

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FERROKROM CÜRUF AGREGASININ BETONUN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih SALİHPAŞAOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

ARALIK 2017

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FERROKROM CÜRUF AGREGASININ BETONUN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Fatih SALİHPAŞAOĞLU
(501161011)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL

ARALIK 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501161011 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Fatih Salihpaşaoğlu, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**FERROKROM CÜRUF AGREGASININ BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı: **Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Doç. Dr. Hasan YILDIRIM**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Nilüfer Ö. ZİHNİOĞLU

Boğaziçi Üniversitesi

Teslim tarihi : 17 Kasım 2017

Savunma tarihi : 25 Aralık 2017





Değerli anne ve babama,



ÖNSÖZ

2016 senesinde, yapı mühendisliği alanında yüksek lisansa başladığım ve mühendisliğe dair bana birçok şey katan İstanbul Teknik Üniversitesi'nin değerli öğretim elemanlarına ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tezimin deney aşamasında bana yardımcı olan İstanbul Teknik Üniversitesi'nin yapı malzemesi laboratuvarı çalışanlarına teşekkür ederim.

Son olarak, tez çalışmamın başından sonuna dek bilgisi, birikimi ve tecrübesiyle her an desteğini gösteren, değerli ve saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Özkan Şengül'e saygılarımı ve şükranlarımı sunarım.

Aralık 2017

Fatih Salihpaşaoğlu
İnşaat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xviii
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Puzolanlar.....	3
1.1.1 Doğal puzolanlar.....	4
1.1.2 Yapay puzolanlar.....	4
1.1.3 Puzolanların beton özelliklerine etkileri.....	4
1.2 Granüle Yüksek Fırın Cürufu.....	4
1.2.1 Giriş.....	4
1.2.2 Tarih.....	5
1.2.3 Üretim ve kullanım alanları.....	5
1.2.4 Fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikler.....	8
1.2.4.1 Fiziksel özellikler.....	8
1.2.4.2 Kimyasal özellikler.....	8
1.2.4.3 Mineralojik bileşim.....	9
1.2.5 Cürufların hidrolik özellikleri ve hidrasyonu.....	9
1.2.5.1 Cüruf hidrasyonuna aktivatörlerin etkisi.....	11
1.2.5.2 Cüruf hidrasyonuna ısıl işlemlerin etkisi.....	11
1.2.5.3 Cüruf bağlayıcılık özelliklerine etkiyen faktörler.....	11
1.2.6 Cürufların beton özelliklerine etkisi.....	12
1.2.6.1 Taze beton özelliklerine etkisi.....	12
1.2.6.2 Cürufların sertleşmiş betonun mekanik özelliklerine etkileri.....	13
1.2.6.3 Cürufların sertleşmiş betonun dayanıklılık özelliklerine etkileri.....	16
1.2.7 Cürufun beton içerisindeki uygulamaları.....	20
1.3 Alkalın Aktivatörler.....	21
1.3.1 Giriş.....	21
1.3.2 Alkali ile aktif edilmiş çimento ve betonların tarihi gelişimi.....	21
1.3.3 Alkalın aktivatörlere genel bakış ve sistem modellemeleri.....	22
1.3.3.1 Model 1; yüksek oranda kalsiyum içeren (Na,K) ₂ O - CaO - Al ₂ O ₃ - SiO ₂ - H ₂ O sistemi.....	23
1.3.3.2 Model 2; düşük oranda kalsiyum içeren (Na,K) ₂ O - Al ₂ O ₃ - SiO ₂ - H ₂ O sistemi.....	23
1.3.4 Yüksek kalsiyum içeriğine sahip sistemlerin alkalın aktivasyonu.....	24
1.3.4.1 Başlangıç malzemelerinin bileşimi.....	24
1.3.4.2 Reaksiyon mekanizması.....	25

1.3.4.3 Reaksiyon ürünleri	26
1.3.4.4 Reaksiyona [CaO]/[SiO ₂] reaktif oranının etkisi	27
1.3.5 Alkalın aktivatörün seçilmesi	27
1.3.5.1 Sodyum hidroksit.....	28
1.3.5.2 Sodyum silikat.....	30
1.3.6 Uygulamalar, sonuçlar ve gelecek eğilimler	31
1.4 Ferrokrom Cürufu.....	32
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
2.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	35
2.1.1 Çimento	35
2.1.2 Yüksek fırın cürufu.....	35
2.1.3 Su	35
2.1.4 Alkalın aktivatörler	36
2.1.4.1 Sodyum hidroksit.....	36
2.1.4.2 Sodyum silikat.....	36
2.1.5 Agregalar	37
2.1.5.1 Kırma taş agregası.....	37
2.1.5.2 Ferrokrom cürufu agregası.....	38
2.1.5.3 Kum	39
2.1.6 Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı	39
2.2 Üretim Serileri.....	40
2.2.1 1. Seri	40
2.2.2 2. Seri	41
2.2.3 3. Seri	43
2.3 Üretim Aşaması	44
2.4 Deneyler.....	45
2.4.1 Beton taze hâldeyken yapılan deneyler.....	45
2.4.1.1 Birim ağırlık deneyi.....	45
2.4.1.2 Çökme deneyi	46
2.4.2 Sertleşmiş beton üzerinde yapılan deneyler	46
2.4.2.1 Basınç dayanım deneyi.....	47
2.4.2.2 Yarmada çekme dayanımı deneyi	47
2.4.2.3 Elastisite modülü ve gevreklik indisinin belirlenmesi için yapılan deneyler	48
3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	51
3.1 Taze Beton Deney Sonuçları.....	51
3.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	51
3.2.1 Basınç dayanım deneyi sonuçları	51
3.2.2 Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları.....	52
3.2.3 Elastisite modülü sonuçları	52
3.2.4 Gevreklik indisi sonuçları	52
3.3 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	55
3.3.1 Birim ağırlıkların değerlendirilmesi	55
3.3.2 Çökme miktarlarının değerlendirilmesi	56
3.3.3 Basınç dayanımlarının değerlendirilmesi.....	56
3.3.4 Yarma dayanımlarının değerlendirilmesi.....	57
3.3.5 Elastisite modülü sonuçlarının değerlendirilmesi.....	58
3.3.6 Gevreklik indisi sonuçlarının değerlendirilmesi.....	59
3.3.7 Gevreklik indisi - basınç dayanımı ilişkisi.....	61
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	63

4.1 Sonuçlar.....	63
4.2 neriler.....	64
KAYNAKLAR.....	65
EKLER.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	77





KISALTMALAR

ASTM : American Society for Testing Materials (Amerikan Malzeme ve Test Topluluğu)

GGBFS : Ground Granulated Blast Furnace Slag (Öğütölmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu)

GPa : Gigapascal (kN/mm^2)

MPa : Megapascal (N/mm^2)

TS : Türk Standartları



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Farklı ülkelerdeki yüksek fırın cürüflerinin kimyasal kompozisyonları	9
Çizelge 2.1 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal analizi	35
Çizelge 2.2 : Kırma taş agregalarının elek analizi	37
Çizelge 2.3 : Ferrokrom cüruf agregasının elek analizi	38
Çizelge 2.4 : Ferrokrom cüruf agregasının kimyasal analizi	38
Çizelge 2.5 : Doğal kumun elek analizi	39
Çizelge 2.6 : Kimyasal akışkanlaştırıcı katkının teknik özellikleri	39
Çizelge 2.7 : 1. Seri üretimi için kullanılan malzeme miktarları	41
Çizelge 2.8 : 2. Seri üretimi için kullanılan malzeme miktarları	43
Çizelge 2.9 : 3. Seri üretimi için kullanılan malzeme miktarları	44
Çizelge 3.1 : Birim ağırlık be çökme deneyi sonuçları	51
Çizelge 3.2 : Basınç dayanım deneyi sonuçları	51
Çizelge 3.3 : Yarmada çekme dayanım deneyi sonuçları	52
Çizelge 3.4 : Elastisite modülü sonuçları	53
Çizelge 3.5 : Gevreklik indisi sonuçları	54



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	: Granülasyon yönteminin şematik gösterimi	7
Şekil 1.2	: Peletleme yönteminin şematik gösterimi	8
Şekil 1.3	: Portland çimentosu ve yüksek fırın cürufu sistemlerindeki bileşimi gösteren üçlü diyagram	10
Şekil 1.4	: Alkali ile aktive edilmiş sistemlerin bileşenleri	22
Şekil 1.5	: Yüksek kalsiyum içeriğine sahip sistemlerin reaksiyon mekanizmasının modellemesi	26
Şekil 1.6	: Sodyum hidroksit çözeltisinin farklı konsantrasyonlardaki sıcaklıkları	29
Şekil 2.1	: 1. Seri üretiminin granülometri eğrisi	41
Şekil 2.2	: 2. Seri üretiminin granülometri eğrisi	42
Şekil 2.3	: Gevreklik indisi hesabında kullanılan gerilme/deformasyon grafiği.	49
Şekil 3.1	: Karşılaştırmalı basınç dayanım sonuçları	52
Şekil 3.2	: Karşılaştırmalı yarmada çekme dayanımı sonuçları	53
Şekil 3.3	: Karşılaştırmalı elastisite modülü grafiği	54
Şekil 3.4	: Karşılaştırmalı gevreklik indisi sonuçları	55
Şekil 3.5	: Birim ağırlıkların su/ bağlayıcı oranına göre değişimi	55
Şekil 3.6	: Çökme miktarının su/ bağlayıcı oranına göre değişimi	56
Şekil 3.7	: Basınç dayanımlarının su/ bağlayıcı oranına göre değişimi	57
Şekil 3.8	: Yarma dayanımlarının su/bağlayıcı oranına göre değişimi	58
Şekil 3.9	: Elastisite modüllerinin su/bağlayıcı oranına göre değişimi	58
Şekil 3.10	: Gevreklik indislerinin su/bağlayıcı oranına göre değişimi	60
Şekil 3.11	: Basınç dayanımına göre gevreklik indisinin değişimi	60



FERROKROM CÜRUF AGREGASININ BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

ÖZET

Endüstriyel üretimin yan ürünü olarak ortaya çıkan cüruflar, üretildikleri materyalden, üretim koşullarına kadar birçok etken sonucunda özelliklerini kazanırlar. Kazanılan son özelliklere bağlı olarak; betonda bağlayıcı malzeme yerine kullanılabilirler gibi agrega olarak da kullanılabilirler. Bu tez çalışmasında, ferrokrom cüruf agregasının betonda kullanılabilirliği ve betonun mekanik özelliklerine etkisi incelendi.

Toplamda üç seri üretim yapıldı. Her bir seride beş farklı su/bağlayıcı oranına sahip beş farklı üretim yapıldı. Tüm serilerde kullanılan su/bağlayıcı oranları sırasıyla; 0,83, 0,67, 0,45, 0,33 ve 0,28 olarak belirlendi. Tüm serilerde, su/bağlayıcı oranının yeterli işlenebilirliği vermediği durumlarda süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanıldı ve kullanım miktarı, bağlayıcı miktarının ağırlıkça %1-3 arasında değişkenlik göstermiştir.

Öncelikli olarak, kontrol grubunu oluşturacak 1. Serinin üretimleri yapıldı. Bu seride kullanılan malzemeleri kırma taş agregası, doğal kum ve bağlayıcı olarak Portland çimentosu oluşturmaktadır. 1. Seri üretimi sonrasında agregalarda değişikliğe gidildi ve 2. Serinin üretimleri yapıldı. Bu seride agrega olarak ferrokrom cüruf agregası, doğal kum ve bağlayıcı olarak Portland çimentosu kullanıldı. Son olarak 3. Serinin üretimi yapıldı. Bu seride agrega olarak ferrokrom cüruf agregası, doğal kum, bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu ve yüksek fırın cüruflarını aktif etmek için alkalin aktivatörler kullanıldı.

3. seride yüksek fırın cüruflarını aktifleştirmek için alkalin aktivatörlerden faydalandı. Kullanılan alkalin aktivatörler sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat ((SiO₂)(Na₂O)(H₂O)) olup, kullanım miktarları üretim öncesinde yapılan ön deneyler sonucu bulunmuştur. Bulunan oranlar, sodyum silikat ((SiO₂)(Na₂O)(H₂O)) için bağlayıcı miktarının ağırlıkça %17,34'u ve sodyum hidroksit (NaOH) için bağlayıcı miktarının %7,1'i olarak belirlendi.

Üretilen tüm numuneler oda sıcaklığındaki kür havuzlarında 28 gün bekletildi. 35. Günde basınç dayanım tayini ve yarmada çekme dayanımı tayini için deneyler yapıldı. Bu deneyler sonrasında elastisite modülü ve gevreklik indisi için komparatör yardımı ile numuneler üzerinde okumalar yapıldı.

Yapılan deneyler sonucunda; ferrokrom cüruf agregası ile Portland çimentosunun beraber kullanılmasıyla üretilen 2. Seriyeye ait beton numunelerinin mekanik özellikleri, kontrol grubu ile benzer özellikler göstermiş, yer yer ise daha iyi sonuçlar vermiştir. Ulaşılan en yüksek basınç dayanım değeri 80,8 MPa, yarmada çekme dayanımı 6,69 MPa, elastisite modülü ise 52,42 GPa ve gevreklik indisi değeri 2,88'dir.

Yine yapılan deneyler sonucunda; ferrokrom cüruf agregası ile yüksek fırın cürufunun beraber kullanılıp, alkaninler ile aktif edilmesi ile üretilen 3. Seriyeye ait beton numuneler kontrol grubu ile kıyaslandı. Kıyas sonucunda; 3. Seri numuneleri basınç dayanımında en iyi performansı 0,33 su/bağlayıcı oranında verdi ve 78,1 MPa değerine ulaştı. Yarmada çekme dayanım sonuçlarında ise genel olarak 3. Seri beton numuneler, kontrol grubundan daha iyi sonuçlar verdi. Ulaşılan en yüksek dayanım değeri 0,28 su/bağlayıcı oranında, 6,8 MPa olarak bulundu. Elastisite modülü kıyası yapıldığında ise 3. Seri üretimleri, kontrol grubuna göre oldukça düşük değerler verdi. Ulaşılan en büyük elastisite modülü değeri 0,33 su/bağlayıcı oranına sahip üretimlerde elde edildi ve 37,31 GPa olarak bulundu. Son olarak gevreklik indislerine bakıldığında, 3. Seri beton numunelerinin kontrol grubu ile benzer sonuçlar verildiği görüldü ve ulaşılan en yüksek değer 2,79'dur.

Bu tez çalışmasında yapılan deneyler sonucunda, ferrokrom cüruf agregasının beton üretiminde agrega olarak kullanılmasının betonun mekanik özellikleri açısından son derece uygun olduğu sonucuna varıldı.



THE EFFECT OF THE FERROCHROME SLAG AGGREGATE ON MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE

SUMMARY

Slags, which emerge as by-product of industrial production, show different properties as a result of their sources, production conditions, cooling process etc. Depending on the last properties obtained, slags can be used in concrete as either cementitious material which is in glassy form or can be used as aggregates which is in crystalline form. In this dissertation, effect and usability of ferrochrome slag aggregate on mechanical properties of concrete were investigated.

As it known, composition of materials is very important for mechanical properties of the concrete. That's why, it is a necessary to consider the interaction of materials which are used in concrete. At the experiment process of this dissertation, 3 series of production were made total. Each series includes 5 productions which vary according to their water/binder ratio. The water/binder ratio was settled as 0,83, 0,67, 0,45, 0,33, 0,28 respectively. In all series, superplasticizer (which is known as high range water reducer) was used when the workability of concrete was not enough. Amount of superplasticizer was ranged between 1-3% of the amount of cementitious material.

Initially, first series productions were made which will form the control group. The materials used in this series are crushed stone aggregate, natural sand and Portland cement as a binder. After the production of the first series, only the aggregates were changed and the second series was produced. The materials used in this series are ferrochrome slag aggregate, natural sand and Portland cement as a binder. Finally, the third series was produced. The materials used in this series are ferrochrome slag aggregate, natural sand and ground granulated blast furnace slag as a binder. At the third series, alkaline activators were utilized to activate ground granulated blast furnace slags. The used alkaline activators are sodium hydroxide ((SiO₂)(Na₂O)(H₂O)) and sodium silicate (NaOH). Amount of the used activators were determined by preliminary tests and results of the tests were found to be 17,34% of the amount of binder for sodium silicate ((SiO₂)(Na₂O)(H₂O)) and 7,1% of the amount of binder for sodium hydroxide (NaOH).

The concrete production for the three series was made using a concrete mixer which is made of stainless steel and has 50 litre capacity. The materials were mixed for about 5 minutes after poured into the concrete mixer. Superplasticizer was only used when the workability of concrete was not enough.

The concrete production for the three series was made using a concrete mixer which is made of stainless steel and has 50 litre capacity. The materials were mixed for about 5 minutes after poured into the concrete mixer. Superplasticizer was only used when the workability of concrete is not enough.

The concrete mixture obtained after the production was placed with 10 pieces of cylinder molds having dimensions of 100mm x 200mm and 4 pieces of prism molds having dimensions of 7mm x 7mm x 280mm. Before the placement of concrete, molds were cleaned and a thin layer of mold oil was applied. During the placement of the concrete into molds, a shake table was used for the exact placement of the concrete and an ideal placement was achieved. After the concrete was placed, the molds were kept in damp conditions and tried to prevent water loss which may occur during hydration. The molds are dismantled 24 hours after the concrete is placed. After that, they were numbered and placed in curing pools at room temperature.

The test process can be divided into two categories. The first is the tests which is made when the concrete is fresh and the second is the tests which is made when the concrete is hardened.

Fresh concrete tests are made after the producing of concrete. Name of the tests are unit weight test and slump test. After the producing and dismantled of concretes from molds, they were placed in curing pools at room temperature. Concrete specimens were kept in the curing pool for 28 days. After being removed from the curing pool, it was left to dry for 1 day. Then the head is made using the sand-cement mixture to distribute the load properly to be applied to the cylinder specimens. On the day 35., all hardened concrete tests were carried out on the specimens.

The first test was applied on hardened concrete is compressive strength test and it is based on TS EN 12390-3. The surfaces of the specimens were carefully cleaned before the test. Likewise, before the test, care has been taken to ensure that the loading heads of the pressure machine are also clean. The specimens were placed in the exact center of the lower loading head and at a constant loading rate, the specimens were loaded up to the maximum value they could carry. The maximum value read from the load indicator is recorded and the compressive strengths are found with the help of the necessary equations.

The second test was applied on hardened concrete is splitting tensile strength test and it is based on TS EN 12390-6 (2010). The cylinder samples were thoroughly cleaned before the test. Then, in order to distribute the load to be applied properly, a lath was placed horizontally in the center of the machine, opposite to the upper and lower parts of the cylinder specimens. The test was continued until samples were cut at a constant loading rate. The maximum value read from the load indicator is recorded and the tensile strengths on the surface are found with the help of the necessary equations.

The final test was made to determine the modulus of elasticity and the brittle index. These two value were found in the same test with different calculations. First, to measure the longitudinal shape changes of the specimens, a comparator frame with a precision of 1/1000 mm was attached to the specimens. The specimens were loaded centrally between the lower and upper loading head, while the comparator frame was installed, and loaded at constant speed. The specimens were placed centrally between the lower and upper loading head, while the comparator frame was installed, and loaded at constant speed. At every 1000 kilograms, the longitudinal shape changes corresponding to these loads are read. For each production, these readings continued to the loading values corresponding to 80-90% of the average compressive strength which was found at results of the compressive strength test. Since these values are not definite, the loads are stopped in regions where the strain rate has significantly increased, and the load is read back at the same speed. These readings continued until the load value reached zero. At the last stage, the specimens are reloaded at the same

speed and new shape change values are read up to the maximum strength value that the specimens can reach. After this point, stress-strain diagrams were drawn from the data obtained from the tests and modulus of elasticity and brittle index were calculated with using necessary equations.

The test results showed that; the mechanical properties of concrete specimens of the second series produced by the use of ferrochrome slag aggregate and Portland cement showed similar properties when it was compared to the control group and gave better results at some points. As a result of comparison; second series specimens gave the best performance in compressive strength at 0.28 water/binder ratio and reached level of 80,8 MPa, while the control group series reached level of 78,9 MPa at the same water/binder ratio. For splitting tensile strength test results, specimens of the second series gave best performance at 0.28 water/binder ratio and reached level of 6,69 MPa, while the control group series reached level of 6,45 MPa at the same water/binder ratio. When the modulus of elasticity was compared, the second series productions showed similar results with control group. The greatest modulus of elasticity was obtained at 0.28 water/binder ratio and found to be 52,42 GPa, while the control group series reached level of 49,58 GPa at the same water/binder ratio. Finally, when brittle index was compared, it was seen that the second series concrete specimens gave similar results to the control group and the highest value reached 2.88.

The test results of the third series produced by using ferrochrome slag aggregate and blast furnace slag together and activated by alkaline activators were compared with the concrete sample control group. As a result of comparison; third series specimens gave the best performance in compressive strength at 0.33 water/binder ratio and reached level of 78.1 MPa, while the control group series reached level of 69,8 MPa at the same water/binder ratio. For splitting tensile strength test results, specimens of the third series gave best performance at 0.28 water/binder ratio and reached level of 6,8 MPa, while the control group series reached level of 6,62 MPa. When the modulus of elasticity is compared, the third series productions are much lower than the control group. The greatest modulus of elasticity was obtained at 0.33 water/binder ratio and found to be 37.31 GPa. Finally, when brittle index was compared, it was seen that the third series concrete specimens gave similar results to the control group and the highest value reached 2.79.

Considering the test results obtained from second series specimens which is produced by using ferrochrome slag as a concrete aggregate and Portland cement as binder, it can be said that the use of this material as an aggregate in the production of concrete is very suitable in terms of the mechanical properties of the concrete.

The main constituents of third series were ferrochrome slag and ground granulated blast furnace slag, which are completely industrial waste materials. Moreover there was no Portland cement used in this series. Also considering the test results obtained from third series specimens, it can be said that using these materials together both will give sufficient mechanical properties and not effect environment in a negative way. From the point of sustainability, this features are very important to have.



1. GİRİŞ

Beton; temel olarak agrega, su ve bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun bir araya getirilip, karıştırılmasıyla oluşan, gerektiğinde katkıları ile desteklenerek özellikleri şekillendirilebilen en önemli kompozit yapı malzemesidir. Beton ilk karıştırılmasından sonraki üç-dört saat gibi bir süre boyunca şekil verilebilir, yani plastik haldedir. Betonun şekil verilebilir halini koruduğu bu durumdaki haline; taze beton denir. İlk üç-dört saat sonrasındaki saatlerde beton; bağlayıcı olan çimento ile su arasında gelişen hidrasyon süreci sonucunda sertleşir. Betonun şekil verilemez haldeki bu katı formuna ise sertleşmiş beton denir.

Taze ve sertleşmiş betondan beklenen belli başlı özellikler vardır. Beton taze haldeyken yeterli işlenebilirliğe, priz süresine ve en az terleme yapacak karışım kompozisyonuna sahip olmalıdır. İşlenebilir olan beton; kolayca karılıp, taşınabilir, yerleştirilebilir, sıkıştırılabilir ve yüzeyi düzeltilebilir haldedir. Beton prizini almış haldeyken ise istenilen servis ömrü boyunca, gerekli olan bakımlar da yapılması ile beraber hesaplanan dayanım ve dayanıklılığı sağlayabilmelidir.

Betonun bu kadar yaygınlaşıp kullanılmasının belli başlı sebepleri vardır. İstenilen özellikteki malzemeler bir araya getirilip, karıldıktan sonra betonun prizini alması için geçen süre içerisinde şekil verilebilir taze halini durumunu korur; böylece istenilen şekil ve boyutlardaki kalıplara yerleştirilebilmekte ve istenilen özelliklere sahip, istenilen şekil ve boyutlardaki sertleşmiş beton eleman elde edilebilmektedir. Beton prizini alıp, sertleştikten sonra diğer yapı elemanlarına oranla daha iyi performans göstermektedir. Örneğin ahşap gibi yanmaz ya da çelik gibi kolay korozyona uğramaz. Kısacası, çevrede oluşan yıpratıcı etkenlere karşı daha büyük dayanıklılık göstermektedir. Ekonomik olarak bakıldığında ise diğer yapı elemanları ile kıyaslandığında betonun bakım masrafı yok denecek kadar az düzeydedir. Ayrıca beton hacminin yaklaşık %75'ini oluşturan su ve agrega, çevreden kolayca temin edilebildikleri için, betonun üretimi hem daha kolay hem de daha ekonomiktir (Erdoğan, 2016).

Tarihsel süreç boyunca insanlar, inşa ettikleri yapılarda farklı bağlayıcılar kullanmışlardır. Bu bağlayıcılar, tarihin ilk devirlerinde killi topraklar olurken, ateşin keşfedilmesi ile beraber alçı ve kireç kullanılmaya başlanmıştır. Sonraki dönemlerde Roma’da puzolan ismi verilen potansiyel bağlayıcılar yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve günümüze kadar ulaşan Aqua Anio Vetus, Aqua Marcia, Pont du Gard, Pantheon Tapınağı gibi mimari eserler bırakmışlardır. Bağlayıcılar ile ilgili tarih boyunca çokça çalışma yapılmıştır. Ancak “Portland çimentosu” olarak adlandırılan ve diğer hidrolik bağlayıcılardan daha üstün özelliklere sahip olan bağlayıcı 1824 yılında İngiliz Joseph Aspdin tarafından icat edilmiştir (Erdoğan, 2010).

Çimentonun bağlayıcı olarak betonda kullanılmasının birçok faydası varken, çevresel ve ekonomik anlamda olumsuz etkileri de vardır. Çimento üretimi sonucu açığa çıkan CO₂ emisyonu, üzerinde durulması gereken en önemli gündemdir. Çimento sektörü, dünya çapında toplam antropojenik (insan kaynaklı) CO₂ emisyonunun yaklaşık %5-8’inden sorumludur. Eğer üretimde fosil yakıt kullanılmışsa ve herhangi iyileştirici bir yöntem uygulanmadıysa, 1 ton klinker üretimi sonucu 1 ton CO₂ emisyonu açığa çıktığı genel olarak kabul edilir (Justnes ve Hammer, 2015). Çimento endüstrisinin insan kaynaklı CO₂ emisyonu oluşumunda 3. sırada yer alması çimentonun çevresel açıdan kötü bir malzeme olduğunu göstermez. Bu derecenin esas nedeni tüm dünyada alt ve üst yapı inşaatlarında betonun çok geniş bir alanda ve büyük hacimde kullanılmasıdır. Beton aslında çevre dostu yapı malzemeleri arasında yer almaktadır (Justnes ve Hammer, 2015).

Ayrıca betonda kullanılan malzemeler yenilenebilir malzemeler değildir. Tüm bunlardan dolayı, daha sürdürülebilir ve verimli beton üretmek, inşaat sektörünü daha yenilikçi bir anlayışa itmektedir.

Betonun çevre ve ekonomiye olan olumsuz etkilerini azaltacak birçok yöntem ve yaklaşım olsa da bu olumsuz etkileri en hızlı azaltacak yöntem; hiç şüphesiz ki çimentonun bir kısmını gizli hidrolik özellikleri bulunan mineral katkıları ile değiştirmek olacaktır. İlerideki bölümlerde de anlatılacağı gibi mineral katkıları; yani puzolanlar uygun inceliğe getirilecek şekilde öğütülüp, betonda kullanıldığı takdirde betonun özelliklerini iyileştirirler.

Puzolanlar doğal ve yapay olarak iki gruba ayrılabilir. Doğal olanlar genelde volkanik kaynaklı ve hazır olarak doğada bulunan ürünler iken, yapay puzolanlar ise endüstriyel

üretim sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan ve belli işleme yöntemleri ile beton uygulamalarında kullanılabilir hale gelen malzemelerdir. Aslen atık malzemeler olmalarından dolayı bu malzemelerin değerlendirilerek betonda kullanılmaları; hem betonun özelliklerine olumlu etkiler sağlamaları dolayısıyla, hem de atıkların değerlendirilmesi noktasında önemlidir.

Bu tez çalışmasının amacı; Elazığ'daki Eti Krom A.Ş. ferrokrom fabrikalarında atık ürün olarak ortaya çıkan ferrokrom cürufunun, hem Portland çimentosu ile hem de sadece öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve alkalın aktivatörlerle beraber agrega olarak kullanılması ve bu kullanımın betonun mekanik özelliklerine etkisinin gözlenmesidir.

1.1 Puzolanlar

Puzolanlar, kendi başına bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan, fakat çok ince taneli olduklarında ve nem varlığında kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ile kimyasal reaksiyona girdiklerinde, hidrolik bağlayıcılık özelliklerine sahip bileşenlerin oluşmasını sağlayan, silisli ve alüminli malzemelerdir. Puzolanlar, silis ve alüminin yanı sıra, bir miktar da demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunabilmektedir (Erdoğan, 2016).

Puzolanların yaygın olarak kullanımı MÖ~300 yıllarının Roma dönemine rastlamaktadır (Vitruvius, 1914). Romalılar, bağlayıcı hamur üretiminde kullandıkları küllü toprağa “pulvis puteolanus” adını vermişlerdir. Bu malzeme, sonraki dönemlerde “puzzolana” olarak adlandırılmış ve zamanla “puzolan” ismiyle anılmaya başlanmıştır (Erdoğan, 2016).

Ancak yapılan diğer araştırmalar, puzolanik malzemelerin Romalılardan çok daha önce keşfedildiğini göstermektedir. Bilim adamlarının Anadolu'daki Çatalhöyük'te bulunan Neolitik Çağ'a ait evler üzerinde yaptığı çalışmalar, orada kullanılan harçların 8000 yıl eski olduğunu ortaya çıkarmıştır (Davidovits, 1987).

Puzolanları doğal puzolanlar ve yapay puzolanlar olarak iki grupta toplayabilmek mümkündür.

1.1.1 Doğal puzolanlar

Doğada doğal olarak bulunan, ince taneli durumda ve nemli ortamda kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ile birleştiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanan, silisli ve alüminli malzemeler, doğal puzolanlar olarak adlandırılmaktadır. Volkanik camlar, volkanik tüfler, traslar, diatomlu topraklar doğal puzolanlara örnek olarak verilebilir. Volkanik orijinli malzemelerin puzolanik özellik gösterebilmeleri için, çok ince taneli duruma (en az Portland çimentosunun inceliğine) getirilmek üzere öğütülmesi gerekmektedir (Erdoğan, 2016).

1.1.2 Yapay puzolanlar

Bu puzolan türleri, endüstriyel üretimlerin yan ürünleridir. Doğal puzolanlar gibi yapılarında silis ve alümin bulundururlar. Endüstriyel üretimlerin yan ürünü olmalarından ötürü, normalde atık olabilecek bu malzemelerin beton üretiminde kullanılması çevreye de katkı sağlayacaktır.

1.1.3 Puzolanların beton özelliklerine etkileri

Puzolanlar, ince olarak öğütülmüş halde betona katılırken, bağlayıcı malzeme olan çimento ile kütlece yer değiştirilerek katılır. Puzolanların kullanıldığı oran, genellikle karışımda yer alan çimentonun %10-50'si kadardır. Puzolanlar, katıldıkları betonun bir veya birden çok özelliğini olumlu ve olumsuz yönde etkileyebilir. Potansiyel olumlu özellikler; taze betonun işlenebilirliğini artırmak, terlemeyi ve segregasyonu azaltmak, alkali-silika reaksiyonu nedeniyle oluşacak genleşmeyi azaltmak, nihai dayanımı artırmak, sülfat ataklarına karşı dayanıklılığı artırmak ve daha ekonomik bir beton elde etmek. Potansiyel zararlı etkileri ise; özellikle soğuk havada taze betonun prizini geciktirmeleri, betonun ilk günlerindeki dayanım kazanma hızını azaltmaları olarak yazılabilir.

1.2 Granüle Yüksek Fırın Cürufu

1.2.1 Giriş

Cüruflar, metalürji endüstrinin yan ürünleri olarak ortaya çıkarlar. Yüksek fırın cürufu, demir üretimi sırasında ortaya çıkan, silikatlardan ve kalsiyum alümina silikatlardan oluşan bir yan üründür. Form olarak camsı dokuda olanlar bağlayıcı özellik gösterirken, kristal dokuda olanlar agrega özelliği gösterirler. Cürufların karakteristik

özellikleri, elde edildikleri sanayi kuruluşlarının ürettikleri ana ürün tipine ve bu ürünlerin üretim tekniklerine göre değişir. Örneğin bakır ve nikel cürufları puzolanik özellik gösterir ve kireç ile reaksiyona girer. Çelik cürufları genellikle kristal formda üretilir ve yol yapımında ana materyal olarak ya da özel beton üretiminde agrega olarak kullanılabilirler. Cürufların diğer kullanım alanları ise hafif beton üretiminde hafif agregalar olarak kullanılması ve yapı endüstrisinde termal izolasyon için cüruf yünü olarak kullanılması gösterilebilir (Ramezianpour, 2014).

1.2.2 Tarih

Bağlayıcı bir malzeme olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın (GGBF) cürufunun kullanımı, Antoine-Joseph Lorient'un, sönmüş kireçle birlikte GGB cüruf kullanan bir harç yapmasıyla beraber 1774 yılına kadar uzanmaktadır (Mather, 1957). 1862'de Emil Langen, öğütülmüş granüle yüksek fırın (GGBF) cürufunun bilinmeyen hidrolik özelliklerini keşfetmiştir. Fransa'da, cüruf lu çimentolar 1889'un başlarında Paris yer altı metro sistemini kurmak için kullanılmıştır (Virgalitte ve diğ., 1995).

Yüksek fırın cürufunun Portland çimentosu ile beraber ilk üretimi Almanya'da 1892'de, Amerika Birleşik Devletleri'nde ise 1896'da gerçekleşmiştir. 1950'lere kadar, granüle yüksek fırın cürufu çimento üretiminde ya da bağlayıcı bir malzeme olarak iki temel yolla kullanılmıştır: Portland çimentosunun hammaddesi olarak ve Portland çimentosu, hidratlı kireç, alçı veya anhidrit ile kombine çimentolu bir materyal olarak (Lewis, 1982).

1950'lerin sonlarından beri, Portland çimentosuna katkı olarak eklenen granüle yüksek fırın (GGBF) cürufunun kullanımı, Güney Afrika, Avustralya, İngiltere, Japonya, Kanada ve Amerika'da kabul görmüştür (Virgalitte ve diğ., 1995).

1.2.3 Üretim ve kullanım alanları

Pik demir üretmek için yüksek fırınlarda hematit (Fe_2O_3), magnetit (Fe_3O_4) gibi demir oksit cevherleri ve yakıt olarak kok kömürü kullanılır. Demir üretimi için demir oksit cevherlerinin yüksek fırınlarda, çok yüksek sıcaklıklara (yaklaşık $1600^{\circ}C$) kadar ısıtılmaları ve bununla beraber oksijen ve diğer yabancı maddelerden arındırılmaları gerekmektedir. Yüksek sıcaklığın etkisiyle, kok kömürünün karbonu ile demir oksitteki oksijen birleşerek, karbon monoksit ve karbon dioksit gazları olarak fırını terk ederken, geriye eriyik durumdaki demir ve CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , MnO , S gibi

yabancı maddeler kalır. Demirin yoğunluğu, diğer yabancı maddeler topluluğundan daha yüksek olduğu için, eriyik durumdaki demir, fırının en alt bölümünde ve eriyik durumdaki diğer malzemeler ise, demirin hemen üzerinde yer almaktadır. Demir ve diğer malzemeler topluluğu ayrı ayrı çıkışlardan dışarı çıkartılmaktadır. Elde edilen yabancı maddeler topluluğu “yüksek fırın cürufu” olarak adlandırılır (Erdoğan, 2016).

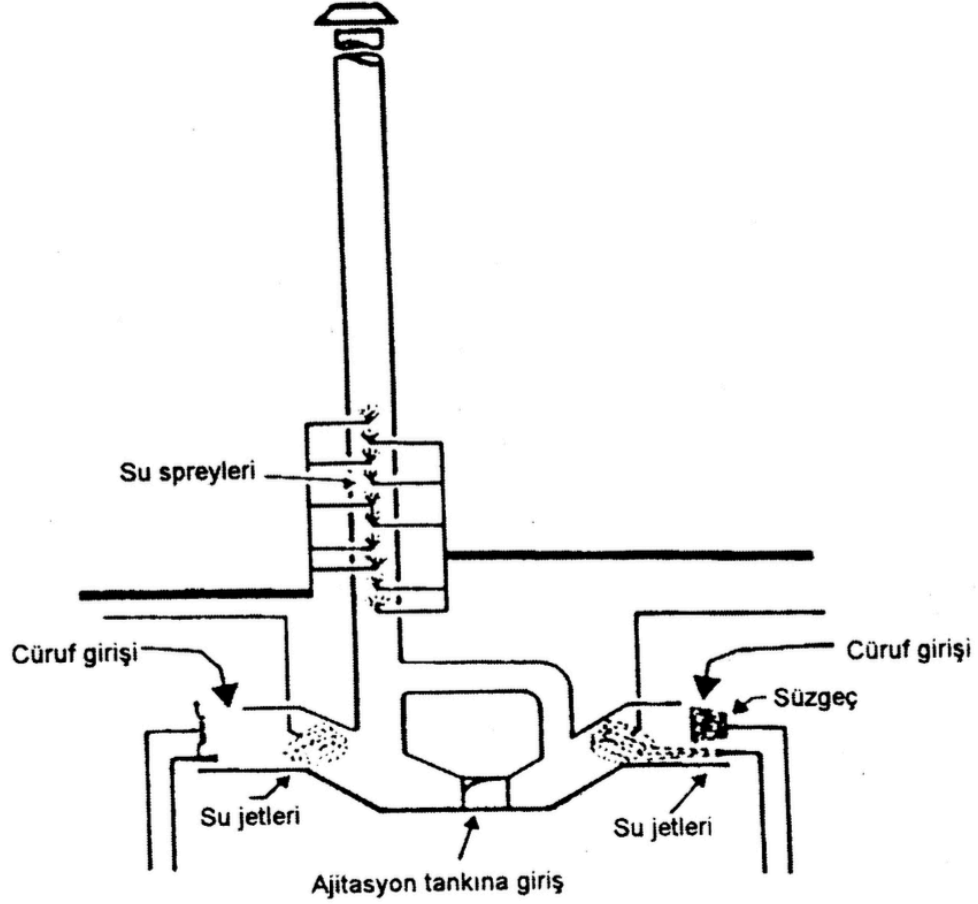
Uygulanacak soğutma işlemlerine göre farklı türlerde yüksek fırın cürufu elde etmek mümkündür. Eğer ki 1400-1600 °C sıcaklığa sahip erimiş cüruf, atmosfer ortamında yavaşça soğutulursa kararlı, katı ve kristal bir materyal elde edilir. Elde edilen bu materyalin puzolanik özelliği çok azdır veya hiç yoktur ve betonda agrega olarak veya yol yapımında temel materyal olarak kullanılır.

Soğutma işlemi kontrollü bir şekilde; su, buhar ve basınçlı kullanılması ile gerçekleştirilirse, oluşacak yüksek fırın cürufu düşük yoğunluğa sahip, gözenekli yapıda ve iri kristal taneli olacaktır. Genleştirilmiş, yüksek fırın cürufu olarak da isimlendirilen bu malzemenin özgül ağırlığı 1100-2200 kg/m³'tür. Bu değer, normal agregalara nazaran oldukça düşüktür (Bilgen ve diğ., 2010). Bu tür genleştirilmiş yüksek fırın cürufları düşük yoğunluğa sahip olmalarından ötürü hafif beton üretiminde kullanılırlar.

Eriyik yüksek fırın cüruflarının soğutulma işlemi hızlı gerçekleşirse, cüruflar amorf ve camsı dokuya sahip, granüle bir form oluştururlar. Camsı dokuya sahip bu cüruflar, kristal yapıdaki cüruflardan daha yüksek enerjiye sahiptirler. Amorf yapıya sahip olan ve büyük miktarda SiO₂ ve Al₂O₃ içeren granüle yüksek fırın cürufu, öğütülerek çok ince taneli duruma getirildiği takdirde, doğal puzolanların ve uçucu küllerine özelliklerine benzer özellikler göstermektedir. Ayrıca, büyük miktarlarda CaO içermesi nedeniyle, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kendiliğinden de bir miktar bağlayıcı özelliği bulunmaktadır (Erdoğan, 2016).

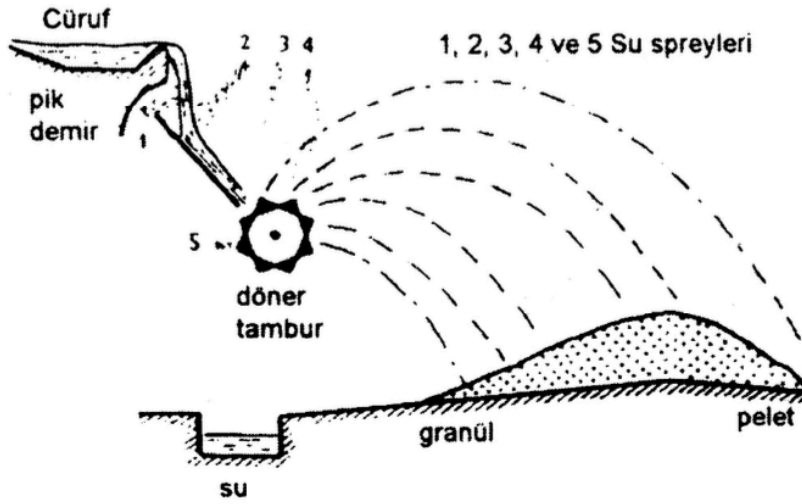
Bağlayıcı malzeme olarak kullanılacak yüksek fırın cüruflarının, eriyik hâlden amorf ve kararsız hale getirilmesi için iki farklı soğutma yöntemi uygulanmaktadır. Bunlardan birincisi granülasyon yöntemidir (Şekil 1.1). Basitçe erimiş cürufun suya daldırılması granülasyon yöntemi olarak geçmişte sıklıkla kullanılmıştır. Daha verimli modern granülasyon sistemleri, kütlece yaklaşık 10 ila 1 su/cüruf oranına sahip miktarda suyu, erimiş cüruf akıntısı üzerine çarpan yüksek basınçlı su jetleri kullanmaktadır (Virgalitte ve diğ., 1995). Yüksek fırın cürufu, hemen hemen ani

olarak suyun kaynama noktasının altındaki bir sıcaklığa kadar soğutulur ve oldukça camsı materyallerin parçalarını üretir.



Şekil 1.1: Granülasyon yönteminin şematik gösterimi (Tokyay ve Erdoğan, 2009)

Diğer yöntem ise hava granülasyonu olarak da adlandırılan peletleme yöntemidir (Şekil 1.2). Bu işlemde erimiş cüruf, su spreyleri tarafından genişip, soğutulduğu titreşimli bir besleme plakasının üzerinden geçer. Ardından dönen, kanatlı bir tambura geçer ve havaya atarak hızla küresel pelet haline getirilir. Bu yöntemde kullanılan su miktarı 1 ton cüruf için yaklaşık 1 m^3 'tür. İşlem sonucunda cüruf içinde kalan su miktarı ise %10'un altındadır (Tokyay ve Erdoğan, 2009). Elde edilen ürün değişiklik gösterir. Büyük boyutlu olanlar gözenekli ve kısmen kristal bir yapıya sahiptir. Hafif beton agregası olarak kullanılabilirler. Küçük boyutlu olanlar ise yüksek cam içeriğine sahiptirler ve bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilirler.



Şekil 1.2: Peletleme yönteminin şematik gösterimi (Tokyay ve Erdoğan, 2009)

1.2.4 Fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikler

1.2.4.1 Fiziksel özellikler

Öğütülmüş granüle yüksek fırın çürüflerinin inceliği, harç ve betonların dayanımını etkileyen önemli bir faktördür. Çürüfler ekonomik koşullara ve gerekli olan aktivasyon enerjisine göre istenilen partikül ebadına veya yüzey alanına öğütülebilir. Çüruf partiküllerinin $10 \mu\text{m}$ 'den az olduğu durumların 28 güne kadar olan erken basınç dayanımının gelişimine katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir. Partiküllerin $10-45 \mu\text{m}$ olduğu aralıkta ise 28 günden sonra hidratasyon devam eder ve ileriki yaş dayanımına katkıda bulunur. $45 \mu\text{m}$ 'den daha büyük partiküller neredeyse hiç aktivite göstermez. Bu yüzden çoğu şartnamede $45 \mu\text{m}$ 'den büyük partiküllerin kullanımı kısıtlanmıştır. Betonda tatmin edici bir dayanım gelişimi elde etmek için öğütülmüş granüle yüksek fırın çürüflerinin Blaine yüzey alanı $4000-6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ aralığında olmalıdır (Ramezianpour, 2014).

1.2.4.2 Kimyasal özellikler

Demir cevheri kaynaklarına, kalker-flux bileşimine ve kok kömürü bileşimine bağlı olarak, çürüflerin kimyasal bileşimi geniş ölçüde değişir. 4 ana bileşen; kireç, silis, alümina ve magnezyumdur. İkincil bileşenler ve oksitler ise sülfür, demir ve mangan oksitleri ile titanyum, sodyum ve potasyum oksitleri şeklindeki kükürttür. Çizelge 1.1

değişik ülkelerdeki yüksek fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonlarını göstermektedir (Erdoğan 2016).

Çizelge 1.1: Farklı ülkelerdeki yüksek fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonları (Erdoğan 2016).

	ABD ve Kanada	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye
CaO	29 – 50	30 - 40	39 - 44	34 – 41
SiO ₂	30 – 40	30 - 36	33 - 37	34 – 36
Al ₂ O ₃	7 – 18	9 - 16	15 - 18	13 – 19
Fe ₂ O ₃	0,1 - 1,5	-	0 - 0,7	0,3 - 2,5
MgO	0 – 19	8 - 21	1 - 3	3,5 – 7
MnO	0,2 - 1,5	-	0,3 - 1,5	1,0 - 2,5
S	0 - 2,0	1,0 - 1,6	0,6 - 0,8	1 – 2

1.2.4.3 Mineralojik bileşim

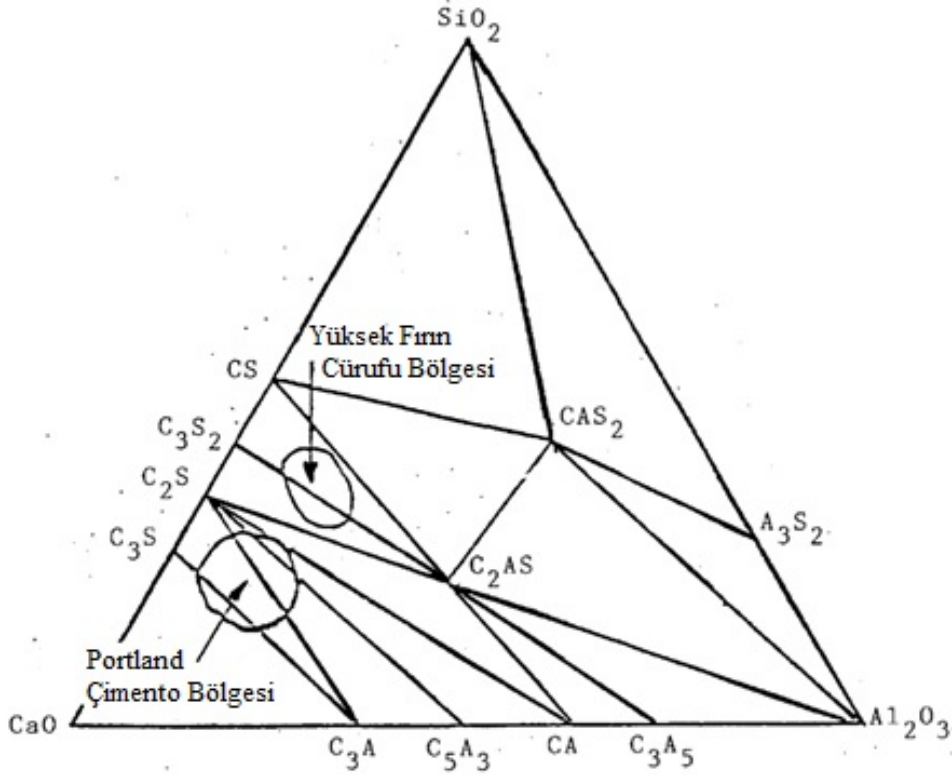
Yavaş soğutma sisteminde kalsiyum, alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşan kararlı, katı bir madde elde edilir.

1.2.5 Cürufların hidrolik özellikleri ve hidrasyonu

Cürufların hidrolik özellikleri, üretildikleri sisteme ve kimyasal bileşimlerine bağlıdır. Yavaş soğutulan cüruf, bağlayıcı ya da hidrolik özelliklere neredeyse hiç sahip değildir. Granüllü cüruflar da neredeyse hiç bağlayıcı özellik göstermezler. Ancak bazı aktivatörler ile bağlayıcı özellik gösterirler. Aktifleştiriciler; kireç, Portland çimentosu ya da sodyum karbonat, sülfatlar, kalsiyum ve magnezyum gibi alkalilerdir.

Araştırmacılar arasında Portland çimentosu ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu karışımının su ile karıştırıldığında oluşacak ana hidrasyon ürününün, Portland çimentosu hidratları sırasında oluşan ana ürünle aynı olduğu (kalsiyum silikat hidrat gibi) konusunda genel bir mutabakat vardır (Virgalitte ve diğ., 1995). Kireç ya da Portland çimentosu varlığında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufun hidrasyonu, cürufların bağlayıcı madde olarak su ile reaksiyona girmesinden dolayı diğer puzolanlardan farklıdır. Cüruf hidrasyonu çimento hidrasyonundan serbest kalmış kireçten etkilenmektedir (Ramezani pour, 2014).

Şekil 1.3'teki üçlü diyagramda görüldüğü gibi Portland çimentosu esas olarak trikalsiyum silikat (C_3S) alanında bulunurken, içeriğinde C_3S , C_2S , C_3A fazlarını içermektedir (Virgalitte ve diğ., 1995).



Şekil 1.3: Portland çimentosu ve yüksek fırın cürufu sistemlerindeki bileşimi gösteren üçlü diyagram.

Yüksek fırın cürufu ise esas olarak diyagramın dikalsiyum silikat (C_2S) alanında bulunur. Ana bileşenler olarak bu Portland çimentosu fazlarını içermez, yapısında sadece bir miktar C_2S bulundurur. Yine de genel anlamda Portland çimentosu ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufları aynı genel alanda yer almaktadır.

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufları ile su karıştırıldığında, başlangıçtaki hidrasyon, Portland çimentosunun hidrasyonuna kıyasla çok daha yavaştır. Bundan ötürü, reaksiyon oranını arttırmak için öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufları ile birlikte Portland çimentosu, alkali tuzları veya kireç kullanılır. Portland çimentosunun varlığında öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının hidrasyonu, Portland çimentosunun hidrasyonunda serbest bırakılan hidroksil iyonları ile camsı cüruf yapısının dağılmasına ve çözünmesine büyük ölçüde bağlıdır (Virgalitte ve diğ., 1995).

Regourd (1980), Vanden Bosch (1980) ve Roy ve Idorn (1982) tarafından yapılan araştırmalar, betonda katkı maddesi olarak kullanılan öğütölmüş granüle yüksek fırın cüruflarının hidrasyonunun iki aşamada meydana geldiğini öne sürmektedir. İlk olarak cüruf ile çimentodaki alkalilerden kaynaklanan alkali hidroksit arasında reaksiyonlar oluşmaktadır. İkinci aşamada ise, öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufu, çimento hidrasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ile reaksiyona girerek çok kuvvetli hidrolik bağlayıcı özellik gösteren kalsiyum silikat hidrat (CSH) ürünler ortaya çıkmaktadır (Virgalitte ve diğ., 1995).

1.2.5.1 Cüruf hidrasyonuna aktivatörlerin etkisi

Cüruflar, aktivatör kullanıldığı zamanlarda daha yüksek aktivite gösterirler. Cürufu Portland çimentosunun en yaygın aktivatörleri jips ve portlandittir. Sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum silikat kalsiyum sülfat alkali aktivatörler olarak sınıflandırılırken; kalsiyum sülfat ve fosfogips sülfat aktivatörler olarak sınıflandırılır.

Erimiş cürufun sıcaklığı ve cam içeriği de ayrıca hidrolik aktiviteyi etkiler. Bununla beraber, kristalin içeriği cürufların hidrolik özelliğini azaltırken, bazıları dayanım özelliklerine katkıda bulunur (Ramezianpour, 2014).

1.2.5.2 Cüruf hidrasyonuna ısı işlemlerin etkisi

Isıl işlemler cüruf hidrasyonuna hız kazandırabilir. Bu, temel olarak ısı işlemlerin, cürufların hidrasyonu için gereken aktivasyon enerjisini desteklemesinden ötürü meydana gelmektedir ancak bu durum bütün cüruflar için geçerli değildir. Alümin açısından zengin cüruflar, hızlı bir şekilde hidrasyonlu alüminat kristalleri oluşturdukları için uzun süreli ısı işleme ihtiyaçları yoktur (Roy ve Idorn, 1982).

1.2.5.3 Cüruf bağlayıcılık özelliklerine etkileyen faktörler

Öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufunun bağlayıcılık özelliğini etkileyen başlıca faktörler; cürufun kimyasal kompozisyonu, reaksiyon sistemindeki alkali konsantrasyonu, cüruf yapısının ne kadar amorf olduğu, cürufun inceliği ve erken safhadaki hidrasyon sıcaklığı olarak sıralanabilir (Virgalitte ve diğ., 1995).

Bu faktörlerin birbiriyle olan ilişkisi komplekstir. Bu nedenle, öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufu hidrasyonunu basitleştirilmiş kimyasal modül ile ilişkilendirmeye yönelik daha önceki uygulamaların, uygun değerlendirme kriterlerini

sağlamada yeterli olmadığını görmek şaşırtıcı değildir (Mather 1957, Hooton and Emery 1980). Bununla beraber, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun betonda kullanılmaya uygunluğunu araştırmanın en iyi yolu, istenilen dayanım ve dayanıklılık kriterlerine uygun deneylerle bulunmaktadır (Erdoğan 2016).

1.2.6 Cürufların beton özelliklerine etkisi

1.2.6.1 Taze beton özelliklerin etkisi

İşlenebilirlik

Granüle yüksek fırın cürufu betonun işlenebilirliğini artırır. Bu, düzgün yoğun kayma düzlemlerine sahip cüruf parçacıklarının yüzey özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Portland çimentosunun aksine, cüruf çimentosu partikülleri, ilk karıştırma sırasında az su emer. Yapılan bir başka araştırma, cüruf çimentoların daha fazla işlenebilir olmasını, çimento hamur içeriğinin artması ve yapıştırıcının artan bağlanabilme özelliğine dayandırmaktadır (Virgalitte ve diğ., 1995).

Aynı su çimento oranındaki beton karışımları üzerine yapılan araştırmalar, normal Portland çimento betonlarına kıyasla cüruf çimento içeren betonların daha yüksek çökme oranına sahip olduğunu göstermiştir (Meusel ve Rose 1983).

Cüruf yüzdesi arttıkça, cürufsuz kontrol betonuyla aynı işlenebilirlik özelliklerini korumak için su bağlayıcı oranı düşürülmelidir. Bu gözlemin, yüksek yer değiştirme seviyesine sahip saha koşulları altında doğrulanması gerekir (Osborne 1989).

Çökme ve hava kaybı, cürufsuz normal Portland çimento betonunki ile karşılaştırılabilir. Kütlece %50 cüruf çimento içeren beton, cüruf olmayan beton ile benzer çökme kaybı göstermiştir [20]. Yüksek hacimde cüruf içeren çimentolu betonlarda aynı miktardaki hava içeriğini muhafaza etmek için, daha yüksek dozajda bir karışım gereklidir. Buna esasen cürufun inceliği neden olmaktadır (Ramezianpour, 2014).

Terleme ve ayrışma

Beton terlemesinde, daha çok bağlayıcı malzemelerin boyut dağılımı, şekli ve yüzey dokusunun etkili olduğu bilinmektedir. Buna ek olarak, bağlayıcı malzemelerin reaktivitesi beton karışımlarının terleme potansiyelini etkiler.

Düşük sıcaklıklarda priz süresinin uzaması, terleme kapasitesinin artması ya da azalmasında rol oynayabilir. İri taneli parçacıkları olan yavaş reaksiyon cürufları, beton terlemesini artırabilirken; beton karışımına Portland çimentosundan daha ince cürufların eklenmesi, terlemenin azalmasını sağlayabilir.

Eldeki verilerin çoğunda, aynı 28 günlük basınç mukavemetine sahip cüruf içeren beton ile normal Portland çimentosu betonu karşılaştırıldığında; normal Portland çimentosu betonu, cüruf içeren betonlara göre daha yüksek terleme göstermiştir.

Cüruf içeren betonun ayrışmasına ilişkin araştırma raporlarında, nadir de olsa, bu tür betonların cürufsuz çimentolu betona kıyasla önemli bir fark göstermediği ifade edilmiştir (Ramezani pour, 2014).

Priz süresi

Cürufla çimentonun kısmen değiştirilmesi, genellikle betonun priz süresini arttırır. Ortam sıcaklığına ve değiştirme miktarına bağlı olarak son priz süresi önemli ölçüde değişebilir. Daha düşük sıcaklıklar priz süresini uzatır. Çimento ile kütlece %35-40 yer değiştirmiş cüruflu çimentolar üzerine yapılan bir araştırma, yaklaşık 21° C'de priz süresinin 1 saat arttığını göstermiştir. Cüruf değiştirme seviyesinin arttırılmasıyla priz süresi de artmıştır (Luther ve diğ., 1994).

Bir karışımdaki Portland çimentosu miktarı genellikle priz özelliklerini belirlediğinden, soğuk havalarda granüle yüksek fırın cürufu oranlarının değiştirilmesi düşünülmelidir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise çoğu zaman priz süresinin daha düşük olması istenir. Ancak bu durumda da plastik rötre çatlaklarını en aza indirmek için dikkatli olunması gerekebilir (Virgalitte ve diğ., 1995).

1.2.6.2 Cürufların sertleşmiş betonun mekanik özelliklerine etkileri

Dayanım özellikleri

Cürufun suyla olan yavaş reaksiyonu, çeşitli cüruf miktarlarını içeren betonun erken yaşlarında daha düşük dayanım artışı ile sonuçlanır. Kimyasal bileşim ya da incelik, aktivite endeksi, karışım tasarımı ve ıslak kurlenme gibi fiziksel özellikler cüruflu çimento betonlarının dayanımını etkiler. Genel olarak, tüm yüksek fırın cüruf içeren betonlarda, mukavemet gelişimi erken yaşlarda düz çimento betonuna göre daha yavaş, 7 ila 28 gün arasında mukavemet düz çimento betonuna yaklaşır ve daha sonraki zamanlarda mukavemet normal düz çimento betonundan daha yüksek

seviyelere ulaşır. Bu durum her zaman doğru olmayabilir. Daha düşük su bağlayıcı oranında, cürufli çimento beton, 1 yıl sonra bile kontrol betonuna göre daha düşük bir mukavemet kazandıracaktır (Ramezianpour, 2014).

Kütlece %60 oranına kadar cüruf içeren beton karışımlarında, erken dayanım, klinker fraksiyonunun inceliğine dayandırılırken, ileri yaş dayanımı esas olarak cüruf fraksiyonunun inceliğinden kaynaklanmaktadır. Yüksek cüruf içeriğine sahip çimentolarda cürufun inceliği her yaşta büyük önem taşırken, bu etki düşük cüruf içeren çimentoda önemli değildir.

Normal Portland çimento betonlarında olduğu gibi cürufli çimento betonlarının mukavemeti, kürlenme sıcaklığı ve bağıl nemden etkilenir. Cürufun klinkerden daha düşük aktivasyonu nedeniyle, kürlenme sıcaklığındaki bir artış cürufli çimento betonlarının mukavemet gelişimini daha elverişli hale getirecektir. Yavaş reaksiyon gösteren cürufu içeren betonların mukavemet gelişiminde bağıl nemin etkisi çok önemlidir.

Elastisite modülü

Cüruf içeren betonların elastisite modülü, basınç dayanımının zamana bağlı değişimine benzer şekilde değişir. Ancak cüruf içeren betonlar ile aynı dayanıma sahip cüruf içermeyen betonlar arasında önemli bir fark bulunmamaktadır. Düşük basınç dayanım değerlerinde (yaklaşık 30 MPa'nın altında) cüruf içeren betonların, kontrol betonuna göre daha düşük elastisite modülüne sahiptirler (Ramezianpour, 2014).

Cürufli çimento betonlarının elastisite modülü üzerine yapılan araştırmalar cürufun kaynağının elastisite modülü üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir (Brooks ve diğ., 1992). Normal sıcaklıklar altında, cürufli çimento betonları, cüruf içermeyen betonlara göre modülü daha yavaş geliştirirler.

Rötre

Cürufli çimento betonlarının kuruma rötresi ile ilgili sonuçlar farklılıklar gösterir. Bunun nedenleri; cüruf ve çimento özelliklerinin, kür koşullarının ve incelemelerde kullanılan test yöntemlerinin değişiklik göstermesidir. Bazı araştırmacılar, cüruf ile çimentonun değiştirilmesinin betonların kuruma büzülmesinde çok az veya hiç etkisi olmadığını belirtmektedir.

Başka bir araştırmada ise cürüflu çimento harmanlarını içeren betonlarda, cürüfsüz çimento betonları ile karşılaştırıldığında daha büyük bir büzülme gözlemlenmiştir (Virgalitte ve diğ., 1995).

Bir araştırmada, %50 cüruf içeren betonlar için %60 bağıl nem ve 20°C'de 28 günlük su depolamasından sonra kuruma büzülmesi, cüruf olmayan betonunkinden %10 daha düşük çıkmıştır (Virgalitte ve diğ., 1995). Farklı kaynaklardan alınan ve toplam çimentolu materyalinin kütlece %30 ila %70'i arasında değişen miktarda cüruf içeren betonların zamana bağlı özelliklerine ilişkin bir çalışmada da benzer bir büzülme bildirilmiştir (Brooks ve diğ., 1992).

Sünme

Cüruf içeren betonların sünmesi için de sonuçlar farklılık gösterir. Bu farklılıklar cüruf ve çimentonun özelliklerine, test yöntemine, stres-mukavemet oranına, uygulanan yükün yaşına, kürlenmeye ve çevre koşullarına bağlıdır. Çoğu araştırmacı arasında, cüruf içeren betonların; nem kaybının olmadığı koşullarda test edildiği takdirde, özdeş düz betonlardan daha düşük sünme göstereceği konusunda genel bir mutabakat vardır (Ramezianpour, 2014).

Farklı kaynaklardan alınan ve toplam çimentolu materyalinin kütlece %30 ila %70'i arasında değişen miktarda cüruf içeren betonların zamana bağlı özelliklerine ilişkin bir çalışmada, cüruf içeren betonların daha az sünme gösterdiği bildirilmiştir (Brooks ve diğ., 1992).

Tüm bunlarla beraber, cüruf betonlarının, erken yaşlarda aynı strese maruz bırakılan eşdeğer bir Portland çimento betonundan daha yüksek sünme sergilediğini belirtmek gerekir. Bu, cürüflu çimento betonlarının erken yaşlarda daha düşük mukavemet kazanımıyla ilgilidir ve bu nedenle daha yüksek stres-mukavemet oranına maruz kalırlar.

Renk

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, çoğu Portland çimentosuna kıyasla renk bakımından oldukça açıktır ve betonun sertleşmesinden sonra daha açık bir renk üretecektir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun beyaz Portland çimentoları ile kütlece %30'a kadar yer değiştirdiği bazı işlemlerde, sertleştirilmiş üründe belirgin bir renk değişikliği gözlemlenmemiştir (Virgalitte ve diğ., 1995).

Ancak dökümden hemen sonraki günler ele alındığında, dökümden sonraki ikinci ila dördüncü günlerde, mavi-yeşil bir renk oluşur ve oksidasyon gerçekleştikçe yaşla birlikte azalır. Bu renk değişime, çimento içindeki diğer bileşikler ile öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içindeki sülfid kükürtünün karmaşık bir reaksiyonuna atfedilir. Renklenmenin derecesi ve kapsamı, oksidasyon oranına, kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun yüzdesine, sertleştirme koşullarına ve beton yüzeylerin gözenekliliğine bağlıdır.

Kütle betonundaki sıcaklık artışına etkileri

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufları geçmişte yaygın olarak Portland yüksek fırın cürufu çimentolarında ve kütle betonundaki sıcaklık artışını azaltmak için ayrı bir bağlayıcı olarak kullanılmıştır (Virgalitte ve diğ., 1995).

Çözelti ısısı metodu (ASTM C 186) kullanılarak yapılan testlerde, öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının eklendiği veya eklenmediği katkısız karışımlar test edilmiştir. Bu test sonuçlarına göre granüle yüksek fırın cüruflarının eklendiği karışımların daha fazla kümülatif ısı ürettiği durumlar vardır (Hogan ve Meusel, 1981). Fakat şunu da belirtmek gerekir; çözelti ısısı metodu çimentonun toplam ısı salınım potansiyeline işaret etse de kütle beton uygulamalarında da önemli olan ısı artış hızını göstermez. Her durumda, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun dahil edilmesi, erken ısı oluşum hızını azaltmıştır ve bu azalma kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu oranıyla doğru orantılıdır.

Hidratasyon ısısı, kullanılan Portland çimentosuna ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun aktivitesine bağlıdır. Eşit miktarda çimento yerine öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanıldığında, hidratasyonun ısısında azalma beklenebilir (Virgalitte ve diğ., 1995).

1.2.6.3 Cürufların sertleşmiş betonun dayanıklılık özelliklerine etkileri

Dayanıklılık

Kötü koşullara sahip ortamlarda cürufu çimento içeren betonların dayanıklılığı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Cürufu çimentoların gözenek iyileştirme etkisi nedeniyle, cürufu çimento betonlarının çoğunda daha düşük gözeneklilik ve geçirgenlik gözlemlenmiştir. Cürufu çimento betonlarının düşük geçirgenliği, suyun

sızmasıyla oluşan bozunmanın fiziksel ve kimyasal süreçlerini kontrol eder ve daha düşük bozulmayla beraber yüksek dayanıklılık sağlar.

Mikroyapı, porozite ve permeabilite

Cüruf içeren betonun mikro yapısı, porozitesi ve porozite büyüklüğü dağılımı, Portland çimento betonlarından biraz farklıdır. Reaksiyonun erken yaşlarında cürufllu çimentonun porozitesi Portland çimentosuna benzerdir (Virgalitte ve diğ., 1995).

Cüruf reaksiyonundan sonraki daha ileri yaşlarda, nano skala aralığındaki çok küçük gözeneklerin hacmi büyür. Cürufllu çimento hamurunun gözenekliliği ve bu gözeneklerin dağılımının, MIP (Mercury Intrusion Porosimetry) yöntemiyle incelenmesi; çimentolardaki gözenek yapısının, nispeten büyük ama kesintili ve ince çeperli gözeneklerle karakterize edildiğini göstermektedir (Feldman, 1986).

Granüllenmiş cürufların çimento macununa dahil edilmesinin, macunun içindeki büyük gözenekleri daha küçük gözeneklere dönüştürdüğü de bildirilmiştir. Bu gözenek iyileştirme mekanizmasının; öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının, Portland çimentosunun hidratasyonu sırasında çıkan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ve alkaliler ile reaksiyona girmesi sonucu değiştiği görülmüştür (Roy and Idorn 1982). Portland çimento macunlarında sürekli kılcal gözenekler, kalsiyum hidroksit ve kalsiyum silikat hidratın arayüzünde eksiklikten kaynaklanmaktadır.

Çimento hamurunun normal olarak kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) içeren gözenekleri, kısmen cürufllu çimentonun hidratasyonundan kaynaklanan kalsiyum silikat hidratlarla doldurulur. Böylece toplam gözeneklilik ve gözenek boyutu dağılımı değişir (Roy ve Idorn, 1982). Bu da ara yüzün yetersizliğini olumlu yönde etkiler.

Cürufların bu gözenek inceltme etkisi, cüruf çimentosu betonlarının gözenekliliğinde azalma, özellikle iyi kürlenmiş betonlarda daha düşük geçirgenlik ile sonuçlanacaktır (Mehta, 1983). Bundan ötürü bazı araştırmacılar, normal Portland çimento betonlarına kıyasla cüruf içeren betonların geçirgenliğinin daha düşük olduğunu belirtmişlerdir (Hooton ve Emery, 1990). Beton geçirgenliği esas olarak sırasıyla; gözeneklilik ve gözenek büyüklüğü dağılımına bağlıdır (Mehta, 1980).

Karbonatlaşma

Cürufllu çimento betonun karbonatlaşma hızı, özellikle cüruf ile çimentonun kütlece yer değiştirmelerinin yüksek olduğu durumlarda, Portland çimento betonlarına göre

daha yüksektir (Virgalitte ve diğ., 1995). %50 cüruf içeren bir betonda, karbonatlaşma Portland çimento betonuna kıyasla 1,5 kat daha derinken, %70 cüruf içeren karbonatlaşma Portland çimento betonundan iki kat daha derindir. Betonun kürlenmesi, cürufllu çimento betonlarında karbonatlaşma derinliğini azaltmada çok önemlidir.

Yapılan bir araştırmada, 20 yıl karbonatlaşmaya maruz kalan, aynı yaştaki sıradan Portland çimento betonuna kıyasla, %65 cüruf içeren betonlarda karbonatlaşma derinliği daha yüksek çıkmıştır (Lirvan ve Mayer, 1986). Başlangıçta betonda bulunan küçük gözeneklerin daha büyük hale gelmesinden ötürü karbonatlaşmanın yüksek fırın cürufu betonunun geçirgenliğini arttırdığı sonucuna çıkarılabilir. Daha büyük gözeneklerdeki artış permeabilitede bir artışa sebep olacak ve dolayısıyla daha yüksek karbonatlaşma derinliği ile sonuçlanacaktır. Normal Portland çimento betonlarına benzer şekilde, cürufllu yapılan betonların karbonatlaşması, betonun daha iyi sıkışması ve yeterli nemli kürleşme ile azaltılabilir.

Klor iyonlarının etkisi

Granüle edilmiş yüksek fırın cürufunun beton içine dahil edilmesi, betonun; klorür iyonunun difüzyonuna karşı olan direncini, özellikle ileri yaşlarda, arttırmaktadır (Bakker, 1983). Betonun klorür bağlama kapasitesini de geliştirir. Bu, klorür penetrasyonundan dolayı oluşan korozyona karşı donatı çeliğinin korunması için çok önemlidir.

Daha yüksek miktarda cüruf içeren beton karışımları (%70'e kadar), daha düşük kılcal gözeneklere ve geçirgenliğe sahip olmaları dolayısıyla, daha düşük klor difüzyonunu göstermiştir (Virgalitte ve diğ., 1995). Klorür penetrasyonunda azalmanın nedeni cüruf içeren betonların daha düşük geçirgenliği değildir; kötü kürlenmiş cürufllu çimento betonu bile klorür iyonu karşı daha iyi bir direnç gösterir. Bunun bir nedeninin, cüruf içeren betonun kimyasal direnci olduğu düşünülmektedir.

Cürufllu çimentonun hidrasyon ürünleri ile klorür iyonlarının kimyasal reaksiyonu, cürufllu çimento macunlarının klorür bağlama kapasitesini artırır. Bu konuda daha fazla ilerleme, cürufun çimento ile kütlece yer değiştirilme miktarı artırılarak ve kürleme süresinin uzatılması ile başarılabilir.

Sülfat etkisi

Cürufların, betonun içerisine katıldığı taktirde, betonun sülfat saldırısına veya deniz suyuna olan direncini arttırdığı genel olarak kabul edilmektedir. Bu direncin iyileşme seviyesi; cüruf ile çimentonun kütlece değişme miktarına, cüruftaki alümin içeriğine, çimentonun C_3A içeriğine ve betonun geçirgenliğine bağlıdır.

Eğer beton %65'den fazla cüruf içeriyorsa; cüruf bileşimi ve çimento bileşenleri ne olursa olsun, cürufllu çimento betonlarının daha yüksek sülfat direncine sahip olacağını bildirilmektedir. Öte yandan cürufun alümin içeriği de önemli bir faktördür. Yüksek alümin içeriğine sahip cüruf miktarının artırılması, sülfat atağına karşı daha düşük direnç oluşmasına neden olacaktır.

Cürufllu çimento betonlarının sülfat direncinin ana mekanizmaları, etrenjit formasyonun oluşumundaki azalma ve karışımlarda oluşan daha düşük miktardaki serbest kalsiyum hidroksittir. Cürufllu çimentoların genellikle C_3A içeriği daha azdır ve bu sayede sülfatlı ortamlarda genişmeye neden olan etrenjit daha az üretilir. Cürufllu çimento içeren karışımların serbest kalsiyum içeriği, sülfat iyonlarıyla reaksiyona giren jips oluşumunu da azaltır. Gözeneklerin içinde kalsiyum silikat hidratin oluşması, cüruf çimentosu betonlarının geçirgenliğini de azaltır ve bundan dolayı sülfat iyonlarının girişi de azalır. Bu da doğal olarak betonun dayanıklılığını artırır (Ramezianpour, 2014).

Alkali agrega reaksiyonları

Cürufun betonda kullanılması, genellikle agreganın potansiyel reaktivitesinden dolayı genişmeyi azaltır. Alkali silis ve alkali karbonat reaksiyonlarına karşı gelişmiş olan bu direnç; çözeltilerin kimyasındaki değişikliklere, çimento hamurunun mikro yapısı ile geçirgenliğine dayandırılır. Cürufun betonda kullanımı; alkali-silika oranını, alkali türlerinin çözünmesini ve tüketimini, reaksiyonu desteklemek için kalsiyum hidroksitin azaltılmasını ve sistemdeki mevcut alkali miktarını doğrudan değiştirecektir. Cürufun daha fazla reaksiyonu, betonun geçirgenliğini azaltır ve böylece betonun alkali agrega reaksiyonu da azalmış olur (Ramezianpour, 2014).

Donma ve çözülme etkisi

Tüm Portland çimento betonlarında olduğu gibi, donma ve çözülmeye karşı yeterli koruma için uygun hava içeriği ve bu hava kabarcıklarının düzgün dağılımı gereklidir. Cürufllu çimento betonları da donma davranışına direnmek için yeterli hava içeriğe

ihtiyaç duyar. Cürüflu çimentonun sudaki donma ve çözme direncine etkisi üzerine çeşitli araştırmalar da normal Portland çimento betonlarıyla benzer sonuçlar vermiştir, çünkü her ikisi de havayı düzgün şekilde sürüklerler (Mather 1957).

Cüruf miktarı, betonların donma-çözülme direncini etkiler. Tip II Portland çimento karışımlarıyla karşılaştırıldığında, yeterli hava sürükleyici ajanlara sahip %50 cüruf içeren betonlar donma ve çözülme döngülerine karşı iyi direnç göstermiştir (Hogan ve Meusel 1981). Yüksek cüruf kullanılan betonlara, tip I ve tip II Portland çimento betonlarına benzer donma direnci kazandırmak için daha yüksek dozda hava sürükleyici katkı maddesi gerekmektedir.

1.2.7 Cürufun beton içerisindeki uygulamaları

Daha önce de bahsedildiği gibi öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile harmanlanmış Portland çimentosu ilk kez 1892'de Almanya'da üretilmiştir. Cürüflu çimentoların mekanik özelliklerine ve dayanıklılığına ilişkin ciddi kuşklar nedeniyle, değiştirme seviyesi sadece %20 seviyelerindeydi. Günümüzde ise, Avrupa ülkeleri, Kuzey Amerika ve dünyanın birçok ülkesinde, beton üretiminde çimentoya ilave edilmektedir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren çimento ile yapılmış en önemli projelerden bazıları: Birleşik Krallık'taki Humber Köprüsü'nün temelleri, üstyapısı ve kule dayanakları; İngiltere'deki Heysham ve Hartlepool Nükleer Enerji Santralleri, Kanada'daki Konvansiyonel Köprü, İngiltere'de Brighton Marina Deniz Yapısı ve Birleşik Arap Emirlikleri'ndeki Burj Halife'dir.

Cürüflu çimentoların uzun vadede ve çeşitli çevre koşullarında iyi performans göstermesi, birçok harç ve beton işlerinde uygulanmasına neden olmuştur. Günümüzde cürüflu çimentolar binalar, barajlar ve hidrolik yapılar, köprüler ve prekast ürünler gibi betonarme yapılar için kullanılmaktadır (Ramezaniyanpour, 2014).

Sıcak hava uygulamaları için hazır beton üreticilerinde kütlece cüruf yer değiştirme seviyesi yaklaşık %50 seviyelerinde kullanılmaktadır. Cürüflu çimento betonlarının soğuk şartlarda mukavemetinin yavaş gelişmesi nedeniyle, bu seviyelerde yer değiştirme seviyesi %20 seviyelerindedir. Erken dayanımın yüksek olması gereken prefabrik beton elemanlarda ise istenilen mukavemeti elde etmek için harmanlanmış çimento cürufu miktarı da azaltılır.

1.3 Alkalin Aktivatörler

1.3.1 Giriş

Alkalin çimentolar esasen amorf veya camsı doğal malzemeler veya endüstriyel yan ürünler ile alkalin tepkimesinin bir sonucudur. Bu maddeler alkalin etkinleştiricilerle karıştırıldığında priz alır, sertleştir ve iyi bir bağlayıcı elde edilir (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015). Bu bağlamda, alkalin çimento bileşenleri olarak kullanılabilir çok geniş bir doğal hammadde, endüstriyel yan ürünler ve geri dönüştürülmüş alüminosilikatlar vardır. Bunlar; metakaolin, pozolanlar, yüksek fırın cürufu, fosfor cürufu, uçucu kül, cam atığı veya bu malzemelerin iki veya daha fazlasının kombinasyonları şeklinde olabilirler (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015).

Kullanılan malzemelerin ve beraber kullanıldıkları alkalin aktivatörlerinin özellikleri, elde edilen bağların hidrasyonunda ve mikro yapısal gelişiminde önemli bir rol oynamaktadırlar. Bununla birlikte, mekanik mukavemetlerinin eş zamanlı değişimleri ile beraber, alkali ile aktive olan çimentolar ve betonlar, Portland çimentosu betonlarına kıyasla daha yüksek bir performans sergileyebilmektedir.

1.3.2 Alkali ile aktif edilmiş çimento ve betonların tarihi gelişimi

Alkali ile aktive olan bağlayıcılarla ilgili ilk yayın, Alman kimyager H. Kühl 1908 yılında patentlenmiştir (Kühl, 1908). Kühl, temel bir yüksek fırın cürufunun, kireç ile beraber sodyum sülfat ya da karbonat ile bir araya getirilebileceğini ve sonra bu ikili karışımın su ile karıştırılarak kullanışlı bir bağlayıcı üretilebileceğini açıklamıştır. Bununla beraber, bu tür malzemelerin uygulanması ancak yıllar sonra pratik hale gelmiştir. Purdon farklı aktivatörler ile cürufların etkileşimiyle ilgili detaylı bir laboratuvar çalışmasını 1940'da yayımladı ve daha sonra bu malzemeleri 'Purdocement' adı altında ticari üretime aldı. Bununla birlikte, Purdocement'in üretimi hiçbir zaman tam anlamıyla ekonomikliğe ulaşamadı ve şirket 1957'de iflas etmiştir (Provis ve Bernal, 2014).

Sonraki yıllarda alkalilerle aktive edilmiş karışımlarla ilgili araştırmalar Glukhovsky ve daha sonra Krivenko öncülüğündeki bir grup araştırmacı merkezinde toplanmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, düşük kalsiyum ve yüksek kalsiyum bağlayıcı sistemleri de dahil olmak üzere çok çeşitli alkali-aktive edilmiş karışımları geliştirip ve ürettir.

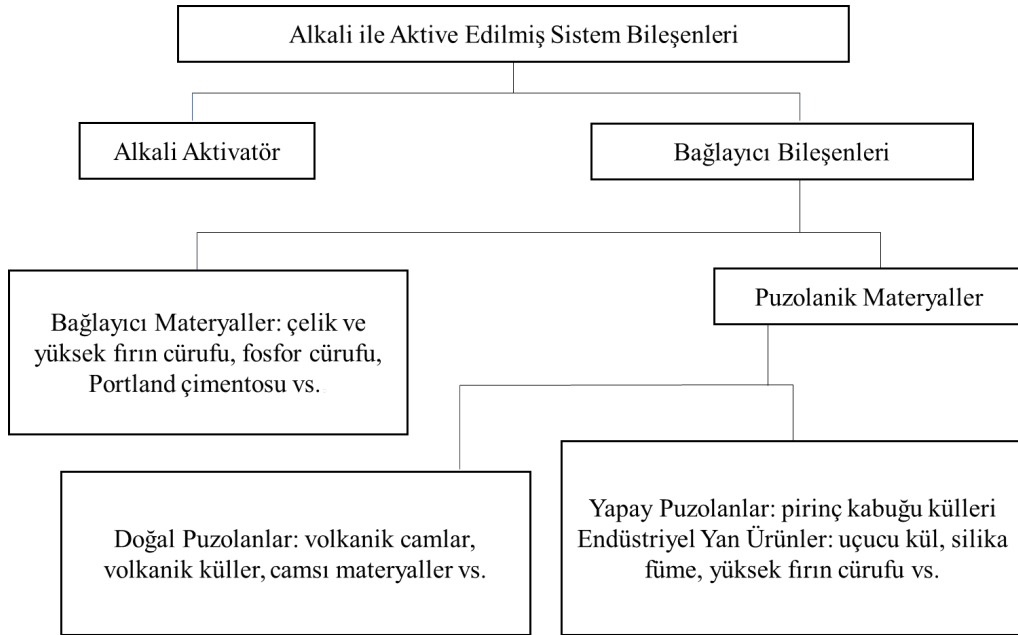
Bu malzemeler geniş bir uygulama yelpazesine yayılmış ve yıllar boyunca hizmette çok iyi performans sağlamıştır (Xu ve diğ., 2008).

1970'lerde Davidovits, metakaolin ve alkalin solüsyonları arasındaki etkileşimden türetilen bir dizi bağlayıcı geliştirdi ve 1979'da 'geopolimerler' adını verdi (Davidovits, 2008). Bu isim, o zamandan beri çeşitli alkali ile aktive olan bağlayıcı sistemleri için genel bir terim olarak yaygın olarak bilinmekte ve kullanılmaktadır.

Alkali aktivasyonuna dair araştırma ve geliştirme faaliyetleri 1980'li ve 1990'lı yıllarda giderek artmaya başlamış ve şimdi bilimsel araştırmalar, ticari dağıtım ve ulusal ve uluslararası standardizasyon çabaları da dahil olmak üzere son derece aktif bir alan haline gelmiştir (Provis ve Bernal, 2014).

1.3.3 Alkalin aktivatörlere genel bakış ve sistem modellemeleri

Alkali ile aktive edilmiş çimento teknolojisinin en önemli özelliklerinden biri, hem doğal materyallerin (kil veya feldispat gibi) hem de endüstriyel yan ürünlerin (cüruf veya uçucu kül gibi) birincil malzemeler olarak kullanılabilmesidir. Alkali ile aktive edilmiş sistemler iki temel bileşenden oluşmaktadır: bağlayıcı ve alkalin etkinleştirici. Şekil 1.4, alkali ile aktive edilmiş sistem bileşenlerini göstermektedir.



Şekil 1.4: Alkali ile aktive edilmiş sistemlerin bileşenleri

Genel olarak kullanılan alkalin aktivatörler, alkali tuzlar veya kostik çözeltilerdir. Bununla beraber aktivatörler kimyasal bileşimine göre altı gruba sınıflandırılabilir (Shi ve diğ., 2006):

1. Kostik çözeltiler: MOH
2. Silisli olmayan, hafif asitli tuzlar: M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF;
3. Silikatlar: $M_2O \cdot nSiO_2$;
4. Alüminatlar: $M_2O \cdot nAl_2O_3$;
5. Aluminosilikatlar: $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$;
6. Silisli olmayan, yüksek asitli tuzlar: M_2SO_4

Bağlayıcı bileşenlerinin (CaO - SiO₂ - Al₂O₃ sistemi) doğasına bağlı olarak, alkali çimento sistemleri iki ana kategori altında gruplanabilir: yüksek kalsiyum içeren ve düşük kalsiyum içeren sistemler (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015). Bu iki sistemin aktivasyon modellemeleri birbirinden farklıdır.

1.3.3.1 Model 1; yüksek oranda kalsiyum içeren (Na,K)₂O - CaO - Al₂O₃ - SiO₂ - H₂O sistemi:

Bu modelde, yüksek fırın cürufu (SiO₂ + CaO > %70) gibi kalsiyum ve silikon içeriği açısından zengin malzemeler, nispeten ortalama alkalin koşullar altında aktive olurlar (Shi ve diğ., 2006). Bu durumda, ana reaksiyon ürünü, yapısına alüminyum alabilen ve Portland çimentosunun hidratasyonu sırasında elde edilen jele benzer bir C-A-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jeldir.

1.3.3.2 Model 2; düşük oranda kalsiyum içeren (Na,K)₂O - Al₂O₃ - SiO₂ - H₂O sistemi:

Bu modelde aktive edilen malzemeler öncelikle alüminyum ve silikon içerirler. Bu ikinci alkali aktivasyon modelinde kullanılan malzemeler Metakaolin veya F tipi uçucu külü gibi düşük CaO içeriğine sahiptirler. Bu durumda, reaksiyonları başlatmak için Model 1'e kıyasla daha güçlendirilmiş çalışma koşulları gereklidir (yüksek alkalin ortam ve 60-200 °C'lık kür sıcaklığı).

Bu durumda oluşan ana reaksiyon ürünü, bir zeolit öncüsü olarak görülebilen bir üç boyutlu inorganik alkalin polimer olan N-A-S-H (veya alkali alüminosilikat hidrat) jelidir (Provis ve van Deventer, 2009).

Bugünlerde yukarıda açıklanan modellerin dışında üçüncü bir alkalin aktivasyon modeli de tarif edilebilir. Burada reaksiyon ürünü, CaO, SiO₂ ve Al₂O₃ içeriği %20'den fazla olan malzemelerin alkalin aktivasyonun sonucu olarak oluşan, harmanlanmış veya hibrid alkali çimento olarak bilinen yeni bir bağlayıcı türü olacaktır. (Yip ve diğ., 2005). Bu malzemeler iki gruba ayrılabilir. 1. grup, düşük Portland çimento klinkeri içeriğine ve yüksek oranda (%70'in üzerinde) mineral katkıya sahip olan malzemeleri içerir (Palomo ve diğ., 2007). Örnek olarak çimento + cüruf, çimento + uçucu kül, çimento + cüruf + uçucu kül gibi karışımlar verilebilir. 2. grup ise, Portland çimentosu içermezken, yüksek fırın cürufu + uçucu kül, fosfor cürufu + yüksek fırın cürufu + uçucu kül gibi harmanları içerir.

1.3.4 Yüksek kalsiyum içeriğine sahip sistemlerin alkalin aktivasyonu

1.3.4.1 Başlangıç malzemelerinin bileşimi

Yüksek kalsiyum içeriğine sahip alkalin çimento ve beton hazırlamak için farklı çeşitlerde cüruf kullanılabilir. Bunlar fosfor, çelik ve yüksek fırın cüruflarıdır. Alkalin aktivasyonunda tercihen en yaygın kullanılan malzeme ise granüle yüksek fırın cürufudur. Cüruf bileşenlerinin yanı sıra asit (SiO₂ ve Al₂O₃) ve bazik (CaO ve MgO) oksitler, yüksek sıcaklıkta (1600 °C) ergimiş sıvı magmanın, 1400 °C'den çevre sıcaklığına soğutulmasıyla oluşur. Sıvı cüruf aniden 800 °C'nin altındaki sıcaklıklara ulaştığında, kristallerin oluşma zamanı kalmaz ve katılaşmış amorf malzeme camsı bir yapı kazanır. Bu alkali aktivasyonunda normal olarak kullanılan cüruf maddesidir (Shi ve diğ., 2006). Bu üretilen cürufların kimyasal bileşimi öncelikle çelik üretim sürecine ve üretilen çelik tipine bağlıdır.

Cürufun Yüksek fırın cürufu, gizli veya potansiyel hidrolik karakterindedir. Başka bir deyişle, ne zaman öğütülür ve su ile karıştırılırsa, oldukça uzun tepki sürelerine rağmen, Portland çimento hamurlarında bulunan ürünlere benzer hidratasyon ürünleri verebilir ve sertleştirebilir. Cürufu çimentolar, cürufun bağlayıcı içeriğinin etkisiyle yavaşça gelişir ve mekanik mukavemet Portland çimentosundakinden daha sonra ortaya çıkar. Bununla birlikte, çeşitli yöntem ve aktive edici ajanların herhangi biri tarafından aktive edildiğinde, cüruf, çimento ürünlerini oluşturarak hızla ve topluca

hidrate olur. Yapılan bir araştırma, alkalın bileşiklerin cüruf hidrolikliğini en etkili şekilde arttıran aktive edici ajanlar olduğunu göstermiştir (Wang ve diğ., 1995).

Cürufların reaktivitesinin parçacık boyutuna bağlı olduğu bilinmektedir. 20 mikrondan büyük parçacık halindeki cüruflar çok yavaş reaksiyon gösterirken, 2 mikronun altındaki cüruflar alkalın aktivatörler ile karıştırıldıktan 24 saat sonra tam reaksiyona girerler (Wang ve diğ., 2005).

Alkalın aktivasyonunda cüruf reaktivitesi büyük oranda camsı faz içeriğine bağlıdır. Bu oranın %90'ın üzerinde olması önerilir (Swamy ve Bouikni, 1990). Bununla birlikte, yapılan bir araştırmada (Pal ve diğ., 2003), düşük camsı faz içeriğine (%30-65) sahip cürufların da iyi sonuçlar verebileceğini belirtilmiştir. Değeri normalde 1,3 ila 1,5 arasında değişen bir parametre olan depolimerizasyon derecesi (DP), cüruf reaktivitesi ile doğrudan ilişkili görünmektedir (Pal ve diğ., 2003). Depolimerizasyon derecesi su formülle (1.1) hesaplanır:

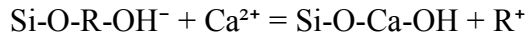
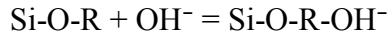
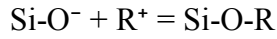
$$DP = [n(\text{CaO}) - 2n(\text{MgO}) - n(\text{Al}_2\text{O}_3) - n(\text{SO}_3)] / [n(\text{SiO}_2) - 2n(\text{MgO}) - 0.5n(\text{Al}_2\text{O}_3)]$$

Cürufun çimento olarak kullanılmasının temel şartları aşağıda listelenmiştir (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015):

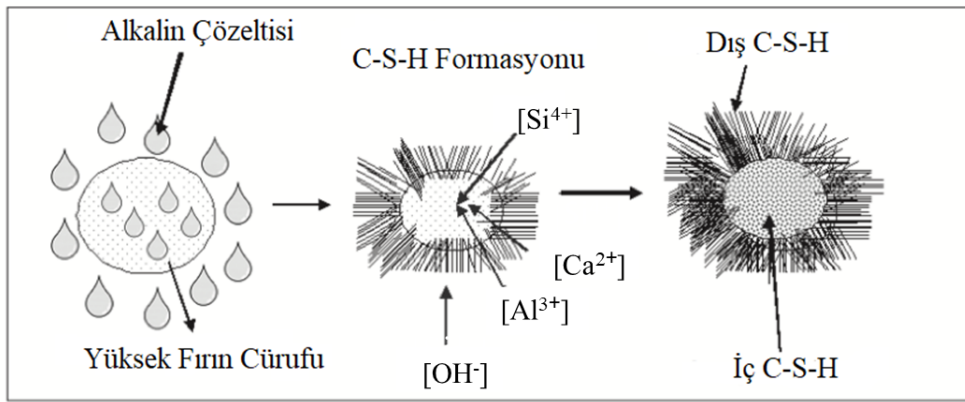
- 1- Ögütülmeli ve %85-95 camsı bir faza sahip olmalıdır.
- 2- Dağınık olmayan bir yapıya sahip olmalıdır. Camsı fazın polimerizasyon derecesi ne kadar yüksek olursa, hidrolikliğı de o kadar düşük olacaktır.
- 3- Basit bir yapıya sahip olmalı. Buradan şu anlaşılmalıdır: $[\text{CaO} + \text{MgO}] / [\text{SiO}_2] > 1$ oranına sahip olmalıdır. Kireç içeriğinin, cüruf aktivasyonunu kontrol etmesinden dolayı, basit yapıya sahip bir kireç daha yüksek bir hidrolik potansiyeline sahiptir.
- 4- 400-600 m²/kg'lık özgül yüzey alanına sahip olmalıdır. Özgül yüzey alanı aktivasyon reaksiyonunun hızında ve yoğunluğunda önemli rol oynamaktadır.

1.3.4.2 Reaksiyon mekanizması

Glukhovsky ve Krivenko, yüksek fırın cürufu gibi silika ve kireç açısından zengin malzemelerin alkali aktivasyonunu açıklayan bir model önermiştir (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015):



Alkalın katyon (R^+), Ca^{2+} iyonlarıyla katyonik değişime girerek, hidrasyonun ilk evrelerinde sadece bir katalizör görevi görür. Yapılan bir araştırmada, çözeltideki anyonun doğasının, özellikle erken yaşlarda ve bilhassa çimento hamurunun prizinin aktivasyonunda rolü olduğu bildirilmiştir. Reaksiyon mekanizmalarını tanımlayan modellerden biri Şekil 1.5'de gösterilmiştir (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015).



Şekil 1.5: Yüksek kalsiyum içeriğine sahip sistemlerin reaksiyon mekanizmasının modellenmesi (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015).

1.3.4.3 Reaksiyon ürünleri

Portland çimentosunun reaksiyonunda oluşan ana ürün, malzemenin yapısından ve mekanik özelliklerinden da kaynaklanan C-S-H tipi jeldir. Oluşan yan ürünler ise portlandir, etrenjit ve kalsiyum monosülfoalüminattır (Taylor, 1990). Alkalın ile aktif edilen çimentolarda da benzer bir durum söz konusudur. Ana reaksiyon ürünü olan bir jel ve yan ürünler oluşur. Oluşan yan ürünler başlangıç materyallerinin bileşimine, aktivatör türüne ve konsantrasyonuna, kür koşullarına ve pH derecesine bağlıdır (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015).

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu için genel olarak ana reaksiyon ürünü bileşiminde alüminyum içeren kalsiyum silikat hidrattır (C-A-S-H). Oluşan bu jel daha düşük bir C/S oranına ($C/S = 0.9-1.2$) sahip olduğu için, normal Portland çimentosu hidrasyonunda oluşan jelden biraz daha farklı bir yapıya sahiptir.

1.3.4.4 Reaksiyona [CaO]/[SiO₂] reaktif oranının etkisi

Daha önce de bahsedildiği gibi, kullanılan materyallerin kimyasal bileşimi ve mineralojik özellikleri (öncelikle amorf veya camı faz içeriği), alkalin çimentolar içeren ana reaksiyon ürünlerinin oluşumunda ana belirleyicidirler. Bu ürünler; C-A-S-H jelleri (cüruf gibi yüksek silisli, yüksek kalsiyumlu malzemelerin alkali aktivasyonu) veya N-A-S-H jelleridir (uçucu kül ve metakaolin gibi yüksek silisli, yüksek alüminyum malzemelerin alkalikle etkinleştirilmesi). Jel kompozisyonu, sistemin mekanik mukavemetini ve dayanıklılığını büyük ölçüde etkiler.

Oluşan jelin özellikleri ve sistem performansı iki parametre sayesinde önceden tahmin edilebilir. Bu parametreler; yüksek fırın cürufu için [CaO]/[SiO₂] reaktif oranı ve alüminosilikat materyalleri, özellikle uçucu kül için ise [SiO₂]/[Al₂O₃] reaktif oranıdır.

Yüksek fırın cürufu, çok yüksek bir camı faz içeriğine (%90 ila %95) sahiptir. Buna ek olarak; CaO, SiO₂ ve Al₂O₃ esaslı bir kimyasal bileşime sahiptir. Aktivatörün eklenmesinden sonra cürufun çözülmesi, bir dizi çözülmüş Si⁴⁺, Al³⁺ ve Ca²⁺ üretir ve bunlar hemen C-A-S-H jelini oluşturabilir. Oluşan jel, normal Portland çimentosu hidratasyonunda üretilen ürüne (C-S-H) benzer olsa da C/S oranı diğerlerinden daha düşüktür. C-A-S-H jel oranları genellikle 0.9 ila 1.2 arasındadır.

Jellerin silis içeriği, bu jellerin polimerizasyonunu düzenler. Silika içeriği ne kadar yüksek olursa (yani C/S oranını düşürdüğü), silikat zincirleri o kadar uzun olur (Taylor, 1990). Bu sistemlerde CaO/SiO₂ oranını modifiye etmek için standart yöntem, alkalin aktivatör (sodyum silikat) ile birlikte sisteme çözünür silika eklenmesidir. Silika içeriğindeki artış, mükemmel mekanik özelliklere sahip, daha yoğun paketlenmiş, daha polimerize jellerin oluşumunu sağlayacaktır (28 günde > 80 MPa, Fernández-Jiménez ve diğ., 2003).

1.3.5 Alkalin aktivatörün seçilmesi

Alkalin aktivatörler, alkalin ile aktif edilmiş çimento tasarımında ve geliştirilmesinde, ikinci temel bileşendir. Geniş anlamda, alüminosilikat (uçucu kül veya metakaolin) bazlı alkalin çimentolarda kullanılan aktivatörler; alkalin hidroksitler, alkalin silikatlar veya bu ikisinin karışımlarıdır. Bununla beraber cürufu yapılan ve yüksek oranda kalsiyum oksit (CaO) içeren alkalin çimentolarında, R₂CO₃, R₂S veya RF gibi zayıf asit tuzları (burada R = alkalin veya toprak alkali Na, K, Li veya Ca gibi iyonları ifade

etmektedir) veya Na_2SO_4 veya $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ gibi kuvvetli asit tuzları aktivatör olarak kullanılabilir.

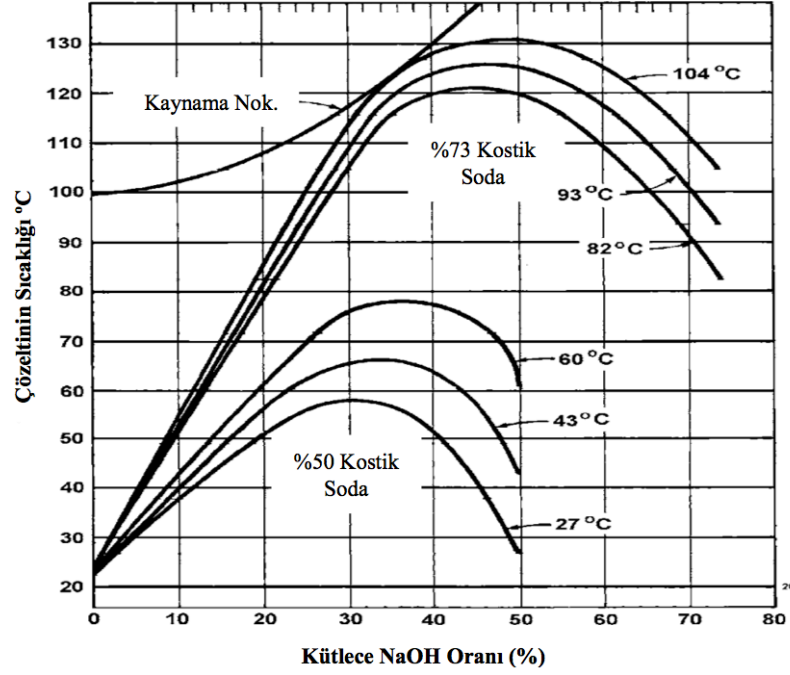
Aktive edici çözeltilerdeki anyon, reaksiyonların alınmasında önemli bir rol oynar. Normal olarak alkalin çimentoları hazırlamak için kullanılan ham maddelerle karıştırılan anyonlar; hidroksitler, silikatlar, karbonatlar ve daha az oranda sülfattır.

1.3.5.1 Sodyum hidroksit

Bir diğer adıyla kostik soda olarak da bilinir. Kimya endüstrisinin en çok kullanılan malzemelerinden birisidir. Kostik sodanın ticari sınıfları tuzlu suyun elektrolizi ile üretilir. Kostik sodaya bağımlı olmayan endüstriyel ürün neredeyse bulunmamaktadır (Shi ve diğ., 2006).

Kimyasal formülü NaOH olarak ifade edilir. Katı formdaki sodyum hidroksitin 20°C 'de öz kütlesi $2,13 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Oda sıcaklığında 1110 g/L çözünürlüğe ulaşabilirler. $39,9971 \text{ g/mol}$ moleküler ağırlığına sahiptir. Erime sıcaklığı 318°C iken, kaynama sıcaklıkları 1388°C 'dir.

Kostik soda bağlayıcılarla beraber hidratasyonunun hızlandırıcısı olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, 7-14 gün hidratasyon sonrasında mukavemet azalır. Çoğu nihai kullanım için, çözelti halindeki kostik soda kullanılır. Susuz katı kostik soda kullanılıyorsa, istenen miktarda kostik soda çözeltisi elde etmek için yeterli miktarda kostik soda, su içerisinde eritilebilir. Genellikle, %50 NaOH çözeltisi, kostik soda için en uygun ve ekonomik çözelti oranı olarak kabul edilir (Shi ve diğ., 2006). Ancak, kostik sodanın suda çözünmesi sırasında çok fazla sıcaklık artışı meydana geldiğinden, katı kostik soda suya çok hızlı eklendiği takdirde suda tehlikeli boyutlara varan kaynamalara ve sıçramalara neden olabilir. Şekil 1.6'daki grafikte %50 ve %73 konsantrasyona sahip NaOH çözeltileri için sıcaklık değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 1.6: Sodyum hidroksit çözeltisinin farklı konsantrasyonlardaki sıcaklıkları

OH⁻ iyonlarının bağlayıcı hidratasyonuna etkisi

OH⁻ iyonları, Si-O-Si ve Si-O-Al bağlarının hidrolizini destekleyerek Si⁴⁺ ve Al³⁺ kationlarının çözünürlüğünü katalize eder ve bundan sonra çeşitli türler çözülmeye bırakılır (Glukhovsky, 1967). OH⁻ iyonlarının varlığı, sadece alkalın aktivasyonun çeşitli evrelerinde yer alan hidrolitik reaksiyonları katalize etmekle kalmaz, aynı zamanda pH'ı, başlangıç öncülünün eritilmesi ve devamında meydana gelen yoğunlaştırma reaksiyonları için gereken değerlere yükseltir.

Cüruf temel hammaddelerden birisi olduğunda, çok yüksek OH⁻ konsantrasyonları uygun değildir. Bununla birlikte, kalsiyum artan pH ile daha az çözünebilir hale gelir. Sonuç olarak, yüksek oranda kalsiyum içeren yüksek fırın cürufunu aktive etmek için kullanılan alkalın çözeltilerin konsantrasyonu, düşük kalsiyum oranına sahip alüminosilikatları (uçucu kül ve metakaolin) harekete geçirmek için gerekli olandan çok daha düşüktür.

Alkalın hidroksitler (öncelikle NaOH), anyon veya anyon grubu (silikatlar, karbonatlar veya sülfatlar gibi) çözünebilir tuzlar gibi, cüruftaki Ca²⁺ iyonlarıyla reaksiyona girerek Ca(OH)₂'ye göre daha az çözünür olan kalsiyum bileşiklerini oluşturabilen etkili granüle yüksek fırın cürufu aktivatörleridir. Bununla beraber cüruf

bazlı bağlayıcıların hazırlanması için 2-4 M konsantrasyona ihtiyaç vardır. (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015)

Yapılan kapsamlı araştırmalara rağmen, aktivatör türüne bağlı olan optimum konsantrasyon hakkında fikir birliğine varılamamıştır. Cürufun alkalin aktivasyonunda, yüksek Na₂O konsantrasyonlarına sahip olan etkinleştiriciler (cüruf ağırlığının %5'inden fazla), önemli ölçüde mukavemet sağlamazlar. Dahası, bu tür yüksek dozda alkaliler zararlı olabilir; parlaklık artar ve materyali daha kırılğan hale getirebilir. Ekonomik faktörler de akılda tutulmalıdır; dozaj ne kadar yüksek olursa maliyet de o kadar yüksek olur (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015).

1.3.5.2 Sodyum silikat

Sodyum silikat ilk defa Van Helmont tarafından 1640 yılında silikayı fazla miktarda alkali ile birleştirdiğinde keşfedildi. Johann Nepomuk von Fuchs, deneyleri sırasında 1818'de onu yeniden keşfetti. Johann Nepomuk von Fuchs, silikayı kostik soda potasında çözdü ve oluşan çözeltinin cam benzeri özelliklerini gözlemledi ve su camı olarak adlandırdı. Günümüzde de yaygın olarak su camı olarak bilinir. Bazı araştırmalardan sonra silikatın tutkal, çimento, boya, deterjan, doğal ve yapay taşlar için sertleştirici madde olarak kullanılmasını önerdi. Çözünür silikatların ticari olarak üretimi, Philadelphia Kuvars Şirketi tarafından başlatıldığı 1864 yılına kadar uzanmaktadır. O zamanlar, sodyum silikat esas olarak sabun imalatında kullanıldı.

Sodyum silikatlar kimyasal olarak, Na₂O · nSiO₂ formülü ile bilinirler. Formüldeki n, bileşenlerin oranıdır ve teorik olarak herhangi bir sayı olmakla beraber, pratik aralıkta 0,4 ila 4,0 aralığında olabilir. Değişken olan bu n oranına göre sodyum silikatlar değişik özellikler gösterir ve endüstriyel açıdan farklı alanlarda kullanılabilirler.

Sodyum silikatların çözelti formları genellikle 1,6 ila 3,3 arasında değişen modül ile satılmaktadır. Katı sodyum silikatın suda çözülmesi endotermik bir reaksiyondur. Cam silislerin çözünme hızı ve çözünürlüğü, modül arttıkça azalmaktadır. Sodyum silikat cam modülü iki katından daha az olduğunda, çözünmesi uyumlu bir işlem olarak kabul edilebilir (Shi ve diğ., 2006).

Sodyum silikat, beton içerisinde priz hızlandırıcısı olarak kullanılmaktadır. Özellikle püskürtme betonunun hızlandırıcısı olarak günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. Birçok bağlayıcı sistemi için sodyum silikat etkili bir alkalin aktivatördür. Hidratlı silikat tozları üretmek için yeni teknolojilerin geliştirilmesiyle beraber çözünür

camların yapı sektöründeki kullanımını artırmıştır. Kuru yapıştırıcı karışımları, yapıştırıcılar, petrol kuyusu çimentoları, asit dayanımlı beton vb. gibi yapı sektöründeki uygulamalar, bu genişleyen kullanım alanlarına örnek olarak gösterilebilir (Shi ve diğ., 2006).

Silikatların etkisi

Silikat çözeltileri, özellikle sodyum silikat (Na_2O), cüruf ve alüminosilikatların (uçucu kül ve metakaolin) alkalınlar ile aktifleştirilmesinde en çok kullanılan ikinci maddelerdir. Çözülebilir silikanın mevcudiyeti bu sistemlerde çok önemlidir. Çünkü işlenebilirlik, priz ve mekanik mukavemet gelişimi üzerinde önemli etkileri vardır. Bununla beraber oluşmuş olan jel formundaki malzemenin hem bileşimini hem de mikroyapısını değiştirir.

Daha önce yapılan çalışmalarda, cürufun; yapısına, inceliğe ve kür koşullarına bağlı olarak optimum sodyum silikat (Na_2O) içeriği cüruf ağırlığının yaklaşık %4'ü olduğu belirtilmiştir (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015).

1.3.6 Uygulamalar, sonuçlar ve gelecek eğilimler

Alkali ile aktive edilen çimento ve betonların bulunmasından bu yana, eski Sovyetler Birliği, Çin ve diğer bazı ülkelerdeki çeşitli inşaat projelerinde ticari olarak üretilmiş ve farklı amaçlarla kullanılmıştır. Bu ticari ürünler ve uygulamalar; yapısal beton, beton kaplamalar, beton boru, beton lavabolar ve siperler, otoklavlı gaz beton, ateşe dayanıklı beton, petrol kuyu çimentosu, tehlikeli ve radyoaktif atıkların dengelenmesi, katılaştırılması ve depolanması alanlarında kullanılmıştır (Shi ve diğ., 2006). Alkalın ile aktive edilmiş beton tasarımında hem hammadde hem de kullanılan aktivatör dikkatle seçilmelidir. Çimento sistemi performansının ilk değerlendirmesi, hammaddenin kimyasal bileşimi ve fiziksel-kimyasal özelliklerinin kapsamlı bir analizi ile elde edilebilir.

Normal olarak kullanılan (çözünür silikatlar veya hidroksitler içeren) aşındırıcı özelliğe sahip aktivatörlerin çözeltilerin el ile teması sonucunda oluşabilecek tehlikeler, araştırmacıları katı aktivatörler aramaya itmiştir. Yani sadece suya katılacak, yerleşik, katı alkalın aktivatörlü (ince öğütülmüş sodyum silikat veya alkalın tuzları) bağlayıcıların geliştirilmesi ve kullanılması, sıvı çözelti hâlinde olan aktivatörlerin kısmen tehlikeli özelliklerinden koruyacaktır (Kolousek ve diğ., 2007). Dahası, bazı katı aktifleştiriciler tarafından salınan hidrasyon ısı, bazı mineral

bileşenlerin reaktivitesini artırabilir. Bu, karışımın tasarımına, numunenin geometrisine ve amaçlanan uygulamaya bağlı olarak istenebilir veya istenmeyebilir.

Roy (1999), yazdığı inceleme raporunda alkali ile aktive edilen çimentolar ve betonlar için bazı zorlukları özetlemiştir. Laboratuvar ve saha tecrübeleri baz alınarak alkali ile aktive olan çimentolar ve betonlar için aşağıdakiler de dahil olmak üzere pek çok endişe ve sorun çözülmelidir:

1- Alkali ile aktive olan çimento ve beton, sızan alkalilerin havadaki CO₂ ile tepkimeye girmesi sonucu çiçeklenme problemi gösterir.

2- Alkali ile aktive olan çimento macunu ve beton genellikle daha fazla kuruma rötresine neden olur ve kuru şartlarda çatlamaya neden olabilir. Büzülme genellikle sistemdeki kireç içeriği azaldığında artar.

3- Alkali ile aktive olan çimento ve beton, ıslak koşullar altında çok yavaş karbonatlaşabilirken, kuruma koşullarında çatlayabilir ve çok hızlı bir şekilde karbonatlaşabilir.

4- Reaksiyon ve genleşme mekanizmalarını anlamak için alkali ile aktive olan çimento ve betonun, alkali-agrega reaksiyonu üzerine daha fazla araştırma gereklidir. Bu reaksiyonlar sonucu oluşan yan ürünlerin özellikleri kaynaktan kaynağa değişiklik gösterir ve alkali-agrega reaksiyonunun potansiyel genleşmesini etkiler. Özellikle agrega alkali-reaktif olduğu bilinen durumlarda, potansiyel alkali agregası reaksiyonu için tedbirler alınmalıdır.

5- Piyasadaki çoğu kimyasal katkı çoğunlukla Portland çimento esaslı betonlar için üretilmiştir. Alkali ile aktive olan çimento betonu ile iyi çalışmazlar.

6- Hammaddelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri zamandan zamana kaynaktan kaynağa değişebilir. Alkali ile aktive edilen çimento ve betonun kalite kontrolü ve kalite standardizasyonu büyük bir engeldir.

1.4 Ferrokrom Cürufu

Ferrokrom cürufu, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel üretimin yan ürünü olarak ortaya çıkar. Ark direnç fırınlarında 1700-1800 °C gibi yüksek sıcaklıklarda, kromit cevheri hammaddesi ile beraber metalürjik kok, kuvarsit gibi yardımcı maddeler bir arada ergitilir. Ferrokrom ve silikoferrokrom üretimi esnasında indirgenemeyen

oksitler ile bir miktar SiO₂, metal yüzeyinde sıvı bir cüruf tabakası oluşturur ve bu cüruf kalıplara dökülerek alınır. Ferrokrom cürufu kimyasal içerik olarak dört ana elementin etkisi altındadır. Bu elementler; silisyum, kalsiyum, magnezyum ve alüminyumdur.

Ferrokrom cüruflarının işlenme süreci yüksek fırın cürufunun işlenme süreciyle benzerlik gösterir. Havada yavaş soğutuldukları takdirde kristal bir yapıya sahip olurlar. Bu haliyle cüruf yüksek mekanik özellik gösterir ve çoğunlukla agrega olarak kullanılır. Yüksek fırından çıktığında eriyik halinde olan cüruf hızlı olarak soğutulduğu takdirde ise akışkanlığındaki ani azalma kristalleşmeyi engeller ve camsı yapıda bir katı madde elde edilmesini sağlar. Bu yarı-kararlı camsı malzeme, bir miktar hidrolik özelliğe sahiptir. Bu tür cüruflar daha çok çimentolu sistemlerde, çimento ve beton üretiminde kullanılır.

Günümüzde cüruflar genellikle demiryolu balastı olarak, beton agregası ve asfalt agregası, olarak, yol temel ve alt temel malzemesi olarak, çimento sanayiinde, briket ve tuğla yapımında, cüruf yünü ve prefabrik elemanların yapımı gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Yılmaz ve Süttaş, 2008).



2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmaların tamamı İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Üretim üç farklı aşamada yürütülmüştür ve kullanılan malzemeler her aşamaya göre farklılık göstermektedir.

2.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

2.1.1 Çimento

Deneysel çalışmalarda kullanılan çimento, TS EN 197-1 (2012) standardı ile uyumlu Portland CEM I 42,5 R çimentosudur. Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilmiştir. Çimento taze olarak kullanılmış olup, üretim öncesinde nemden ötürü topaklanmaması için plastik ve hava geçirmez torbalarda muhafaza edilmiştir.

2.1.2 Yüksek fırın cürufu

Deneysel çalışmalarda kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, Kardemir Karabük Demir Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş. Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Blaine özgül yüzeyi ise 5500 cm²/gramdır. Cüruf nemden uzak ortamda, plastik ve hava geçirmez torbalarda muhafaza edilmiştir. Kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal içeriği Çizelge 2.1'de verilmiştir. Cürufun özgül ağırlığı 2,97 g/cm³tür.

Çizelge 2.1: Yüksek fırın cürufunun kimyasal analizi.

Kimyasal Analiz	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl-	KK
Analiz Sonuçları (%)	43,5	1,2	11,3	29,2	10,3	1,3	1,1	0,35	0,011	1,9

2.1.3 Su

Deneysel çalışmaların üretim ve kütleme aşamalarında kullanılan su, İstanbul şehir şebekesinin İSKİ'den temin ettiği, içilebilir sudur. Beton karışım ve bakım suyunun

kalitesi ile ilgili Türk Standardı TS EN 1008 (2003) olup, içme suyu şebekesinden alınan suyun, bu standartta verilen özellikleri sağladığı kabul edilmiştir.

2.1.4 Alkalın aktivatörler

DeneySEL çalışmalarının 3. üretim aşamasında kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufalarını aktive etmek için alkalın aktivatörler kullanılmıştır. Seçilen aktivatörler sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (SiO₂)(Na₂O)(H₂O)' tır. Çözeltilerde kullanılan su, karma suyunun toplam miktarından düşürülmüştür. Çalışmalar süresince tüm alkalın aktivatörler kendi plastik kaplarında, kapların ağzı sıkı bir şekilde kapalı tutularak muhafaza edilmiştir.

Asıl üretimlerin öncesinde yapılan deneme üretimlerinde alınan en iyi sonuçlar, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufuna sodyum hidroksitin kütlece %7,1, sodyum silikatın ise kütlece %17,34 oranında ve beraber kullanıldığı durumlarda elde edilmiştir.

2.1.4.1 Sodyum hidroksit

DeneySEL çalışmaların 3. üretim aşamasında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufalarını aktive etmek için kullanılan alkalın aktivatörlerden biri olan sodyum hidroksit (NaOH), Bereket Kimya Tıp Teknik Tic. ve San. Ltd. Şti.'nden temin edilmiştir. Temin edilen sodyum hidroksit pelet hâlinde olup, üretim öncesi suda çözülerek üretime dahil edilmiştir. Beyaz renkte, nem çekici ve kokusuz bir maddedir. Su ile tepkimeye girdiğinde, ekzotermik bir reaksiyon meydana gelir ve yaklaşık 5 dakika içinde sıcaklığı 50 dereceye çıkar. Yumuşak, kaygan ve sabun hissi veren bir çözelti oluşturur. Çok kuvvetli bir bazdır ve insan dokusunu tahriş edici bir etkisi vardır. Hesaplarda kullanılan molekül ağırlığı 40 g/mol, yoğunluğu ise oda sıcaklığında 2,13 g/cm³'tür.

2.1.4.2 Sodyum silikat

DeneySEL çalışmaların 3. üretim aşamasında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufalarını aktive etmek için kullanılan alkalın aktivatörlerden bir diğeri olan sodyum silikat ((SiO₂)(Na₂O)(H₂O)) da Bereket Kimya Tıp Teknik Tic. ve San. Ltd. Şti.'nden temin edilmiştir. Cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat, renksiz ve kokusuz bir maddedir. Temin edilen sodyum silikat, suda çözülmüş hâlde ve şurup kıvamındadır.

Hesaplarda kullanılan molekül ağırlığı 184,04 g/mol, yoğunluğu ise oda sıcaklığında 1,35 g/cm³'tür.

2.1.5 Agregalar

Deneysel çalışmalarda iki tip agrega kullanılmıştır. Bunlar; kırma taş agregası ve ferrokrom cürufu agregasıdır.

2.1.5.1 Kırma taş agregası

Deneysel çalışmaların ilk aşamasında kırma taş 1 ve 2 numaralı agregalar kullanılmıştır. Agregaların elek analizi TS EN 933-2 (1996) standardında belirtildiği gibi kare göz açıklıklı elekler kullanılarak yapılmıştır. Agregaların özgül ağırlıkları, TS 3526 standardına göre yapılmış testler ile bulunmuş ve sonuçlar sırasıyla; 1 numaralı agrega için 2,69 g/cm³ ve 2 numaralı agrega için 2,72 g/cm³ ve çıkmıştır. Agregaların elek analizi TS EN 933-1 (2012) standardına uygun şekilde yapılmış olup, elde edilen sonuçlar Çizelge 2.2'deki gibidir:

Çizelge 2.2: Kırma taş agregalarının elek analizi.

Elek boyutu (mm)	Kırma taş 1 numara	Kırma taş 2 numara
	Geçen (%)	Geçen (%)
31,5	100	100
16	100	42,13
8	52,53	0,26
4	2,53	0
2	0	0
1	0	0
0,500	0	0
0,250	0	0

2.1.5.2 Ferrokrom cürufu agregası

Deneysel çalışmaların 2. ve 3. üretim aşamalarında ferrokrom cürufu agregaları kullanılmıştır. Eti Krom A.Ş.'den temin edilen ferrokrom cürufu agregaları, Elazığ'daki ferrokrom fabrikalarında üretilmiştir. Ferrokrom cürufu agregaları, özgül ağırlık deneyleri yapılmadan önce inceden kalına doğru olacak şekilde 1, 2 ve 3 şeklinde numaralandırılmıştır. Sonrasında ferrokrom cürufu agregalarının özgül ağırlıkları deneyleri, TS 3526 standardına göre yapılmış ve sonuçlar sırasıyla; 2,98 g/cm³, 2,91 g/cm³, 3,09 g/cm³ çıkmıştır. Ferrokrom cürufu agregasının elek analizi TS EN 933-1 (2012) standardına uygun şekilde yapılmış olup, elde edilen sonuçlar Çizelge 2.3'deki gibidir:

Çizelge 2.3: Ferrokrom cüruf agregasının elek analizi.

Elek boyutu (mm)	Ferrokrom cürufu 1 numara	Ferrokrom cürufu 2 numara	Ferrokrom cürufu 3 numara
	Geçen (%)	Geçen (%)	Geçen (%)
31,5	100	100	100
16	100	100	28,53
8	99,40	41,67	0
4	38,73	0	0
2	3,50	0	0
1	0	0	0
0,500	0	0	0
0,250	0	0	0

Bunlarla beraber, kullanılan ferrokrom cüruf agregasının kimyasal içeriği Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4: Ferrokrom cüruf agregasının kimyasal analizi.

Kimyasal Analiz	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	S	K ₂ O	Na ₂ O	Cl-	KK
Analiz Sonuçları (%)	59,72	7,87	1,43	23,15	5,67	0,28	0,12	0,02	0,0547	0,58

2.1.5.3 Kum

Deneysel çalışmaların bütün aşamalarında kum olarak doğal kum kullanılmıştır. Kullanılan kumun özgül ağırlığı $2,65 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Kullanılan doğal kumunun elek analizi TS EN 933-1 (2012) standardına uygun şekilde yapılmış olup, elde edilen sonuçlar Çizelge 2.5'teki gibidir:

Çizelge 2.5: Doğal kumun elek analizi.

Elek boyutu (mm)	Doğal kum
	Geçen (%)
31,5	100
16	100
8	100
4	100
2	100
1	87,80
0,500	69
0,250	17,60

2.1.6 Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı

Taze beton karışımlarında, su/bağlayıcı oranının istenilen işlenebilirliği vermediği durumlarda; işlenebilirliği artırmak, erken ve nihai mukavemette yüksek performans sağlamak amacıyla; karma suyunu ciddi anlamda azaltan yeni nesil bir süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı BASF Türk Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilen MasterGlenium RMC 303'tür. Deneysel çalışmalarda, işlenebilirliğin yetersiz geldiği durumlarda, bağlayıcı kütlesinin %1-3'ü arasında kullanılmıştır. Kullanılan MasterGlenium RMC 303'e ait fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.6'da verildiği gibidir.

Çizelge 2.6: Kimyasal akışkanlaştırıcı katkının teknik özellikleri.

Teknik özellikler	
Malzemenin yapısı	Polikarboksilik eter esaslı
Görünüm	Yeşil - sıvı
Özgül ağırlık (20° C'de)	1,00 - 1,1 kg/l
pH değeri	5 - 8
Alkali içeriği (%)	≤ 3,00 (Kütlece)
Klor iyon içeriği	≤ 0,10 (Kütlece)

2.2 Üretim Serileri

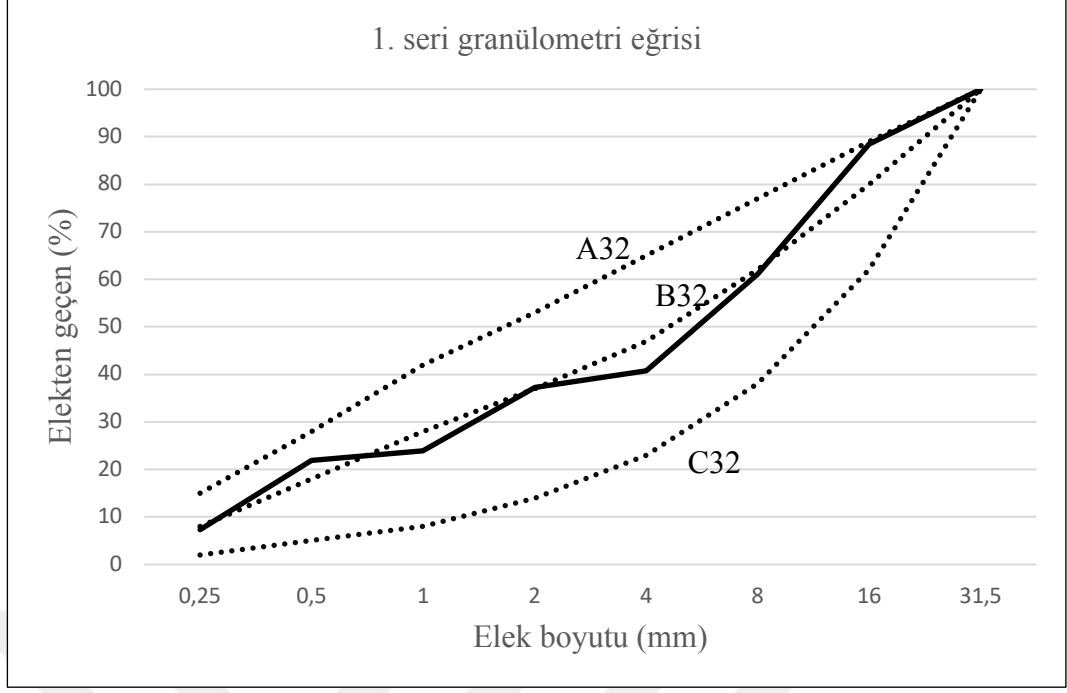
Deneysel çalışmalarda yapılan beton üretimleri üç farklı seri olarak yapılmıştır. Her bir seride beş farklı üretim yapılmış olup, her bir üretimdeki su/bağlayıcı oranı farklıdır.

Tezin temel araştırma konusunu ferrokrom cürufunun betonda agrega olarak kullanılması oluşturmaktadır. Bundan ötürü, üretilen ilk seri kontrol grubu olarak oluşturulmuş ve üretilen numunelere ait sonuçlar 'k' harfi ile kodlanmıştır. İkinci seri üretiminde, birinci seriden farklı olarak sadece kullanılan agregalar değiştirilmiş; kırma taş agregası yerine ferrokrom cürufu agregası kullanılmıştır. İkinci seriye ait numunelerden elde edilen sonuçlar 'f' harfiyle kodlanmıştır. Son seri olan üçüncü üretim serisinde ise agrega olarak ferrokrom cürufu agregası kullanılmıştır. Son seride ilk iki üretim serilerinden farklı olarak Portland çimentosu kullanılmamış; bunun yerine bağlayıcı olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufularını aktif etmek için ise alkalin aktivatörler kullanılmıştır. Üçüncü seriye ait sonuçlar 'a' harfi ile kodlanmıştır. Tüm serilere ait kullanılan malzemeler, bu malzemelerin oranları ve diğer bilgiler yazının devamında ayrıntısıyla verilmiştir.

2.2.1 1. Seri

Deneysel çalışmaların ilk aşaması olan 1. seri üretimi, tez konusunun kontrol grubunu oluşturmaktadır. Malzeme olarak; Portland CEM I 42,5 R çimento, su, doğal kum, kırma taş 1 ve 2 numaralı agregalar ve su/bağlayıcı miktarının yeterli işlenebilirliği vermediği durumlarda ise MasterGlenium RMC 303 akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır.

Karışımlarda kullanılacak malzemelerin miktarını belirlemek için granülometri eğrisi oluşturulmuş ve TS 802 (2016) standardında da belirtilen A₃₂, B₃₂ ve C₃₂ granülometri değerleri dikkate alınarak kırma taş 1 ve 2 numaralı agregalar ve doğal kum ile üretilebilecek en ideal karışım agregasının oranları belirlenmiştir. Bulunan oranlar; kırma taş 1 numaralı agrega için %40, kırma taş 2 numaralı agrega için %20 ve doğal kum için %40 olarak belirlenmiştir. Bu durumda oluşan granülometri eğrisi Şekil 2.1'de verildiği gibidir.



Şekil 2.1: 1. Seri üretiminin granülometri eğrisi.

Belirlenen malzeme oranları için yapılan hesaplar ile bulunan malzeme miktarları 1 m³ için Çizelge 2.7’de verildiği gibidir.

Çizelge 2.7: 1. Seri üretimi için kullanılan malzeme miktarları.

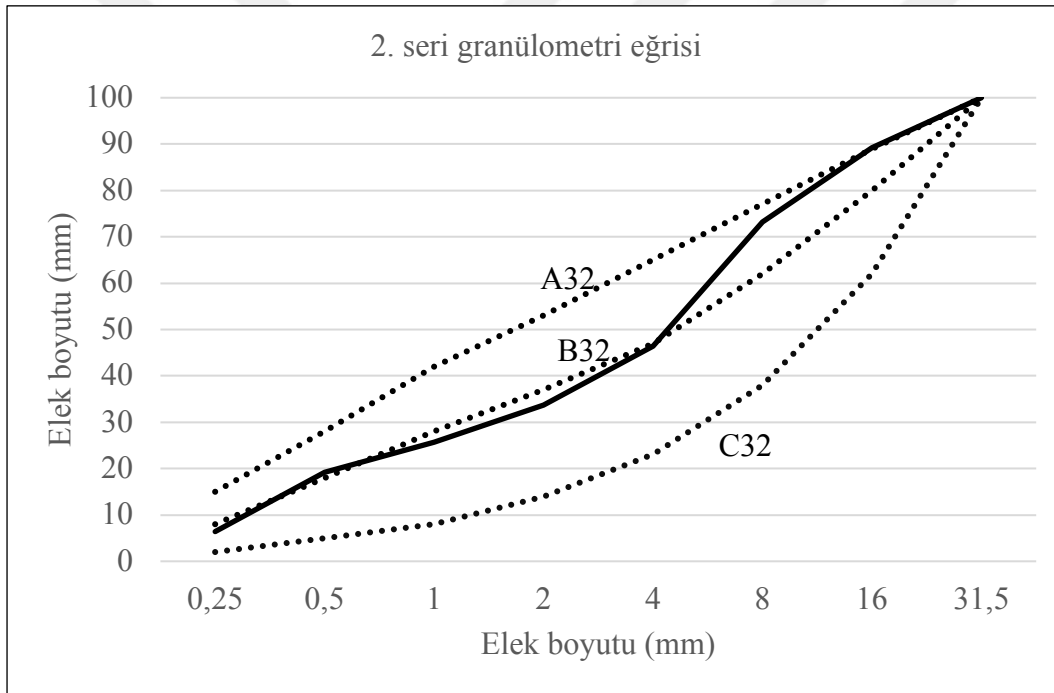
Malzemeler	1. seri				
	1. üretim	2. üretim	3. üretim	4. üretim	5. üretim
Çimento (kg)	270	310	400	450	500
Su (l)	224	208	180	149	140
Su/çimento	0,83	0,67	0,45	0,33	0,28
Akışkanlaştırıcı kt. (kg)	-	-	2	7	8
Kırma taş no 1 (kg)	721	722	720	736	728
Kırma taş no 2 (kg)	364	365	364	372	368
Kum (kg)	710	711	709	725	717

2.2.2.2. Seri

Deneysel çalışmaların ikinci aşaması olan 2. seri üretimi; 1. seriden farklı olarak ferrokrom cürufunun agrega olarak kullanıldığı üretim grubunu oluşturmaktadır. Malzeme olarak; Portland CEM I 42,5 R çimento, su, doğal kum, üç farklı incelikteki ferrokrom cüruf agregası ve su/bağlayıcı miktarının yeterli işlenebilirliği vermediği

durumlarda ise MasterGlenium RMC 303 akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır.

Karışım oranları özgül ağırlık deneyi öncesi yapılan numaralandırmalar doğrultusunda hesaplanmıştır. 1. seri üretiminde olduğu gibi karışımlarda kullanılacak malzemelerin miktarını belirlemek için granülometri eğrisi oluşturulmuş ve TS 802 (2016) standardında da belirtilen A₃₂, B₃₂ ve C₃₂ granülometri değerleri dikkate alınarak ferrokrom cürufu agregası ve doğal kum ile üretilebilecek en ideal karışım agregasının oranları belirlenmiştir. Bulunan oranlar; ferrokrom cürufu 1 numaralı agregası için %30, ferrokrom cürufu 2 numaralı agregası için %20, ferrokrom cürufu 3 numaralı agregası için %15 ve doğal kum için %35 olarak belirlenmiştir. Bu durumda oluşan granülometri eğrisi Şekil 2.1’de verildiği gibidir.



Şekil 2.2: 2. Seri üretiminin granülometri eğrisi

Belirlenen malzeme oranları için yapılan hesaplar ile bulunan malzeme miktarları 1 m³ için Çizelge 2.8’de verildiği gibidir.

Çizelge 2.8: 2. Seri üretimi için kullanılan malzeme miktarları.

Malzemeler	2. seri				
	1. üretim	2. üretim	3. üretim	4. üretim	5. üretim
Çimento	270	310	400	450	500
Su (l)	224	208	180	149	140
Su/çimento	0,83	0,67	0,45	0,33	0,28
Akışkanlaştırıcı kt. (kg)	-	-	2	8	16
Ferrokrom cüruf agregası no 1 (kg)	599	600	598	612	605
Ferrokrom cüruf agregası no 2 (kg)	390	390	389	398	394
Ferrokrom cüruf agregası no 3 (kg)	311	311	310	317	313
Kum (kg)	621	622	620	635	627

2.2.3 3. Seri

Deneysel çalışmaların üçüncü ve son aşaması olan 3. seri üretimi; 1. seriden farklı olarak ferrokrom cürufunun agrega olarak kullanıldığı, 1. ve 2. seriden farklı olarak Portland çimentosu yerine bağlayıcı olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kullanıldığı üretim grubunu oluşturmaktadır. Malzeme olarak; öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, su, doğal kum, üç farklı incelikteki ferrokrom cüruf agregası, alkalin aktivatörler olarak; sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat ((SiO₂)(Na₂O)(H₂O)), su/bağlayıcı miktarının yeterli işlenebilirliği vermediği durumlarda ise MasterGlenium RMC 303 akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır.

Karışımda kullanılacak agregalar, ferrokrom cürufu agregası olduğu için 2. seri üretimindeki granülometri değerleri ve karışım oranları aynen korunmuştur. Bu durumda kullanılacak agregaların oranları; ferrokrom cürufu 1 numaralı agrega için %30, ferrokrom cürufu 2 numaralı agrega için %20, ferrokrom cürufu 3 numaralı agrega için %15 ve doğal kum için %35 olarak aynı bırakılmıştır.

3. seri üretiminde, ilk iki üretimden farklı olarak hesaplamalar içerisine alkalin aktivatörler dahil edilmiştir. Alkalin aktivatörler olarak, granüle yüksek fırın cürufuna kütlece %7,1 oranında sodyum hidroksit (NaOH) ve kütlece %17,34 sodyum silikat ((SiO₂)(Na₂O)(H₂O)) beraber kullanılmıştır. Alkalin aktivatörlerden ilki olan

sodyum hidroksit, beton karışımına katılmadan önce katı ve pelet hâlde olduğundan dolayı su içerisinde çözülmüştür. Çözelti için kullanılacak su ve katı sodyum hidroksitin miktarları ön deneyler sonucu belirlenmiştir. Bulunan sonuçlar; sodyum hidroksit çözeltisinin %47'sini su, %53'ünü ise katı haldeki sodyum hidroksit peltesi olacak şekilde karışım hazırlanmıştır. Kullanılan bir diğer aktivatör olan sodyum silikat ise hazır olarak ambalajında sıvı olarak üretilmiştir. Bu yüzden ayrıca suda çözmeye gerek kalmamıştır. Her iki aktivatör de asıl malzemeler olan ferrokrom cüruf agregası, doğal kum, yüksek fırın cürufu ve su bir araya getirilip, karıştırıldıktan sonra eklenmiştir.

Son olarak bu serideki karma suyun hesabında, pelet hâlde bulunan sodyum hidroksiti (NaOH) çözmek için gerekli olan karışım suyu ile hâli hazırda sıvı çözelti olarak kullanılan sodyum silikat ((SiO₂)(Na₂O)(H₂O)) içerisindeki su miktarları düşürülerek son değerler bulunmuştur. 1 m³ için bulunan malzeme miktarları Çizelge 2.9'da verildiği gibidir.

Çizelge 2.9: 3. Seri üretimi için kullanılan malzeme miktarları.

Malzemeler	3. seri				
	1. üretim	2. üretim	3. üretim	4. üretim	5. üretim
Yüksek fırın cürufu (kg)	270	310	400	450	500
Toplam su miktarı (l)	224	208	180	149	140
Su/çimento	0,83	0,67	0,45	0,33	0,28
Akışkanlaştırıcı kt. (kg)	-	-	2	8	16
Ferrokrom cüruf agregası no 1 (kg)	571	550	534	539	524
Ferrokrom cüruf agregası no 2 (kg)	372	358	347	351	341
Ferrokrom cüruf agregası no 3 (kg)	296	285	277	280	272
Kum (kg)	593	570	554	559	544
Sodyum silikat (kg)	47	54	69	78	87
Sodyum silikattan gelen su miktarı (l)	35	40	51	58	64
Sodyum hidroksit peltesi (kg)	10	12	15	17	19
Sodyum hidroksit için gerekli su mikt. (l)	9	10	13	15	17
Karma suyu (l)	180	158	116	76	59

2.3 Üretim Aşaması

Üç seri için de beton üretimi, 50 litre kapasiteli paslanmaz çelikten yapılmış olan beton mikseri kullanılarak yapılmıştır.

Malzemeler bir araya getirilip beton karıştırıcısının içerisine, inceden kalına doğru olacak şekilde döküldükten sonra 5 dakika kadar karıştırılmıştır. Yeterli işlenebilirliğin sağlanmadığı durumlarda akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmış, işlenebilirliğin yeterli olduğu durumlarda ise herhangi bir katkı kullanılmamıştır. Betonun taze hâlde iken yapılan deneyler olan birim ağırlık alma ve slump deneyi, üretimden hemen sonra, betonlar kalıplara dökülmeden önce yapılmıştır.

Üretim sonrası elde edilen beton karışımı, 10 adet 100mm x 200mm ebatlarına sahip silindir ve 4 adet 7mm x 7mm x 280mm ebatlarına sahip prizma kalıplara yerleştirilmiştir. Yerleştirme öncesi kalıplar temizlenmiş, ince bir tabaka halinde kalıp yağı sürülmüştür. Kalıplara döküm sırasında betonun tam olarak yerleşmesi için sarsma tablası kullanılmış ve ideal bir yerleşim sağlanmıştır. Döküm sonrasında kalıplar rutubetli ortamda tutulmuş, hidratasyon sırasında oluşabilecek su kaybının önüne geçilmeye çalışılmıştır. Kalıpların sökülmesi beton dökümünden 24 saat sonra yapılmış ve numaralandırılarak, oda sıcaklığındaki kür havuzlarına yerleştirilmiştir.

2.4 Deneyler

2.4.1 Beton taze hâldeyken yapılan deneyler

Beton üretiminin hemen sonrasında, beton henüz prizini almamış iken birim ağırlık ve çökme deneyi yapılmıştır.

2.4.1.1 Birim ağırlık deneyi

Birim ağırlık deneyi, TS EN 12350-6 (2010) standardına uygun olarak yapılmıştır. Ölçüm için kullanılan kovanın hacmi 7 litredir. Birim ağırlık deneyi öncesinde boş kovanın ağırlığı 0,1 hassaslıktaki terazi ile belirlenip, kaydedilmiştir. Üretim sonrasında beton bu kovaya doldurulmuştur. Beton, kaba yerleştirildikten hemen sonra, sarsma tablası yardımıyla tam sıkışma elde edilecek, ancak ayrışma olmayacak ve yüzeye aşırı şerbet çıkmayacak şekilde sıkıştırılmıştır. Kovanın son durumdaki ağırlığı, 0,1 hassaslıktaki terazi ile belirlenip kaydedilmiş ve kovanın hacmi yardımıyla birim ağırlıklar belirlenmiştir.

Birim ağırlığı belirlemek için 2.1 bağıntısı kullanılmıştır.

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (2.1)$$

Burada;

D: Taze betonun yoğunluğu, kg/m³,

m₁: Kabin kütlesi, kg,

m₂: Kabin, içerisindeki beton numune ile birlikte toplam kütlesi, kg,

V: Kabin hacmi, m³'tür.

2.4.1.2 Çökme deneyi

Bu deney, TS EN 12350-2 (2010) standardına uygun olarak yapılmıştır. Çökme deneyi, betonun işlenebilirliği hakkında bilgi veren bir deneydir.

Öncelikle kalıbın iç yüzeyi ile taban plâkası, yüzeyde serbest su kalmayacak şekilde nemlendirilmiş ve kalıp, yatay konumdaki taban plâkası üzerine yerleştirilir. Betonun doldurulması esnasında, kalıbın kenarlarından sıkıca bastırılarak taban plakasına sabitlenir.

Taze beton, kalıba eşit kalınlıkta üç tabaka halinde ve her tabakanın sıkıştırılmış durumdaki kalınlığı, kalıp yüksekliğinin yaklaşık olarak 1/3'ü olacak şekilde doldurulduktan sonra sıkıştırma çubuğu ile 25 defa şişlenerek sıkıştırılır. Bu uygulama her 1/3 yükseklikte tekrar edilir. Sıkıştırma çubuğu darbelerinin, her tabakanın yüzey alanına düzgün dağılmasına dikkat edilmiştir. Sıkıştırma işleminin tamamlanmasından sonra, kalıp üst seviyesinden taşan fazla beton, mala yardımıyla sıyrılıp alınmış ve yüzey düz bir hâle getirilmiştir.

Düzgün çökme meydana gelen deneylerde, çökme değeri (h), şekilde gösterildiği gibi ölçülür. Çökme değeri sonuçları, en yakın 10 mm'ye yuvarlatılarak gösterilecektir.

2.4.2 Sertleşmiş beton üzerinde yapılan deneyler

Kalıplardan çıkartıldıktan sonra kür havuzuna koyulan numuneler, 28 gün boyunca oda sıcaklığındaki bu havuzlarda bekletilmiştir. Kür havuzundan çıkartıldıktan sonra kür havuzunun bulunduğu odada 1 gün boyunca kuruması için bekletilmiştir. Daha sonra silindir numunelere yapılacak deneylerde, uygulanacak yükü düzgün olarak

dağıtmak için kum-çimento karışımı kullanılarak başlık yapılmıştır. 35. günde bütün sertleşmiş beton deneyleri numuneler üzerinde yapılmıştır.

2.4.2.1 Basınç dayanım deneyi

Basınç dayanımının belirlenmesi için TS EN 12390-3 (2010) standardına uygun olacak şekilde deneyler yapılmıştır. Basınç dayanım testi için 100mm x 200mm ebatlarındaki silindir numuneler kullanılmıştır. Testler için Amsler marka 500 ton kapasiteli pres makinesi kullanılmıştır.

Deney öncesi numunelerin yüzeyleri dikkatle temizlenmiştir. Aynı şekilde deney öncesinde, basınç makinesinin yükleme başlıklarının da temiz olmasına özen gösterilmiştir. Numuneler, alt yükleme başlığının tam merkezine yerleştirilmiş ve sabit bir yükleme hızında, numunelerin taşıyabileceği maksimum değere kadar yükleme yapılmıştır. Yük göstergesinden okunan en büyük değer kaydedilerek, aşağıda verilen 2.2 denkleminin de yardımıyla basınç dayanımları bulunur.

$$F_c = \frac{F}{A_c} \quad (2.2)$$

Burada;

F_c : Basınç dayanımı, MPa (N/mm²),

F : Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N,

A_c : Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm²'yi ifade etmektedir.

Basınç dayanımı, en yakın 0,1 MPa (N/mm²)'ye yuvarlatılarak gösterilecektir.

2.4.2.2 Yarmada çekme dayanımı deneyi

Yarma deneyleri TS EN 12390-6 (2010) standardına uygun olacak şekilde yapılmıştır.

Silindir numuneler, deney öncesinde iyice temizlenmiştir. Ardından uygulanacak yükü düzgün olarak dağıtmak için yatay olarak makinenin merkezine yerleştirilmiş, silindir numunelerin alt ve üst kısımlarına karşılıklı olacak şekilde birer çita konulmuştur. Sabit bir yükleme hızında numuneler yarılanaya kadar deneye devam edilmiştir. Yük göstergesinden okunan en büyük değer kaydedilerek, aşağıda verilen 2.3 denkleminin de yardımıyla yarmada çekme dayanımları bulunur.

$$F_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (2.3)$$

Burada;

F_{ct}: Yarmada çekme dayanımı, MPa (N/mm²),

F: En büyük yük, N,

L: Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu, mm,

d: Numunenin seçilen en kesit boyutu, mm'dir.

Yarmada çekme dayanımı en yakın 0,05 Mpa (N/mm²)'ye yuvarlatılarak gösterilecektir.

2.4.2.3 Elastisite modülü ve gevreklik indisinin belirlenmesi için yapılan deneyler

Elastisite modülü ve gevreklik indisi aynı deney içerisinde, farklı hesaplar ile bulunmuştur.

Deneyler, Amsler marka 500 ton kapasiteli pres makinesinde yapılmıştır. İlk olarak, numunelerin boyuna şekil değiştirmelerini ölçmek için numunelerin ortalanarak sabitlendiği ve uygulama eksenine boyunca meydana gelen kısalmaların iki katını veren 1/1000 mm hassasiyetine sahip komparatörlü bir çerçeve takıldı. Numuneler, komparatörlü çerçeve takılı iken alt ve üst yükleme başlığı arasında merkezi olarak yerleştirilerek, sabit hızda yüklemeler yapıldı. Her 1 tonda bir, bu yüklere karşılık gelen boyuna şekil değiştirmeler okundu.

Her bir üretim için, basınç dayanım testi sonuçlarından yararlanılarak, ortalama basınç mukavemetinin %80-90'ına denk gelen yükleme değerlerine kadar bu okumalar devam etmiştir. Bu değerler kesin olmadığı için, şekil değiştirme hızının önemli ölçüde arttığı bölgelerde yüklemeler durdurulmuş ve yük aynı hızda boşaltılarak geri okumalar yapılmıştır. Bu geri okumalar, yükleme değeri sıfıra ulaşıncaya kadar devam etmiştir.

Son aşamada ise boşaltılan yük, yine aynı hızda tekrar yüklenerek, numunelerin ulaşabileceği en büyük dayanım değerine kadar yeni şekil değiştirme değerleri okunmuştur.

Uygulanan bu yükleme ve şekil değiştirme okumaları sonucunda gerilme-şekil değiştirme grafiği oluşturulmuştur. Numunelere ait grafikler deney sonuçları kısmında verilecektir.

Elastisite modülü hesabı

Elastisite modülünün hesabı için izlenen yöntem su şekildedir: betonun basınç dayanımının yaklaşık olarak %30'una denk gelen gerilme-şekil değiştirme bölgesinde elastisite modülünün hemen hemen sabit olduğu kabul edilir. Bu bölgede eğri yaklaşık olarak lineer bir davranış sergiler.

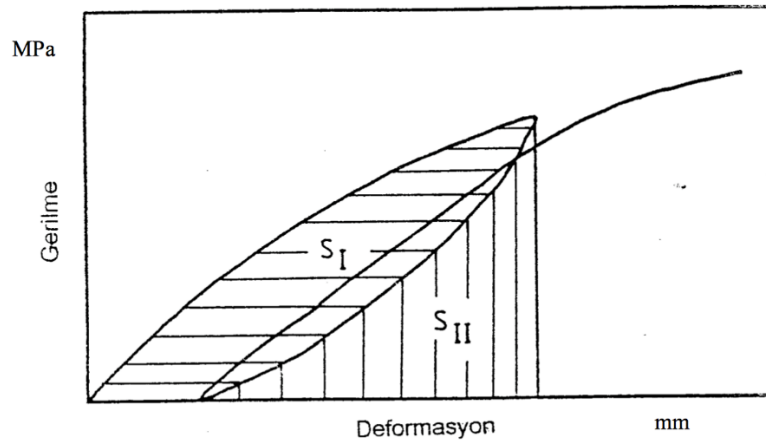
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.4)$$

2.4 bağıntısının da yardımıyla lineer bölgenin eğimi bulunarak, elastisite modülü değerleri bulunmuştur.

Gevreklik indisi hesabı

Betonun gevreklik indisi (G.İ) basınç dayanımının %80-100 arasında "tersinir deformasyon enerjisinin tersinmez deformasyon enerjisine oranı" olarak tanımlanır.

şekil 2.3'te gösterildiği gibi S_I numunedeki hasara bağlı olarak tersinmez (kalıcı) deformasyon enerjisi, S_{II} ise tersinir (elastik) deformasyon enerjisidir. Gevreklik indisi değerinin büyümesi, malzemenin gevrekliğinin arttığını gösterir.



şekil 2.3: Gevreklik indisi hesabında kullanılan gerilme/deformasyon grafiği.



3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3.1 Taze Beton Deney Sonuçları

Taze beton deneyleri olan birim ağırlık ve çökme deneylerinin sonuçları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Birim ağırlık ve çökme deneyi sonuçları.

	1. Seri					2. Seri					3. Seri				
	K1	K2	K3	K4	K5	F1	F2	F3	F4	F5	A1	A2	A3	A4	A5
Teorik birim ağırlık (kg/m ³)	2290	2310	2370	2430	2450	2420	2460	2510	2590	2600	2356	2314	2331	2376	2389
Deneysel birim ağırlık (kg/m ³)	2380	2400	2400	2440	2440	2370	2480	2490	2500	2600	2508	2505	2520	2520	2490
Çökme değerleri (cm)	19	18	12	22	10	19	10	7	11	-	16	19	18	12	-

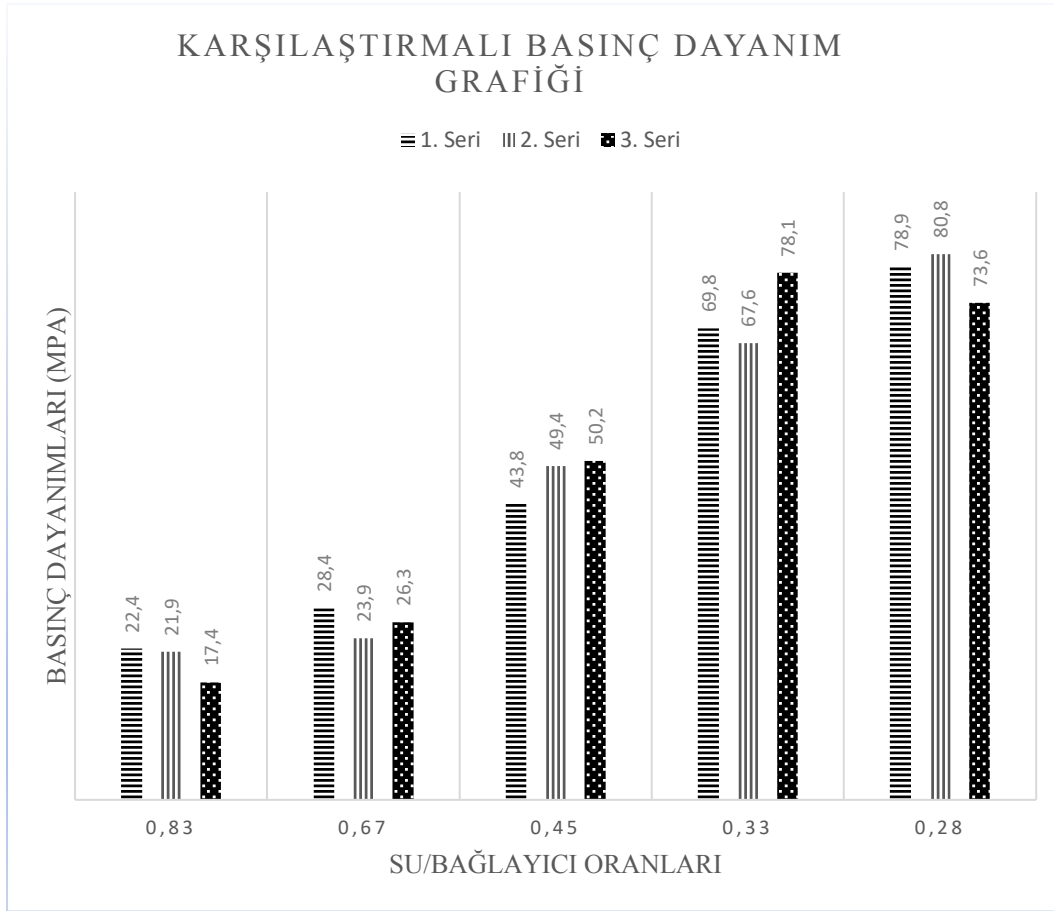
3.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

3.2.1 Basınç dayanım deneyi sonuçları

28. günde kür havuzundan çıkartılan ve 35. günde basınç dayanım deneyi yapılan numunelere ait sonuçlar Çizelge 3.2’de ve karşılaştırmalı grafik Şekil 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.2: Basınç dayanım deneyi sonuçları.

Seriler	1. Seri					2. Seri					3. Seri				
	Numuneler	K1	K2	K3	K4	K5	F1	F2	F3	F4	F5	A1	A2	A3	A4
Basınç dayanımları (MPa)	22,4	28,4	43,8	69,8	78,9	21,9	23,9	49,4	67,6	80,8	17,4	26,3	50,2	78,1	73,6



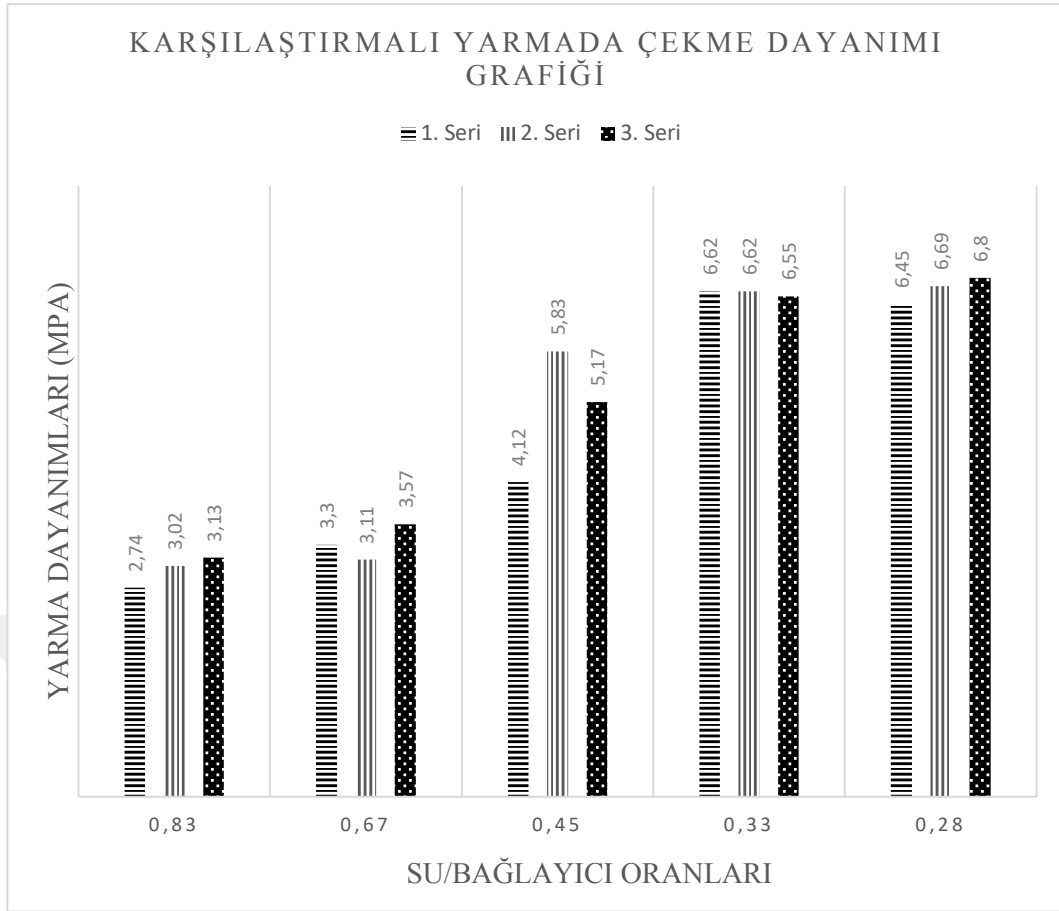
Şekil 3.1: Karşılaştırmalı basınç dayanım sonuçları.

3.2.2 Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

28. günde kür havuzundan çıkartılan ve 35. günde yarma deneyi yapılan numunelere ait sonuçlar Çizelge 3.3'te ve karşılaştırmalı grafik Şekil 3.2'te verilmiştir.

Çizelge 3.3: Yarmada çekme dayanım deneyi sonuçları.

Seriler	1. Seri					2. Seri					3. Seri					
	Numuneler	K1	K2	K3	K4	K5	F1	F2	F3	F4	F5	A1	A2	A3	A4	A5
Yarma dayanımları (MPa)		2,74	3,30	4,12	6,62	6,45	3,02	3,11	5,83	6,62	6,69	3,13	3,57	5,17	6,55	6,80



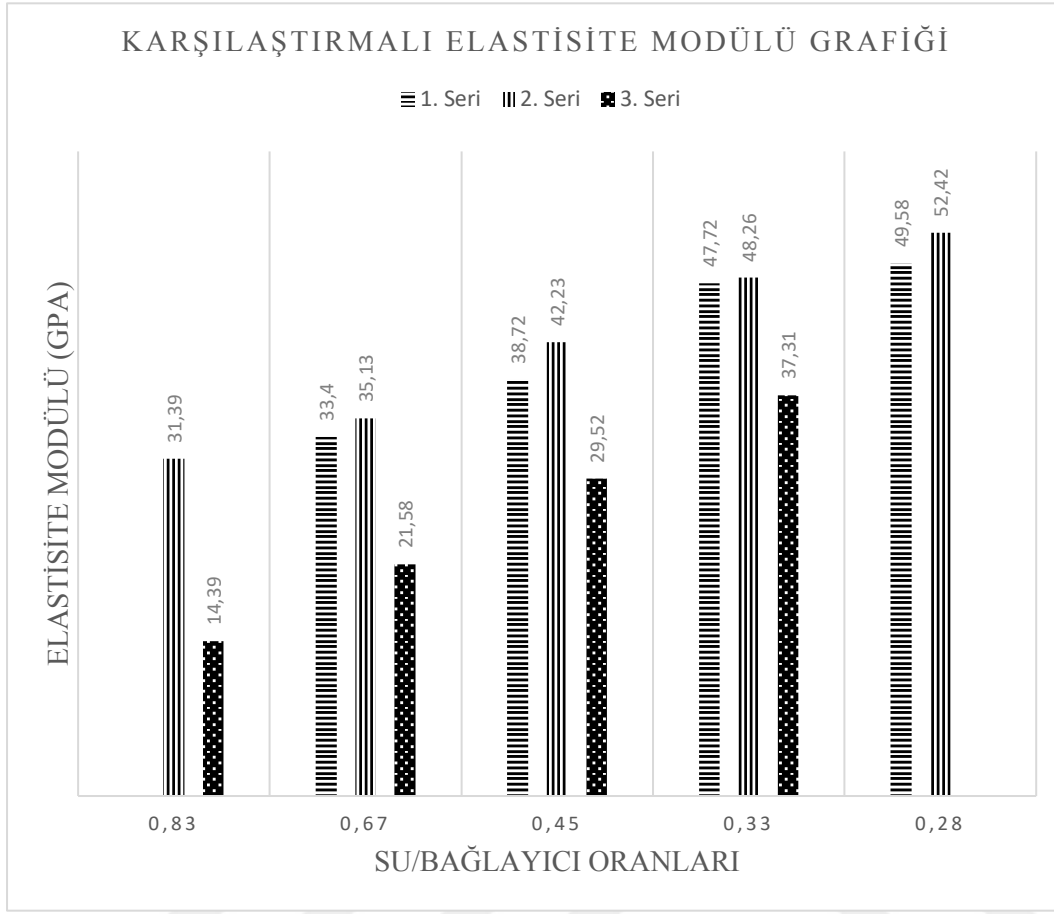
Şekil 3.2: Karşılaştırmalı yarmada çekme dayanımı sonuçları.

3.2.3 Elastisite modülü sonuçları

28. günde kür havuzundan çıkartılan numuneler, 35. günde deney için hazırlanmıştır. Numunelere komparatörlü çerçeve takılmış ve bu çerçeve yardımıyla numunelere ait şekil değiştirme okumaları yapılmıştır. Elde edilen veriler gerekli formüller içerisinde kullanılarak, numunelere ait olan elastisite modülü sonuçları bulunmuştur. Bu sonuçlar Çizelge 3.4'te ve karşılaştırmalı grafik Şekil 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.4: Elastisite modülü sonuçları

Seriler	1. Seri					2. Seri					3.Seri				
	Numuneler	K1	K2	K3	K4	K5	F1	F2	F3	F4	F5	A1	A2	A3	A4
Elastisite modülleri (GPa)	-	33,40	38,72	47,72	49,58	31,39	35,13	42,23	48,26	52,42	14,39	21,58	29,52	37,31	-



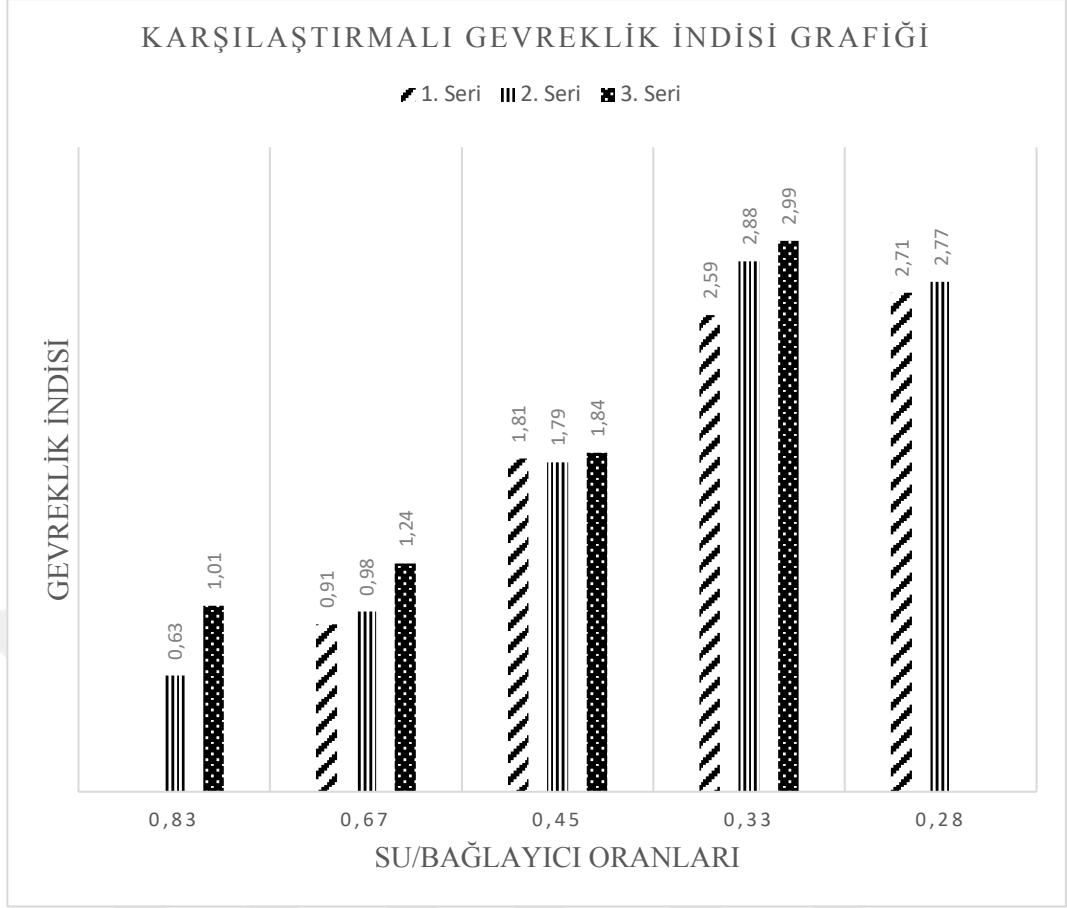
Şekil 3.3: Karşılaştırmalı elastisite modülü grafiği.

3.2.4 Gevreklik indisi sonuçları

Gevreklik indisinin hesabı, daha önceki bölümlerde anlatılan şekilde yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 3.5’te ve karşılaştırmalı grafik Şekil 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.5: Gevreklik indisi sonuçları.

Seriler	1. Seri					2. Seri					3. Seri				
Numuneler	K1	K2	K3	K4	K5	F1	F2	F3	F4	F5	A1	A2	A3	A4	A5
Gevreklik indisi	-	0,91	1,81	2,59	2,71	0,63	0,98	1,79	2,88	2,77	1,01	1,24	1,84	2,79	-

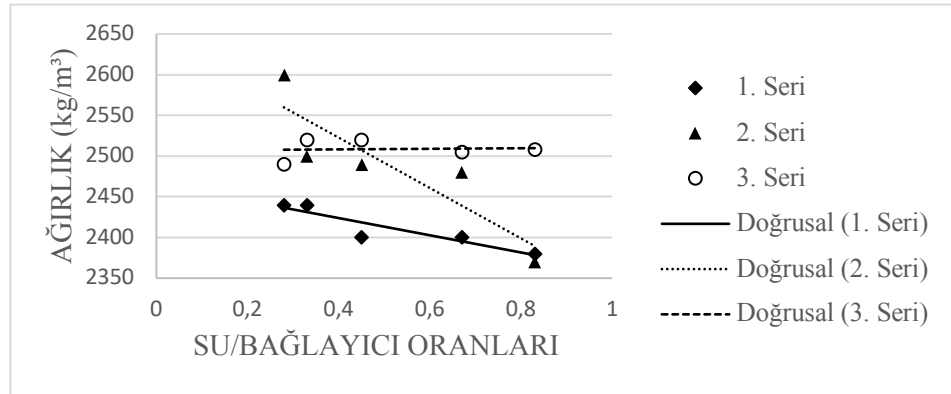


Şekil 3.4: Karşılaştırmalı gevreklik indisi sonuçları.

3.3 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

3.3.1 Birim ağırlıkların değerlendirilmesi

Birim ağırlıkların su/bağlayıcı oranına göre değişimi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



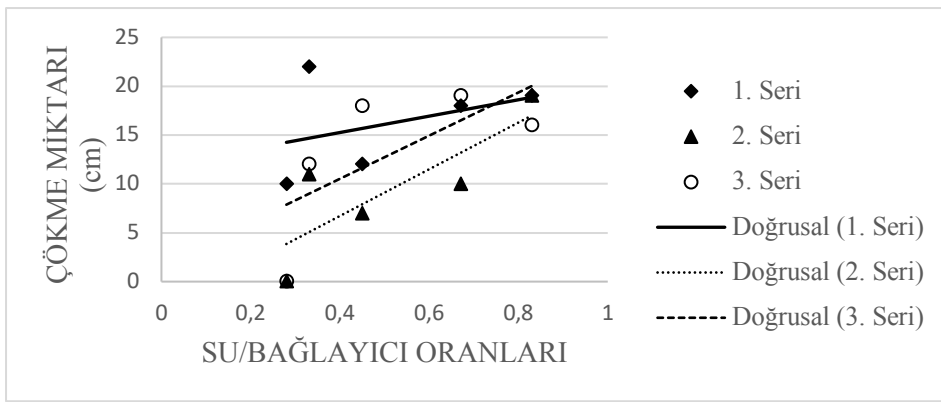
Şekil 3.5: Birim ağırlıkların su/ bağlayıcı oranına göre değişimi.

İlk iki seride azalan su/bağlayıcı oranı ile birlikte birim ağırlıklar artmıştır. 3. Seri, daha önce bahsedildiği gibi alkalin aktivatörler kullanılarak üretilen geopolimer beton

grubunu oluşturmaktadır. Bu seriye ait birim ağırlıklara bakıldığında ise su/bağlayıcı oranına bağlı olarak herhangi keskin bir lineer artma ya da azalma görülmemektedir. Bunun sebebi olarak kullanılan malzeme miktarları incelenmelidir. İlk iki seride, su/bağlayıcı miktarı düştükçe, kullanılan agrega ağırlıkları da belli ölçüde artarken, 3. Seride alkalin aktivatörlerin kullanılmasından dolayı bu durum gerçekleşmemiştir. Aksine su/bağlayıcı oranı düştükçe kullanılan yüksek fırın cürufu ve alkalin aktivatör miktarı artarken, kullanılan agregaların miktarları azalmıştır.

3.3.2 Çökme miktarlarının değerlendirilmesi

Çökme miktarının su/bağlayıcı oranına göre değişimi Şekil 3.6’da gösterilmiştir.

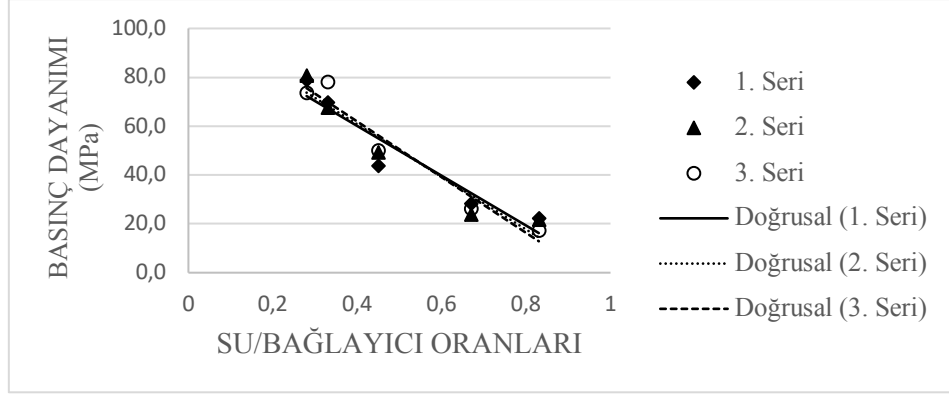


Şekil 3.6: Çökme miktarının su/ bağlayıcı oranına göre değişimi.

Üretilen üç seri için de su/bağlayıcı miktarı azaldıkça, çökme miktarlarının da azaldığı söylenebilir. Daha önce de bahsedildiği gibi yeterli islenebilirliğin sağlanamadığı durumlarda akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmış, bu da çökme değerlerini etkilemiştir. Ancak şunu da belirtmek gerekir ki ince malzeme miktarının çok fazla olduğu; 0,28 su/bağlayıcı oranına sahip 2. ve 3. Seri üretimlerinde elde edilen çökme değeri, akışkanlaştırıcı kullanılmasına rağmen sıfırdır. Bu da doğal olarak istenmeyen bir durumdur.

3.3.3 Basınç dayanımlarının değerlendirilmesi

Basınç dayanımlarının su/bağlayıcı oranına göre değişimi Şekil 3.7’deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Basınç dayanımlarının su/ bağlayıcı oranına göre değişimi.

Grafikten de görülebileceği gibi üretilen tüm serilerde azalan su/bağlayıcı oranı ile beraber basınç dayanımlarında keskin bir artış mevcuttur. Elde edilen en yüksek basınç dayanımı 2. Seri üretiminin 0,28 su/bağlayıcı oranına sahip üretiminde, 80,8 MPa olarak bulunmuştur.

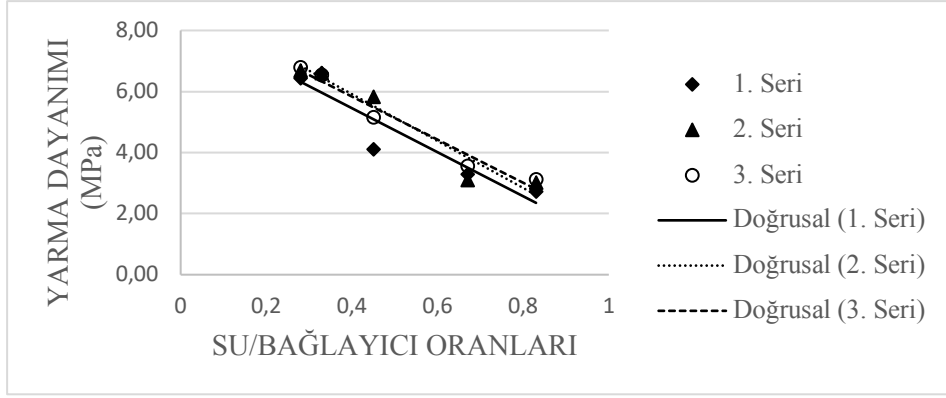
1. ve 2. Seri üretimleri arasındaki temel fark kullanılan agrega türü olup, kullanılan diğer karışım materyalleri aynı miktarda tutulmuştur. Bu durumla beraber basınç dayanım sonuçlarına bakıldığında, ferrokrom cüruf agregasının betonda Portland çimentosu ile beraber kullanılmasının basınç dayanımı açısından uygun olduğu görülmektedir.

3. Seri üretiminde, daha önce bahsedildiği gibi ferrokrom cüruf agregası, yüksek fırın cürufu ve alkalin aktivatörler kullanılmıştır. Basınç dayanım sonuçlarına bakıldığında; özellikle 0,45 ve 0,33 su/bağlayıcı oranlarında, kontrol grubu olan 1. Seri üretimine göre çok daha iyi sonuçlar elde edilmiş ve 78,1 MPa değerine kadar ulaşılmıştır. Yüksek su/bağlayıcı oranlarında ise kontrol grubu daha iyi performans göstermiştir.

3. serinin üretiminde, en düşük su/bağlayıcı seviyesi olan 0,28 oranında beton kalıplara tam yerleşmemiş ve prizini istenilen şekilde alamamıştır. Kalıbın üst kısmından alt kısmına doğru 6-7 cm'lik kısım çok boşluklu olacak şekilde prizini aldığından dolayı, testler öncesinde o bölge kesilmiş ve testler kesilen numuneler üzerinde yapılmıştır. Yapılan basınç dayanım testleri sonucunda 73,6 MPa değerine ulaşılmıştır.

3.3.4 Yarma dayanımlarının değerlendirilmesi

Yarmada çekme dayanımlarının su/bağlayıcı oranına göre değişmesi Şekil 3.8'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Yarma dayanımlarının su/bağlayıcı oranına göre değişimi.

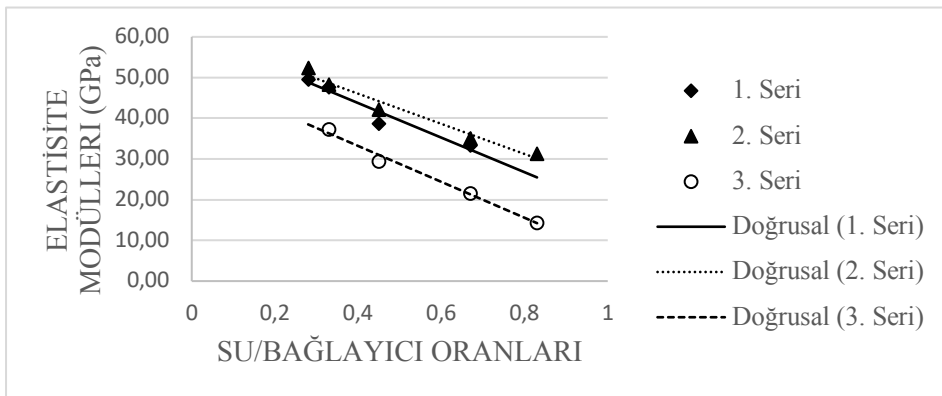
Grafikten de görülebileceği gibi üretilen tüm serilerde su/bağlayıcı oranı azaldıkça, yarma dayanımı artış göstermektedir. Testler sonucu elde edilen en yüksek dayanım 3. Seri üretiminin 0,28 su/bağlayıcı oranına sahip üretiminde, 6,80 MPa olarak bulunmuştur.

Yarmada çekme dayanımı testinde, basınç dayanım testinde olduğu gibi seriden seriye büyük farklılıklar gözlemlenmemiştir. Bununla beraber, 2. Seri olarak üretilen numuneler, genel olarak kontrol grubuna göre bir nebze daha iyi sonuçlar vermiştir. 2. Seri olarak üretilen numunelerde ulaşılan en yüksek çekmede yarma dayanımı değeri 6,69 MPa olmuştur.

3. Seri olarak üretilen numuneler ise genel olarak hem kontrol grubuna göre hem de 2. Seriyeye göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

3.3.5 Elastisite modülü sonuçlarının değerlendirilmesi

Elastisite modüllerinin su/bağlayıcı oranına göre değişimi Şekil 3.9'daki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Elastisite modüllerinin su/bağlayıcı oranına göre değişimi.

Grafikten de görülebileceği gibi üretilen tüm serilerde su/bağlayıcı oranı azaldıkça, elastisite modülünün değerinde artış görülmektedir. Testler sonucu elde edilen en yüksek elastisite modülü 2. Seri üretiminin 0,28 su/bağlayıcı oranına sahip üretiminde, 52,42 GPa olarak bulunmuştur.

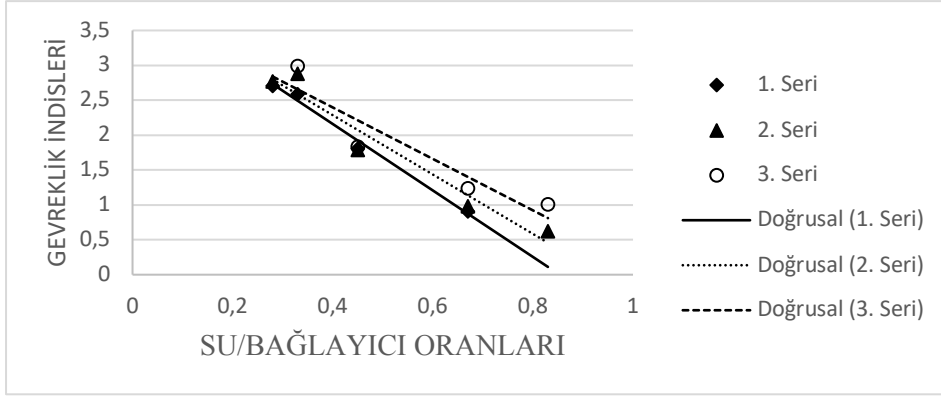
Üretilen seriler ayrı ayrı incelendiğinde; 2. Seride üretilen beton numunelere ait elastisite modülü sonuçlarının, kontrol grubuna göre daha yüksek değerler verdiği görülmektedir. 2. Seri üretiminde agrega olarak kullanılan ferrokrom cürufunun betonun elastisite modülünde artışa neden olduğu söylenebilir.

3. seride üretilen beton numuneleri incelendiğinde ise bu serideki numunelere ait elastisite modülü değerleri, kontrol grubuna göre çok daha düşük performans göstermiştir. Bu durumun değerlendirilmesinde, oluşan betonun iç yapısına bakılmalıdır. Daha önce '1.3.4.3 Reaksiyon ürünleri' başlığında değinildiği gibi alkalın aktivatörlerin yüksek fırın cürufu ile beraber kullanıldığı durumlarda geopolimerizasyon sonucu oluşan ana reaksiyon ürünü C-A-S-H jelidir. Bu jel, normal Portland çimentosunun ana hidrasyon ürünü olan C-S-H jeline benzese de yapıları farklılık gösterir. Bununla beraber alkalın aktivatör kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda oluşan ürünün mikro yapısını ve son özelliklerini etkileyen faktörler normal Portland çimentosu ile üretilen betonlara göre çok daha fazladır. Geopolimerizasyon sürecini etkileyen faktörler; kür koşulları, kalsiyum içeriği, su içeriği, kullanılan bağlayıcının kimyasal kompozisyonu, kullanılan aktivatörlerin molar konsantrasyonu, dozajı (Na_2O /bağlayıcı) ve aktivatörlerin modülü ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) olarak sıralanabilir. Tüm bu etkenler göz önüne alındığında elastisite modülünde de istenen gelişimi sağlayabilmek için daha farklı kompozisyonlarda alkalın aktivatörler ve diğer malzemeler kullanılarak, yapılacak deneylerin sonuçları gözlemlenmelidir.

Son olarak daha önce bahsedildiği gibi 0,28 su/bağlayıcı oranına sahip beton numunelerinin üretimlerinde yaşanan problemden dolayı elastisite modülü hesabı yapılamamıştır. Bununla beraber bulunan en yüksek elastisite modülü değeri 0,33 su/bağlayıcı oranına sahip üretimlerde gerçekleşmiş olup, bulunan değer 37,31 GPa'dır.

3.3.6 Gevreklik indisi sonuçlarının değerlendirilmesi

Hesaplanan gevreklik indislerinin su/bağlayıcı oranına göre değişimi Şekil 3.10'daki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Gevreklik indislerinin su/bağlayıcı oranına göre değişimi.

Grafikten de görülebileceği gibi üretilen tüm serilerde su/bağlayıcı oranı azaldıkça, genel olarak gevreklik indisi değerinde artış görülmektedir. Hesaplamalar sonucu elde edilen en yüksek gevreklik indisi 3. Seri üretiminin 0,33 su/bağlayıcı oranına sahip üretiminde, 2,99 olarak bulunmuştur.

Üretilen seriler ayrı ayrı incelendiğinde; 2. Seride üretilen beton numunelerine ait gevreklik indislerinin, çok büyük farklılıklar olmasa da kontrol grubuna göre yüksek değerler verdiği görülmektedir. Bu durumun 2. Seri üretiminde agrega olarak kullanılan ferrokrom cürufundan kaynaklandığı söylenebilir. Nitekim ferrokrom cüruf agregasının yüzeyi, kontrol serisinin üretiminde kullanılan kırma taş agregasının yüzeyine kıyasla çok daha fazla pürüzlüdür. Bu özellik sayesinde çimento hamuru-agrega ara yüzeyindeki aderans çok daha güçlü olacaktır.

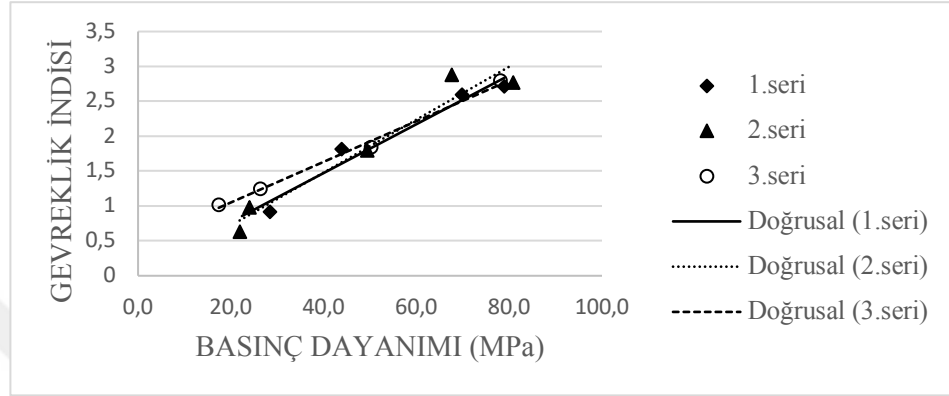
3. seride üretilen beton numuneleri incelendiğinde ise bu serideki numunelere ait gevreklik indisi değerleri hem kontrol grubuna göre hem de 2. Seriyeye göre daha yüksek değerler vermiştir. Daha önce değinildiği gibi 3. Seriyeye ait 0,28 su/bağlayıcı oranına sahip beton numunelerinin üretimlerinde yaşanan sıkıntılardan dolayı bu numunelerde gevreklik indisi hesabı yapılamamıştır. Buna rağmen bulunan en yüksek gevreklik indisi değeri 0,33 su/bağlayıcı oranına sahip üretimlerde gerçekleşmiş olup, bulunan değer 2,99 olarak hesaplanmıştır.

Bu seride de agrega olarak ferrokrom cürufu kullanıldığı için beton hamuru ile ferrokrom cüruf agregaları arasındaki aderans daha kuvvetlidir. Ayrıca bu seri, çimento kullanılmadan üretilmiştir. Bu yüzden betonun prizi ile başlayan, hidrasyon suresince devam eden kimyasal tepkimeler ve sonrasında oluşan beton içi bağlar,

normal Portland çimentosuna göre farklılık göstermektedir. Bu etkenin de 3. Seriyeye ait gevreklik indisleri değerlerini etkilediği söylenebilir.

3.3.7 Gevreklik indisi - basınç dayanımı ilişkisi

Şekil 3.11'deki grafik, betonun basınç dayanımına göre gevreklik indisinin değişimini göstermektedir.



Şekil 3.11: Basınç dayanımına göre gevreklik indisinin değişimi.

Şekildeki grafikten de görülebileceği gibi beton numunelere ait basınç dayanım değerleri arttıkça, numunelerin gevrekliği de artmaktadır.



4. SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1 Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ulaşılan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1. Su/bağlayıcı oranı azaldıkça basınç dayanımı, yarma dayanımı, elastisite modülü ve gevreklik indisi değerleri genel olarak artmıştır.
2. Basınç dayanımı arttıkça gevreklik indisi de artmıştır. Bu durum dayanımın artmasıyla, betonun daha gevrek bir malzeme haline geldiğini göstermektedir.
3. Ferrokrom cüruf agregasının kullanıldığı 2. Seriyeye ait deney sonuçları, bu agreganın normal Portland çimentosu ile beraber yapılacak üretimlerde kullanılmaya uygun olduğunu göstermektedir.
4. Ferrokrom cüruf agregasının sahip olduğu pürüzlü yüzeyden ötürü, bu agreganın kullanıldığı üretimler, kontrol grubuna kıyasla daha kuvvetli bir aderansa sahip olmuştur. Bu durum ise betona ait mekanik özellikler açısından genel olarak olumlu bir etkiye sahiptir.
5. 3. Seride bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufunun, agrega olarak ferrokrom cürufunun kullanılmasıyla tamamen çevre dostu bir malzeme elde edilmiştir.
5. 3. Seriyeye ait basınç dayanım testi sonuçları kontrol grubuna ait test sonuçları ile kıyaslandığında, özellikle 0,45 ve 0,33 su/bağlayıcı oranlarında 3. Seriyeye ait numuneler çok daha yüksek performans göstermiştir. Bununla beraber su/bağlayıcı oranının yüksek olduğu oranlarda (0,67 ve 0,83), 3. Seriyeye ait numuneler kontrol grubuna göre daha düşük dayanıma sahip olmuşlardır.
6. 3. Seriyeye ait elastisite modülü sonuçları incelendiğinde hem kontrol grubuna göre hem de 2. Seri olarak üretilen numunelere göre çok daha düşük sonuçlar vermiştir. Bu durum, oluşan geopolimer malzemeye ait iç yapı ile açıklanabilir. Bu iç yapı normal Portland çimentosu ile üretilen betona göre farklılık gösterir.
7. Yarma dayanımları açısından üretilen seriler arasında bariz bir fark görülememiştir.

Tüm seriler için su/ bağlayıcı oranı azaldıkça yarma dayanımlarında artış gözlenmiştir.

8. Tüm test sonuçlarına bakıldığında, ferrokrom cürufunun betonda agrega olarak kullanılmasının betonun mekanik özellikleri açısından uygun olduğu, hatta doğru oranlarda malzemeler ile kullanıldığı takdirde bu özellikleri iyileştirdiği söylenebilir.

4.2 Öneriler

Bu tez çalışmasında, ferrokrom cüruf agregasının hem Portland çimentolu betonda hem de alkalin çözeltilerinin aktivatör olarak kullanıldığı geopolimer özellikli betonda kullanılması araştırılmış ve genel olarak tatmin edici sonuçlara ulaşılmıştır.

Üretim maliyetleri, hedeflenen mekanik özellikler ve elastisite modülünde ulaşılan görece düşük sonuçlar da göz önüne alınarak, alkalin aktivatörlerin ve diğer materyallerin daha farklı oranlarda kullanıldığı, tamamen atık malzemelerden oluşan ve tamamen çevre dostu beton üretimi yapılabilir. Tamamen atık malzemelerden üretilen bu beton türünün durabilite özellikleri hakkında çalışma yapılabilir.

KAYNAKLAR

- ASTM C 186 (2005). Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standards.
- Bakker, Robert F. M., (1983). Permeability of Blended Cement Concrete,” *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-Products in Concrete, SP-79, American Concrete Institute, Detroit*, pp. 589-605.
- Bilgen, G., Kavak, A., Yıldırım, S. T., Çapar, Ö. F., (2010). Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründeki Yeri ve Önemi. 2. *Ulusal katı atık yönetimi kongresi*, Mersin, Türkiye: Mersin Üniversitesi
- Brooks, J.J., Wainwright P.J., Boukendakji M., (1992). Influence of slag type and replacement level on strength, elasticity, shrinkage and creep of concrete. *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, SP-132, vol 2. Proceedings of the 4th International Conference, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan*, pp. 1325–1341
- Davidovits, J., (2008). *Geopolymer. Chemistry and applications*. Institut Géopolymere, Saint-Quentin, France.
- Davidovitz, J. (1987). “Ancient and Modern Concretes: What is the difference?” *Concrete International, ACI*, pp 23-25.
- Erdoğan, T. Sinan ve Erdoğan, T. Y. (2010). Portland çimentosunun Joseph Aspdin tarafından icadı ve çimento üretiminde Aspdin ailesinin rolü. http://www.as-beton.com/pdf/portland_cimentosunun_icadi.pdf. Erişim tarihi:14 Kasım 2017.
- Erdoğan, T. Y. (2016). *Beton*. Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.
- Feldman, R. F., (1986). Pore structure, permeability and diffusivity as related to durability. *Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, 1986. vol I*, pp. 336–356.
- Fernández-Jiménez, A., Puertas, F., Sobrados, I., and Sanz, J., (2003). ‘Structure of calcium silicate hydrate formed in alkaline activated slag: influence of the type of alkaline activator’, *J. Am. Ceram. Soc.* 86, 1389–1394.
- Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., & Fernández-Jiménez, A. (2015). Crucial insights on the mix design of alkali-activated cement-based binders. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, pp. 49-73.
- Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., & Fernández-Jiménez, A. (2015). An overview of chemistry of alkali-activated cement-based binders. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, pp. 19-43.

- Hogan, F. J., and Meusel, J. W.,** (1981). Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast-Furnace Slag,” *Cement, Concrete, and Aggregates, V. 3, No. 1*, pp. 40-52.
- Hooton, R. D., and Emer J. J.,** (1980). Pelletized Slag Cement: Autoclave Reactivity. *Proceedings, 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, V. II*, pp. III-43-47.
- Justnes, H. and Martius-Hammer, T.A** (2016) Sürdürülebilirlik - Beton İnovasyonundaki Öncü Rolü (İnş.Yük.Müh. Yasin Engin, Çev.). *Hazır Beton Dergisi, 135*, 77-82.
- Kolousek, D., Brus, J., Urbanova, M., Andertova, J., Hulinsky, V., and Vorel, J.,** (2007). ‘Preparation, structure and hydrothermal stability of alternatice (sodium silicate-free) geopolymers’, *J. Mater. Sci. 42*, 9267–9275
- Kühl, H.,** (1908). *Slag cement and process of making the same. U.S. Patent No: 900,939.* Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Lirvan, G.G., Mayer A.,** (1986). Carbonation of granulated blast furnace slag cement concrete during twenty years of field exposure. *Proceedings of the 2nd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid.*
- Luther, M. D., Mikols, W.J., DeMaio, A.J., Whitliger, J.E.,** (1994). Scaling Resistance of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) Concretes. *SP-145, ed. by V.M. Malhotra. Proceedings of the 3rd International Conference, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan*, pp. 47–64
- Mather, B.,** (1957). Laboratory Tests of Portland Blast-Furnace Slag Cements. *ACI Journal, V. 54, No. 3*, pp. 205-232.
- Mehta, P. K.,** (1980). Durability of Concrete in Marine Environment-A Review. *Performance of Concrete in Marine Environment, SP-65, American Concrete Institute, Detroit*, pp. 1-20.
- Mehta, P. K.,** (1983). Pozzolanic and Cementitious By-Products as Mineral Admixtures for Concrete-A Critical Review. *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By- Products in Concrete, V. M. Malhotra, Ed., SP-79, American Concrete Institute, V. 1, Detroit*, pp. 1-46.
- Meusel, J. W., and Rose, J. H.,** (1983). Production of Granulated Blast Furnace Slag at Sparrows Point, and the Workability and Strength Potential of Concrete Incorporating the Slag. *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, SP-79, American Concrete Institute, Detroit*, pp. 867-890.
- Osborne, G. J.,** (1989). Carbonation and Permeability of Blast- Furnace Slag Cement Concretes from Field Structures. *Fly Ash, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, V. M. Malhotra, Ed., SP-114, American Concrete Institute, Detroit*, pp. 1209-1237.
- Pal S.C., Mukherjee, A., and Pathak, S.R.,** (2003), ‘Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete’, *Cem. Concr. Res 33*, 1481–1486.

- Palomo, A., Fernández-Jiménez A., Kovalchuk G., Ordoñez L.M. and Naranjo M.C.,** (2007). ‘OPC-fly ash cementitious system: study of the gel binders produced during alkaline hydration’, *J. Mater. Sci.* 42, 2958–2966.
- Provis J. and van Deventer J.S.J.** (2009). *Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Provis, J.L. and Bernal, S. A.,** (2014). Milestones in the analysis of alkali-activated binders. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 4 (2). pp. 74-84.
- Ramezani pour, A. A.** (2014). *Cement replacement materials*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin.
- Roy, D. M.,** (1999). Alkali-activated cements: Opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 29(2), 249–254.
- Roy, D. M., and Idorn, G.M.** (1982). “Hydration, Structure and Properties of Blast Furnace Slag Cements, Mortars, and Concrete,” *Proceedings, ACI Journal V. 79, No. 6*, 445-457.
- Roy, D. M., and Parker, K. M.,** (1983). Microstructures and Properties of Granulated Slag-Portland Cement Blends at Normal and Elevated Temperatures. *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, SP-79, American Concrete Institute, Detroit*, pp. 397-414.
- Shi, C., Krivenko, P. V., Roy, D.,** (2006). *Alkali-Activated Cements and Concretes*. London: Taylor & Francis.
- Swamy, R.N. and Bouikni, A.,** (1990). ‘Some engineering properties of slag concrete as influenced by mix proportioning and curing’, *ACI Mater. J.* 87, 210–220.
- Taylor, H.F.W.,** (1990). *Cement Chemistry*. London: Academic Press.
- Tokyay, M. ve Erdoğdu, K.,** (2009). Cüruflar ve cüruflu çimentolar, araştırmaların gözden geçirilmesi ve durum değerlendirmesi raporu, TÇMB Ar-ge Enstitüsü, Ankara, 97-2
- TS EN 1008** (2003). Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.
- TS EN 12350-2** (2010). Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.
- TS EN 12350-6** (2010). Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.
- TS EN 12390-3** (2010). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.

- TS EN 12390-6** (2010). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*
- TS EN 196-1** (2016). Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*
- TS EN 197-1** (2012). Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*
- TS EN 3526** (1980). Beton agregalarında özgül ağırlık ve su emme oranı tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*
- TS EN 802** (2016). Beton karışım tasarımı hesap esasları. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*
- TS EN 933-1** (2012). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*
- TS EN 933-2** (1996). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler kısım 2: Tane boyutu dağılımı tayini-Deney elekleri, elek göz açıklıklarını anma büyüklükleri. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*
- Vanden Bosch, V. D.,** (1980). Performance of Mortar Specimens in Chemical and Accelerated Marine Exposure. *Performance of Concrete in Marine Environment. SP-65, American Concrete Institute, Detroit*, pp. 487-507.
- Virgalitte, S. J., Luther, M. D., Rose, J. H., Mather, B., Bell, L. W., Ehmke, B. A., ... & Lewis, D. W.** (1995). Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete. *ACI Report 233R-95, American Concrete Institute, USA.*
- Vitruvius, Pollio** (1914). The ten books on architecture (Translated by Morris Hicky Morgan). *Harvard University Press, Cambridge, United Kingdom.*
- Wang, F.S., Rui-Lian, S., and Ying-Jing, C.,** (2005). ‘Study on modification of the high-strength slag cement material’, *Cement and Concrete Research* 35, 1344–1348.
- Wang, S.D., Pu X.C., Scrivener K.L., and Pratt, P.L.,** (1995). ‘Alkali-activated slag: a review of properties and problems’, *Cem. Concr. Res.* 17, 93–102.
- Xu, H., Provis, J.L., van Deventer, J.S.J. and Krivenko, P.V.,** (2008). Characterization of aged slag concretes, *ACI Mater. J.* 105 (2), pp. 131-139.
- Yılmaz, A., ve Sütaş, İ.,** (2008). Ferrokrom cürufunun yol temel malzemesi olarak kullanımı. *İMO Teknik Dergi*, 20084455, 4470.
- Yip, C.K., Lukey G.C., and Deventer J.S.J.,** (2005). ‘The coexistence of geopolymeric and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation’, *Cem. Concr. Res.* 35, 1688–1697.

EKLER

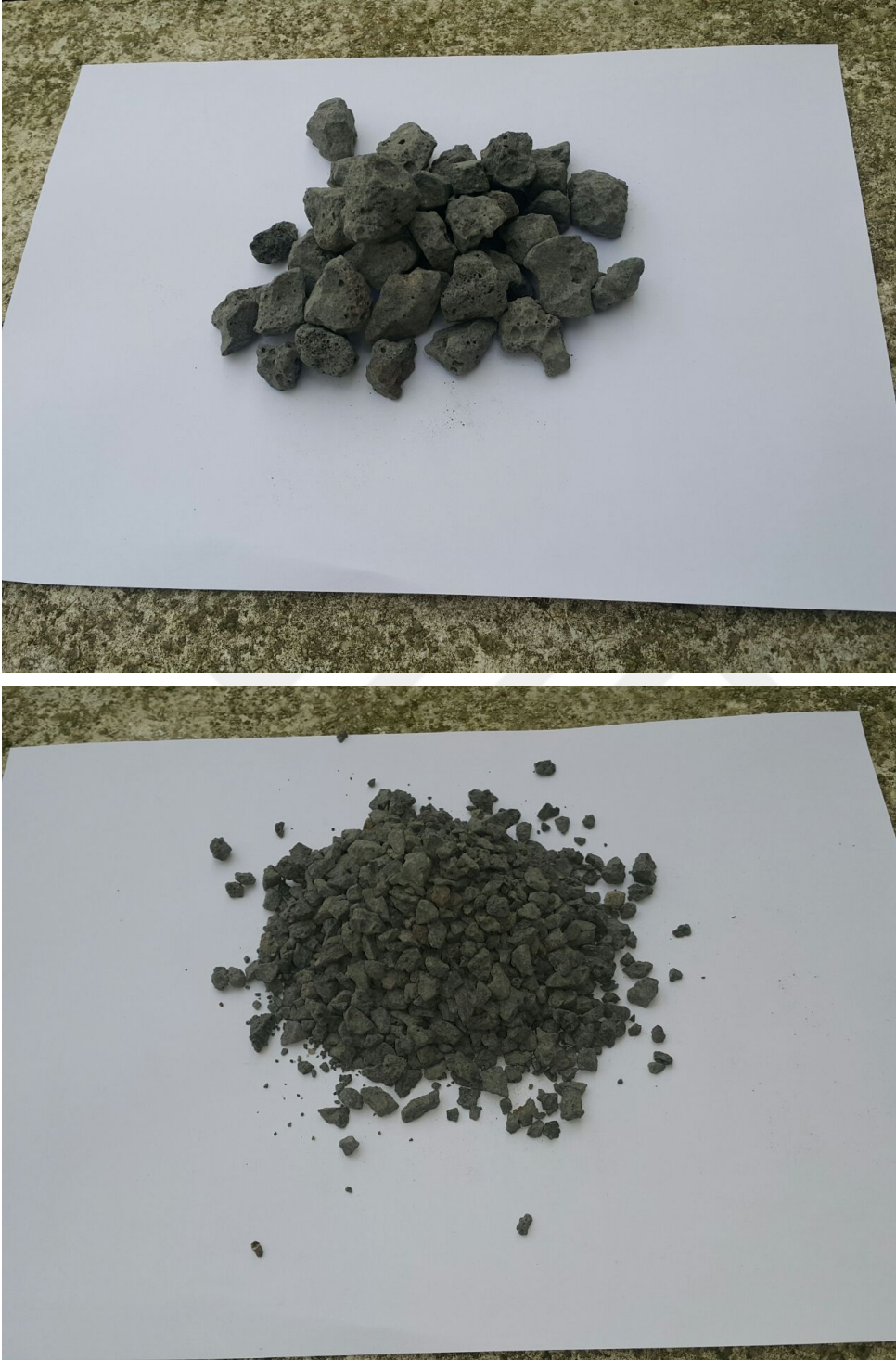
EK A: Ferrokrom cüruf agregasının görünümü

EK B: Sertleşmiş beton deneylerine ait tekil sonuçlar

EK C: Üretim serilerine ait maliyet analizleri



EKA



Şekil A.1: Ferrokrom cüruf agregasının görünümü.

EK B**Çizelge B.1:** Sertleşmiş beton numunelerine ait basınç dayanım sonuçları.

1. Seri					
Üretimler	K1 [0,83]	K2 [0,67]	K3 [0,45]	K4 [0,33]	K5 [0,28]
Basınç dayanımları (MPa)	15,92	28,47	41,83	66,80	77,42
	20,31	25,85	36,96	64,43	76,67
	22,10	27,10	44,20	70,55	76,79
	23,29	28,09	44,33	71,17	81,66
	23,94	28,97	44,70	75,92	81,79
	-	29,34	-	-	-

2. Seri					
Üretimler	F1 [0,83]	F2 [0,67]	F3 [0,45]	F4 [0,33]	F5 [0,28]
Basınç dayanımları (MPa)	21,10	23,72	50,57	65,55	80,54
	20,98	19,73	48,32	60,19	56,19
	21,98	23,10	48,20	54,94	76,04
	22,23	23,47	48,32	67,55	68,68
	23,23	25,29	51,44	69,55	85,91

3. Seri					
Üretimler	A1 [0,83]	A2 [0,67]	A3 [0,45]	A4 [0,33]	A5 [0,28]
Basınç dayanımları (MPa)	17,11	26,22	53,69	72,55	91,91(kübik)
	13,11	26,85	50,95	80,66	78,12
	14,36	18,73	46,82	73,67	86,07
	18,73	25,97	48,95	83,66	
	19,23	26,22	50,45	80,16	

Çizelge B.2: Sertleşmiş beton numunelerine ait yarma dayanımı sonuçları.

1. Seri					
Üretimler	K1 [0,83]	K2 [0,67]	K3 [0,45]	K4 [0,33]	K5 [0,28]
Yarma sonuçları (MPa)	2,93	3,74	4,98	6,33	6,30
	2,54	2,86	4,14	6,75	6,60
	-	-	3,24	6,77	-

2. Seri					
Üretimler	F1 [0,83]	F2 [0,67]	F3 [0,45]	F4 [0,33]	F5 [0,28]
Yarma sonuçları (MPa)	3,21	3,23	4,68	5,66	7,09
	2,95	3,07	5,62	6,75	6,16
	2,89	3,02	6,03	6,50	6,82

3. Seri					
Üretimler	A1 [0,83]	A2 [0,67]	A3 [0,45]	A4 [0,33]	A5 [0,28]
Yarma sonuçları (MPa)	3,00	4,06	4,94	7,13	6,98
	3,01	3,41	5,02	5,92	7,14
	3,37	3,23	5,56	6,61	6,28

Çizelge B.3: Sertleşmiş beton numunelerine elastisite modülü sonuçları.

1. Seri					
Üretimler	K1 [0,83]	K2 [0,67]	K3 [0,45]	K4 [0,33]	K5 [0,28]
Elastisite modülü sonuçları	-	36,81	38,53	48,40	47,44
	-	33,19	37,81	47,88	55,72
	-	30,20	39,81	46,89	45,58

2. Seri					
Üretimler	F1 [0,83]	F2 [0,67]	F3 [0,45]	F4 [0,33]	F5 [0,28]
Elastisite modülü sonuçları	30,07	35,66	41,87	48,95	50,94
	30,68	32,12	42,99	43,82	52,91
	33,43	37,61	41,85	52,02	53,41

3. Seri					
Üretimler	A1 [0,83]	A2 [0,67]	A3 [0,45]	A4 [0,33]	A5 [0,28]
Elastisite modülü sonuçları	12,38	28,20	30,46	38,62	-
	12,05	22,20	28,40	34,92	-
	18,74	14,33	29,71	38,40	-

Çizelge B.4: Sertleşmiş beton numunelerine gevreklik indisi sonuçları.

1. Seri					
Üretimler	K1 [0,83]	K2 [0,67]	K3 [0,45]	K4 [0,33]	K5 [0,28]
Gevreklik indisi sonuçları	-	0,76	2,16	2,13	3,22
	-	1,02	1,46	2,75	3,00
	-	0,96		2,89	1,92

2. Seri					
Üretimler	F1 [0,83]	F2 [0,67]	F3 [0,45]	F4 [0,33]	F5 [0,28]
Gevreklik indisi sonuçları	0,93	0,88	1,72	2,94	2,77
	0,61	1,05	1,71	2,86	-
	0,33	1,03	1,93	2,82	-

3. Seri					
Üretimler	A1 [0,83]	A2 [0,67]	A3 [0,45]	A4 [0,33]	A5 [0,28]
Gevreklik indisi sonuçları	0,95	1,32	1,93	2,39	-
	1,19	0,92	1,96	2,57	-
	0,88	1,47	1,63	3,41	-



EK C

Çizelge C.1: 1 m³ için 3. Seri üretimlerinin maliyet analizleri.

Malzemeler	Birim fiyat	1. seri									
		1. üretim (kg)	Maliyet (tl)	2. üretim (kg)	Maliyet (tl)	3. üretim (kg)	Maliyet (tl)	4. üretim (kg)	Maliyet (tl)	5. üretim (kg)	Maliyet (tl)
Çimento (kg)	180	270	49	310	56	400	72	450	81	500	90
Su (l)	4,37	224	1	208	1	180	1	149	1	140	1
Su/çimento	-	0,83	-	0,67	-	0,45	-	0,33	-	0,28	-
Akışkanlaştırıcı kt. (kg)	2,5	-	0,00	-	0	2	5	7	17,5	8	20
Kırma taş no 1 (kg)	15	721	11	722	11	720	11	736	11	728	11
Kırma taş no 2 (kg)	15	364	5	365	5	364	5	372	6	368	6
Kum (kg)	25	710	18	711	18	709	18	725	18	717	18
Toplam maliyet (tl)			84		91		112		134		145

Çizelge C.2: 1 m³ için 3. Seri üretimlerinin maliyet analizleri.

Malzemeler	Birim fiyat	2. seri									
		1. üretim (kg)	Maliyet (tl)	2. üretim (kg)	Maliyet (tl)	3. üretim (kg)	Maliyet (tl)	4. üretim (kg)	Maliyet (tl)	5. üretim (kg)	Maliyet (tl)
Çimento (kg)	180	270	49	310	56	400	72	450	81	500	90
Su (l)	4,37	224,1	1	207,7	1	180	0,7866	148,5	0,648945	140	1
Su/çimento		0,83		0,67		0,45		0,33		0,28	0
Akışkanlaştırıcı kt. (kg: %1-3)	2,5	-		-		2	5	8	20	16	40
Ferrokrom cüruf agregası no 1 (kg)	5	599	3	600	3	598	2,9903	612	3,05795	605	3
Ferrokrom cüruf agregası no 2 (kg)	5	390	2	390	2	389	1,9467	398	1,9907	394	2
Ferrokrom cüruf agregası no 3 (kg)	5	311	2	311	2	310	1,55035	317	1,5854	313	2
Kum (kg)	25	621	16	622	16	620	15,51175	635	15,8625	627	16
Toplam maliyet (tl)			72		79		100		124		153

Çizelge C.3: 1 m³ için 3. Seri üretimlerinin maliyet analizleri.

Malzemeler	Birim fiyat	3. seri									
		1. üretim (kg)	Maliyet (tl)	2. üretim (kg)	Maliyet (tl)	3. üretim (kg)	Maliyet (tl)	4. üretim (kg)	Maliyet (tl)	5. üretim (kg)	Maliyet (tl)
Yüksek fırın cürufu (kg)	110	270	30	310	34	400	44	450	50	500	55
Toplam su mikt.	-	224	-	208	-	180	-	149	-	140	-
Su/çimento	-	0,83	-	0,67	-	0,45	-	0,33	-	0,28	-
Akışkanlaştırıcı kt. (kg: %1-3)	2,5	-	-	-	-	2	5	8	20	16	40
Ferrokrom cüruf agregası no 1 (kg)	5	571	3	550	3	534	3	539	3	524	3
Ferrokrom cüruf agregası no 2 (kg)	5	372	2	358	2	347	2	351	2	341	2
Ferrokrom cüruf agregası no 3 (kg)	5	296	1	285	1	277	1	280	1	272	1
Kum (kg)	25	593	15	570	14	554	14	559	14	544	14
Sodyum silikat	6,95	47	325	54	374	69	482	78	542	87	603
Sodyum silikattan gelen su miktarı		35		40		51		58		64	0
Sodyum hidroksit peltesi	4,95	10	50	12	59	15	74	17	84	19	94
Sodyum hidroksit için gerekli su miktarı	4,37	9	0	10	0	13	0	15	0,1	17	0,07
Karma suyu	4,37	180	1	158	1	116	1	76	0,3	59	0,26
		Toplam maliyet (tl)	426		488		625		716		811



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Fatih Salihpaşaoğlu
Doğum tarihi ve yeri : 1992 / İstanbul
E-posta : fatihsalihp@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010-2014, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2016-2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı