

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ÖZELLİKTE PUZOLAN KATKILI HARÇLARIN
DURABİLİTEYE ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Selda AGAR**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

Haziran 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ÖZELLİKTE PUZOLAN KATKILI HARÇLARIN
DURABİLİTEYE ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Selda AGAR
(501071100)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 05 Haziran 2009**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Hasan YILDIRIM (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Hulusi ÖZKUL(İTÜ)
Prof.Dr. Fevziye AKÖZ (YTÜ)**

HAZİRAN 2009

Sevgili Anneme ve Rahmetli Babama,

ÖNSÖZ

Harçlarda ve birçok yapıda kullanılan çimento önemli bir yapı malzemesidir. Bu yüzden içyapısının iyi anlaşılabilmesi ve gelişen teknikler paralelinde özelliklerinin çeşitli katkılar ile artırılması önemli bir gereklilik halini almıştır.

Çalışmalarımın maddi ve manevi olarak destek olarak gelişmesini sağlayan tez danışmanım Y.Doç. Dr. Hasan YILDIRIM'a, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuar çalışmalarında bana yardımcı olan İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına ve değerli hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim. Deneyimin ön ayağını oluşturan Onur YILMAZ arkadaşıma emeği için çok teşekkürler. yüksek lisans öğrenimimde bana yardımcı olan arkadaşlarım Omar ALHAMSS'a ve Korhan Deniz DALGIÇ'a dostlukları ve yardımları için teşekkürler.

Yüksek lisans öğrenimi konusunda beni teşvik eden ve bana bu konuda her türlü desteği sağlayan ikinci annem Nurdan SEVER'e gönülden teşekkür ederim. Aynı zamanda benim ikinci ailem olarak hep yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen babam İsa SEVER'e, kardeşlerim Sinan ve Sezen SEVER'e, Rifat ve Emine ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

Bana hayatım boyunca zorlu yollarımda destek olan, beni yetiştiren, kol kanat geren, hayatımdaki prensiplerimi edinmemi ve onurlu bir insan olarak yürümemi sağlayan annem Muradiye AGAR ve rahmetli babam Halil AGAR'a minnet ve şükranlarımı sunarım. İyi ve kötü günlerimin dostları olan kardeşim Serhan AGAR ve ablam Sibel KESKİNKİLİNÇ'a, hayatımıza girdiği andan itibaren ailemize sürekli destek olan ve öğütleriyle bana daima yol gösteren eniştem Kaya KESKİNKİLİNÇ'a sonsuz teşekkürler.

Bana tanıştığımız andan itibaren maddi ve manevi desteğim olan, çok sevdiğim biricik nişanlım Samet SEVER'e gösterdiği her türlü anlayış, özveri ve emek için candan teşekkür ederim.

Bu çalışmanın daha sonradan yapılacak bütün çalışmalara yardımcı olmasını ve yol göstermesini temenni ederim.

Haziran 2009

Selda AGAR

İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1.GİRİŞ	1
2. ÇİMENTO	3
2.1 Çimentonun Tarihi	3
2.2 Çimentonun Bileşimi ve Tipleri.....	4
2.3 Çimento Türleri.....	6
2.3.1 Portland çimentosu.....	7
2.3.1.1 Portland silika füme çimento	7
2.3.1.2 Portland kalkerli çimento	7
2.3.1.4 Beyaz portland çimentolar	8
2.3.2 Yüksek fırın cürufu çimentolar	8
2.3.2.1 Cürufun camsı yapısı ve kristalitesinin etkisi	9
2.1.2.2 Çimentoda YFC içeriğinin mekanik dayanımlara etkisi.....	9
2.3.2.3 Klinker özellikleri ve cüruf inceliğinin etkileri.....	11
2.3.2.4 YFC'nin fiziksel özellikleri.....	11
2.3.4 Uçucu küllü çimento	12
2.3.5 Sülfata dayanıklı çimento.....	12
2.3.6 Erken dayanımlı yüksek çimento	12
2.3.7 Katkılı çimento.....	12
2.4.1 Yaş sistem	13
2.4.2 Yarı kuru sistem	14
2.4.3 Kuru sistem	15
2.5 Çimento Hamuru ve Sertleşme Sırasındaki Özellikleri	17
2.5.1 Hidratasyon	17
2.5.2 Hidratasyon ısısı.....	18
2.5.3 Priz ve sertleşme	19
2.6 Sertleşmiş Çimento Hamurunun Özellikleri	20
2.6.1 Mekanik mukavemet.....	20
2.6.2 Yük altında deformasyon	22
2.6.3 Rötire ve şişme	23
2.6.4 Geçirimlilik	24
2.6.5 Donmaya karşı dayanıklılık	25
2.6.6 Kimyasal etkilere karşı dayanıklılık.....	25
3. HARÇLAR	33

3.1 Harçların Dayanımı ve Dayanıklılığı	33
3.2. Harçların Sınıflandırılması	35
3.3 Bağlayıcılar	37
3.3.1 Alçı	37
3.3.2 Kireç	38
3.3.3 Puzolanlar	39
3.3.3.1 Puzolanik reaksiyon	42
3.3.3.2 Uçucu kül	44
3.3.3.3 Tras	48
3.3.4 Dolgu malzemeleri	48
3.5 Katkılar	49
3.5.1. Kimyasal katkılar	49
3.5.2 Mineral katkılar	50
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	51
4.1 Deney Programı	51
4.2 Kullanılan Malzemeler	52
4.2.1 Kumun özellikleri	52
4.2.2 Çimentonun özellikleri	52
4.2.3 Yüksek fırın cürufunun özellikleri	53
4.2.4 Trasın özellikleri	53
4.2.5 Uçucu külün özellikleri	53
4.3 Numunelerin Kodlanması	54
4.4 Harç Karışım Oranları	54
4.5 Deneyler	56
4.5.1 Eğilme ve basınç deneyleri	56
4.5.2 Ultrases hızı deneyi	58
4.5.3 Ağırlık değişimi	59
4.5.4 Boy değişimleri	59
4.5.5 Kılcal su emme deneyi	59
4.12 Karbonatlaşma Deneyi	60
4.10 Sodyum Sülfat Çözeltisi ve Hazırlanması	61
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	63
5.1 Basınç Deneyleri Sonuçları	63
5.2 Sülfat Etkisi	64
5.2.1 Ağırlık değişimi	64
5.2.2 Boy değişimi	64
5.2.3 Ultrases hızı deneyi sonuçları	65
5.2 Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları	66
5.3 Karbonatlaşma Deneyi Sonuçları	68
6.GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR	73
EKLER	77

KISALTMALAR

SDÇ	: Sulfata Dayanıklı Çimento
S/Ç	: Su/Çimento
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
UK	: Uçucu Kül
ASTM	: American Society for Testing and Materials

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	: Çimento ana bileşenlerinin relatif özellikleri	5
Çizelge 2.2	: Çimento tiplerinin ortalama kimyasal bileşimleri	6
Çizelge 2.3	: Çimento ana bileşenlerinin hidratasyon reaksiyonları	18
Çizelge 2.4	: Çimento ana bileşenlerinin hidratasyon ısıları	19
Çizelge 2.5	: Klor geçirimsizlik deneyi sonuçlarına göre betonun değerlendirilmesi	27
Çizelge 2.6	: Zemin suyu ve toprakta bulunan sülfat yoğunluklarının betona etkisi	28
Çizelge 2.7	: TS 3340'a göre sülfat (SO_4^{2-}) iyonlarının zararlı etkinlik dereceleri	29
Çizelge 3.1	: Harç Karışım Oranları	35
Çizelge 3.2	: Sıva Tabakaları	36
Çizelge 3.3	: Puzolanların Sınıflandırılması ve Puzolan Türleri	41
Çizelge 3.4	: Çeşitli Puzolanların Kimyasal Bileşimleri	42
Çizelge 3.5	: Puzolanik aktivite deney sonuçları	45
Çizelge 3.6	: TS 639 'da Belirtilen uçucu kül özellikleri	47
Çizelge 4.1	: Çimentoların fiziksel özellikleri	53
Çizelge 4.2	: Çimentoların ve mineral katkıların kimyasal bileşenleri	54
Çizelge 4.3	: Harç üretiminde kullanılan malzemeler ve çimentoya göre % karışım oranları	55
Çizelge 5.1	: Kılcallık katsayıları	67
Çizelge 5.2	: Karbonatlaşma deney sonucu	69
Çizelge A.1	: Ultrases Deneyi Sonuçları	77
Çizelge A.2	: Ağırlık Ölçümü % Değişim Sonuçları	78
Çizelge A.3	: Boy Ölçümü % Değişim Sonuçları	79

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Yaş sistem fırınlarının şematik diyagramı	14
Şekil 2.2	: Kireç ve kil taneciklerinin lepol ızgarasında kurutulması.....	15
Şekil 2.3	: Çimentonun üretim aşamaları	16
Şekil 2.4	: Çimento hamurunun iç yapısı.....	20
Şekil 2.5	: S/Ç Oranına bağlı olarak beton basınç mukavemetinin değişmesi.....	22
Şekil 2.6	: Hızlı ve yavaş yüklemde deformasyon değişimi.....	23
Şekil 2.7	: Sürekli yüklemde deformasyon değişimi	23
Şekil 2.8	: Klor geçirimliliği deney düzeneği.....	26
Şekil 2.9	: Klor geçirgenliği deneyi sonuçlarına kül etkisi.....	27
Şekil 2.10	: Farklı tip çimentolarla değişik çimento içeriklerinde üretilmiş betonların sülfat etkisiyle bozulma hızları	32
Şekil 3.1	: Bir hidrate portland-puzolan çimentosundaki kalsiyum hidroksit içeriğinin değişimi.....	43
Şekil 4.1	: Kumun granülometri eğrisi	52
Şekil 4.2	: Eğilme deneyi düzeneği	57
Şekil 4.3	: Basınç deneyi düzeneği	57
Şekil 4.4	: Ultrases deney düzeneği.....	58
Şekil 4.5	: Numunelerde boy değişimi ölçümü	59
Şekil 4.7	: Seçilen numunelerde karbonatlaşma deneyi	61
Şekil 5.1	: Seçilen numunelerde 28 günlük basınç deneyi sonuçları.....	63
Şekil 5.2	: Seçilen numunelerin ağırlık değişim sonuçları	64
Şekil 5.3	: Seçilen numunelerin boy değişim sonuçları.....	65
Şekil 5.4	: Seçilen numunelerin ultrases ortalama sonuçları	66
Şekil 5.5	: Şahit numunelerde kılcallık sonuçları	66
Şekil 5.5	: Seçilen SDÇ 32.5 numunelerinde kılcallık sonuçları.....	67
Şekil 5.6	: Seçilen CEMIV B(P) 42.5R numunelerinde kılcallık sonuçları	68
Şekil 5.7	: Şahit numunelerde karbonatlaşma miktarı	69
Şekil 5.7	: Seçilen düşük S/Ç Oranına sahip numunelerde karbonatlaşma sonuçları	70
Şekil 5.8	: Seçilen yüksek S/Ç oranı sahip numunelerde karbonatlaşma sonuçları	70

FARKLI ÖZELLİKTE PUZOLAN KATKILI HARÇLARIN DURABİLİTEYE ETKİLERİ

ÖZET

Bu çalışmada değişik çimentolara, üç farklı mineral katkı katılıp 40*40*160 mm. boyutlarında üretilen harçların hem genel niteliklerindeki değişikliklere hem de harçlardaki sodyum sülfat etkisine bakılmıştır. SDC 32,5 ve CEMIV/B(P) 32,5R çimentoları kullanılarak üretilen harçlarda yüksek fırın cürufu, tras ve uçucu kül olmak üzere 3 ayrı mineral katkı kullanılarak 32 farklı karışım hazırlanmıştır. 225 g ve 292.5 g olmak üzere iki farklı su oranı kullanılmıştır.

Ağırlıkça %10 sodyum sülfat içerecek şekilde hazırlanan çözeltide 15 gün bekletilen numunelerde oluşan etkileşimler ve etkiler nitel ve nicel olarak gözlenmiştir. Numuneler her 15 günde bir çıkarılışında etüvde iyice kurutulmuştur. Sülfat çözeltisinin etkisinin anlaşılabilmesi için harçların ağırlık ve boy değişimlerine bakılmış ve ultrases hızı ölçümleri alınmıştır. Bunun yanında harçların dürabilitesi ile ilgili daha verimli sonuçlar alabilmek için aynı dayanımı gösteren harçlar üzerinde karbonatlaşma ve kılcallık deneyleri de yapılmıştır.

Deneyin yaklaşık olarak sürdüğü 10 ay boyunca harçlarda çok az değişiklik olmuştur ve bu sürenin sülfat deneyi için yeterliği olmadığı görülmüştür. Numunelerdeki parçalanmalar ve boy ve ağırlık kaybı son iki ayda sadece CEMIV/B(P) 32.5R ile üretilen tras içeren numunelerde görülmüştür. Karbonatlaşma ve kılcallık deneylerinde ise, su/çimento oranı yüksek olan harçlarda karbonatlaşma ve kılcallık derinliğinin fazla olduğu görülmüştür.

Altı bölümden oluşan bu çalışmada, ilk bölümde yapılan çalışmanın amacı anlatılmıştır. İkinci bölümde, çimento hakkında genel bilgi verilerek, sertleşmiş çimento hamurunun özelliklerinde bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde harçlar konusuna değinilmiş ve harçların içerisinde bulunan dolgu malzemeleri ve katkı malzemeleri de anlatılmıştır. Dördüncü bölümde iki farklı çimento ve 3 farklı mineral katkı ile yapılan deneysel çalışma anlatılarak, sodyum sülfat çözeltisinin etkisi anlatılmıştır. Beşinci bölümde deney sonuçlarına bakılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Son bölüm olan altıncı bölümde ise, çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

THE EFFECTS OF THE PUZOLAN INCLUDING MORTARS WITH DIFFERENT PROPERTIES ON DURABILITY

SUMMARY

In this work, three different mineral admixtures were used to investigate the properties of cement paste and effects of sodium sulfate in different kind of cement which are SDÇ 32,5 and CEMIV/B 42,5R. This way it has been examined that how the reaction of C_3A with sodium sulfat effecting the cement paste and its properties. In these samples with different mixtures 3 different mineral additives were choosen and their importance on sulfat effect were examined.

Samples with a weight coeficient of %10 has been waited in the solution for 15 days and the effects has been examined. Samples were being hold in the etuv for every 15 days when they were taken out of the solution. To examine the sulphate solution samples has been examined with their changes in their weight, length and with their ultrasonic speed test results. Except that to get better results about the durability of the samples, on samples with similar strength carbonation and capillarity tests implied.

For the 10 months of the experiment little changes occured on the samples and it has been seen that thistime interval is not enough for a sulphate experiment. Shatterings, length and weight changes of samples were seen only on samples with CEMIV/B(P) 32.5R. According to the carbonation and capillarity experiments it has been seen that the carbonation and capillarity depths are high on samples with a higher water/cement ratio.

This work includes six parts and in first part, the objective of the work was explained. In second part, there is some knowledge about cement and hardened cement pastes properties. In third part, pastes and admixtures properties was explained. Fourth part includes the experimental works explanation. There is the conclusion and suggestion in fifth part. In final part the experiments results were discussed

1.GİRİŞ

Yapı sektöründe beton, hem ülkemizde hem de dünyada önemli yer tutmaktadır. Gelişen ve ilerleyen teknoloji, artan talepler ve bunun paralelinde doğan malzeme sıkıntısı nedeniyle malzemenin en verimli ve en iyi şekilde kullanma gerekliliği yaratmıştır. Bunun için betonun en önemli bileşeni olan çimentonun etkin biçimde kullanılması, içyapısının ve bağ özelliklerinin iyi bir biçimde analiz edilerek ve mekanik davranışının en iyi şekilde anlaşılması gerekmektedir.

Betondan beklenen özellikler dayanım ve dayanıklılıktır(dürabilitedir). Betonun dayanıklılığı iç ve dış etkenlere bağlıdır. İç etkenler çimento, agrega ve su tarafından belirlenir. Dış etkiler ise donma-çözülme, ıslanma-kuruma, karbonatlaşma, sülfat etkisi, korozyon gibi sayılabilir.

Sudaki, zemindeki ve deniz suyundaki sülfat iyonları beton yapılarda bozulmaya yol açabilir. Sülfat saldırısının zararlı etkisi, sülfat iyonlarının sertleşmiş betondaki alüminli(C_3A) ve kalsiyumlu ($Ca(OH)_2$) bileşenlerle kimyasal reaksiyona girerek, hacmi çok artan etrenjit ve alçı oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Reaksiyon ürünleri, sertleşmiş betonda genleşme yaratarak agrega-çimento hamuru aderansının olumsuz yönde etkilenmesine, çatlak oluşumuna ve geçirimsizliğin artmasına yol açar. İleri derecedeki etkilenmelerde ise betonun tamamen dağılması söz konusudur. Sülfat saldırısı gibi dış kaynaklı iyon girişi sebebiyle oluşan kimyasal reaksiyonlarda çimentonun kimyasal bileşiminin kontrolü kadar, betonun geçirimsizliği de önem kazanmaktadır [4,40].

Bu çalışmada, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve tras olmak üzere üç farklı mineral katkı, çimentoya değişik oranlarda katılarak hazırlanan harçlarda meydana gelen değişiklikler mekanik ve fiziksel deneyler ile araştırılmıştır. Aynı mukavemeti gösteren harçlarda dayanıklılık incelenmiştir.

2. ÇİMENTO

Çimento, yapı malzemeleri arasında en önemli yeri kaplayan bir bağlayıcı maddedir. Temel olarak kil ve kirecin pişirilip birleştirilmesiyle oluşur. Su ve agrega ile karışınca harç ve betonun oluşmasını sağlayan bir malzemedir. Çimento, en eski ve en çok yapı malzemelerinden birisi olmakla beraber bundan sonrada yapı sektöründeki yerini koruyacak bir malzemedir [13].

2.1 Çimentonun Tarihi

Doğal çimento üretimi ilk olarak 18. yüzyılda yapılmıştır. 1756 yılında John Smeathon adında bir İngiliz kireç ve bazı puzolanlarla çeşitli deneyler yapmış ve iyi bir bağlayıcı elde etmiştir. Ancak bu icat duyulmamıştır. 1796 yılına kadar birçok kez aynı denemeler yapılmış fakat ilk doğal çimento patentini alan Joseph Parker olmuştur. İlk üretildiğinde ‘Parker’ın Çimentosu’ adını verse de sonradan ‘Roma Çimentosu’ olarak adlandırılmıştır [7].

Portland çimentosunun icadı ise 1824 yılında Joseph Aspdin adında bir İngiliz tarafından gerçekleştirildi. Duvar ustası olan Aspdin, 1800’lü yılların başında yollardaki taş tozlarını toplamaya başladı ve bunları kil ile birleştirip pişirerek bağlayıcı üretmeye başladı. Ürettiği bağlayıcının renk ve diğer özellikler bakımından Portland Adası’ndan çıkartılan yapı taşlarına benzettiği için ‘Portland Çimentosu’ adını verdiği bağlayıcının 1824 yılında patenti olarak üretmeye başladı [13].

Ülkemizde ise çimentonun gelişimi diğer ülkelere nazaran daha geç olmuştur. Türkiye’de ilk kurulan çimento fabrikası Darıca’da 1911 yılında kurulmuştur. Hemen ardından bir fabrika da Eskişehir’de kurulmuştur. Arslan Çimento adı altında kurulan bu fabrikalar Türkiye’nin ilk çimento fabrikalarıdır. İkinci Dünya Savaşı döneminde bir süreliğine de olsa faaliyeti duran Arslan Çimento Fabrikası 1947 yılında tekrar faaliyete geçmiştir. Bu iki fabrika tarafından yapılan üretimin yeterli olmaması nedeniyle 1932–1933 yılları arasında Zeytinburnu, Kartal ve Sivas fabrikaları kurulmuştur. Böylece ülkemizde çimento üretimi artmış ve çimento sektörü gelişmiştir [13].

2.2 Çimentonun Bileşimi ve Tipleri

Çimento bileşiminde bulunan maddeler temel olarak kil ve kalkerdir. Birinci bileşen olan kil, bileşiminde %90 oranında kil minerali bulunduran kayalardan oluşur. Diğer bileşen olan kalker ise; bileşiminde %90 oranında kalsiyum karbonat veya kalsit bulunduran kayalardan oluşmaktadır [12]. Çimentonun bileşiminde bulunan kalsiyum, alüminyum, demir ve silisyum oksitler bu bileşenlerin içinde bulunmaktadır. Bileşimde bulunan silisyum oksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) kilin yapısından bileşime katılmaktadır. Kireç (CaO) ve magnezyum oksit (MgO) ise kalker taşının yapısından bileşime dahil olmaktadır [3].

Çimentoyu oluşturan ana ve diğer bileşenler şu şekilde sıralanabilir:

— Ana Bileşenler: Dikalsiyum silikat, $2\text{CaO}.\text{SiO}_2\text{C}_2\text{S}$

Trikalsiyum silikat, $3\text{CaO}.\text{SiO}_2\text{C}_3\text{S}$

Trikalsiyum alüminat, $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3\text{C}_3\text{A}$

Tetrakalsiyum alüminoferrit, $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3\text{C}_4\text{AF}$

— Diğer Bileşenler: Serbest CaO , MgO , Cam ve Katı eriyikler

Çimentoyu oluşturan ana bileşenleri inceleyecek olursak;

- C_2S : Bu bileşenin hidrate olması oldukça yavaştır. 14. gün ile 28. gün arasındaki mukavemet artışında önemli rol oynar. C_2S oranı daha fazla olan çimentoların kimyasal ataklara karşı dayanıklılığı daha fazla olur.
- C_3S : Bu bileşen etkinliğini erken safhalarda gösterir ve önemli miktarda ısı açığa çıkmasına neden olur. Ayrıca betonun erken zamanlardaki mukavemetine önemli katkıları vardır.
- C_3A : Bu bileşen hidratasyonun hızlı olmasını sağlar ve önemli miktarda ısı açığa çıkmasına neden olur. Ayrıca ilk sertleşmenin oluşmasına yardımcı olur. Ancak mukavemete katkısı önemsiz denilecek kadar azdır ve kimyasal ataklara karşı dayanıklılığı kötüdür.
- C_4AF : Diğer bileşenlere göre önemi çok daha azdır. Mukavemet ve sertleşmiş çimento hamuru özelliklerine renk haricinde çok katkısı yoktur.

Bu bileşenlerin relatif özellikleri aşağıdaki Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 :Çimento ana bileşenlerinin relatif özellikleri [7]

Bileşen	Reaksiyon Hızı	Bağlayıcı Değer	Hidratasyon Isısı	Dayanıma Katkısı (İlk Günlerde)	Dayanıma Katkısı (Sonunda)
C ₂ S	Yavaş	Kuvvetli	Az	Düşük	Yüksek
C ₃ S	Orta	Kuvvetli	Orta	Yüksek	Yüksek
C ₃ A	Hızlı	Zayıf	Yüksek	Düşük	Düşük
C ₄ AF	Orta	Zayıf	Orta	Düşük	Düşük

Bu bileşenlerin farklı oranlarda kullanılmasıyla farklı özellikte çimentolar elde edilebilmektedir. Örneğin Amerika’da bu şekilde 5 farklı çimento üretilebilmektedir. Bunlar;

- Tip I: Yapıda kullanılan normal Portland Çimentosu. Bileşiminde %50 C₃S, %30 C₂S ve %20 C₃A+ C₄AF bulunmaktadır.
- Tip II: Hidratasyon ısısı ve sülfat dayanıklılığı orta, C₃S miktarı Tip I’e göre biraz daha fazla olan bir çimentodur.
- Tip III: C₃S oranı ve öğütme inceliği fazla olan yüksek mukavemetli bir çimentodur.
- Tip IV: C₃S oranı fazla, hidratasyon ısısı az olan bir çimentodur.
- Tip V: C₃A oranı az fakat sülfata dayanıklılığı fazla olan bir çimentodur [16].

Bu 5 tipin kimyasal bileşimleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Çimento tiplerinin ortalama kimyasal bileşimleri [13]

	Tip I	Tip II	Tip III	Tip IV	Tip V
Oksit Analizi Yüzdeleri					
Kireç (CaO)	64	63	65	60	64
Silis (SiO ₂)	21	22	20	24	26
Alümin (Al ₂ O ₃)	6,5	5	5,5	5	2,5
Demiroksit (Fe ₂ O ₃)	2,5	4	3	4,5	1,5
Manyezi (MgO)	2,5	3	2,3	3	2
Sülfür (SO ₃)	2,1	1,5	2,5	1,7	1,3
Yanma Kaybı	1,3	1,1	1,5	1,1	0,02
Asitle Erimeyen	0,02	0,02	0,02	0,02	
Ana Bileşen Yüzdeleri					
C ₃ S	45	44	53	28	38
C ₂ S	27	31	19	49	43
C ₃ A	11	5	10	4	4
C ₄ AF	8	13	10	12	8
İncelik					
Özgöl Yüzey	1710	1990	2730	1880	1960
325 No. Elekten Geçen	90,7	94,7	99,5	93,1	93,2

2.3 Çimento Türleri

Çimento çeşitleri, kullanılan hammaddelerin miktarına ve seçilen üretim yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Ülkemizde, çimento çeşitleri için geliştirilen standartlardan yola çıkılarak aşağıdaki sınıflandırma yapılmaktadır:

- Portland çimentoları
- Yüksek fırın cürufllu çimentolar
- Beyaz Portland çimentosu

- Harç çimentosu
- Traslı çimento
- Uçucu küllü çimento
- Süper sülfat çimentosu
- Erken dayanımı yüksek çimento
- Katkılı çimento

2.3.1 Portland çimentosu

Portland çimento klinkerinin alçı taşı ile %10'a kadar herhangi bir doğal ya da yapay puzolanik madde ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen bir hidrolik bağlayıcıdır. Portland çimentoları klinkerle az miktarda (yaklaşık %5) alçıtaşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen katkısız çimentolardır. Bu çimentolar 28 günlük basınç dayanımlarına göre başlıca 3 tiptir. Bunlar; PÇ 32.5, PÇ 42.5 ve PÇ 52.5'tir [29].

2.3.1.1 Portland silika füme çimento

Portland silika füme çimento, klinkerle kütlece en fazla %10 oranında silis dumanı ve az miktarda alçıtaşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. Bu çimento Avrupa Standartlarından yeni alınan bir çimento çeşididir. Tek bir sınıfı vardır, Portland Silika Füme Çimento 28 günlük basınç dayanımına göre PSFÇ 32.5 olmak üzere tek tiptir[29].

2.3.1.2 Portland kalkerli çimento

Portland kalkerli çimento, klinkerle kalkerin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. İhtiva ettikleri kalker miktarına göre 2 sınıfa ayrılırlar. Kütlece %6–20 arasında kalker ihtiva edenler A sınıfı, kütlece %21–35 arasında kalker ihtiva edenler B sınıfıdır. 28 günlük basınç dayanımlarına göre PLÇ 32.5, PLÇ 32.5R, PLÇ 42.5, PLÇ 42.5R, PLÇ 52.5, PLÇ 52.5R olmak üzere 6 tiptir. Bu çimento Avrupa Standartlarından yeni alınan bir çimento çeşididir[29].

2.3.1.3 Portland kompoze çimento

Klinkerle puzolanik veya hidrolik maddelerin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen çimentodur. İçerdikleri toplam katkı maddesinin miktarına göre 2 sınıfa ayrılırlar. Kütlece %6–20 arasında kalker ihtiva edenler A sınıfı, %21–35 arası kalker ihtiva edenler B sınıfıdır. 28 günlük basınç dayanımlarına göre PKÇ 32.5, PKÇ 32.5R, PKÇ 42.5, PKÇ 42.5R, PKÇ 52.5, PKÇ 52.5R olmak üzere 6 tiptir. Bu çimento Avrupa Standartlarından yeni alınan bir çimento çeşididir[29].

2.3.1.4 Beyaz portland çimentolar

TS 21 BPC 52.5N çimentosu, kimyasal ve fiziksel özellikleri ile performans özellikleri açısından standart değerlerinin çok üstünde ve süper beyaz Portland çimentosu niteliğindedir. Beyazlığı ortalama %85.5'tir. Türkiye'nin bu kadar yüksek beyazlıkta üretilen ilk ve tek beyaz çimentosudur. Dünyanın da sayılı beyaz çimentoları arasındadır. Türkiye'de piyasada satılmakta olan beyaz ve gri Portland çimentoları arasında dayanımı en yüksek olan çimentodur. İki günlük dayanımı 37 MPa, 28 günlük dayanımı 59 MPa civarındadır. Hidrolik olarak çok aktiftir. Bu özelliği ile kullanıldığı yerlerde üretim hızını ve kalitesini artırır. Prefabrik beton elemanları üretiminde buhar kuru gerektirmez. Düşük alkalili çimento sınıfı içindedir. Alkali-agrega reaksiyonlarına karşı dirençlidir. Her türlü mimari, estetik ve sanatsal ürünlerde, yapı malzemelerinde sağlamlık ve görünüş güzelliği sağlar[29].

2.3.2 Yüksek fırın cürufllu çimentolar

Cürufllu çimentolar granüle yüksek fırın cürufunun Portland çimentosu klinkeri ve alçı taşı ile birlikte veya ayrı ayrı öğütülüp karıştırılmasıyla elde edilir. Cüruf içinde bulunan bileşikler aşağıda sıralanmıştır

Gelenit $2 \text{ CaO SiO}_2 \text{ Al}_2\text{O}_3$ (mono kalsiyum silikat)

Volostonit $\text{CaO SiO}_2 \text{ Al}_2\text{O}_3$ (mono kalsiyum silikat)

Dikalsiyum silikat 2 CaO SiO_2

- Çiftli Silikatlar

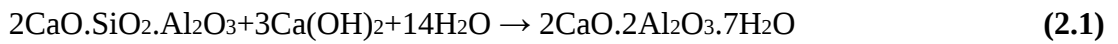
Montisenit CaO MgO SiO_2

Akermonit $2 \text{ CaO MgO } 2\text{SiO}_2$

Mervinit $3 \text{ CaO MgO } 2\text{SiO}_2$

Cüruf içindeki en önemli bileşik "gelenit" tir. Bu silikatlar cüruf içinde pasiftir. Az miktarda katılan klinkerin hidratasyonundan meydana gelen Ca(OH)_2 aktivatör rolü oynar. Silikatlar hidrate olarak yeniden çift silikatlar oluşturup çimentonun dayanım kazanmasını sağlar.

Aşağıda belirtilen reaksiyon cüruf hidratasyonunu göstermektedir



Ortamda yeterli miktarda alçı taşı (%12) katılmış bulunduğunda kalsiyum alüminat hidratlar, kireç ve alçı taşı birleşerek mekanik dayanıma sahip kalsiyum sülfat alüminat hidratları (etrenjit kristalleri) oluştururlar[31].

$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{CaSO}_4.3\text{H}_2\text{O} = \text{Etrenjit}$ (Çözünmüş fazla meydana gelmiştir).

Cürufsuz çimentoda az miktarda etrenjit hekzagonal sistemde kristalleşir. Cürufllu çimentoda ise kristalleşme iğnecikler şeklinde olup bunlar bağlayıcı rol oynadıklarından dayanımı yükseltirler. Sonuç olarak Portland çimentosu hidratasyonunda meydana gelen Ca(OH)_2 cürufllu çimentoda bulunmamakta veya çok az bulunmaktadır[29].

2.3.2.1 Cürufun camısı yapısı ve kristalitesinin etkisi

Aynı Portland çimentosu ve yedi değişik granüle yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen cürufllu çimentolar üzerine yapılan bir mikro yapı araştırmasında cürufun hidratasyon hızıyla, rekristalize hale getirildikten sonra, içerdiği akermanit (C_2MS_2) miktarı arasında 0,98 korelasyon katsayısına sahip bir bağıntı saptanmıştır. Buna göre, rekristalize cüruf içindeki akermanit miktarı ne kadar yüksekse cüruf o kadar yavaş hidrate olmaktadır[29].

2.1.2.2 Çimentoda YFC içeriğinin mekanik dayanımlara etkisi

Cürufların hidratasyon reaksiyonu yavaştır. Bu yüzden cürufllu çimentolarda erken yaşlardaki dayanım daha düşüktür. Güner'in değişik oranlarda (%0-20-40-60-80-90-100) YFC içeren bağlayıcı karışımları kullanarak standart çimento harcı numuneleri üzerinde yaptığı çalışmada 3 ve 7 günlük dayanımların YFC içeriği arttıkça

sürekli olarak azaldığı, 28 günlük dayanımlarda %60 cüruf içeriğine kadar dikkate değer bir artış olduğu, 90 günlük dayanımlarda yine %60'a kadar cüruf içeren bağlayıcı karışımlarında bir azalma, olmadığı görülmektedir. Su/(Cüruf+Çimento) oranının düşürülmesi, yüksek sıcaklık uygulaması veya cürufun daha ince öğütülmesi ile cürufllu çimentoların erken yaşlardaki dayanımı yükseltebilmektedir. V.Sivasundaram ve V.M. Malhatra'nın yapmış olduğu çalışmada süper akışkanlaştırıcı kullanılmış ve hava sürüklenmiş düşük miktarlarda ASTM tip I çimento ve yüksek dozajda yüksek fırın cürufu içeren betonlar anlatılmıştır. Cüruf, kuzey Ontario'da ki bir kaynaktan elde edilmiştir. Üç seri beton karışımı değişik dozajlarda çimentoyla (100, 125 ve 150 kg/m³) yapılmıştır. Betondaki cüruf oranı toplam bağlayıcı madde miktarına göre %50 ile %75 arasında değişmektedir. Karışımlardaki su oranı 115 kg/m³ de sabit tutulmuş ve süper akışkanlaştırıcı sayesinde yüksek çökme değerlerine ulaşılmıştır. Taze beton özellikleri hesaplanmış ve beton numunelerin basınç ve eğilme mukavemetleri, elastisite modülleri, kuru rötreleri, klor iyonu penetrasyon dayanıklılıkları ve sülfat dayanıklılıkları hesaplanmıştır[29].

Cüruf miktarının artmasıyla işlenebilirliğin düştüğü gözlenmiş, ayrıca su/çimento oranının 0,30'un altına düşmesiyle işlenebilirlik aniden azalmıştır. Betonlardaki otojen ısının düşmesinin de yüksek dozajda cüruf içeriğiyle ilgili olduğu düşünülmüştür. Maksimum sıcaklık düşüşü 5,5°C'dir. 7 günden sonra ilerleyen zamanlarda da bütün yüksek cüruf dozajlı betonlarda kontrol betonlarıyla karşılaştırılacak kadar birbirine yakın basınç dayanımları elde edilmiştir. 91 günlük, 300 kg/m³ bağlayıcı oranına sahip betonlardan birisi 50 MPa değeri aşarak en yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır. Ayrıca yüksek dozajda cüruf içeren betonların daha geç yaşlarda kontrol betonuna göre daha iyi mukavemet değerleri verdiği tespit edilmiştir. 250 kg/m³ bağlayıcı oranına sahip cürufllu betonların dayanım değerleri düşük çıkmıştır.

14 günlük cürufllu betonların eğilme dayanımları çoğunlukla 8 MPa gibi bir değer vermiştir ve bu da kontrol betonunun değerlerinden yüksektir. Ayrıca 28 günlük cürufllu betonların elastisite modülü yaklaşık olarak 42 MPa gibi yüksek bir değer almıştır. Klor iyon penetrasyon direnci genel olarak cürufllu betonlarda normal betonlara göre yüksek çıkmıştır[29].

2.3.2.3 Klinker özellikleri ve cüruf inceliğinin etkileri

Cürufli çimentoların hidratasyonunda granüle yüksek fırın cürufuyla Portland çimentosu arasında karşılıklı bir etkileşim söz konusudur. Normal inceliklerde (3000 cm²/g) öğütülmüş olan cürufli çimentolarda klinker özellikleri, çok ince (6000 cm²/g) öğütülmüş olanlardakine göre, daha önemlidir. C3S miktarı yüksek olan klinkerler cürufun erken yaşlarda aktivasyonu için daha elverişlidir. 28 günün üstündeki yaşlarda ise cürufun inceliği ve reaktivitesi klinker özelliklerinden daha fazla önem kazanmaya başlar. Genel olarak %70'in üstünde cüruf içeren çimentolarda erken dayanımlar daha çok klinker özelliklerinin etkisine bağlıdır.

Cürufli çimento üretiminde cüruf ve klinkerin birlikte öğütülmesi klinkerin daha ince buna karşılık cürufun daha kaba kalmasına yol açar. Aynı öğütme sonucunda daha ince cüruf elde etmek mümkün olur.

VVang Fu - sheng, Sun Rui-lian, Cui Ying Jing'in yapmış olduğu çalışmada cüruf tozunun inceliğinin etkisi, aktivatör miktarları, kuru rötredeki değişikliğin tipi ve içeriği ve yüksek dayanımlı cüruf çimento malzemesinin dayanımı incelendi. Deneysel verilere göre %9 Na₂SiO₃ aktivatörü ve %10 portland çimentosu eklemek yüksek basınç dayanımlı cürufli çimentonun kuru rötre değerlerini Portland çimentosunun değerlerine yakın çıkarmıştır. Basınç dayanım değerleri de cürufli çimentonun, portland çimentosuna göre daha fazla çıkmıştır[29].

2.3.2.4 YFC'nin fiziksel özellikleri

Yüksek Fırın Cürufli Çimentolar Portland Çimentosundan daha açık renklidir. Özgül ağırlığı, Portland çimentolarına oranla biraz düşüktür. Priz süreleri, rötre, sünme, betonarmede donatı aderansı özellikleri bakımından portland yüksek fırın cürufu çimentolarıyla portland çimentoları arasında önemli farklılıklar yoktur.

Portland Yüksek Fırın Cürufu çimentolarının hidratasyon ısıları kullanılan klinkerin ve Granüle Yüksek Fırın Cürufu'nun kompozisyonu ve miktarlarıyla orantılı olarak değişir ancak, genel olarak, normal portland çimentolarından daha düşüktür[29].

2.3.3 Harç çimentosu

En az %40 portland çimentosu klinkeri ile çözünmeyen kalıntı miktarı en çok %50 olacak şekilde doğal puzolanlar ve uçucu kül gibi çeşitli maddelerin bir miktar alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucu ile elde edilen hidrolik bağlayıcıdır[29].

2.3.4 Uçucu küllü çimento

Klinkerle küttelece %10-30 arasında uçucu külün az miktarda alçıtaşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. Tek bir sınıfı mevcuttur. 28 günlük basınç dayanımına göre UKÇ 32,5 olarak tek tiptir.

Ülkemizde artan enerji ihtiyacından dolayı kömürün yakıt olarak kullanıldığı çok sayıda termik santral kurulmuştur. Pozolanik özelliği olan uçucu küllerin atık malzeme olarak betonda kullanılması ekonomik ve çevresel yönden yararlar sağlarken betonun özelliklerini de geliştirmektedir. Uçucu küllerin kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri yoktur, ancak kireçle birleştikleri zaman bağlayıcılık özelliği kazanırlar[29].

2.3.5 Sülfata dayanıklı çimento

Bu çimento sülfatlı suların ve sülfatı zeminlerin olduğu ortamlarda sülfat etkisine karşı C₃A oranının %5'in altında olması nedeniyle dayanıklı olmakta ve bu çimentodan üretilen betonlar sülfat saldırısından zarar görmemektedir. Bu çimentolardan üretilen betonlar etrenjit oluşmaması nedeniyle uzun ömürlüdür. Yine C₃A oranının düşük olması sebebiyle hidrasyon ısıları portland çimentolarına göre düşük ve priz süreleri daha uzundur. Deniz suyu etkisinin olduğu yerlerde, yer altı sularında, istinat duvarlarında, kanalizasyon borularında, endüstriyel atıkların etkisinde olan yerlerde SDÇ kullanımı son derece uygundur[29].

2.3.6 Erken dayanımlı yüksek çimento

Özel olarak üretilmiş klinker ile az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen erken dayanımı yüksek olan bir çimentodur. Tek bir sınıfı mevcuttur. 28 günlük basınç dayanımına göre EYÇ 52.5 olmak üzere tek tiptir[29].

2.3.7 Katkılı çimento

Katkılı çimento, klinkerle en fazla %19 oranında pozolanik maddenin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. Tek bir sınıfı mevcuttur. 28 günlük basınç dayanımına göre KÇ 32.5 olmak üzere tek tiptir[29].

2.4 Çimentonun Üretimi

Çimentonun üretiminden piyasaya sürülmesine kadar olan aşamaları ana başlıklarla şu şekilde sıralayabiliriz:

- Kullanılacak kil ve kalkerin analizlerinin yapılması ve miktarlarının belirlenmesi,
- Kil ve kalkerin belirli oranlarda karıştırılarak öğütme işlemi sonucunda homojen bir karışım elde edilmesi,
- Karışımın fırında pişirilmesi ve sonuçta oluşan klinkerin soğutucuya sevk edilmesi,
- Klinkerin içerisine az miktarda alçı taşı katılarak öğütülmesi ve böylelikle klinkere bağlayıcı özellik verilerek çimento elde edilmesi,
- Elde edilen çimentonun silolarda bekletilerek kararlı hale geldikten sonra paketlenerek piyasaya sürülmesi [3].

Çimentonun üretiminde hammadde olarak kil ve kalker taşı kullanılır. Öncelikli olarak bu hammaddeler belirli oranlarda karıştırılarak öğütülür ve böylece homojen bir karışım elde edilir. Daha sonra elde edilen karışım fırınlarda 1500°C 'ye kadar pişirilir ve klinker oluşur. Hammadde karışımının pişirilmesi esnasında oluşan değişimler ana hatlarıyla aşağıdaki gibidir:

100 - 200°C- Nem tamamen kaybolur

700 - 800°C- Kalker ayrışır

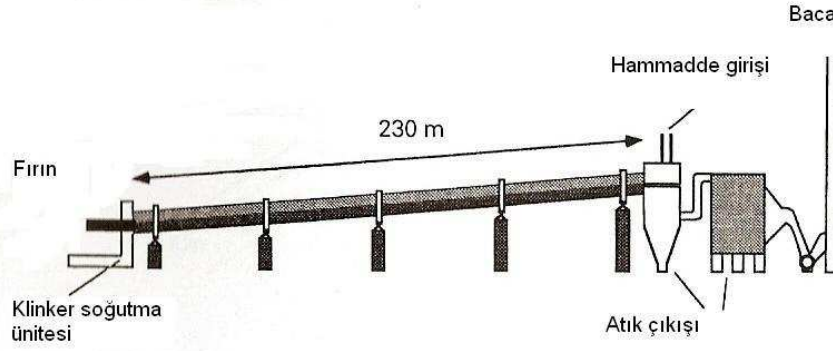
1250°C- Kristal sistem oluşur

1450°C- Klinker oluşur

Klinker oluşuktan sonra klinker içerisine belirli oranda alçı taşı ilave edilerek öğütülür ve böylelikle çimento üretimi tamamlanmış olur. Çimentonun üretiminde, yaş sistem, yarı kuru sistem ve kuru sistem olmak üzere kullanılan 3 farklı yöntem vardır [13].

2.4.1 Yaş sistem

Yaş sistemde hammadde olarak kullanılan kil ve kalker %37-%39 oranında su ilave edilerek öğütülür ve çamur haline gelen karışım Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi fırında pişirilir [8].



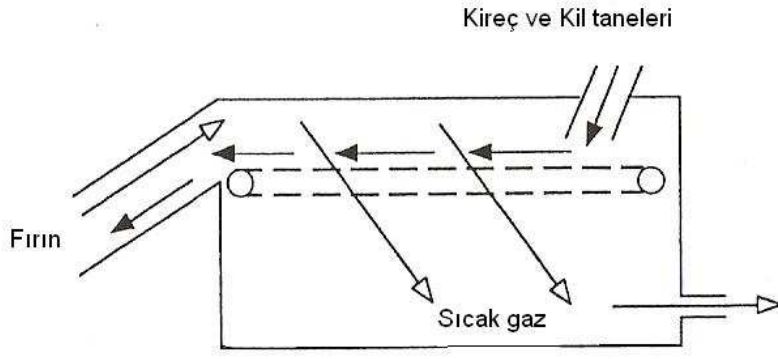
Şekil 2.1 : Yaş sistem fırınlarının şematik diyagramı [8]

Bu sistemde ısı kaynağı ile fırına konulan çamur arasındaki ısı transferini sağlamak için metal zincirler kullanılır. Ayrıca bu kullanılan zincirler çamur içerisindeki serbest suyun uzaklaştırılmasını da sağlar. Çamur, bu zincirli kısma 38°C 'de girer ve yaklaşık $90-100^{\circ}\text{C}$ 'de çıkar. Bu esnada çamurun nem oranı yaklaşık olarak %6 ile %12 arasındadır. Rutubetini kaybeden çamur fırın çıkışındaki soğutucuya dökülür. Daha sonra alçı taşı ilave edilerek öğütülür ve çimento elde edilmiş olur [8].

Bu sistemin ekonomik olabilmesi için kullanılan hammaddelerin çok rutubetli olması gerekmektedir. Ekonomik olmaması sebebiyle de günümüzde çok tercih edilmeyen bir yöntemdir [8].

2.4.2 Yarı kuru sistem

Yarı kuru sistemde hammaddeler öncelikli olarak kuru şekle öğütülür. Öğütme işleminden sonra hammaddelere su püskürtülerek ufak topak halini almaları sağlanır. Bu aşamadaki nem oranı %10 ile %15 arasındadır. Topak haline gelen malzeme Şekil 2.2.'de gözüktüğü gibi lepol ızgarasında kurutulur ve nemini kaybederek kalsine olurlar. Daha sonra fırında pişirilerek klinker oluşumu gerçekleşir. Alçı taşı katılmasıyla da çimento üretimi tamamlanmış olur [8].

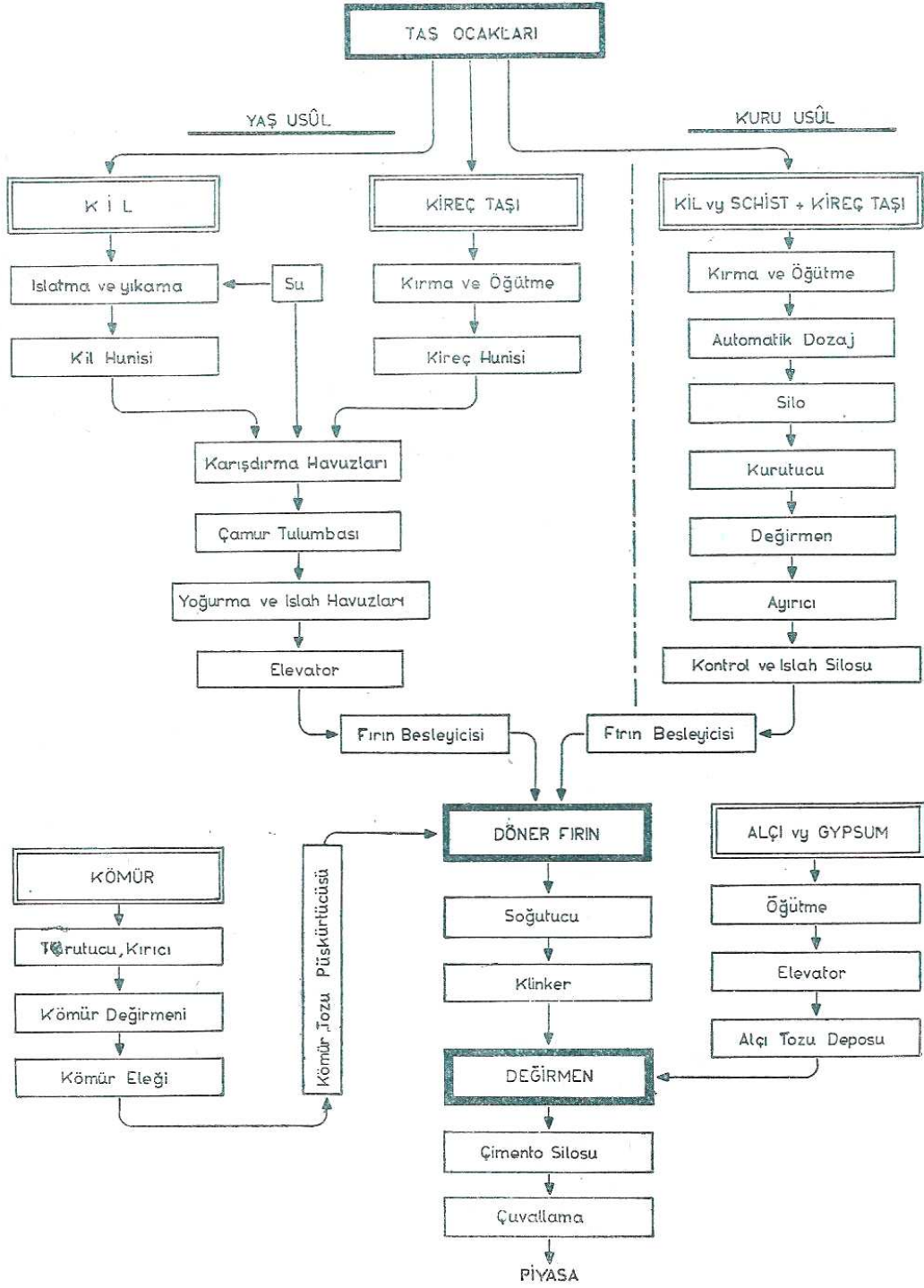


Şekil 2.2 : Kireç ve kil taneciklerinin lepol ızgarasında kurutulması [8]

2.4.3 Kuru sistem

Kuru sistemde hammadde karışımı fırına kuru ve toz halinde konulur. Hammadde, farin değirmeninde öğütülür ve fırından çıkan gazlarla kurutulur. Bu sistemde diğerlerinden farklı olarak ön ısıtma ünitesi vardır. Bu ünite döner fırın çıkışındaki gaz, siklon kademesinden geçerken soğumaya başlar, ters istikamette ilerleyen farin ise gazdan çıkan enerji ile ısınır ve kalsine olur. Bu kademe sayısı artırılarak enerji tasarrufu sağlanabilir. Daha sonra klinker oluşumu ve alçı taşı katılmasıyla üretim sonlanmış olur [8].

Yaş ve kuru sistemler arasındaki en büyük fark döner fırında harcanan enerji farklılığıdır. Kuru sistemde harcanan enerji yaş sistemdekinden çok daha azdır. Şekil 2.3.'de her üç sistemi de kapsayan üretim aşamaları gösterilmiştir [8].



Şekil 2.3 : Çimentonun üretim aşamaları [8]

2.5 Çimento Hamuru ve Sertleşme Sırasındaki Özellikleri

Çimento tanecikleri anidr durumunda, kristal ve amorf karışımı bir yapıya sahiptirler ve su ile karıştırıldıklarında hidrasyon olayı sonunda bağlayıcı özelliği olan jel halindeki çimento hamurunu oluştururlar. Çimento hamuru ilk halinde plastik kıvamda olsa da zamanla katılaşarak mukavemet kazanır. Çimento tanelerinin mukavemet kazanabilmesi için hidrasyon, priz alma ve sertleşme olaylarını sırasıyla geçirmesi gerekir [17].

2.5.1 Hidrasyon

Hidrasyon olayı en genel anlamda, çimento taneciklerinin bileşiminde bulunan kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminatların su ile yaptığı reaksiyonlar olarak tanımlanmaktadır. Hidrasyon olayının oluşabilmesi için minimum ortalama çimento dane büyüklüğü 20 mikron olmalıdır [6].

Su ile temasa geçen çimento tanelerinde yüzeyden itibaren hidrasyon olayı başlar. Hidrasyon olayı zamanla gelişen bir olaydır ve priz tamamlandıktan sonra bile azalan bir hızla olsa dahi senelerce devam eder ve devam ettikçe de çimentonun özellikleri değişir. Hidrasyonunu tamamlayan 1cm^3 anidr portland çimentosu, yaklaşık olarak $2,06\text{ cm}^3$ jel haline gelmektedir [18].

Başlangıçta serbest olarak çimentoya eklenen su, hidrasyon boyunca çimento içerisinde farklı şekillerde bulunur. Zamanla serbest su azalır ve kristalleşme suyuna dönüşür. Hidrasyonun ilerleyen safhalarında su, iyonlarına ayrışarak OH iyonları halinde ürünlerin kimyasal yapısına karışır. Hidrasyon boyunca çimento içerisindeki bileşenler su ile çeşitli reaksiyonlara girerler. Çimentonun ana bileşenlerinin girmiş olduğu hidrasyon reaksiyonları Çizelge 2.3.'de verilmiştir [19].

Çizelge 2.3 : Çimento ana bileşenlerinin hidrasyon reaksiyonları [13]

BİLEŞEN	SU İLE HİDRATASYON REAKSİYONU
C ₃ S	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (n-1)\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (n-3)\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$
C ₂ S	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (n-1)\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$
C ₃ A	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{ısı}$ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$
C ₃ A+alçı	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 3(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) + 19 \text{H}_2\text{O} \rightarrow$ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ $2(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) + 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O} \rightarrow$ $3(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O})$
C ₄ AF	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + (n+6)\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} +$ $+ \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

2.5.2 Hidratasyon ısısı

Betonda kullanılan bağlayıcı maddeler priz ve sertleşme esnasında önemli miktarda ısı açığa çıkarırlar. Bu ısı çimentonun içerisinde bulunan bileşenlerle su arasında oluşan reaksiyonlarda diğer adıyla hidrasyonda meydana geldiği için hidrasyon ısısı olarak adlandırılır. Hidrasyon olayı senelerce sürdüğü için açığa çıkan ısıda zaman geçtikçe artmaktadır. Betonarme yapılarda bu ısı yüzey/hacim oranının fazla olması sebebiyle rahatlıkla dışarı çıkabilmektedir. Ancak bu ısı değeri, baraj gibi büyük kütleli betonlarda büyük değerlere ulaşmakta ve betonda çatlaklar oluşmasına neden olmaktadır. [20].

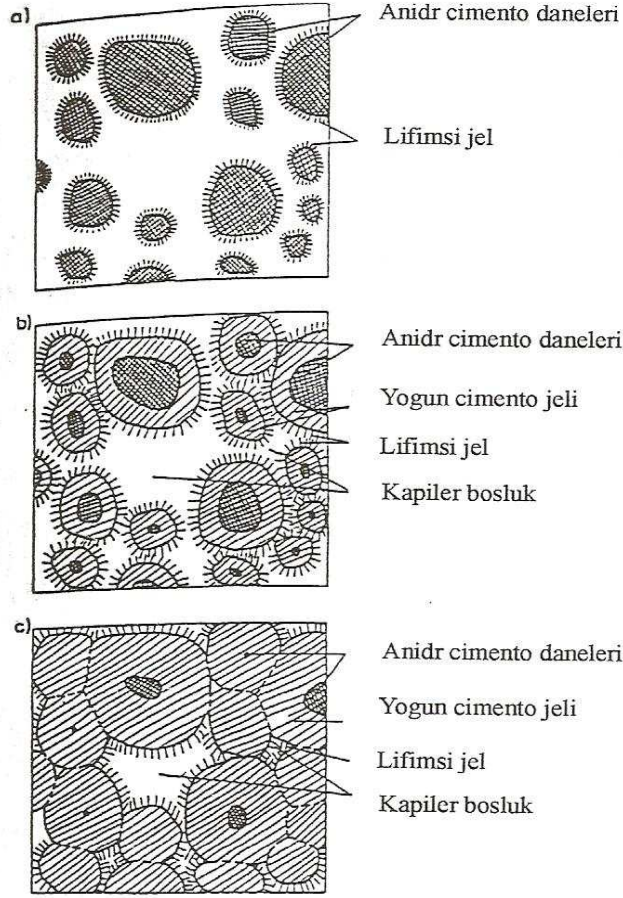
Çimentonun içerisinde bulunan bileşiklerin hidrasyon ısısı üzerinde önemli etkileri vardır. Aşağıdaki Çizelge 2.4.'de su/çimento oranı %40 ve sıcaklığı 21°C olan bileşenlerin hidrasyon ısıları verilmiştir [13].

Çizelge 2.4 : Çimento ana bileşenlerinin hidratasyon ısıları [13]

Bileşen	Hidratasyon Isısı (cal/g)							
	3 gün	7 gün	28 gün	3 ay	1 yıl	6,5 yıl	13 yıl	Tam hidratasyon
C ₃ S	58	53	80	104	117	117	122	120
C ₂ S	12	10	25	42	54	53	59	62
C ₃ A	12	372	329	311	279	328	324	207
C ₄ AF	69	118	118	98	90	111	102	100

2.5.3 Priz ve sertleşme

Priz, kısaca bağlayıcı maddelerin katılaşması olarak tarif edilebilir. Priz ve sertleşme hakkında iki ayrı teori ortaya atılmıştır. Birinci teori 1887 yılında Le Chatelier tarafından ortaya atılmıştır. Bu teoriye göre çimento içerisinde bulunan kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat, ayrı ayrı su ile reaksiyona girerler. Tanecikler su ile temasa geçtikten sonra çözülürler. Karışım doygün hale geldikten sonra kristalleşme oluşur ve karışım tekrar doyma derecesinin altına düşer. Bu karışım kalan taneciklerinde çözülmesini sağlar. Oluşa kristaller sert bir hal alırla ve priz gerçekleşmiş olur. Priz ve sertleşme ile ilgili bir diğer teori ise Wilhelm Michaelis tarafından ortaya atılmıştır. Bu teoriye göre ilk aşamada kireç, alüminat ve sülfat suda erir. Sudaki kireç miktarı belirli bir değere ulaştıktan sonra kalsiyum silikat hidrate jeli oluşur. Bu oluşan jel, çimento boşluklarını doldurur ve suyun çimento danelerinin iç kısımları tarafından emilmesi sonucunda kuru bir yüzeye sahip olur ve katılaşma meydana gelir. Her iki teori de priz ve sertleşme hakkında önemli bilgiler vermektedir ve her ikisi de doğru kabul edilir. Çünkü katılaşan çimento hamurunun içyapısında hem tanecikler hem de jel vardır. Aşağıdaki Şekil 2.4.'de çimento hamurunun içyapısı görülmektedir [13].



Şekil 2.4 : Çimento hamurunun iç yapısı [6].

2.6 Sertleşmiş Çimento Hamurunun Özellikleri

Serleşmiş çimento hamuru özellikleri, mekanik mukavemet, yük altında deformasyon, rötre ve şişme, donmaya karşı dayanıklılık ve kimyasal etkilere dayanıklılık olarak sıralanabilir.

2.6.1 Mekanik mukavemet

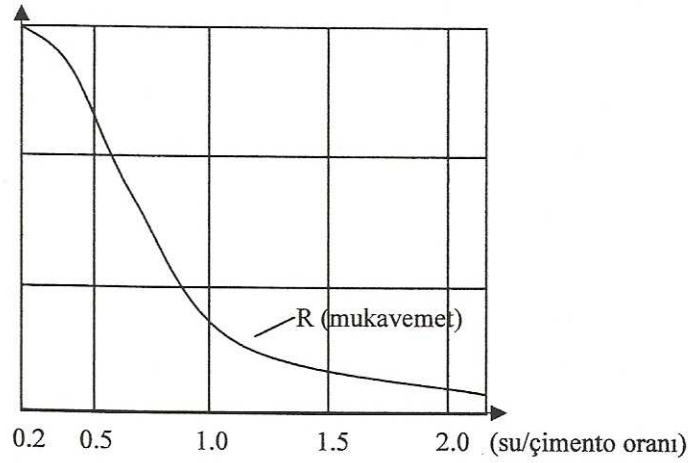
Mekanik mukavemet ile sertleşmiş çimento hamurunun içyapısı hakkında tam olarak bir bağlantı kurulamamıştır. Ancak birçok deneye dayalı bağlantı mevcuttur. Bu bağlantılar üzerinde çalışan Powers mekanik mukavemetin, jel konsantrasyonuna bağlı olduğunu belirten aşağıdaki formülü öne sürmüştür [13].

$$R=K.X^n \quad (2.2)$$

Bu bağlantıda X jel konsantrasyonu (jel hacmi/çimento hamuru hacmi), K jel kalitesini belirten bir katsayı, N 2 veya 3 gibi sabit değerler alabilen bir sayıdır. Bu formülde jel kalitesini belirten K katsayısı, çimento cinsine ve özelliklerine bağlıdır. 1960 yılında Grudemo, mekanik mukavemetin katı yüzler arasındaki fiziki çekme kuvvetlerinden ve kimyasal bağlardan oluşabileceğini öne sürmüştür. Bahsedilen fiziki çekme kuvvetleri, Van der Waals kuvvetleridir ve çimento hamurunun sahip olduğu mukavemetin temel kaynağıdır. Fiziksel çekme kuvvetlerinin yanı sıra kimyasal bağlar da mevcuttur. Çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan kristal yapı, büyüyerek iğneli bir yapı halini alır ve boşlukların dolmasını sağlayarak mukavemetin kazanılmasına neden olur [13].

Reinus adında bir bilim adamının bu konuda çalışmaları olmuştur. Reinus'a göre çimento hamuru üzerinde etkiyen basınç kuvveti, iğneli yapı sayesinde bir çimento danesinden diğerine aktarılır. Danelerin konumları nedeniyle bazılarının kuvvete dik, bazılarının eğik, bazılarının da paralel olacağını düşünmüştür. Bu düşünceye göre kuvvete eğik konumda olan kristaller daneleri iterek birbirlerinden uzaklaştırmaya çalışır, dik kristallerin ise daneleri çekerek birbirlerine yaklaştırmaya çalışırlar. Çekmeye çalışan bu dik kristallerin uzaması, çimento hamurunun basınç etkisi altında kaldığı zaman yapmış olduğu yanıl uzamanın nedenidir. Bu kristallerdeki çekme mukavemetinin düşük olması da çimento hamurunun basınç etkisi altında yapmış olduğu kuvvete paralel çatlak ve yarılmalara nedenidir [20].

Bir bağlayıcı maddenin mukavemet kazanması hidratasyon olayıyla ilgilidir. Hidratasyon olayı zamanın bir fonksiyonudur ve ne kadar hızlı gelişirse çimentonun mukavemet alması o kadar çabuk gelişir. Bu nedenle hidratasyon olayını etkileyen faktörler aynı zamanda çimentonun mekanik mukavemetini de etkiler. Mekanik mukavemeti etkileyen en önemli etkenlerden birisi çimentoya katılan su miktarıdır. Çimentoya katılan su miktarı arttıkça hamurun mukavemeti azalmaktadır. Aşağıdaki Şekil 2.5.'de çimento hamurunun mukavemetinin su/çimento oranına göre değişimi verilmiştir [6].



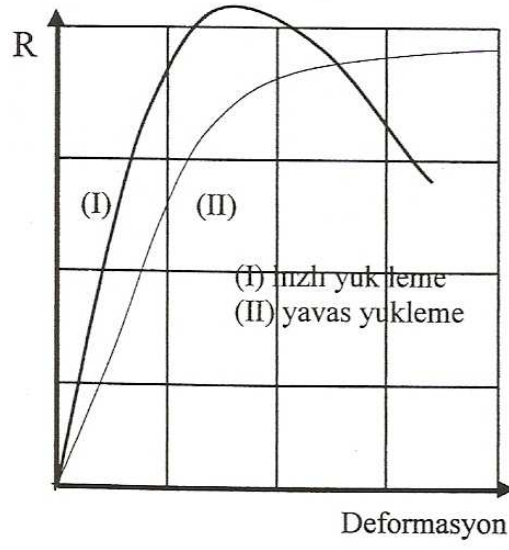
Şekil 2.5 : S/Ç Oranına bağlı olarak beton basınç mukavemetinin değişmesi [6]

Mekanik mukavemeti etkileyen faktörlerden bir diğeri ise çimentonun inceliği ve bileşimidir. İnce öğütülmüş çimentolar diğerlerine göre daha hızlı mukavemet almaktadır. Ayrıca bileşiminde kireç bulunan çimentolar, silisi fazla olan çimentolardan daha hızlı mukavemet alırlar ancak uzun sürede son mukavemetlerinde bir değişiklik olmaz [6].

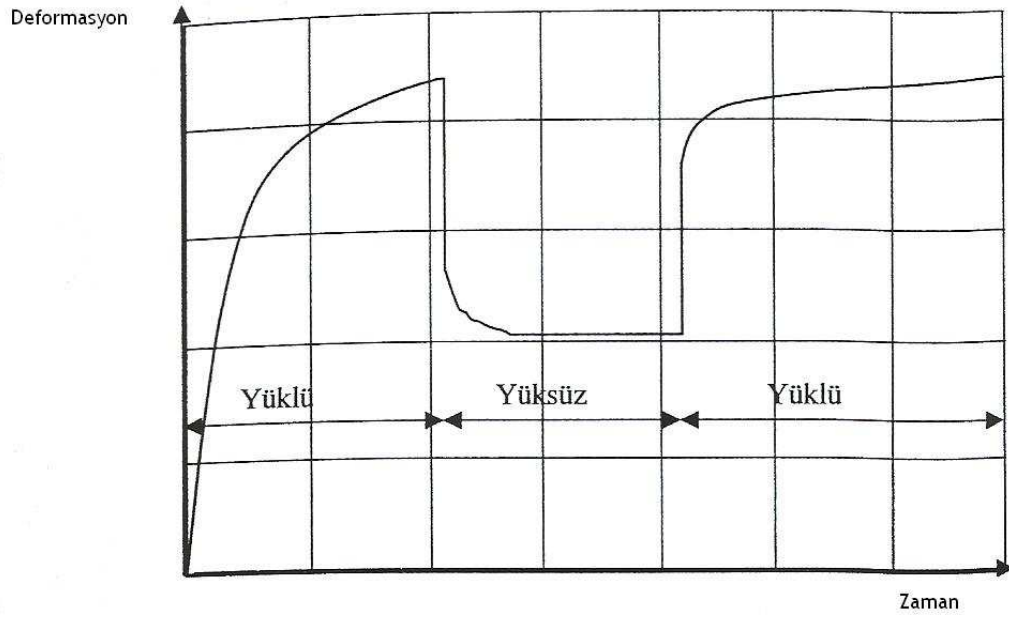
Ayrıca çimento kalitesi, su/çimento oranı, yükleme hızı ve süresi, numune boyutu ve şekli, sıcaklık, zaman ve rutubet de çimentonun mekanik mukavemetini etkileyen diğer unsurlardır [6].

2.6.2 Yük altında deformasyon

Çimento hamuru sürekli, hızlı ve yavaş yüklemeler altında farklı deformasyon hareketleri gösterirler. Bunun nedeni de jelin içyapısı ile açıklanabilir. Çimento hamuru özellikle sürekli yükler altında krip deformasyonu gösterirler. Krip deformasyonunun sebebi de; sürekli basınç jeldeki katı yüzeyle jel suyu arasındaki kuvvetin dengesini bozarak, yeni denge hali kurulana kadar jel suyunun bir miktarının kapiler boşlulara geçmesi ve buradan da buharlaşmasına sebep olmasıdır. Aşağıdaki Şekil 2.6. ve Şekil 2.7.'de yavaş, hızlı ve sürekli yüklemeler altında çimento hamurunun yaptığı deformasyonlar gösterilmektedir [13].



Şekil 2.6 : Hızlı ve yavaş yüklemede deformasyon değişimi [6]



Şekil 2.7 : Sürekli yüklemede deformasyon değişimi [6]

2.6.3 Rötme ve şişme

Çimento taneleri su ile karşılaştıkları zaman hidrasyonun oluşmasıyla çimento hamurunun hacminde önemli değişiklikler oluşmaktadır. Çimento jeli içinde

bulunduğu ortama göre hacimce büyür veya küçülür. Eğer kuru bir ortam mevcutsa jel suyunda azalma meydana gelir ve büzülme oluşur. Eğer nemli bir ortam mevcutsa jel suyunda bir artış meydana gelir ve şişme olayı oluşur. Ancak kuru ortamda oluşan büzülmenin değeri her zaman için nemli ortamda oluşan şişmeden fazladır. Bu yüzden çimentonun nemli ortamda korunması daha yararlıdır [22].

Rötre ve şişme olaylarının oluşmasının nedeni temelde aynı olmakla beraber, çimento hamuru içerisindeki sıvı miktarının değişmesi sonucu oluşan basınç değişimlerinin oluşturduğu iç kuvvetlerdir. Sertleşmiş çimento hamurundaki iç yüzeylerle su molekülleri arasındaki çekme kuvveti suyun jel yüzeyleri arasında yayılmasına neden olur. Yayılma esnasında çıkacak herhangi bir engel, karşıt yüzeyleri birbirinden itecek basınç değişimleri oluşturur ve çimento hamurunun şişmesine neden olur. Bu durumun tersi olursa, yani çimento hamuru bünyesindeki su uzaklaşırsa, itme kuvvetlerinin azalıp çekme kuvvetlerinin artmasına neden olacaktır ve çimento hamurunda büzülme meydana gelecektir. Meydana gelen rötre ve şişme olayların boyutu, çimento hamuru içerisindeki değişen su miktarıyla orantılıdır [15].

Çimento hamurunda oluşan rötre ve şişmeyi etkileyen faktörleri, çimento cinsi, agrega cinsi, kullanılan katkıları, su/çimento oranı, sıcaklık, rutubet, numune boyutu ve numune şekli olarak sıralayabiliriz [20].

2.6.4 Geçirimsizlik

Sertleşmiş Çimento hamuru içerisinde suyun ve rutubetin geçişini sağlayan iki tür boşluk vardır. Bunlar kapiler boşluklar ve jel boşluklarıdır. Bunlardan jel boşlukları, kapiler boşluklara oranla çok daha ufaktır ve içerisine giren suyun bağlarla yüzeye yapışmasına neden olarak dışarı çıkmasına izin vermezler. Bu yüzden su ve rutubet akışında çok önemli bir rol oynamazlar. Diğer boşluk çeşidi olan kapiler boşlukların boyutları ise daha çeşitlidir ve çimento hamurunun geçirimsizliğini sağlarlar. Ancak çimentonun geçirimsizliğini saptamak için bu boşlukların miktarını bilmek tek başına yeterli olmamaktadır [6].

Geçirimsizliği etkileyen birçok faktör vardır. Bunlar; çimentonun özellikleri, agrega granülometrisi, çimento dozajı, su/çimento oranı, kullanılan katkı maddelerinin özellikleri, rutubet ve sıcaklık olarak sıralanabilir [13].

2.6.5 Donmaya karşı dayanıklılık

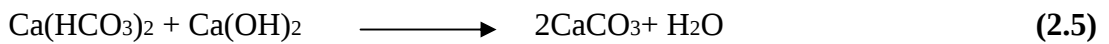
Sertleşmiş çimento hamurunun donmaya karşı dayanıklılığı bünyesinde bulunan suyun etkisine bağlıdır. Jel boşluklarında bulunan su katı yüzeylerin çekimi altında olduğundan sıfır derecenin altında bile donmaz ve çimento hamuru için bir tehlike yaratmaz. Ancak kapiler boşluklardaki su, dış yüzeyden içeri doğru donmaya başlar ve jel boşluklarındaki suyu da kendine çekerek hacmini artırır. Kapiler boşluklarda oluşan bu hacim artışı boşluğun çevresinde basınç etkisi yapar. Böylelikle donan su çimento hamurunda çatlamlar oluşmasına neden olur [6].

Sertleşmiş çimento hamurunun donmaya karşı dayanıklılığı hamurun bünyesinde bulunan su/çimento oranına ve hamur içerisine sürüklenmiş olan hava miktarına bağlıdır [6].

2.6.6 Kimyasal etkilere karşı dayanıklılık

Kimyasal etkilerin neden olduğu çözeltiler beş grupta toplanabilir[38]:

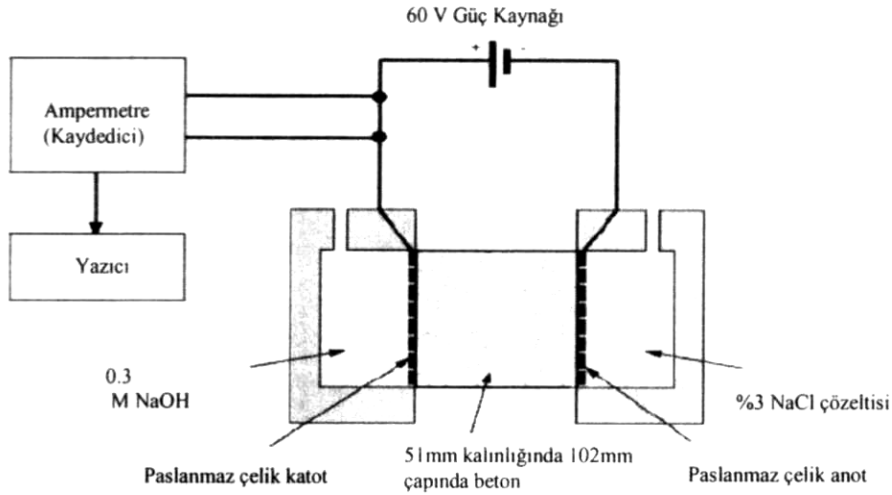
- 1- Saf sular: Çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 'i çözerek boşluklu geçirimli beton oluşumunu kolaylaştırır.
- 2- Karbonatlı çözeltiler: Havadaki CO_2 su içinde H_2CO_3 'e dönüşür. Oluşan H_2CO_3 betona korozif şekilde etki eder.



Eğer CO_2 az ise (2.5) reaksiyonu biter ve CaCO_3 boşlukları doldurarak daha dayanıklı bir yapı meydana gelir. CO_2 miktarı fazla ise (2.4) reaksiyonu ile korozyona devam eder. Mukavemet ve sertliğin artmasına yardımcı olarak oluşan çatlakların kendiliğinden tamir olmasını sağlar. Ancak betondaki büzülmelere ve çeşitli ağırlık artmalarına neden olur [20].

- 3- Klorürlü çözeltiler: Çözeltideki klorürler çimentodaki Ca(OH)_2 'in çözünmesini kolaylaştırır, betonarme yapıdaki donatının korozyonuna neden olur. Bu olumsuz etkilerin yanı sıra, sülfat iyonlarının C_3A 'daki etkisi etkisini yavaşlatması olumlu bir etkiye sahiptir.

Onur Yılmaz'ın yaptığı deneysel çalışmada; klor geçirgenliği deneyi ASTM C1202–05 standardına uygun olarak yapılmıştır. Bu yöntem için 10 cm çapında 5,1 cm yüksekliğinde silindir numuneler kullanılmıştır. Öncelikle deneyde kullanılacak numunelerin yan yüzeyleri yalıtkan bir malzemeyle kaplanır. Numunelere önce 3 saat kuru, ardından 1 saat su içerisinde olmak üzere toplam 4 saat vakum uygulanmaktadır. Deney düzeneğinde numune iki kabın arasına konulur. Kaplardan birinde %3'lük sodyum klorür, diğerinde ise %3'lük sodyum hidroksit çözeltisi bulunmaktadır(Şekil 2.8). Bu deney yöntemi betonun elektriksel geçirimliliğine dayanmaktadır. 60 V değerinde bir potansiyel farka maruz bırakılan numunenin içinden 6 saat sonunda geçen toplam akım değerinin ölçülerek, Coulomb cinsinden belirtilmesine dayanmaktadır. Klor geçirimliliğine göre yapılan değerlendirme Çizelge 4.4.'da verilmiştir[31].



Şekil 2.8 : Klor geçirimliliği deney düzeneği

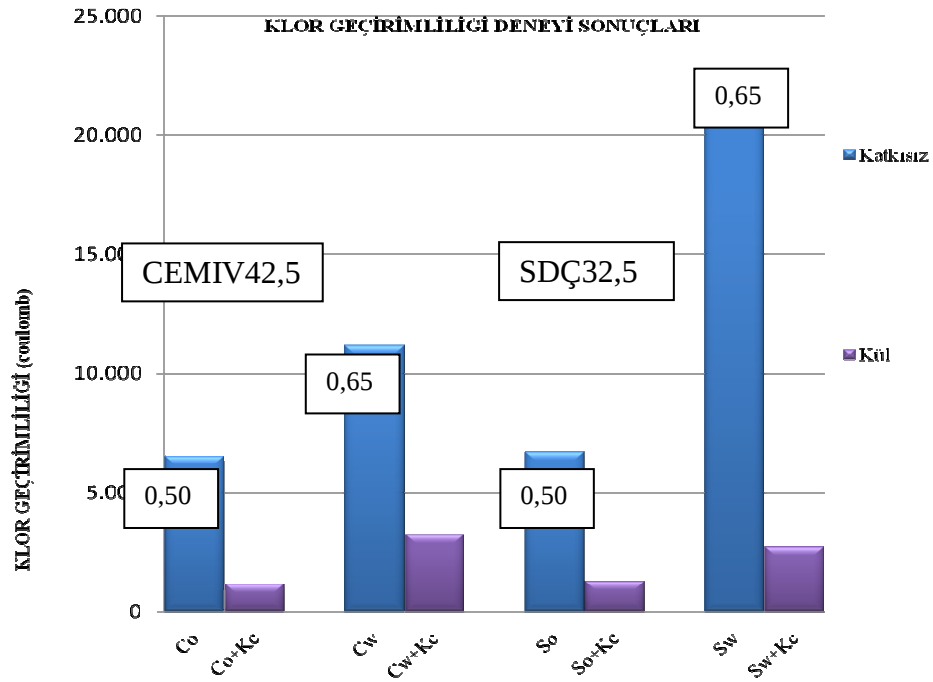
Her karışım için 2 numune üzerinde deney yapılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır[31].

Çizelge 2.5: Klor geçirimlilik deneyi sonuçlarına göre betonun değerlendirilmesi

Geçen elektriksel yük miktarı (Coulomb)	Klor iyonu Geçirimliliği Yönünden Değerlendirme
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir

Klorürler özellikle deniz suyuunda CaCl_2 , MgCl_2 , NaCl , KCl şeklinde ve bunların birkaç tanesi karışım halinde bulunabilir.

Katkı olarak tras kullanılan numunelerde klor geçirimliliği değerleri diğer katkılar ile yapılan harç numunelerine göre daha yüksek çıkmıştır. Klor geçirimliliğini engelleme konusunda en kötü sonuçları veren katkı tras olmuştur. Klor geçirimliliğini engelleme konusunda en iyi sonucu veren karışım CEMIV/B(P) 42,5R tipi çimento ile üretilen, 225 g su içeren ve içerisine kül katılmış harç numunesidir (Şekil 2.9). Şekilde kutu içerisinde yazan rakamlar su/bağlayıcı oranları ve kullanılan çimento tipleridir[31].



Şekil 2.9 : Klor geçirgenliği deneyi sonuçlarına kül etkisi[31]

- 4- Nitratlı çözeltiler: Nitratlar, çimentonun hidratasyonu sonucunda oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girer. Meydana gelen ürün, C_3A 'nın hidratasyon ürünü olan C_3AH_6 ile reaksiyona girerek hacimca genişmeye neden olan tuzlar oluşturur.
- 5- Sülfatlı çözeltiler: Sülfatlı bileşiklere doğada çok sık rastlanır. Toprakta % 0,01–0,05 oranında bulunabilir. Sülfat, az veya çok tüm sularda, temel sularında, akarsu ve deniz sularında veya kimya endüstrisinde ürün veya atık şeklinde çeşitli tuz bileşimleri halinde bulunabilirler.

Sülfat, çimentonun bazı bileşenleri ile tepkimeye girerek betonun zamanla bozulmasına neden olur. Bu saldırı sülfat iyonlarının, sertleşmiş betondaki alüminli ve kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girmesi, etrenjit ve alçı taşı oluşturmaları ile gerçekleşir. Reaksiyon ürünleri betonda genişleme yaratarak çatlaklara ve dağılmaya yol açar, agrega-çimento aderansının etkilenmesiyle betonun mukavemeti düşer. Sülfat saldırısına uğramış betonun karakteristik görünümü, özellikle köşe ve kenarlardan başlayarak tüm kütleyle yayılan beyaz lekeler, çatlaklar ve dökülmelerdir. Betonun kolayca ufalanabildiği ve yumuşadığı görülür.

Beton açısından sülfat etkisinin şiddeti toprak veya suda bulunan sülfat iyonunun konsantrasyonuna bağlıdır. Zemindeki SO_4^{2-} veya SO_3^{2-} yoğunlukları % veya mg/kg olarak verilir. Yeraltı suyundaki sülfat konsantrasyonu ise ppm veya mg/lt olarak gösterilir. Çizelge 2.6'da ACI 201 standardında sülfat etkisi açısından yapılmış sınıflama gösterilmiştir[40].

Çizelge 2.6 : Zemin suyu ve toprakta bulunan sülfat yoğunluklarının betona etkisi

Etki Derecesi	Zeminde Suda Çözünen Sülfat SO_4^{2-}	Suda SO_4^{2-} mg/lt
İhmal Edilebilir	0,00-0,10	0-150
Orta	0,10-0,20	150-1500
Şiddetli	0,20-2,00	1500-10000
Çok Şiddetli	2,00 ve üstü	10000 ve üstü

TS 3340 “Zararlı Kimyasal Etkileri Olan Su, Zemin ve Gazların Etkisinde Kalacak Betonlar için Yapım Kuralları” standardına göre ise Sülfat (SO_4^{2-}) iyonlarının zararlı etkinlik dereceleri Çizelge 2.6’deki gibi sınıflandırılmıştır. Sülfat iyonu yoğunluğunu zaman zaman SO_4^{2-} olarak, bazen ise SO_3^{2-} olarak ifade edilmektedir. SO_3^{2-} konsantrasyonunu 1.2 ile çarparak SO_4^{2-} konsantrasyonuna geçmek mümkündür[40].

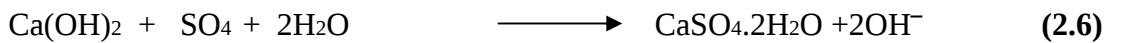
Çizelge 2.7 : TS 3340’a göre sülfat (SO_4^{2-}) iyonlarının zararlı etkinlik dereceleri

Etkinlik Derecesi	Suda SO_4^{2-} mg/l	Suda SO_4^{2-} mg/kg
Zayıf	200-600	2000-5000
Kuvvetli	600-3000	5000’den büyük
Çok Kuvvetli	3000’den büyük	-

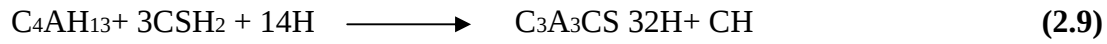
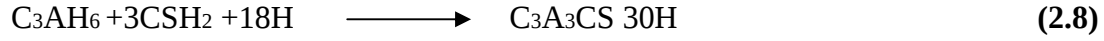
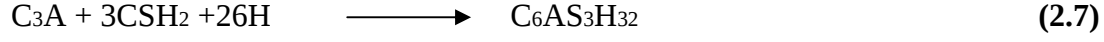
Standartlarda yapılan sınıflamalar beton ile sürekli temas eden durgun sular için geçerlidir. Suyun basıncının ve sıcaklığının artması, ıslanma-kuruma olayları, çarpma, sürtünme gibi mekanik etkiler etkinliğin derecesini artırır. Betonun özellikle doygun hale gelip ardından kuruması ve bu olayın sürekli gerçekleşmesi halinde hasarın boyutu büyür.

Betonda sülfat etkileşimi; sülfatlara, çimento ve betonun yapısına, tuzların yoğunluğuna, dış koşullara, zamana, çözeltinin yenilenmesine ve hareketine v.s. bağlıdır. Betonla sülfatlı çözeltiler arasında oluşan reaksiyon ürünleri, sülfata bağlı katyonlar, farklı sülfat karışımları, bunların birbirine bağlı oranları, çözeltideki klorür iyonları miktarı, çimentodaki C_3A miktarı, C_3A ’nın kristal şeklinin kübik, tetragonal, ortorombik olması, hidrate çimento hamurundaki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ’e göre değişir ve sülfat etki mekanizması çok karmaşıktır.

Sülfatlı çözeltilerde ortamdaki sülfat iyonları çimentonun hidratasyon ürünü $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile birleşerek $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ oluşturur.



Bu reaksiyon Na_2SO_4 'lı ortamda ise NaOH , MgSO_4 'lı ortamda ise $\text{Mg}(\text{OH})_2$ meydana gelir. Reaksiyon sonucu oluşan $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, çimentodaki C_3A , hidratasyon ürünü C_3AH_6 , C_4AH_{13} , $\text{C}_4\text{ASH}_{12-18}$ ile Candlot tuzuna dönüşür. Candlot tuzu doğal mineral olan etrenjite çok benzer ~ 30 molekül H_2O bağlanması nedeni ile harç veya betonda hacim artışına neden olur.



Reaksiyonun gelişimini doğrudan etkileyen parametreler şöyle sıralanabilir

- 1) Etkilenme koşulları (SO_4^{2-} içeriği, ortam koşulları)
- 2) Betonun geçirimliliği (zararlı madde taşınımı)
- 3) Betonun yapısı (çimentonun kimyasal yapısı)
- 4) Suyun varlığı

Diğer tüm dayanıklılık problemlerinde olduğu gibi betonun sülfata dayanıklılığı da büyük oranda geçirimliliğe bağlıdır. Betonun geçirimliliğini etkileyen malzeme özellikleri, karışım oranları, çatlak durumu, taze betonun sıkıştırılması, kürü, vb. tüm parametreler aslında sülfata dayanıklılığını da dolaylı olarak etkilemektedir. Bir başka deyişle, sülfat etkisine maruz kalan betonun boşluk yapısı değişmekte, gözenekliliği artmakta, çatlaklı bir yapı oluşmaktadır. Bu durum, betonun geçirimliliğinin artmasını dolayısıyla yıpranma sürecinin kendi kendini hızlandırma özelliğini göstermektedir.

Katı, kuru tuzlar betona zarar vermezler ancak su ile birlikte bulunmaları sonucu, sertleşmiş çimento harcı ile reaksiyona girerler. Bazı killer alkali, magnezyum ve kalsiyum sülfatlar gibi kimyasal maddeler içerir, bunlar yeraltı suyu ile birleşince olumsuz etki ortaya çıkar. Zemin yüzeyinde oluşan tuz birikintileri, çoğunlukla sodyum sülfattır (Na_2SO_4). Ancak magnezyum sülfata (MgSO_4) da birçok bölgede rastlanır. Bu tür birikimlerin, nispeten kuru iklimlerde fazla buharlaşma sonucu, yeraltında bulunan tuz tabakalarındaki çözünebilir sülfatların yukarıya emilip, tırmanması sonucu oluştuğu sanılmaktadır.

Çimentonun kimyasal yapısı, özellikle C₃A içeriği betonun sülfata dayanıklılığında önemli bir parametredir. Bu nedenle, ASTM standartları C₃A içeriği %8 ve altında olan çimentoları sülfata orta seviyede dayanıklı, %5 ve altında olan çimentoları ise sülfata yüksek seviyede dayanıklı olarak tanımlamaktadır. Avrupa’da ise %3 C₃A içeriği birçok ülke tarafından üst sınır kabul edilmektedir. Normal portland çimentolarında C₃A oranı %8–11 arasında değiştiğinden, bu tip çimentoları sülfat etkisinde kalan yapılarda kullanmak doğru değildir.

Cürufli çimentoların hidratasyonu sonucu oluşan C₃A yalnızca Portland çimentosu klinkerinden geldiği için miktarı çok azdır. Bu nedenle cürufli çimentolar sülfata çok dayanıklıdır. Bazı standartlarda en az %65 oranında cüruf içeren çimentolar sülfata dayanıklı tip olarak kabul edilmektedir.

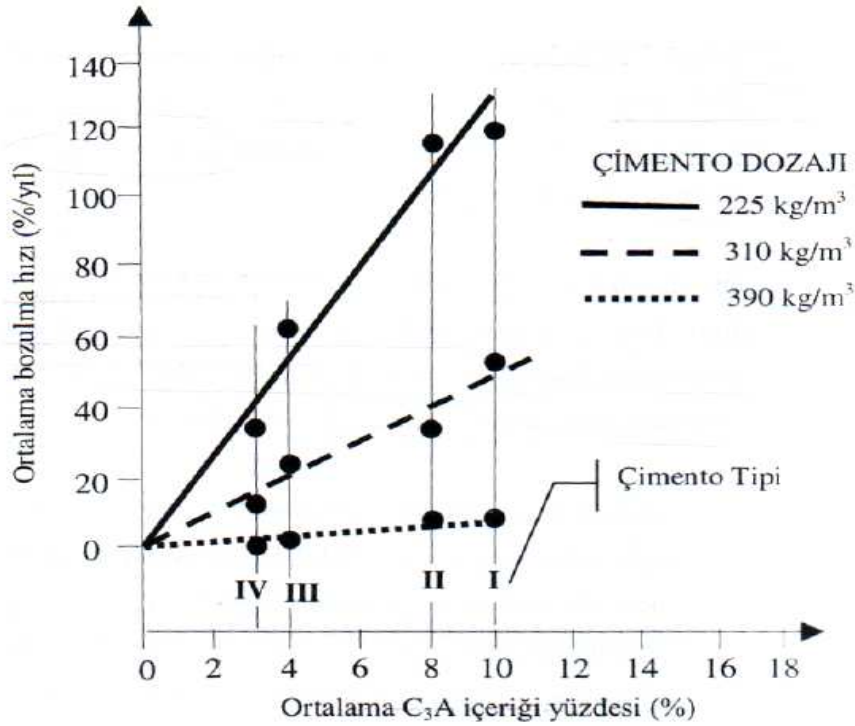
Son yıllarda yapılan araştırmalar katkı çimentoların sülfata dayanıklılık konusunda portland çimentolarına kıyasla üstünlüğünü ortaya koymaktadır. Uçucu kül, silika tozu veya doğal puzolan gibi mineral katkıların da bu konuda önemli yararları vardır. Çimento harcındaki serbest kirecin puzolanlarla reaksiyona girip bağlanması dayanıklılığı arttıran bir unsurdur. Bu süreç içinde beton sülfatlarla temas etmemelidir. Ayrıca katkı çimentoların kür süresinin de daha uzun olduğu unutulmamalıdır.

Alüminli çimentolar aslında sülfata dayanıklılık açısından geliştirilmişlerdir. Bu tip çimentolar Ca(OH)₂ içermemeleri ve hidratasyon sırasında oluşan inert alümin jelinin koruyucu etkisi sonucu sülfata çok dayanıklıdır. Ancak asidik karakterdeki alüminli çimentolar günümüzde bu amaçla tüketilmemektedir. Çimento tiplerinin sülfata dayanıklılığı yukarıda açıklanmıştır. Ancak, deniz suyu etkisi gibi karma bir kimyasal saldırı durumunda çok düşük C₃A içerikli, sülfata dayanıklı çimento kullanımı betonarme donatısının korozyonu açısından doğru olmayabilir.

Çimento C₃A içeriği ve betonda kullanılan çimento miktarının betonun sülfata dayanıklılığına etkisinin incelendiği Verbeck’in deneysel bir çalışmasının sonucu Şekil 2.10’da gösterilmektedir. Deney sonuçları betonda kullanılan çimento miktarının, dolayısıyla betonun geçirimsizliğinin, sülfata dayanıklılıkta çimentonun kimyasal yapısından daha etkili bir faktör olduğunu göstermektedir. C₃A içeriği %4 olan çimentodan 310 kg/m³ kullanılarak üretilen betonların, C₃A içeriği %10 olan çimentodan 390 kg/m³ kullanılarak üretilen betonlara kıyasla iki-üç kat daha hızlı

bozuldukları görülmektedir. Ancak burada, çimento dozajının tek başına betonun kalitesi ve geçirimsizliği hakkında fikir veremeyeceğini, ancak S/Ç oranıyla birlikte tanımlandığında anlam kazanacağını belirtmekte fayda vardır. Örneğin 350 kg/m³ çimento dozajı ile S/Ç oranına bağlı olarak 28 günlük silindir basınç dayanımı 14 MPa olan bir beton üretilebileceği gibi 40 MPa olan bir beton da üretilebilir. Doğaldır ki bu iki beton arasında dayanıklılık açısından da büyük farklar olması beklenir.

Su, sülfat reaksiyonlarında rol almakla kalmaz aynı zamanda bu iyonların beton içine taşınmasını sağlar. Bu bağlamda yeraltı suyunu drene ederek beton yüzeylerle temasını önlemek ve temelleri kuru tutmak reaksiyonun gelişimini önlemek için etkili bir önlemdir[30].



Şekil 2.10 : Farklı tip çimentolarla değişik çimento içeriklerinde üretilmiş betonların sülfat etkisiyle bozulma hızları

Çimento harçları imalatın hemen hemen her aşamasında ve kullanım alanlarında çeşitli kimyasal maddelerle temasa geçebilir ve korozyona maruz kalabilirler. Genel olarak bütün asitlerin zararlı, bütün bazılarının zararsız olduğunu söyleyebiliriz. Bu nedenle çimento ve harçlar uygun şartlarda korunmalıdır [20].

3. HARÇLAR

Harç, temel olarak kum, su ve bağlayıcı malzemelerden oluşmaktadır. Geniş bir tanım yapacak olursak, bağlayıcı malzeme, dolgu malzemesi suyun belirli oranlarda karıştırılması ile oluşan ve katılaşma özelliği bulunan hamurlara harç denir. [8] Diğer bir tanımda ise; bağlayıcı malzeme, kum, su ve ihtiyaca göre katkı maddelerinin belirli oranlarda karıştırılması ile oluşan ve mukavemet, aderans, doluluk, geçirimsizlik ve dış etkilere karşı dayanıklılık gibi özellikleri bulunan hamurlara harç denir [15].

3.1 Harçların Dayanımı ve Dayanıklılığı

Harçların dayanımını belirleyen iki ana unsur vardır. Bunlar harcın mekanik dayanımı ve aderansıdır. Bu iki unsuru etkileyen faktörler doğrudan harcın dayanımını da etkiler. Harç içinde kullanılan kumun granülometri, su/çimento oranı, bağlayıcının mukavemeti ve harcın doluluk oranı mekanik mukavemeti etkileyen faktörlerdir. Aderansı etkileyen faktörler ise, harcı yapıştırıldığı yüzeyin pürüzlülüğü ve harcın yapışma yeteneğidir [6].

Harcın dayanımı etkileyen bir diğer faktör ise sertleşme sırasındaki oluşan hacim değişikliğidir. Kullanılan bağlayıcı cinsine göre bu hacim değişikliğinin miktarı da değişir. Bağlayıcı olarak kullanılan çimento kullanılan harçlar da % 0,08–0,12 oranında rötre meydana gelmektedir. Oluşan rötre sonucunda çatlaklar oluşmakta ve bu çatlaklar harç dayanımının düşmesine neden olmaktadır. Rötre oluşmasını engellemek için çimento dozajı azaltılmalı ya da ıslak kür uygulanmalıdır. Harçta meydana gelen hacim genişlemeleri de aynen rötre gibi dayanımı düşüren bir diğer etkendir. Harçta oluşan şişmeler yüzey ile harç arasında hava boşlukları oluşmasına neden olmaktadır. Bu oluşan hava boşlukları da çatlaklara ve harç dökülmelerine neden olmaktadır [6].

Harçların dayanıklılığına gelince; bir harcın dayanıklılığını anlayabilmek için öncelikle maruz kaldığı çevresel, kimyasal, biyolojik ve mekanik etkilere bakmak gerekir. Bina cephelerinde uygulanan harçların maruz kaldığı etkiler şunlardır:

1. Çevresel etkiler;

- Yağışlar
- Güneş
- Rüzgar

2. Mekanik faktörler

- Deprem
- Mekanik aşınmalar

3. Kimyasal faktörler

- Gazlar
- Hava kirliliği

4. Biyolojik faktörler

- Hayvanlar
- Bitkiler

Sertleşme sırasındaki hidrasyon olayı için su gereklidir. Ancak uzun süreli suya maruz kana harçlarda aşınmalar meydana gelir. Özellikle kar etkisinde kalan cephelerde donma kaynaklı çatlamalar oluşur. Harç bünyesine giren su donar ve genişleyerek çatlak oluşumuna neden olur. Bir diğer yağış biçimi olan dolu ise daha çok mekanik etki yarattığı için aşınmaya neden olur. Güneş ve rüzgar ise harç içinde bulunan suyu buharlaştırdığı için doğrudan hidrasyonu etkiler. Deprem ne aşınmalar ise mekanik etki yaratır ve cephede çatlak ve kırılmalara neden olur [6].

Harcın bu sayılan faktörlere karşı dayanıklı olabilmesi için geçirimsizliğinin düşük, doluluk oranının yüksek olması gerekir. Ayrıca yüzeyi nefes alabilmeli, buhar geçirgenliği, aderansı ve mekanik etkilere karşı dayanımı yüksek olmalıdır. Bünyesine su geçmemesi için yüzeyi de kaygan olmalıdır. Oluşabilecek ısı değişimleri karşısında hacim değişikliği yapmaması için de elastik bir yapıya sahip olmalıdır [6].

3.2. Harçların Sınıflandırılması

Harçların sınıflandırılmasını kullanılan bağlayıcı malzemenin cinsine ve kullanım alanına göre olmak üzere iki türde sınıflandırabiliriz. Kullanılan bağlayıcı malzeme cinsine göre; çimento, kil, alçı, puzolanik, melez ve kireç harçları olarak altı grupta sınıflandırabiliriz. Bu tür harçların karışım oranları Çizelge 3.1.'da verilmiştir [13].

Çizelge 3.1: Harç Karışım Oranları [13].

Harç Cinsi	Hacim Oranları					
	Kil	Tras	Kireç	Alçı	Çimento	Kum
Kil Harcı	1	-	-	-	-	-
Puzolanik Harç	-	2,5-3,5	5-7	-	-	3-6
Kireç Harcı	-	-	1	-	-	3
Alçı Harcı	-	-	-	1	-	0-4
Çimento Harcı	-	-	-	-	1	3-4-6
Melez Harç	-	-	1,5-2	-	1	8

Harçları, kullanım alanı bakımında 3 ayrı başlıkta toplayabiliriz.

- Duvarcılık Harçları: Duvar işinde kullanılan harçların temel olarak iki görevi vardır. Birincisi; harç yatay veya yataya yakın bir konumda ise taş ve tuğlaların etkisi altında bulunduğu kuvvetlerin aktarımını sağlamaktır. Diğer görevi ise; harç düşey veya düşeye yakın bir konumda ise taş ve tuğlaları birbirine bağlamaktır. Harcın bu iki görevi yerine getirebilmesi için aşağıdaki fonksiyonlara sahip olması gerekir.

- İşlenebilir ve plastiklik özelliğine sahip olması,
- Doluluk oranının yüksek olması,
- Geçirimsiz olması,
- Belirli bir mukavemete sahip olması.

Mukavemet şartının aranması konusunda iki hayrı husus vardır. Birincisi eğer duvar kendi ağırlığından başka ağırlık taşımıyorsa harcın belirli bir mukavemete sahip

olma zorunluluğu yoktur. Ancak eğer duvar taşıyıcı özellikteki bir duvar ise kullanılan harcın da belirli bir mukavemet değerinin üzerinde olması gerekir [20].

- Sıvalar: Sıvaların iki ayrı kullanım amacı vardır. Birincisi görsel olarak güzel bir görüntü elde etmektir. İkincisi ise yapıyı yağmur, yeraltı suyu, hava gibi dış etkenlerden korumak ve sert bir yüzey elde etmektir.

Sıvada kullanılan kumun en büyük boyutu 0,5 – 1,5 mm arasında değişebilir. Ayrıca sıvaların istenilen şartları sağlayabilmesi için 3 ayrı tabaka halinde uygulanması gerekir. Ancak duvarın çok düzgün olması durumunda da tek tabaka halinde uygulanabilir. Sıva tabakalarının kalınlıkları Çizelge 3.2.'da verilmiştir [20].

Çizelge 3.2 : Sıva Tabakaları [20].

Tabaka	Tabaka Kalınlığı	Bağlayıcı Madde Dozajı (kg)	
		Çimento	Yağlı Kireç
1. tabaka	2–3 mm	660–425	75
2. tabaka	8–20 mm	250–175	250–175
3. tabaka	10 mm.den az	175–125	175–125

Bu üç tabakadan birincisinin fonksiyonu duvar ile sıva arasındaki aderansı sağlamaktır. Uygulanan kinci tabaka asıl sıvayı oluşturur. Duvardaki girinti çıkıntıların ve yamuklukların giderilmesini ikinci tabaka sağlar. Üçünü ve son tabakanın görevi ise tamamen düz bir yüzey elde etmek ve istenilen görselliği sağlamaktır. Tabakaların uygulanması için aralarında en az 24 saat geçmesi gerekmektedir.

- Şaplar : Şaplar yapıda sızdırmazlığı sağlarlar ve sadece çimento ile üretilen harçlardır. Şaplarda aranan özellikler şunlardır:

- Aderansı yüksek olmalı,
- İstenilen mukavemet değerine sahip olmalı,
- Geçirimsiz olmalı

Şaplarda çimento dozajı fazla olduğu ve büyük tabakalar halinde uygulandığı için rötre büyük değerler alabilir. Bu nedenle uygulama sırasında önlemler alınmalıdır [20].

3.3 Bağlayıcılar

Su ile karıştırıldıkları zaman kırma taş, çakıl ve kum gibi dolgu malzemelerini birbirine bağlayarak plastik hamur kıvamı veren ve sonrasında sertleşerek yapay taş oluşmasını sağlayan maddelere bağlayıcı adı verilmektedir. Bağlayıcı malzemeler genellikle toz halinde bulunmaktadır. Bağlayıcı maddeler sertleşme gerçekleştirdikleri ortama göre iki ana grupta toplanabilirler [15].

- Havada katılaşabilme özelliği olan bağlayıcılar (alçı, hava kireci)
- Hem havada hem suda katılaşabilme özelliği olan bağlayıcılar (su kireci, çimento ve puzolanlar)

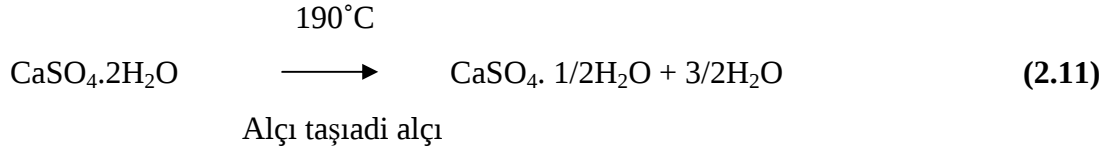
Bağlayıcıları çimento, alçı, kireç ve puzolanlar olmak üzere 4 ayrı grupta toplayabiliriz. Çimento, alçı ve kireç direk olarak bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilirler. Ancak puzolanlar tek başlarına bağlayıcı özelliği sahip değildir. Puzolanlar, başka bir bağlayıcı ile birlikte kullanıldıkları zaman bağlayıcı özellik kazanırlar [15].

3.3.1 Alçı

Kullanılan en eski bağlayıcı maddelerden birisi de alçıdır. Ancak günümüz bağlayıcı olarak kullanılmamaktadır. Alçıyı genel olarak, alçı taşının çeşitli sıcaklıklarda pişirilmesi sonucunda oluşan, su ile karıştırıldığında katılaşabilen beyaz renkli inorganik esaslı bir malzeme olarak tanımlayabiliriz [6].

Alçı, kullanım yerine göre yapı alçısı, kalıp alçısı ve saplı alçı olmak üzere 3'e ayrılır. Alçı için bir diğer sınıflandırma da saflık derecesine göredir. Alçılar saflık derecesine göre %60–100 arasında olmak üzere 4'e ayrılırlar [6].

Alçının hammaddesi doğadaki alçı taşı veya jips ve anhidrittir. Alçı taşı $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 'dur, anhidrit ise CaSO_4 'dür. Öncelikle jips 190°C civarında pişirilir ve aşağıdaki reaksiyon gerçekleşerek alçı dediğimiz beyaz renkli malzeme elde edilir [1].



Sıcaklık 200°C 'nin üzerine çıkarsa alçı taşı suyunu tamamen kaybeder ve elde edilen toz bağlayıcı özelliğinde olmaz. Priz yapma yeteneği yoktur. Ancak sıcaklık 600°C 'yi aştığı zaman elde edilen ürün dayanıklı bir alçı üretiminde kullanılabilir. Bu aşamada elde edilen, kristal suyu içermeyen alçıya döşeme alçısı veya Keene Çimentosu denilir. Alçının sertleşmesi yukarıda yazılı olan reaksiyonun ters reaksiyonu şeklinde oluşur [1].

Alçı su ile karıştırıldığı zaman toz haline göre hacminde artma meydana gelir. Ancak katılaşma sırasında hacim değişikliği göstermez. Alçı çok hızlı hidrate olan bir malzemedir. Normal şartlar altında 3–15 dakika içerisinde hidratasyonunu tamamlar. Hızlı hidratasyon sunucunda büyük kristaller oluşur ve bu nedenle de mukavemeti düşüktür. Hidratasyonu geciktirmek için sıcaklık 60°C 'nin üzerinde olmalı ya da zayıf asitler, alkol, kazein gibi katkıları kullanılmalıdır [1].

3.3.2 Kireç

Kireç de tıpkı alçı gibi çok eskiden beri kullanılan bir bağlayıcıdır. Ancak kireç havada dayanım kazanır, suya dayanıksızdır ve alçı gibi düşük mukavemetlidir [6].

Kalker taşı ve tebeşir gibi CaCO_3 (Kalsiyum karbonat) kökenli maddelerin yanmasıyla beyaz, dolomit gibi CaCO_3 , MgCO_3 (Magnezyum karbonat) kökenli maddelerin yanmasıyla esmer ve dayanımı daha yüksek kireç elde edilir [20].

Üretim yöntemine göre kireci 4 ayrı grupta toplayabiliriz:

- Çalı kireci: Alevli ateşte pişirilmiş (1000°C) ve söndürülmesi kolaydır.
- Kömür kireci : Kömürde pişirilmiş (1400°C) ve söndürülmesi zordur.
- Mermer kireci: Hammaddesi saftır ve daha fazla sönmüş kireç elde edilir.
- Esmer kireç: %10 civarında yabancı madde içerir.

Ayrıca kireci içerisinde bulundurduğu kil oranında göre de ikiye ayırabiliriz. Birincisi havada katılaşabilen hava kireci (yağlı kireç), ikincisi de hem suda hem havada katılaşabilen su kirecidir (hidrolik kireç) [20].

Kirecin üretiminde iki ana aşama vardır. Bunlar kirecin yakılması ve söndürülmesidir.

Yakma İşlemi:

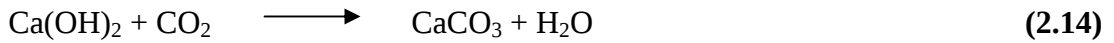


Söndürme İşlemi:



Yakma işlemi kireç ocaklarında kömür ve odun kullanılarak ya da fabrikalarda sıvı yakıt kullanılarak yapılır. Söndürme işlemi ise teknelerde ve kireç kuyularında ya da fabrikalarda su püskürtülerek yapılmaktadır [20].

Kirecin priz alması üç aşamada gerçekleşir. Bunlar kuruma, kristalleşme ve karbonatlaşmadır. Kuruma ve kristalleşme geri dönüşümlü reaksiyonlardır ve tekrar su ile karşılaşınca yumuşama gerçekleşir. Asıl sertleşme karbonatlaşma ile olur.



Bu reaksiyon çok yavaş gerçekleşir ve reaksiyon esnasında ortamda havanın ve özellikle CO₂ 'nin varlığı zorunludur. Bu nedenle kireç havada sertleşen bir bağlayıcı sıfatını almaktadır. Eğer bu kuruma hızlı gerçekleşirse rötre çatlakları meydana gelir.

Kireç harçları tıpkı alçı harçları gibi düşük dayanımlıdır ve suya karşı dayanıksızdır. Su karşısında çözülebilmektedirler. Bu nedenle tek başına bağlayıcı olarak kullanılmazlar. Genellikle çimentoyla karıştırılarak kullanılırlar [20].

3.3.3 Puzolanlar

Puzolanlar yalnız başına kullanıldıkları zaman bağlayıcı olmayan fakat kireç veya çimento ile karıştırıldığı zaman su ile yaptığı reaksiyon sonucu bağlayıcı madde özelliği kazanan maddelerdir [44]. Puzolanların içinde fazla miktarda kolloidal halde silis ve alümin bulunmaktadır. Bu maddeler kireç ile yapmış olduğu reaksiyon sonunda puzolan bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır [44]. Mineral katkı maddeleri; taze betonun işlenebilme ve su ihtiyacı ile reolojik özelliklerine, terleme, ayrışma,

hava sürüklenme, hidrasyon ısı ve plastik rötre gibi özelliklerine etki ederler [43]. Sertleşmiş betonda da puzolanlar mekanik özelliklere ve durabiliteye oldukça önemli etkiler yapar. Dayanım ve dayanım kazanma hızı ile elastisite modülü, sünme ve rötre mineral katkı kullanımından etkilenirler. Geçirimsizlik, asitlere ve sülfata dayanıklılık, alkali-agrega reaksiyonu, donma çözülme tekrarlarına dayanıklılık, deniz ortamına dayanıklılık ve donatı korozyonu gibi tüm durabilite özellikleri de, bu katkıların kullanımından etkilenmektedir. Mineral katkı maddelerinin durabilite özelliklerine olan etkilerinin yönü ve şiddeti çoğu zaman katkının cinsi, kullanım miktarı, kullanım yöntemi, fiziksel, kimyasal ve puzolanik özellikleri gibi faktörlere bağlı olmaktadır [43]. Puzolanların, betonda portland çimentosu ile beraber kullanılması, su geçirimsizliğinin artması, hidrasyon ısının düşmesi ile termal çatlakların azalması, alkali-agrega reaksiyonu ile oluşan çatlamlara karşı dayanımın artması, işlenebilirliğin artması ve sülfat ve asit ortamlarında durabilitenin artması gibi amaçlara yönelik olarak kullanılmaktadır [44]. Puzolanlar, portland çimentosuna ilave edildiklerinde çimentonun hidrasyon sonucu meydana gelen Ca(OH)_2 ile SiO_2 ve Al_2O_3 arasındaki reaksiyon sonucunda puzolan yine bağlayıcılık özelliğine sahip olurlar. Puzolanlar silisli veya silisli ve daha az miktarda alüminli malzemelerdir. Kendi başlarına bağlayıcı özellikleri yoktur ya da çok azdır; ancak, çok ince taneli olduklarından, söndürülmüş kireçle birlikte su ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcı özelliği kazanırlar [44].

Temel puzolanik reaksiyon; puzolan içeren betonlarda puzolandaki silika ile portland çimentosu hidrasyonu sonucu açığa çıkan serbest kireç arasında, sulu ortamda gerçekleşmektedir. Puzolanik reaksiyon sonucu portland çimentosunun silikatlı bileşenleri ile aynı hidrate ürünler ortaya çıkmaktadır. Ancak, bu reaksiyonun hem serbest kireç oluşumunu, hem de oldukça yavaş seyreden bir reaksiyon olması sonucu puzolanik etki nedeniyle mukavemet kazanma da yavaş olmaktadır. Kür sıcaklığının artması ya da alkali ve sülfatlı bazı kimyasal katkı maddelerinin varlığı ise reaksiyonu hızlandırabilmektedir.

Puzolanlar elde edilişlerine göre doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Her bir gruba giren puzolan türleri aşağıdaki Çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 : Puzolanların Sınıflandırılması ve Puzolan Türleri

Puzolanlar	
Doğal Puzolanlar	Yapay Puzolanlar
Volkanik Küller	Uçucu Kül
Killi Şist	Pişirilmiş Kil
Diatome Toprağı	Yüksek Fırın Cürufu
Ponza Taşı	Silis Dumanı
Volkanik Tüfler	Demirli Olmayan Cüruf
Traslar	Pirinç Kabuğu Külü
Opalin Silika	

Mineral katkı maddelerinin beton teknolojisinde kullanım yöntemleri puzolanların türüne göre değişebilmektedir. Doğal puzolanlar çoğunlukla katkılı portland çimentosu üretiminde kullanılmaktadırlar. Bu tür çimentoların kullanılmasıyla betonda önceden belirlenmiş oranlarda puzolan kullanılmış olmaktadır. Puzolanlarla belirli oranda puzolan içeren katkılı portland çimentosu kullanımıyla betona dahil edilirler veya betona karıştırma esnasında çimentoya ilave veya ikameli olarak katılır. Çizelge 3.4’de çeşitli puzolanların kimyasal bileşimleri verilmektedir [44].

Çizelge 3.4 : Çeşitli Puzolanların Kimyasal Bileşimleri

	Ren Trası	Santorin	Napoli	Mecitözü	Kayseri	Uçucu Kül	Pişirilmiş Kül
SiO₂	%54,6	% 63,2	%55,7	%64,47	%63,08	%42–50	%50,2
Fe₂O₃	%3,8	%4,9	%4,6	%1,50	%5,58	%5–10	%7,6
Al₂O₃	%16,4	%13,2	%19,0	%14,38	% 18,63	%16–30	%17,0
CaO	%3,8	%4,0	%5,0	%4,73	%5,07	%2–4	%5,1
MgO	%1,9	%2,1	%1,3	%1,38	%1,55	%5–9	%3,5
Diğer Maddeler	%12,5	%12,6	%14,4	% 13,54	%6,09	%4–10	%16,4

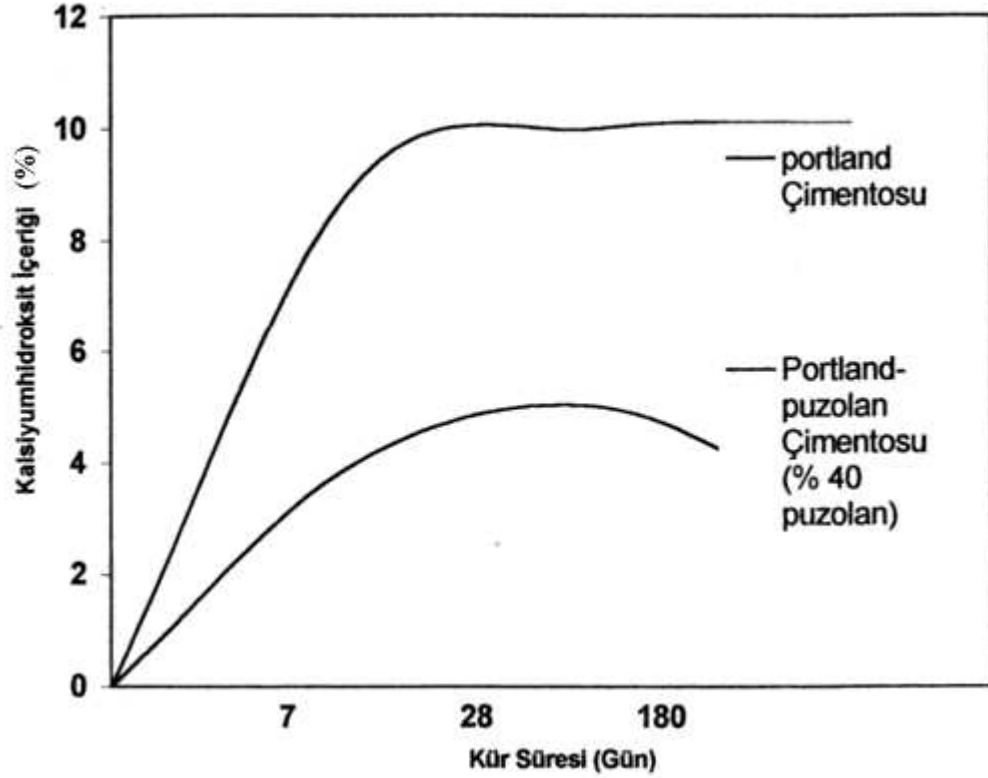
3.3.3.1 Puzolanik reaksiyon

ASTM C 618 portland çimentosu kullanımında doğal puzolanların kullanımı için kimyasal bileşimlerindeki SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ yüzdelerinin toplamı en az %70 (S+F+A=0,70) olması istenmektedir. Portland çimentosunun puzolan ve su ile karışımı sonucu, puzolanda SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ amorf ya da zayıf bir kristal yapıda mevcut olduğunda, bu oksitlerin kimyasal olarak normal sıcaklıkta, portland çimentosundaki kalsiyum silikatların hidrasyonu neticesinde oluşan kalsiyum hidroksit ile bağlayıcılık özelliği olan bileşikler oluşturmak için tepkimeye gireceği kabulü yapılır. Puzolanlar genellikle % 60 ila % 85 arasında SiO₂ içerirler. Bu yüzden ana puzolanik reaksiyon, portland çimentosunun temel kalsiyum silikat reaksiyonuna benzer kalsiyum silikat hidrate oluşumunu kapsar.



CH kalsiyum hidroksit, **S** silikat (SiO_2), **CSH** kalsiyum silikat hidrat

Sadece portland çimentosu ve portland-puzolan çimentosundaki kalsiyum hidroksit içeriğinin zamanla değişimi aşağıdaki Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1: Bir hidrate portland-puzolan çimentosundaki kalsiyum hidroksit içeriğinin değişimi [39]

Puzolanik reaksiyon yavaştır; bunun neticesinde bu reaksiyon ile birlikte dayanım kazanma hızı ve hidratasyon ısısı düşüktür. Öte yandan, portland çimentosundaki C_3S hidratasyonu hızlıdır. Bu nedenle bu reaksiyon ile birlikte dayanım kazanma hızı ve hidratasyon hızı yüksektir. Aynı zamanda belirtilmelidir ki, puzolanik reaksiyon kireç tüketen, portland çimentosu reaksiyonu ise kireç üreten reaksiyondur. Puzolanik reaksiyon, sıcaklık, alkaliler ve sülfatlar gibi kimyasal katkılarla hız kazanabilir [39].

Portland çimentosunun bir puzolan ile karışımı hidrate olduğunda, puzolanik reaksiyonun ilerlemesi sonucu zamanla serbest kalsiyum hidroksitte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ azalma oluşur.

Puzolanik reaksiyonun serbest kireç oluşumunu bekleme, hem de oldukça yavaş seyreden bir reaksiyon olması sonucu puzolanik etki nedeniyle mukavemet

kazanmada yavaş olmaktadır. Kür sıcaklığının artması, alkali ve sülfatlı bazı kimyasal katkı maddeleri reaksiyonu hızlandırır [43].

Puzolan ve portland çimentosu karışımı hidratasyona girince puzolanik reaksiyonun etkisiyle bağlayıcı ham ürünlerdeki serbest kireç miktarı giderek azalmaktadır. Belli bir süre sonunda puzolan içeren betonların serbest kireç ve daha çok kalsiyum silikat hidrate elemanları bulunmaktadır. Daha çok bağlayıcı ürün oluşması mukavemet artışına neden olurken, serbest kirecin azalması ve hamur boşluk yapısının iyileştirilmesi de geçirimsizliği ve dolayısıyla zararlı dış etkilere dayanıklılığı artırır. Puzolanik reaksiyonun portland çimentosu hidratasyonundan daha yavaş gelişmesi mukavemet kazanma hızlarını etkiler. İlk yaşlarda mukavemetler daha düşük olur ancak puzolanların aktivitesinin yüksekliğine göre 28, 56 veya 90 gün sonraki mukavemetler referans betonunu yakalamakta veya geçmektedir [43].

3.3.3.2 Uçucu kül

En önemli yapay puzolanlardan biri olan uçucu kül, enerji üretmek amacıyla kurulan termik santrallerde toz halinde veya pulverize (öğütülmüş) taşkömürü ya da linyitin yüksek sıcaklıklarda yakılması sonucu ortaya çıkan baca gazlarıyla sürüklenen elektro filtre ve siklonlarla havaya çıkışı engellenerek biriken toz halindeki puzolanik niteliğe sahip silisli ve alümin silisli atık maddesidir. Uçucu kül termik santrallerin yan ürünü olup kömürün içindeki inorganik maddeler fırın ortamında erimekte ve bacadan atılma esnasında soğuyarak genellikle küresel tanecikler halinde oluşmaktadır [45].

TS EN 450-2 'ye göre uçucu küller, pulverize kömürün yakılmasından elde edilen, puzolanik özelliklere sahip olan ve esas olarak SiO_2 ve Al_2O_3 'den meydana gelen, reaktif SiO_2 muhtevası kütleye en az %25 olan, başlıca küresel ve camsı taneciklerin ince tozudur. Yine TS EN 450'ye göre uçucu kül, pulverize edilmiş antrasit, linyit veya bitümlü kömürün yakıldığı fırınların baca gazlarındaki toz benzeri taneciklerin elektrostatik veya mekanik çöktürülmesi ile elde edilir [46].

Bugün dünyada ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 600 milyon ton civarındadır. Türkiye'de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermekte olup bu santrallerden yılda 13 milyon ton kadar uçucu kül elde edilmektedir [47].

Uçucu küllerin beton içindeki etkisi mikrofiller etkisi ve puzolanik etki olarak ikiye ayrılabilir. Puzolanik etki, mikrofiller etkisinin yanında azdır ve uçucu külün inceliğine göre puzolanik aktivite değişim gösterir. Uçucu kül inceliği puzolanik aktiviteyi önemli derecede etkiler. Şengül ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada Blaine Yüzeyi ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi Tablo 3.5’de göstermiştir. Blaine Özgül Yüzeyinin $222 \text{ m}^2/\text{kg}$ ’den $604 \text{ m}^2/\text{kg}$ ’ye çıkartmak 7 günlük basınç dayanımını %79,7 arttırmıştır [48].

Çizelge 3.5 : Puzolanik aktivite deney sonuçları

7 günlük basınç dayanımı, MPa	Uçucu kül	
	Öğütme öncesi, Blaine Ö.Y. 222 m^2/kg	Öğütme sonrası, Blaine Ö.Y. 604 m^2/kg
Deney sonucu	7.9	14.2
ASTM C618–85 standardı F türü için minimum basınç dayanımı, MPa	5.5	5.5

Uçucu küller ASTM C 618 ve TS EN 197–1 standartlarına göre sınıflandırılmaktadır. ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar. F sınıfı uçucu küllerde $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70’den fazladır ve CaO %10’nun altındadır. C sınıfı uçucu küllerde ise $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %50’den fazladır ve CaO %10’nun üzerindedir. C sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler. TS EN 197-1’e göre uçucu küller Silisli (V) ve Kalkersi (W) olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır [48].

TS EN 197-1’ göre sınıflandırmada uçucu küller silisli (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10’dan az,

reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı uçucu küller ise, hidrolik veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10' dan fazla, reaktif silis miktarının da %25' den fazla olması gerekmektedir [36].

Türkiye'de aktif olarak çalışan 11 adet termik santral vardır. Bunlardan sadece Çatalağzı Termik Santrali'nden F tipi uçucu kül elde edilmektedir. Diğer termik santrallerden elde edilen uçucu küller ise C tipidir. Dünyadaki uçucu kül üretimi yaklaşık 600 milyon tondur ve bu miktarın %6'sı çimento ve beton endüstrisinde kullanılmaktadır. Ülkemizde yıllık uçucu kül üretimi 13 milyon ton civarındadır. Üretilen uçucu külün endüstride kullanımı oldukça düşüktür. Bunun iki sebebi vardır:

- Uçucu kül hakkında yetersiz bilgi.
- Uçucu kül özelliklerinin her zaman üniform olmaması [48].

Çimento inceliğinde olan bu malzemenin genel olarak puzolanik özelliği vardır. Bu konuda ilk araştırmalara 1930'da ABD'de başlanmış ve 1938 senesinde de ilk defa Chicago'da bir yolun yapımında çimentoya karıştırılarak kütle betonu üretiminde kullanılmıştır. İkinci dünya savaşından sonra, malzeme kıtlığı nedeniyle bu malzemenin kullanımı gerek Amerika'da ve gerek Avrupa'da oldukça artmıştır. Fransa'da birçok barajın inşaatında uçucu kül %15-30 oranında çimentoya karıştırılarak kullanılmış ve bu suretle bağlayıcı madde tüketimini azaltma yoluna gidilip bunun sonucunda da önemli ölçüde enerji ekonomisi sağlanmıştır. Fransa'da senede üretilen 4 milyon ton civarında uçucu külün %25'i çimento üretiminde kullanılmaktadır. Birçok faydalı kullanma alanı olan ve daha önceki zamanlarda termik santraller için, fabrikadan uzaklaştırma bakımından, sorun olan uçucu kül günümüzde Avrupa ülkelerinde bir ticari mal gibi satılır hale gelmiştir.

Çizelge 3.6 : TS 639 'da Belirtilen uçucu kül özellikleri

Özellik	Standart Sınırları
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	En az %70
MgO	En çok %5
SO ₃	En çok %5
Rutubet	En çok %3
Kızdırma kaybı	En çok %10
İncelik (Blaine)	En az 3000 cm ² /g
P.A.İ.	En az kontrolün %70

Uçucu külün özellikleri kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Genellikle silisli ve alüminli olan bileşimi sebebiyle puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak yararlı olur. İnce ve küresel taneleri nedeniyle taze betonda işlenebilmeyi artırır, ayrıca hidratasyon ısını azaltır. Çimento hidratasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur, çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betona dayanıklılık kazandırır. Linyit kömürü yakılması ile elde edilen uçucu külde kireç oranı genellikle yüksek olup bu tür küller aynı zamanda bağlayıcılık özelliği gösterir. Antrasit kömüründen veya iyi yakılmayan diğer kömürlerden elde edilen uçucu küllerde karbon miktarı yüksek olur. Bu da çimento ve betonda su ihtiyacını artırır, puzolanik özelliği ve kaliteyi olumsuz etkiler. Uçucu kül genellikle çimentodan daha ince taneli olarak elde edilir. Dolayısıyla ilave öğütme gerektirmeden kullanılabilir. Gerekğinde seperatörden geçirilerek inceliği daha da artırılır ve olumlu özellikleri daha etkin hale getirilir [47].

3.3.3.3 Tras

Traslar, volkanik kaynaklı malzemelerdir. Volkanik püskürük ve lavların yeryüzünde birikmeleriyle oluşmuşlardır. Bunlar çeşitli silikatlar olup; camsı ve kristalli, bazen de salt camsı bölümlerden meydana gelmiştir[37].

Püskürme esnasında hızla soğuma ve depolandıkları alanlarda sular ve kimyasal etkenlerin etkisiyle amorf-süngerimsi (zeolitik) bir yapıya doğru gelişme gösterirler. Söz konusu kimyasal etkiler CO₂ ve CO₂ içeren zemin sularıdır.

Trasların sahip oldukları değişik renkleri çoğunlukla ihtiva ettikleri amorf-süngerimsi yapıdan kaynaklanmaktadır. Bu yapı trasların aktiflik özelliği kazanmasına yardımcı olmaktadır.

Trasların aktifliğin kaynağı kesin olarak bilinmemekle beraber içerdikleri SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ bileşiklerinin amorf olmasını veya en azından puzolan içinde amorf bölümlerin fazla olmasına bağlanmaktadır [37].

Kısacası trasların aktifliği sahip oldukları amorf-camsı-süngerimsi boşluklu yapıların fazlalığı, diğer bir deyişle amorf-çözünbilir SiO₂ miktarının fazlalığıyla artmaktadır. Aktiflik SiO₂ 'in çözünabilir bölümünün çok veya az olmasına bağlıdır.

Amorf bileşikler veya bölümler kolaylıkla çözünerek ortamdaki (kalsiyumhidroksit gibi) alkali maddelerle reaksiyona girerek çözünmez bileşikler oluştururlar.

3.3.4 Dolgu malzemeleri

Dolgu malzemeleri harç, sıva ve beton yapımında bağlayıcı malzemelerle birlikte kullanılan, toplam hacmin yaklaşık %60–80 'ini oluşturan mineral kökenli ve farklı boyutlara sahip malzemelerdir [1].

Agregalar doğal yolla elde edildiği gibi yapay agrega elde etmek de mümkündür. Doğal agregaları kum ve çakıl olarak, yapay agregaları da kırma taş ve taş tozları olarak sınıflandırabiliriz. Ayrıca agregaları ince ve kaba olarak iki gruba ayrılırlar. Genel olarak 4,75 mm.den küçük olan agregalar ince agrega, 4,75 mm ile 40 mm arasında olanlar da iri agrega olarak adlandırılır. Kum ince agrega sınıfına girer. Çakıl ve kırmataş ise iri agrega sınıfına girerler [1].

Kullanılan agreganın niteliği, üretilen harç ve betonun nitelikleri açısından çok önemlidir. Dolgu maddesinin boyutu, dayanıklılığı, içeriği harç ve beton

mukavemetini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Dere kumu en uygun agrega çeşididir. Deniz kumları ise homojen, temiz ve ince olmasına rağmen içeriğinde tuz bulundurduğu için harç mukavemetini düşürür. Toprakten elde edilen kum ise içerisinde olabilecek kil nedeniyle yıkandıktan sonra kullanılmalıdır [15].

Agrega boyutları harcın mukavemetini ve kullanılacak bağlayıcı miktarını doğrudan etkilemektedir. Küçük boyutlu agrega kullanıldığı zaman toplam agrega yüzeyi artacağından kullanılacak bağlayıcı miktarı da artacaktır. Ancak ince agregalarla iri agregalar iyi belirlenmiş oranlarda karıştırılarak kullanıldıkları zaman, agrega yüzeyini saran bağlayıcı miktarı ve sertleşme sırasında oluşan hacim değişimi az olacağından mukavemet de artacaktır [8].

Ayrıca agreganın biçimi de harcın dayanımını etkileyen faktörlerden birisidir. Köşeli olan agregalar, sürtünme miktarı ve buna bağlı olarak sağlamlığın artması nedeniyle daha çok tercih edilirler [8].

3.5 Katkılar

3.5.1. Kimyasal katkılar

- Akışkanlaştırıcılar; Taze harç ve betonların işlenebilirliğini artıran ve daha az su ile istenilen kıvamın elde edilmesini sağlayan katkılardır. Bu katkılar çimento daneleri tarafından absorbe edilirler. Böylece danelerin birbirinden ayrılıp dağılmasını ve su itmesini engelleyerek daha kolay ıslanmalarını sağlarlar. Bir karışıma bu katkının katılması akışkanlığı artıracığı için ihtiyaç olan su miktarının azalmasına ve dolayısıyla mukavemetin ve homojenliğin artmasına neden olmaktadır [13].
- Priz geciktiriciler; Bu katkılar, yalancı prizi önlemek ve sıcak havda beton dökmek gibi amaçlarla kullanılırlar. Taze harcın katılaşmaya başlama sürecini uzatmaya yararlar [13].
- Priz hızlandırıcılar; Bu katkılar harcın katılaşma sürecini kısaltırlar. En bilinen priz hızlandırıcı CaCl_2 'dir. Yoğurma suyuna katılmak suretiyle %2-3 oranında kullanılırlar ve maksimum mukavemete 1-3 arasında ulaşılmasını sağlarlar. Erken kalıp almada ve soğuk havada yapılan dökümlerde tercih edilen bir katkıdır [13].

- Antifirizler; Kullanılan çimentonun donmasını önlerler ve böylelikle don sebebiyle çimentonun mukavemet kazanmasındaki aksamayı engellerler [22].
- Hava sürükleyiciler; Çimento harcına veya betona hava sürükleyici katkı ilavesi, çok sayıda ve yayılmış şekilde küçük hava kabarcıklarının oluşmasına neden olur. Bu hava kabarcıklarının oluşması sertleşmiş harç ve betonların özelliklerinde önemli değişikliklere neden olur. İşlenebilirliğin ve kohezyonun artmasına neden olarak ayrışmanın engellenmesini sağlar. Mukavemette ufak miktarda düşme olsa da donmaya karşı dayanıklılık da önemli derecede artış olmaktadır [22].
- Geçirimsizlik katkıları; Çimento hamuru, harç ve betonlarda su geçirimsizliğini azaltmak ve işlenebilirliği artırmak için kullanılan katkılardır [22].

3.5.2 Mineral katkılar

Öğütülmüş halde bulunan ve çimento gibi silolarda depolanan uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve tras gibi çeşitli ürünlerin yan ürünü olan maddeler mineral katkılar olarak adlandırılırlar. Tek başlarına bağlayıcı özellikleri olmayan mineral katkılar, ancak çimento gibi başka bir bağlayıcı malzeme ile kullanıldıklarında bağlayıcı özellik kazanırlar [13].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma, çimento harçlarının mineral katkı kullanarak niteliklerinin iyileştirilmesi ve kullanılan değişik katkılarla harçların sodyum sülfat karşısındaki durabilitesinin değerlendirilmesi amacıyla yapılmıştır.

4.1 Deney Programı

Deneysel çalışmada aynı dayanım sınıfında iki farklı çimento, üç farklı mineral katkı, maksimum dane büyüklüğü 4 mm olan yıkanmış dere kumu ve şebeke suyu ile 32 farklı karışımda harç hazırlanmıştır. Suyun etkisinin araştırılması amacı ile de iki farklı su miktarı içeren harçlar üretilmiştir. Çalışmanın birinci kısmında taze harçlarda yayılma miktarı; sertleşmiş harçlarda ise ultrases geçiş hızı, kılcal su emme, hızlı klorür geçirgenliği, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır[31]. Devam eden deney programının bu kısmında ise sertleşmiş harçlarda ultrases geçiş hızı, sodyum sülfat etkisi, kılcal su emme, karbonatlaşma deneyleri yapılmış ve bu çalışmaya bağlı olarak boy ve ağırlık kaybı çalışılmıştır.

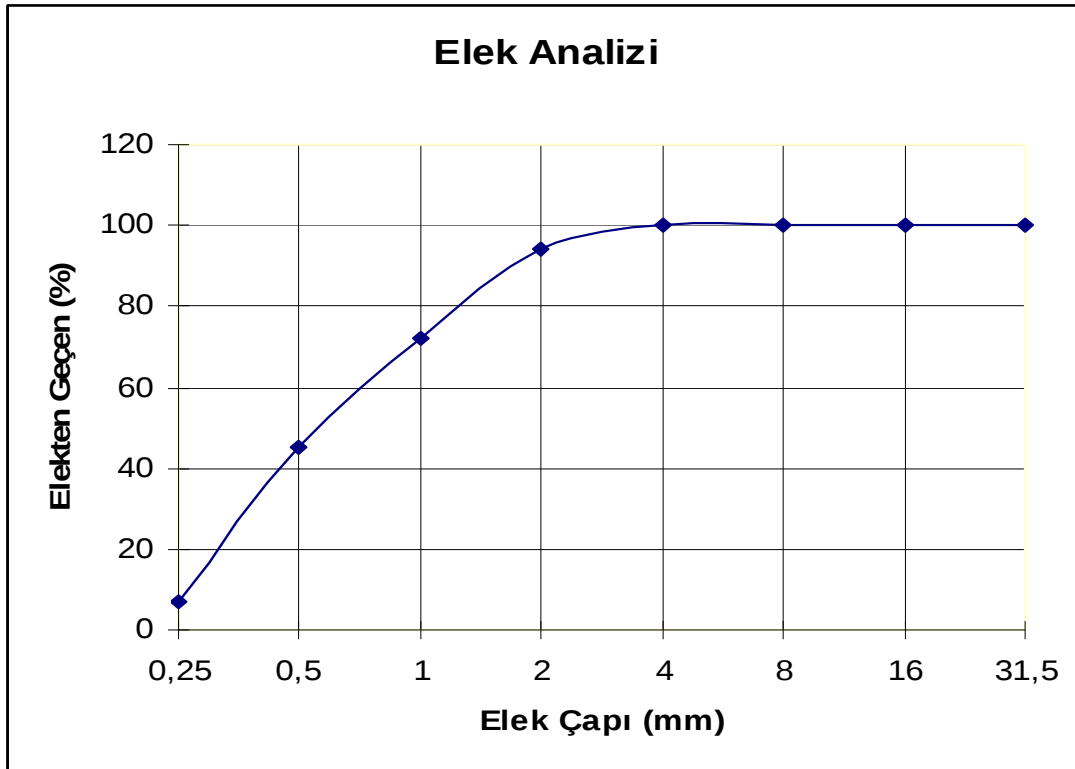
Üretilen harçlardan her bir deney için üçer adet 40x40x160 mm boyutlarında prizma, ikişer adet 100/200 mm boyutlarında silindir numuneler hazırlanmıştır. Üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkartılan numuneler, standart koşullarda su içerisinde saklanmış, deneylerden bir gün önce sudan çıkartılarak oda sıcaklığındaki laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Prizma numunelerde 28. Günde ses geçiş süresi ölçümü, eğilme ve basınç dayanımları deneyleri yapılmıştır. Silindir numuneler ise 28. Günde sudan çıkartılmış, deneyin yapılacağı 40. Süne kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Bu numuneler 51 mm kalınlığında diskler halinde kesilerek kılcal su emme ve hızlı klorür geçirgenliği deneyleri yapılmıştır.

4.2 Kullanılan Malzemeler

Yapılan deneylerde kum, iki ayrı çimento; mineral katkı olarak da yüksek fırın cürufu, tras ve uçucu kül kullanılmıştır. Deneyde bunların yanında ağırlıkça % 10 sodyum sülfat çözeltisi de kullanılmıştır.

4.2.1 Kumun özellikleri

Yapılan deneylerde agrega olarak granülometrisi Şekil 4.1.'de verilen, özgül ağırlığı $2,62 \text{ g/cm}^3$ olan yıkanmış dere kumu kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Kumun granülometri eğrisi

4.2.2 Çimentonun özellikleri

Harç üretiminde fiziksel özellikleri Çizelge 4.1.'de, Kimyasal bileşenleri Çizelge 4.2.'de verilen, Set Çimento Ambarlı Tesisleri'nden temin edilen CEMIV/B(P) 42,5R tipi pozolanik çimento ve SDÇ 32,5 tipi çimento kullanılmıştır. Yapılan özgül ağırlık deneyleri sonucunda her iki çimentonun da özgül ağırlıkları $3,16 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiştir. Çimentolar arasındaki en büyük fark bileşimlerinde bulunan C_3A yüzdesidir.

4.2.3 Yüksek fırın cürufunun özellikleri

Harç Üretiminde kullanılan yüksek fırın cürufu öğütülmüş olup Set Çimento Ambarlı Tesisleri'nden temin edilmiştir. Yapılan özgül ağırlık deneyi sonucunda yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığı $2,89 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiş ve kimyasal bileşenleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Çimentoların fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	Birim	SDÇ 32,5	CEM IV/B (P) 42.5 R
Priz Başlangıcı	dakika	159	187
Priz Sonu	dakika	204	223
Hacim Genleşmesi	mm	1	1
Özgül Yüzey (Blaine)	cm^2/g	3000	4660
Litre Ağırlığı	g/l	1020	880
2 Günlük Dayanım	N/mm^2	25	15
28 Günlük Dayanım	N/mm^2	57	40
Özgül Ağırlık	g/cm^3	3,16	3,16

4.2.4 Trasın özellikleri

Üretimlerde kullanılan tras Set Çimento Ambarlı Tesisleri'nden temin edilmiştir. Yapılan özgül ağırlık deneyi sonucunda trasın özgül ağırlığı $2,27 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiş ve kimyasal bileşenleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

4.2.5 Uçucu külün özellikleri

Harç üretiminde kullanılan uçucu kül Set Çimento Ambarlı Tesisleri'nden temin edilmiştir. Yapılan özgül ağırlık deneyi sonucunda uçucu külün özgül ağırlığı $2,17 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiş ve kimyasal bileşenleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Çimentoların ve mineral katkıların kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşenler	Çimento Tipi		Mineral Katkı Tipi		
	SDÇ 32,5	CEMIV/B (P) 42,5R	Yüksek Fırın Cürufu	Uçucu kül	Tras
K.K (%)	1,25	3,14	0,17	0,88	9,58
SiO ₂ (%)	22,93	20,91	38,12	45,14	64,81
Al ₂ O ₃ (%)	4,37	4,79	13,57	22,21	12,88
Fe ₂ O ₃ (%)	4,47	3,56	0,74	14,71	1,68
CaO (%)	63,92	63,14	36,12	10,42	2,49
MgO (%)	0,82	0,87	6	3,46	1,82
SO ₃ (%)	1,91	3,12	0,4	2,68	0,02
K ₂ O (%)	0,52	0,72	0,93	1,38	3,84
Na ₂ O ₃ (%)	0,40	0,36	0,48	0,18	1,6
C ₃ A (%)	4,00	6,70	-	-	-

4.3 Numunelerin Kodlanması

Numuneler çimento cinsine (C, S), mineral katkı türüne (Y, T, K), katkının oranına (a, o, c) ve su miktarına göre (o, w) olarak kodlanmıştır. Bu kodlamada C ile CEMIV/B(P) 42,5R çimentosu, S ile SDÇ 32,5 çimentosu, Y ile yüksek fırın cürufu, T ile tras, K ile uçucu kül, a ile az oranda katkı, o ile orta oranda katkı, c ile yüksek oranda katkı, o ile 225g su kullanılan karışım, w ile 292,5 g su kullanılan karışım ifade edilmiştir.

4.4 Harç Karışım Oranları

Harç üretiminde yapılan bütün karışımlarda 1350'şer gram kum kullanılmıştır. Karışımlarda belirli oranlarda çimento çıkartılarak yerlerine yine belirli oranlarda tras, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu eklenmiştir. Böylelikle bu katkıların harç özellikleri üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. İki ayrı çimento kullanılmıştır. CEMIV B(P) 42.5R çimentosu puzolan katkılı bir çimento olup % 38 oranında tras içermektedir. İlave kullanılan puzolanik trasla çimentodan gelen tras ayrıca toplanarak aşağıdaki Çizelge 4.3'de verilmiştir. Tabloda 450 gr çimento 1 birim alınmış, diğer kum ve puzolan miktarları bu sayının katları halinde verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Harç üretiminde kullanılan malzemeler ve çimentoya göre % karışım oranları

Karışım No	Çimento Cinsi	Kum Miktarı	Çimento Miktarı	Yüksek Fırın Cürufu Miktarı	Tras Miktarı	Kül Miktarı	Su Miktarı	Su / Bağlayıcı oranı	Yayılma Miktarı (cm)
Co	CEMIV /B (P) 42,5R	3	0,62	0	0,38	0	0,5	0,5	13,5
Co+Ya		3	0,56	0,1	0,34	0		0,5	12,2
Co+Yc		3	0,56	0,25	0,34	0		0,43	11,2
Co+Yo		3	0,5	0,24	0,3	0		0,48	11,8
Co+Ta		3	0,56	0	0,48	0		0,5	12,3
Co+Tc		3	0,56	0	0,63	0		0,43	10,4
Co+Ka		3	0,56	0	0,34	0,1		0,5	14,6
Co+Kc		3	0,56	0	0,34	0,25		0,43	13
Cw	CEMIV /B (P) 42,5R	3	0,62	0	0,38	0	0,65	0,65	19,4
Cw+Ya		3	0,56	0,1	0,34	0		0,65	19,4
Cw+Yc		3	0,56	0,25	0,34	0		0,57	19,2
Cw+Yo		3	0,5	0,24	0,3	0		0,63	19,3
Cw+Ta		3	0,56	0	0,48	0		0,65	21
Cw+Tc		3	0,56	0	0,63	0		0,57	15,3
Cw+Ka		3	0,56	0	0,34	0,1		0,65	23,2
Cw+Kc		3	0,56	0	0,34	0,25		0,57	18,4
So	SDÇ 32,5	3	1	0	0	0	0,5	0,5	12,7
So+Ya		3	0,9	0,1	0	0		0,5	13,7
So+Yc		3	0,9	0,25	0	0		0,43	12,3
So+Yo		3	0,8	0,24	0	0		0,48	13,6
So+Ta		3	0,9	0	0,1	0		0,5	13,1
So+Tc		3	0,9	0	0,25	0		0,43	10,2
So+Ka		3	0,9	0	0	0,1		0,5	15
So+Kc		3	0,9	0	0	0,25		0,43	13,5
Sw	SDÇ 32,5	3	1	0	0	0	0,65	0,65	18
Sw+Ya		3	0,9	0,1	0	0		0,65	22,8
Sw+Yc		3	0,9	0,25	0	0		0,57	19,3
Sw+Yo		3	0,8	0,24	0	0		0,63	21,5
Sw+Ta		3	0,9	0	0,1	0		0,65	19,2
Sw+Tc		3	0,9	0	0,25	0		0,57	16,4
Sw+Ka		3	0,9	0	0	0,1		0,65	21,3
Sw+Kc		3	0,9	0	0	0,25		0,57	20,7

Bütün karışımlar için iki ayrı su miktarı kullanılmıştır. Her karışım için hem 225 g su, hem de 292,5 g su kullanılmıştır. Su/çimento oranının harç özellikleri üzerindeki etkisine bakılmıştır.

Karışım hazırlanırken karıştırıcıya öncelikle su, çimento ve eğer o karışımda mevcutsa katkı maddesi eklenmiştir. Bu şekilde 30 saniye yavaş hızda karıştırıldıktan sonra 30 saniye boyunca kum eklenmiş ve 1 dakika boyunca hızlı karıştırma yapılmıştır. Hızlı karıştırma sonunda karıştırıcı durdurularak 15 saniye boyunca mala ile kabın cidarları temizlenip 75 saniye boyunca üstü kapalı bir şekilde bekletilmiştir. Son olarak 1 dakika daha hızlı karıştırma işlemi yapılarak karışım hazırlanmıştır. Karışım hazırlandıktan sonra öncelikle yayılma sehpasında yayılma miktarı ölçülmüş ve karışım kalıplara konularak yerleştirmesi yapılarak beklemeye alınmıştır.

Her karışım için 6'şar adet 40*40*160 mm boyutlarında prizmalar ve 2'şer adet 100/200 mm silindir numuneler üretilmiştir.

4.5 Deneyler

4.5.1 Eğilme ve basınç deneyleri

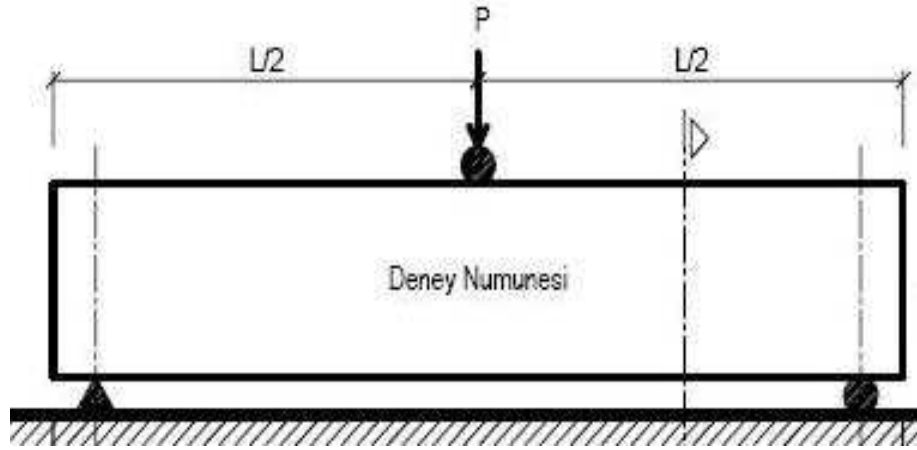
Eğilme ve basınç deneyleri için, hazırlanan 4*4*16 cm boyutlarındaki prizma numuneler kullanılmıştır. 28 gün sonunda numuneler üzerinde eğilme deneyi yapılmıştır(Şekil 4.2). Her karışım için 3 ayrı numune üzerinde eğilme deneyi yapılmış ve ortalamaları alınmıştır. Deney sonundaki hesaplamalar aşağıda gösterildiği gibi hesaplanmıştır:

$$\sigma=M/w \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (4.1)$$

$$M=Pl/4 \text{ (kg.cm)} \quad (4.2)$$

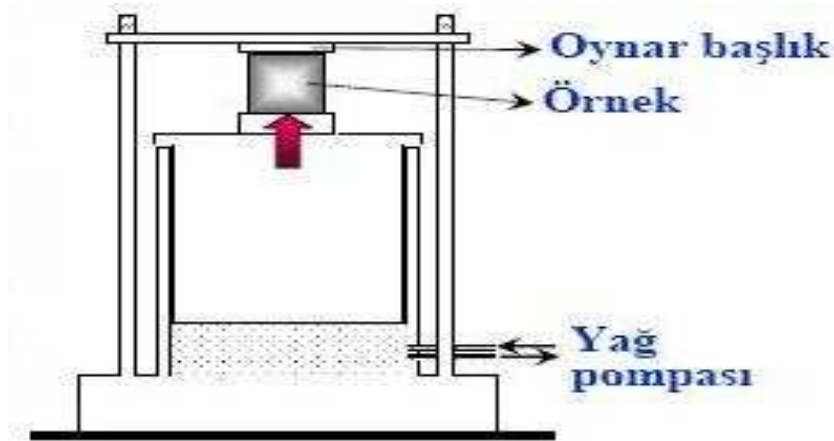
$$w=bh^2/6 \text{ (cm}^3\text{)} \quad (4.3)$$

Bu formülde; σ numunenin eğilme dayanımı, P deney aletinde okunan değer (kg), l deney aletindeki mesnet açıklığı (cm), b, h numunenin boyutlarını simgelemektedir (cm).



Şekil 4.2. Eğilme deneyi düzeneği

Eğilme deneyi sonunda numuneler iki ayrı parçaya ayrılmış ve her karışım için 6 numune elde edilmiştir. Bu numuneler üzerinde de basınç deneyi yapılarak yine ortalamaları alınmıştır(Şekil 4.3).



Şekil 4.3 : Basınç deneyi düzeneği

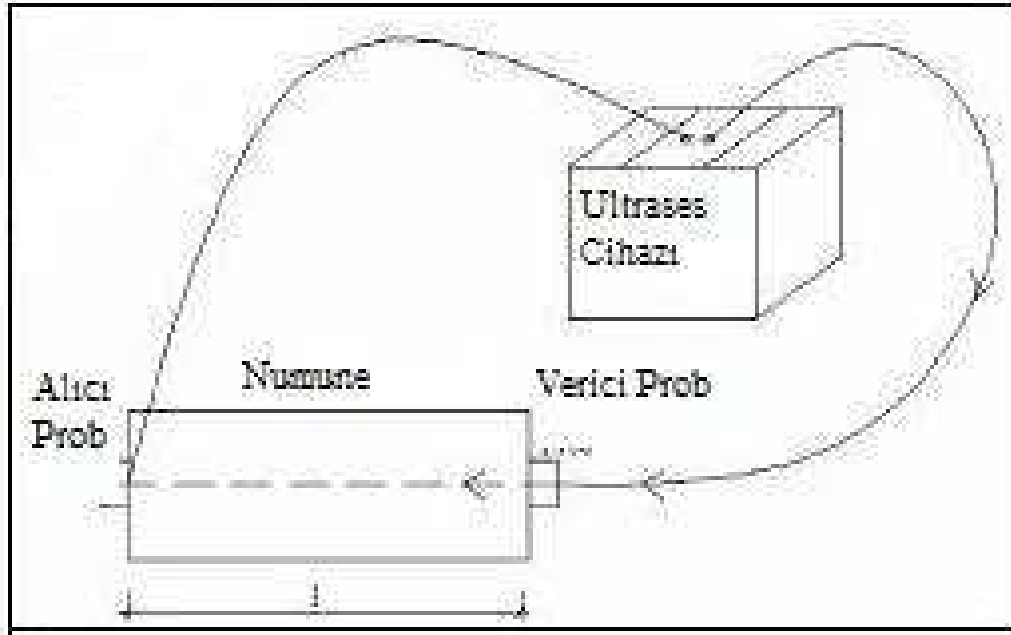
Yapılan basınç deneyi sonucunda numunelerin basınç dayanımları aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır:

$$\sigma = P / (b \cdot h) \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (4.4)$$

Denklemden; σ numunenin eğilme dayanımı, P deney aletinde okunan değer (kg), l deney aletindeki mesnet açıklığı (cm), b , h numunenin boyutlarını simgelemektedir (cm).

4.5.2 Ultrases hızı deneyi

Ultrases hız metodu beton içerisinde geçen dalganın geçiş süresini ölçerek geçiş hızını hesaplamaktan ibarettir. Hesaplanan bu hız, betonun boşluk oranı hakkında fikir vermektedir. Kullanılan numunenin boyutlarından bağımsız bir deneydir. Ancak yine de çok küçük numunelerle yapılamaması sağlıklı sonuç almak açısından önemlidir(Şekil 4.4).



Şekil 4.4 : Ultrases deney düzeneği

Deney yapılırken özellikle numunenin boyu ölçülür. Ölçüm yapılacak yüzeyler zımparalanarak pürüzsüz hale getirilir. Alıcı ve verici uçlara betonla arasında kontak kurması için makine yağı sürülür. Alıcı ve verici probalar numunenin üstüne konur ve sıkıca bastırılır. Cihazdan geçiş süresi mikro saniye cinsinden okunur. Son olarak okunan değer aşağıdaki bağlantı ile ses hızı bulunur:

$$V=l/t \quad (4.5)$$

Bu bağlantıda; V ses hızı (mm/s), t ses geçiş süresi (saniye), l numune boyu (mm) 'dur.

Ultrases deneyi, hazırlanmış olan 40*40*160 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde yapılmıştır. Her karışım için 3'er numune üzerinde deney yapılmıştır ve bulunan değerlerin ortalaması alınmıştır.

4.5.3 Ağırlık değişimi

Ağırlık değişiminin ölçümleri, 40*40*160 boyutlarındaki numuneler sodyum sülfat çözeltisine konulmadan ilk olarak ağırlık ölçümleri yapıldı. Daha sonra her 15 günde bir çözeltiden çıkarıldıktan sonra iyice kurutulup ağırlık ölçümleri yeniden yapıldı. Ölçümler ilk değerden çıkarılarak aradaki fark bulundu ve % değişimi elde edildi.

4.5.4 Boy değişimleri

Boy değişiminin ölçümleri, 40*40*160 boyutlarındaki numuneler sodyum sülfat çözeltisine konulmadan ilk olarak boy ölçümleri yapıldı. Daha sonra her 15 günde bir çözeltiden çıkarıldıktan sonra iyice kurutulup boy ölçümleri yeniden yapıldı. Ölçümler ilk değerden çıkarılarak aradaki fark bulundu ve % değişimi elde edildi. Şekil 4.5’de bir SDÇ 32.5 çimentosuyla üretilmiş katkısız 292.5 g su içeren numunenin boy ölçümü görülüyor.



Şekil 4.5 : Numunelerde boy değişimi ölçümü

4.5.5 Kılcal su emme deneyi

Kılcal su emme deneyi çapı 100 mm, yüksekliği 20 mm olan disk numuneler üzerinde yapılmıştır. Öncelikle numunelerin yan yüzeyleri su geçirmez malzeme(parafin) ile kaplanmıştır. Sonrasında numuneler sadece alt yüzeyleri su ile temas edecek şekilde su dolu kaba konulmuştur ve 4, 9, 16, 25, 36, 49 ve 64. dakikalarda ağırlıkları ölçülerek bu sürelerde emdiği su miktarı ölçülmüştür. Su

emme sonucunda oluşan ağırlık değişimi – zaman grafiği çizilerek bu eğrinin eğiminden kılcallık hesaplanmıştır.

$$q = \sqrt{k \cdot t} \quad (4.6)$$

$$m = \left(\frac{q}{\sqrt{t}} \right) \quad (4.7)$$

Bu denklemde; k kılcallık katsayısı (cm^2/sn), q birim alanda emilen su miktarı (Q/A) g/cm^2 , t süre (sn), m doğrunun eğimi olarak gösterilmektedir.

4.12 Karbonatlaşma Deneyi

100/200 mm olan silindir numunelerden 20 mm. Parça kesilmiştir ve kesilen yüzeylere fenolftalein sürülmüştür. Fenolftalein asit-baz indikatörü olarak kullanılır. Asitli ortamda renksiz olan fenolftalein bazik ortamda pembe renklidir. Nötral ortamda da renksizdir. Fenolftalein ilave edilmiş asidik çözeltiye baz ilave edilirse, çözeltinin pH'sı 8,2 olduğu an, fenolftalein çözeltiyi pembe renge boyar ve çözeltinin bazik olmaya başladığı anlaşılır. Burada pH'ın düşmesinin zararı donatı korozyonuna yol açmasıdır.

Çizelge 4.3 : Fenolftaleinin asit-baz konsantrasyonuna göre renk değişimi

Fenolftalein (pH indikatörü)	
8,2 pH altında ise	10,0 pH üstünde ise
renksiz	pembe



Şekil 4.7 : Seçilen numunelerde karbonatlaşma deneyi

4.10 Sodyum Sülfat Çözeltisi ve Hazırlanması

Deneylerde kullanılan çözelti hazırlanırken Na_2SO_4 'ün su içerisinde erimesini kolaylaştırmak amacıyla su sıcaklığı 40–50 °C'de tutulmuştur. Suyu katılan Na_2SO_4 'ın su içinde iyice erimesine çalışılmıştır. Çözelti, suyun ağırlığının % 10'u oranında Na_2SO_4 ilave edilerek hazırlanmıştır. Ayrıca çözelti, özelliğinin kaybolmaması amacıyla 15 günde bir tekrar üretilmek suretiyle yenilenmiştir

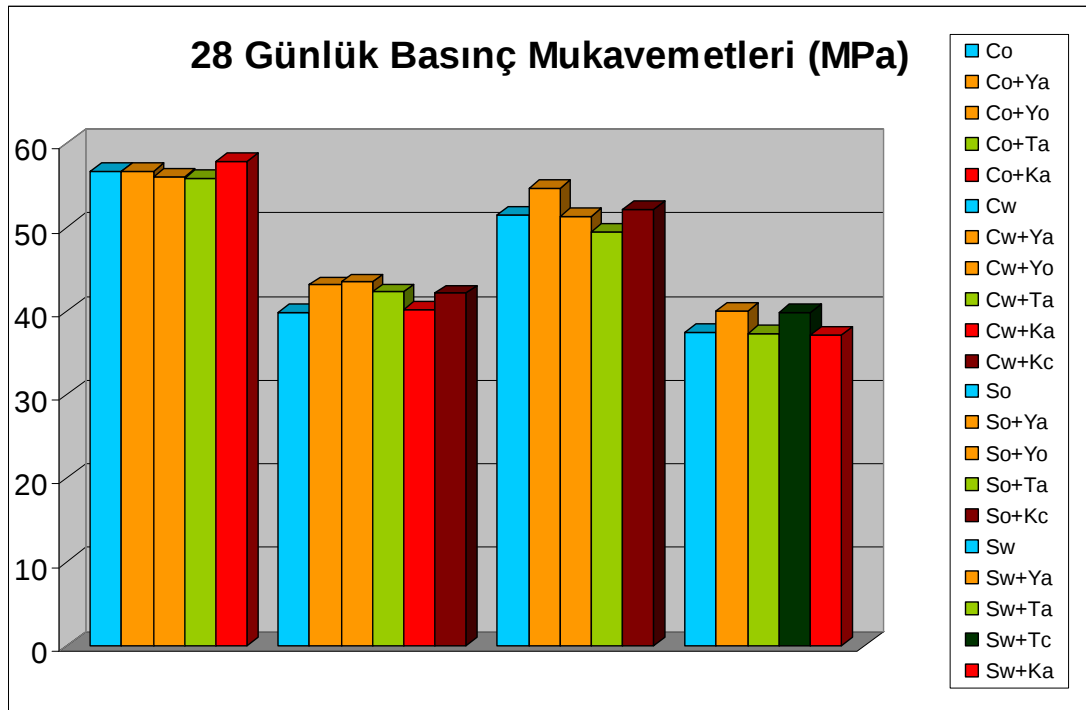
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada, farklı özellikteki puzolan katkı çimentolarla üretilmiş harçlar üzerinde fiziksel, mekanik ve durabilite deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları aşağıda sırasıyla irdelenmiştir.

5.1 Basınç Deneyleri Sonuçları

— Basınç deneylerinde, çimento farklılığı nedeniyle harç numunelerinin dayanımları arasında çok bir fark görülmemiştir.

— Karışımlarda kullanılan S/Ç oranı harç numunelerinin basınç mukavemetlerini de düşürmüştür (Şekil 5.1).

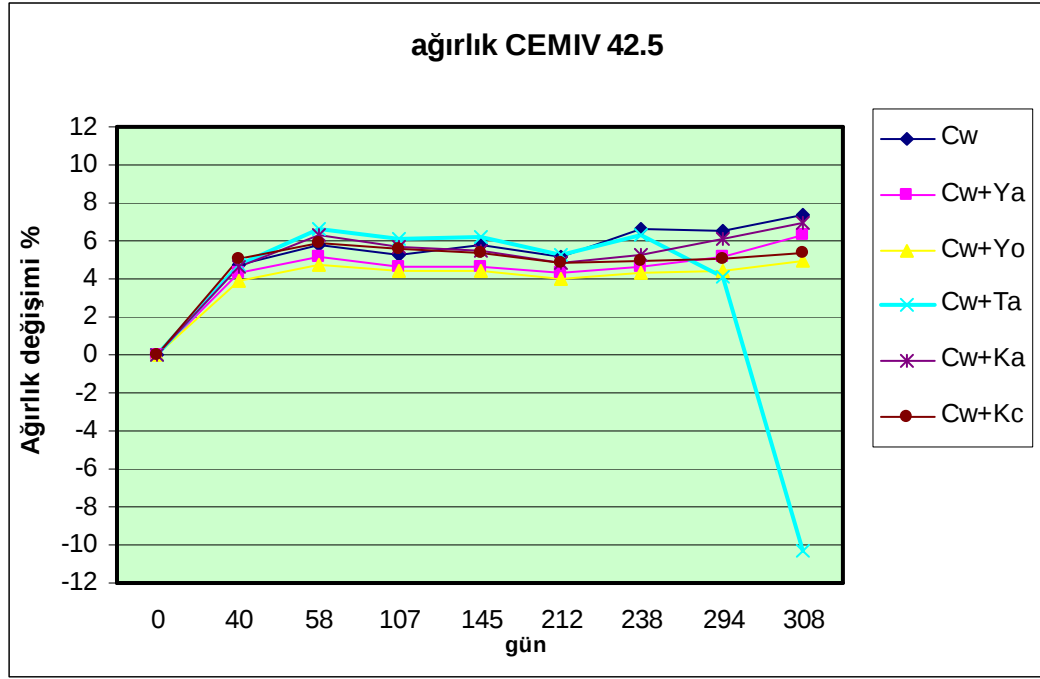


Şekil 5.1 : Seçilen numunelerde 28 günlük basınç deneyi sonuçları

5.2 Sülfat Etkisi

5.2.1 Ağırlık değişimi

Sodyum sülfat çözeltisinde bırakılan CEMIVB(P) 42.5R çimentosuyla üretilen su miktarı 292,5 g. olan numunelerdeki ağırlık değişim grafiği aşağıdaki gibidir.



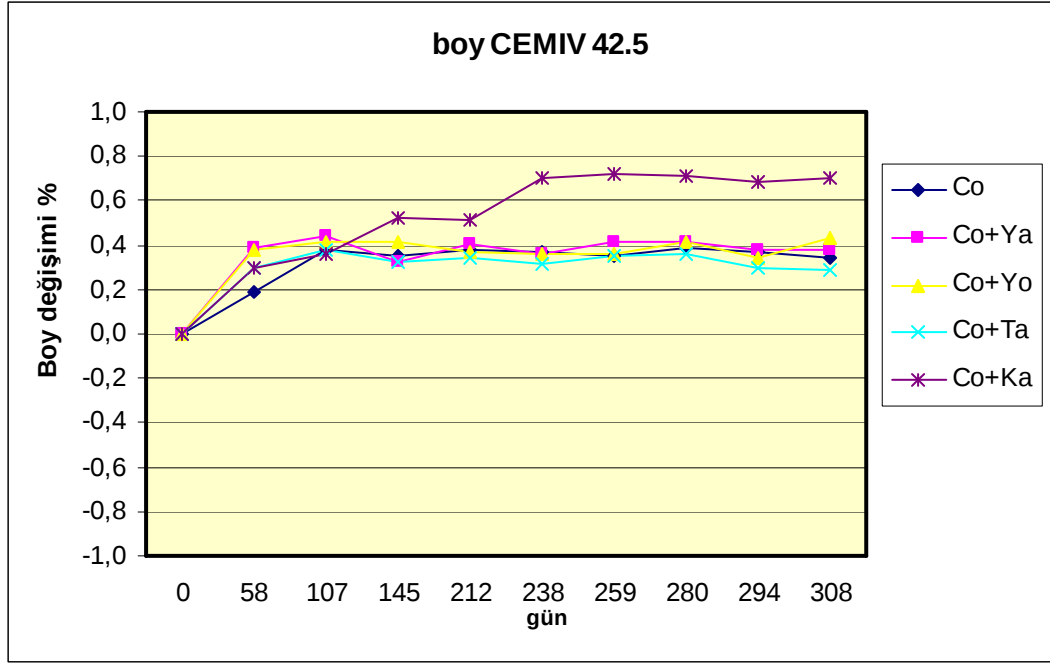
Şekil 5.2 : Seçilen numunelerin ağırlık değişim sonuçları

—Ağırlık değişiminde harçlar ilk önce bünyesine çözelti alarak şişmiş daha sonra ağırlıkları sabit kalmıştır.

— Sülfat etkisine maruz kalan CEMIVB(P) 42.5R çimentosuyla üretilmiş, S/Ç miktarı yüksek ve tras miktarı düşük olan harçta parçalanmalar oluşmuştur. Ayrıca aynı özellikteki yüksek traslı harçlarda da uç kısımda parçalanmalar ve ufalanmalar oluşmuştur.

5.2.2 Boy değişimi

Sodyum sülfat çözeltisinde bırakılan CEMIVB(P) 42.5R çimentosuyla su miktarı 225 g. olan numunelerdeki boy değişim grafiği aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.3 : Seçilen numunelerin boy değişim sonuçları

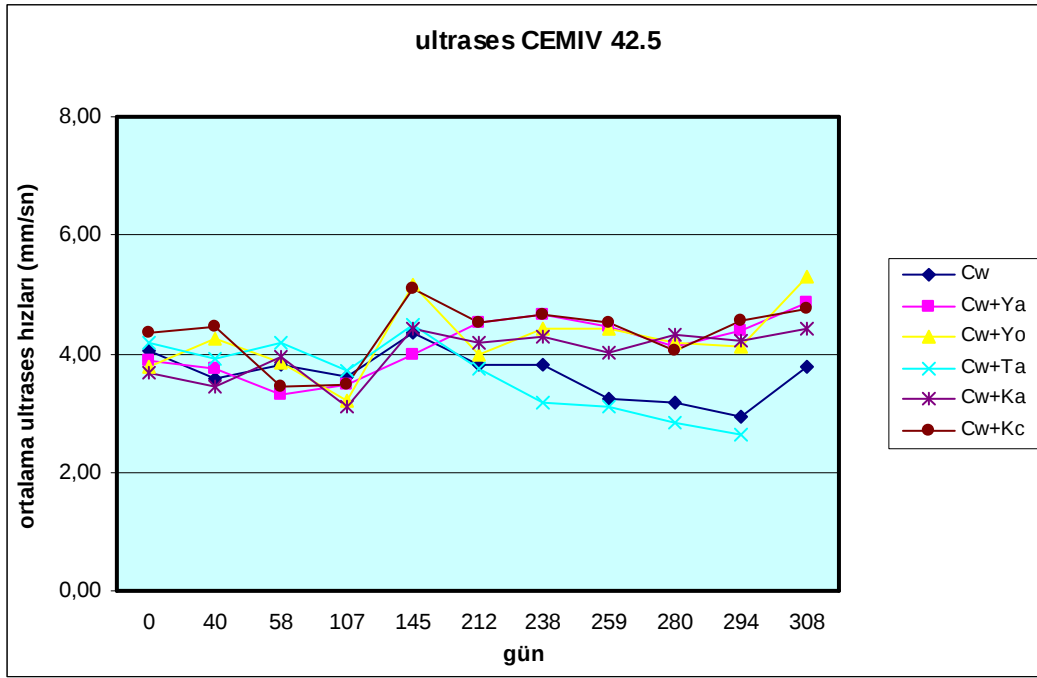
— Sülfatlı ortamında tutulan harçlar önce bünyesine çözelti almışlar ve boy uzamaları olmuş, daha sonra S/Ç oranı düşük olan numunelerin % boy değişim miktarları sabit kalmıştır. S/Ç oranı fazla olan harçların bir kısmında ise rötre oluşmuştur.

5.2.3 Ultrases hızı deneyi sonuçları

Sodyum sülfat çözeltisinde bırakılan CEMIV 42.5 çimentosuyla su miktarı 292.5 g. olan numunelerdeki ultrases hızı değişim grafiği aşağıdaki gibidir.

— Ultrases hızı numuneler üzerinde çok fazla bir değişim göstermemiştir.

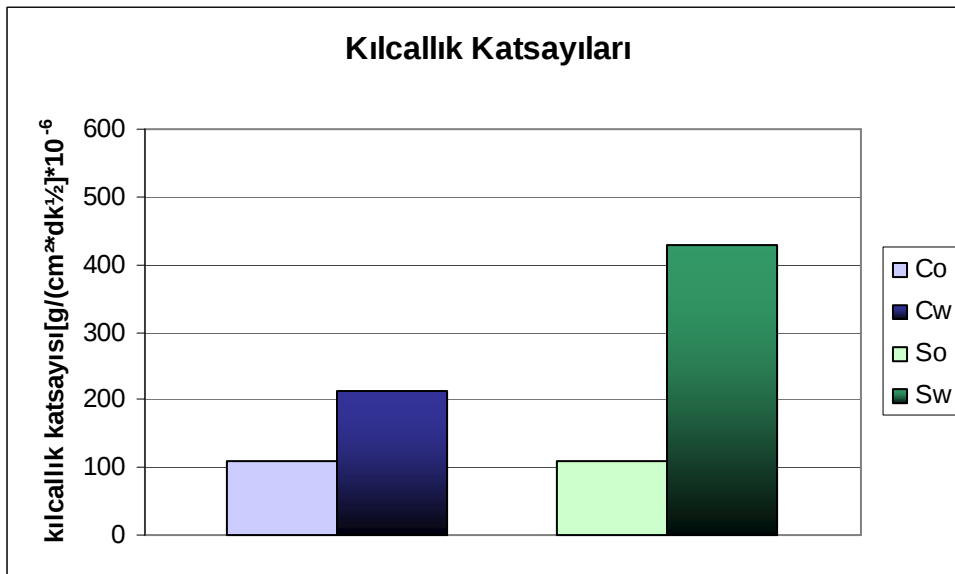
— Sülfat çözeltisine maruz kalan CEMIV 42.5 çimentosuyla üretilen, S/Ç miktarı yüksek olan düşük miktardaki tras içeren ve parçalanan numunede ultrases hızının düşmeye başladığı gözlenmiştir.



Şekil 5.4 : Seçilen numunelerin ultrases ortalama sonuçları

5.2 Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları

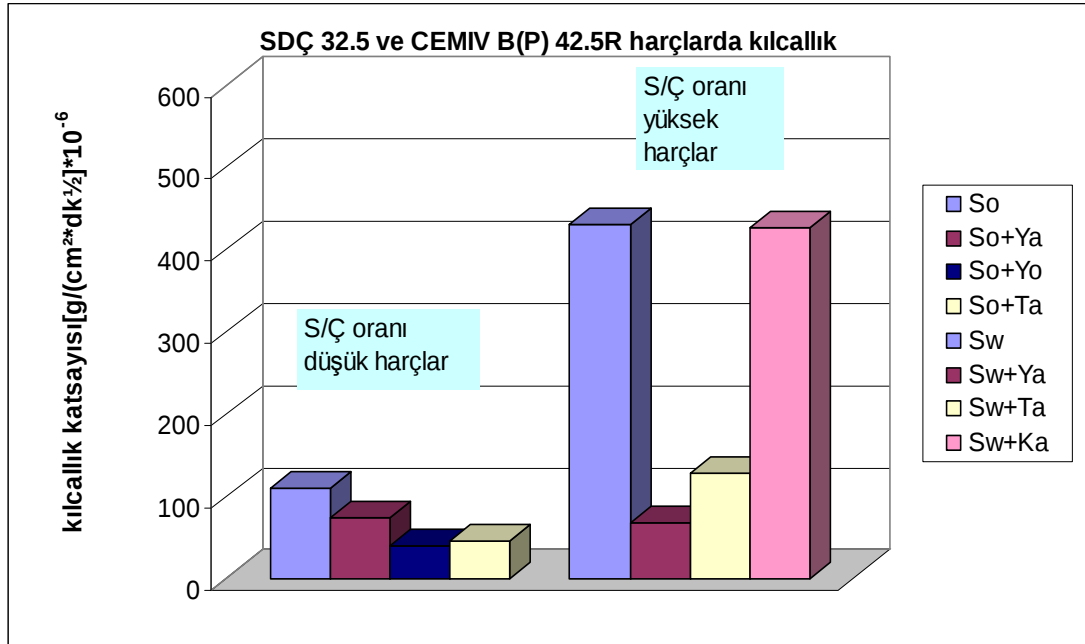
Kılcal su emme deneyi sonuçları aşağıdaki tabloda ve grafiklerde görülmektedir.



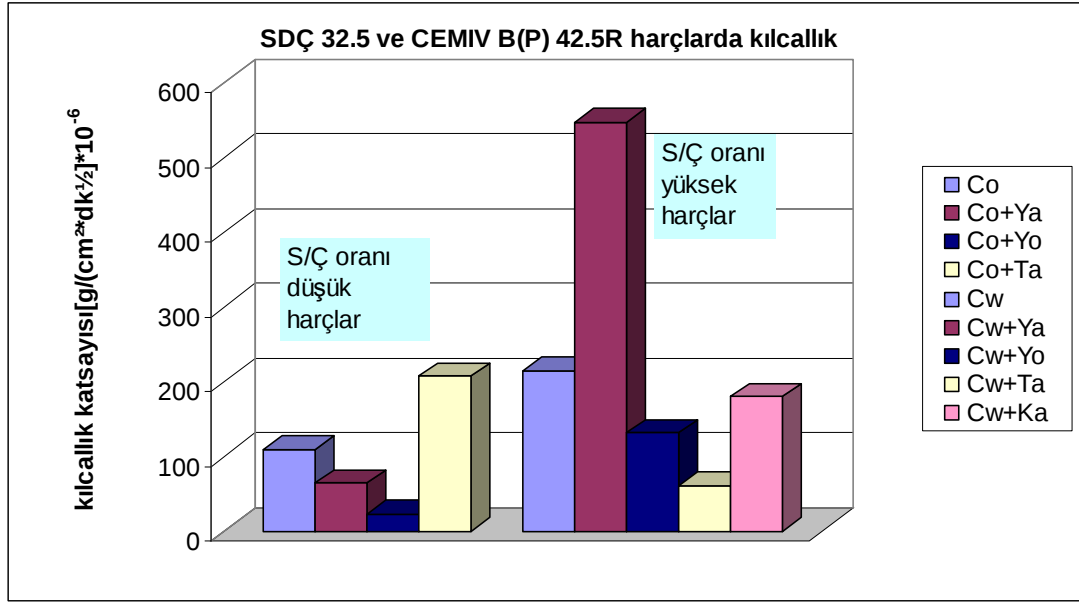
Şekil 5.5 : Şahit numunelerde kılcallık sonuçları

Çizelge 5.1 : Kılcallık katsayıları

Numune kodu	Kılcallık katsayısı [g/(cm ² *dk ^{1/2})]*10 ⁻⁶
Co	109,7
Co+Ya	63,5
Co+Yo	23,1
Co+Ta	207,0
Co+Ka	67,9
Cw	214,1
Cw+Ya	547,7
Cw+Yo	131,7
Cw+Ta	60,4
Cw+Ka	179,4
So	108,8
So+Ya	74,0
So+Yo	39,2
So+Ta	44,8
So+Ka	12,1
Sw	429,7
Sw+Ya	68,0
Sw+Yo	113,5
Sw+Ta	127,7
Sw+Ka	425,5



Şekil 5.5 : Seçilen SDÇ 32.5 numunelerinde kılcallık sonuçları



Şekil 5.6 : Seçilen CEMIV B(P) 42.5R numunelerinde kılcallık sonuçları

- S/Ç oranı yüksek olan harçlarda genel olarak kılcal geçirimsizliğin daha fazla olduğu gözlenmiştir.
- CEMIVB(P) 42.5R çimentosuyla üretilen harçlarda genel olarak daha fazla kılcallık meydana gelmiştir.

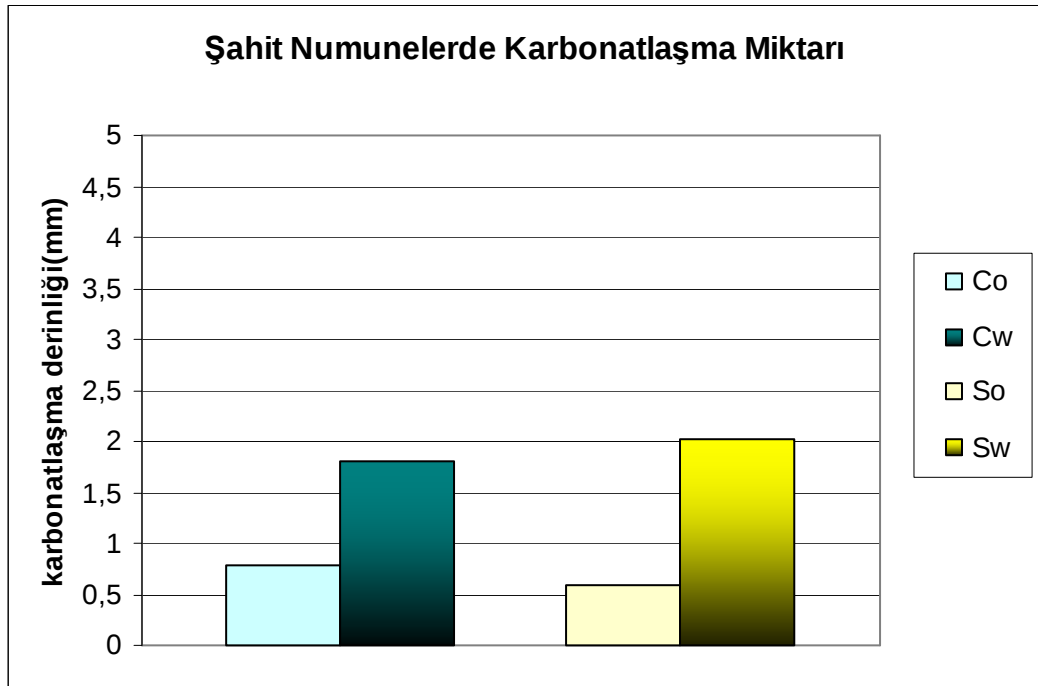
5.3 Karbonatlaşma Deneyi Sonuçları

Farklı çimentolarla üretilen harçlarda düşük ve yüksek S/Ç oranına göre harçlarda karbonatlaşma deneyi sonuçları aşağıdaki grafiklerde ve tabloda görülmektedir.

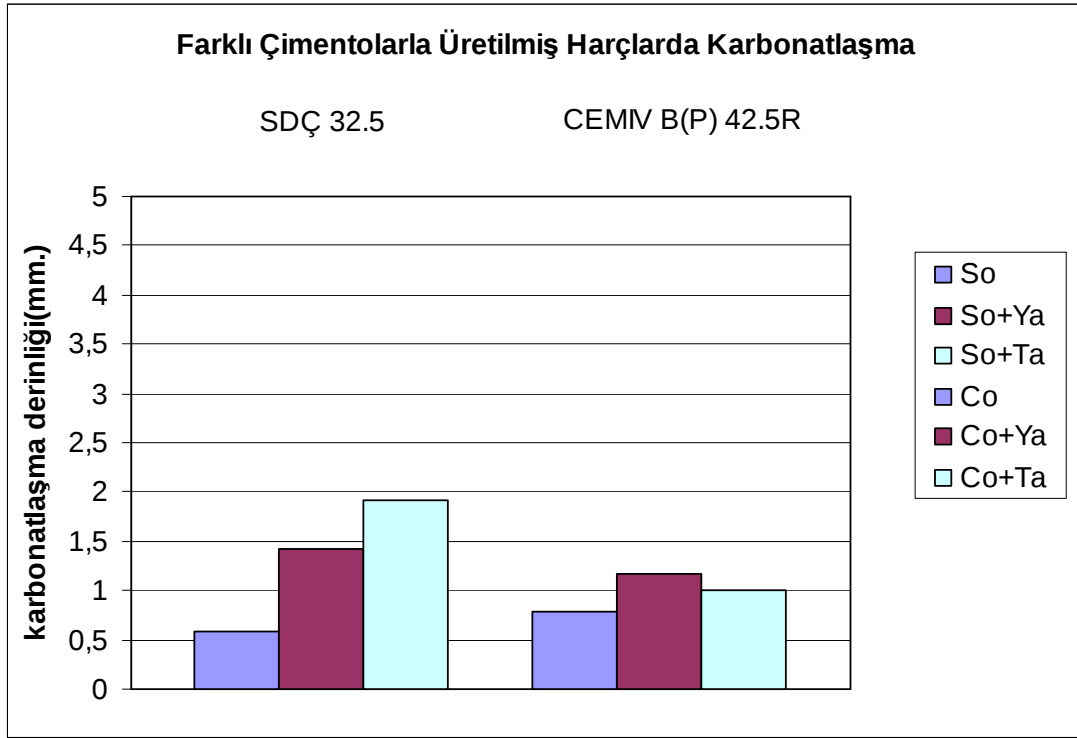
- S/Ç oranı arttıkça karbonatlaşma miktarı artmıştır.
- En yüksek karbonatlaşma miktarı uçucu kül içeren harçlarda meydana gelmiştir.
- CEMIVB(P) 42.5R çimentosuyla üretilmiş harçlarda karbonatlaşma miktarı daha fazladır.

Çizelge 5.2 : Karbonatlaşma deney sonucu

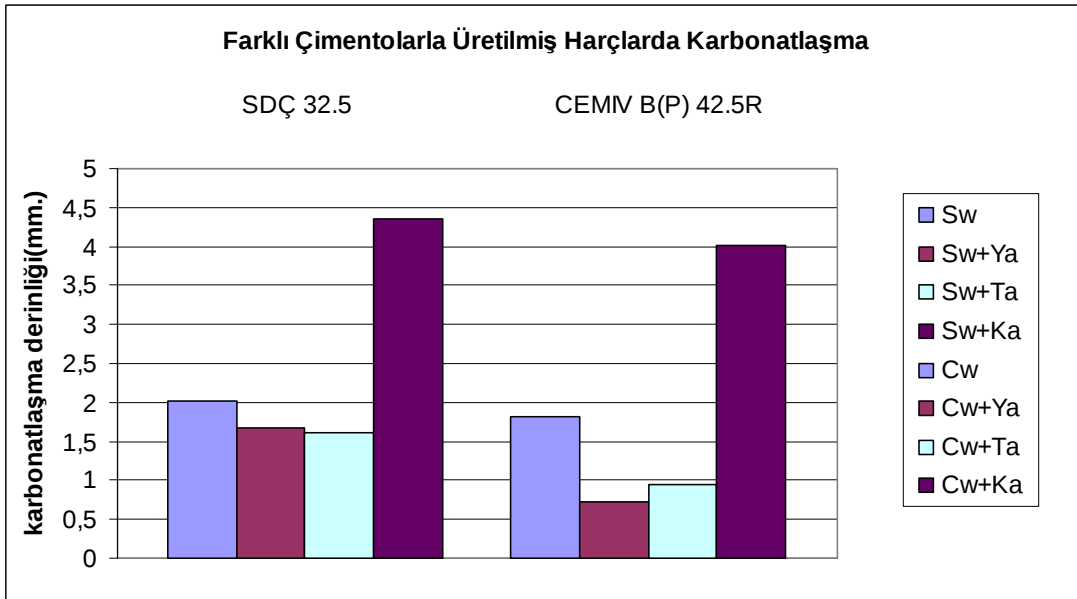
Numune kodu	Karbonatlaşma derinliği(mm)
Co	0,78
Co+Ya	1,17
Co+Yo	1,38
Co+Ta	1,00
Co+Ka	3,08
Cw	1,81
Cw+Ya	0,72
Cw+Yo	1,84
Cw+Ta	0,95
Cw+Ka	4,02
So	0,59
So+Ya	1,43
So+Yo	4,00
So+Ta	1,92
So+Ka	4,45
Sw	2,02
Sw+Ya	1,67
Sw+Yo	3,33
Sw+Ta	1,61
Sw+Ka	4,36



Şekil 5.7. Şahit numunelerde karbonatlaşma miktarı



Şekil 5.7 : Seçilen düşük S/Ç Oranına sahip numunelerde karbonatlaşma sonuçları



Şekil 5.8. Seçilen yüksek S/Ç oranı sahip numunelerde karbonatlaşma sonuçları

6.GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Deneyssel çalışmalar sınırlı sayıda numune üzerinde yapılmıştır ve deneyler hızlandırılmış yöntemler üzerinden uygulanmıştır.

Bu çalışmada farklı iki çimento ile üretilen harçlara yüksek fırın cürufu, tras ve uçucu kül katılarak hazırlanan harçların özelliklerindeki değişiklikler araştırılmıştır.

Sülfat ortamına maruz bırakılan numunelerde değerlendirme aynı mukavemete sahip numuneler üzerinde yapılmıştır. Buradaki amaç aynı mukavemete sahip harçların çeşitli etkiler altında dayanıklılığının incelenmesidir.

Yapılan deneylerden şu sonuçlara varılmıştır;

- Çimento tipinin harç özelliklerine etkileri;
 - Kılcal su emme deneylerinde sülfata dayanıklı çimento ile üretilmiş harçların kılcal su emme değerleri daha düşük çıkmıştır.
 - Karbonatlaşma deneyinde CEMIV B(P) 42.5R çimentosuyla üretilen harçlarda karbonatlaşma miktarının fazla olduğu gözlenmiştir.
- Yüksek fırın cürufunun çimento harcına etkileri;
 - Yapılan deneylerde yüksek fırın cürufunun harçların basınç mukavemetlerinde artışa neden olduğu görülmüştür.
 - Yüksek fırın cürufu, ultrases hızında çok az bir artış neden olmuştur. Karbonatlaşmada ise zararlı bir etki göstermemiş. Aksine yüksek S/Ç oranına sahip harçlarda karbonatlaşma etkisini azaltmıştır.
 - Kılcal su emme deneyin de yüksek fırın cürufunun S/Ç oranı ve C₃A miktarı fazla olan CEMIV B(P) 42.5R çimentosu ile üretilen harçlarda geçirgenliğin çok fazla arttığı gözlenmiştir.
- Trasın çimento harcına etkileri;
 - Basınç mukavemetinde tras, deney sonuçlarında ufak bir artış olmasına neden olmuştur.

— Tras kullanımı, numunelerin kılcal su emme deneyinde düşük S/Ç oranı olanlarda emme miktarı artmış; yüksek olanlarda ise azalmıştır

- Uçucu külün çimento harcına etkileri;

— Basınç deneyi sonuçlarında, tras ve yüksek fırın cürufu kullanılan harç numunelerine göre basınç mukavemeti daha düşük çıkmıştır.

— Yapılan harçlarda uçucu kül kullanılması ultrases hızı deneyinde çok etkili olmamıştır. Kılcal su emme deneylerinde ise sülfata dayanıklı çimento içeren numunelerde daha yüksek emme değerine ulaşılmıştır.

- Sülfat etkisi;

— SDÇ ile üretilen, S/Ç oranı yüksek olan az miktarda tras ile üretilen harç sülfatın zararlarından en önce ve en çok etkilenmiştir ve parçalanmıştır. Bunun nedeni S/Ç oranı yüksek olduğu için harç; çok fazla zararlı madde geçirmiş bunun sonucu da sülfattan çok fazla etkilenmiştir.

— S/Ç oranı düşük olan numuneler sülfattan en az etkilenmiştir.

— Sülfata dayanıklı çimento içeren harçlarda sülfat etkisi daha fazla gözlenmiştir.

Kılcallık ve karbonatlaşmada yüksek S/Ç oranına sahip harçların daha fazla etkilendiği gözlenmiştir. Bu da boşluksuz betonun dayanıklılığının daha fazla olduğunu yeniden kanıtlamıştır.

Kullanılan her katkının belirli özellikleri iyileştirdiği belirli özelliklere ise çok fazla etki etmediği görülmüştür. Bu nedenle, harcın kullanım amacına ve kullanılacağı ortam koşullarına uygun çimento tipi ve mineral katkı seçilmeli, mineral katkı oranı amaca uygun olarak belirlenmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Akman, S.**, 1987: Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [2] **Altınbaş, I.**, 1986: Yüksek Fırın Cürufunun Portland Çimentosunda Amonyum Nitrat Korozyonu Dayanıklılığına Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Artel, T.**, 1961: Yapı Malzemesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.
- [4] **ASTM C1202-97**, 2004: Standart Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, *ASTM*.
- [5] **Dodson, V.H.**, Concrete Admixtures, Van Nostrand Reinhold, New York.
- [6] **Erdoğan, N.**, 2005: Çimento Harçlarının Niteliklerinin İyileştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] **Erdoğan, T.S. ve Erdoğan, Y.T.**, 2007: Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun Onbin Yıllık Tarihi, ODTU Yayıncılık, Ankara.
- [8] **Gani, M.S.J.**, Cement and Concrete, Chapman and Hall, London.
- [9] **Hamanlı, Y.**, 2007: Metakaolin ve Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] **Helmuth, R.**, 1987: Fly Ash in Cement and Concrete, Portland Cement Association, U.S.A..
- [11] **Ilıca, T., Yıldırım, H. ve Şengül, Ö.**, 2008: Effect of Cement Type on Resistance of Concrete Against Rapid Chloride Permeability, *11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components*.
- [12] **İncesu, Y.**, 2000: Çimento Sektörü Raporu, *T.C. Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı Orta Anadolu İhracatçıları Birlikleri Genel Sekreterliği Raporu*.
- [13] **Kocataşkın, F.**, 1965: Çimento ve Özellikleri Hakkında Ne Biliyoruz?, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.

- [14] **Larrard, D.F.**, Concrete Mixture Proportioning, FN Spon, London. 229–249.
- [15] **Mavi, Ö.**, 2000: Kireç Harç ve Sıvaların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] **Murdock, L.J., Brook, K.M. and Dewar, J.D.**, Concrete Materials and Practice, Edward Arnold, London
- [17] **Oktar, O.N.**, 1984: Beton ve Harçların Basınç Altındaki Kısa Süreli Davranışında Çimento Hamuru Yapısı ve Agregada Granülometrisinin Etkileri, *İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Teknik Raporu*,
- [18] **Popovics, S.**, 1992: Concrete Materials, Properties, Specifications and Testing, Noyes Publications, New Jersey.
- [19] **Portland Cement Association.**, Design and Control of Concrete Mixtures, PCA, U.S.A.
- [20] **Postacıoğlu, B.**, 1975: Yapı Malzemesi Dersleri, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar ve Beton, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.
- [21] **Postacıoğlu, B., Uyan, M. ve Mazlum, F.**, 1987: Traslı Çimentoların Kullanım Alanları, *İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Teknik Raporu*,
- [22] **Ramachandranan, V.S.**, 1984: Concrete Admixtures Handbook, Noyes Publications, New Jersey.
- [23] **Şahan, A.M.**, 2006: CEM I 42,5 Çimentolu Düşük Dozajlı Betonlarda Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliği, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [24] **Şengül, Ö.**, 2006: Effects of Pozzolanic Materials on Mechanical Properties and Chloride Diffusivity of Concrete, *Ph. D. Thesis*, İ.T.Ü. Institute of Science and Technology, İstanbul.
- [25] **Şimşek, O.**, 2007: Beton Bileşenleri ve Beton Deneyleri, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- [26] **Tangüner, R.**, 2007: Uçucu Küllü Düşük ve Yüksek Mukavemetli Elastiklik Modülünün İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [27] **Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. Ve Yeğinoğlu, A.**, 2004: Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.

- [28] **Yeğınobalı, A.**, 1971: Uçucu Kül, Tras ve Yüksek Fırın Cürufunun Betonda Katkı Maddesi Olarak Kullanılması ve Optimum Uçucu Kül Karışım Oranlarının Tayini, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, Ankara.
- [29] **Göktepe,M.**, 2008: C₃A Oranı Farklı Çimentolarla Üretilmiş Betonlarda Sülfat Etkisi ve Klorür Geçirimsiliği, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
- [30] **Ilca,T.**, 2008: Oranı Farklı Çimentolarla Üretilen Betonlarda Sülfat Etkisi ve Klorür Geçirimsiliği, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
- [31] **Yılmaz,O.**, 2008: C₃A Yüzdeleri ve Mineral Katkı İçerikleri Farklı Olan Çimentolarla Üretilmiş Harçlarda Klor Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
- [32] **Massazza F., Costa U.**, Some Properties of Pozzolonic Cements Containing Fly Ashes
- [33] **Erdoğan, T.**, 2003: Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.
- [34] **Özturan, T.**, 1991: Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği, 2. *Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul.
- [35] **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği**, 2003: Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması Ve Özellikleri, Ankara.
- [36] **TS EN 197-1**, 2002: Çimento – Bölüm 1 Genel Çimentolar-Birleşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [37] **Yıldırım,M.**,1986: Tras Katkılı Çimentolarla Üretilen Betonların Amonyum Nitrata Dayanıklılığı, , *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
- [38] **Mazlum,F.**, 1989: Pirinç Kabuğunun Puzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi, *Doktora Tezi* , İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
- [39] **Mehta, P.K.**, 1989: Puzzolanic And Cementitious By-Pruducts in Concrete – Another Look, Third International Conference on The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Puzzolans in Concrete, Editor V.M. Malhotra, Trondheim, Norway.

- [40] **Baradan,B.,Yazıcı,H.,Ün,H.,** 2002: Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Dürabilite), DEÜ Müh. Fak. Yayınları, İzmir.
- [41] **Uyan,M.,** 1975: Beton ve Harçlarda Kılcallık Olayı, *Doktora Tezi* , İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
- [42] **Altun,B.,** 2001: Melasın Beton Katkı Maddesi Olarak Kullanabilirliği ve Betonun Durabilitesine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
- [43] **Özturan, T.,** 1993: Uluslar Arası IV. CANMET-ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf Ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, , Ankara.
- [44] **Postacıoğlu, B.,** Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar Cilt-2.
- [45] **TSE 639,** 1975: Uçucu Küller-Çimentoda Kullanılan, *Türk StandartlarıEnstitüsü*, Ankara.
- [46] **TS EN 450,** 1998. Uçucu Kül, Betonda Kullanılan Tarifler, Özellikler Ve Kalite Kontrolü, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [47] **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği,** 2003. Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması Ve Özellikleri, Ankara.
- [48] **Şengül, Ö., Taşdemir M. A. ve Sönmez R.,** 2003. Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Normal Ve Yüksek Dayanımlı Betonların Klor Geçirimsizliği, *V.Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul.

EKLER

Ek-A

Çizelge A.1 : Ultrases Deneyi Sonuçları

gün	0	40	58	107	145	212	238	259	280	294	308
% degisim											
C	3,8	3,4	3,7	3,7	4,2	4,2	4,1	5,1	4,2	4,8	4,9
C+Ya	5,0	4,0	3,9	3,5	4,9	4,8	5,0	4,2	3,7	4,4	5,0
C+Yc	3,9	4,1	3,8	3,6	4,7	3,9	5,4	4,7	4,4	4,1	5,2
C+Yo	4,1	4,5	3,7	3,6	5,1	4,1	4,8	5,0	4,6	4,1	4,7
C+Ta	4,1	3,6	3,8	4,7	4,4	4,4	4,4	4,2	3,8	4,5	5,0
C+Tc	4,2	4,0	3,5	5,4	5,5	4,1	5,0	4,2	4,1	4,6	5,1
C+Ka	5,4	3,7	5,1	3,6	4,5	4,5	4,8	4,2	4,0	5,0	4,5
C+Kc	5,3	3,8	3,6	4,2	5,6	3,4	3,7	4,5	3,8	4,7	5,1
Cw	4,1	3,6	3,8	3,6	4,3	3,8	3,8	3,2	3,2	2,9	3,8
Cw+Ya	3,9	3,8	3,3	3,5	4,0	4,5	4,7	4,5	4,1	4,4	4,9
Cw+Yc	4,3	3,9	3,8	4,2	4,9	4,5	4,7	5,2	4,4	4,7	4,5
Cw+Yo	3,8	4,2	3,9	3,2	5,2	4,0	4,4	4,4	4,2	4,1	5,3
Cw+Ta	4,2	3,9	4,2	3,7	4,5	3,8	3,2	3,1	2,8	2,6	
Cw+Tc	3,9	3,4	4,2	4,3	4,3	3,7	4,7	3,9	3,1	4,2	3,9
Cw+Ka	3,7	3,4	3,9	3,1	4,4	4,2	4,3	4,0	4,3	4,2	4,4
Cw+Kc	4,3	4,4	3,4	3,5	5,1	4,5	4,6	4,5	4,0	4,6	4,8
S	4,1	4,1	3,6	3,7	4,1	4,6	4,8	5,1	4,2	4,4	4,8
S+Ya	4,1	4,3	3,9	4,2	4,5	5,2	4,6	4,5	3,4	4,3	4,8
S+Yo	4,5	3,6	3,7	3,5	5,4	4,2	4,3	4,7	3,6	4,2	4,8
S+Ta	4,1	3,7	3,6	3,7	4,8	3,8	4,4	4,5	4,0	4,5	4,7
S+Tc	4,1	4,2	4,0	3,9	4,5	4,0	5,1	4,4	4,2	4,4	4,4
S+Ka	4,0	4,4	4,3	4,0	5,2	3,9	4,1	5,4	4,0	3,7	4,7
S+Kc	4,1	3,2	3,7	4,2	5,2	4,0	4,8	4,8	4,4	3,7	5,1
Sw	3,9	4,0	3,5	3,6	4,5	3,6	4,7	4,0	4,2	3,9	4,1
Sw+Ya	3,8	3,7	3,5	3,6	4,8	4,0	5,3	5,0	3,7	3,7	4,0
Sw+Yc	4,8	3,6	3,6	3,5	5,2	3,7	4,2	4,5	4,4	4,0	4,9
Sw+Yo	4,2	4,0	4,0	4,8	5,3	3,9	4,4	4,9	4,4	4,2	4,5
Sw+Ta	3,8	3,7	3,8	3,9	4,8	3,4	4,1	4,4	3,8	3,9	4,0
Sw+Tc	3,8	3,6	3,6	4,2	4,2	4,1	3,4	4,6	3,3	3,0	4,4
Sw+Ka	4,2	3,4	3,4	3,6	5,3	3,6	3,9	4,5	3,5	4,2	4,4
Sw+Kc	4,2	4,3	3,7	3,6	4,8	4,0	4,8	5,0	3,8	3,9	4,7

Çizelge A.2 : Ağırlık Ölçümü % Değişim Sonuçları

gün	0	40	58	107	145	212	238	259	280	294	308
% degisim											
C	0	2,5	3,0	2,8	2,9	2,7	3,0	2,5	1,8	2,6	3,0
C+Ya	0	3,1	3,6	3,4	3,4	3,2	3,4	3,0	2,9	3,4	3,6
C+Yc	0	1,3	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,6	1,4	1,6	1,6
C+Yo	0	2,1	2,6	2,5	2,5	2,4	2,6	2,2	1,8	2,3	2,4
C+Ta	0	3,4	4,1	3,7	3,7	3,5	3,8	2,9	3,1	3,8	4,1
C+Tc	0	3,3	3,9	3,7	3,8	3,6	3,8	3,1	3,0	3,6	4,0
C+Ka	0	3,1	3,8	3,6	3,6	3,4	3,5	2,9	3,0	3,5	3,8
C+Kc	0	2,8	3,3	3,2	3,2	3,0	3,1	2,4	2,3	3,0	3,2
Cw	0	4,7	5,8	5,3	5,8	5,1	6,6	4,2	3,8	6,5	7,4
Cw+Ya	0	4,3	5,2	4,7	4,7	4,3	4,7	3,8	4,0	5,1	6,3
Cw+Yc	0	3,7	4,2	3,9	3,9	3,6	3,8	3,0	2,6	3,6	3,9
Cw+Yo	0	3,9	4,7	4,4	4,5	4,0	4,3	3,5	3,4	4,4	4,9
Cw+Ta	0	4,7	6,6	6,1	6,2	5,3	6,4	4,5	3,5	4,2	-10,3
Cw+Tc	0	5,0	6,4	5,8	5,7	5,1	5,8	3,5	4,4	5,9	5,1
Cw+Ka	0	4,7	6,3	5,7	5,5	4,8	5,2	4,2	4,6	6,1	6,9
Cw+Kc	0	5,1	5,9	5,5	5,4	4,8	4,9	3,8	3,8	5,0	5,3
S	0	1,6	2,2	2,0	2,0	1,9	2,2	1,7	1,1	1,5	1,7
S+Ya	0	2,4	2,6	2,5	2,5	2,3	2,4	2,0	1,7	2,1	2,5
S+Yo	0	1,8	2,2	2,2	2,3	2,1	2,3	1,8	1,9	2,1	2,3
S+Ta	0	3,3	3,9	3,5	3,6	3,4	3,7	3,0	2,9	3,4	3,6
S+Tc	0	3,1	3,7	3,6	3,4	3,5	3,6	3,0	2,2	3,2	3,5
S+Ka	0	3,9	4,1	3,8	3,8	3,5	3,7		3,1	3,7	3,9
S+Kc	0	2,8	3,2	3,1	3,2	3,0	3,1	2,6	2,2	2,9	3,0
Sw	0	3,5	4,2	3,7	3,7	3,3	3,7	3,0	2,4	4,3	6,2
Sw+Ya	0	4,4	5,1	4,8	4,8	4,5	4,7	4,0	4,1	5,2	5,7
Sw+Yc	0	4,2	4,9	4,7	4,7	4,4	4,4	3,5	3,6	4,5	4,8
Sw+Yo		4,7	5,4	5,1	5,1	4,5	4,7	3,7	3,2	5,1	5,7
Sw+Ta	0	5,7	6,7	6,2	6,2	5,5	5,9	4,5	4,1	7,3	8,0
Sw+Tc	0	5,6	6,7	6,1	6,1	5,5	5,7	4,4	4,8	6,4	6,5
Sw+Ka	0	5,6	6,5	5,9	5,8	5,3	5,5	6,3	4,8	6,3	7,2
Sw+Kc	0	5,3	6,2	5,7	5,6	5,3	5,3	4,6	4,1	4,4	4,5

Çizelge A.3 : Boy Ölçümü % Değişim Sonuçları

gün	0	58	107	145	212	238	259	280	294	308
% değişim										
C	0	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3
C+Ya	0	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
C+Yc	0	0,1	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4
C+Yo	0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4
C+Ta	0	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3
C+Tc	0	0,3	0,6	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1
C+Ka	0	0,3	0,4	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
C+Kc	0	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,6	0,5	0,5
Cw	0	0,3	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	-0,1
Cw+Ya	0	0,1	0,3	0,2	0,3	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0
Cw+Yc	0	0,4	0,4	0,5	0,4	0,3	0,5	0,6	0,5	0,5
Cw+Yo	0	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3
Cw+Ta	0	0,1	0,4	0,4	0,2	0,2	0,1	0,0	-0,1	
Cw+Tc	0	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,1	0,0
Cw+Ka	0	0,3	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Cw+Kc	0	0,2	0,7	0,4	0,7	0,6	0,7	0,5	0,6	0,6
S	0	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
S+Ya	0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2
S+Yo	0	0,4	0,4	0,6	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4
S+Ta	0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
S+Tc	0	0,2	0,2	-0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
S+Ka	0	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
S+Kc	0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Sw	0	0,2	0,4	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Sw+Ya	0	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,6
Sw+Yc	0	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2
Sw+Yo	0	-0,1	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,5
Sw+Ta	0	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
Sw+Tc	0	0,4	0,1	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
Sw+Ka	0	0,2	0,3	0,4	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5
Sw+Kc	0	0,4	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Selda Agar

Doğum Yeri ve Tarihi: Silivri/İST 03.01.1984

Adres: Kumburgaz /İST

Lisans Üniversite: Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği

