

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK CAM TOZU K-DEĞERLERİNİN BETONUN
DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

BEYZA AYGÜN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

GEBZE

2021

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK CAM TOZU K-DEĞERLERİNİN
BETONUN
DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

BEYZA AYGÜN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. TAYFUN ALTUĞ SÖYLEV

GEBZE
2021

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**THE EFFECT OF WASTE GLASS
POWDER K-VALUES ON DURABILITY
PROPERTIES OF CONCRETE**

BEYZA AYGÜN
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
EARTHQUAKE AND STRUCTURAL ENGINEERING PROGRAM

THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. TAYFUN ALTUĞ SÖYLEV

GEBZE
2021

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU
----------------------------------	--------------------------------------

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 18/12/2020 tarih ve E.2387 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 05/01/2021 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Beyza AYGÜN'ün tez çalışması İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Deprem ve Yapı Mühendisliği Programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) :Doç. Dr. Tayfun ALTUĞ SÖYLEV

ÜYE

:Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Can ZÜLFİKAR

ÜYE

:Dr.Öğr. Üyesi İsmail KILIÇ

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Yapım sürecinin verimliliği ve kaynakların etkin kullanılması sürdürülebilirlik için önemlidir. Bu bağlamda endüstriyel atıkların (uçucu kül, cam tozu vb.) ikamesi inşaat sektöründe önem kazanmıştır. Bu malzemeler dayanım ve dayanıklılık parametrelerine de olumlu katkı sağlayabilir. Şartname de 28 günlük dayanımları esas olan mineral katkılı betonların erken dayanımları düşük fakat ileriki yaşlardaki dayanımları yüksektir. TS-EN206 bu tip mineral katkıların çimento ikamesi olarak kullanılmasında k-değeri kavramını kullanmaktadır. Buna göre belli bir çimento tipi ve ikame oranında, belirlenmiş bir k-değeri uygulanır. Bu bağlayıcılık etkinlik faktörü, mineral katkı içeren betonun, içermeyen referans betonuyla eşdeğer dayanıklılığa sahip olmasını sağlamak için uygulanır. Uçucu kül, silis dumanı vb. mineral katkıları için standartlarda k-etkinlik değeri verilmesine rağmen benzer özelliklere sahip birçok başka malzeme için belirlenmemiştir. Cam tozu da standartta k-etkinlik değeri hesaplanmamış puzolanik bir bağlayıcıdır. Çalışmanın amacı önceki çalışmalarda belirlenen k-değerleriyle oluşturulan cam tozu içeren beton karışımlarının, dayanıklılık açısından değerlendirilmesinden oluşmaktadır. Çalışmada bir çimento, farklı ikame oranı (%10, 15, 20), farklı su/çimento oranıyla (0.45, 0.55 ve 0.65) oluşturulan betonlar test edilmiş, su/çimento oranı ve basınç dayanımı ilişkisinden k-değeri hesaplanmıştır. "Betonda Basınç Altında Su Sızdırma Derinliğinin Belirlenmesi" (TS-EN12390-8), "Betonda Yoğunluk, Su emme ve Boşlukların Belirlenmesi" (ASTM-C642), "Betonda Ultrases" (ASTM-C597), "Beton Kolorimetrik" deneyleri yapılmıştır. Aynı etkin s/ç oranındaki performansları, cam tozu içermeyen betonunkiyle karşılaştırılmış ve normal betona göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton, Cam Tozu, K-Etkinlik Değeri, Dayanıklılık, Sürdürülebilirlik.

SUMMARY

Efficiency of the construction process and effective use of resources are important for sustainability. In this context, the use of industrial wastes (fly ash, glass powder, etc.) has gained importance in the construction sector. The use of these materials in concrete can positively contribute to both strength and durability. TS-EN206 standard based on 28-day strength, early strength low, but later age high strength mineral-added concrete. Standard uses the k-value concept for cement substitution of such mineral additives. Accordingly, k-value is applied at specific cement type and substitution ratio. This binding activity factor is applied so that the concrete containing mineral additive has the same strength as that of reference concrete. Although the standards for mineral additives give k-value, it hasn't been determined for many materials with similar properties. Glass powder is pozzolanic binder whose k-value hasn't been calculated in the standard. The aim of the study is to evaluate glass powder concrete mixtures formed with determined k-values for durability. In the study, k-values were determined in concretes with different water/cement replacement ratios (0.45, 0.5, 0.65), cement replacement ratios (10, 15, 20%). "Depth of Water Penetration Under Pressure" (TS-EN12390-8), "Determination of Density, Absorption and Voids" (ASTM-C642), "Pulse Velocity Through Concrete" (ASTM-C597), "Concrete Colorimetric" tests were performed. The performances at the same effective w/c ratio were compared with those of concrete without glass powder better results than normal concrete.

Key Words: Concrete, Glass Powder, K-Efficiency Value, Durability, Sustainability.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında bana değerli bilgi ve yardımlarıyla destek olan sayın hocam Doç. Dr. Tayfun Altuğ SÖYLEV'e,

Gerek deney aşamasındaki yardımları ve pratik önerileri ile deneysel çalışmada büyük desteği olan Araş. Gör. Muhammet ASAN'a,

Deneysel çalışmalarımızı birlikte yürüttüğümüz çalışma arkadaşım Levent YALÇIN'a,

Maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen aile bireylerime ve özellikle kız kardeşim Begüm AYGÜN'e sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez çalışması GTÜ BAP 2018 A 105 63 Projesi kapsamında yapılmıştır.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1. Puzolanlar ve Puzolanik Aktivite	3
2.2. Puzolanların Betonda Kullanım Amaçları	3
2.3. Puzolan Çeşitleri	4
2.3.1. Doğal Puzolanlar	4
2.3.2. Yapay Puzolanlar	4
2.3.2.1. Uçucu kül	4
2.3.2.2. Silis dumanı	5
2.3.2.3. Yüksek fırın cürufu	6
2.3.2.4. Mermer tozu	7
2.3.2.5. Pirinç kabuğu külü	8
2.4. Camın Betonda Kullanımı	8
2.4.1. Cam Tozu	9
2.4.2. Cam Tozunun Fiziksel Kompozisyonu	9
2.4.3. Cam Tozunun Kimyasal Kompozisyonu	10
2.4.4. Cam Tozunun Puzolanik Reaktivitesi	10
2.4.5. Cam Tozunun Taze Beton Özelliklerine Etkisi	11
2.4.6. Cam Tozunun Mekanik Özelliklere Etkisi	11
2.4.7. Cam Tozunun Dayanıklılık Özelliklerine Etkisi	12
2.4.8. Cam Tozunun Çevresel ve Ekonomik Faydası	13
2.5. k-Etkinlik Değerinin Belirlenmesi	14

2.6. Betonda Dayanıklılık	17
2.6.1. Betonda Geçirimsizlik	17
2.6.2. Betonda Klor Etkisi	18
2.6.3. Betonda Alkali Silika Reaksiyonu	18
2.7. Dayanıklılık Deneyleri	19
2.7.1. Basınç Altında Su İşleme Derinliğinin Tayini	19
2.7.2. Sertleşmiş Betonun Yoğunluğu Deneyi	21
2.7.3. Kolorimetrik Deney Yöntemi	23
2.8. Tahribatsız Beton Muayene Yöntemleri	25
2.8.1. Betonda Ultrases Geçiş Süresi Ölçümü	25
2.9. Taze Beton Özellikleri	26
2.9.1. İşlenebilme ve Kıvam	26
2.9.1.1. Çökme Deneyi	27
2.9.1.2. Birim Ağırlık	28
2.10. Betonda Dayanım	28
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	30
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	30
3.1.1. Agregalar	30
3.1.2. Çimento	31
3.1.3. Cam Tozu	32
3.2. Beton Karışımları	33
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	35
4.1. Taze Beton Deney Sonuçları	35
4.1.1. İşlenebilme	35
4.1.2. Birim Ağırlık	36
4.2. k-Etkinlik Değeri Sonuçları	37
4.3. Dayanıklılık Deney Sonuçları	40
4.3.1. Betonda Yoğunluk, Su Emme ve Boşluk Hacmi	40
4.3.2. Betonun Basınç Altında Su Sızdırma Derinliği	42
4.3.3. Betonun Klorür Geçirgenliği	44
4.3.4. Ultrases Geçiş Süresi	70
5. GENEL SONUÇLAR	71
KAYNAKLAR	73

ÖZGEÇMİŞ	79
EKLER	80

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
A	: Kuru kütle
a_0, b_0, a_f, b_f	: Dayanım & su/çimento arasındaki lineer parametreler
B	: Suyu doymuş kütle
β_{D0}	: Kontrol betonunun basınç dayanımı
β_{DF}	: Mineral katkılı betonun basınç dayanımı
c	: Cam tozu içeren betonun çimento içeriği
C	: Suyu doymuş ve kaynamış kütle
D	: Sudaki kütle
g	: Cam tozu içeriği
g_1	: Yığın yoğunluğu
g_2	: Görünür yoğunluk
L	: mm cinsinden alınan yol
T	: μs cinsinden geçen süre
V	: km/s cinsinden hız
W_0	: Kontrol betonunun su/çimento oranı
W_ϕ	: Mineral katkılı betonun su/çimento oranı
SEM	: Scanning Electron Microscope

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Cam tozu.	9
2.2: Cam tozunun SEM görüntüsü.	10
2.3: Basınç dayanımı ve su/çimento arasındaki ilişki.	15
2.4: Su geçirimsizlik deneyi uygulanan numuneler.	20
2.5: Su geçirimsizlik derinliği ölçülen numune.	20
2.6: Yüzey kuru suya doymuş kütle.	21
2.7: Sudaki kütle.	22
2.8: %3.5 NaCl çözeltisinde bekletilen numuneler.	24
2.9: 0.1 M AgNO ₃ çözeltisi uygulanan numune.	24
2.10: Ultrases geçiş süresi ölçümü.	25
2.11: Betonda çökme değerinin ölçümü.	27
2.12: Betonda net ağırlığın ölçülmesi	28
3.1: Kullanılan agregaların elek analizi.	31
3.2: Kullanılan cam tozunun elek analizi sonuçları.	33
4.1: %10 Cam tozu içeren numunelerin basınç dayanımı & su/çimento ilişkisi.	37
4.2: %15 Cam tozu içeren numunelerin basınç dayanımı & su/çimento ilişkisi.	38
4.3: %20 Cam tozu içeren numunelerin basınç dayanımı & su/çimento ilişkisi.	39
4.4: Numunelere işlenen ortalama su yükseklikleri.	43
4.5: C4500 kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.	48
4.6: C4500 kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.	49
4.7: C4500 kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.	49
4.8: C4520K kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.	50
4.9: C4520K kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.	50
4.10: C4520K kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.	51
4.11: C4520K kodlu numunenin 56 günlük klorür derinliği sonuçları.	51
4.12: C5500 kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.	56
4.13: C5500 kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.	56
4.14: C5500 kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.	57
4.15: C5500 kodlu numunenin 56 günlük klorür derinliği sonuçları.	57
4.16: C5520K kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.	58

4.17: C5520K kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.	58
4.18: C5520K kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.	59
4.19: C5520K kodlu numunenin 28 gnlk klorr derinliği sonuçları.	59
4.20: C6500 kodlu numunenin 7 gnlk klorr derinliği sonuçları.	63
4.21: C6500 kodlu numunenin 14 gnlk klorr derinliği sonuçları.	64
4.22: C6500 kodlu numunenin 28 gnlk klorr derinliği sonuçları.	64
4.23: C6520K kodlu numunenin 7 gnlk klorr derinliği sonuçları.	65
4.24: C6520K kodlu numunenin 14 gnlk klorr derinliği sonuçları.	65
4.25: C6520K kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.	66
4.26: C6520K kodlu numunenin 56 günlük klorür derinliği sonuçları.	66
4.27: Tüm numunelerin 7 günlük klorür derinliği ortalamaları.	68
4.28: Tüm numunelerin 14 günlük klorür derinliği ortalamaları.	68
4.29: Tüm numunelerin 28 günlük klorür derinliği ortalamaları.	69
4.30: Tüm numunelerin yaklaşık 300 günlük klorür derinliği ortalamaları.	69
4.31: Ultrases geçiş süreleri ortalamaları.	70

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Cam tozunun fiziksel kompozisyonu.	10
2.2: Cam tozunun kimyasal kompozisyonu.	10
2.3: Betonun kıvam sınıfı ve çökme miktarının belirlenmesi.	28
3.1: Kullanılan agregalar için fiziksel özellikler.	30
3.2: Kullanılan agregaların karışım oranları.	31
3.3: Çimentonun ve cam tozunun fiziksel analiz sonuçları.	32
3.4: Çimentonun ve cam tozunun kimyasal analiz sonuçları.	32
3.5: 1 m ³ beton için gerekli olan malzeme miktarları.	34
4.1: Çökme değerleri.	35
4.2: Birim ağırlık ve yoğunluk sonuçları.	36
4.3: Yoğunluk, su emme, boşluk hacmi sonuçları.	41
4.4: Su geçirimsizlik sonuçları.	43
4.5: C4500 kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.	45
4.6: C4500 kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.	45
4.7: C4500 kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.	46
4.8: C4520K kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.	46
4.9: C4520K kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.	47
4.10: C4520K kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.	47
4.11: C4520K kodlu numunenin 56 günlük klorür derinliği sonuçları.	48
4.12: C5500 kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.	52
4.13: C5500 kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.	52
4.14: C5500 kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.	53
4.15: C5500 kodlu numunenin 56 günlük klorür derinliği sonuçları.	53
4.16: C5520K kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.	54
4.17: C5520K kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.	54
4.18: C5520K kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.	55
4.19: C5520K kodlu numunenin 56 günlük klorür derinliği sonuçları.	55
4.20: C6500 kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.	60
4.21: C6500 kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.	60
4.22: C6500 kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.	61

4.23: C6520K kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.	61
4.24: C6520K kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.	62
4.25: C6520K kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.	62
4.26: C6520K kodlu numunenin 56 günlük klorür derinliği sonuçları.	63
4.27: Kontrol numunelerinin yaklaşık 300 günlük klorür derinliği ortalamaları.	67
4.28: Ultrases geçiş süresi sonuçları.	70

1. GİRİŞ

Nesillerin gelecek yaşamlarını idame ettirebilmeleri açısından sürdürülebilirlik kavramı önemlidir. Sürdürülebilirlik enerjinin, bakım ve onarım maliyetlerinin, yapıyla ilgili sorunların, atık ve kirliliğin azaltılması dışında yapı malzemelerinin verimliliğinin, konforunun, dayanıklılığının ve esnekliğinin arttırılmasını da hedeflemektedir. Yapıda kullanılan malzemelerin belirli periyotlarda bakım-onarım gerektirmesi veya yenilenmesi, kullanıcıların yaşamlarının büyük bölümünü yapılarda geçirmesi insan sağlığı açısından önemlidir. Bu nedenle yapı malzemeleri sınırlı yerel kaynakların etkin bir şekilde kullanılmasına imkan veren, çevreye duyarlı, enerji tasarrufu sağlayan, ekonomik açıdan istenilen kriterleri yaşam döngüsü boyunca kaliteli bir şekilde karşılamalıdır. Geri dönüşüm malzemelerinin kullanılması sayılan bu kriterleri etkin bir şekilde karşılayacaktır. Geri dönüşüm malzemelerinden cam yapı ve inşaat sektöründe sunduğu renk, doku ve biçim alternatifleri açısından tercih edilen bağlayıcı bir yapı malzemesidir. Cam mikron seviyesinde öğütülmekle tekrardan kullanım özelliği bulmaktadır. Kimyasal özellik bakımından cam ve çimento birbirlerine benzer özellik göstermektedir. Bu sayede çimentonun gerçekleştirdiği tepkimelerde yakın olmaktadır. Camın bahsedilen çimento ikamesi dışında agrega veya her ikisinin karışımı ikamesiyle ilgili çalışmalar da bulunmaktadır. Fakat çimento ikamesiyle yapılan çalışmalarda daha fazla olumlu sonuç elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde silika yönünden zengin olan camların hem çevreye karşı duyarlılığının olduğunu hem de dayanıklılık parametrelerine olumlu yönde katkısı sağladığını görmekteyiz.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Cam tozu kullanımı beton teknolojisinde son dönemlerde önemli bir yer tutmuştur. Betonda cam tozunun etkin oranlarda yer değiştirilmesi beton performansı açısından önem arz etmektedir.

Betonda cam tozunun kullanım amacı daha çevreci, ekonomik ve aynı zamanda enerji tasarrufu sağlayan betonlar üretilerek çok yönlü katkılar sağlamaktır.

Bu tez kapsamında ikinci bölümde betonda kullanılan puzolanik malzemelerin özellikleriyle araştırmacıların yapmış oldukları çalışmaların sonuçları (cam tozuyla ilgili kısımlar ayrıntılı olmak üzere), k-etkinlik değeriyle ilgili hesaplamaların nasıl yapılacağı, çalışmada yapılmış olan taze beton ve dayanıklılık deneylerinin literatür bilgisine yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ve özellikleriyle ilgili bilgiler, dördüncü bölümde deneysel sonuçlara ait veriler sunulurken kısaca yorumlamalar yapılmış ve en son bölümde (beşinci bölüm) yorumların en genel hali yazılarak çalışma tamamlanmıştır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Puzolanlar ve Puzolanik Aktivite

Betonda kimyasal katkıların dışında kullanılan mineral katkıların diğer bir deyişle puzolanların kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri yoktur. Ancak puzolanların silis bileşeni yüksek olduğundan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği kazanır [Erdogan, 2013]. Reaksiyonla bağlayıcılık özelliği kazanma durumu "puzolanik aktivite" olarak adlandırılır ve bu koşul ASTM D 6158 ve TS EN 450/197-1 standartlarında tanımlıdır.

TS EN 196-2 standartında belirtilen ve çimento ikamesi olarak kullanılacak puzolanlar için birincil şart reaktif silis içeriğinin en az %25 olmasıdır. İkincil şart ise puzolanik aktivite indeksidir. Bu yöntemin hesaplanması, belirlenen oranlarda çimento ikamesi olarak puzolan katılarak üretilen betonların basınç dayanımı ile yalnızca çimentodan üretilen (puzolan katılmamış) betonların basınç dayanımına oranının eş değer puzolan türlerine göre kıyaslamasıyla yapılmaktadır.

2.2. Puzolanların Betonda Kullanım Amaçları

Taze betonun işlenebilirliğini arttırmak, terleme ve segregasyonunu azaltmak, hidratasyon ısını düşürmek; sertleşmiş betonun mekanik özelliklerinden basınç, eğilme, yarmada çekme dayanımı ile dayanıklılık özelliklerinden poroziteyi, su geçirimsizliğini, kuruma rötresini, genleşmeleri azaltmak, donma çözünme, asit, sülfat, klorür direncini arttırmak ve daha ekonomik bir beton amacıyla kullanılır [Erdogan, 2013].

2.3. Puzolan Çeşitleri

Elde edildikleri kaynaklara göre puzolanları üç grupta toplayabilmek mümkündür.

- Doğal malzemeler (volkanik küller, traslar, diatomlu topraklar)
- Beton üretimi ile doğrudan ilgili olmayan ve endüstri kolunda yan ürün olarak elde edilen malzemeler (uçucu küller, silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu)
- Isıl işlem uygulanmış olan malzemeler (pişirilmiş kil, pişirilmiş şeyl) [Erdogan, 2013].

2.3.1. Doğal Puzolanlar

Doğal olarak bulunan volkanik kaynaklı tortul kayalardan oluşmuş malzemelere denilmektedir. Bu sınıfa volkanik küller, tüfler, camlar dahil edilmektedir. Bunların dışında killer, şeyller, diatomlu topraklarda doğal puzolan kategorisine girmekte ve katkılı çimento üretiminde kullanılmaktadır [Erdogan, 2013].

2.3.2. Yapay Puzolanlar

Termik santrallerden çıkan ve puzolanik özellik gösteren malzemelerdir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, mermer tozu, cam tozu örnek olarak verilebilir. Yapay puzolanlar kalsiyum hidroksitle karıştırılarak, katkılı çimento üretiminde veya beton karışıma ilave edilerek kullanılır [Erdogan, 2013].

2.3.2.1. Uçucu kül

Pulverize kömürün yakılmasından elde edilen çok ince daneli bir mineral katkı maddesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Fiziksel olarak amorf ve küresel yapıya sahip olan uçucu küller 1-150 μm arasında dane boyutu ve ortalama 2,4 g/cm^3 yoğunluğa sahiptir. Kimyasal olarak ise yüksek miktarda SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi oksitlerden oluşur. Kendi başına bağlayıcılık özelliği yoktur. Bağlayıcılık özelliğini çimentodaki

Ca(OH)_2 ile tepkimesiyle kazanır. Uçucu kül beton endüstrisinde çimento veya kum yerine kullanılabilir. Çimento üretimi sırasında klinkere katılıp öğütülerek uçucu küllü çimento olarak da değerlendirilebilir. Günümüzde portland çimentosu kullanıldığından portland uçucu küllü çimentoların kullanımı yaygın değildir. Bunun nedeni uçucu kül miktarının sınırlı olması, maliyet ve tedarik etme de yaşanan zorluklardandır [Engin, 2005].

Yapılan çalışmalarda puzolanik özelliğinden dolayı uçucu kül kullanılarak üretilen betonlarda dayanım ve dayanıklılık parametrelerinde artış gözlemlenmiştir [Gunasekara et al. 2020], [Riefler et al. 2017], [Maejier et al., 2020].

Çimento yerine kullanılan uçucu külün olumsuz özelliklerini sınırlandırmak adına %15-25 arasında kullanılması tavsiye edilmiştir. Bu oranlarda kullanılarak hazırlanan taze betonlarda işlenebilirliğin, sertleşmiş betonlarda ise basınç, çekme ve eğilme dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir [Canbaz ve Topçu, 2001], [Khan and Ali, 2019], [Krithika and Kumar, 2020].

Çimentodan daha ince olması sayesinde betonda %30 oranında uçucu kül kullanılması geçirgenliği azaltmıştır. Uçucu kül kullanımında öğütme süresinin karbonatlaşma derinliğini etkilemediği, kullanılan uçucu kül miktarının artmasına bağlı olarak karbonatlaşma derinliğinin arttığı ve aşınma miktarının 28. günde en fazla olduğu yapılan çalışmalar sonucunda görülmüştür [Şahin vd., 2019].

2.3.2.2. Silis dumanı

Kuarsitin kömür ve odun parçacıklarına indirgenmesiyle elde edilen çok ince daneli bir mineral katkı maddesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Fiziksel olarak kristalize olmayan amorf silisler 0,1 μm dane boyutu ve 2,2-2,3 g/cm^3 yoğunluğa, 240-300 kg/m^3 gevşek birim ağırlığa sahiptir. Kimyasal olarak ise yüksek miktarda SiO_2 (%85-98) ve ikinci bileşen Fe_2O_3 oksitinden oluşur.

Çimentolu ortamda bulunduğu en önemli görevi, C_2S ve C_3S hidrasyonları sonucu oluşan Ca(OH)_2 'i bağlayarak yeni bir C-S-H jeli meydana getirmektir. Oluşan bu jelin yoğunluğu az, geçirimsizliği fazladır. Böylece silis dumanı taneleri, çok sayıda küçük Ca(OH)_2 kristallerinin oluşmasına yardımcı olabilmektedir. Silis dumanı kullanımında uygun oranlarda akışkanlaştırıcı katkı kullanılması, çimento taneleri

arasındaki boşluklarda suyun daha yoğun bir çimento hamuru meydana getirebilmektedir.

Yapılan çalışmalar silis dumanı kullanılarak üretilen betonların (hacimce/ağırlıkça) çökme değerlerinde ve hidrasyon ısılarında artış, dayanım (basınç, eğilme, çekme) [Bagheri et al., 2012], [Mehta and Ashish, 2020] ve dayanıklılık (donma-çözünme, sülfat ataklarında azalma) [Wang et al., 2017] parametrelerinde artış olduğunu göstermiştir. Fakat çalışmalar silis dumanının ince bir malzeme olması nedeniyle terleme miktarını azalttığını bu yüzden betonda yüzeyin düzeltilebilmesini zorlaştırdığını göstermektedir. Silis dumanının fazla miktar da kullanımı plastik büzülme çatlaklarına yol açmaktadır. Ayrıca karışım suyuna ihtiyacı fazla olduğundan su azaltıcı katkılarla birlikte kullanılmalıdır [Erdogan, 2013]. İncelenen bu çalışma sonuçları değerlendirildiğinde silis dumanı katılarak elde edilen betonlarda olumsuz etkileri sınırlandırmak adına %5-15 arasında kullanılması tavsiye edilmiştir.

2.3.2.3. Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırınlarda, demir üretimi esnasında elde edilen endüstriyel bir yan ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. Fiziksel olarak amorf yapıya sahip yüksek fırın cürufu 2.88-2.94 g/cm³ arasında yoğunluğa sahiptir. ¹Kimyasal olarak ise CaO (%29-50), SiO₂ (%30-40), Al₂O₃ (%7-18) ve az miktarda da Fe₂O₃ ve diğer bileşiklerden (MgO, MnO, S) oluşmaktadır.

Yapılan çalışmalarda yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen betonlarda dayanım (basınç, eğilme ve çekme) ve dayanıklılık parametrelerinde (su emme ve geçirimsilikte azalma) [Aghaeipour and Madhkhani, 2017], [Gholampour and Ozbakkaloglu, 2017] (sülfat ve asit direncinde artış) [Majhi and Nayak, 2019] iyileşme gözlemlenmiştir. Aynı şekilde klorür penetrasyon derinliği erken yaşlarda yüksek olmasına rağmen ileriki yaşlarda bu derinlik azalmıştır [Bagheri et al., 2012]. %60'a kadar kullanılan yüksek fırın cürufu ultrases geçiş hızı değerlerini arttırmış ve donma-çözünme etkilerini de azaltmıştır [Nicula et al., 2020]. Erken yaşlardaki betonun kontrol betonuna göre dayanımı düşük olmasına rağmen ileriki yaşlarda dayanım

¹ Kimyasal bileşen yüzdelerinde Turhan Erdoğan'ın ABD ve Kanada ülkeleri için verdiği değerler referans alınmıştır.

artmıştır [Mehta et al., 2020]. Fakat yüksek fırın cürufunun artışı işlenebilirliği azaltmıştır [Gholampour and Ozbakkaloglu, 2017]. Soğuk havalarda yüksek fırın cürufunun kullanımı betonun daha geç priz almasına ve dayanımda azalmaya neden olmaktadır. Sonuçlar değerlendirildiğinde yapılan deneysel araştırmalar olumsuz etkilerin sınırlandırılması adına betonda (hacimce/ağırlıkça) yüksek fırın cürufunun %30'a kadar kullanılması tavsiye etmektedir [Jiang et al., 2020], [Bagheri et al., 2012].

2.3.2.4. Mermer tozu

Mermer tozu fiziksel olarak 75-150 µm tane boyutuna, 2.7 g/cm³ yoğunluğa, 2.5-2.78 g/cm³ özgül ağırlığına ve 332-335 m²/kg incelik değerine sahip bağlayıcı bir malzemedir. Kimyasal olarak ise yüksek oranlarda kalsiyum oksit (%30-65), kısmi oranlarda silika (%1,4-23,5) ve az miktarda magnezyum, alümina, demir, sodyum, potasyum oksit ve diğer bileşiklerden (çinko, klor, manganez oksit, titanyum dioksit) oluşur [Khodabakhshian et al., 2018], [Rana et al., 2015], [Varadharajan et al., 2020]. Yapılan çalışmalarda betonda atık mermer tozu oranının artması işlenebilirliği azaltmıştır [Rana et al., 2015], [Prošek et al., 2020], [Varadharajan, 2020]. Mermer tozunun %20 oranından daha fazla kullanılması priz süresini (başlangıç ve bitiş zamanı) uzatmış ve hidratasyon ısını düşürmüştür [Prošek et al., 2020]. Betonda atık mermer tozu oranının hacimce/ağırlıkça (%15'e kadar) arttırılması, düşük su/çimento oranlarında ve tüm kürlenme yaşlarında basınç, çekme ve eğilme dayanımlarını arttırmıştır [Aliabdo et al., 2014]. Betonda mermer tozunun (%20'ye kadar) ilavesi, düşük su/çimento oranlarında su emme [Khodabakhshian et al., 2018], geçirgenlik [Rana et al., 2015], karbonatlaşma ve klorür derinliği [Rana et al., 2015], porozite [Prošek et al., 2020], rötreyi azaltmış, sülfat [Khodabakhshian et al., 2018] direncini arttırmıştır. Dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin yanı sıra yapılan araştırmalar mermer tozu kullanımının CO₂ emisyonunu, ozon tabakası delinme riskini azalttığı, enerji ve maliyet tasarrufu ile tarımsal arazilerin verimli kullanılmasını sağladığı diğer bir deyişle çevre ve ekonomik iyileşmenin önünü açabileceğini ortaya koymuştur [Varadharajan, 2020].

2.3.2.5. Pirinç kabuğu külü

Pirinç kabuğu külü fiziksel olarak 3-6 μm parçacık boyutuna, yaklaşık 2 g/cm^3 özgül ağırlığa, 2-37 m^2/g yüzey alanına sahip yüksek oranda SiO_2 (yaklaşık %85) içeren bağlayıcı bir malzemedir [Siddika et al., 2020]. İnce olması nedeniyle yüzey alanındaki artış pozolanik reaktivite indeksi için önemlidir. Pirinç kabuğu külü ile yapılan çalışmalarda ağırlıkça %10-30 oranında kullanılması mekanik özelliklerden basınç, çekme, eğilme [Alex et al., 2016], elastisite modülünde artma, dayanıklılık özelliklerinden permeabilite, su geçirgenlik, klorür, karbonatlaşma penetrasyonu, ASR genleşmelerinde azalma, sülfat direncinde artma [Siddika et al., 2020] ile termal dirençte azalma [Ferraro and Nanni, 2012] görüldüğünü fakat işlenebilirliği azalttığını ortaya koymuştur [Varadharajan et al., 2020]. Dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin yanı sıra sadece pirinç kabuğu külü katılarak üretilen betonlar ile bu külün mermer tozu ile birlikte kullanımının CO_2 emisyonu ve ozon tabakası delinme riskini büyük ölçüde azalttığı yapılan çalışmalar ve ÇED raporlarında görülmüştür [Varadharajan et al., 2020].

2.4. Camın Betonda Kullanımı

Cam yapısal olarak SiO_2 , Na_2O ve CaO bileşenlerinden oluşmaktadır. Atık camlar geri dönüşüm firmalarından tesislere getirildikten sonra belirli kullanım alanları için ayrılmaktadır. Atık cam betona üç şekilde katılabilir. Agregası ikamesi (iri ve ince), çimento değişimi [Kavas, Çelik ve Evcin, 2004] veya hem ince agregası hem de çimento ikamesi yani kombinasyonunun olduğu toplu değiştirme yöntemidir. Çalışmalarda agregası ikamesiyle kullanım çimento ve/veya ince malzemeyle kullanımdan daha yaygındır. Fakat atık cam agregası ikamesi olarak kullanılacaksa ASR özellikleri hesaba katılmalıdır [Du and Tan, 2014], [Shao et al., 2000]. Atık camın daha büyük boyutlarda olmasının ASR reaksiyonuyla genleşme riskini arttıracığı bilinmelidir [Yüksel vd., 2017]. Diğer bir yandan camın rengi de ASR reaksiyonu için önemlidir. Renkli camların (özellikle yeşil) beyaz cama göre SiO_2 içeriğinin yüksek olması kütle ve dayanım kayıplarının azalmasını dolayısıyla ASR genleşme riskinin de azalmasıyla birlikte bu camlar kullanılarak elde edilen betonların hem dayanım hem de dayanıklılık performanslarında iyileşme sağlanabilir.

2.4.1. Cam Tozu

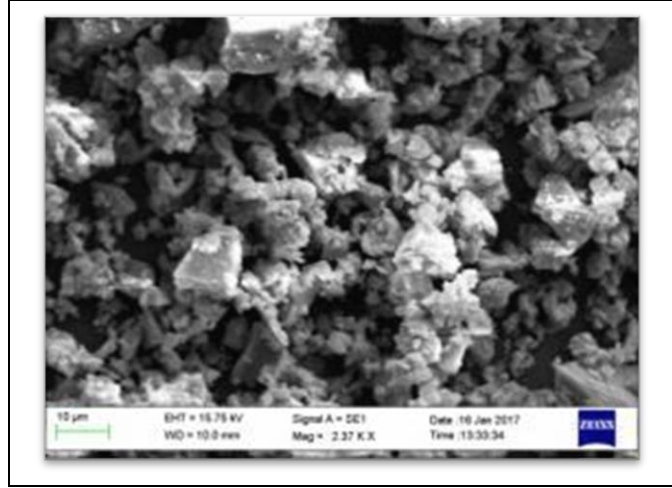
Cam tozu (Şekil 2.1) atık camların toplanması, ayrıştırılması ve elenmesi aşamalarının ardından belirli proseslerden geçirildikten sonra mikron boyutlarına getirilerek elde edilen yoğunluğu $2,6 \text{ g/cm}^3$ olan amorf yapıya ve yüksek derece silis içeriğine sahip bir yapı malzemesidir. Düşük iletkenlik ve nem emici özelliğine ek olarak yüksek sertliğe de sahiptir. Bu tozun bağlayıcılık özelliği gösterebilmesi için tanecik boyutunun 0.075 mm 'den daha az olması gerekmektedir. Bu mertebelerde bulunan toz elekten elenerek kullanıma hazır hale getirilmekte ve bu haliyle çimento yerine alternatif bir bağlayıcı olarak kullanılabilir.



Şekil 2.1: Cam tozu.

2.4.2. Cam Tozunun Fiziksel Kompozisyonu

Çimentodan daha düşük özgül ağırlığa ve dökme yoğunluğuna sahip cam tozunun genel bilgileri (Tablo 2.1) ve SEM görüntüsü (Şekil 2.2) verilmiştir.



Şekil 2.2: Cam tozunun SEM görüntüsü.

Tablo 2.1: Cam tozunun fiziksel kompozisyonu.

Özgül Ağırlığı	2,45 g/cm ³
Dökme Yoğunluğu	1,5 g/cm ³

2.4.3. Cam Tozunun Kimyasal Kompozisyonu

Cam tozunun kimyasal özelliklerine ait bilgiler (Tablo 2.2) verilmiştir. Cam tozunun yüksek oranda SiO₂ ve kısmi oranda CaO bileşenleri içerdiği görülmektedir.

Tablo 2.2: Cam tozunun kimyasal kompozisyonu.

Bileşenler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	K ₂ O
%	71,79	2,23	0,28	10,51	0,84	13,83	0,1	0,01	0,17

2.4.4. Cam Tozunun Puzolanik Reaktivitesi

SiO₂ içeriği bakımından yüksek olan atık camın çimento ile yer değiştirmesi yani çimento miktarında azalma puzolanik reaktivite indeksini etkiler. Atık camın kalsiyum hidroksitle reaksiyona girmesi ve çimento hidratlarını tüketmesi sonucunda gözenek yapısı kalsiyum silikat hidrat jelleriyle dolmakta ve daha yoğun bir matris yapısı oluşmaktadır. Camın 45- 75 µm boyutlarında öğütülerek cam tozu haline getirilmesi ve %30' a kadar çimento yerine kullanılması puzolanik reaktivite indeksini artırır

[Tamanna et al., 2013]. Diğer bir ifadeyle cam tozunun inceliğinin artması puzolanik reaktivitesini dolayısıyla dayanım indeksini de artıracaktır [Shi et al., 2005].

2.4.5. Cam Tozunun Taze Beton Özelliklerine Etkisi

Cam tozunun taze beton üzerine etkileri konusunda yapılan araştırmalar cam tozunun kullanım oranının artmasıyla kıvamda ve yoğunlukta azalmanın olduğu yönündedir [Raju and Kumar, 2014]. Cam tozunun inceliğinin fazla olması dolayısıyla yüzey alanındaki artış bu sonucu etkilemiştir. Çökmenin azalmasına bağlı olarak cam tozu kullanıldığında işlenebilirlik ve yerleştirme kaybı olmaması için mutlaka hiper akışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapılmalıdır.

Çökme değerlerinde artışın görüldüğü çalışmalarda hidrate olan çimento miktarının azalması daha az su gereksinimi gerektirir ve kıvamı da artırır [Elaqra et al., 2019], [Rahma et al., 2017]. Cam tozunun çimento ile karşılaştırıldığında saydamlık, pürüzsüz yüzey dokusu, düşük su emme ve spesifik yüzeyine sahip olması da çökmeyi arttıran diğer etkenlerdendir.

2.4.6. Cam Tozunun Mekanik Özelliklere Etkisi

Cam tozunun sertleşmiş beton üzerine etkileri konusunda yapılan araştırmalar neticesinde basınç ve eğilme dayanımlarında ilk kazanımda (7 gün) azalma gerçekleşirken nihai dayanımda artma olmuştur. İleriki yaşlarda puzolanik etki reaksiyonun hızlanmasıyla ara yüzey geçişinin yoğunlaştığı görülmüştür [Shi et al., 2005]. Çalışmalarda 28, 56, 91 günlük basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde cam tozunun hacimce/ağırlıkça %0-20 oranlarında çimento/agrega ikamesi olarak kullanılmasının basınç dayanımına katkı sağladığı gözlemlenmiştir [Mageswari and Vidivelli, 2010], [Meena and Singh, 2012], [Raju and Kumar, 2014], [Rodier and Savastano, 2018], [Sharma and Sangamnerkar, 2015], [Shi et al., 2005], [Uzun vd., 2018].

Bazı çalışmalarda ise bu oranlardan daha yüksek (%20-60) cam tozu kullanımıyla da basınç dayanımları artmıştır [Du and Tan, 2014], [Elaqra et al., 2019], [Pachideh et al., 2020], [Vijayakumar et al., 2013]. Çalışmalarda sadece basınç dayanımlarında artış değil yarmada çekme ve eğilme dayanımlarında da artma

görülmüştür [Pachideh et al., 2020], [Rodier and Savastano, 2018]. Eğilme dayanımlarındaki artış cam tozunun arayüz bölgesini geliştirmesiyle açıklanabilir. Kullanılan cam tozu tanelerinin inceliği mekanik etkilerle oluşan çatlakların ilerleme hızını da yavaşlatır. Cam tozunun mekanik özelliklere katkısı çimentoya göre daha iyi reaktiflik göstermesi, daha ince taneli bir malzeme olması, daha fazla yüzey alanına sahip olması sayesinde gerçekleşmektedir. Fakat bazı çalışmalarda %20-25'e kadar cam tozu kullanımının başka bir bağlayıcı malzeme ilave edilmesi [Madandoust and Ghavidel, 2013]/edilmemesi durumunda ilk yaşlarda (7. ve 28. gün) basınç dayanımını azaltmıştır ve bu azalma parçacık boyutu büyük olanda daha fazla olmuştur [Islam et al., 2017], [Patel et al., 2019]. Dayanımda artış ilerleyen (91. ve 180. gün) yaşlarda görülmüştür. Bunun nedeni ileriki yaşlarda cam tozunun puzolanik reaksiyon rejiminin daha yüksek olması, ilk yaşlarda ise çimentonun azalmasına bağlı olarak reaksiyonun yavaşlamasıyla açıklanabilir.

2.4.7. Cam Tozunun Dayanıklılık Özelliklerine Etkisi

Cam tozu içeren betonların dayanıklılık özelliklerine etkisi konusunda yapılan araştırmalar neticesinde betonda düşük porozite ve nem içeriği [Mageswari and Vidivelli, 2010], [Meena and Singh, 2012], daha düşük absorbiyon oranları (yüzey suyunu tutma özelliği) [Madandoust and Ghavidel, 2013], [Rodier and Savastano, 2018] ASR ve klorür derinliğinde azalma, sülfata karşı direncin artması görüldüğünden dayanıklılık parametrelerine olumlu etki sağladığı söylenebilir.

İncelik dışında puzolanik aktiviteyi arttıran bir diğer parametrenin de kür sıcaklığı olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalarda kür sıcaklığı arttıkça puzolanik reaktivite indeksi artmıştır [Shi et al., 2005]. İnceliğin fazla olması ve kimyasal katkı kullanılmasıyla azalan su ihtiyacı ve artan hidrat ürünleri sayesinde su absorpsiyonunu ve kuruma rötresini azaltmıştır [Elaqra et al., 2019], [Pachideh et al., 2020], [Patel et al., 2019].

Yapılan bu çalışmalara ilaveten betonda kullanılan cam tozunun mikroyapıda yoğunlaşma, iyonların taşınması yani alkali azalması sayesinde ASR reaksiyonunu azaltmıştır [Kamali and Ghahremaninezhad, 2015], [Matos and Sousa-Coutinho, 2012], [Shi et al., 2005]. Alkali silika reaksiyonu ile ilişkilendirilen bir diğer parametrede elektriksel dirençtir. Bu konuda yapılan araştırmalar betonda kullanılan

cam tozunun azalan boşluk nedeniyle klorür penetrasyonunda azalma ve elektriksel dirençte artma sağladığını göstermiştir [Kamali and Ghahremaninezhad, 2015]. Betonda korozyona karşı direnç artan cam tozunun pH değerlerini arttırmasıyla mümkündür [Raju and Kumar, 2014]. pH değerindeki artış cam tozu miktarının artmasının yanı sıra camın rengiyle de ilişkilendirilmektedir. Yeşil cam beyaz cama göre kalsiyum alümina bakımından daha zengin olup silika boşlukta kolay bir şekilde çözünemez [Mirzahosseini and Riding, 2014]. Düşük sıcaklıklarda CaCO_3 çözünmesi sınırlı ve reaktivite indeksinin de yüksek olması sadece dayanıklılık değil aynı zamanda dayanım değerleri de yüksek olmaktadır [Redden and Neithalath, 2014].

2.4.8. Cam Tozunun Çevresel ve Ekonomik Faydası

Sürdürülebilirlik kavramı, son yıllarda beton endüstrisinde önemli bir yer tutmuştur. Kullanılan çimento miktarının azaltılması, geri dönüştürülmüş agrega kullanılması, beton karışım suyuna arıtılmış su ilave edilmesi gibi seçeneklerle beton sektöründe sürdürülebilirliğin sağlanması hedeflenmektedir. Olumsuz etkilerin sosyal sonuçları ve alternatif çözümleri de dahil olmak üzere çevre üzerindeki kalıcı veya geçici potansiyel etkilerinin, diğer bir deyişle çevresel etki değerlendirmesinin analiz edilmesi gerekmektedir. Çevresel etki değerlendirmesi için ilk olarak yaşam döngüsü etki analizi yapılır. Bir ürünün hammadde çıkarımından nihai bertarafına kadar üretimiyle ilgili çevresel etkilerinin değerlendirilmesine yaşam döngüsü etki analizi denir. Yaşam döngüsünün tamamını kapsayan bu kavram, beşikten mezara yaklaşım olarak da adlandırılır [Web 2]. Betonla ilgili yaşam döngüsü çalışmaları değerlendirildiğinde, üretim, nakliye, yerleştirme, CO_2 emisyonu [Chen et al., 2010], [Gutiérrez et al., 2017] enerji tüketimi, maliyet [Rashad, 2014] ve daha birçok faktör açısından olumsuz olduğu bilinmektedir. Endüstriyel atıklarının betonda kullanılması, bu etkileri sınırlandırmak ve olumlu etki yaratmak için sürdürülebilir ve akıllıca bir çözüm haline gelmektedir. Bu noktada endüstriyel atıklardan biri olan camın kullanılması doğal malzeme harcanmasını, CO_2 salınımını, enerji tüketimini azaltarak [Rodier and Savastano, 2018] çevreyi korur. Ayrıca düzenli depolanma ve defalarca geri dönüştürülebilme imkanlarından dolayı da maliyeti azaltır [Tamanna et al., 2013]. Camın mikron boyutunda öğütülerek cam tozu haline getirilerek betonda kullanılması sadece mekanik ve dayanıklılık özelliklerini değil aynı zamanda camın sağladığı

çevreci ve ekonomik faydalardan dolayı da kullanımını mümkün kılmaktadır [Uzun vd., 2018].

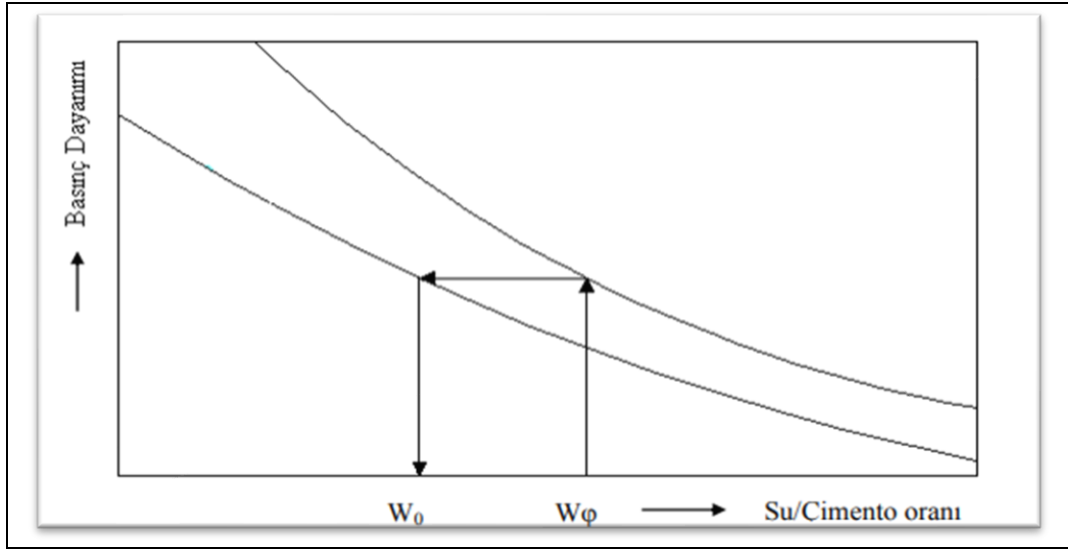
2.5. k-Etkinlik Değerinin Belirlenmesi

k-etkinlik değeri çimentoya katılan katkı malzemelerinin kontrol betonuna göre etkinliğinin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. k-etkinlik değerini etkileyen birçok faktör vardır. Bunlar, mineral katkıların fiziksel ve kimyasal özellikleri, mineral katkıların eklenme miktarı, çimento tipi, su/çimento oranı, kür koşulları, mineral katkı /çimento oranı, sıcaklık gibi faktörlerdir.

k-etkinlik değerinin hesaplanması için kontrol betonuyla mineral katkı eklenen betonların basınç dayanımı- su/çimento ilişkisi grafikleri elde edilir. Kontrol betonu ve mineral katkılı beton dayanımlarının diyagramlarının kontrol betonu diyagramlarına çakışması sağlanarak k-etkinlik değeri bulunmaktadır [Anuk, 2004; Kocabıyık, 2010].

k-etkinlik değerinin hesabı için üç çeşit grafiksel metot bulunmaktadır. Bu metotların hepsinde su/çimento oranı- basınç dayanımı arasındaki ilişkiden k-etkinlik değeri hesaplanmaktadır.

- Lineer İlişki Metodu: Bu metodu uygulayabilmek için en az iki kontrol betonu karışımı ve eklenen mineral katkılı beton karışımı olması gerekmektedir. Bu ilişki (Şekil 2.3) ve kullanılacak denklemler gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Basınç dayanımı & su/çimento arasındaki ilişki.

- *Hesaplama:*
- W_0 : Kontrol betonunun su/çimento oranı;
- W_ϕ : Mineral katkılı betonun su/çimento oranı;
- β_{D0} : Kontrol betonunun basınç dayanımı;
- β_{DF} : Mineral katkılı betonun basınç dayanımı ;
- a_0, a_f, b_0, b_f : Dayanım & su çimento arasındaki lineer parametrelerdir.

Denklem 1

$$W_0 = W_\phi / (1 + k\phi) \quad (2.1)$$

Denklem 2

$$k = [(W_\phi W_0) - 1] * (1/\phi) \quad (2.2)$$

Denklem 3

$$\beta_{D0} = a_0 - b_f w_0 \quad (2.3)$$

Denklem 4

$$\beta_{DF} = a_f - b_f w_\phi \quad (2.4)$$

Burada $\beta_{DF} = \beta_{D0}$ eşitliğini uygulayarak ve (2.2) denklemi kullanılarak k değeri çekilirse aşağıdaki denklem elde edilir;

Denklem 5

$$k = [W_0 b_0 / a_0 - (a f - b f_w \varphi) - 1] * 1 / \varphi \quad (2.5)$$

- Karşıt ilişki metodu: Lineer ilişki metoduna benzer olarak basınç dayanımı-su/çimento oranı ilişkisinden yararlanılarak ve aşağıdaki denklemler kullanılarak yapılır.

Denklem 6

$$f_{c1} = A + B/W_0 \quad (2.6)$$

Denklem 7

$$f_{c2} = P + Z/W \varphi \quad (2.7)$$

- Eşit işlenebilme metodu: Bu metodu uygulayabilmek için kontrol betonlarıyla mineral katkı eklenen betonların eşit çökmeye sahip olması gerekir. Su ve akışkanlaştırıcı eklenerek eşit çökme sağlanır. Diğer metotlarda olduğu gibi basınç dayanımı-su/çimento oranı grafikleri çizilerek denklemlerden k -etkinlik değeri bulunur.

Mineral katkıların betonda hangi oranda kullanılacağı deneye başlamadan belirlenmelidir. Uygunluk açısından çimento miktarı, su/çimento oranı hesaplamaları incelenmelidir. Uçucu kül ve silis dumanı için k -değeri belirlenmişse bu miktarın kontrolü yapılmalıdır.² TS EN 206-1 standartında cam tozu için uygun bir k -etkinlik değeri kavramı tanımlanmamaktadır. Çalışmanın ilk kısmını lineer ilişki metodu kullanılarak k - etkinlik değerinin belirlenmesi oluşturmaktadır.

- Diğer mineral katkılar için uygunluk;
- $(\text{Uçucu kül} / \text{Çimento}) \leq 0,33$ (kütlece)

² TS EN 206-1 standartına göre XA2 ve XA3 etki sınıflarında, zararlı maddenin sülfat olması durumunda, sülfata dayanıklı CEM I çimento ile birlikte uçucu kül ihtiva eden betonlarda k - değeri kavramının kullanımı önerilmez.

- TS EN 197 standartına göre uçucu kül için alınacak k değerleri;
- CEM I 32,5 için $k = 0,2$
- CEM I 42,5 ve daha yüksek sınıf için $k = 0,4$
- $(\text{Silis dumanı} / \text{Çimento}) \leq 0,11$ (kütlece)
- TS EN 197 standartına göre silis dumanı için alınacak k değerleri;
- Su/çimento oranı $\leq 0,45$ olarak belirlenmiş beton için $k = 2,0$
- Su/çimento oranı $> 0,45$ olarak belirlenmiş beton için $k = 2,0$ alınır, ancak XC ve XF etki sınıfları için bu değer kullanılmaz ve $k=1,0$ alınır.

2.6. Betonda Dayanıklılık

Yapı malzemelerinin ve yapıların işlevlerini kullanım ömürleri boyunca bozulmadan yerine getirmelerine durabilite, dayanıklılık veya kalıcılık adı verilmektedir. Betonda dayanımından sonra bakılan ikinci önemli faktördür. Betonun dayanıklılığı betonun boşluk yapısı ve dağılımıyla ilişkilidir. Betona etki eden dış etkenler (sülfat, asit, deniz suyu, karbonatlaşma, alkali-agrega reaksiyonu, çiçeklenme, donma-çözülme, beton yüzeyinde pullanma, aşınma, korozyon etkisi) beton matrisindeki boşluklar ve agrega-hamur ara yüzeyi aracılığıyla betona nüfuz etmekte ve dayanıklılığı olumsuz etkilemektedir.

Dayanıklılığı arttırmaya yönelik olarak su/çimento oranının azaltılması, uygun malzeme seçimi (çimento, agrega, kimyasal/mineral katkı), agrega gradasyonunun uygunluğu ve içerisinde inorganik malzeme barındırmaması, terlemeyi azaltıcı etkisinin bulunması, işlenebilirliğin ve kür koşullarının yeterliliğinin sağlanması ve betonda segragasyon oluşturmamasına dikkat edilmelidir [Erdogan, 2013].

2.6.1. Betonda Geçirimsizlik

Beton içerisindeki boşluklar, çimento hamuru ve agrega ara yüzeyindeki mikro çatlakların bir fonksiyonudur [Saran, 2007]. Sıkıştırma, hava, kapiler, jel boşlukları betondaki boşluklardandır. Betonda dayanıklılık açısından sürdürülebilirlik istendiğinden betonun boşluksuz ve geçirimsiz olması beklenir.

Beton üretimi sırasında kullanılan suyun bir kısmı hidratasyon bir kısmı işlenebilirlik içindir. Çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan C-S-H jelleri beton içerisinde kapiler (kılcal) boşlukları oluşturmaktadır [Erdogan, 2013]. Bu boşlukların fazla olması suyun girişini hızlandırır. Hidratasyon sonucunda oluşan jellerin hacimlerinin artması ile boşluklar artar ve bahsedilen dış etkenlerin beton içerisine geçişi kolaylaşır. Betonda bozulmalar (çatlama ve genleşmeler) meydana gelir. Betonda işlenebilirliğin sağlanması için her su ilavesi geçirgenliği negatif yönde etkilemektedir.

Geçirimliliği azaltmaya yönelik olarak su/çimento oranı, su geçirimsizlik katkısı, düzgün granülometri, iyi sıkıştırma, iyi kür, çatlaksız yapı oluşturmak gibi hafif etkiler ile özel tip çimento kullanımı gibi orta etkiler örnek olarak verilebilir. Bununla birlikte çevre dostu olması, dayanımı arttırması, hidratasyon ısını düşürmesi, serbest kireci bağlaması yönünden mineral katkıları da (uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, mermer, cam tozu vb.) kullanılmaktadır [Yazıcı, 2010].

2.6.2. Betonda Klor Etkisi

Bulunulan bölgelerdeki yapılara klorür geçişi iç veya dış kaynaklardan gerçekleşebilir. İç kaynaklara çimento, agrega veya katkı maddeleri; dış kaynaklara deniz suyu, buz çözücü tuzlar örnek olarak verilebilir. Dış kaynaklardan klorür geçişi iç kaynaklara göre daha yüksektir. Dış kaynaklardan betona geçen klor serbest halde bulunur ve serbest haldeki klor betonarme yapılarda donatı korozyonuna neden olur. Bu nedenle yapılara etki eden serbest klorürün varlığı bilinmelidir. Klorür varlığını betonun kalitesi ve çevresel şartlar etkiler. Örneğin deniz suyunun etkisi altında kalacak yapılarda su/çimento oranı düşük tutulmalıdır [Erdogan, 2013]. Klor konsantrasyonu yüzeyde en yüksekken artan derinlikle birlikte konsantrasyonu azalır [Web 3].

2.6.3. Betonda Alkali Silika Reaksiyonu

Dayanıklılık yönünden sertleşmiş betonları etkileyen en önemli unsurdan biri de alkali silika reaksiyonudur [Varol ve Türkmenoğlu, 2016]. Çimentodaki alkalilerle agregalardaki silisli malzemelerin arasındaki tepkimenin sonucu ortaya çıkan ve

betonda genleşmelere yol açan dayanım ve dayanıklılık problemlerinden biridir. Reaktif silika formu, çimentodan gelen yeterli miktardaki alkali, reaksiyona giren ürünlerin yoğunluğu, beton içerisindeki nem ve sıcaklık bu tepkimeyi tetikleyen faktörlerdendir.

ASR nedeniyle bir hasarın oluşmaması için tepkime mekanizmasının iyi bilinmesi gerekmektedir [Korkmaz, 2018]. Gereken tedbirler alınarak hasarların oluşması önlenabilir. Bu tedbirler düşük su/çimento oranı, mineral katkı kullanımı vb. olabilir. Bu şekilde geçirimsizliği azaltılan betonlarda nem ve alkali geçişinin zorlaştığı, böylelikle ASR genleşmelerinin azaldığı sonucu çıkartılabilmektedir [Çullu vd., 2010].

2.7. Dayanıklılık Deneyleri

2.7.1. Basınç Altında Su İşleme Derinliğinin Tayini

TS EN 12390-8 standartına göre bu deneyin uygulanabilmesi için öncelikle beton numunesi; küp, silindir veya prizma şeklinde olmalı, numunenin kenar uzunluğu veya çapı 150 mm'den daha küçük olmamalıdır. Deney aşamasında sertleşmiş beton numunesi tesviyelenmiş kısmına su basıncı uygulanmayacak şekilde deney cihazına yerleştirilir. Numuneye (72 ± 2) saat ve (500 ± 50) kPa su basıncı uygulanır. Deney bittikten sonra deney cihazından çıkartılan numunenin fazla suyu varsa yüzeyinden alınır. Numunenin incelenmesi esnasında test cihazına basınçlı su uygulanan kısım üstte olacak biçimde numune yerleştirilir. Yerleştirilen numune yüzeye dik ve ortasından ayrılacak şekilde bölünür. Test aşaması tamamlanan numune su işleme derinliği tespiti için kurutulur, ıslak alanın sınırları belirlenir. Deney alanı basınç uygulanan alan dahil olmak üzere, suyun işlediği en büyük derinlik ölçülerek milimetre cinsinden yazılır [İğdır Üniversitesi, Laboratuvar Dersi Deney Föyü, 2019].



Şekil 2.4: Su geçirimsizlik deneyi uygulanan küp numuneler.



Şekil 2.5: Su geçirimsizlik derinliği ölçülen numune.

2.7.2. Sertleşmiş Betonun Yoğunluğu Deneyi

TS EN 12390-7 ve ASTM C642 standartlarına göre sertleşmiş beton numunesinin mevcut, suya doygun, etüv kuru durumdaki kütle/su ile yer değiştirme (referans) metoduyla hacim verileri elde edilerek yoğunluk tayin edilir. Numunenin suya doygun durumuyla hacminin hesaplandığı referans metot geometrik şekle sahip betonlarda uygun olmakla beraber, bu formda olmayan betonlar için de kullanılabilen tek metottur. Normal koşullarda yoğunluğu belirlemek için numune bütün olarak (ilk haliyle) konulur. Fakat numunenin şekli ve büyüklüğü itibariyle tamamının konulmasının mümkün olmadığı durumlarda numune daha küçük parçalara ayrılarak yoğunluk hesabı yapılabilir.



Şekil 2.6: Yüzey kuru suya doygun kütle.



Şekil 2.7: Sudaki kütle.

- Hesaplama:
- A : Kuru kütle, g;
- B : Suya doymun kütle, g;
- C : Suya doymun ve kaynamış kütle, g;
- D : Sudaki Kütle, g;
- g_1 : yığın yoğunluğu g/cm^3 ;
- g_2 : görünür yoğunluk g/cm^3 ;
- r : su yoğunluğu $= 1 g/cm^3$;
- $(1 g/cm^3 = Mg/m^3)$

Denklem 8

$$\text{Su Emme(Suya Doygun): } (B - A) / A * 100 \% \quad (2.8)$$

Denklem 9

$$\text{Su Emme(Kaynamış) : } (C - A) / A * 100 \% \quad (2.9)$$

Denklem 10

$$\text{Kuru Yoğunluk: } A / (C - D) \text{ Mg/ m}^3 \quad (2.10)$$

Denklem 11

$$\text{Suya Doygun Yoğunluk: } B / (C - D) \text{ Mg/ m}^3 \quad (2.11)$$

Denklem 12

$$\text{Kaynamış Yoğunluk: } C / (C - D) \text{ Mg/m}^3 \quad (2.12)$$

Denklem 13

$$\text{Görünen Yoğunluk: } A / (A - D) \text{ Mg/m}^3 \quad (2.13)$$

Denklem 14

$$\text{Suyun Geçtiği Boşluk Hacmi: } (C - A) / (C - D) * 100 \% \quad (2.14)$$

2.7.3. Kolorimetrik Deney Yöntemi

AgNO₃ püskürtme yöntemi belirli bir standartı olmayan fakat pratik olması sebebiyle hızlandırılmış klorür geçirimsiliği deneyi olarak çalışmalarda kullanılmaktadır. AgNO₃ püskürtme yöntemi çimento esaslı malzemelerde serbest klorürlerin varlığını belirlemek için kullanılan kalitatif bir yöntemdir. Bu yöntemin ana uygulaması, klorür penetrasyonunun derinliğini ölçmektir. Silindir beton numunesi/numuneleri 0.002-0.05 mol/l su kütlesinin %3'ü NaCl çözeltisinde deney süresi (7-365 gün) gelene kadar bekletilir. Deney süresi gelen silindir numune/numuneler cihazda yarılarak üzerine/ üzerlerine 0.1 M (mol/l) AgNO₃ çözeltisi püskürtülmek suretiyle uygulanır. Gümüş nitrat çözeltisi beton yüzeyine uygulandığında fotokimyasal bir reaksiyon meydana gelir. Uygulama sonucunda farklı iki renk gözlemlenir. Birinci renk AgCl çökmesinin oluşturduğu beyazımsı kısımdır. İkinci renk çökmenin olmadığı yani klorür içermeyen kahverengi kısma karşılık gelir [He et al., 2011, 2012], [Yuan et al., 2008]. Numunenin/numunelerin kahverengi kısmına/kısımlarına gelen yerler üst ve alt kısmından 4 mm boşluk bırakıldıktan sonrasağdan ve soldanher 2 mm'de bir değer okunarak yapılır ve sonuçların ortalaması alınır. Agregalar nedeniyle okuma hatası varsa bu ölçüm ihmal edilerek geçerli olanlar yazılır.



Şekil 2.8: %3.5 NaCl çözeltisinde bekletilen numuneler.



Şekil 2.9: 0.1 M AgNO₃ çözeltisi uygulanan numune.

Su/çimento oranı difüzyon katsayısını etkilemektedir. Su/çimento oranı arttıkça (0.50 ve yukarısı) difüzyon katsayısı da artar. Bu uygulama beton pH'ının 11-13 olduğu yani renk değişimin belirgin olduğu pH değerlerinde yapılmalıdır. pH değerinin 10'un altına düşmesi durumunda alkalinite azalacak ve renk değişimi gözlemlenemeyeceğinden sonuçlar doğru olmayacaktır. Böyle bir durum söz konusu olduğu klorür derinliği değil karbonatlaşma derinliğinin ölçülmesi gerekmektedir [He et al., 2011], [Kim et al., 2013].

Bu uygulamanın haricinde betonun derinliğini ölçmek için standartta tanımlı çeşitli yöntemler olmasına rağmen bu tip yöntemler numunelerin kesilmesi,

öğütülmesi ve kimyasal işlemler gerektirdiğinden pratik değildir. AgNO_3 'e tabi tutulan kolorimetrik deney kolay ve hızlı olması açısından tercih edilir. Ancak gümüş nitrat yöntemi hassas bir ölçüm yöntemi olmadığından dolayı uygulama koşullarının takibi iyi yapılmalıdır.

2.8. Tahribatsız Beton Muayene Yöntemleri

2.8.1. Betonda Ultrases Geçiş Süresi Ölçümü

TS EN 12504-4 ve ASTM C 597 standartlarında tanımlanan beton numunenin bir yüzeyinden uygulanan ses üstü dalgalarının diğer yüzey arasındaki mesafeyi ne kadar sürede kat ettiğinin ölçümüdür. 15 cm kalınlığındaki beton bir blokta ses dalgasının bir uçtan karşı uca geçme süresi yaklaşık 30-45 μs kadardır [Erdogan, 2013]. Ultrasonik deney metodu beton dayanımlarıyla korelasyon kurulabilmesi için kullanılmakla birlikte gönderilen titreşim sayesinde dayanıklılık, yüzey kırığı derinliği, elastisite modülü, betonun homojenliği gibi parametrelerin belirlenmesi açısından da basit bir yöntemdir.

Dayanım için uygunluk istendiğinde darbe hızı ölçülerek hız ve dayanım arasındaki ilişkiden faydalanılabilir. Fakat betonun dayanımı arttıkça dayanım ile kurulan korelasyon daha zayıflar. Dayanım gelişimi izlenirken beton yaşının değiştirilmesiyle elde edilen korelasyonlar güvenilirdir ancak kalite kontrol amacıyla su/çimento oranını değiştirerek elde edilen bir korelasyon tercih edilir.



Şekil 2.10: Ultrases geçiş süresi ölçümü.

- *Hesaplama:*
- $V = km/s$ cinsinden hızdır.
- $L = mm$ cinsinden kat edilen yoldur.
- $T = \mu s$ cinsinden geçen süre.

Denklem 15

$$V = L/T \quad (2.15)$$

2.9. Taze Beton Özellikleri

Betonun şekil verilebilir bir kıvamda olması taze beton kavramıyla açıklanmaktadır. Taze betondan işlenebilme ve kıvamın beklenmesinin yanı sıra segregasyon olmaması, üniformite, priz süresi ve terleme gibi faktörlerinde uygun olması beklenmektedir.

2.9.1. İşlenebilme ve Kıvam

Relatif bir özellik gösteren işlenebilirlik kavramı taze betonun kolaylıkla karılabilmesi, pompalanabilirliği, ayrışma (segregasyon) olmadan taşınabilmesi (kohezyon), kalıba yerleştirilmesi, sıkıştırılabilirliği ve yüzeyinin düzeltilebilirliğinin (yapışkanlık) bir ölçüsüdür.

İşlenebilirliği çimento miktarı, çimento özelliği, karışım suyu miktarı, agrega gradasyonu ve en büyük agrega tane boyutu, ince agreganın miktarı ve tane dağılım oranı, agregaların tane şekli, mineral ve kimyasal katkıları, sürüklenmiş hava miktarı, sıcak hava koşulları ve beton karışımının sıcaklığı vb. faktörler etkiler [Erdogan, 2013; Saran, 2007].

Betonun akıcılık derecesi olan kıvam işlenebilirlikle orantılı bir kavram olmasına rağmen belirli bir noktadan sonra işlenebilirliği olumsuz etkileyerek betonda ayrışmaya neden olur.

Taze betonun işlenebilirliği belirlemede çeşitli deney yöntemleri vardır. Bunlardan en yaygın olanı çökme (slump) deneyidir.

2.9.1.1. Çökme deneyi

TS EN 12350-2 standartında tanımlanan deney için (200 ± 2) mm taban çapı, (100 ± 2) mm üst çapı olan, (300 ± 2) mm uzunluğundaki metalden yapılmış kesik koni ve boyu (600 ± 5) mm, çapı (160 ± 1) mm olan ucu yuvarlatılmış bir çelik çubuk kullanılır.

Taze beton huni yüksekliğinin 1/3'ü olacak şekilde yerleştirildikten sonra 25 kez şişlenerek sıkıştırılır. Her tabaka için bu işlem yapıldıktan sonra en üst tabaka mala ile düzeltilir ve huninin saplarından tutularak 5-10 saniye arasındaki sürede burulma veya yanal hareket yapmasına imkan vermeden yavaşça yukarı çekilmeli ve tüm deney 150 saniyede tamamlanmalıdır. Fakat en üst tabaka için bu işlemi yapmadan önce beton kalıp üst yüzeyinden daha yukarıda olmalıdır.

Çökme miktarı için huni ve huniden ayrılan beton yan yana getirilerek aradaki fark (ilk- son konum) cetvel yardımıyla (30 cm uzunluğunda) ölçülür. Böylelikle çökme miktarı hesaplanmış olur [Saran, 2007; Web 1].



Şekil 2.11: Betonda çökme değerinin ölçümü.

Çökme deneyi yapılarak elde edilen veriler neticesinde kıvam sınıfı ve çökme değeri verilerini değerlendirebilmek için TS EN 206 standartında tanımlı (Tablo 2.3) verilen değerler kullanılmaktadır.

Tablo 2.3: Betonun kıvam sınıfı ve çökme miktarının belirlenmesi.³

Kıvam Sınıfı	Çökme Sınıfı (mm)
S1	10-40
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5	≥ 220

2.9.1.2. Birim ağırlık

TS EN 12350-7 standartında tanımlanan taze betonun birim hacminin ağırlığı olarak ifade edilir.



Şekil 2.12: Betonda net ağırlığın ölçülmesi.

2.10. Betonda Dayanım

Genel tabiriyle betonda dayanım üzerine gelen yükler karşısında şekil değiştirme ve kırılmaya karşı direnç gösterme yeteneğini ifade eder. Betonun basınç yüklerine karşı direnme kabiliyetinin güçlü olduğu bilinmekle birlikte donatı takviyesiyle çekme

³ İnşaat sektöründe taşıma, yerleştirme ve yüzeyi düzleme açısından istenilen ideal çökme aralığı 18-22 cm'dir. Çok akıcı kıvamın şekil alması ve neticesinde dayanım kazanma durumunun zayıf olmasından dolayı S4 (çökme>16cm) kıvam düzeyi THBB tarafından tavsiye edilmiştir.

ve eğilme dayanımlarına karşı da iyi bir performansının olduğu görülmektedir. Dayanımdaki gelişme dayanıklılığı da etkilediğinden beton ham maddesi inşaat/yapı, kalite yönetimi gibi sektörlerde önemli bir noktadadır.

Beton dayanımı çimento hamuru, agrega dayanımı, çimento ve agrega arasındaki aderans, karışım suyu kalitesi, su/çimento oranı agrega özellikleri (agreganın tane boyut dağılımı, en büyük tane boyutu, tane şekli, tanelerin yüzey dokusu, dayanımı) betona uygulanan karıştırma, taşınma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri, uygun kür koşulları ve betonun yaşı gibi parametrelerden etkilendiğinden bahsi geçen faktörler dikkate alınmalıdır [Erdogan, 2013], [Saran, 2007].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneyisel çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda, cam tozunun farklı ikame oranlarında betonun basınç dayanımı test edilerek bağlayıcı etkinlik katsayısı, yani k -değerleri belirlenmiştir. İkinci kısımda, ilk kısımdaki sonuçlardan yararlanılarak seçilen k -değeri ve ikame oranı, üç farklı etkin su/çimento oranında beton karışımının oluşturulmasında kullanılmıştır. Bu betonlar aynı su/çimento oranına sahip kontrol betonuyla (cam tozu içermeyen) eşdeğer dayanıklılık performansı yönünden karşılaştırılmıştır.

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1. Agregalar

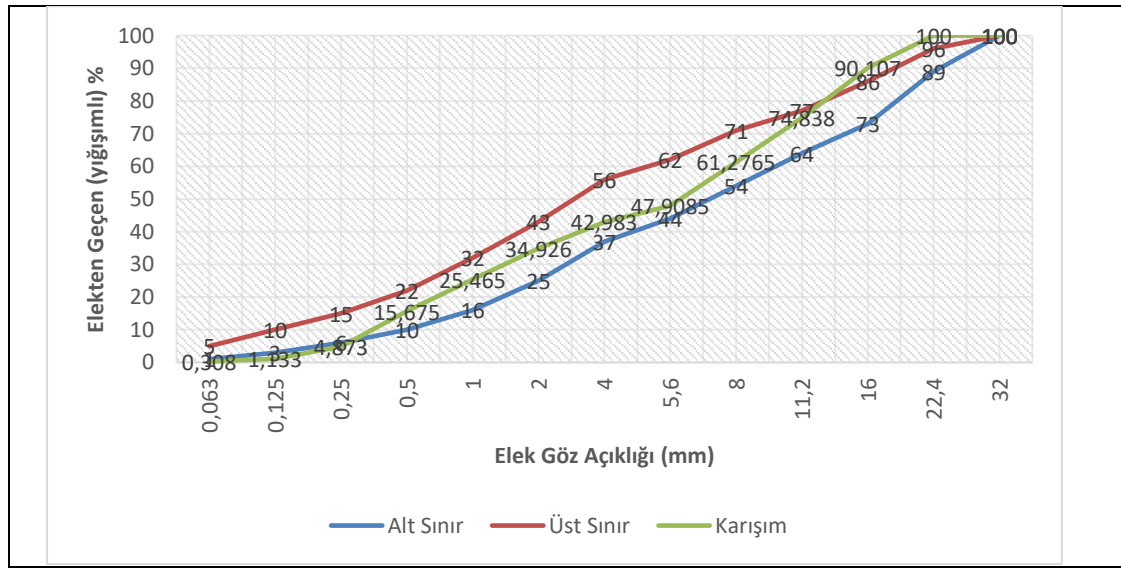
Çalışmada beton karışımlarında kullanılmak üzere iri agrega olarak Kırmataş I ve Kırmataş II, ince agrega olarak ise kırma kum ve doğal kum kullanılmıştır. Agregaların fiziksel özellikleri (Tablo 3.1), karışım oranları (Tablo 3.2) ve granülometri deneyi sonuçları Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1: Kullanılan agregalar için fiziksel özellikler.

Malzeme	Özgül Ağırlık (t/m^3)	Su Emme (%)
D.Kum	2,65	0,45
K.Kum	2,65	1
KT1	2,67	0,44
KT2	2,67	0,34

Tablo 3.2: Kullanılan agregaların karışım oranları.

Agrega Karışı m Oranı	Agrega Cinsi	Elek Göz Boyutu (mm)												
		Elekten Geçen %												
		0,06 3	0,12 5	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11, 6	16	22,4	32
0,22	Doğal Kum	0	1,4	11,2	52,1	77,8	88, 5	97	99,6	100	100	100	100	100
0,22	Kırma Kum	1,4	3,75	10,9 5	19,1 5	37,9 5	69, 3	97,1 5	99,9	100	100	100	100	100
0,3	Kırmataş1	0	0	0	0	0	0,7	0,9	13,2	57,3 5	96, 9	100	100	100
0,26	Kırmataş2	0	0	0	0	0	0	0	0,22 5	0,27 5	61,9 6,8	5	100	100
	Karışım	0,3	1,1	4,9	15,7	25,5	34, 9	43,0	47,9	61,3	74, 8	90,1	100, 0	100, 0
	Alt Sınır	1	3	6	10	16	25	37	44	54	64	73	89	100
	Üst Sınır	5	10	15	22	32	43	56	62	71	77	86	96	100



Şekil 3.1: Kullanılan agregaların elek analizi.

3.1.2. Çimento

Çalışmada kullanılan çimento, Nuh Çimento Sanayi Kocaeli Fabrikası'nda üretilmiş, CEM I / 42,5 R tipinde portland çimentosudur. Kullanılan çimentoya ait kimyasal, fiziksel ve dayanım özellikleri (Tablo 3.3 ve Tablo 3.4) verilmiştir.

3.1.3. Cam Tozu

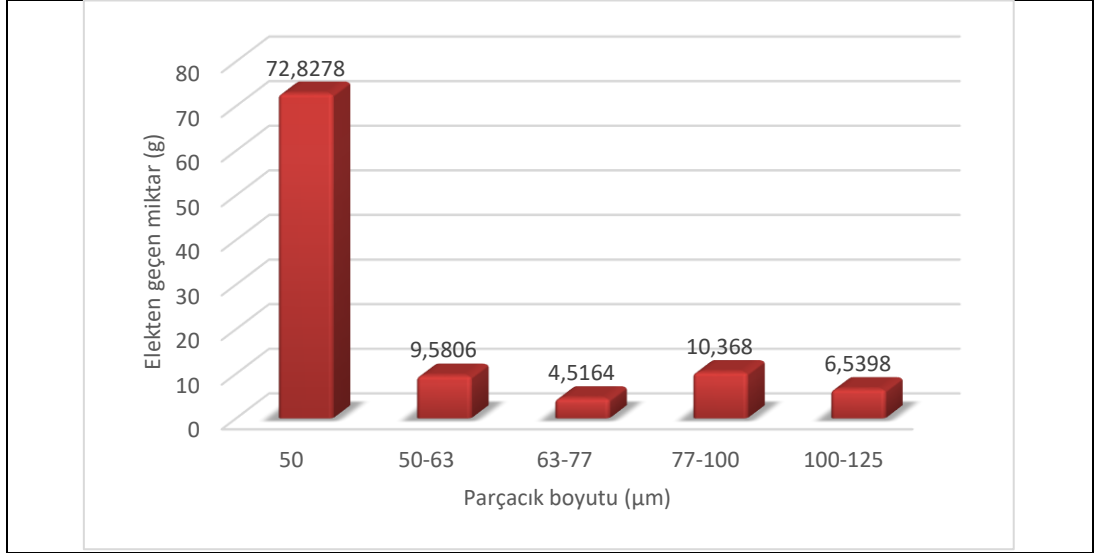
Deneylerde çimentoya ikame olarak Akcihan Madencilikten alınan cam tozu kullanılmış olup fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları (Tablo 3.3 ve Tablo 3.4) ve elek analizi sonuçları ise (Şekil 3.2) verilmiştir.

Tablo 3.3: Çimentonun¹ ve Cam tozunun² fiziksel analiz sonuçları.

Özgül Ağırlığı	3,19 g/cm ³	2,58 g/cm ³
Yığın Yoğunluğu	-	1,56 g/cm ³
Kıvam (Su/Çimento)	28,70%	-
Donma Süresi (Vicat, dakika)	Başlangıç: 149; Bitiş: 197	-
Hacim Sabitliği (Le Chatelier)	1	-
Erime Derecesi	-	720 °C
Tane Boyutu	-	< 0,125 (120 mesh altı)
Su Absorpsiyonu	-	0,02
Basınç Dayanımı	1. Gün: 19,6 Mpa; 2.Gün 30,2 Mpa	

Tablo 3.4: Çimentonun¹ ve Cam tozunun² kimyasal analiz sonuçları.

Bileşenler	%	%
SiO ₂	19,5	69,42
Al ₂ O ₃	4,23	1,09
Fe ₂ O ₃	3,72	0,48
CaO	63,93	8,27
MgO	1,63	4,25
SO ₃	2,85	-
Na ₂ O	-	12,31
LOI	-	16,18
Çözünmeyen Kalıntı	0,28	-
Kızdırma Kaybı	2,69	-
Serbest Kireç	1,51	-
Toplam Alkali	0,53	-
Klorür	0,0058	-



Şekil 3.2: Kullanılan cam tozunun elek analizi sonuçları.

3.2. Beton Karışımları

Beton Karışım Hesapları TS 802 standartına uygun olarak yapılmıştır. Yapılan çalışmada her beton karışımı için, basınç, eğilme, yarmada çekme dayanımı, su geçirimsizliği ve kolorimetri deneyleri için toplam 18 adet numune hazırlanmıştır. 3 adet basınç, eğilme, su geçirimsizliği; 4 adet yarmada çekme ve 5 adet kolorimetri deneyleri içindir.

Numuneler isimlendirilirken öncelikle su/çimento oranı (0.45, 0.55, 0.65) daha sonrasında mineral katkı varsa mineral katkının yüzdesi (%10, 15, 20) ve k-etkinlik değeri hesaplanan numuneler için ise en sonuna " K" harfi yazılarak kod oluşturulmuştur (Örnekler: C4500, C4520, C4520K vs.)

Karışımda agregalar (doğal kum, kırma kum, kırmataş 1 ve kırmataş 2) mikserde ilk sırada konularak 1-2 dk karıştırma işlemi yapılmıştır. Çimento ve cam tozu eklentisinden sonra karışıma su takviyesi yapılarak karışım tamamlanmıştır.

Karışım tamamlandıktan sonra hesapta belirlenen oranlarda üretilen betonlar, betonyer vasıtasıyla karıştırılıp önceden yağlanmış kalıplara dökülerek sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Numuneler kalıplar içerisinde 2 gün bekletildikten sonra, kalıptan çıkarılarak kür koşullarına göre hazırlanmış bölümlere yerleştirilmiştir. $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de, musluk suyu ile doldurulmuş havuzlarda 28 gün bekletilerek uygulanmıştır. Beton karışım sonuçlarıyla ilgili veriler (Tablo 3.5) verilmiştir.

Tablo 3.5: 1 m³ beton için gerekli olan malzeme miktarları.

Numune Kodları	Çiment o (kg)	Su (kg)	Cam Tozu (kg)	Doğal Kum (kg)	Kırma Kum (kg)	Kırmataş 1 (kg)	Kırmataş 2 (kg)
C4500	460	207	-	368	368	502	435
C5500	380	209	-	382	382	520	451
C6500	320	208	-	393	393	536	465
C4510	414	207	46	359	368	502	435
C5510	342	209	38	374	382	520	451
C6510	288	208	32	387	393	536	465
C4515	391	207	69	355	368	502	435
C5515	323	209	57	371	382	520	451
C6515	272	208	48	384	393	536	465
C4520	368	207	92	351	368	502	435
C5520	304	209	76	367	382	520	451
C6520	256	208	64	381	393	536	465
C4520K	438	207	110	275	368	502	435
C5520K	362	209	91	305	382	520	451
C6520K	305	208	76	328	393	536	465

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Taze Beton Deney Sonuçları

4.1.1. İşlenebilme

Karıştırma işlemi bittikten sonra kıvamın belirlenmesinde TS EN 12350-2 standartına göre çökme deneyi (slump deneyi) yapılmıştır. 0.55 ve 0.65 su/çimento oranına sahip beton numuneleri kimyasal katkı kullanılmadan dökülmüş ve kıvam değerleri hesaplanmıştır. 0.45 su/çimento oranına sahip numuneler içinse başta belirlenen kimyasal katkı kullanımı işlenebilirlik açısından herhangi bir problem görülmediğinden dolayı kullanılmaması yönünde bir karar alınmıştır. İşlenebilirlik sonuçlarına ait veriler (Tablo 4.1) verilmiştir.

Tablo 4.1: Çökme değerleri.

Üretim Kodu	Slump Değerleri (cm)	
	1. Üretim	⁴ 2. Üretim
C4500	10	14
C4510	13,5	-
C4515	14,5	-
C4520	12	-
C5500	10	14
C5510	15,5	-
C5515	17,5	-
C5520	14	-
C6500	17	21
C6510	17,5	-
C6515	18	-
C6520	15	-
C4520K	9	9
C5520K	12	12,5
C6520K	16	17

⁴ Kontrol ve k- etkinlik değeri hesaplanan cam tozlu numunelerin mekanik ve dayanıklılık deneyleri için iki part halinde döküm yapıldığından tabloda 1. ve 2. üretim olarak çökme değerleri not alınmıştır.

4.1.2. Birim Ağırlık

TS EN 12350-6 standartına göre üretim aşamasında, betonyer vasıtasıyla karıştırma işlemi bittikten sonra taze beton, hacmi 7 litre ve ağırlığı belirli olan kalıp içerisine iki katman halinde yerleştirilerek vibratörle sıkıştırılmış ve toplam ağırlığı tartılmıştır. Betonun net ağırlığı ile kalıp ağırlığı arasındaki fark hesaplanmış, net ağırlığın kalıp hacmine bölünmesiyle de birim ağırlık değerleri elde edilmiştir. Birim ağırlık sonuçlarına ait veriler (Tablo 4.2) verilmiştir.

Tablo 4.2: Birim ağırlık ve yoğunluk sonuçları.

Üretim Kodu	Taze Beton Birim Ağırlıkları (g)		Yoğunluk (kg/m ³)	
	1. Üretim	2. Üretim	1. Üretim	2. Üretim
C4500	16572	16555	2367,4	2365
C4510	16523,5	-	2360,5	-
C4515	16423	-	2346,1	-
C4520	16502	-	2357,4	-
C5500	16427,5	16500,5	2346,8	2357,2
⁵ C5510	16307,5	-	2329,6	-
C5515	16325,5	-	2332,2	-
C5520	16430	-	2347,1	-
C6500	16364	16410	2337,7	2344,3
C6510	16273	-	2324,7	-
C6515	16159	-	2308,4	-
C6520	16332	-	2333,1	-
C4520K	16380,5	16423	2340,1	2346,1
C5520K	16325	16260	2332,1	2322,9
C6520K	16218	16103,5	2316,9	2300,5

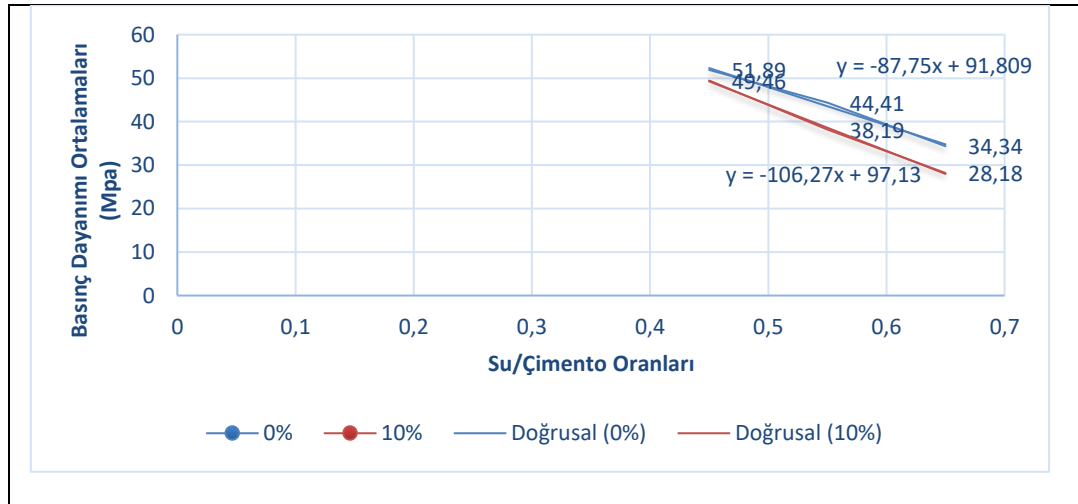
Su/Çimento oranı arttıkça betonda kapiler boşluk artar ve beton geçirimli hale gelir. Geçirimli hale gelen betonun yoğunluğu da düşük olur. Tablodan görüldüğü üzere 0.45 (s/ç) oranına sahip kontrol betonlarının 0.55 ve 0.65 (s/ç) oranına sahip kontrol betonlarından daha yüksek birim ağırlığa sahip olduğu görülmüştür. Cam tozu çimentodan daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan dolayı cam tozu oranı arttıkça kontrol betonlarına göre daha düşük birim ağırlık değerleri ortaya çıkmıştır. Çökme değerleri k-etkin değeri hesaplanmış cam tozlu betonlar haricinde artmıştır. Bu durum

⁵ Üretim kodu C5500 olan betonun 1. üretiminde değerin doğru olmadığı tespit edildiğinden yeniden üretim yapılarak sonuç 2. üretim olarak tabloya işlenmiştir.

cam tozunun inceliğinin fazla olması yani yüksek yüzey alanına sahip olmasıyla açıklanabilir.

4.2. k-Etkinlik Değeri Sonuçları

Kontrol ve cam tozu içeren betonların basınç dayanımı ortalamaları ve su/çimento oranları ilişkisi kurularak elde edilen veriler neticesinde oluşturulan eğilim çizgileri Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Bu grafikler ve literatür kısmındaki formüllerden yararlanılarak k- etkinlik değerlerinin hesabı yapılmıştır.



Şekil 4.1: %10 Cam tozu içeren numunelerin basınç dayanımı & su/çimento ilişkisi.

- %10 cam tozu
- ω_0 : su/çimento oranı
- Wg : cam tozu içeren betonun su içeriği
- c : cam tozu içeren betonun çimento içeriği
- g : cam tozu içeriği

$$- 87.75\omega_0 + 91.80 = - 106.27Wg / (c + g) + 97.13$$

$$Wg / (c + k \times g) = \omega_0 \rightarrow Wg = \omega_0 \times (c + k \times g)$$

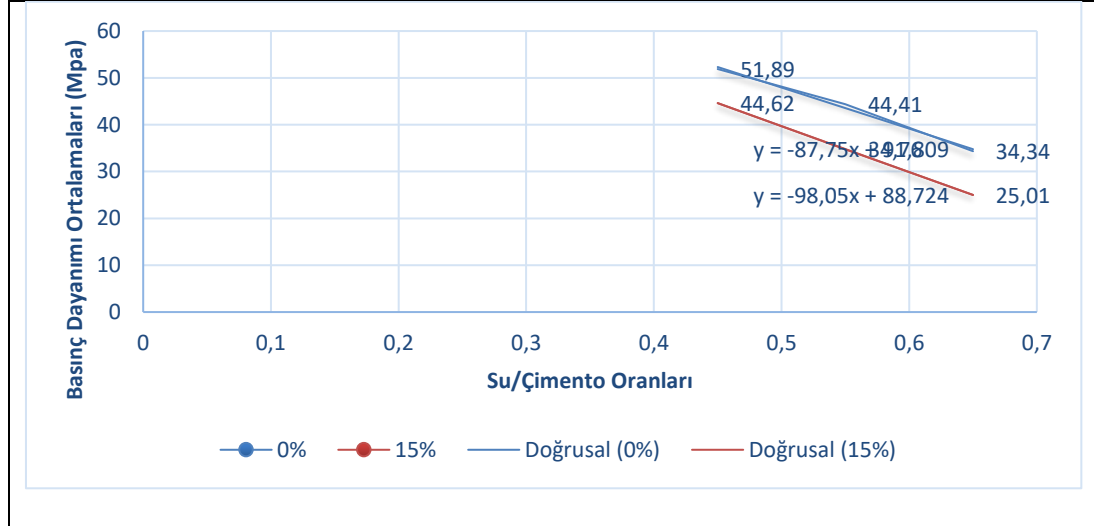
$$[\omega_0 \times (c + k \times g)] / (c + g) = [\omega_0 (1 + k \times 1/9)] / (1 + 1/9)$$

$$= [\omega_0 \times (9 + k)] / 10$$

$$\omega o \times [-87.75 + 10.627 \times (9 + k)] = 5.33$$

$$7.893 + 10.627k = 5.33/\omega$$

- $\omega o = 0.45 \rightarrow k = 0.372$
- $\omega o = 0.55 \rightarrow k = 0.170$
- $\omega o = 0.65 \rightarrow k = 0.030$



Şekil 4.2: %15 Cam tozu içeren numunelerin basınç dayanımı & su/çimento ilişkisi.

- %15 cam tozu
- ωo : su/çimento oranı
- Wg : cam tozu içeren betonun su içeriği
- c : cam tozu içeren betonun çimento içeriği
- g : cam tozu içeriği

$$-87.75\omega o + 91.80 = -98.05Wg/(c + g) + 88.72$$

$$Wg/(c + k \times g) = \omega o \rightarrow Wg = \omega o \times (c + k \times g)$$

$$[\omega o \times (c + k \times g)]/(c + g) = [\omega o (1 + k \times 1/6)]/(1 + 1/6)$$

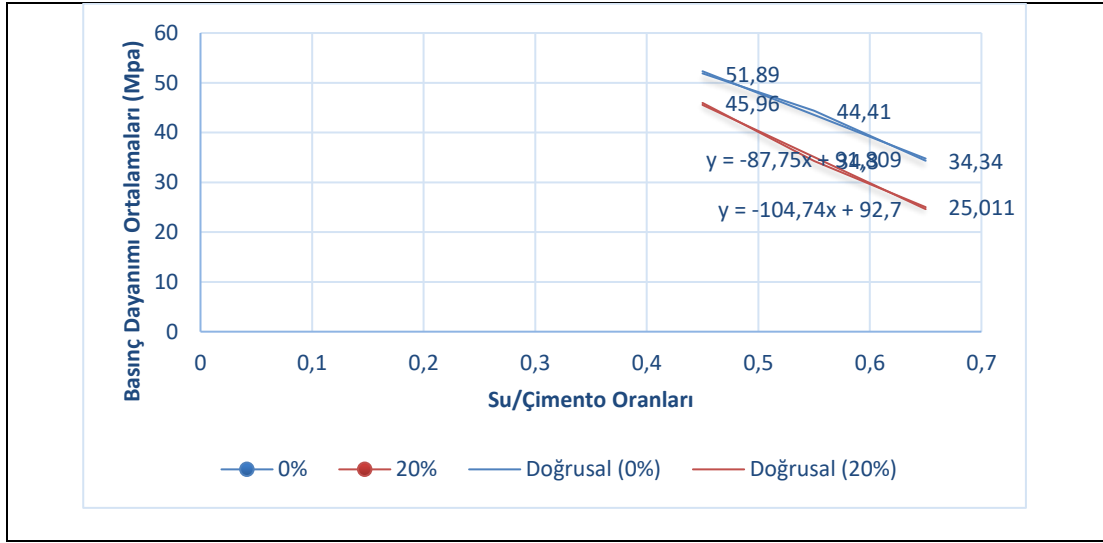
$$= [\omega o \times (6 + k)]/10$$

$$\omega o \times [-87.75 + 9.805 \times (6 + k)] = 3.08$$

$$-28.92 + 9.805k = 3.08/\omega o$$

- $\omega o = 0.45 \rightarrow k = 3.650$

- $\omega o = 0.55 \rightarrow k = 3.520$
- $\omega o = 0.65 \rightarrow k = 3.433$



Şekil 4.3: %20 Cam tozu içeren numunelerin basınç dayanımı & su/çimento ilişkisi.

- %20 cam tozu
- ωo : su/çimento oranı
- Wg : cam tozu içeren betonun su içeriği
- c : cam tozu içeren betonun çimento içeriği
- g : cam tozu içeriği

$$-87.75\omega o + 91.80 = -104.7Wg / (c + g) + 92.70$$

$$Wg / (c + k \times g) = \omega o \rightarrow Wg = \omega o \times (c + k \times g)$$

$$[\omega o \times (c + k \times g)] / (c + g) = [\omega o (1 + k \times 1/4)] / (1 + 1/4)$$

$$= [\omega o \times (4 + k)] / 10$$

$$\omega o \times [-87.75 + 10.47 \times (4 + k)] = 0.9$$

$$-45.87 + 10.47k = 0.9 / \omega o$$

- $\omega o = 0.45 \rightarrow k = 4.57$
- $\omega o = 0.55 \rightarrow k = 4.54$
- $\omega o = 0.65 \rightarrow k = 4.51$

TS EN 206-1 standartında uçucu kül için tanımlanan k-etkinlik değerleri, cam tozu içeren betonların dayanımları ve su/çimento oranları ile hesaplanan k-etkinlik

değerleri arasındaki bağıntıdan yararlanılarak cam tozu için k-etkinlik değerinin 0.2 alınması uygun görülmüştür.

4.3. Dayanıklılık Deney Sonuçları

4.3.1. Betonda Yoğunluk, Su Emme ve Boşluk Hacmi

Kiriş numune parçalarıyla yapılan yoğunluk, su emme ve boşluk hacmi deneyinde ilk ağırlıkları tartılan numuneler 24 saat etüvde bekletilmiştir. Etüvden çıkartılarak yaklaşık 1 saat kadar desikatörde bekletilen numunelerin ağırlıkları tartılmıştır. İlk deneylerde 72 saat etüv kurusu olarak bekletilen numuneler ile 48 saat bekletilenler arasında kısmi bir fark görüldüğünden (%0.5'den daha az) 48 saat etüv kurusu değerleri referans alınarak tartımlar yapılmıştır. 48 saat etüv kurusu tartımlarının ardından numuneler su dolu bir tencere içerisinde 48 saat bekletilerek suya doymun hale getirilmiştir. Suyu doymun hale gelen numunelerin hem ağırlık hem hacim tartımları yapılarak kayıt altına alınmıştır. Tartımları yapılan numuneleri kaynamış suya doymun hale getirmek için ise 5 saat boyunca tencerede kaynattıktan sonra aynı şekilde hem ağırlık hem hacim değerleri kaydedilerek yoğunluk, su emme ve boşluk hacmi hesabı yapılmıştır. Sonuçlara ait veriler (Tablo 4.3) verilmiştir.

Tablo 4.3: Yoğunluk, su emme ve boşluk hacmi sonuçları.

	Islak	A	B	C	D	S.E %	S.E. K %	S.D.Y Mg/m ³	K.Y Mg/m ₃	G.Y Mg/m ₃	K.Y Mg/m ₃	S.G. B.H %
C45												
00-1	2698	2540	2691	2694	1557	5,93	6,06	2,37	2,37	2,58	2,23	13,54
C45												
00-2	2618	2467	2613	2617	1512	5,94	6,10	2,36	2,37	2,58	2,23	13,62
C45												
00-3	2295	2164	2292	2295	1329	5,89	6,05	2,37	2,37	2,59	2,24	13,55
C55												
00-1	2204	2054	2191	2193	1254	6,65	6,77	2,33	2,33	2,57	2,19	14,80
C55												
00-2	2322	2175	2310	2314	1331	6,18	6,39	2,35	2,35	2,58	2,21	14,13
C55												
00-3	2597	2428	2583	2588	1486	6,41	6,59	2,34	2,35	2,58	2,20	14,53
C65												
00-1	2224	2080	2215	2217	1272	6,49	6,61	2,34	2,35	2,58	2,20	14,55
C65												
00-2	2535	2371	2522	2525	1446	6,39	6,50	2,34	2,34	2,57	2,20	14,29
C65												
00-3	2031	1898	202	2025	1158	6,51	6,66	2,33	2,34	2,56	2,19	14,59
C45												
20K												
-1	2711	2554	2703	2705	1564	5,85	5,93	2,37	2,37	2,58	2,24	13,27
C45												
20K												
-2	2678	2520	2670	2674	1536	5,97	6,11	2,35	2,35	2,56	2,21	13,53
C45												
20K												
-3	2339	2202	2332	2334	1345	5,88	5,99	2,36	2,36	2,57	2,23	13,34
C55												
20K												
-1	2784	2608	2771	2774	1600	6,27	6,37	2,36	2,36	2,59	2,22	14,14
C55												
20K												
-2	2353	2199	2343	2345	1348	6,55	6,66	2,35	2,35	2,58	2,20	14,69
C55												
20K												
-3	2352	2194	2340	2342	1344	6,66	6,75	2,35	2,35	2,58	2,20	14,84
C65												
20K												
-1	2565	2390	2549	2550	1460	6,63	6,69	2,34	2,34	2,57	2,19	14,68
C65												
20K												
-2	2246	2100	2235	2235	1284	6,43	6,45	2,35	2,35	2,57	2,21	14,24
C65												
20K												
-3	2473	2304	2461	2462	1408	6,79	6,84	2,34	2,34	2,57	2,19	14,95

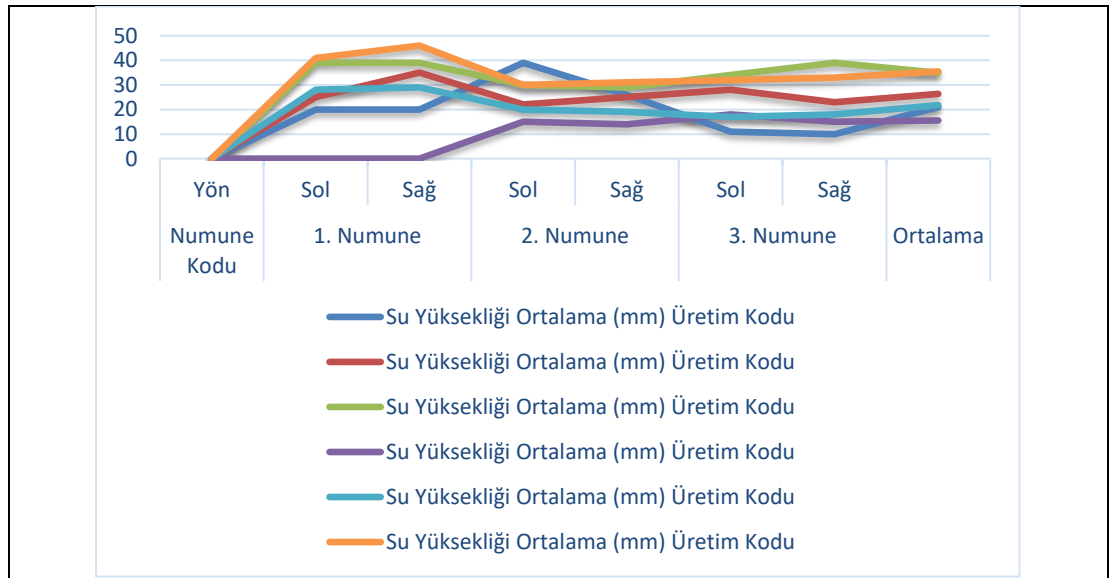
Su/çimento oranı 0.45 olan kontrol ve cam tozu içeren beton numunelerinin su emme (doygun, kaynamış), görünen yoğunluk değerleri 0.55 ve 0.65 su /çimento oranına sahip beton numunelerinden daha yüksek ve suyun geçtiği boşluk hacmi daha düşüktür. Bunun nedeni su/çimento oranı düşük numunelerin porozite, su absorpsiyonu değerlerinin düşük olmasındandır. Yine su/çimento oranı 0.45 olan kontrol ve cam tozu içeren betonların kuru yoğunluk değerleri de 0.55 ve 0.65 su/çimento oranına sahip beton numunelerinden daha yüksektir. Su absorpsiyonu sınırlandırıldığından dolayı betonda küçülmenin de daha az olması beklenir. Cam tozu içeren beton numuneleriyle kontrol beton numuneleri karşılaştırıldığında su emme (doygun, kaynamış), suyun geçtiği boşluk hacmi yüzdelerinin düşük, suya doygun, kaynamış ve kuru yoğunluk değerlerinin ise yüksek olduğunu görmektedir. Bu durum ince bir malzeme olan cam tozunun daha fazla hidrat ürünleri oluşturarak betondaki boşlukları doldurması ve karışımın daha kompakt bir yapıya sahip olmasıyla açıklanabilir.

4.3.2. Betonun Basınç Altında Su Sızdırma Derinliği

Betonun basınç altında su sızdırma derinliği deneyi 3 küp numune üzerinde yapılmıştır. 3 küp numune 5 bar hava basıncı ve yeterli su geçişi olacak şekilde cihazda konumlandırıldıktan sonra 72 saat beklenmiştir. Cihazdan çıkartılan numuneler su geçişi olan kısmı üste getirilerek mekanik deney cihazında yükleme hızı 13.5 kN/s çizgisel yük uygulayacak şekilde kırılmıştır. Belirli bir süre beklendikten sonra geçiş derinliği belirgin hale gelen numunelerde okuma yapılarak değerler kaydedilmiştir. Sonuçlara ait veriler (Tablo 4.4 ve Şekil 4.4) verilmiştir.

Tablo 4.4: Su geçirimsizlik sonuçları.

Numune Kodu	Yön	Su Yüksekliği Ortalama (mm)					
		Üretim Kodu					
		C4500	C5500	C6500	C4520K	C5520K	C6520K
1. Numune	Sol	20	25	39	-	28	41
	Sağ	20	35	39	-	29	46
2. Numune	Sol	39	22	30	15	20	30
	Sağ	26	25	29	14	19	31
3. Numune	Sol	11	28	34	18	17	32
	Sağ	10	23	39	15	18	33
Ortalama		21,0	26,3	35,0	15,5	21,83	35,5



Şekil 4.4: Numunelere işlenen ortalama su yükseklikleri.

Farklı su/çimento oranlarına sahip kontrol beton numunelerinin su geçirgenlik değerleri karşılaştırılmıştır. Su/Çimento oranı düşük betonların su geçirgenlik değerlerinin daha düşük olacağı bilinmektedir. TS EN 206/TS 1315 standartlarında belirtilen maksimum su işleme değeri 50 mm'den düşük ve numunelerin ortalama su işleme derinliği 40 mm'den küçük olduğunda betonun su geçirimsiz, eğer bu ortalama 30 mm'den daha az ise zararlı sulara karşı da dirençli olduğu kabul edilmektedir. Çalışmada 0.45 (s/ç) oranına sahip kontrol beton numunelerinin 0.55 ve 0.65 (s/ç) oranına sahip beton numunelerine göre daha düşük su geçirgenlik değerine sahip olduğu görülmektedir. 0.45 (s/ç) oranına sahip 2. ve 3. numunelerde değerler beklenenden farklı çıkmıştır. 2.numune için yüzeyinde normalden fazla su olması ve 3. numunedeki düşük çıkan değerler için ise su akışı az olmuştur yorumu yapılabilir. Ayrıca k-etkin değeri hesaplanarak dökülen cam tozlu betonların su geçirgenlik

değerleri normal betonların su geçirgenlik değerlerinden daha küçüktür. Cam tozunun yüksek yüzey alanına sahip olmasının yanı sıra çimentoya cam tozu ikamesi, özellikle arayüz bölgesindeki yüksek Ca(OH)_2 konsantrasyonu sayesinde puzolanik reaksiyon oluşturarak zamanla ortamdaki Ca(OH)_2 tüketir, ikincil C-S-H jellerini de oluşturarak cam tozlu betonların su geçirgenlik değerlerini kontrol betonlarına göre azaltır. Ayrıca cam tozunun çimentoya göre hidrasyon ısısının düşük olması ve terlemeyi azaltması betondaki içsel gerilmeleri azaltır ve geçirimsizlik değerleri düşer.

4.3.3. Betonun Klorür Geçirgenliği

Betonda klorür penetrasyonu 7, 14, 28, 56 ve 91 gün boyunca, boyutu 10*20 cm olan silindir numuneler kullanılarak yapılmıştır. 28. günün sonunda kür havuzundan çıkartılan numuneler %3.5 NaCl sulu çözeltisinde deney süresi gelene kadar bekletilmiştir. Deney süresi gelen numuneler sulu çözeltiden çıkartıldıktan sonra numunelere çizgisel yük uygulayacak şekilde mekanik deney cihazına yerleştirilerek ikiye ayrılmıştır. Daha sonrasında derişimi 0.1 M (mol/l) AgNO_3 numunelerin üzerlerine püskürtülerek 2 saat boyunca görünür klorür derinliğinin oluşması için beklenilmiştir. Sol ve sağ kısma ayrılan numune okumaları 4-16 mm'ye kadar 2 mm arayla (7 okuma) yapılmıştır. Okuma sırasında agregaya gelinmesi durumunda okumada hata yapmamak için ihmal edilerek ölçümler yapılmıştır. Tüm günlere ait veriler aşağıdaki tablolarda (Tablo 4.5-4.24; Şekil 4.5-4.23) verilmiştir.

Tablo 4.5: C4500 kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.

C4500 7 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	5	7	8	6
6	5	5	6	6
8	8	3	3	7
10	5	4	2	7
12	5	4	5	6
14	4	5	4	5
16	4	6	4	6
Maksimum	9	8	9	8
ORT	5,14	4,86	4,57	6,14

Tablo 4.6: C4500 kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.

C4500 14 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	6	12	12	4
6	6	11	10	4
8	4	9	8	3
10	4	11	8	3
12	5	4	12	4
14	3	10	9	3
16	6	4	11	4
Maksimum	7	16	16	5
ORT	4,86	8,71	10	3,57

Tablo 4.7: C4500 kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.

C4500				
28 GÜNLÜK				
Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	9	8	9	5
6	8	5	6	9
8	10	9	5	8
10	13	5	4	6
12	12	5	10	11
14	12	8	8	5
16	15	6	8	6
Maksimum	15	13	12	12
ORT	11,29	6,57	7,14	7,14

Tablo 4.8: C4520K kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.

C4520K				
7 GÜNLÜK				
Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	7	7	3	3
6	7	7	4	4
18	4	3	4	6
10	4	8	4	5
12	3	6	6	5
14	10	4	6	3
16	3	5	5	3
Maksimum	10	8	6	6
ORT	5,43	5,71	4,57	4,14

Tablo 4.9: C4520K kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.

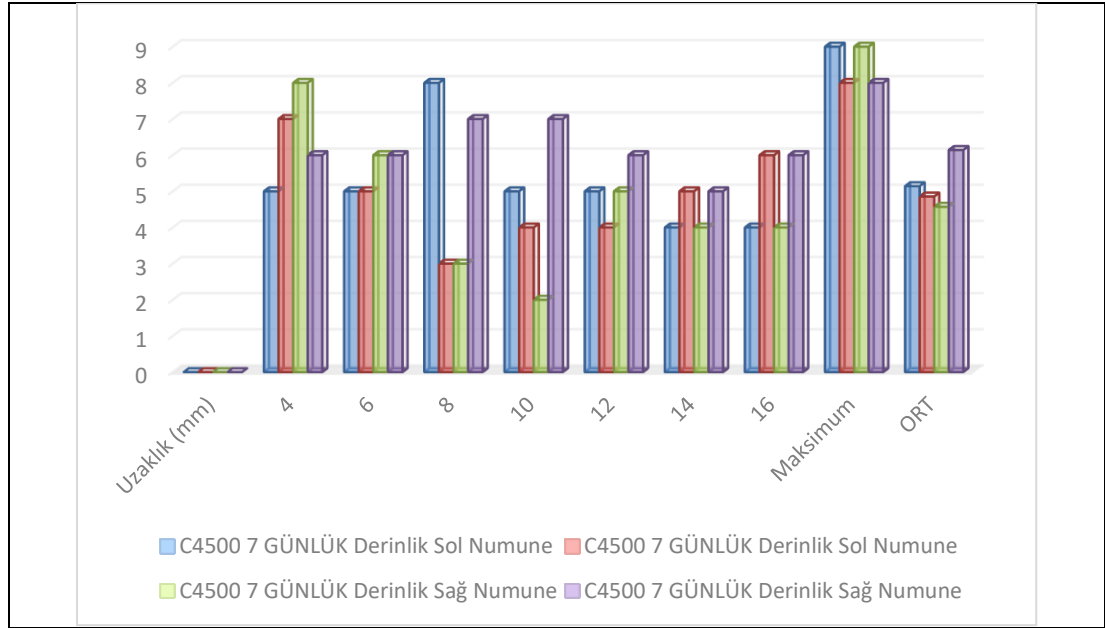
C4520K 14 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	2	17	8	2
6	3	16	20	3
8	4	20	14	5
10	2	24	18	2
12	4	7	19	3
14	1	12	23	4
16	3	10	-	4
Maksimum	4	24	23	5
ORT	2,71	15,14	17,00	3,29

Tablo 4.10: C4520K kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.

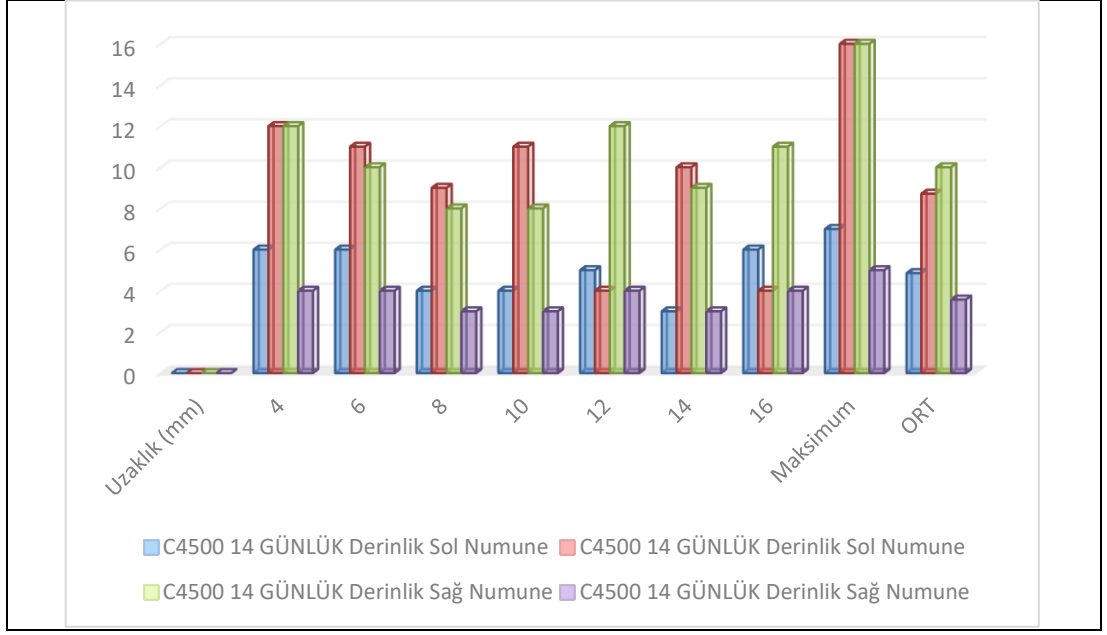
C4520K 28 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	10	4	2	8
6	7	2	2	7
8	5	5	5	4
10	12	3	4	13
12	5	1	2	5
14	7	2	3	11
16	5	3	1	6
Maksimum	12	6	6	16
ORT	7,29	2,86	2,71	7,71

Tablo 4.11: C4520K kodlu numunenin 56 günlük klorür derinliği sonuçları.

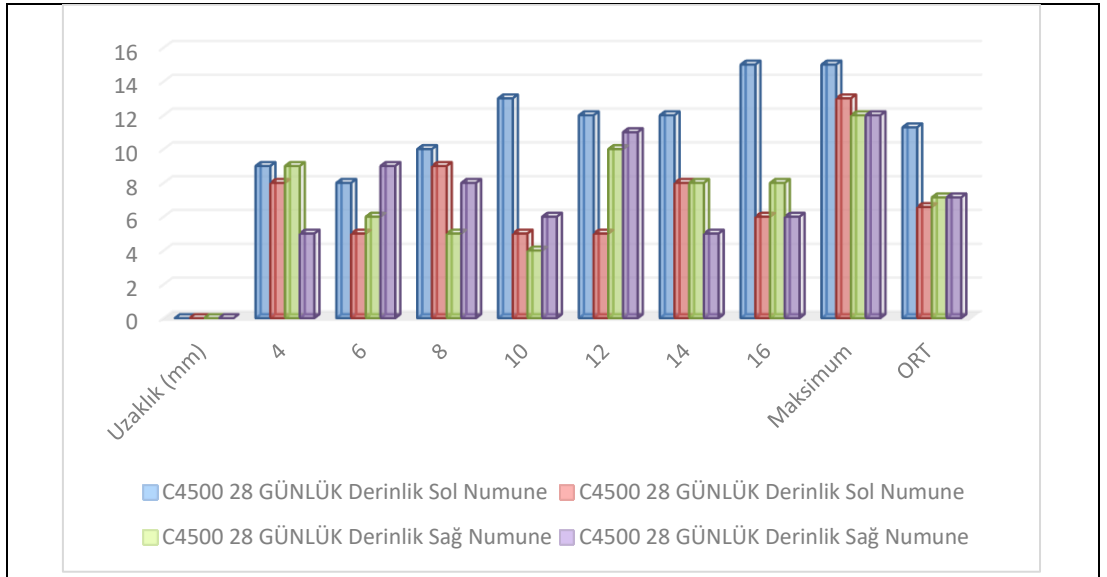
C4520K 56 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	1	6	5	8
6	3	8	3	17
8	3	8	7	11
10	1	22	25	8
12	5	9	2	6
14	11	5	4	5
16	7	8	7	5
Maksimum	15	31	30	17
ORT	5,86	9,43	7,57	8,57



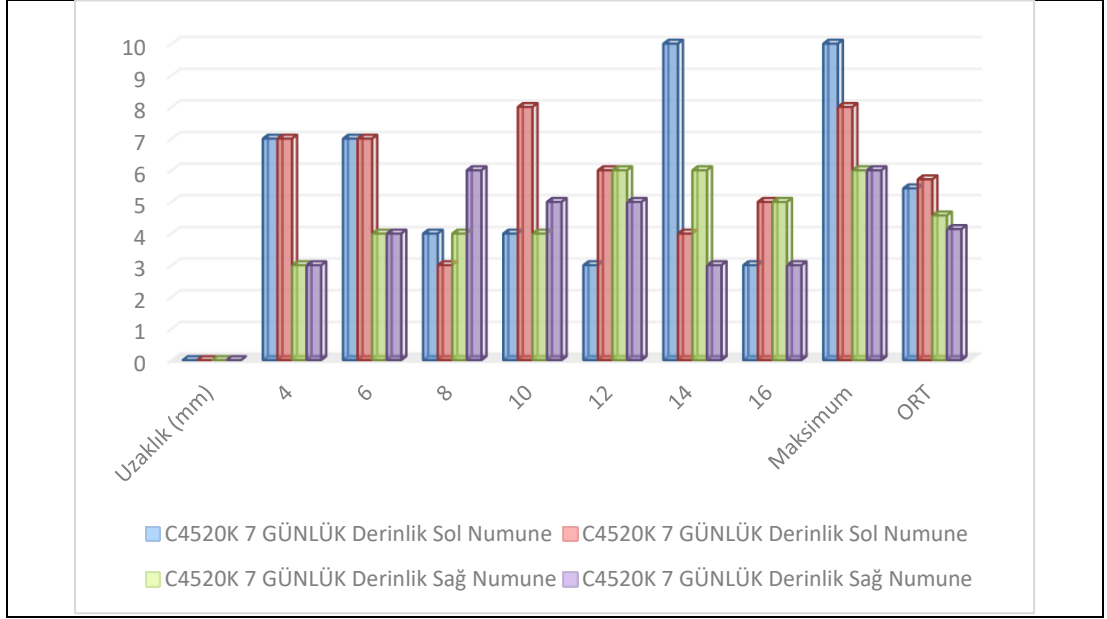
Şekil 4.5: C4500 kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.



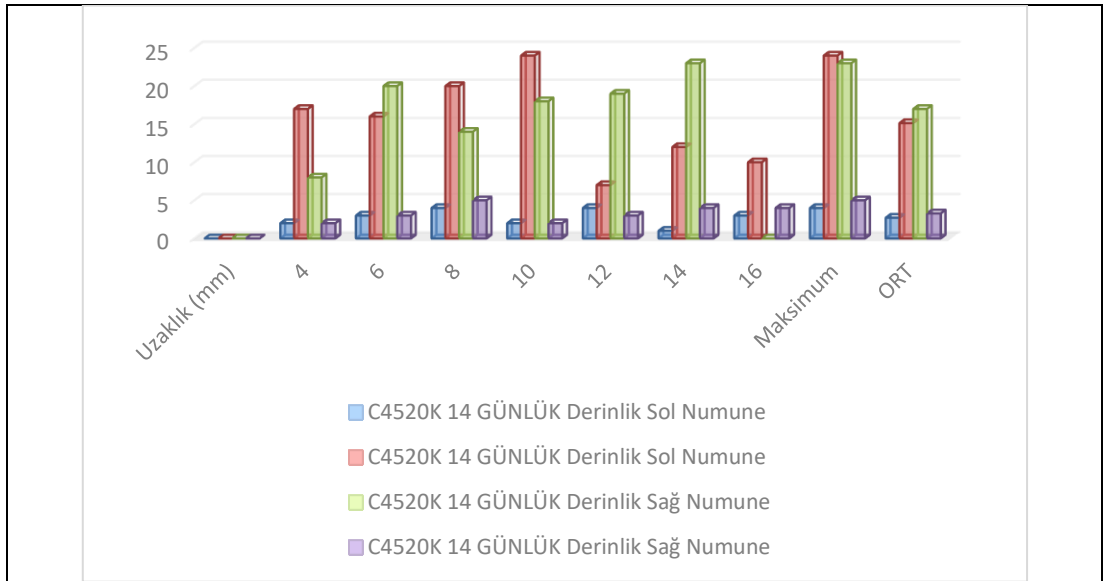
Şekil 4.6: C4500 kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.



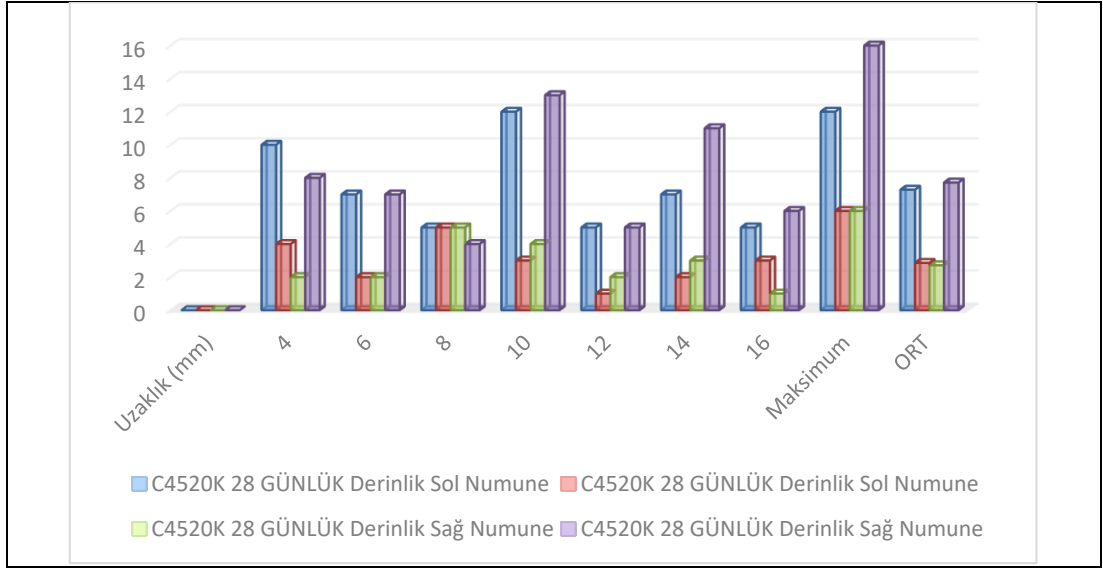
Şekil 4.7: C4500 kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.



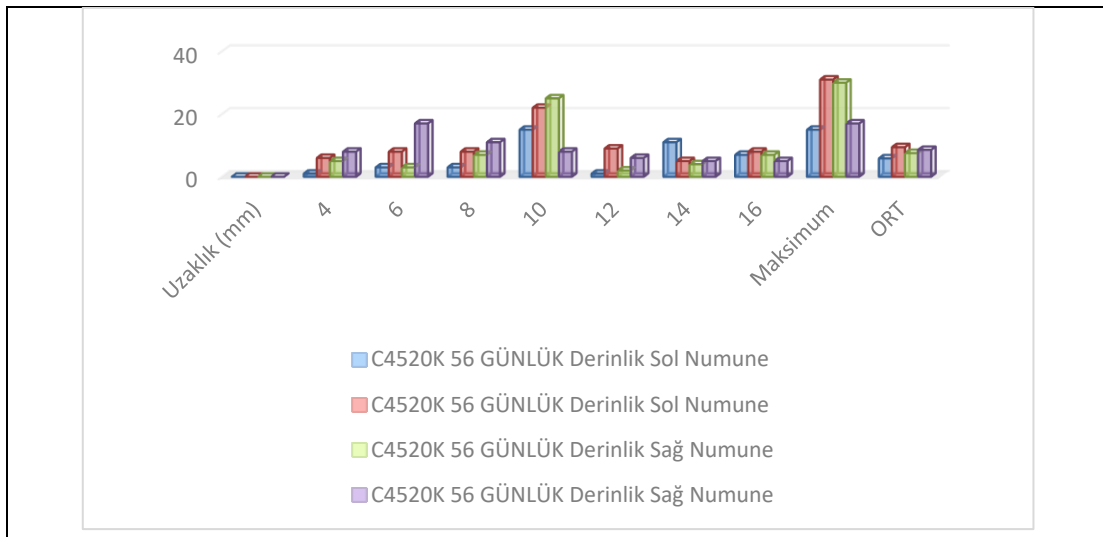
Şekil 4.8: C4520K kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.



Şekil 4.9: C4520K kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.



Şekil 4.10: C4520K kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.



Şekil 4.11: C4520K kodlu numunenin 56 günlük klorür derinliği sonuçları.

Tablo 4.12: C5500 kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.

C5500 7 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	4	5	7	7
6	4	7	10	5
8	7	7	8	7
10	5	5	5	5
12	6	5	7	7
14	3	6	10	9
16	4	8	6	5
Maksimum	7	8	10	9
ORT	4,71	6,14	7,57	6,43

Tablo 4.13: C5500 kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.

C5500 14 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	6	11	5	9
6	8	8	5	7
8	3	8	6	6
10	11	8	5	9
12	4	14	14	8
14	10	7	5	11
16	10	8	7	10
Maksimum	12	14	14	14
ORT	7,43	9,14	6,71	8,57

Tablo 4.14: C5500 kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.

C5500 28 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	10	9	9	14
6	11	9	11	10
8	8	6	8	11
10	8	9	8	9
12	8	10	7	11
14	12	9	9	10
16	11	9	9	16
Maksimum	20	14	12	16
ORT	9,71	8,71	8,71	11,57

Tablo 4.15: C5500 kodlu numunenin 56 günlük klorür derinliği sonuçları.

C5500 56 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	17	20	21	22
6	14	13	14	16
8	12	13	13	14
10	11	14	15	15
12	12	12	16	14
14	16	15	16	16
16	15	14	14	15
Maksimum	26	24	23	22
ORT	13,86	14,43	15,57	16

Tablo 4.16: C5520K kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.

C5520K 7 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	7	4	8	7
6	4	4	6	5
8	6	5	7	6
10	7	6	10	7
12	4	9	7	6
14	5	4	6	6
16	5	7	5	5
Maksimum	7	8	10	7
ORT	5,43	5,57	7	6

Tablo 4.17: C5520K kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.

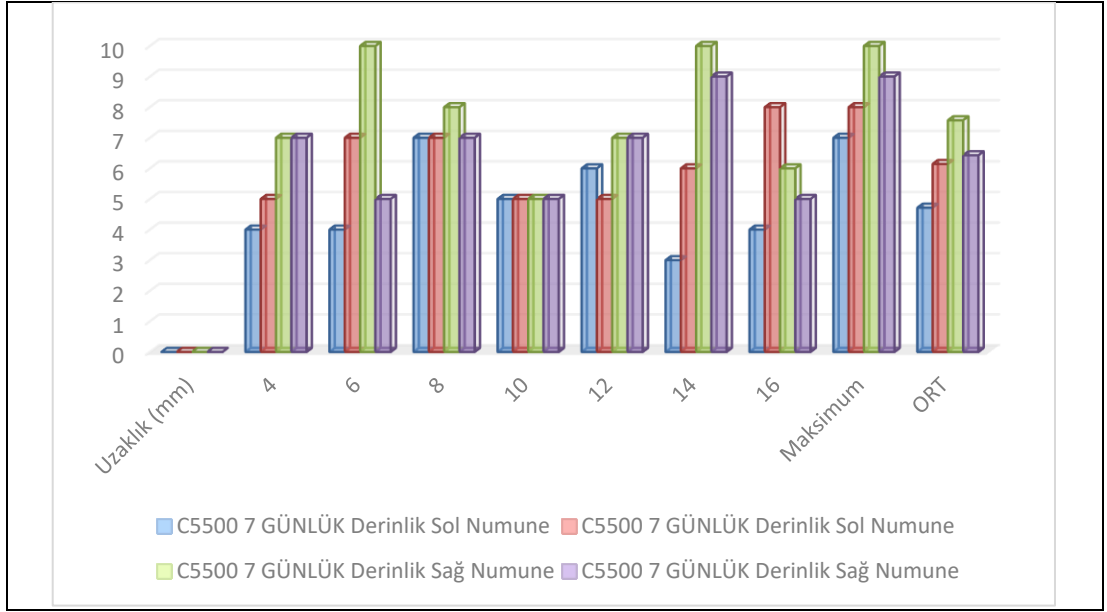
C5520K 14 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	5	4	5	9
6	8	9	4	8
8	10	10	12	10
10	10	10	9	9
12	12	10	8	12
14	11	7	7	9
16	9	9	12	12
Maksimum	12	10	12	12
ORT	9,29	8,43	8,14	9,86

Tablo 4.18: C5520K kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.

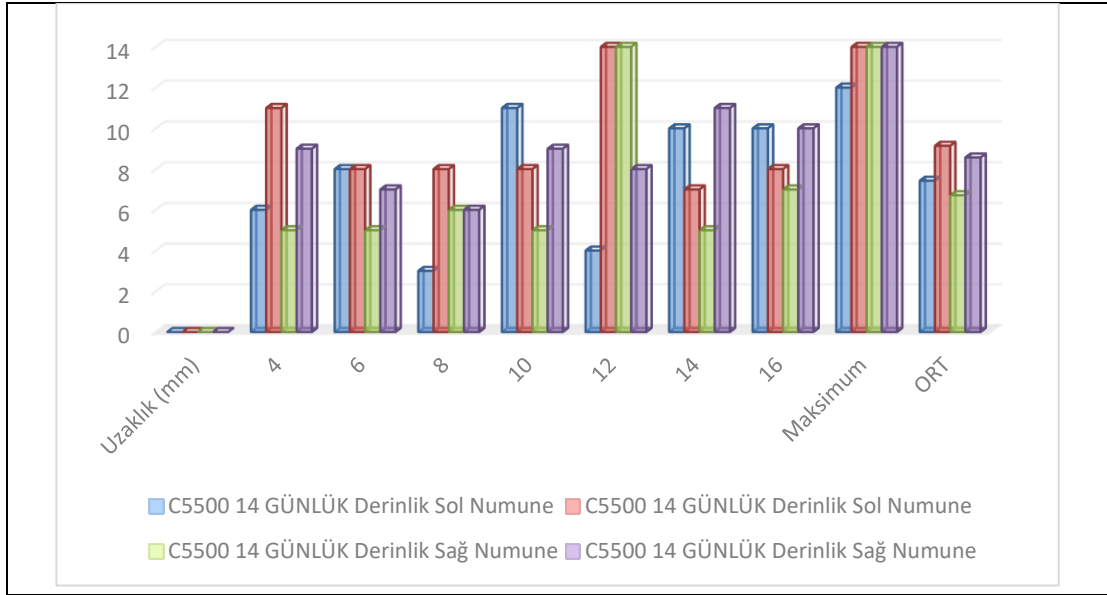
C5520K 28 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	8	8	4	9
6	10	13	9	11
8	11	10	10	4
10	12	12	13	10
12	9	14	15	3
14	14	5	9	2
16	8	8	4	4
Maksimum	14	14	15	12
ORT	10,29	10,00	9,14	6,14

Tablo 4.19: C5520K kodlu numunenin 56 günlük klorür derinliği sonuçları.

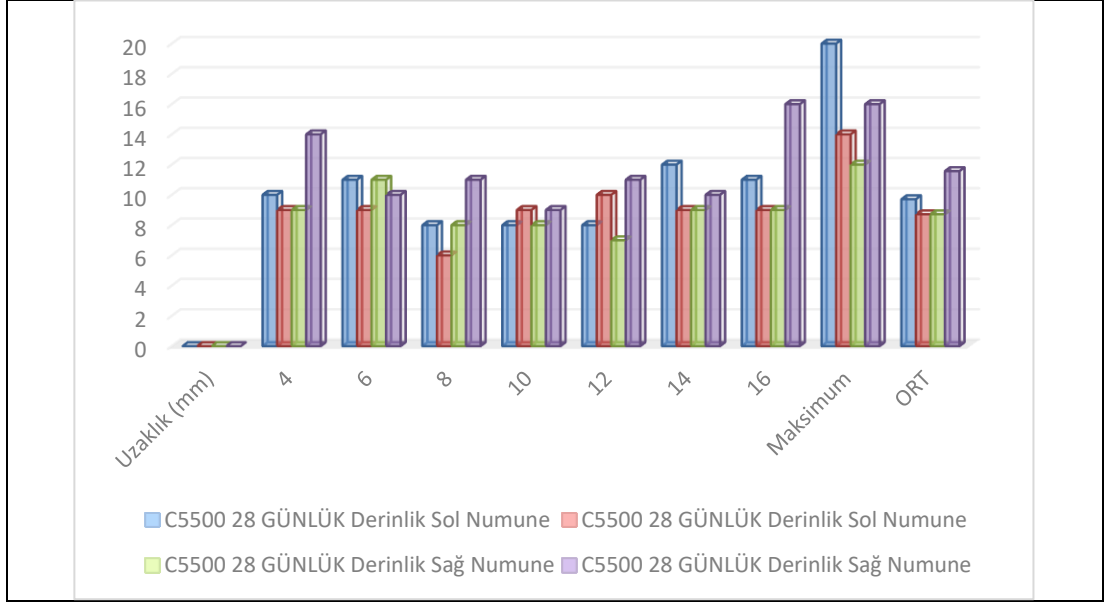
C5520K 56 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	15	19	16	13
6	6	15	10	13
8	15	14	11	12
10	11	15	13	13
12	11	20	17	12
14	13	17	15	13
16	12	15	13	3
Maksimum	17	20	17	15
ORT	11,86	16,43	13,57	11,29



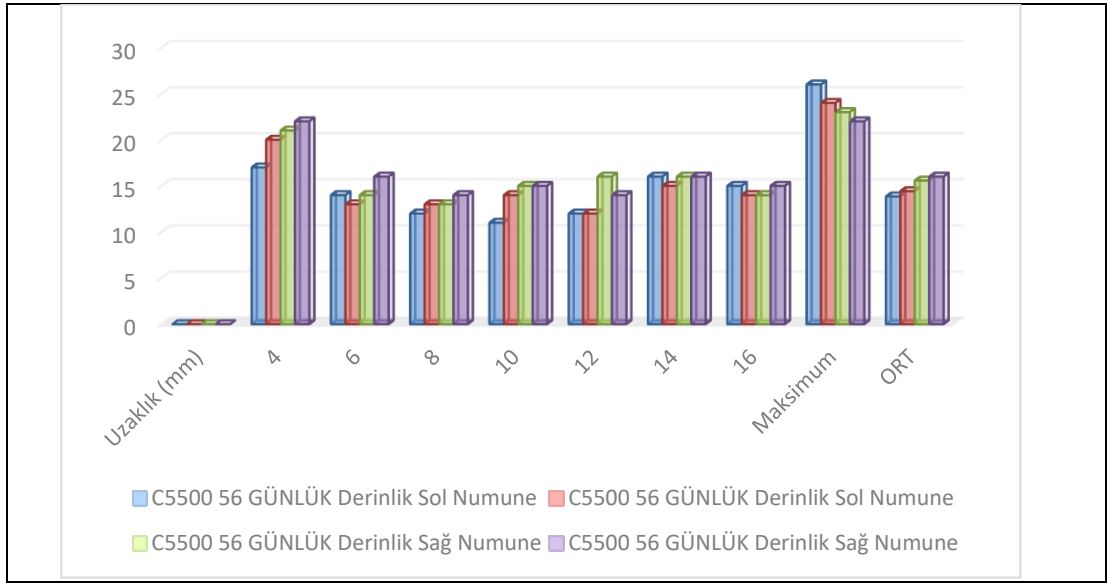
Şekil 4.12: C5500 kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.



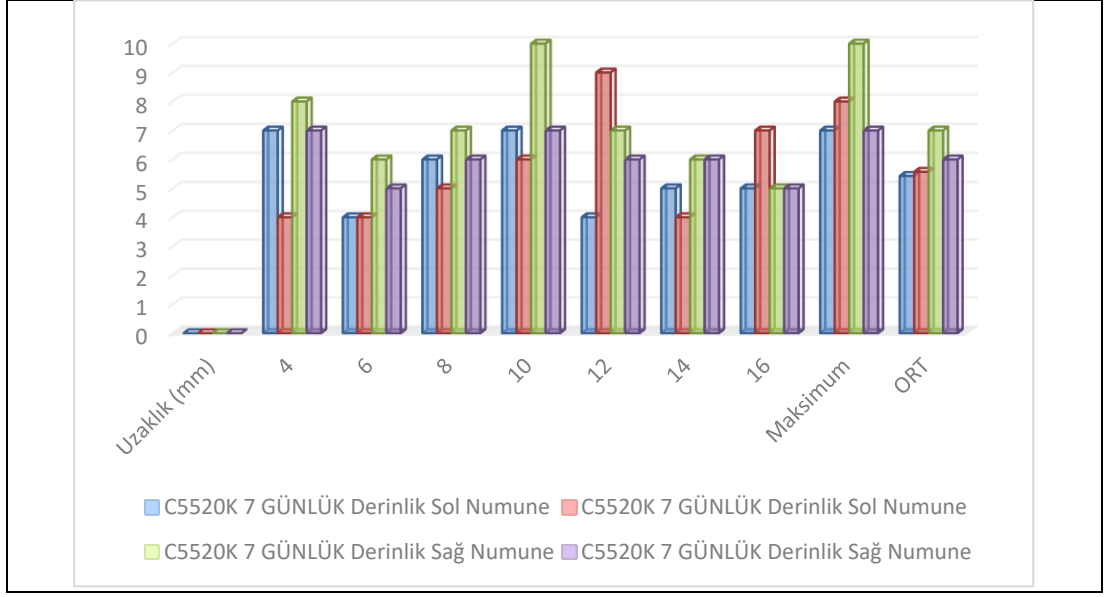
Şekil 4.13: C5500 kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.



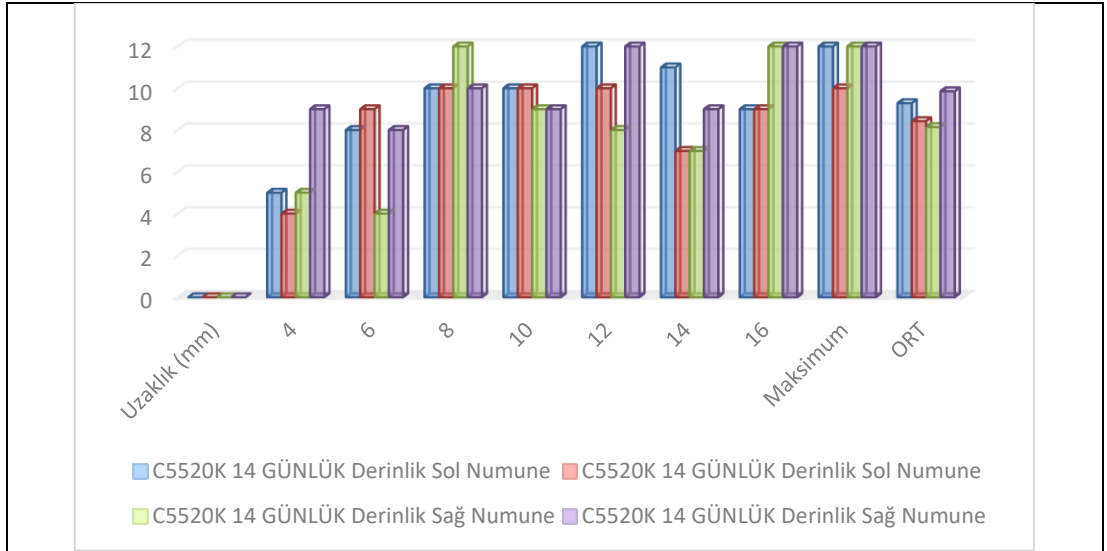
Şekil 4.14: C5500 kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.



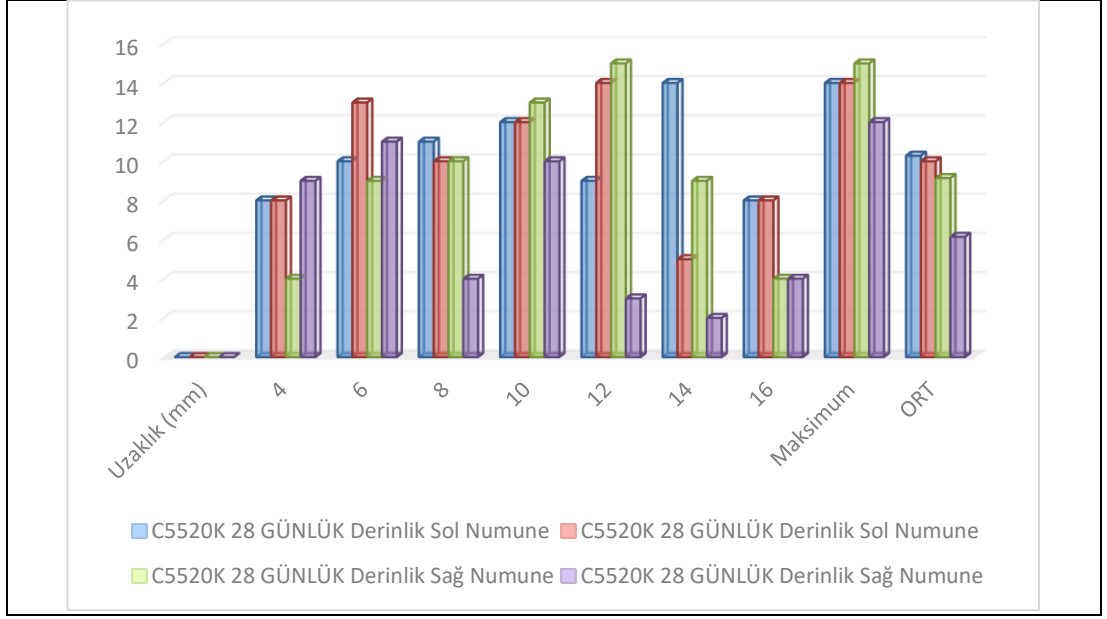
Şekil 4.15: C5500 kodlu numunenin 56 günlük klorür derinliği sonuçları.



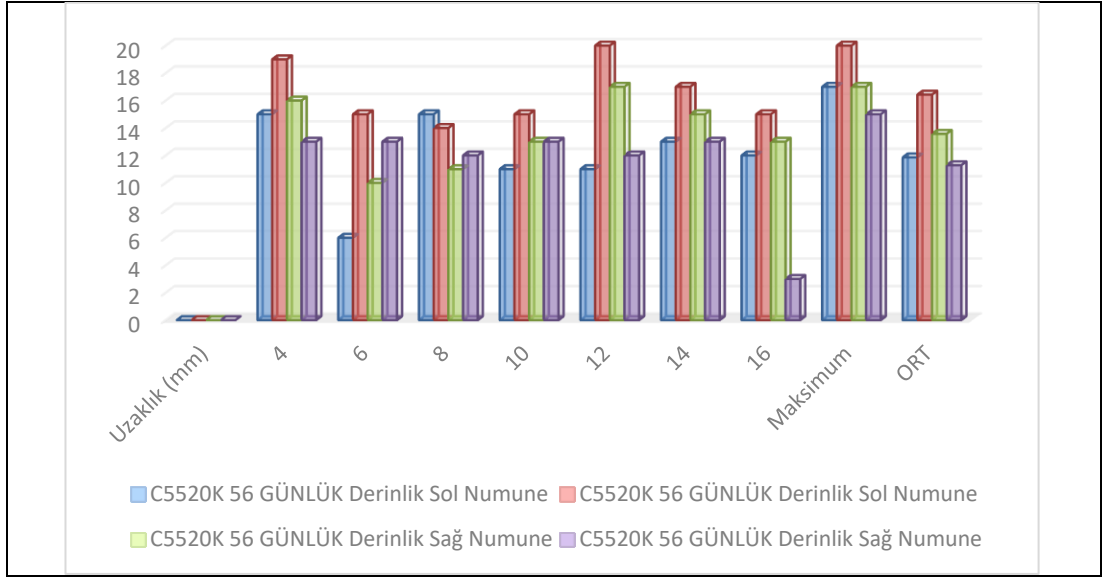
Şekil 4.16: C5520K kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.



Şekil 4.17: C5520K kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.



Şekil 4.18: C5520K kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.



Şekil 4.19: C5520K kodlu numunenin 56 günlük klorür derinliği sonuçları.

Tablo 4.20: C6500 kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.

C6500 7 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	7	4	6	3
6	12	3	4	6
8	8	6	5	2
10	6	5	4	6
12	8	6	6	5
14	7	6	7	8
16	7	5	6	6
Maksimum	14	9	8	10
ORT	7,86	5	5,43	5,14

Tablo 4.21: C6500 kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.

C6500 14 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	8	4	5	9
6	11	6	6	8
8	9	5	5	8
10	9	5	7	10
12	12	8	7	10
14	10	5	7	9
16	8	8	8	9
Maksimum	12	10	10	11
ORT	9,57	5,86	6,43	9

Tablo 4.22: C6500 kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.

C6500 28 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	4	5	10	8
6	11	9	9	11
8	10	10	11	11
10	10	11	12	10
12	12	12	9	12
14	12	9	14	8
16	15	10	12	13
Maksimum	15	14	14	13
ORT	10,57	9,43	11	10,43

Tablo 4.23: C6520K kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.

C6520K 7 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	5	25	16	9
6	7	24	19	8
8	9	24	20	9
10	7	15	12	7
12	12	16	16	14
14	10	15	10	12
16	10	16	11	10
Maksimum	12	25	20	14
ORT	8,57	19,29	14,86	9,86

Tablo 4.24: C6520K kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.

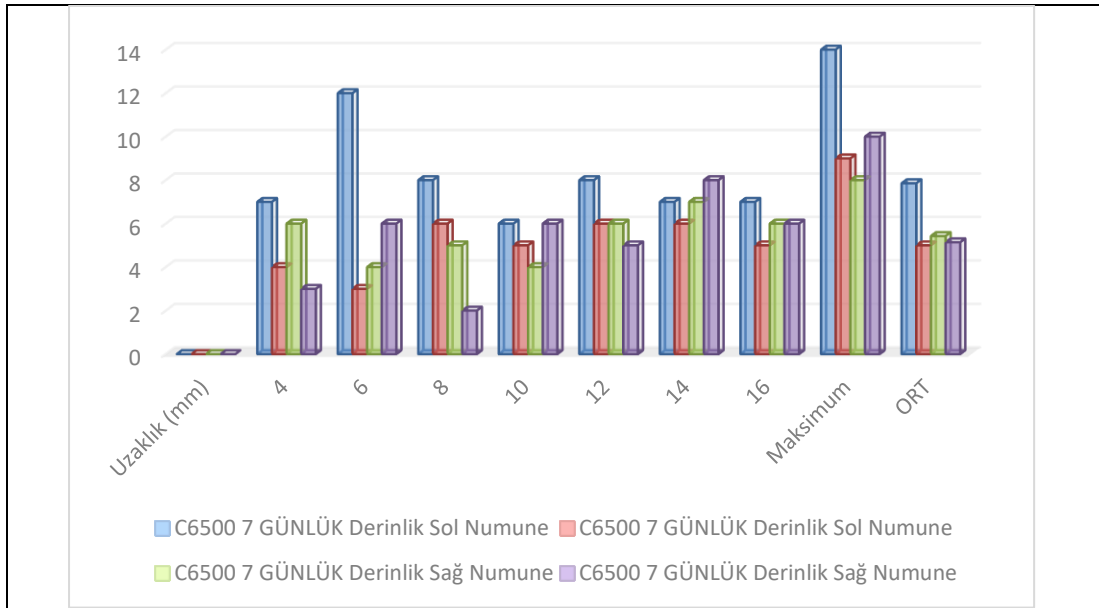
C6520K 14 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	10	11	10	9
6	11	8	9	9
8	8	9	7	7
10	12	8	9	10
12	18	11	7	15
14	10	9	8	9
16	10	10	7	8
Maksimum	18	16	13	15
ORT	11,29	9,43	8,14	9,57

Tablo 4.25: C6520K kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.

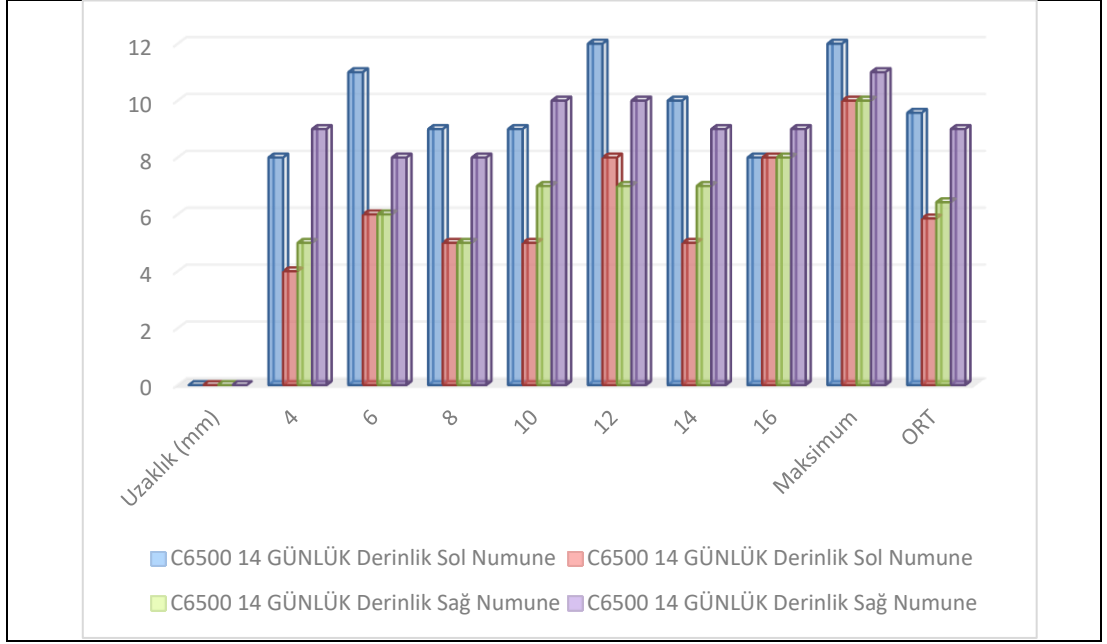
C6520K 28 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	12	10	11	12
6	15	10	13	11
8	15	13	13	13
10	20	12	14	17
12	15	12	11	16
14	15	14	16	13
16	14	16	17	10
Maksimum	19	17	17	20
ORT	15,14	12,43	13,57	13,14

Tablo 4.26: C6520K kodlu numunenin 56 günlük klorür derinliği sonuçları.

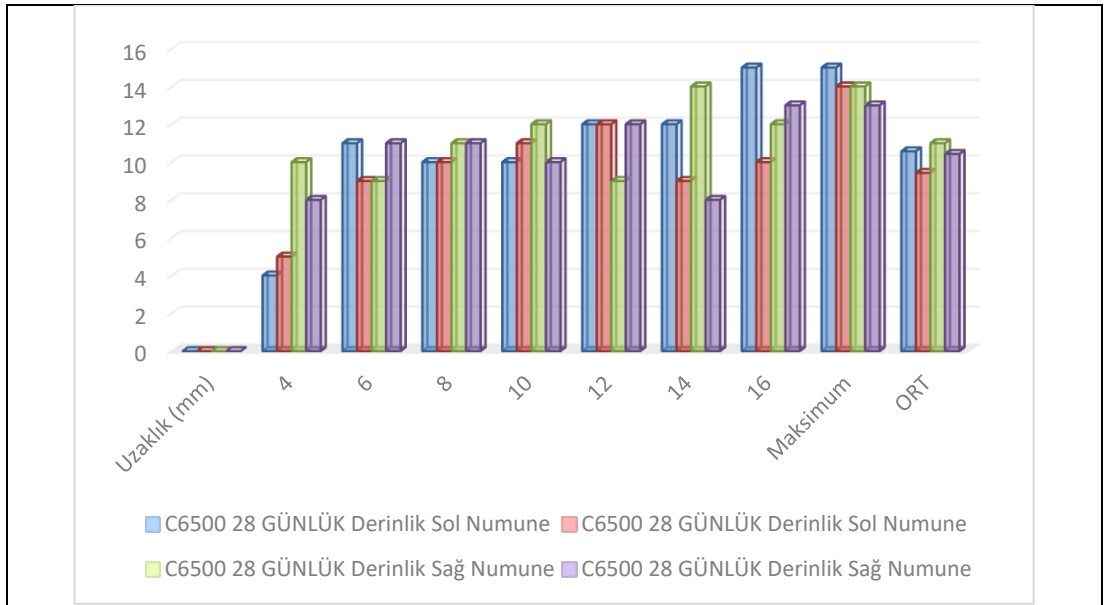
C6520K 56 GÜNLÜK Derinlik				
Uzaklık (mm)	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
4	20	24	24	21
6	15	11	12	16
8	18	17	16	13
10	18	18	18	13
12	18	18	15	17
14	15	18	18	19
16	8	14	15	19
Maksimum	24	24	24	21
ORT	15,71	17,14	16,86	16,86



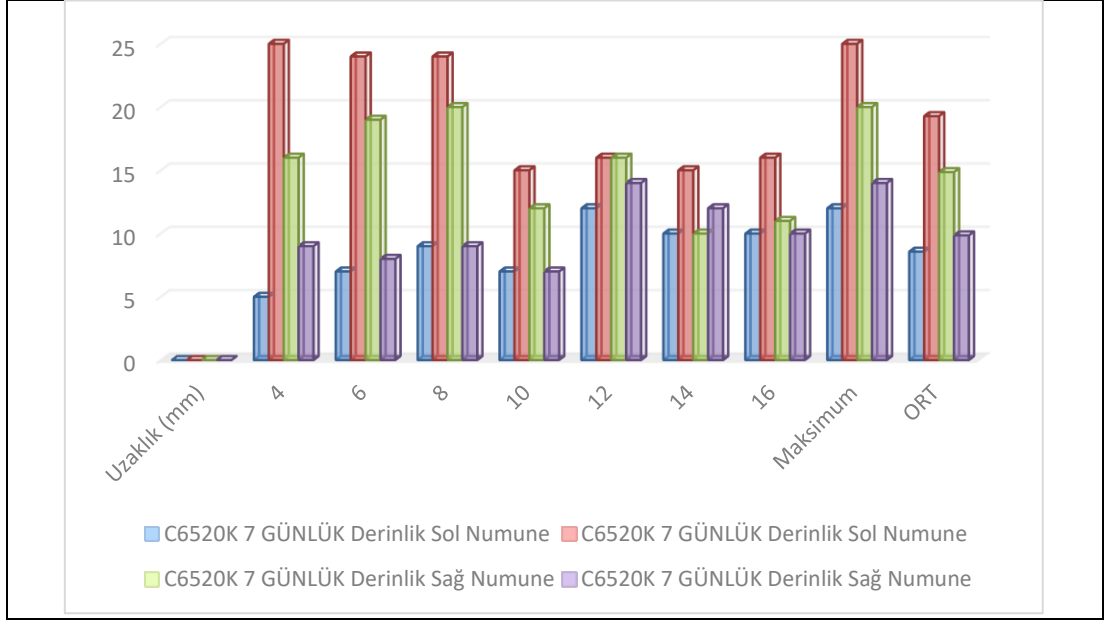
Şekil 4.20: C6500 kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.



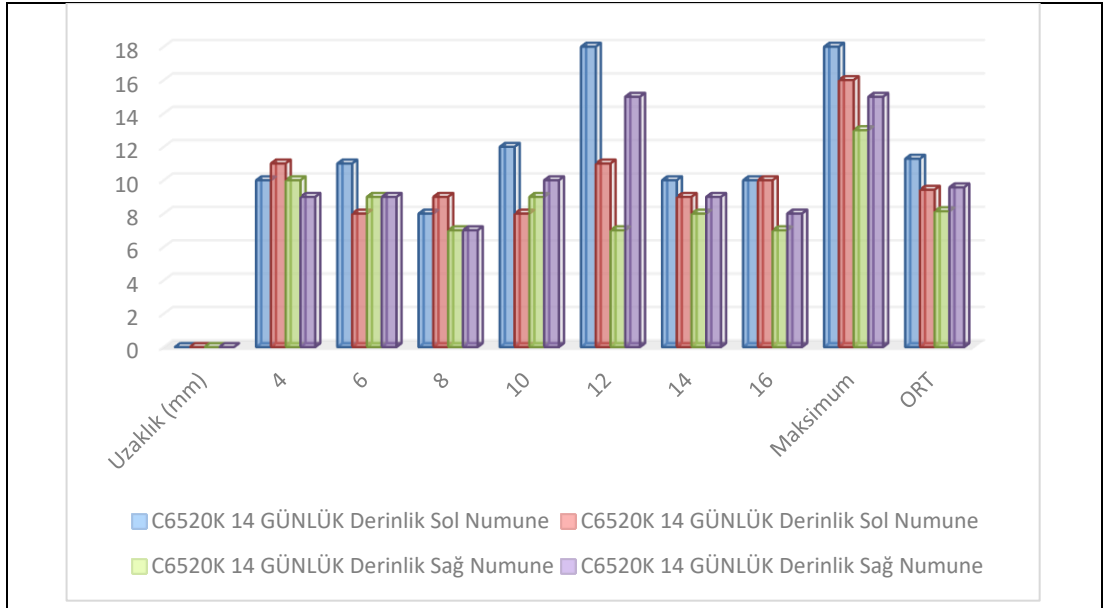
Şekil 4.21: C6500 kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.



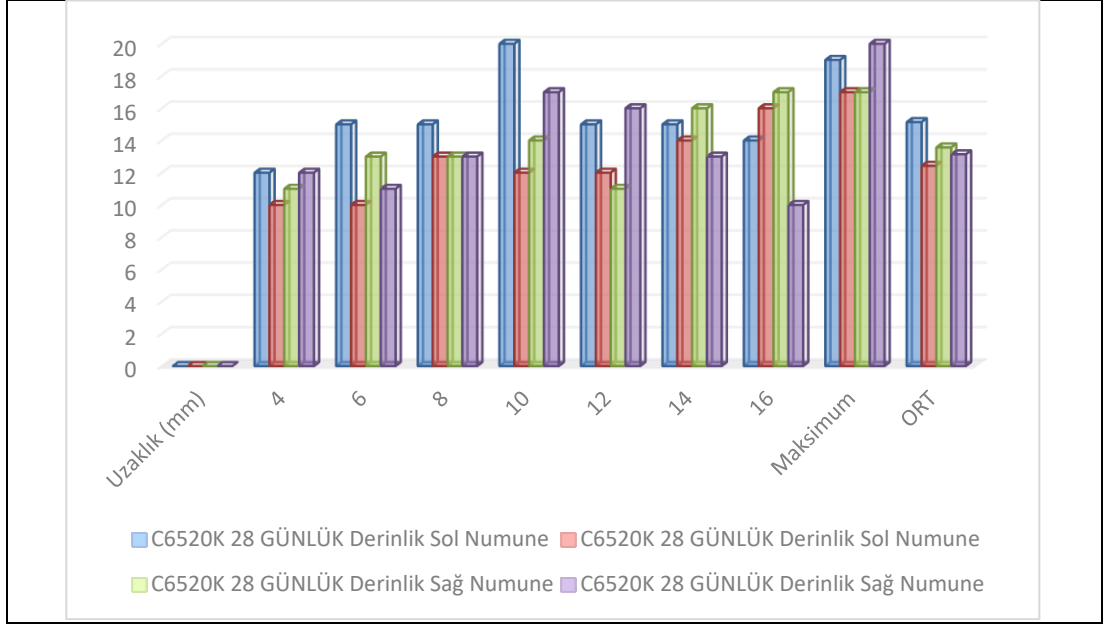
Şekil 4.22: C6500 kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.



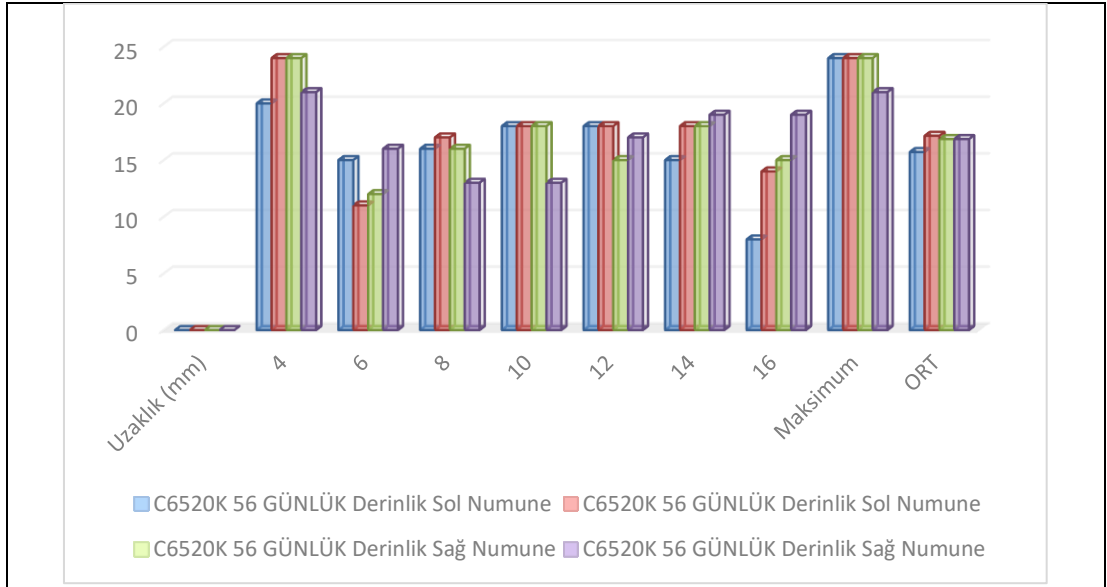
Şekil 4.23: C6520K kodlu numunenin 7 günlük klorür derinliği sonuçları.



Şekil 4.24: C6520K kodlu numunenin 14 günlük klorür derinliği sonuçları.



Şekil 4.25: C6520K kodlu numunenin 28 günlük klorür derinliği sonuçları.



Şekil 4.26: C6520K kodlu numunenin 56 günlük klorür derinliği sonuçları.

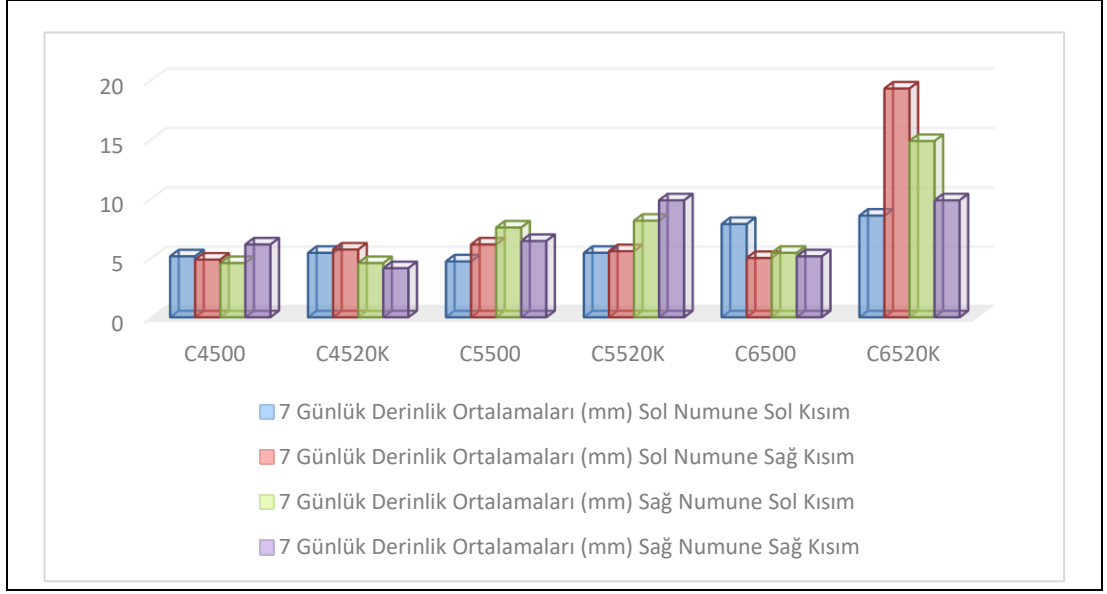
Farklı zaman dilimlerinde (7, 14, 28. gün) farklı su/çimento oranlarına sahip (0.45, 0.55, 0.65) kontrol betonlarının ve k-etkin değeri hesaplanmış cam tozu içeren betonların klorür penetrasyon değerleri karşılaştırılmıştır. 0.45 su/çimento oranına sahip kontrol betonları ile cam tozu içeren beton numunelerinin sonuçları karşılaştırıldığında cam tozu içeren beton numunelerinin klorür penetrasyon değerleri tüm yaşlarda kontrol betonuna göre daha düşüktür. Fakat 0.55 ve 0.65 su/çimento

oranına sahip kontrol betonları ile cam tozu içeren beton numunelerinin sonuçları karşılaştırıldığında kontrol beton numunelerin cam tozu içeren beton numunelerine göre klorür penetrasyonu tüm yaşlarda daha düşüktür. Diğer bir yandan yalnızca su/çimento oranı 0.55 olan numunelerin 56. gündeki klorür penetrasyon derinlikleri karşılaştırılmış olup cam tozlu numuneler de klorür derinliğinin daha az olduğu görülmüştür. Su/çimento oranının artışına (0.50 ve yukarısı) bağlı olarak hem kontrol hem de cam tozu içeren beton numuneler de difüzyon katsayısında artış görülmüştür. Klorür iyonlarının hidratasyon iyonlarından daha hızlı görülmektedir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde cam tozunun boşlukları doldurucu özelliği 0.45 su/çimento oranında 28.günde olumlu sonuçlar vermiştir. Sonuç olarak cam tozunun düşük su/çimento oranlarında ve ilerleyen yaşlarda klorür penetrasyonunu azalttığı yorumu yapılabilir.

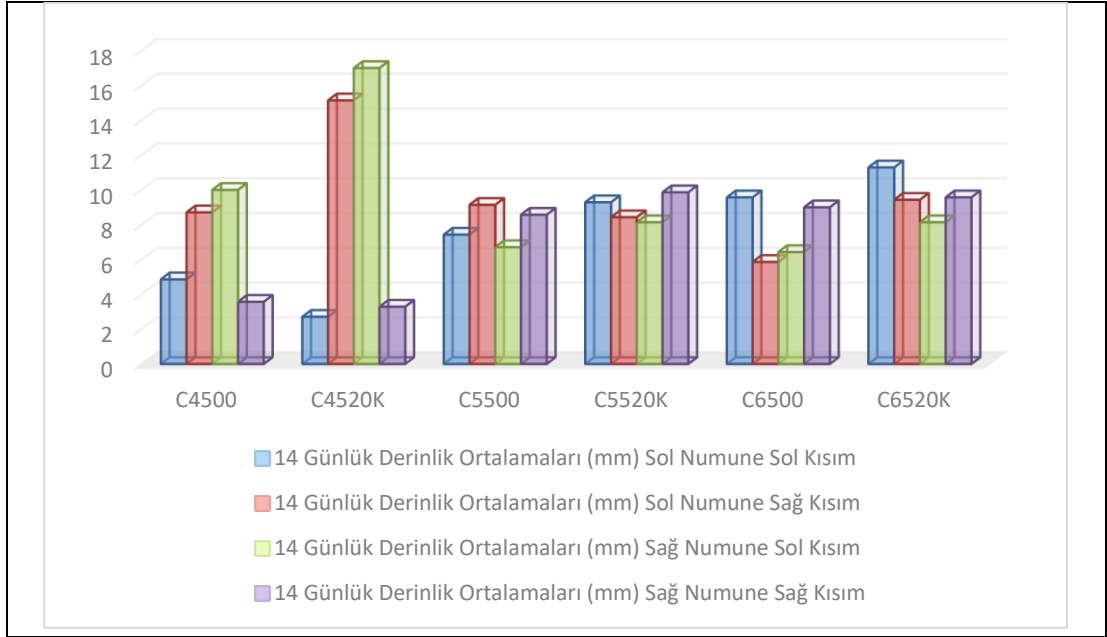
Tablo 4.27: ⁶Tüm numunelerin yaklaşık 300 günlük klorür derinliği ortalamaları.

	300 Günlük Derinlik Ortalamaları (mm)			
	Sol Numune		Sağ Numune	
	Sol Kısım	Sağ Kısım	Sol Kısım	Sağ Kısım
C4500* ⁵⁶	25	26,86	26,57	23,43
C4500*91	24,29	25,57	21,71	26,29
C5500*91	39,29	34,57	33,57	39,14
C6500*56	-	-	-	-
C6500*91	-	-	-	-

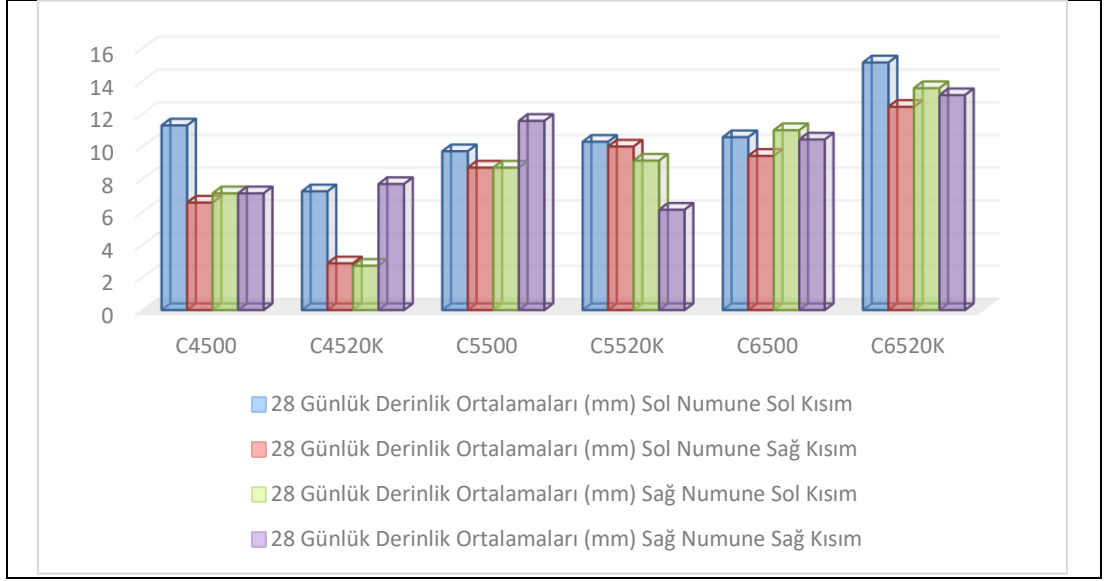
⁶ 56. ve 91. günde yapılması planlanan kontrol betonlarının kolorimetrik deneyleri pandemi nedeniyle tamamlanamamış olup yaklaşık 300 gün sonra klorür derinlik ölçümleri yapılmıştır. 0.45 ve 0.55 su/çimento oranına sahip kontrol betonlarında klorür derinliği artmış olmakla beraber 0.65 su/çimento oranına sahip kontrol betonunda renk değişimi gözlemlenememiştir. Bunun nedeni betonun pH değerinde düşme ve alkalinitedeki azalmadır. EK A' da resimler olarak sunulmuştur.



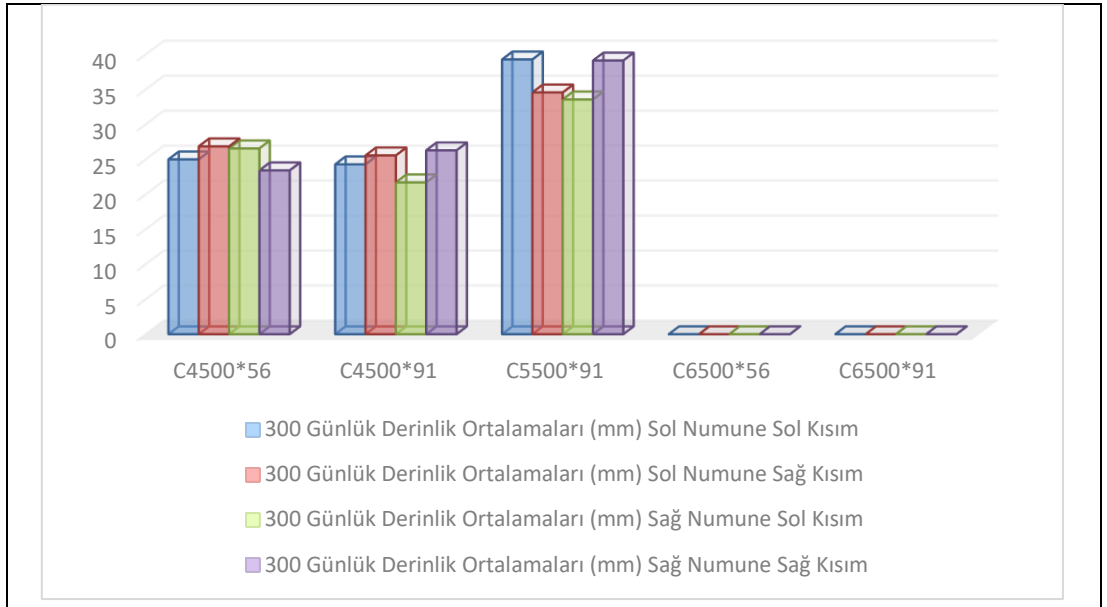
Şekil 4.27: Tüm numunelerin 7 günlük klorür derinliği ortalamaları.



Şekil 4.28: Tüm numunelerin 14 günlük klorür derinliği ortalamaları.



Şekil 4.29: Tüm numunelerin 28 günlük klorür derinliği ortalamaları.



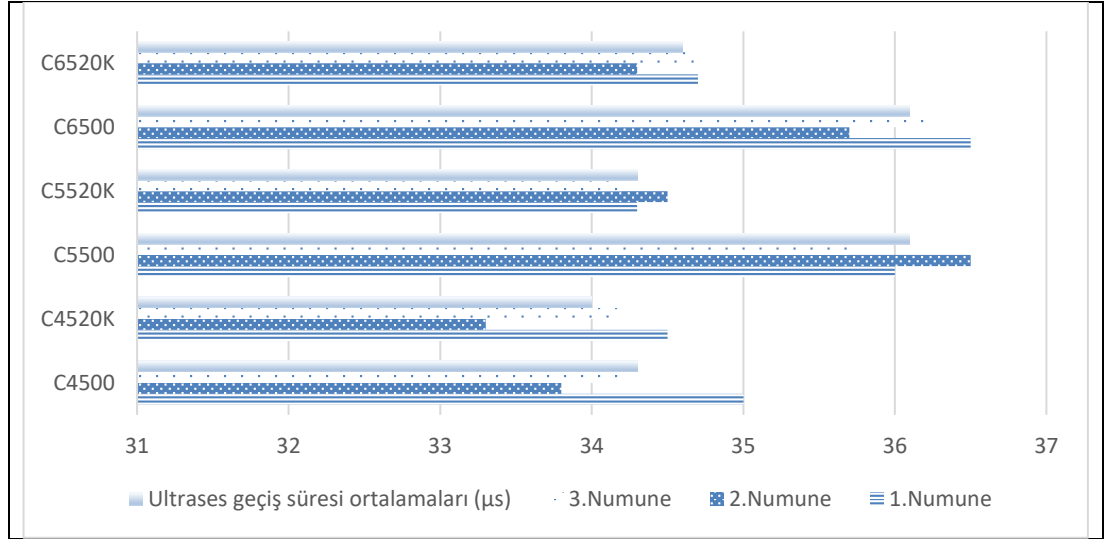
Şekil 4.30: Tüm numunelerin yaklaşık 300 günlük klorür derinliği ortalamaları.

4.3.4. Ultrases Geçiş Süresi

Su/çimento oranlarından yararlanılarak ultrases geçiş süreleri yorumlanmıştır. Ultrases sonuçlarına ait veriler (Tablo 4.28) ve oluşan grafik (Şekil 4.31) verilmiştir.

Tablo 4.28: Ultrases geçiş süresi sonuçları.

	C4500	C4520K	C5500	C5520K	C6500	C6520K
1.Numune	35	34,5	36	34,3	36,5	34,7
2.Numune	33,8	33,3	36,5	34,5	35,7	34,3
3.Numune	34,2	34,2	35,7	34,2	36,2	34,7
Ultrases geçiş süresi ortalamaları (μs)	34,3	34	36,1	34,3	36,1	34,6



Şekil 4.31: Ultrases geçiş süresi ortalamaları.

Su/Çimento oranı arttıkça betonda boşluklar artmakta ve yoğunluk azalmaktadır. Yoğunluğu az olan betonda ultrasesin betonun bir yüzeyinden diğerine ulaşma süresi daha uzundur. Diğer bir ifadeyle betonda boşluğun artmasıyla ultrasonik geçiş hızı yavaşlar, ultrasesin ulaşma süresi artar; boşluğun azalmasıyla, ultrasonik geçiş hızı artar, ulaşma süresi azalır. Tablo yorumlanacak olursa 0.45 (s/ç) oranına sahip kontrol ve k-etkin değeri hesaplanmış cam tozlu betonlarının 0.55 ve 0.65 (s/ç) oranına sahip kontrol ve k-etkin değeri hesaplanmış cam tozlu betonlardan daha yüksek ultrasonik geçiş hızı değerleri olduğu görülmektedir. Düşük su/çimento oranının ve cam tozu katkısının ultrases geçiş hızına olumlu etkisi olduğu görülmüştür.

5. GENEL SONUÇLAR

- Cam tozu kullanımıyla birlikte su/bağlayıcı oranının artması slump değerlerini yükseltmiştir. Bunun nedeni hidrate olan çimento miktarının azalması ve cam tozunun artması sonucunda daha fazla su gereksinimini gerektirmesi ve kıvamda artışa neden olmasındandır. Fakat k-etkinlik değeri hesaplanarak katılan yüksek miktarda cam tozu (%20K) çökme değerlerinde ters etki yaparak kıvamı azaltmıştır. Cam tozunun inceliğinin fazla olması yüzey alanının artmasıyla birlikte Ca(OH)_2 'i azaltarak suyun geçtiği alanı kısıtlar. Suyun geçtiği alanı kısıtlaması çökme değerlerinde azalmaya çimentodan daha düşük özgül ağırlığa sahip olmasıyla da birim ağırlık ve yoğunluk değerlerinde azalma gözlemlenir.
- Cam tozu kullanımı suyun geçtiği boşluk hacmini azaltmıştır. Su absorpsiyonu sınırlandığından dolayı betonda küçülme de azalmıştır. Cam tozu içeren beton numunelerinin suya doymuş, kaynamış ve kuru yoğunluk değerlerinin ise kontrol betonuna göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Cam tozunun inceliğinin fazla olması poroziteyi azaltmış ve ilk sonuçta bahsedildiği gibi daha fazla hidrat ürünlerini oluşturarak karışımın daha yoğun bir yapıya sahip olmasına yardımcı olmuştur.
- Cam tozu kullanımıyla kontrol betonlarına göre su sızdırma derinliği değerleri de düşmüştür. Cam tozunun boşluk hacmini azalttığı bilindiğinden su geçişi de sınırlanmıştır. İlk iki sonuçta bahsedilen şekliyle cam tozu kullanımı ikincil C-S-H jellerini oluşturarak cam tozlu betonların su geçirgenlik değerlerini kontrol betonlarına göre düşürmüştür. Sonuçlar TS EN 206/TS 1315 standartlarında belirtilen maksimum su işleme değeri 50 mm'den düşük ve numunelerin ortalama su işleme derinliği 40 mm'den küçük olmasıyla su geçirimsiz olarak kabul edilmektedir.
- Cam tozu kullanımı düşük su/bağlayıcı oranlarında klorür penetrasyon ortalamalarını kontrol betonlarına göre tüm yaşlarda düşürmüştür. Fakat su/çimento oranı arttıkça tüm yaşlarda klorür penetrasyonlarında artış görülmüştür. Yalnızca 56. günde su/bağlayıcı oranı 0.55 olan numunelerin cam tozu ve kontrol betonuna göre klorür derinliği kıyaslanabilmiş olup cam tozlu numunelerde klorür derinliğinin daha az olduğu bulunmuştur. Bu durumda cam tozu kullanımının ilerleyen yaşlarda klorür penetrasyonunu azalttığı yorumu da

yapılabilir. Su/imento oranının önemi su/bağlayıcı oranın artmasıyla difüzyon geçiş katsayısının da artmasındandır. Bu nedenle yüksek su/bağlayıcı oranlarında derinlik daha fazla olacaktır.

- Cam tozu kullanımı tüm su/bağlayıcı oranlarında ultrases geçiş süresini kontrol betonlarına göre azaltmıştır. Hız süreyle ters orantılı olduğundan süresi artan numunelerin hız değerleri düşük, yoğunluğu daha az boşlukları daha fazla diyebiliriz.

KAYNAKLAR

- Aghaeipour A., Madhkhan M., (2017), "Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP", Construction and Building Materials, 141, 533-541.
- Alex J., Dhanalakhshmi J., Ambedkar B., (2016), "Experimental investigation on rice husk as cement replacement on concrete production", 127, 353-362.
- Aliabdo A. A., Abd Elmoaty A. E. M., Auda E. M., (2014), "Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete", Construction and Building Materials, 50, 28-41.
- Anuk O., (2004), "CEM I 42.5 Çimentolu Düşük Dozajlı Betonlarda F tipi Uçucu Külün Etkinliği", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- ASTM C 642-13, (2020), "Standart Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete".
- ASTM C 597, (2016), "Standart Test Method for Pulse Velocity Through Concrete".
- Bagheri A. R., Zanganeh H., Moalemi M. M., (2012), "Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag", Cement and Concrete Composites, 34, 663-670.
- Canbaz M., Topçu İ. B., (2001), "Uçucu Kül Kullanımının Betondaki Etkileri", Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 14, (2).
- Chen C., Habert G., Bouzidi Y., Jullien A., (2010), "Environmental Impact of Cement Production: Detail of the Different Processes and Cement Plant Variability Evaluation", Journal of Cleaner Production, 18, 478-485.
- Çullu M., Subaşı S., Bolat H., (2010), "Beton Kanseri-Alkali Silika Reaksiyonu", e-Journal of New World Sciences Academy, 5, (3).
- Du H., Tan K. H., (2013), "Use of Waste Glass as Sand in Mortar: Part 1, Fresh-Mechanical and Durability Properties", Cement and Concrete Composites, 35, 109-117.
- Du H., Tan K. H., (2014), "Waste Glass Powder as Cement Replacement in Concrete", Journal of Advanced Concrete Technology, 12, 468-477.
- Elaqra H. A., Abou Haloub M. A., Rustom R. N., (2019), "Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior concrete", Construction and Building Materials, 203, 75-82.
- Engin Y., (2015), "Beton ve Çimentoda Kullanılan Uçucu Külün Özellikleri".
- Erdoğan T.Y., (2013), "Beton, O.D.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü Matbaası".

Ferraro R. M., Nanni A., (2012), “Effect of white rice husk ash on strength, porosity, conductivity and corrosion resistance of white concrete”, *Construction and Building Materials*, 31, 220- 225.

Gholampour A., Ozbakkaloglu T., (2017), “Performance of sustainable concretes containing very high volume Class-F fly ash and ground granulated blast furnace slag”, *Journal of Cleaner Production*, 162, 1407-1417.

Gutiérrez A. S., Eras J. J. C., Gaviria C.A., Caneghem J. V., Vandecasteele C., (2017), “Improved Selection of The Functional Unit in Environmental Impact Assessment of Cement”, *Journal of Cleaner Production*, 168, 463-473.

He F., Shi C., Yuan Q., An X., Tong B., (2011), “Calculation of chloride concentration at color change boundary of AgNO₃ colorimetric measurement”, *Cement and Concrete Research*, 41 (11), 1095-1103.

He F., Shi C., Yuan Q., Chen C., Zheng K., (2012), “AgNO₃ based colorimetric methods formeasurement of chloride penetration in concrete”, *Construction and Building Materials*, 26 (1), 1-8.

Herath C., Gunasekara C., Law D. W., Setunge S., (2020), “Performance of high volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review”, *Construction and Building Materials*, 258, 120606.

Islam G. M. S., Rahman M. H., Kazi N., (2017), “Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice”, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6, 37-44.

Jiang W., Li X., Lv Y., Siang D., Liu Z., He C., (2020), “Mechanical and hydration properties of low clinker cement containing high volume superfine blast furnace slag and nano silica”, *Construction and Building Materials*, 238, 117683.

Kamali M., Ghahremaninezhad A., (2015), “Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials”, *Construction and Building Materials*, 98, 407-416.

Kavas T., Çelik M. Y., Evcin A., (2004), “Cam Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, Türkiye.

Khan M., Ali M., (2019), “Improvement in concrete behaviour with fly ash, silica-fume and coconut fibres”, *Construction and Building Materials*, 203, 174-187.

Khodabakhshian A., Ghalehnovi M., de Brito J., Shamsabadi E. A., (2018), “Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder”, *Journal of Cleaner Production*, 170, 42-60.

Kim M. Y., Yang E., Yi S. T., (2013), “Application of the colorimetric method to chloride diffusion evaluation in concrete structures”, *Construction and Building Materials*, 41, 239-245.

Kocabıyık L., (2010), “Yüksek Fırın Cürufu Mineral Katkısının Betondaki Etkinlik Katsayısının Belirlenmesi ve Betonun Kırılma Parametrelerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Korkmaz Y., (2018), “Alkali Silika Reaksiyonuna Maruz Betonun Yapısal Davranışının Araştırılması”, 2. Uluslararası Mesleki Bilimler Sempozyumu, IVSS, 7(2), 63-73.

Krithika J., Ramesh Kumar G. B., (2020), “Influence of fly ash on concrete: A systematic review”, Materials Today Proceedings, 33, 906-911.

Iğdır Üniversitesi (2019), İnşaat Mühendisliği Bölümü, Laboratuvar Dersi Deney Föyü.

Madandoust R., Ghavidel R., (2013), “Mechanical properties of concrete containing waste glass powder and rice huskash”, Biosystems Engineering, 116, 113-119.

Maejier P. K. D., Craeye B., Snellings R., Kazemi-Kamyab H., Loots M., Janssens K., Nuyts G., (2020), “Effect of ultra-fine fly ash on concrete performance and durability”, Construction and Building Materials, 263, 120493.

Mageswari L. M., Vidivelli B., (2010), “The use of Sheet Glass Powder as Fine Aggregate Replacement in Concrete”, The Open Civil Engineering Journal, 4, 65-71.

Majhi R. K., Nayak Bond A. N., (2019), “Durability and microstructural characteristics of ground granulated blast furnace slag based recycled aggregate concrete”, Construction and Building Materials, 212, 578-598.

Matos A. M., Sousa-Coutinho J., (2012), “Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement”, Construction and Building Materials, 36, 205-215.

Meena A., Singh R., (2012), “Comparative Study of Waste Glass Powder as Pozzolanic Material in Concrete”, Doctoral dissertation, Department of Civil Engineering National Institute of Technology Rourkela.

Mehta A., Kumar Ashish D., (2020), “Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review”, Journal of Buildings Engineering, 29, 100888.

Mehta A., Siddique R., Ozbakkaloglu T., Shaikh F. U. A., Belarbi R., (2020), “Fly ash and ground granulated blast furnace slag-based alkali-activated concrete: Mechanical, transport and microstructural properties”, Construction and Building Materials, 257, 119548.

Mirzahosseini M., Riding K. A., (2014), “Effect of curing temperature and glass type on the pozzolanic reactivity of glass powder”, Cement and Concrete Research, 58, 108-110.

Nicula L. M., Corbu O., Iliescu M., (2020), “Influence of blast furnace slag on the durability characteristic of road concrete such as freeze-thaw resistance”, *Procedia Manufacturing*, 46, 194-201.

Pachideh G., Gholhaki M., Ketabdari H., (2020), “Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties durability and microstructure of the cementitious mortars”, *Journal of Building Engineering*, 29, 101178.

Patel D., Tiwari R. P., Shrivastava R., Yadav R. K., (2019), “Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement in making paste and mortar”, *Construction and Building Materials*, 198, 406-415.

Prošek Z., Nežerka V., Tesárek P., (2020), “Enhancing cementitious pastes with waste marble sludge”, *Construction and Building Materials*, 255, 119372.

Rahma A., El Naber N., Ismail S. I., (2017), “Effect of glass powder on the compression strength and the workability of concrete”, *Cogent Engineering*, 4, 1373415.

Raju S., Kumar P. R., (2014), “Effect of Using Glass Powder in Concrete”, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(5).

Rana A., Kalla P., Csetenyi L. J., (2015), “Sustainable use of marble slurry in concrete”, *Journal of Cleaner Production*, 94, 304-311.

Rashad A. M., (2014), “Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on portland cement”, *Construction and Building Materials*, 71, 340-357.

Redden R., Neithalath N., (2014), “Microstructure, Strength and Moisture Stability of Alkali Activated Glass Powder-Based Binders”, *Cement and Concrete Composites*, 45, 46-56.

Rodier L., Savastano H., (2018), “Use of glass powder residue for the elaboration of eco-efficient cementitious materials”, *Journal of Cleaner Production*, 184, 333-341.

Saran A. G., (2007), “Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Durabilite Özelliklerine Etkisi”, *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*.

Shao Y., Lefort T., Moras S., Rodriguez D., (2000), “Studies on concrete containing ground waste glass”, *Cement and Concrete Research*, 30, 91-100.

Sharma A., Sangamnerkar A., (2015), “Glass Powder – A Partial Replacement for Cement”, *International Journal Of Core Engineering and Management (IJCEM)*, 1.

Shi C., Wu Y., Riefler C., Wang H., (2005), “Characteristic sand pozzolanic reactivity of glass powders”, *Cement and Concrete Research*, 35, 987-993.

Siddika A., Al Mamun Md. A., Alyousef R., Mohammadhosseini H., (2020), “State of the art the review on rice husk ash: A supplementary cementitious material in concrete”, Journal of King Saud University-Engineering Sciences.

Tamanna N., Bin Yakub I., Mohamed Sutan N., (2013), “Utilization of Waste Glass in Concrete”, Conference Paper, 6th International Engineering Conference, Energy and Environment.

TS EN 206-1, (2002), “Beton Standartı”.

TS EN 197-1, (2012), “Çimento Standartı”.

TS EN 12350-2, (2002), “Taze beton deneyleri- Bölüm 2: Çökme (Slump) deneyi”.

TS EN 12390-7, (2002), “Taze beton deneyleri-Bölüm 7: Hava içeriğinin tayini-Basınç metotları”.

TS EN 12390-8, (2019), “Taze betonun test edilmesi-Bölüm 8: Kendiliğinden yerleşen beton-Çökme akış testi” .

TS 802, (1985), “Beton karışım hesapları”.

Uzun M., Çöğürçü M. T., Keski Ü. S., (2018), “Cam Tozunun Beton Basınç Dayanımına Etkisi”, Beykent Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11 (2).

Varadharajan S., (2020), “Determination of mechanical properties and environmental impact due to inclusion of fly ash and marble waste powder in concrete”, Structures, 25, 613-630.

Varadharajan S., Jaiswal A., Verma S., (2020), “Assessment of mechanical properties and environmental benefits of using rice husk and marble dust in concrete”, Structures, 28, 389-406.

Varol O. O., Türkmenoğlu Z. F., (2016), “Betonda Alkali Silis Reaksiyonu”, 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress, Çukurova University, Congress Center, 2080-2085, Adana, Turkey.

Vijayakumar G., Vishaliny H., Govindarajulu D., (2013), “Studies on Glass Powder as Partial Replacement of Cement in Concrete Production”, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3 (2), 153-157.

Wang D., Zhou X., Meng Y., Chen Z., (2017), “Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and sulfate attack”, Construction and Building Materials, 147, 398-406.

Yazıcı H., (2010), “Beton ve Beton Yapılarda Kalıcılık”.

Yuan Q., Shi C., He F., Schutter G., Audenaert K., Zheng K., (2008), “Effect of hydroxylions on chloride penetration depth measurement using the colorimetric method”, Cement and Concrete Research, 38 (10), 1177-1180.

Yüksel C., Mardani-Aghabaglou A., Beglarigale A., Yazıcı H., Ramyar K., Andiç Çakır Ö., (2017), “Bazalt ve Atık Cam Agregalı Betonlarda Alkali-Silis Reaksiyonu Genleşmeleri ve Alkali Sızıntısı Seviyeleri”, İMO Teknik Dergi, 7865-7882.

Web 1, (2020), <https://www.sanalsantiye.com/slump-cokme-deneyi> (Erişim Tarihi: 29/12/2020).

Web 2, (2021), <https://malzemebilimi.net/yasam-dongusu-analizi-nedir.html> (Erişim Tarihi: 04/01/2021).

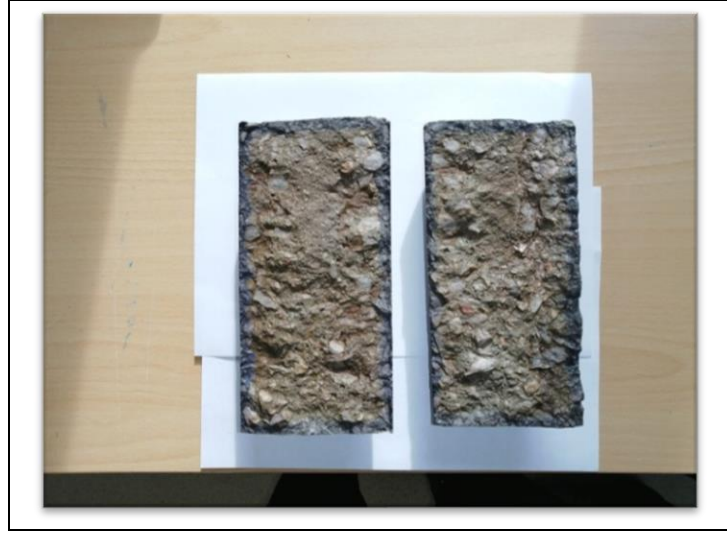
Web 3, (2020), [http://cementurk.com.tr./](http://cementurk.com.tr/) (Erişim Tarihi: 29/12/2020).

ÖZGEÇMİŞ

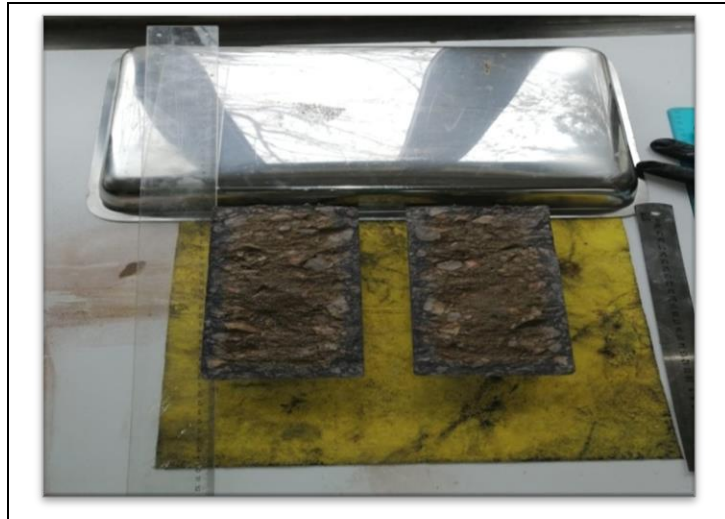
Beyza AYGÜN, 1996 yılında İstanbul’da doğdu. İlkokul öğrenimini Cenap Şahabettin İlköğretim Okulu’nda bitirdi. Liseyi Ahmet Sani Gezici lisesinde tamamladı. 2014 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girdi. 2018 yılında mezun olduktan sonra aynı sene Gebze Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Deprem ve Yapı Mühendisliği Programında yüksek lisans öğrenimine başladı. Öğrenimine halen devam etmektedir.

EKLER

Ek A: Betonda Klorür Geçirgenliği Ölçülen Numunelere Ait Resimler



Şekil A1.1: C4500 kodlu numunenin 28. günlük klorür derinliğinin resimsel olarak gösterimi.



Şekil A1.2: C5500 kodlu numunenin 28.günlük klorür derinliğinin resimsel olarak gösterimi.



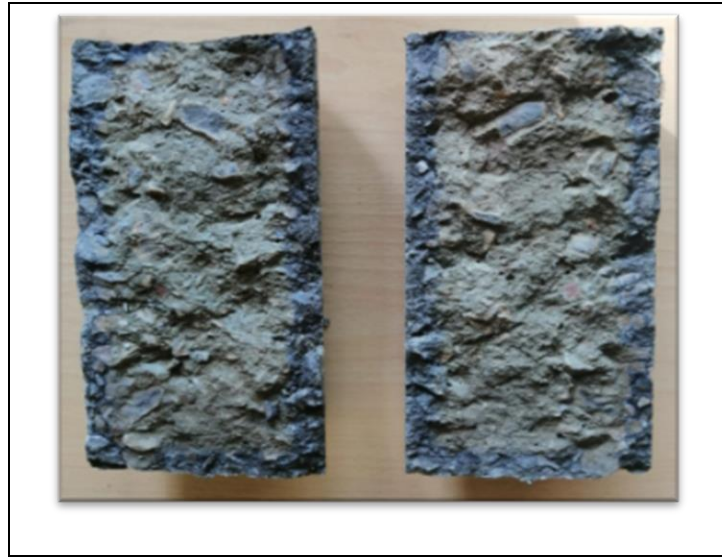
Şekil A1.3: C6500 kodlu numunenin 28. günlük klorür derinliğinin resimsel olarak gösterimi.



Şekil A1.4: C4520K kodlu numunenin 28. günlük klorür derinliğinin resimsel olarak gösterimi.



Şekil A1.5: C5520K kodlu numunenin 28. günlük klorür derinliğinin resimsel olarak gösterimi.



Şekil A1.6: C6520K kodlu numunenin 28. günlük klorür derinliğinin resimsel olarak gösterimi.



Şekil A1.7: C4500 kodlu numunenin yaklaşık 300 günlük klorür derinliğinin resimsel olarak gösterimi.



Şekil A1.8: C5500 kodlu numunenin yaklaşık 300 günlük klorür derinliğinin resimsel olarak gösterimi.



Şekil A1.9: C6500 kodlu numunenin yaklaşık 300 günlük klorür derinliğinin resimsel olarak gösterimi.

EK B: Betonda Su Sızdırma Derinliği Ölçülen Numunelere Ait Resimler



Şekil B1.1: C4500 kodlu numunenin su sızdırmazlık derinliğinin resimsel olarak gösterimi.



Şekil B1.2: C5500 kodlu numunenin su sızdırmazlık derinliğinin resimsel olarak gösterimi.



Şekil B1.3: C6500 kodlu numunenin su sızdırmazlık derinliğinin resimsel olarak gösterimi.



Şekil B1.4: C4520K kodlu numunenin su sızdırmazlık derinliğinin resimsel olarak gösterimi.



Şekil B1.5: C5520K kodlu numunenin su sızdırmazlık derinliğinin resimsel olarak gösterimi.



Şekil B1.6: C6520K kodlu numunenin su sızdırmazlık derinliğinin resimsel olarak gösterimi.