/28	3288	BÇ-32/7/56	3332
BÇ-37/28/28	3878	BÇ-38/28/56	3571

Çizelge 4.16. (Devam) Numunelerin 28 ve 56 günlük rezonans frekansları

Rezonans Frekansı (Hertz)			
Numune Kodu	28	Numune Kodu	56
C-1/0/28	3048	C-2/0/56	3171
CS-7/1/28	3180	CS-8/1/56	3339
CS-13/7/28	3316	CS-14/7/56	3446
CS-19/28/28	3194	CS-20/28/56	3458
CÇ-25/1/28	3081	CÇ-26/1/56	3347
CÇ-31/7/28	3052	CÇ-32/7/56	3424
CÇ-37/28/28	3401	CÇ-38/28/56	3146
CE-43/28	3655	CE-44/56	3613
D-1/0/28	4133	D-2/0/56	3247
DS-7/1/28	4134	DS-8/1/56	3630
DS-13/7/28	4127	DS-14/7/56	3441
DS-19/28/28	3821	DS-20/28/56	3593
DÇ-25/1/28	3997	DÇ-26/1/56	3436
DÇ-31/7/28	3945	DÇ-32/7/56	3595
DÇ-37/28/28	3501	DÇ-38/28/56	3551
E-1/0/28	3825	E-2/0/56	3791
ES-7/1/28	3965	ES-8/1/56	3794
ES-13/7/28	3841	ES-14/7/56	3436
ES-19/28/28	3917	ES-20/28/56	3575
EÇ-25/1/28	3996	EÇ-26/1/56	3399
EÇ-31/7/28	3835	EÇ-32/7/56	3268
EÇ-37/28/28	3929	EÇ-38/28/56	3828
EE-43/28	4191	EE-44/56	3918
F-1/0/28	3158	F-2/0/56	3562
FS-7/1/28	3021	FS-8/1/56	3640
FS-13/7/28	3430	FS-14/7/56	3685
FS-19/28/28	3291	FS-20/28/56	4110
FÇ-25/1/28	3350	FÇ-26/1/56	3728
FÇ-31/7/28	3241	FÇ-32/7/56	3770
FÇ-37/28/28	3082	FÇ-38/28/56	3376

56 günlük numuneler incelendiğinde, A ve C numunelerinde 28. güne göre frekans artışı gözlenmiştir. B ve D numunelerinde ise bunun tam tersi azalma görülmüştür. 56 günlük dayanımlarda en yüksek frekans değeri 4159 Hz ile AÇ-26/1/56 numunesinde, en düşük ise 3130 Hz ile B-2/0/56 numunesinde ölçülmüştür. Referans numunelerine göre kıyaslanan deney karışımları içerisinde en çok artış %22 oranı ile AÇ-26/1/56 numunesinde görülürken, %18 oranı ile en çok düşüş AE-44/56 numunesinde olduğu tespit edilmiştir. 56 günlüklerde kür süresine (0, 1, 7, 28) bağlı olarak 28.günde rezonans frekansları düşmüştür.





Şekil 4. 33. 28 ve 56 günlük rezonans frekans değerleri

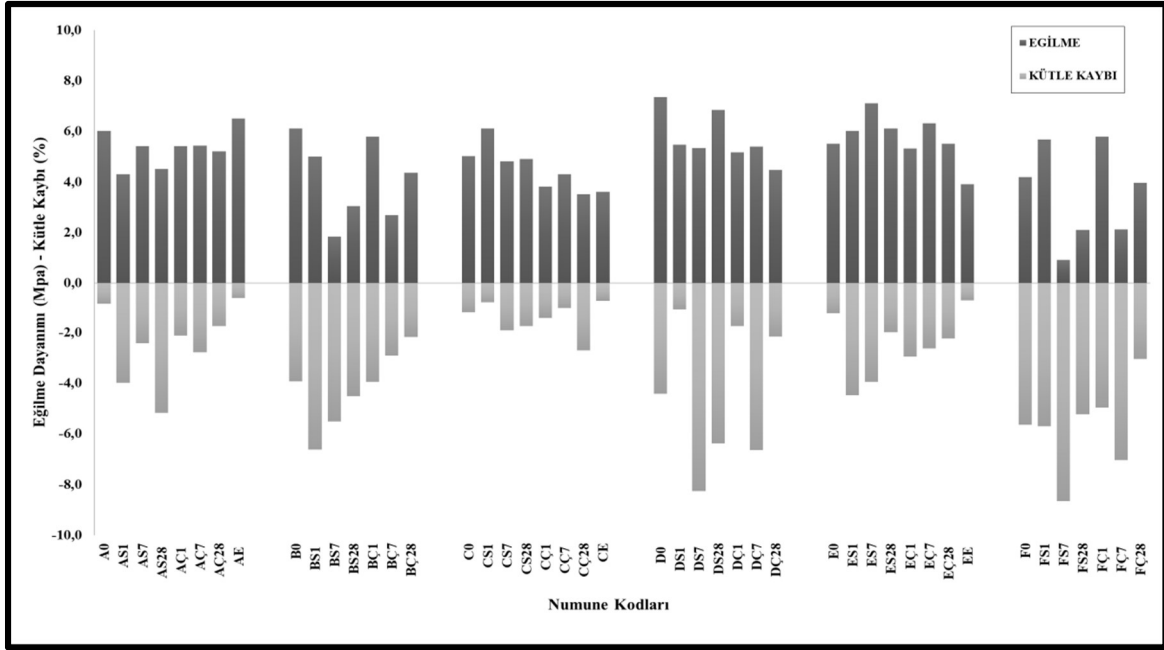
#### 4.2.10. İslanma-kuruma

İslanma-kuruma deneylerinde, eğilme dayanımı-kütle kaybı ve basınç dayanımı-kütle kaybı ilişkilerini gösteren grafikler Şekil 4.34 ve Şekil 4.35’de verilmiştir. 30 çevrim olarak yapılan ıslanma-kuruma deneyinin sonucunda numunelerin kütlelerinde kayıplar gözlenmiştir. Deney verilerine ait kütle kaybı ve dayanım durumları incelendiğinde; 100 °C sıcak su katkısı ile hazırlanan B, D, F numunelerinin kütle kaybı oranı yüksek seyretmektedir. 23 °C suda hazırlanan numunelerde ise A ve E numunelerinin ortalama kütle kaybının yakın değerlerde olduğu gözlenirken, en az kütle kaybı C karışımında ölçülmüştür. Numunelerin dayanımları incelendiğinde; kütle kaybı oranı ile basınç dayanımları ters orantılıdır. D numunelerinin eğilme ve basınç dayanımlarına bakıldığında, B numunesine oranla yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek basınç dayanımına sahip olan numune CS/16/7/İK olup kütle kaybı %1,9 oranında hesaplanmıştır. Eğilme dayanımında en yüksek numune D/4/0/İK olduğu ve kütle kaybının %4,4 oranında olduğu tespit edilmiştir. Kütle kaybının en az görüldüğü numune ise %0,6 oranındaki AE-46/İK numunesidir. 1, 7, 28 gün sıvı tankında bekletilen numunelerin ıslanma-kuruma sonrası basınç dayanımlarına bakıldığında, A ve C numunelerinde 7.gün basınç dayanımları artmış sonra tekrar düşüşe geçmiştir. B ve D numunelerinde ise 7. düşüp, 28.günde dayanımlar tekrar artmıştır. Eğilme dayanımlarında belirli bir trend olmamakla birlikte ortam koşullarındaki A, B ve D numunelerinin diğer numunelere göre daha iyi dayanım göstermiştir.

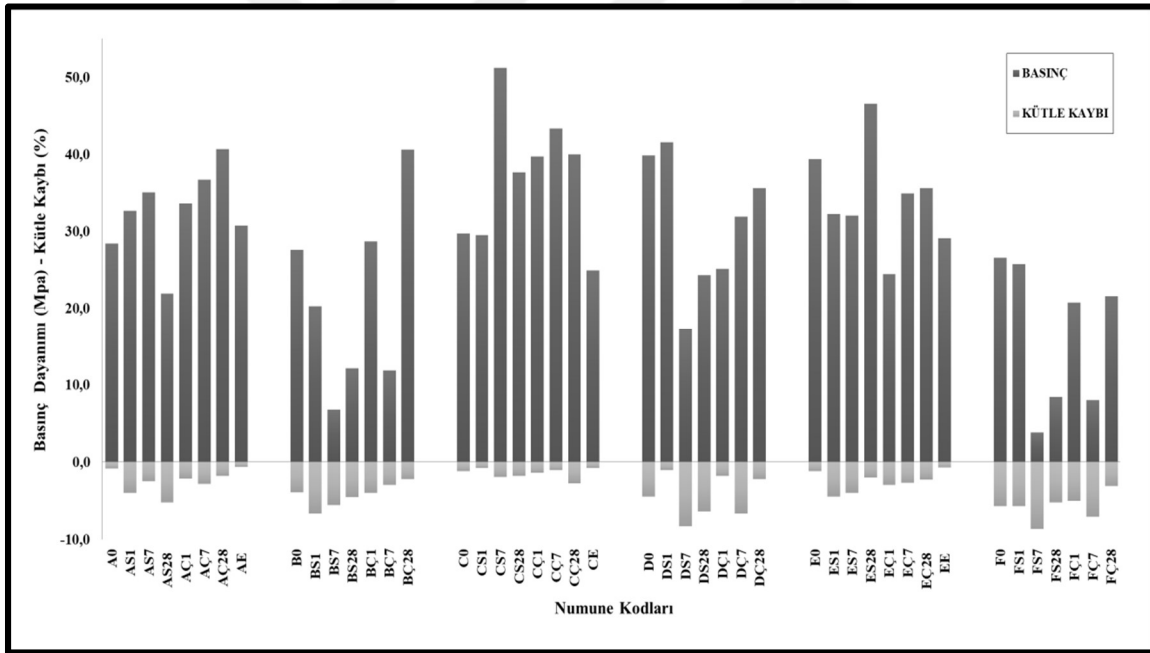
Wang vd. (1995) yapmış olduğu çalışmada, geopolimer harçların, Portland çimentosuna kıyasla daha iyi ıslanma- kuruma direnci gösterdiği ve buna bağlı olarak büzülmelerin daha az olduğunu belirtmektedir. Karışımların kütle kayıpları referans numuneleri ile kıyaslandığında, 100 °C'lik B ve D karışımlarında kütle kayıplarının F'ye göre su, çözelti ve ortam koşullarınının tamamında daha fazla olduğu görülmüştür. 23 °C karışımlarda çözeltide içerisinde bekletilenler A ve C karışımları, referans numunesine göre daha az kütle kaybı yaşamıştır. Su içerisinde bekletilen numunelerde ise C numunesinin kütle kaybı E'ye göre daha az miktarlarda iken A numunesinde referansa göre daha yüksek kütle kaybı olmuştur. Etüv ve ortam numunelerinde kayıplar referans numunesine yakın değerlerde seyretmiştir.

Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'de verilen grafikler incelendiğinde eğilme, basınç ve kütle kaybı arasındaki ilişkide kütle kaybının en çok F numunelerinde, en az ise C numunelerinde görüldüğü tespit edilmiştir. Basınç dayanımlarının ise tam aksine C numunelerinde en yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Genel olarak kütle kayıpları, su içerisinde bekletilen numunelerde olup en az kayıp etüv koşullarında bekletilen numunelerde gözlenmiştir.

Buna ek olarak çözelti ve ortam koşullarında suda bekletilenlere oranla daha az kütle kaybı olmuştur. Çözeltili karışımlarının (C, D), referans numunelerine (E, F) göre daha iyi dayanım gösterdiği görülmüştür. Bu durum kütle kayıplarının referansa göre daha düşük olması ve içerisindeki çözelti yoğunluğunun fazla olması ile ilişkilendirilmektedir. Süper emici polimerlerin desorpsiyonunun çatlak oluşan yüzeylerde iyileşmeyi sağladığı ve belirli büyüklükteki çatlakları ıslanma-kuruma döngüsünde kapatabildiği belirtilmiştir (Snoeck ve ark., 2012). Buda hem çözeltili hemde su katkılı SEP'lerin dayanımının gelişmesine neden olduğu düşünülmektedir.

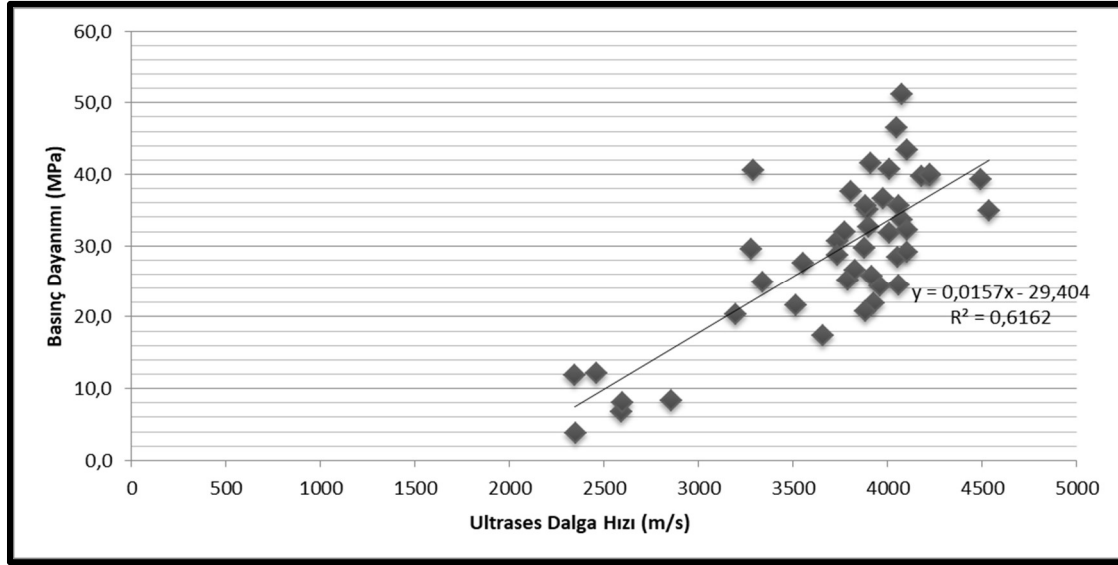


Şekil 4. 34. Islanma kuruma numunelerinin eğilme dayanımı ile kütle kaybı ilişkisi



Şekil 4. 35. Islanma kuruma numunelerinin basınç dayanımı ile kütle kaybı ilişkisi

Islanma-kuruma numunelerinde basınç dayanımı ile ultrases dalga hızı arasındaki korelasyon katsayısı  $R=0,78$  olarak bulunarak birbirleri ile ilişkilerinin doğru orantılı olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 4.36).

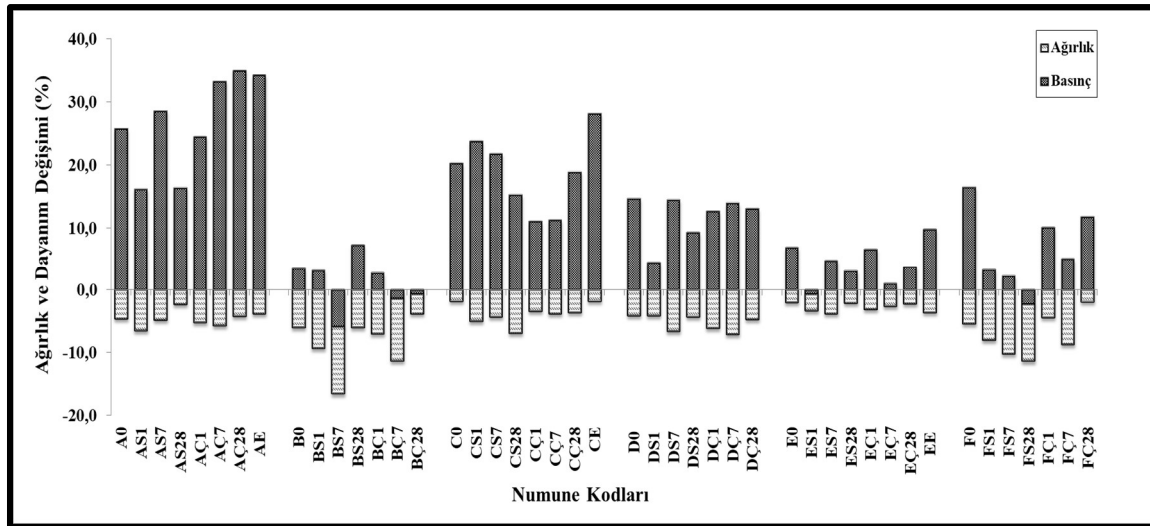


Şekil 4. 36. Islanma-kuruma deneyinde basınç dayanımı- ultrases dalga hızı ilişkisi

#### 4.2.11. Asit direnci deneyi

A, B, C, D numuneleri ile E ve F referans numuneleri 1 ay süre ile %5 oranında asit çözeltisi ( $H_2SO_4$ ) içerisinde bekletilmiştir. Asitten çıkarılan numunelerin ağırlık ve basınç değişimleri hesaplanarak hazırlanan grafikler Şekil 4.37’de verilmiştir. Numunelerde basınç dayanımı değişim oranlarına bakıldığında; referans numuneleri ile sıcak su katkılı numunelerde dayanımlar düşük seyretmiştir. Ancak SEP katkılı A ve C karışımlarının asit etkisine karşı diğer karışımlara göre daha dirençli olduğu görülmüştür. F referans numunesine göre B ve D karışımları içerisinde B numunelerinin düşük direnç gösterdiği ve asitten en çok etkilenen numune olduğu görülmüştür. D numunelerinin ise SEP’ye eklenen çözelti katkısı sonucu basınç dayanımına karşı daha iyi direnç gösterdiği tespit edilmiştir. A numunesi, E referans numunesine oranla ve tüm karışımlar içerisinde en yüksek değere sahip olan karışımdır. Bu numuneler içerisinde AÇ/41/28/30A asite karşı en iyi dayanıma sahip olan numunedir. Ağırlık değişimleri incelendiğinde tüm karışımlarda ağırlık kaybı olmuştur. B ve F numunelerinin ağırlık kayıpları fazla olup dayanımları düşüktür. Geopolimer harçların sülfürik asit etkisine karşı dayanıklılık gösterdiği görülmüştür. Ayrıca SEP katkısı, numunelerin asit etkisini azaltmıştır. Canbaz vd. (2008), çimentolu harçlarda asit etkisindeki numunelerin dayanım, ultrases sonuçlarının düşük olduğunu ancak bağlayıcı yapıdaki YFC’nin ortamdaki kalsiyum oksitleri bağlayarak oluşan tuz miktarı azalttığından kimyasal etkilere karşı direncin artacağını belirtmiştir. Karışımların genelinde, 7 gün sıvı içerisinde bekletilen numunelerin ağırlık kayıpları artmıştır.

28. Gün kayıpları ise 7.güne göre daha düşüktür. Numunelerin ağırlık kayıpları  $F > B > D > A > C > E$  şeklinde sıralanabilir. En çok ağırlık kaybının görüldüğü ve asit etkisinde dayanımı en düşük olan numune BS/17/7/30A numunesidir. Ultrasonik dalga hızları ile kıyaslanan asit etkisindeki numunelerde genel olarak A, C, D ve E numunelerinin harç kaliteleri orta ve iyi iken; B ve F karışımlarının harç kalitesi kötü olarak sınıflandırılmıştır. A ve C numunelerinde düşük kılcal su emme oranları gözleendiği bunun aksine B ve D numunelerin su absorpsiyon oranların daha yüksek olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak B ve D karışımlarında boşluklardan zararlı maddeleri alması sonucu kimyasal etkilere karşı direncinin düştüğü görülmüştür. Afridi vd. (2019), SEP'nin su absorpsiyon kinetiğinin zararlı iyonların geopolimer matrisine girişini sınırladığı bu sayede kimyasal etkilere karşı dayanıklılık açısından etkili olduğu belirtilmiştir. Asitlerin zararlı etkisinin temel nedeni kalsiyum tuzlarının çözünmesidir. Çözünürlüğün artmasına bağlı olarak su ile çözünen maddeler betonda zararı artırır (Kayacıklı, 2020). SEP katkısı ile bünyesine almış olduğu kimyasal tuzları harç içerisinde yayılımını engellediği düşünerek asite karşı dayanıklılığı arttırmıştır. Çalışma kapsamında 1 ay süre ile yapılan deneyin süresine bağlı olarak etkilerinin tam olarak belirlenemediğinden daha uzun süreli asit etkisi gözlenmelidir.

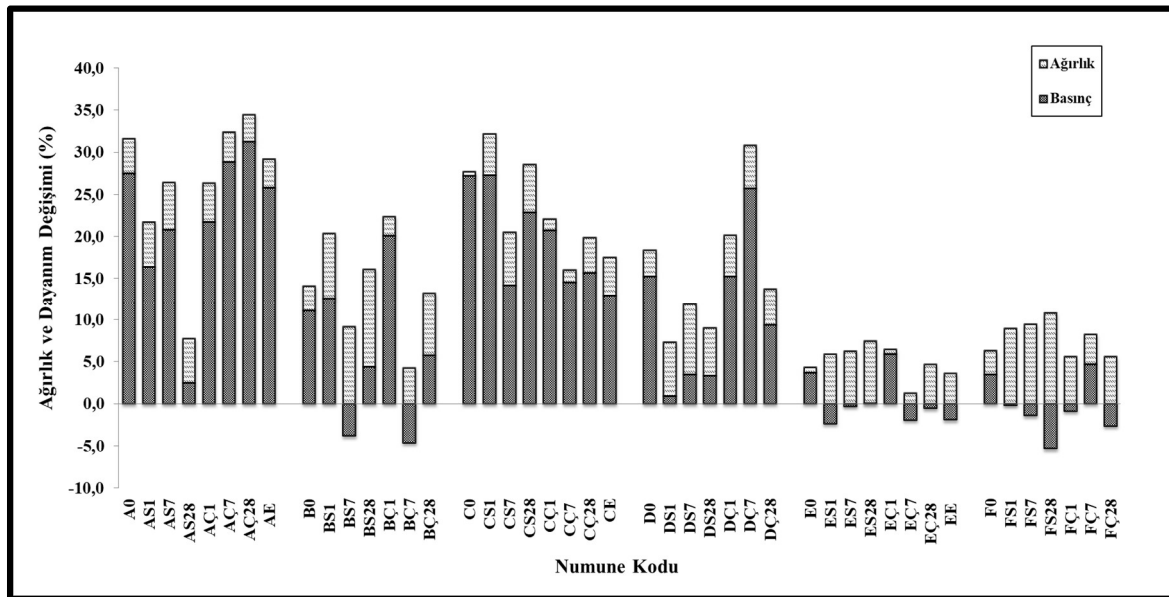


Şekil 4. 37. Asit etkisindeki A,B,C,D,E,F numunelerinin ağırlık ve basınç değişimleri

#### 4.2.12. Sülfat direnci deneyi

SEP katkılı numunelerin durabilite özelliklerini incelemek amacıyla örnekler %5 oranında sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) çözeltisi ile hazırlanan havuzda 30 gün boyunca bekletilmiştir. Ölçümler sonucunda Şekil 4.38'de görüleceği gibi sülfat içerisinde bekleyen numunelerin,

boşluklardan bünyesine tuz alması sonucu A, B, C, D numunelerinin ağırlıkları artmıştır. Yapılan çalışmalarda sülfat içerisinde bekletilen numunelerin sülfata maruz kalma süresi arttıkça etkilerinin arttığı belirtilmektedir. Çalışmada 1 ay süre ile bekletilen numunelerinin dış yüzeyinde beyaz tortular gözlenmiştir. GÖK (2020), sülfat çözeltilisine maruz kalan numunelerde ağırlık ve dayanım artışları olmasının sülfatın alkali görevi görmesi, hidrasyonun devam etmesi ve sülfat etkisinde boşlukların dolması sonucu dayanıma olumlu etki yaptığı belirtilmiştir. E ve F kontrol numunelerine kıyasla SEP katkılı numuneler sülfat saldırısına karşı daha iyi dayanım göstermişlerdir. 23 °C standart koşullarda hazırlanan A ve C numunelerinin SEP katkısı sonucu referans numunesine oranla artış göstermesi YFC'nin harç içerisinde geçişi zorlandırması sonucunda kimyasal tepkime ile oluşan etrenjitin SEP içerisinde hapsolması sülfat direncini artmasına neden olmuştur. 28 günlük dayanımlara kıyasla sülfat etkisinde en çok dayanım artışı AÇ/42/28/30S numunesinde görülmüştür. Bu numune ayrıca asit etkilerine karşı da en dirençli karışımdır. SEP katkılı ÖGYFC'li harçların oluşturduğu yoğunluk kimyasal katkılara karşı dayanımı geliştirmiş. Li ve ark. (2021), AAS harçlarının sülfat etkisinde zararlı kalsiyum sülfat fazlarının oluşmadığı bu nedenle sodyum sülfatın numuneler üzerindeki etkisinin düşük seviyelerde olduğunu belirtmiştir. Ultrasonik dalga hızları incelendiğinde numuneler kötü-orta aralığındadır. Ancak ortam koşullarında bekletilen C ve D numuneleri iyi kalite olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 4. 38. Sülfat etkisindeki A,B,C,D,E,F numunelerinin ağırlık ve basınç değişimleri

#### 4.2.13. Karbonatlaşma derinliği

Çalışma kapsamında 28, 56, 90 gün ortam koşullarında bekletilen ve ıslanma-kuruma çevrimi yapılan numunelere karbonatlaşma derinliği testi uygulanmıştır. Ortalamaları alınarak elde edilen sonuçlarla ilgili veriler Şekil 4.39, Şekil 4.40, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’de sunulmuştur. Sıcak su ile hazırlanan karışımlarda B ve F numularının karbonatlaşma derinlikleri (KD) yüksektir. D karışımında ise bu oran düşük seyretmektedir. B ve D karışımları referans numunesi ile kıyaslandığında SEP katkısı sonucunda B numunelerinde ortalama %13, D numunelerinde %54 oranında bir azalma tespit edilmiştir. A, C, E numunelerinin genel olarak karbonatlaşma derinlikleri düşüktür (Çizelge 4.17). Çözelti katkılı C numuneleri referans numunesine kıyasla SEP katkısı sonrası düşüş yaşamıştır. Ancak IK çevriminde A ve C numunelerinde artış görülmüştür. Numuneler içerisinde en çok karbonatlaşmanın olduğu numune BS-19/28/28 (1,90 mm) olarak belirlenmiştir C serisinde karbonatlaşmanın hiç görülmediği numuneler tespit edilmiştir. Çizelge 4.18’da karbonatlaşmanın en az ve en çok görüldüğü numuneler sıralanmıştır.

A serisininin KD değerleri 0,05 ile 1,60 mm arasındadır. Genel olarak 28 günlük karbonatlaşma miktarları daha yüksektir. A numuneleri içerisinde karbonatlaşmanın en fazla görüldüğü numune etüvde bekletilen AE-46/IK, en az görüldüğü numune ise AÇ-27/1/90 numunesidir. Suda bekletilen numunelerde 7.gün karbonatlaşma derinlikleri artmış sonra tekrar düşmüştür. Bu durum çözeltide bekleyen numunelerde bekleme süresi arttıkça genel olarak KD değeri artmıştır.

100 °C karışım suyu ile hazırlanan ıslak su emmiş SEP katkılı B numunelerinde su içerisinde 0, 1 ve 7 gün ve 28, 56, 90 günlerdeki bekleme süreleri arttıkça KD artmıştır. 28. günde ise bu etki tam tersidir. Çözelti havuzunda bekletilen numunelerde bir trend yakalanamamıştır. Karbonatlaşmanın en yüksek olduğu 1,9 mm ile BS-19/28/28 numunesinde referans numunelerine kıyasla karbonatlaşma derinliğinin de en yüksek olduğu numunedir. Karışımlar içerisinde karbonatlaşma miktarının F numunelerine oranla en çok düşüş BÇ-32/7/56 ve BS-20/28/56 karışımlarında görülmüştür. F referans numunelerinde ve B numunelerinde diğer karışımlara oranla karbonatlaşma derinlikleri yüksek değerlerde ölçülmüştür.

Çizelge 4. 17. En düşük karbonatlaşma derinliğine sahip olan A, B, C, D numuneleri

	Numune Kodu (A)	KD (mm)	Numune Kodu (B)	KD (mm)	Numune Kodu (C)	KD (mm)	Numune Kodu (D)	KD (mm)
1	AÇ-27/1/90	0,050	BÇ-27/1/90	0,150	C-3/0/90 CS-9/1/90 CÇ-27/1/90 CE-45/90	0,000	DÇ-37/28/28	0,100
2	AS-8/1/56 AÇ-26/1/56 AÇ/28/1/IK	0,100	BS/16/7/IK	0,200	CÇ-33/7/90 C-1/0/28	0,050	DS-7/1/28 DÇ-31/7/28	0,150
3	AS/10/1/IK AS/16/7/IK	0,150	B/4/0/IK BÇ-31/7/28 BÇ-39/28/90	0,350	CÇ-39/28/90	0,075	DS-8/1/56 DÇ-25/1/28	0,200
4	A-2/0/56 A/4/0/IK AÇ-32/7/56 AÇ/40/28/IK AE-44/56 AE-45/90	0,200	BS-13/7/28	0,400	C/4/0/IK CS/10/1/IK CS/16/7/IK	0,100	DS-13/7/28 DÇ-33/7/90	0,250
5	AS-7/1/28 AS-19/28/28 AS-20/28/56 AÇ-39/28/90 AE-43/28	0,250	B-1/0/28 BÇ-32/7/56	0,450	CS-8/1/56 CS/22/28/IK CÇ/28/1/IK CÇ-32/7/56	0,150	DS-9/1/90 DS-21/28/90 DÇ-39/28/90 DÇ/40/28/IK	0,350

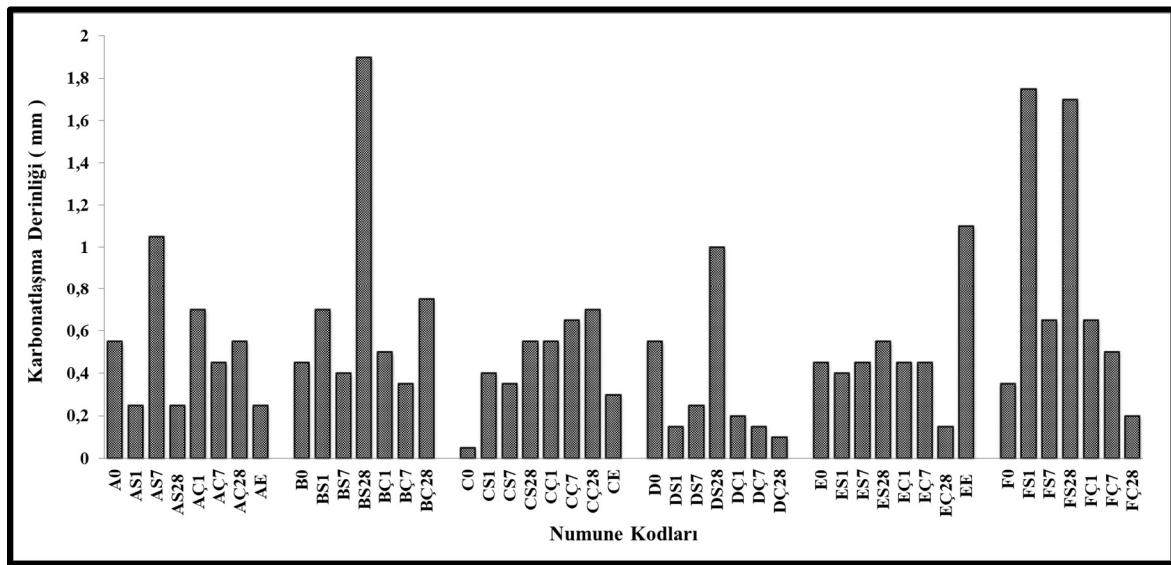
C karışımının karbonatlaşma derinliği E ve A'nın karbonatlaşma derinliklerinden daha düşüktür. Genel olarak 90 derecedeki koşullarda C karışımlarında karbonatlaşma hiç görülmemiştir. En yüksek değer ise 0,7 mm ile CÇ-37/28/28 numunesinde görülmüştür. Jiang vd. (2021), SEP katkılı numunelerin karbonatlaşma direncinin daha iyi olduğunu belirtmiştir.

100 °C sıcaklıkta SEP'ye çözelti emdirilerek hazırlanmış olan D numuneleri referans numunesi ve su emdirilerek hazırlanan B numunesine göre daha düşük karbonatlaşma derinliği göstermiştir. Ortalama olarak 23 °C hazırlanan numunelere kıyasla derinliği fazladır ancak 100 derece numuneler arasında iyi sonuçlar vermiştir. Karbonatlaşmanın en az görüldüğü numune DÇ-37/28/28 olarak ölçülmüştür. En yüksek ise 1 mm derinlik ile suda kürlenmiş DS-19/28/28 numunesidir. D numunelerinde genel olarak IK numunelerinde daha çok karbonatlaşma görülmüştür. İlkentapar (2013), alkali aktivatör katkılı cürüflü harçlarda Na<sup>+</sup> konsantrasyonundaki artışın karbonatlaşma derinliklerini düşürdüğünü belirtmiştir. Çözelti katkılı C ve D numunelerinde de SEP'ye çözelti emdirilmesinin karbonatlaşma direncinde etkili olduğu düşünülmektedir.

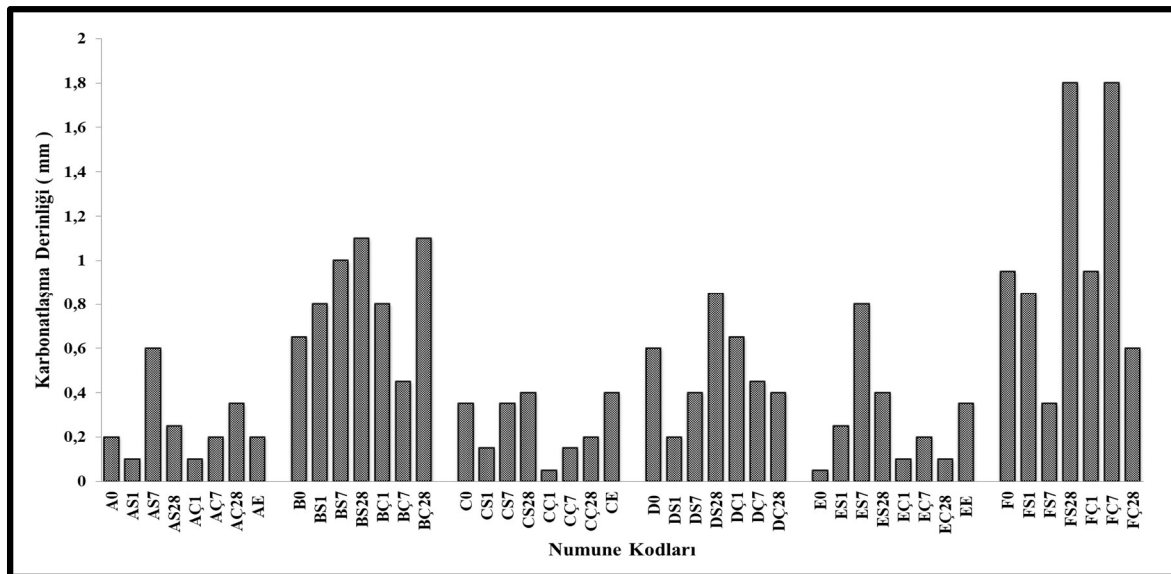


Çizelge 4. 18. Karbonatlaşmanın en çok ve en az görüldüğü numuneler

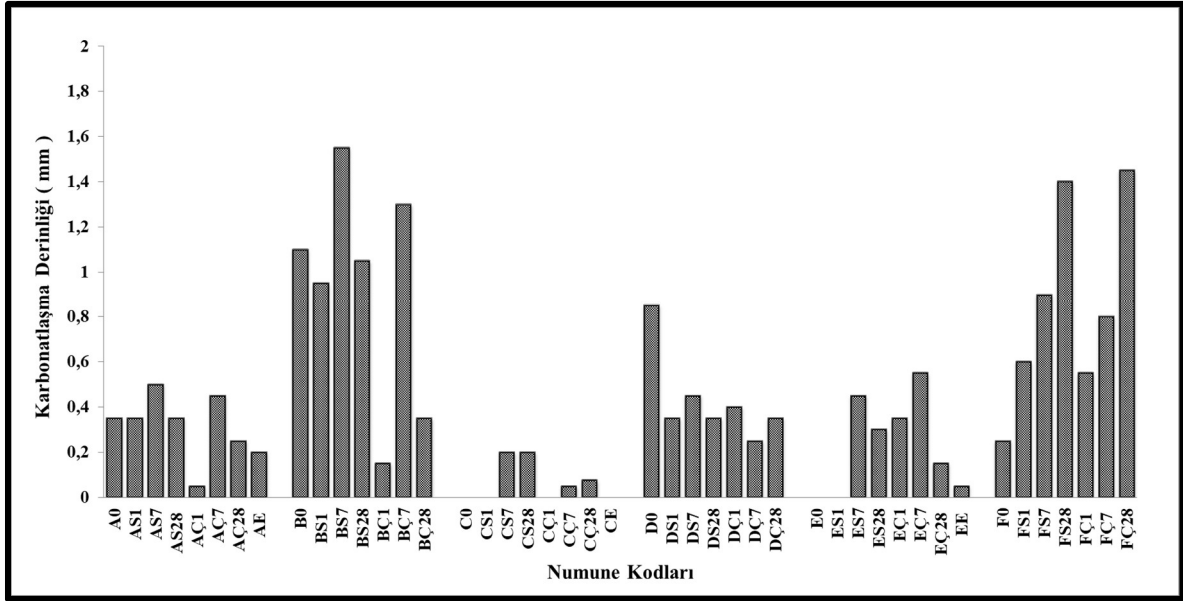
Numune Kodu	KD (mm)	Numune Kodu	KD (mm)
<b>En Az</b>		<b>En Fazla</b>	
C-3/0/90	0	AE-46/IK/	1,600
CS-9/1/90	0	BS-19/28/28	1,900
CÇ-27/1/90	0	CÇ-37/28/28	0,700
CE-45/90	0	DS-19/28/28	1,000
E-3/0/90	0	EE-43/28	1,100
ES-9/1/90	0	FÇ-32/7/56	1,800
		FS-20/28/56	



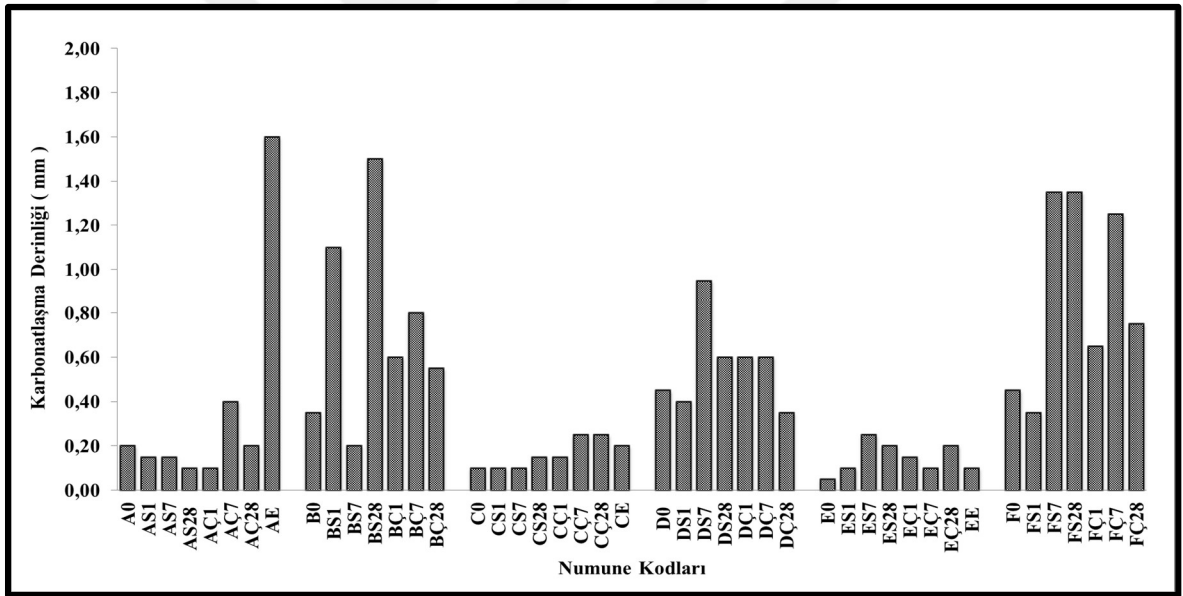
Şekil 4. 39. 28 günlük karbonatlaşma derinlikleri



Şekil 4. 40. 56 günlük karbonatlaşma derinlikleri



Şekil 4. 41. 90 günlük karbonatlaşma derinlikleri



Şekil 4. 42. Islanma-kuruma karbonatlaşma derinlikleri

### 4.3. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, A, B, C, D, E ve F numunelerinin arasındaki ilişki istatistiksel olarak ele alınmıştır. SEP katkılı ve katkısız numunelerin 28, 56 ve 90 günlük dayanım etkileri, boşluklu yapıdaki numunelerin su emme ilişkisi ve kimyasal etkilerine karşı yapılan asit-sülfat deneyindeki ilişkisi korelasyon katsayısı belirlenerek ifade edilmiştir.

Çizelge 4. 19. Korelasyon katsayı aralığı ve ilişki düzeyi

Korelasyon Katsayısı (R)	Veriler Arasındaki İlişki Düzeyi
0,00	Çok düşük
0,01 - 0,29	Düşük
0,30 - 0,70	Orta
0,71 - 0,99	Yüksek
1,00	Çok Yüksek

#### 4.3.1. Su emme-basınç dayanımı ilişkisi

50 gr SEP katkısı ile hazırlanan A, B, C ve D numunelerinin referans numunelerine kıyasla su emme-basınç arasındaki ilişki korelasyon katsayısı elde edilerek incelenmiştir. 28, 56 ve 90 günlük numunelerin 1, 7 ve 28 gün sıvı içerisinde beklemeleri sonucunda su emme oranları ve basınç dayanımları hesaplanmıştır. Şekil 4.43, Şekil 4.44 ve Şekil 4.45’de elde edilen veriler ile ilgili basınç-su emme ilişkisini gösteren grafikler oluşturulmuştur. Numuneler arasındaki korelasyon katsayısı sırasıyla  $R_{28}=0,78$ ,  $R_{56}=0,69$ ,  $R_{90}=0,72$  olarak hesaplanmıştır. ( $R_c$ = Basınç dayanımı,  $S$  =Su emme oranı )

$$28. \text{Gün} \quad R_c = -1,6638. S + 24,157$$

$$56. \text{Gün} \quad R_c = -1,1947. S + 17,911$$

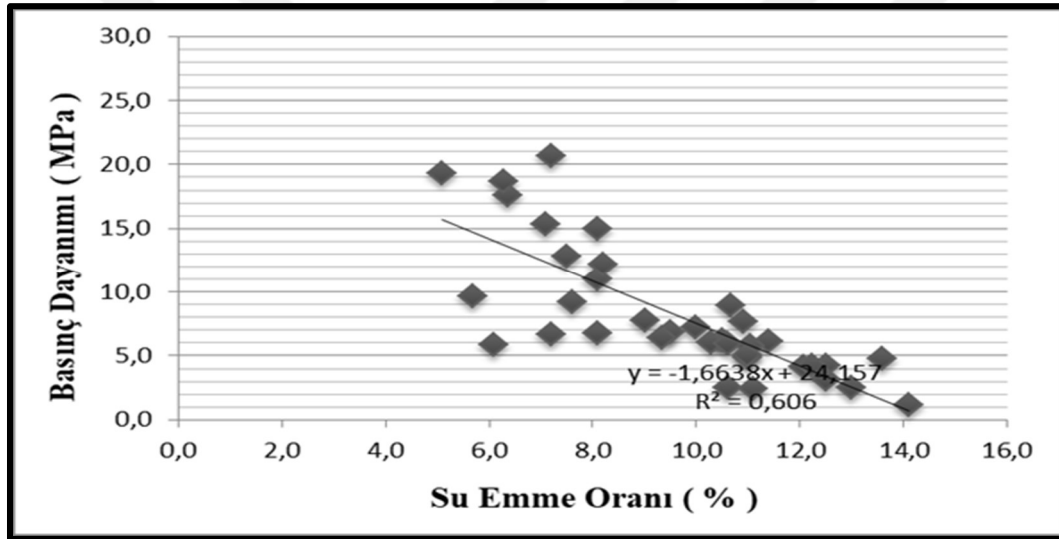
$$90. \text{Gün} \quad R_c = -1,4354. S + 21,274$$

Genel tabiri ile R katsayı aralığı tüm dayanım sürelerinde (28, 56, 90) su emme kapasitesi ile basınç dayanımları arasında ters ilişki olduğunu göstermiştir. SEP oranının artması, oluşturduğu boşluklu yapı nedeniyle su emme oranını arttırmış, basınç dayanımlarını ise azaltmıştır (Awolusi ve ark.,2021).

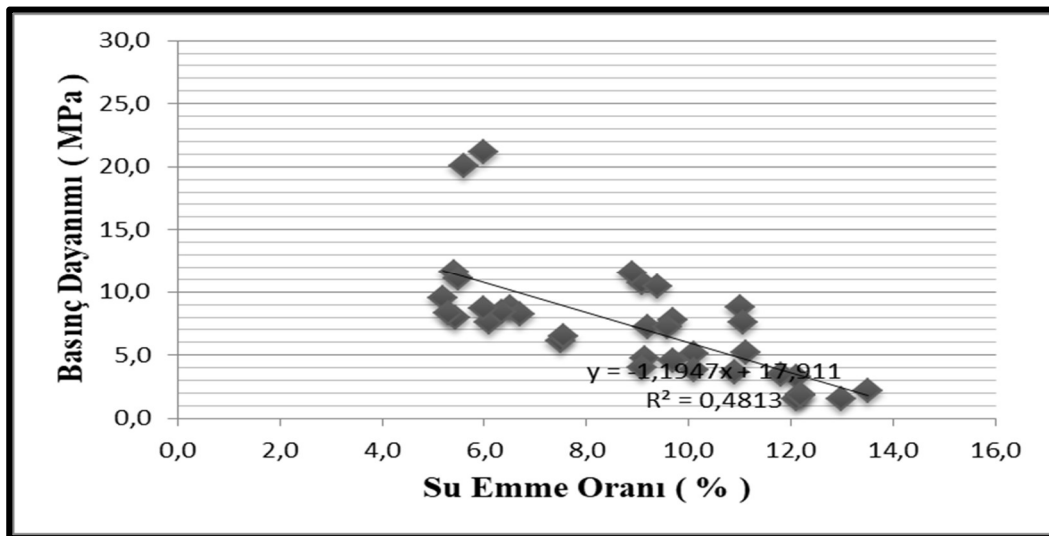
23 °C standart sıcaklıktaki su ile hazırlanan A, C ve E katkılı numunelerinin dayanımları 100 °C sıcaklıkta hazırlanan karışımlara oranla yüksek çıkmıştır. A, C ve E karışımları kendi içlerinde değerlendirildiklerinde basınç dayanımları yüksek, su emme dayanımları düşük iken B, D ve F numunelerinde tam tersi su emme dayanımları yüksek, basınç dayanımları düşük seyretmiştir. Sıcaklık etkisi ile karışımların priz süreleri düşmüştür bu nedenler dayanımlarının düşük seyrettiği düşünülmektedir. D numunelerinin dayanımının artmasının buna karşılık su emme oranlarının B numunelerine kıyasla daha düşük olmasının sebebinin SEP içerisinde bulunan ilave çözeltili kaynağından olabileceği düşünülmektedir.

Aynı etki 23 °C çözelti katkısı ile hazırlanan C numunesinde de görülmüştür. SEP katkısındaki artış ön çalışmada elde edilen verilere de bakıldığında su emme oranlarını arttırarak, basınç dayanımlarını düşürmüştür.

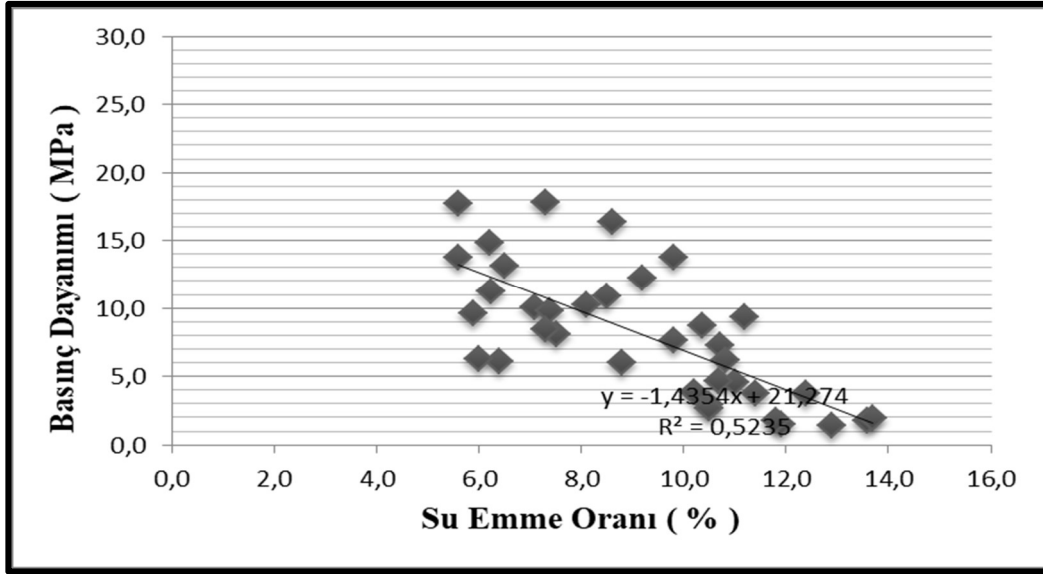
Tez çalışmasında 50 gr SEP katkısının uygun dozajda kullanımının mukavemet etkilerini geliştirebileceği düşünülmektedir. Çalışma sıcaklık etkileri ve sodyum poliakrilat bünyesine çözelti katılarak elde edilen numuneler üzerinde yoğunlaşmaktadır. SEP katkısının alkali aktivatör absorpsiyonunda cüruf, uçucu kül vb. malzemeler için düzenli alkali aktivatör tedariki sağlaması ve daha fazla reaksiyon ve mikro yapı gelişimini teşvik etmesi, SEP kullanımının dayanım ve kimyasal dayanıklılık açısından önemli etkilerinin olduğu sonucunu çıkarmıştır (Afridi ve ark., 2019).



Şekil 4. 43. 28 günlük basınç dayanımları ile su emme oranları arasındaki ilişkisi



Şekil 4. 44. 56 günlük basınç dayanımları ile su emme oranları arasındaki ilişkisi



Şekil 4. 45. 90 günlük basınç dayanımları ile su emme oranları arasındaki ilişkisi

#### 4.3.2. Eğilme-basınç dayanımı ilişkisi

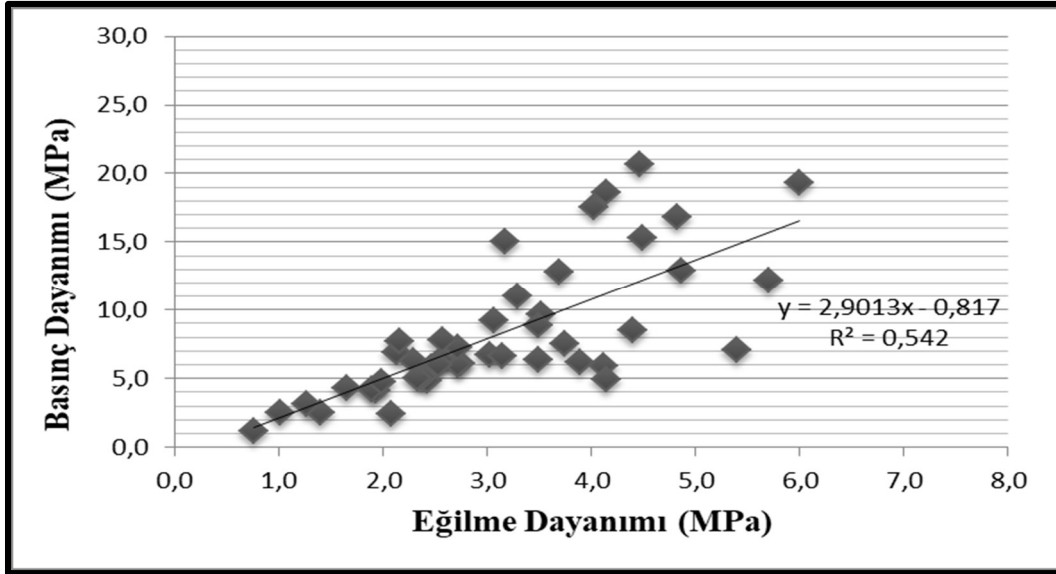
28, 56 ve 90 günlük numunelerin eğilme - basınç ilişkisi istatistiksel açıdan incelendiğinde numuneler arasındaki korelasyon katsayısı sırasıyla  $R_{28}=0,73$ ,  $R_{56}=0,58$ ,  $R_{90}=0,62$  olarak hesaplanmıştır ( $R_c$ = Basınç dayanımı,  $R_f$ =Eğilme dayanımı ). Elde edilen veriler ile ilgili grafik Şekil 4.46, Şekil 4.47 ve Şekil 4.48’de gösterilmiştir.

$$28. \text{ Gün } R_c = 2,9013. R_f - 0,817$$

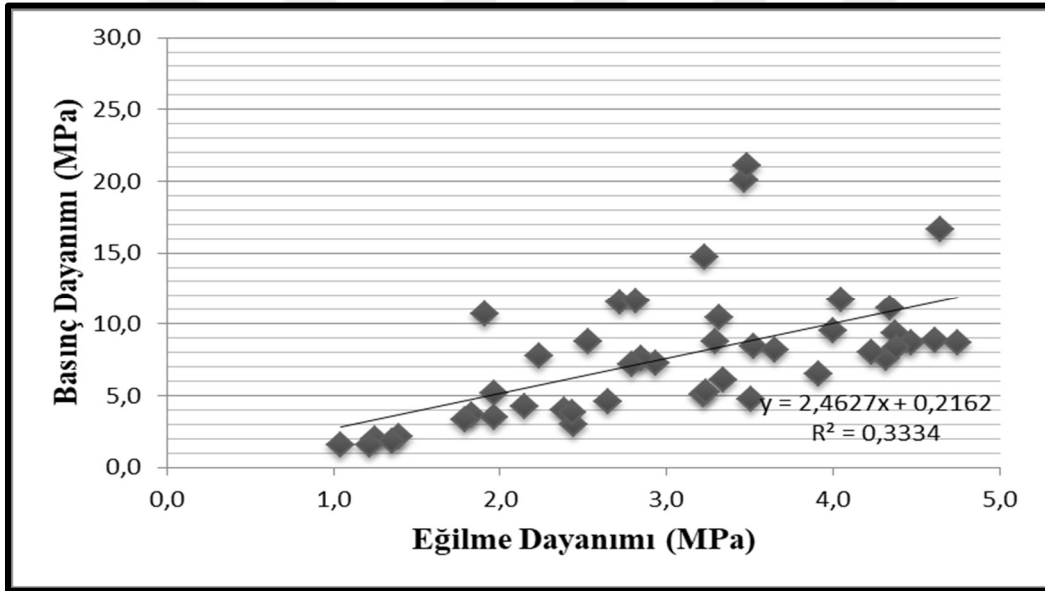
$$56. \text{ Gün } R_c = 2,4627. R_f + 0,2162$$

$$90. \text{ Gün } R_c = 2,8590. R_f + 0,8511$$

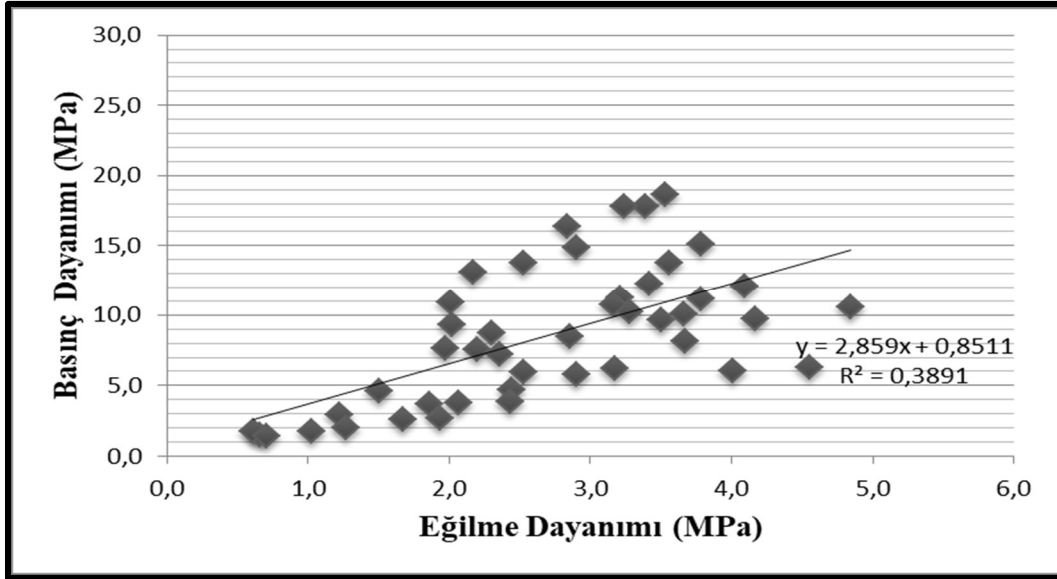
Çalışmada korelasyon eğrisi pozitif yönlüdür. Eğilme dayanımları ile basınç dayanımlarının doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişki güçlüdür. 23°C ile hazırlanan numunelerin genel olarak eğilme ve basınç dayanımları yüksektir. Sıcaklık etkisi ile karışımların değerleri düşmüştür. Ancak çözelti katkılı D numunelerinin hem eğilme hemde basınç dayanımları B ve F numunelerine oranla daha yüksektir. 28, 56 ve 90 günlük dayanımlarda 56. gün düşüş gözlenmiştir. 90. günde ise basınç dayanımları tekrar yükselmeye başlamıştır.



Şekil 4. 46. 28 günlük eğilme-basınç dayanımları arasındaki ilişki



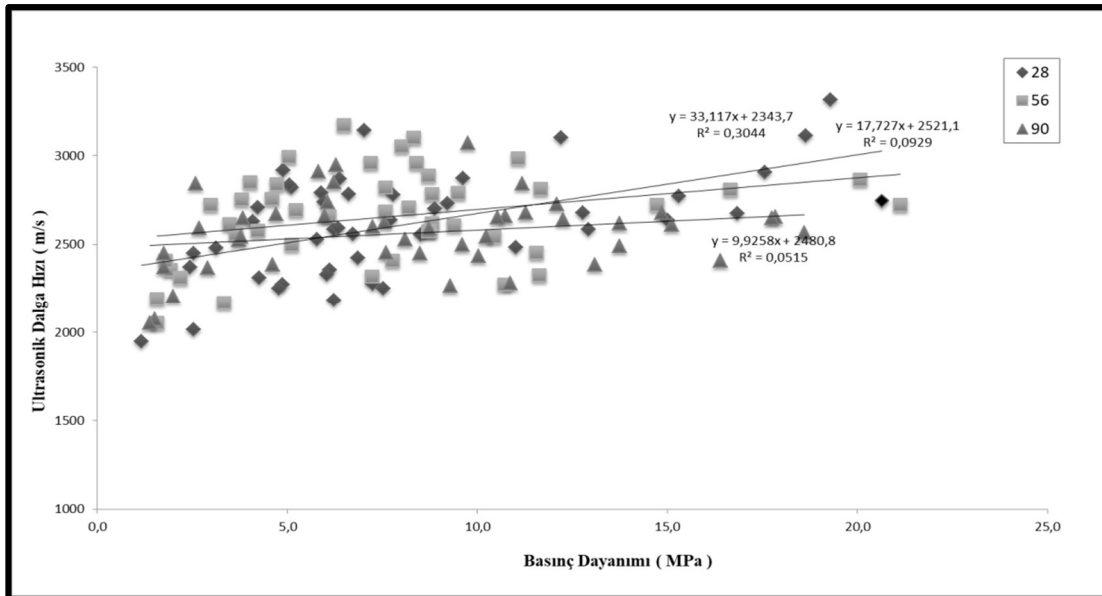
Şekil 4. 47. 56 günlük eğilme-basınç dayanımları arasındaki ilişki



Şekil 4. 48. 90 günlük eğilme-basınç dayanımları arasındaki ilişkisi

#### 4.3.3. Ultrasonik dalga hızı-basınç dayanımı ilişkisi

Numunelerin basınç-ultrasonik dalga hızı ilişkisi incelendiğinde numuneler arasındaki korelasyon katsayı ortalaması  $R = 0,66$  olarak hesaplanmıştır. 28 günlük numunelerin UDH ve dayanım arasında anlamlı ve yüksek bir ilişki olduğu görülmektedir (Şekil 4.49).



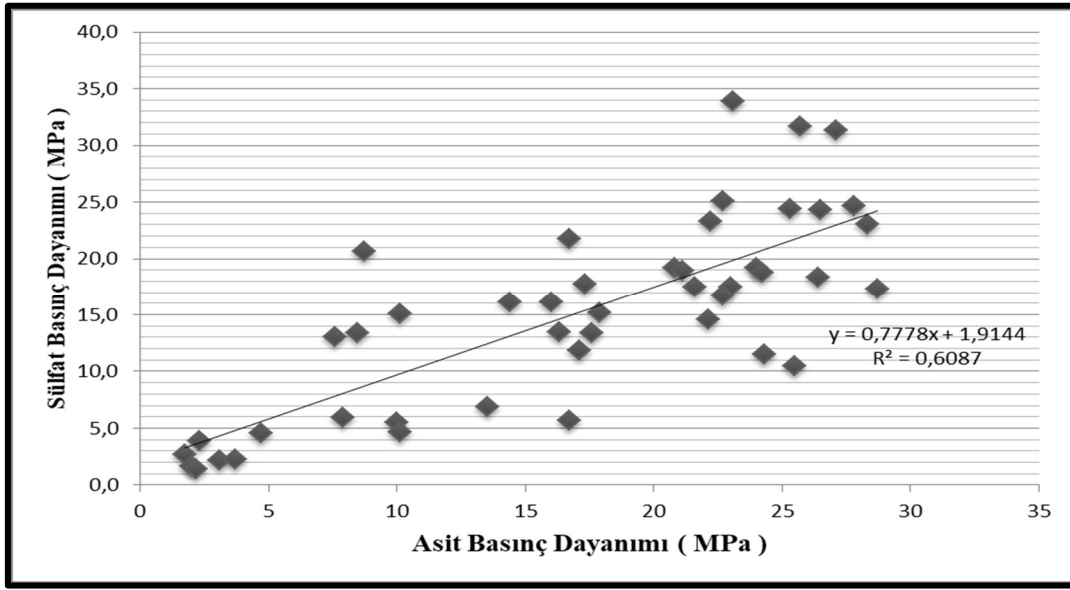
Şekil 4. 49. Ultrasonik dalga hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

#### 4.3.4. Asit-sülfat dirençlerinin karşılaştırılması

Asit-sülfat numunelerinin basınç dayanımları arasındaki ilişki Şekil 4.50 ve Şekil 4.51’de gösterilmiştir. Numuneler arasındaki korelasyon katsayısı  $R = 0,78$  olarak belirlenmiştir. ( $R_s$  = Sülfat basınç dayanımı,  $R_a$  = Asit basınç dayanımı )

$$R_s = 0,7778 \cdot R_a + 1,9144$$

$$R^2 = 0,6087$$

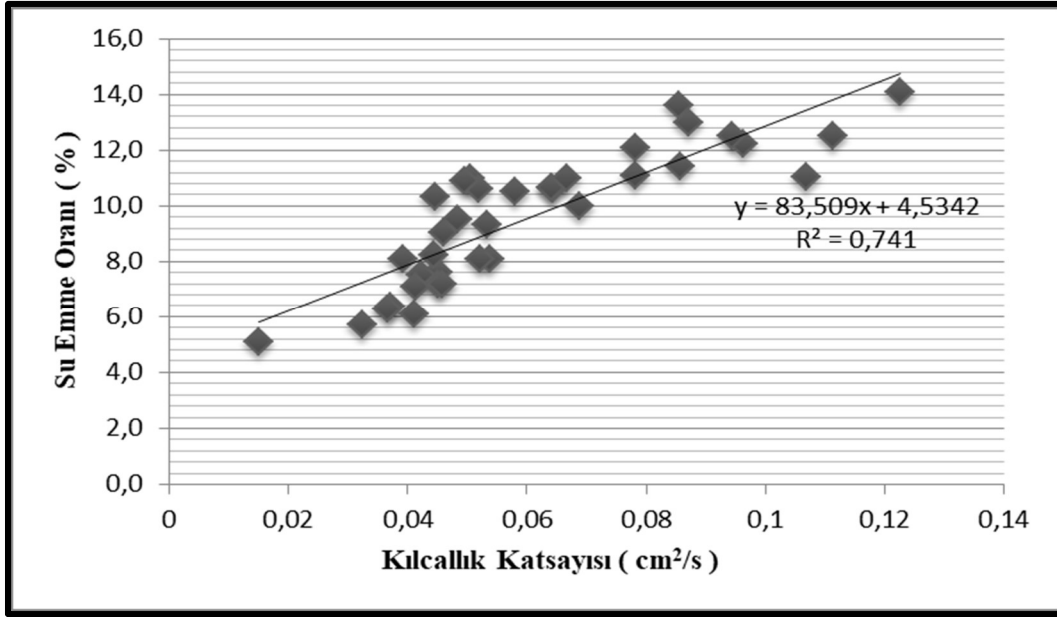


Şekil 4. 50. Asit ve sülfat korelasyon eğrisi

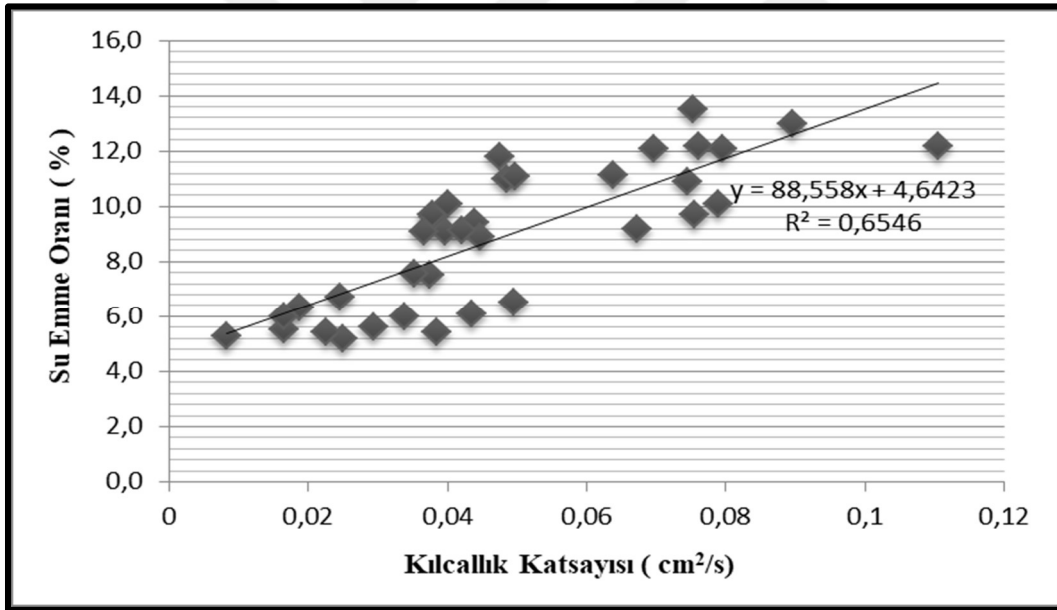
Deneysel çalışmada, SEP katkısı içermeyen E ve F numuneleri incelendiğinde asit ve sülfat etkisinde dayanım ve kütle kayıpları yaşandığı görülmüştür. Bunun aksine SEP katkılı A ve C numuneleri SEP katkısında kimyasal etkilere direnç göstererek iyi dayanım performansı göstermiştir. Şekil 4.51’de görüleceği gibi tüm kür sürelerinde, özellikle çözelti havuzunda bekletilen C numunelerinin asit ve sülfat etkisinde dayanımlarının yüksek ve kütle kayıplarının düşük olduğu görülmüştür. Geopolimer harçlarda Portland çimentolu harçlara kıyasla sülfat saldırısı sırasında portlandit ve monosülfoalüminatlar içermediğinden alçıtaşı veya etrenjit oluşmaz (Afridi ve ark., 2019). Birçok çalışmada alkaliler ile aktive edilen betonun, kimyasal saldırısına karşı güçlü direnç gösterdiği belirtilmiştir (Komljenović ve ark., 2013 ; Džunuzović ve ark., 2017). Dayanım artışının, harçlarda sodyum sülfatın gözenekleri doldurmasından ve devam eden reaksiyondan kaynaklı olabileceği belirtilmiştir. (Li ve ark., 2021).



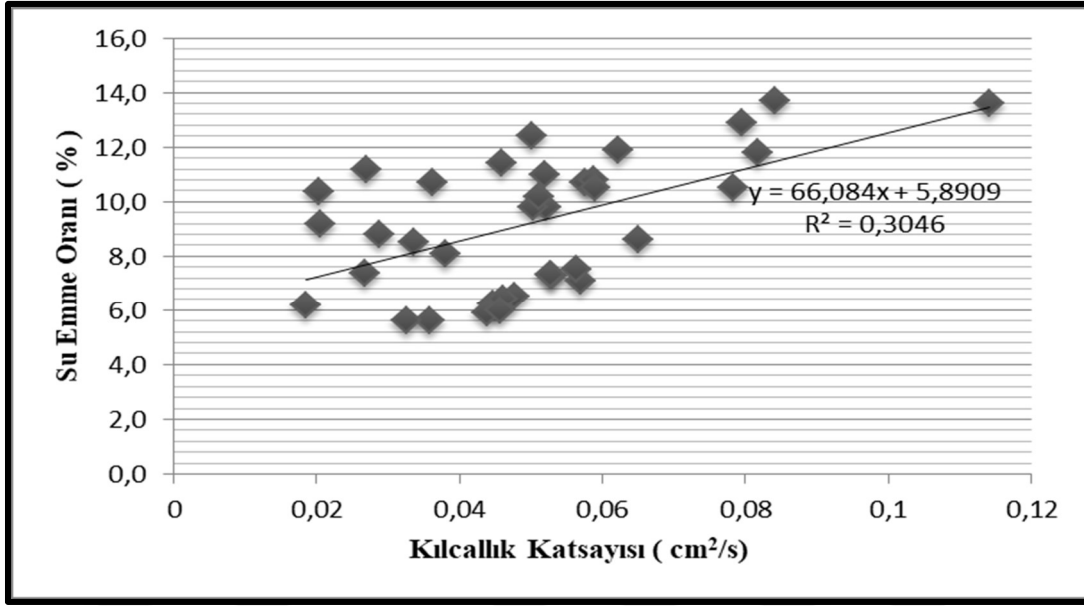




Şekil 4. 52. 28 günlük su emme ile kılcal su emme arasındaki ilişki



Şekil 4. 53. 56 günlük su emme ile kılcal su emme arasındaki ilişki



Şekil 4. 54. 90 günlük su emme ile kılcal su emme arasındaki ilişkisi

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde, hem deneme çalışması hemde ana çalışmaya ait sonuçlar yer almaktadır.

### 5.1. Sonuçlar

Ön çalışmaya ait sonuçlar incelendiğinde, SEP katkılı karışımlarda su emme miktarının arttığı, eğilme ve basınç dayanımların genel olarak düştüğü gözlemlenmiştir. Ancak %6 sodyum konsantrasyonuna sahip numunelerde %4 ve %8 ile hazırlanan numunelere kıyasla basınç ve eğilme dayanımlarının referans numunelerle kıyaslanabilir olduğu görülmüştür. YFC ile hazırlanan geopolimer harçların dayanım kazanması açısından gerekli olan alkali ortam için sodyum konsantrasyonunun en az %6 olması gerektiği belirtilmiştir. SEP katkısı yayılma çaplarında ve su emme oranlarında artışa neden olmaktadır. SEP miktarının yüksek olması taze harçta kismaya neden olduğundan 150 gr ve üzerinde SEP kullanılmamıştır. Sıcaklık kürü (60° C) uygulanan numunelerde SEP katkısı ile çatlakların önemli oranda azaldığı gözlenmiştir. Ön çalışma sonuçlarına göre; dayanım özellikleri ve su emme kapasitesi bakımından iyi sonuç veren BS2/60°C/50 gr SEP numunesinin basınç dayanımı 26,8 MPa, su emme oranının %7,4 olduğu tespit edilmiştir. SEP'in su emme kabiliyetinden faydalanılarak boşluk miktarı yüksek, sürdürülebilir geopolimer numuneler üretilmiştir. Bu sonuçlar referans alınarak çalışmanın daha da geliştirilmesi amacıyla tez çalışması yapılmış ve SEP davranışları incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında, 50 gr sodyum poliakrilat eklenen ve %6 Na<sup>+</sup> konsantrasyon oranı ile hazırlanan alkaliler ile aktifleştirilmiş ÖGYFC katkılı geopolimer harçların, karışım sıcaklığının ve çözelti miktarındaki değişimlerin birbirleri ve referans numuneleri ile aralarındaki ilişkiler incelenmiştir. Çalışmada SEP içerisine katkı maddesi olarak su (SEP-1) ve çözelti (SEP-2) eklenmesi, karışım sıcaklıkları, sıvı (çözelti-su) içerisinde kürlenmeleri ve kür sürelerine bağlı olarak dayanım ve boşluklu iç yapısı araştırılmış buna ek olarak asit-sülfat saldırısında ve ıslanma-kuruma etkisindeki durumları incelenmiştir. Deney numuneleri A,B,C,D olarak adlandırılan ve referans numuneleri E ve F olan 6 farklı karışımdan elde edilen sonuçlar şu şekildedir.

1. A,B,C,D,E,F karışımlarının yayılma çapları incelendiğinde; SEP içeren numunelerin, referans numunelerine göre yayılma çaplarında artış olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte SEP içerisine su eklenerek hazırlanan numunelerin çözelti emdirilerek hazırlananlara göre kıvamlarının daha fazla olduğu

görülmüştür. SEP katkısı vizkoziteyi azaltarak harçların daha akışkan bir kıvam almasını buna bağlı olarak işlenebilirlik ve kolay kalıplanmayı sağlamaktadır. Karışımlarda sıcaklığın artması hem referans numunelerinde hem de SEP katkılı deney numunelerinde yayılma çaplarını düşürmüştür. Sıcaklık faktörü harçların priz sürelerini hızlandırarak daha kısa sürede katı forma geçmesini sağlamaktadır.

2. Numunelerin birim hacim ağırlıkları incelendiğinde; SEP katkılı numunelerde su emme miktarlarındaki artış ve ısıнын etkisi ile SEP'nin içerisindeki suyunu salması sonucu boşluklu yapının oluşması  $\gamma_k$ 'yi düşürmüştür. C ve D karışımlarında hem SEP içerisinde çözelti eklenip hem de çözelti havuzunda bekletilenlerinde  $\gamma_k$  değerlerinin diğer numunelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin SEP'nin su miktarının ve buharlaşmanın daha düşük olması sonucunda olduğu düşünülmektedir. Asit-sülfat ve IK numuneleri incelendiğinde aynı koşullarda aynı tür sonuçlar gösterdiği gözlenmiştir.
3. Kuru birim hacim ağırlıkları A ve B numunelerinin daha gözenekli yapıya sahip olduğuna bunun aksine C ve D numunelerinde SEP içerisinde bulunan çözelti ilavesinin boşlukları doldurarak daha yoğun bir yapı oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir.
4. Doygun birim hacim ağırlıklarına bakıldığında; kuru birim ağırlıkları ölçülen numunelerde olduğu gibi SEP içerisinde çözelti eklenerek hazırlanan numunelerin  $\gamma_{dyk}$  değerlerinin daha fazla olduğu, bunun nedeninin oluşan C-S-H jellerinin daha yoğun olması ve suya olan ihtiyacın azalması olduğu düşünülmektedir. Bu düşüncenin neticesinde C numunelerinin ağırlıklarının ölçümlerde en yüksek değerlere sahip olması bu durumu destekler niteliktedir. Numune yaşına bağlı olarak  $\gamma_{dyk}$  değerlerine bakılan numunelerin 90. günde artış gösterdiği bunun nedeninin SEP katkılı numunelerin içerisine su almaya devam etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
5. Çalışmada numunelerin su emme oranlarının sıcaklığa bağlı olarak arttığı gözlenmiştir (B, D, F). Sıcak su ilavesinin aktivasyon hızını arttırması sonucunda bünyesine aldığı su miktarının arttığı düşünülmektedir. Buna ek olarak SEP-2 (çözelti katkılı) ile hazırlanan numunelerin (C ve D) su emme miktarları, SEP-1 (su

katkılı) ile hazırlanan A ve B karışımlarına göre daha düşük oranlarda ölçülmüştür. Asit-sülfat ve IK numunelerinin su emme oranları da benzer şekilde 100 °C'deki B,D,F numunelerinde daha yüksek olduğu bununla birlikte SEP içerisinde çözelti emdirilerek hazırlanan D numunelerinin diğer numunelere göre daha fazla su emdiği görülmüştür.

6. Su emme kapasitesi ile basınç dayanımları arasında ters bir ilişki olduğu korelasyon analizi sonucu görülmüştür. Artan boşluklu yapı nedeniyle su emme oranları artmış, basınç dayanımlarını ise düşük seyretmiştir. Çalışma sıcaklık etkileri ve sodyum poliakrilat bünyesine çözelti katılarak elde edilen numuneler üzerinde yoğunlaşmaktadır. SEP katkısının içten kürlenme sırasında ilave alkali aktivatör kaynağı ile reaksiyon gerçekleştirmesi, dayanım ve kimyasallara karşı dayanıklılık açısından etkili olduğu düşünülmektedir.
7. B numunelerinin mevcut su miktarlarının diğerlerine oranla daha fazla olduğu dikkat çekmektedir. SEP içerikli B numunesinin sıcaklık faktörü altında hızlı bir şekilde kürlenmesinin boşluklu yapının artması ile doğru orantılı olduğu ve içerisindeki bulundurduğu su miktarının bu nedenden kaynaklı daha fazla olduğu görülmüştür.
8. Asit içerisinde bekletilen numunelerin mevcut su durumu değerlendirildiğinde; diğer kür şartlarına göre daha düşük miktarlarda olduğu görülmüş özellikle etüv ve çözelti içerisinde bekletilenlerinde bu değerlerin daha düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir.
9. Kılcal su emme deney sonuçları, su emme oranları ile uyumludur. Referans numunelerine kıyasla SEP katkısı kılcal su emme miktarlarını arttırmıştır. Ancak Na<sup>+</sup> konsantrasyonundaki artışın karışım içerisindeki yoğunluğu arttırması nedeni ile su katkılı karışımlara oranla çözümlü C ve D karışımlarının kılcal su emme miktarlarının daha düşük çıkmıştır. Deney sırasında belirlenen periyotlardaki ölçümler sonucunda kılcal su emme miktarlarının giderek arttığı gözlemlenmiştir. Numunelerin kürlenme sırasında numune yaşı arttıkça kılcal su emmenin düştüğü tespit edilmiştir. Karışımlar içerisinde en düşük değeri alan numuneler D

karışımına ait olanlardır. Burada yine çözelti miktarı ve sıcaklık faktörleri sonucu etkilemektedir.

10. Numunelerin sıcaklık etkisi altında eğilme dayanımlarında düşüşler gözlenmiştir. 100 °C sıcaklıkta hazırlanan (B,D,F) numuneler içerisinde B numunesinin eğilme dayanımındaki düşüşün sıcaklık faktörüne bağlı olarak erken priz alması ve boşluklu yapısından kaynaklı olduğu düşünülmekle beraber; su emme, mevcut su durumu, kapilarite deneylerinden elde edilen sonuçlar eğilme dayanımındaki durumu destekler niteliktedir. A ve C karışımlarının eğilme dayanımları birbirleri ile yakın sonuçlar vermiştir. C ve D numuneleri her ikisinde de çözelti miktarlarının fazlalığı ve ilave aktivatör kaynağı oluşturarak içten kürlenmeyi olumlu yönde etkilemiş olmasına rağmen sıcaklık etkisi altındaki D numunesinin dayanımındaki düşüşler bariz bir şekilde görülmektedir.
11. Numunelerin basınç dayanımları arasındaki ilişkiler eğilme dayanımı ile benzer sonuçlar vermiştir. A ve C numuneleri E referans numunesine yakın değerlere sahiptir. Karışımlar içerisinde en yüksek basınç dayanımına sahip olanlar AÇ-38/28/56 (21,1 MPa) ve C-3/0/90(18,6 MPa) numuneleridir. B ve D numunelerinde sıcaklık etkisi özellikle fazla miktarda boşluk içeren B numunesinin basınç dayanımını düşürmüştür. Numunelerin genelinde 28, 56, 90 günlük kür süreleri içerisinde 28 ve 56 gün ortamda bekleyenlerin bazılarında düşüşler gözlenmişse de tüm numunelerde 90.günde basınç dayanımı sonuçları daha yüksek değerlerde ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre içten kürlenmenin devam ettiği düşünülmektedir. Ayrıca alkali aktivatör katkısı içten kürlenme sırasında oluşturduğu yoğun çözelti yapısı ile SEP katkısının boşlukları doldurarak, gözenekliliğin azalması ve desorpsiyonun daha yavaş gerçekleşmesi sonucunda betonun dayanıklılığını arttırdığı düşünülmektedir.
12. 23 °C su katkılı (SEP-1) C numunelerinin asit ve sülfat etkisinde dayanımlarının yüksek ve kütle kayıplarının düşük olduğu görülmüştür.
13. Ultrasonik dalga hızı deneyi sonuçlarına göre en yüksek UDH değerine sahip numuneler; DS-8/1/56 (3174 m/s), D-1/0/28 (3143 m/s), DS-7/1/28 (3103 m/s) ve DS-9/1/90 (3072 m/s)'dir. Numunelerin aldığı değer Whitehurst (1995) tarafından

yapılan sınıflandırmaya göre orta değerlere sahiptir. Ultrasonik dalga hızındaki değerlerin numunelerin genelinde 'Kötü' kategorisinde sonuçlar elde edilmiştir. Bu ultrases geçiş hızı değerlerinin karışıma eklenen SEP sonucunda numunelerin boşluklu hale gelmesinden kaynaklandığı bilinmektedir. Ses dalgalarının boşluk etrafında dolaşmasından kaynaklı dalga geçiş hızlarının azaltılmaktadır. (Kuloğlu, 2003). D numunesinin tüm numuneler içerisinde en iyi sonucu vermesinin ek çözültiden gelen kimyasalların SEP boşluklarının içerisinde kalarak boşluk miktarını azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. UDH ve dayanım arasında anlamlı ve yüksek bir ilişki olduğu görülmektedir.

14. Numunelerin geçirimsizlik özelliğinin belirlenmesi için uygulanan rezonans frekansı deneyinde; SEP-2 katkılı D numunelerinin 28.günde daha yüksek değerlerde seyrederken, 56 gün genel olarak referans numunesine yakın değerlerde seyretmiştir. Bu sonuçlar UDH deneyleri ile benzerdir. A ve C karışımları (SEP-1) ise oluşturduğu boşluklu yapı sonucu geçirimsizliğin arttığı gözlenmiş ve referans numunelerine göre SEP katkısı frekans değerlerini düşürmüştür.
15. Islanma – kuruma deneyinde numunelerinin kütle kayıpları ile basınç ve eğilme olan ilişkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmada kütle kayıpları ile eğilme-basınç ilişkisinin birbirleri ile ters orantılı olduğu görülmektedir. A, C, E numunelerinin B, D, F numunelerine göre daha az kütle kaybetmişlerdir. Islanma – kuruma döngüsü sonrasında deney numunelerinin kontrol numunelerine kıyasla kütle kayıpları fazladır. Çözelti konsantrasyonu fazla olan SEP katkılı C ve D numunelerin kütle kaybı ve eğilme basınç ilişkilerine bakıldığında D numunesinin sıcaklık faktörünün etkisi sonucu daha fazla kütle kaybının meydana geldiği görülmüştür. Kütle kayıplar arttıkça D karışımının basınç dayanımları azalmış, eğilme dayanımı ise C numunesi ile kıyaslandığında daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür.
16. Sülfürik asit içerisinde 1 ay boyunca bekletilen numunelerde kütle kayıpları gözlenmede geopolimer harçların asite karşı dayanıklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca SEP katkısı, numunelerin asit etkisini azaltmıştır. SEP'ye eklenen çözülti ile hazırlanan D karışımı sonuçlarına bakıldığında basınç dayanımına karşı daha iyi direnç gösterdiği tespit edilmiştir. A ve C numunelerinde düşük kılcal su emme



oranları gözleendiği bunun aksine B ve D numunelerin su apsorbiyon oranların daha yüksek olduğu görölmüştür. Buna bağlı olarak B ve D karışımalarında boşluklardan zararlı maddeleri alması sonucu kimyasal etkilere karşı direncinin düştüğu görölmüştür.

17. Sülfata maruz kalan numunelerin yüzeyinde beyaz tortular gözlenmiştir. Sülfat içerisinde bekleyen numunelerin, boşluklardan bünyesine tuz alması sonucu A, B, C, D numunelerinin ağırlıkları artmıştır. SEP katkılı numuneler sülfat saldırısına karşı daha iyi dayanım göstermişlerdir. 23 °C standart koşullarda hazırlanan A ve C numunelerinin SEP katkısı sonucu referans numunesine oranla artış göstermesi YFC'nin harç içerisinde geçişi zorlaştırması sonucunda kimyasal tepkime ile oluşan etrenjitin SEP içerisinde hapsolarak sülfat direncini arttırdığı düşünölmektedir. Numunelerin UDH aralığı kötü-orta şeklindedir. Ancak ortam koşullarında bekletilen C ve D numuneleri iyi kalite olarak sınıflandırılmıştır.
18. Alkaliler ile aktive edilen cüruflu harçlarda çalışma kapsamında SEP içerisine ilave olarak eklenen çözelti katkısı ( $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{Su}$ ) karbonatlaşma derinliklerini düştürmüştür.
19. SEP katkısının numune yaşı arttıkça içten kürlenme yaparak hidratasyona devam ettiği gözlenmiştir.
20. SEP katkısının harç içerisinde sıvı desorpsiyonunun deney koşullarına göre farklılık gösterebileceği düşünölmektedir. SEP'nin içten kürlenme sürecinde hidratasyonun devamı için gerekli şartların SEP içeriğinin, sıcaklığın ve kür koşulları ile artıp, azabileceği kanısına varılmıştır. Ayrıca literatür çalışmalarında SEP boyutu ve kimyasal yapısına göre desorpsiyon mekanizmasının değişebileceğini desteklemektedir.
21. Çalışmada SEP miktarı sabit tutulan karışımların kür süreleri ve yöntemi, SEP katkısı, karışım suyu sıcaklığı, değişken faktörler olarak belirlenmiştir. Bu değişkenlere göre çalışmada 50 gr SEP katkısının oluşturduğu boşluklu yapı ve su emme oranlarına rağmen uygun şartlarda mukavemet etkilerini geliştirebileceği düşünölmektedir.

22. C ve D numunelerinin yapılan testlerde daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. SEP içerisinde su yerine alkali aktivatör çözeltisi eklenerek jel kıvamına getirilen bu karışımlarda, ayrıca kür koşullarında hazırlanan çözelti içerisinde bekletilmesi harcın yoğunluğu arttırarak gözenekliliği azalttığı görülmüştür. Cürufun aktivasyon sürecinde içten kürlenme yaparak ilave aktivatör katkısı sağlaması ile hem dayanım hemde kimyasal dayanıklılık açısından olumlu sonuçlanmasına neden olduğu görülmüştür.

## 5.2. Öneriler

Yapılan tez çalışmasından elde edilen verilere göre; yüksek fırın cürufu geopolimerin sürdürülebilir ve çevreci harç üretimi için uygun olduğu, SEP katkısı ile içten kürlenme etkisinde dayanım etkilerini arttırmasının yanı sıra daha gözenekli bir malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla özellikle çözelti katkılı SEP'nin, numuneler üzerinde olumlu etkileri gözlemlendiğinden, daha kapsamlı araştırmalar ile konunun geliştirilebileceği ve çalışma planı oluşturularak SEP katkılı, boşluklu ve içten kürlenme etkisinde hafif beton üretimleri yapılabileceği düşünülmektedir. Çalışma içerisinde asit-sülfat ve ıslanma-kuruma deneylerinde belirgin bozulmalar olmadığından dolayı deneye maruz kalma süreleri arttırılarak numunelerin zamana bağlı bozulmaları ve dayanım değişimleri araştırılabilir. Çalışmada ayrıca dayanım etkilerini daha iyi gözlemleyebilmek amacıyla ortamda kür süreleri arttırılarak konunun geliştirilebileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Atiş, C. D., Bilim, C., elik, ., & Karahan, O. (2009). Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construction and building materials*, 23(1), 548-555.
- Kim, J. S., & Schlangen, E. (2010, October). Super absorbent polymers to simulate self healing in ECC. In *2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructures*. RILEM Publications SARL, (s. 849-858).
- Afridi, S., Sikandar, M. A., Waseem, M., & Nasir, H. (2019). Chemical durability of superabsorbent polymer (SAP) based geopolymer mortars (GPMs). *Construction and Building Materials*, 217, 530-542.
- Al-Nasra, M., & Daoud, M. (2013). Investigating the use of super absorbent polymer in plain concrete. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(8), 598-603.
- Al-Nasra, M., Daoudb, M., & Abu-Lebdeh , T. M. (2015). The use of the super absorbent polymer as water blocker in concrete structures. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(4), 659.
- Arslan, A. A. (2019). Metakaolin tabanlı geopolimer harçlara farklı kr koşullarının etkisinin incelemesi. (Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- ASTM C 215. (2003). Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. West Conshohocken, PA.: ASTM International.
- ASTM C109 . (1993). Standard Test Method for Compressize Strength of Hydraulic Cement Mortar. 1916 Race Steet, Philadelphia, PA 19103.: Annual Book of ASTM Standards.
- Atabey, İ. İ. (2017). *F sınıfı uucu kll geopolimer harcının durabilite özelliklerinin araştırılması*.

- Awolusi, T. F., Oke, L. O., Akinkurolere, O. O., Ubani, D. P., Bamisaye, R. T., & Aluko, O. G. (2021). The application of response surface methodology in understanding the compressive strength and water absorption capacity of sandcrete blocks. *Silicon*, 13, 4123–4132.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (2002). Sulfate attack on alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete research*, 32(2), 211-216.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (2003). Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack. *Cement and Concrete research*, 33(10), 1607-1611.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y.-B. (1999). Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research*, 29(1), 113-120.
- Balçıkanlı, M. (2016). Alkalilerle aktive edilmiş çimentosuz cürüflü betonların mekanik ve geçirimsizlik özellikleri ve üretim optimizasyonu . (Master's thesis, İskenderun Teknik Üniversitesi/Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Balçıkanlı, M., Özbay, E., & Türker , H. T. (2015). Alkalilerle aktive edilmiş harçların çekip çıkarma ve aşınma dirençlerinin belirlenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(2), 87-98.
- Burciaga-Díaz, O., & Escalante-García, J. I. (2013). Structure, Mechanisms of Reaction, and Strength of an Alkali-Activated Blast-Furnace Slag. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(12), 3939-3948.
- Canbaz, M., & Topçu, İ. B. (2008). Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harçlarda asit etkisi. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (016), 69-80.
- Chen, X., Chen, L. S., & Xu, J. T. (2014). Research on Sodium Polyacrylate and its effects on Mechanical Properties of Slag-based Geopolymer. *In Applied Mechanics and Materials*, (Vol. 638, pp. 1387-1390). Trans Tech Publications Ltd.
- Collins , F., & Sanjayan, J. G. (2000). Numerical modeling of alkali-activated slag concrete beams subjected to restrained shrinkage. *Materials Journal*, 97(5), 594-602.
- Collins, F., & Sanjayan, J. G. (2001). Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete. *Cement and Concrete Composites*, 23(4-5), 345-352.

- Craeye, B., Geirnaert, M., & De Schutter, G. (2011). Super absorbing polymers as an internal curing agent for mitigation of early-age cracking of high-performance concrete bridge decks. *Construction and building materials*, 25(1), 1-13.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2017). Demir-Çelik Sanayi Raporu Sektörel Atık Kılavuzu. <https://cygm.csb.gov.tr/kilavuz-ve-rehberler-i-429> adresinden alınmıştır
- Davidovits, J. (1976). Solid phase synthesis of a mineral block polymer by low temperature polycondensation of aluminosilicate polymers. *Topic III, New Polymers of high stability*. IUPAC International Symposium on Macromolecules Stockholm.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633–1656.
- Davidovits, J. (2008a). Geopolymer chemistry and applications. *Institut Géopolymère, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France*.
- Davidovits, J. (2008b). They built the Pyramids. *Geopolymer Institute*.
- Davidovits, J. (2013). Geopolymer cement. A review. *Geopolymer Institute, Technical papers* (s. 21, 1-11). içinde
- De Meyst, L., Mannekens, E., Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2021). The influence of superabsorbent polymers (SAPs) on autogenous shrinkage in cement paste, mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 286, 122948.
- Džunuzović, N., Komljenović, M., Nikolić, V., & Ivanović, T. (2017). External sulfate attack on alkali-activated fly ash-blast furnace slag composite. *Construction and Building Materials*, 157, 737-747.
- Elibol, C. (2012). *Alkalilerle aktive edilen çimento esaslı malzemelerin basınç dayanımlarının incelenmesi*. (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Erdoğan, T. (1993). Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu* (s. 1-8). Ankara: İMO.

- Euroslag. (2014). "Statistics 2012": <http://www.euroslag.com/products/statistics/2012/> adresinden alınmıştır
- Euroslag.(2018)."Statistics2018".<https://www.euroslag.com/wpcontent/uploads/2022/04/Statistics-2018.pdf> adresinden alınmıştır.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, J. G., & Puertas, F. (1999). Alkali-activated slag mortars: mechanical strength behaviour. *Cement and concrete research*, 29(8), 1313-1321.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, J. G., & Puertas, F. (1999). Alkali-activated slag mortars: mechanical strength behaviour. *Cement and concrete research*, 29(8), 1313-1321.
- Genç, B. S., Sevim, U. K., & Balçıkanlı Bankir, M. (2022). Süper emici polimer katkılı alkalilerle aktive edilen geopolimer harçların özellikleri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(2), 1-1.
- Gök, S. G. (2020). Alkali ile aktive edilmiş harç ve atık çelik tel donatılı betonların (SIFCON) fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin araştırılması . (Doctoral dissertation, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- GÖK, S. G., & KILINÇ, K. (2017). Mechanical Properties of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Alkali Activated Concrete. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2), 123-131.
- Haha, M. B., Lothenbach , B., Le Saout, G., & Winnefeld, F. (2011). Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag—Part I: Effect of MgO. *Cement and Concrete Research*, 41.9: 955-963.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. (2004). On the development of fly ash-based geopolimer concrete. *Materials Journal*, 101(6), 467-472.
- Hubbe, M. A., & Koukoulas, A. A. (2016). Wet-laid nonwovens manufacture—chemical approaches using synthetic and cellulosic fibers. *BioResources*, 11(2), 5500-5552.
- Ikeda, K. (1998). Consolidation of mineral powders by the geopolimer binder technique for materials use. *Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan*, 114, 497–500.

- İlkertapar, S. (2013). Kimyasal katkı içeren alkali ile aktive edilmiş cüruf harçlarının farklı kür koşulları altındaki özellikleri. (Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi).
- International Energy Agency (IEA). (2018). Technology Roadmap:Low-Carbon Transition in the Cement Industry. 04.06.2021 tarihinde IEA: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry> adresinden alındı
- Islam, M. M., Islam, S. M., Rahman , A. M., & Das , A. (2011). Strength behavior of mortar using slag as partial replacement of cement. *Mist International Journal Of Science And Technology*, 3(1).
- Jiang, Y., & Gu, W. (2021). Carbonation and Electrochemical Corrosion Resistance of Mild Steel Rebar in Concrete Modified by Sodium Polyacrylate as Super Absorbent Polymer exposed to 3.5 wt% NaCl Solution. *International Journal Of Electrochemical Science*, 16(6).
- Kaya, H. (2010). Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonda Su/Çimento Oranının Etkinlik Katsayısına ve Kırılma Parametrelerine Etkisi. İstanbul : Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kayacıklı, İ. E. (2020). Farklı geopolimer betonların dayanımlarının zamanla değişimi ve durabilitesi. (Master's thesis, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Komljenović, M., Bašćarević, Z., Marjanović, N., & Nikolić, V. (2013). External sulfate attack on alkali-activated slag. *Construction and Building Materials*, 49, 31-39.
- Kuloğlu, F. Ş. (2003). Çimento Esaslı Tamir Harçlarının Durabilite Özellikleri. (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Li, Q., Li, X., Yang, K., Zhu, X., Gevaudan, J. P., Yang, C., & Basheer, M. (2021). The long-term failure mechanisms of alkali-activated slag mortar exposed to wet-dry cycles of sodium sulphate. *Cement and Concrete Composites*, 116, 103893.

- Li, Z., Ding, Z., & Zhang, Y. (2004). Development of sustainable cementitious materials. *In Proceedings of international workshop on sustainable development and concrete technology, Beijing, China*, (pp.55-76).
- Lokeshwari, M., Bandakli, B. R., Tarun, S. R., Sachin, P., & Kumar, V. (2021). A review on self-curing concrete. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2259-2264.
- Lothenbach, B., & Gruskovnjak, A. (2007). Hydration of alkali-activated slag: thermodynamic modelling. *Advances in cement research*, 19.2: 81-92.
- Madduru, S. R., Shaik, K. S., Velivela, R., & Karri, V. K. (2020). Hydrophilic and hydrophobic chemicals as self curing agents in self compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, 28, 101008.
- Madhuri, G., & Srinivasa Rao, K. (2018). Performance of alkali-activated slag concrete against sulphuric acid attack. *Asian Journal of Civil Engineering*, 19(4), 451-461.
- Manzur, T., Iffat, S., & Noor, M. A. (2015). Efficiency of sodium polyacrylate to improve durability of concrete under adverse curing condition. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- Matsumoto, M. (2018). Water Driven Soft Actuator. *Applied System Innovation*, 1(4), 41.
- Mechtcherine, V., Gorges, M., Schroefl, C., Assmann, A., Brameshuber, W., Ribeiro, A. B., &.....& Zhutovsky, S. (2014). Effect of internal curing by using superabsorbent polymers (SAP) on autogenous shrinkage and other properties of a high-performance fine-grained concrete: results of a RILEM round-robin test. *Materials and Structures*, 47(3), 541-562.
- Moranville-Regourd, M., & Kamali-Bernard, S. (2019). Cements Made From Blastfurnace Slag. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete (Fifty Edition)* (s. 469-507). içinde Elsevier.
- Newman, J., & Choo, B. S. (2003). *Advanced Concrete Technology*. Oxford: Elsevier.
- Öcal, Y. (2014). Demir çelik sektöründe atık yönetimi. Uzmanlık Tezi. TC Kalkınma Bakanlığı Yayın No, 2911.



- Petermann, J. C., Saeed, A., & Hammons, M. I. (2010). Alkali-activated geopolymers: a literature review.
- Roy, A., Schilling, P. J., Eaton, H. C., Malone, P. G., Brabston, W. N., & Wakeley, L. D. (1992). Activation of ground blast-furnace slag by alkali-metal and alkaline-Earth hydroxides. *Journal of the American Ceramic Society*, 75(12), 3233-3240.
- Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2020). *Demir-Çelik Sektör Raporu*. <https://www.sanayi.gov.tr/plan-program-raporlar-ve-yayinlar/sector-raporlari> adresinden alınmıştır
- Sarna, S. K. (2013, May 5). Blast Furnace Slag Granulation at the Cast House. ispatguru: <https://www.ispatguru.com/blast-furnace-slag-granulation-at-cast-house/> adresinden alınmıştır
- Savaşkan, T. (2017). *Malzeme Bilimi Ve Malzeme Muayenesi Kitabı*. Papatya Yayıncılık.
- Schröfl, C., Erk, K. A., Siriwatwechakul, W., Wyrzykowski, M., & Snoeck, D. (2022). Recent progress in superabsorbent polymers for concrete. *Cement and Concrete Research*, 151, 106648.
- Snoeck, D., & De Belie, N. (2016). Repeated autogenous healing in strain-hardening cementitious composites by using superabsorbent polymers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1), 04015086-1.
- Snoeck, D., Pel, L., & De Belie, N. (2017). The water kinetics of superabsorbent polymers during cement hydration and internal curing visualized and studied by NMR. *Scientific reports*, 7(1), 1-14.
- Snoeck, D., Van Tittelboom, K., De Belie, N., Steuperaert, S., & Dubruel, P. (2012, September). The use of superabsorbent polymers as a crack sealing and crack healing mechanism in cementitious materials. *In 3rd international conference on concrete repair, rehabilitation and retrofitting*. Cape Town (pp. 152-157).
- Snoeck, D., Van Tittelboom, K., Steuperaert, S., Dubruel, P., & De Belie, N. (2014). Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25(1), 13-24.

- Sohn, O., & Kim, D. (2003). Theoretical and experimental investigation of the swelling behavior of sodium polyacrylate superabsorbent particles. *Journal of applied polymer science*, 87(2), 252-257.
- Song, C., Choi, Y. C., & Choi, S. (2016). Effect of internal curing by superabsorbent polymers–internal relative humidity and autogenous shrinkage of alkali-activated slag mortars. *Construction and Building Materials*, 123, 198-206.
- Şinik, O. (2019). Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması (Master's thesis).
- Thunuguntla, C. S., & Gunneswara Rao, T. D. (2018). Effect of mix design parameters on mechanical and durability properties of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 193, 173-188.
- Tokyay , M., & Erdoğan, K. (2003). *Cüruflar ve Cürüflü Çimentolar. Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu*. Ankara.
- TS EN 1015-3. (2000). *Kagir harcı-Deney metotları-Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile)*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 14630. (2012). *Beton yapılar - Koruma ve tamir için mamul ve sistemler - Deney yöntemleri - Sertleşmiş betonda karbonatlaşma derinliğinin fenolftaleyn yöntemi ile tayini*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 196-1. (2002). “Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım”. Türk Standartları Enstitüsü.
- Türker, H. T., Balçikanlı, M., Durmuş, İ. H., Özbay, E., & Erdemir, M. (2016). Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend on exposed high temperature level. *Construction and Building Materials*, 104, 169-180.
- Venkateswarlu, K., Deo, S. V., & Murmu, M. (2020). Overview of effects of internal curing agents on low water to binder concretes. *Materials Today: Proceedings*, 32, 752-759.
- Wang, S. D., Pu, X. C., Scrivener, K. L., & Pratt, P. L. (1995). Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. *Advances in cement research*, 7(27), 93-102.

- Whitehurst, E. A. (1951, February). Soniscope tests concrete structures. *In Journal Proceedings*, (Vol. 47, No. 2, pp. 433-444).
- World Steel Association. (2018). Steel Industry Co-Products. <https://www.worldsteel.org> adresinden alınmıştır
- Yang, Z., Shi, P., Zhang, Y., & Li, Z. (2022). Influence of liquid-binder ratio on the performance of alkali-activated slag mortar with superabsorbent polymer. *Journal of Building Engineering*, 48, 103934.
- Yang, Z., Shi, P., Zhang, Y., & Li, Z. (2022). Influence of liquid-binder ratio on the performance of alkali-activated slag mortar with superabsorbent polymer. *Journal of Building Engineering*, 48, 103934.
- Zhang, H. Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L., & Wang, F. (2016). Thermal behavior and mechanical properties of geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 109, 17-24.
- Zhang, J., Provis, J. L., Feng, D., & van Deventer, J. S. (2008). Geopolymers for immobilization of Cr<sup>6+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, and Pb<sup>2+</sup>. *Journal of Hazardous materials*, 157(2-3), 587-598.
- Živica, V. (2007). Effects of type and dosage of alkaline activator and temperature on the properties of alkali-activated slag mixtures. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1463-1469.

## DİZİN

**A**

Agrega · V, 44, 45, 46, 47, 53, 54

Alkali Aktivasyon · 27

Alkali Çözelti · 18, 26, 41, 44, 49, 134, 135

Amorf Yapı · 22, 27

Asit · V, 17, 18, 34, 35, 41, 42, 44, 55, 61, 62, 63, 65, 66, 77, 81, 82, 87, 88, 89, 91, 95, 118, 120, 124, 130, 134, 138

**B**

Bağlayıcılık · 16, 20, 21, 22, 24, 27, 48

Basınç · V, X, 26, 29, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 44, 45, 48, 55, 62, 65, 66, 67, 73, 74, 75, 107, 108, 109, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 134, 139, 147

Birim Ağırlık · V, 35

Boşluklu Yapı · V, 31, 37, 45, 70, 76, 109, 110, 125, 135

**C**

CO<sub>2</sub> · 16, 27

Cüruf · V, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 27, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 41, 43, 53, 71, 126, 141

Cüruf · V, 17, 24, 27, 44, 54, 56

**Ç**

Çevre Dostu · 16, 25

Çevre Kirliliği · 16

Çözelti Oranı · V, 44, 45

**D**

Dayanım · 16, 17, 18, 23, 28, 32, 33, 35, 39, 41, 44, 45, 67, 70, 73, 74, 83, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 115, 116, 118, 119, 124, 125, 126, 129, 130, 134, 135

Demir-Çelik · 17, 18, 19

**E**

Eğilme · V, 18, 35, 36, 38, 40, 45, 55, 62, 65, 72, 73, 74, 75, 104, 105, 106, 115, 116, 117, 127, 128, 129, 134, 135

Ekonomik · V, 16, 18, 25

Enerji Tasarrufu · 17

**G**

Geopolimer Harçlar · V, 17, 38, 115

**I**

Islanma-Kuruma · V, 36, 44, 55, 61, 62, 63, 65, 77, 80, 89, 99, 115, 120, 134

**K**

Kapilarite · V, 55, 60, 134

Karbonatlaşma · V, 36, 55, 120, 121, 122, 123, 124, 144

Korelasyon Katsayısı · V, 117, 124, 125, 127, 130

**M**

Mevcut Su Durumu · V, 60, 95, 96, 97

**N**

Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> · 27,32

NaOH · Viii, İx, 16, 17, 27, 28, 29, 32, 35, 37, 41, 44, 45, 46, 48, 49, 52, 53, 56

**Ö**

ÖGYFC · v, viii, 27, 28, 29, 38, 51, 126

**P**

Portland çimentosu · 26, 27, 29, 37, 38

**R**

Rezonans · V, 23, 40, 70, 118, 119, 120

**S**

SEP · V, 20, 22, 34, 35, 36, 41, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 53, 56, 57, 58, 61, 65, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 85, 87, 89, 92, 95, 100, 106, 107, 108, 110, 111, 113, 115, 116, 118, 120, 122, 124, 125, 126, 127, 128, 131, 132, 137, 140, 141

SEP-1 · V, 23, 49, 57, 58

SEP-2 · V, 23, 49, 57, 58

Sıcaklık · 23, 30, 34, 37, 39, 41, 43, 44, 55, 59, 75, 77, 82, 101, 106, 112, 115, 132

Sodyum poliakrilat · v, viii, ix, 34, 35, 36, 42, 55, 56

sodyum sülfat · 38

su · v, ix, x, 19, 22, 23, 26, 29, 34, 35, 37, 38, 39, 41, 43, 44, 46, 47, 49, 50, 51, 53, 55, 56, 57, 58,

59, 60, 63, 64, 65, 66, 75, 76, 77, 80, 82, 83, 85, 86, 89, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 113, 116, 118, 121, 122, 124, 126, 127, 128, 131, 132, 133, 137, 138, 139, 140, 141

su emme · v, ix, x, 22, 23, 34, 49, 50, 54, 55, 57, 60, 64, 65, 66, 75, 76, 77, 80, 83, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 124, 131, 132, 133, 137, 138, 139, 140, 141

sülfat · v, x, 23, 32, 38, 42, 46, 49, 60, 67, 68, 72, 73, 83, 87, 88, 93, 94, 95, 97, 99, 101, 105, 125, 131, 136, 137, 140, 141

sülfürik asit ·46, 71, 124

süper emici polimer · v, 44, 47, 48, 49

sürdürülebilir ·21, 22, 140

## ***U***

---

Ultrases · 23, 40, 70, 115, 117, 123, 124

ultrasonik dalga hızı · v, 71, 72, 116, 135

## ***Y***

---

yüksek fırın çürufu ·v, viii, 22, 25, 27, 30, 32, 46 ,50, 51, 54, 55





**TEKNOVERSITE**





teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

