

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UÇUCU KÜLLÜ BETONLARDA KIRMAKUM
İÇERİĞİNİN VE KÜR KOŞULLARININ
BETON ÖZELİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Çağatay ALICI

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Yapı Mühendisliği

MAYIS 2004

**UÇUCU KÜLLÜ BETONLARDA KIRMAKUM
İÇERİĞİNİN VE KÜR KOŞULLARININ
BETON ÖZELİKLERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Çağatay ALICI
(501001146)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Nisan 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Mayıs 2004**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Canan TAŞDEMİR

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Mehmet UYAN

Prof.Dr. Turan ÖZTURAN (B.Ü.)

MAYIS 2004

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, uçucu küllü betonlarda değişik kür şartlarının ve ince agrega olarak kırmakum kullanılmasının betonun mekanik ve geçirimlilik özelliklerine etkileri araştırılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Çalışmalarımı başından sonuna kadar ilgilenip yardımını esirgemeyen ve birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum sayın hocam Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarda kullandığımız malzemeleri edinmemizi sağlayan sayın Gülenden KARA ve SOYAK Hazır Beton A.Ş.'ye teşekkürlerimi iletirim.

Deneylein gerçekleştirilmesi sırasındaki yardımlarından dolayı İ.T.Ü. İnşaat Fakóltesi Yapı Malzemesi Anabilim Dalındaki başta sayın Anıl Ü. DOĞAN olmak üzere tüm araştırma görevlilerine ve başta Murat MEYDAN olmak üzere tüm laboratuvar personeline teşekkür ederim.

Ayrıca hayatım boyunca bana verdikleri destek ve duydukları güvenden dolayı aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2004

Çağatay ALICI

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	VI
ŞEKİL LİSTESİ	VII
SEMBOL LİSTESİ	IX
ÖZET	X
SUMMARY	XII
1. GİRİŞ	1
2. UÇUCU KÜLLERİN ÖZELİKLERİ VE UÇUCU KÜLLERİN BETON ÖZELİKLERİNE ETKİLERİ	3
2.1. Puzolanlar ve Puzolanik Reaksiyon	4
2.2. Uçucu Külün Tanımı	4
2.3. Uçucu Külün Betonda Kullanımı	5
2.4. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması	6
2.5. Uçucu Küllerin Fiziksel ve Kimyasal Yapıları	7
2.6. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri	8
2.7. Uçucu Küllerin Diğer Kullanım Alanları	9
2.8. Uçucu Küllerin Taze Beton Özelliklerine Etkisi	11
2.8.1. İşlenebilme, Su İhtiyacı ve Terleme	12
2.8.2. Priz Süresi	15
2.8.3. Hidratasyon Isısı ve Sıcaklık Yükselmesi	15
2.8.4. Hava Sürüklenme	17
2.9. Uçucu Küllerin Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi	17
2.9.1. Betonun Basınç Dayanımına ve Kırılma Davranışına Uçucu Külün Etkileri	18
2.9.2. Dayanım Kazanımı, Basınç ve Eğilme Dayanımları	19
2.9.2. Elastisite Modülü	20
2.9.3. Sünme ve Rötne	21
2.10. Uçucu Küllerin Ortam Şartlarına Dayanıklılık Özellikleri	22
2.10.1. Geçirimlilik	23

2.10.2. Zararlı Kimyasallara Dayanıklılık	23
2.10.3. Donma-Çözülme Dayanıklılığı	24
2.10.4. Deniz Ortamında Dayanıklılık	24
2.10.5. Donatı Korozyonu	25
2.10.6. Alkali-Agrega Reaksiyonu	25
2.10.7. Karbonatlaşma	25
2.11. Uçucu Küllü Betonlarda Karışım Oranlama Yöntemleri	26
2.11.1. Çimentonun Yerine Kısmi Olarak Uçucu Kül Kullanılması (Basit Yer Değiştirme Yöntemi)	27
2.11.2. Uçucu Külün İnce Agregada Olarak Kullanılması (Ekleme Yöntemi)	27
2.11.3. Uçucu Külün Kısmi Olarak Çimento ve İnce Agregada Yerine Koyulması (Kısmi Yer Değiştirme Yöntemi)	27
2.11.3.1. Modifiye Edilmiş Yer Değiştirme Yöntemi	27
2.11.3.2. Rasyonel Oranlama Yöntemi	28
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29
3.1. Çalışmanın Amacı	29
3.2. Üretilen Betonların Özellikleri	29
3.3. Kullanılan Malzemeler	29
3.3.1. Çimento	29
3.3.2. Uçucu Kül	31
3.3.3. Katkı Maddesi	31
3.3.4. Agregada	31
3.4. Taze Beton Deneyleri	33
3.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri	34
3.6. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	36
3.6.1. Basınç Dayanımı	36
3.6.2. Hacimsel Deformasyon, Poisson Oranı, Çözülme ve Süreksizlik Sınırı	38
3.6.3. Hızlı Klor Geçirimsizliği Deneyi	40
3.6.4. Kılcal Geçirimsizlik Deneyi	41
3.6.5. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi	42
3.6.6. Eğilme Dayanımı Deneyi	43
4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ	44
4.1. Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	44
4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	44
4.2.1. Basınç Dayanımı Sonuçlarının İrdelenmesi	44
4.2.2. Çözülme ve Süreksizlik Sınırı Değerlerinin İrdelenmesi	46
4.2.3. Hızlı Klor Geçirimsizliği Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi	47

4.2.4. Kılcal Geçirimsizlik Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi	49
4.2.5. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi	51
4.2.6. Eğilme Dayanımı Sonuçlarının İrdelenmesi	52
5. GENEL SONUÇLAR	55
5.1. Taze Beton Özellikleri	55
5.2. Sertleşmiş Beton Özellikleri	55
5.2.1. Basınç Dayanımları, Çözülme ve Süreksizlik Sınırları	55
5.2.2. Hızlı Klor Geçirimsizliği	56
5.2.3. Kılcal Geçirimsizlik Katsayıları	56
5.2.4. Ultrases Geçiş Hızları	57
5.2.5. Eğilme Dayanımları	57
KAYNAKLAR	58
EKLER	61
ÖZGEÇMİŞ	79

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1	Puzolanların Sınıflandırılması 4
Tablo 2.2	Uçucu Kül Özellikleri (TS 639) 5
Tablo 3.1	Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri 30
Tablo 3.2	Çimentonun Kimyasal Özellikleri 30
Tablo 3.3	Çayırhan Uçucu Külünün Kimyasal Özellikleri 31
Tablo 3.4	Agregaların Fiziksel Özellikleri 32
Tablo 3.5	Agregaların Elek Analizi 32
Tablo 3.6	Beton Bileşimleri ve Taze Beton Özellikleri 35
Tablo 3.7	28 Günlük Silindir Numunelerin Basınç Dayanımları ve Elastisite Modülleri 36
Tablo 3.8	90 Günlük Prizma Numunelerin Basınç Dayanımları 37
Tablo 3.9	Çözülme ve Süreksizlik Sınırları 38
Tablo 3.10	Çözülme ve Süreksizlik Sınırlarının Basınç Dayanımlarına Oranları 39
Tablo 3.11	90 Günlük Numunelerin Hızlı Klor Geçirimsizlikleri 40
Tablo 3.12	90 Günlük Numunelerin Kılcal Geçirimsizlik Katsayıları 41
Tablo 3.13	90 Günlük Numunelerin Ultrases Geçiş Hızları 42
Tablo 3.14	90 Günlük Numunelerin Eğilme Dayanımları 43
Tablo 4.1	Klor İyonu Geçirimsizliği Sınıfları (ASTM C 1202) 49

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1	Kırmakum/İnce Agrega Oranı %100 Olan Karışımın Granülometrisi 33
Şekil 3.2	K100 Serisi Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği 39
Şekil 4.1	28 Günlük Silindir Numunelerin Basınç Dayanımı 45
Şekil 4.2a	90 Günlük Normal Betonların Basınç Dayanımı 45
Şekil 4.2b	90 Günlük Uçucu Küllü Betonların Basınç Dayanımı 46
Şekil 4.3	28 Günlük Silindir Numunelerin Çözülme Sınırları 47
Şekil 4.4	28 Günlük Silindir Numunelerin Süreksizlik Sınırları 47
Şekil 4.5a	90 Günlük Normal Betonun Hızlı Klor Geçirirliiği 48
Şekil 4.5b	90 Günlük Uçucu Küllü Betonun Hızlı Klor Geçirirliiği 48
Şekil 4.6a	90 Günlük Normal Betonun Kılcal Geçirirlilik Katsayıları 50
Şekil 4.6b	90 Günlük Uçucu Küllü Betonun Kılcal Geçirirlilik Katsayıları 50
Şekil 4.7a	90 Günlük Normal Betonun Ultrases Geçiş Hızları 51
Şekil 4.7b	90 Günlük Uçucu Küllü Betonun Ultrases Geçiş Hızları 52
Şekil 4.8a	90 Günlük Normal Betonun Eğilme Dayanımları 53
Şekil 4.8b	90 Günlük Uçucu Küllü Betonun Eğilme Dayanımları 49
Şekil Ek.1	Kırmakum/İnce Agrega Oranı %75 Olan Karışımın Granülometrisi 62
Şekil Ek.2	Kırmakum/İnce Agrega Oranı %50 Olan Karışımın Granülometrisi 62
Şekil Ek.3	Kırmakum/İnce Agrega Oranı %25 Olan Karışımın Granülometrisi 62
Şekil Ek.4	Kırmakum/İnce Agrega Oranı %25 Olan Karışımın 3 Granülometrisi 63
Şekil Ek.5	K100 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı ... 63
Şekil Ek.6	K100 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı ... 63
Şekil Ek.7	K75 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı 64
Şekil Ek.8	K75 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı 64
Şekil Ek.9	K75 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı 64
Şekil Ek.10	K50 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı 65
Şekil Ek.11	K50 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı 65
Şekil Ek.12	K50 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı 65
Şekil Ek.13	K25 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı 66
Şekil Ek.14	K25 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı 66
Şekil Ek.15	K25 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı 66
Şekil Ek.16	K00 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı 67
Şekil Ek.17	K00 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı 67
Şekil Ek.18	K00 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı 67
Şekil Ek.19	UK100 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poiss. Oranı ... 68
Şekil Ek.20	UK100 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poiss. Oranı ... 68
Şekil Ek.21	UK100 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poiss. Oranı ... 68
Şekil Ek.22	UK75 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı ... 69
Şekil Ek.23	UK75 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı ... 69

Şekil Ek.24	UK75 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı ...	69
Şekil Ek.25	UK50 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı ...	70
Şekil Ek.26	UK50 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı ...	70
Şekil Ek.27	UK50 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı ...	70
Şekil Ek.28	UK25 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı ...	71
Şekil Ek.29	UK25 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı ...	71
Şekil Ek.30	UK25 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı ...	71
Şekil Ek.31	UK00 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı ...	72
Şekil Ek.32	UK00 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı ...	72
Şekil Ek.33	UK00 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı ...	72
Şekil Ek.34	90 Gün Su İçinde Tutulmuş Betonların Basınç Dayanımı	73
Şekil Ek.35	7 Gün Islak Çuval Altında Tutulmuş Betonların Basınç Dayanımı .	73
Şekil Ek.36	90 Gün Laboratuvarında Tutulmuş Betonların Basınç Dayanımı	73
Şekil Ek.37	28 Günlük Silindir Numunelerin Elastisite Modülleri	74
Şekil Ek.38	90 Günlük Normal Betonların Hızlı Klor Geçirimsiliği	74
Şekil Ek.39	90 Günlük Uçucu Küllü Betonların Hızlı Klor Geçirimsiliği	74
Şekil Ek.40	90 Gün Su Kürü Uygulanmış Betonların Hızlı Klor Geçirimsiliği ...	75
Şekil Ek.41	7 Gün Çuval Altında Tutulmuş Betonların Hızlı Klor Geçirimsiliği	75
Şekil Ek.42	90 Gün Laboratuvar Ortamında Tutulmuş Betonların Hızlı Klor Geçirimsiliği	75
Şekil Ek.43	90 Gün Suda Tutulmuş Betonların Kılcal Geçirimsiliği Katsayıları	76
Şekil Ek.44	7 Gün Islak Çuval Altında Tutulmuş Betonların Kılcal Geçirimsiliği Katsayıları	76
Şekil Ek.45	90 Gün Laboratuvar Ortamında Tutulmuş Betonların Kılcal Geçirimsiliği Katsayıları	76
Şekil Ek.46	90 Gün Kirece Doygun Su İçinde Tutulmuş Betonların Ultrases Geçiş Hızları.....	77
Şekil Ek.47	7 Gün Çuval Altında Tutulmuş Betonların Ultrases Geçiş Hızları ...	77
Şekil Ek.48	90 Gün Labotatuvar Ortamında Tutulmuş Betonların Ultrases Geçiş Hızları	77
Şekil Ek.49	90 Gün Kirece Doygun Su İçinde Tutulmuş Betonların Eğilme Dayanımları	78
Şekil Ek.50	7 Gün Çuval Altında Tutulmuş Betonların Eğilme Dayanımları	78
Şekil Ek.51	90 Gün Laboratuvarında Tutulmuş Betonların Eğilme Dayanımları ..	78

SEMBOL LİSTESİ

$\sigma_{\max}$	: Basınç Dayanımı
σ_{ϕ}	: Çözülme Sınırı
σ_s	: Süreksizlik Sınırı
E	: Elastisite Modülü
ε_b	: Boyuna Şekil Değişirme
ε_e	: Enine Şekil Değişirme
ν	: Poisson Oranı
$\Delta V/V_0$	: Hacimsel Şekil Değişirme
P	: Yük
A	: Yükün Etkidiği Alan
W	: Mukavemet Momenti
l	: Mesnetler Arası Açıklık
b	: Yükün Etkidiği Kesitin Genişliği
h	: Yükün Etkidiği Kesitin Yüksekliği
σ_e	: Eğilme Dayanımı
q	: Birim Alandan Emilen Su Miktarı
k	: Kılcal Geçirimsizlik Katsayısı
t	: Zaman

ÖZET

Kendi başlarına bağlayıcı özellik göstermeyen uçucu küller, çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kireci kullanarak bağlayıcı özellik kazanmaktadırlar. Uçucu kül pek çok nedenden dolayı betonda kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları, işlenebilirliğe, dayanıklılığa ve uzun sürede dayanıma olumlu etki yapmasıdır. Diğer yandan çok ince malzeme içeren kırmakum daha dolu ve dayanımı yüksek bir beton üretilmesini sağladığı için betonda kullanılmaktadır. Böylece kırmataşın üretimi sırasında elde edilen kırmakum ekonomiye kazandırılmış olmaktadır. Bu çalışmada, uçucu küllü betonlarda kırmakum içeriğinin ve kür şartlarının beton özelliklerine etkileri araştırıldı.

Bağlayıcı miktarının hepsi çimento olan normal beton ve uçucu kül/çimento oranı 0,30 olan uçucu küllü beton olmak üzere kırmakum/ince agrega oranları %0, %25, %50, %75, %100 olan toplam 10 seri beton üretildi. Bütün karışımlarda, bağlayıcı miktarı 300 kg/m^3 , su/bağlayıcı miktarı ise 0,65'te sabit tutuldu. $180 \pm 20 \text{ mm}$ 'lik bir çökme sağlamak için bir normal akışkanlaştırıcı kullanıldı. Her seride 3 adet $150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ boyutlarında silindir, 3 adet $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ boyutlarında silindir ve 12 adet $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ boyutlarında prizmadan oluşan 18 adet numune elde edildi.

Bu numuneler, deney günlerine kadar 3 farklı kür ortamında tutuldu. Bir kısmı sürekli $+23 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kirece doymun su içinde, bir kısmı ilk 7 gün ıslak çuval altında daha sonra $+20^\circ\text{C}$ sıcaklıkta ve $\%65 \pm 5$ bağıl nemli laboratuvar ortamında, bir kısmı da sürekli $+20^\circ\text{C}$ sıcaklıkta ve $\%65 \pm 5$ bağıl nemli laboratuvar ortamında tutuldu. Numuneler üzerinde standart basınç dayanımı, hızlı klor geçirimsiliği, kılcal geçirimsilik, ultrases hızı, eğilme dayanımı ve eğilme deneyinden kalan numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyleri yapıldı.

Basınç dayanım deneyleri 28.günde sürekli $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kirece doymun su içinde kalmış $150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ boyutlarındaki silindir numuneler üzerinde yapıldı. Uçucu küllü betonların basınç dayanımlarının daha düşük olduğu gözlemlendi. Kırmakum içeriği arttıkça basınç dayanımlarının arttığı görüldü.

3 ayrı kür ortamında 90 gün saklanan $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ bayutlarındaki silindir numuneler, 5 cm yüksekliğinde kesilerek disk haline getirildi ve hızlı klor geçirimsiliği deneyinde kullanıldı. Kirece doymun su içerisinde saklanan uçucu küllü betonların hızlı klor geçirimsiliklerinin normal betonlarınkinden çok daha düşük olduğu görüldü. Hem normal betonlarda hem de uçucu küllü betonlarda hızlı klor geçirimsiliklerinin kırmakum içeriğinin artmasıyla azaldığı gözlemlendi.

Yine 3 ayrı kür ortamında 90 gün saklanan $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ boyutlarındaki prizma numunelerden 3 tanesi 3 eşit parçaya kesilip kılcal geçirimsilik deneyinde, 9 tanesi ise ultrases, eğilme ve basınç dayanımı deneylerinde kullanıldı. Betonların ultrases geçiş hızlarının, eğilme dayanımlarının ve basınç dayanımlarının kırmakum içeriğinin artışıyla arttığı gözlemlendi. Bu da, kırmakum içeriğindeki artışla betonların

kompozitlerinin arttığını göstermektedir. Kür koşulları açısından incelendiğinde, normal betonlarda, laboratuvar ortamında saklanmış numunelerin deney sonuçları diğer 2 kür ortamındaki numunelerin deney sonuçlarından olumsuz olmuştur. Uçucu küllü betonlarda ise, kirece doymuş su içinde saklanan numuneler diğer 2 kür ortamında saklanmış numunelerden daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu da, uçucu külün pozolanik reaksiyon için suya daha çok ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

THE EFFECTS OF CRUSHED SAND CONTENT AND CURING CONDITIONS ON THE PROPERTIES OF THE FLY ASH CONCRETES

SUMMARY

Fly ash, that does not have cementitious properties itself, reacts with the calcium hydroxide given out at the hydration reaction of cement, and performs a binding property. Fly ash is used in concrete for many reasons. It increases the workability and has positive effects on durability. Fly ash concretes also have high, long-term strength. On the other hand, crushed sand which contains very fine materials is used in concrete to a better packed concrete with high strength. Thus, the crushed sand is a by-product that is obtained at the crushed stone production is put into use. In this study, the effects of crushed sand content and different curing conditions on the properties of the fly ash concretes were investigated.

Concretes incorporating only cement as a binder were called normal concretes while the ones produced with a fly ash/cement ratio of 0,30 were called the fly ash concretes in the study. In all the mixtures, the binder content and water/binder ratio were kept constant at 300 kg/m^3 and 0,65 respectively. A normal plasticizer was used to maintain approximately the same slump of $180 \pm 20 \text{ mm}$. A total of 10 concrete series with the crushed sand/fine aggregate ratios of %0, %25, %50, %75, %100 were produced. In each series, a total of 18 specimens which consist of three $150\text{mm} \times 300\text{mm}$ cylindrical specimens, three $100\text{mm} \times 200\text{mm}$ cylindrical specimens and twelve $70\text{mm} \times 70\text{mm} \times 280\text{mm}$ prismatic specimens were obtained.

The specimens were kept under three different curing conditions. Some of them were kept in $+23 \pm 2^\circ\text{C}$ water, some were kept under sacking at the first seven days then kept at $+20^\circ\text{C}$ and $\%65 \pm 5$ moisture at the laboratory conditions, and some of them were kept permanently at $+20^\circ\text{C}$ and $\%65 \pm 5$ moisture at the laboratory conditions.

Compressive strength, rapid chloride permeability, capillar permeability, ultrasound pulse velocity, bending strength and compressive strength (on pieces remaining from the bending tests) tests were conducted on the specimens.

Compressive strength test was applied at the 28th day on $150\text{mm} \times 300\text{mm}$ cylindrical specimens that have been kept permanently in $+23 \pm 2^\circ\text{C}$ water. It was observed that the compressive strengths of fly ash concretes were less than that of normal concretes. It was found that compressive strengths were increased with the increase in crushed sand content.

$100\text{mm} \times 200\text{mm}$ cylindrical specimens kept in 3 different curing conditions were cut into discs of 5 cm height and used in rapid chloride permeability test. It was observed that rapid chloride permeability of fly ash concretes cured in water were less than that of normal concretes. It was also determined that rapid chloride permeability of both normal and fly ash concretes were decreased with the increase in crushed sand content.

Three of the 70mmx70mmx280mm prismatic specimens cured in different conditions for 90 days were cut in three equal pieces and used in the capillar permeability test. The other nine samples were used in ultrasound pulse velocity, bending strength and compressive strength tests. It was observed that ultrasound pulse velocity, bending strength and compressive strength of the concretes were increased with the increase in crushed sand content. Considering the curing conditions, in the normal concretes, the results of the specimens fully kept under laboratory conditions were not as favorable as the ones kept under the other two curing conditions. Furthermore the specimens kept in water gave better results than those kept under the other two curing conditions. This means that the fly ash needs water for the pozzolanic reaction.

1 GİRİŞ

Gelişen ülke ekonomilerine paralel olarak enerji tüketiminin ve nüfusun artması enerji gereksinimini daha arttırmaktadır. Bu gereksinimi karşılamak için başvurulan çözümlerden biri olan kömüre dayalı termik santraller, ekolojik sorulara yol açabilen uçucu kül üretimini arttırmaktadır. Santrallerden elde edilen bu uçucu küllerin beton içerisinde kullanılması hem ekonomik hem çevresel açıdan önem kazanmaktadır. Diğer yandan beton bileşimlerinde ince agrega olarak kullanılan doğal kumun elde edilmesinin güçleştiği bilinmektedir. Bunun yerine günümüzde beton üretiminde iri agrega olarak kullanılmakta olan kırmataşın üretimi sırasında elde edilen kırnakumun kullanılması daha ekonomik olmakta ve betonun mekanik özelliklerinde artış sağlamaktadır.

Modern termik santrallerde en önemli atık malzeme, yanma nedeni ile baca tarafından çekilen gazlarla birlikte yukarıya sürüklenen çok ince kül parçacıklarıdır. Bu ince kül parçacıkları elektrofiltrelerde ve siklonlarda yakalanmakta, baca gazları ile atmosfere çıkışları önlenmektedir. Bu şekilde elde edilen ince küle uçucu kül adı verilmektedir.

Uçucu külün beton içinde kullanılmasının, kimyasal ve fiziksel etkileri dolayısıyla taze ve katı beton özelliklerine katkısı olur.

Betonda uçucu külün çimento ile etkileşimi pek çok etmene bağlıdır ve bu nedenle oldukça karmaşıktır. Bu etmenlerin bazıları öncelikle çimentonun cinsi, çimento dayanım sınıfı, uçucu külün hesaplanmasında yerine getirilmesi zorunlu ilgili şartlar, taze betonun işlenebilirliği, dayanıklılık ve uzun sürelilik gibi özelliklerdir. Son yıllarda özellikle uzun süreklilik/dayanıklılık özelliğine artan bir önem verilmektedir.

1970 yılında ilk kez bir uçucu küle katkı maddesi olarak yapı denetimsel açıdan izin verildi. 1984 yılından beri uçucu kül DIN 1045'e göre, su/çimento değeri ve asgari çimento miktarına bağlı belirli koşullar altında beton katkı maddesi olarak onay belgesine sahiptir [1].

Yapı mühendisliği uygulamalarında geniş bir paya sahip betonun üretiminde hızla tükenmekte olan yuvarlak çakıl iri agregasını bulup kullanmak zorlaşmaktadır. Çünkü hem ekonomik sebepler hem de doğal kaynakların azalması bunu olanaksız hale getirmektedir. Bu nedenle beton üretiminde kullanılan iri agregaların büyük bölümü taş ocaklarından sağlanan kırmataştır.

Şekilleri çakıllar kadar düzgün olmayan kırmataşlar ile agregaların kompasitesini arttırmak için kırmakum gibi ince malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır. 1980'lerde hazır beton sektörünün gelişimi ile beraber ekonomik nedenlerle kırmakum kullanılmaya başlamıştır. Böylece kırmataş üretilirken elde edilen kırmakum ekonomiye kazandırılmış olmaktadır. Mekanik özellikleri çakılardan daha iyi olan kırmataş ve kırmakum kullanımıyla betonun da mekanik özellikleri iyileştirilmiş olur. Yapılan araştırmalar, kırmakumun şekil ve yüzey özellikleri nedeniyle agrega matris arayüzeyini güçlendirdiğini göstermektedir. Kırmakumda 75 mikronluk elekten geçen malzeme mikrofiller malzeme olarak kabul edilmektedir. Bu mikrofiller malzemelerin betonda su ihtiyacını arttırdığı bilinmektedir. Ayrıca alkali agrega reaksiyonuna neden olan bazı doğal kumların yerine kırmakum kullanılmasıyla da bu reaksiyon engellenebilmektedir.

Bu çalışmada, ince agrega olarak değişik oranlarda kırmakum kullanılarak uçucu küllü ve uçucu kül içermeyen normal betonlar üretilmiş; numuneler 3 farklı kür ortamında saklanarak uçucu küllü betonlarda kırmakum içeriğinin ve kür şartlarının betonun mekanik özelliklerine, klor geçirimliliğine ve kılcal geçirimliliğe etkileri araştırılmıştır.

2 UÇUCU KÜLLERİN ÖZELİKLERİ VE UÇUCU KÜLLERİN BETON ÖZELİKLERİNE ETKİLERİ

Kömüre dayalı termik santraller ülkemizdeki elektrik enerjisinin önemli bir bölümünü üretmektedir. Bu üretim sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan uçucu küller birçok ekolojik ve ekonomik soruna neden olabilmektedirler. Bu olası olumsuzluklar uçucu küllerin kullanılmasıyla azaltılabilir. Uçucu küllerin kullanım olanağı bulunan alanlardan birisi de çimento endüstrisidir.

Yeni çimento standartlarının kabul edilmesiyle Portland Uçucu Küllü Çimentolarda, Portland Kompozit Çimentolarda ve Kompozit Çimentolarda çeşitli miktarlarda uçucu kül kullanma olanağı doğmuştur.

Termik santrallerde kullanılan taş kömürlerin %10-15'i linyit kömürlerinin ise %20-40'ı küldür. Termik santralin 1 kWh'lık enerji üretimi yaklaşık 110g külün atık madde olarak ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, 1000 MW'lık bir santralden bir yılda yaklaşık 650000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir.

Türkiye toplam uçucu kül üretimi yaklaşık 15 milyon ton/yıl'dır.

Tüm dünyada çimentoda daha fazla mineral katkı kullanılması yönünde artan bir eğilim bulunmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, uçucu küllerin çimentoda kullanılması ile klinkerizasyon enerjisinde, öğütme enerjisinde ve kurutma enerjisinde tasarruf sağlanacak, ürün çeşitliliği sağlanacak ve üstün özelliklere sahip çimento elde edilebilecektir.

Maliyet açısından bakıldığında, kullanılacak olan uçucu kül miktarı ve tipine göre değişecek olmakla birlikte,

-sabit bir mamul madde(çimento) miktarı için daha az klinker üretimi

-tras ve cüruf gibi mineral katkılara kıyasla, zaten ince olan tane boyutları nedeniyle daha az öğütme enerjisi gereksinmesi

-yine tras ve cüruf gibi katkılarda gerekebilecek ön kurutmaya ihtiyaç göstermemesi uçucu külle sağlanacak olan olası tasarrufların gerekçeleridir [2].

2.1 Puzolanlar ve Puzolanik Reaksiyon

Puzolanlar modern beton teknolojisinde yaygın olarak kullanılan doğal veya yapay mineral katkılardır.

Puzolan, kendi kendine bağlayıcılık karakteri çok az olan veya hiç olmayan ancak ince olarak öğütülmüş halde ve ortamda nem bulunması halinde kalsiyum hidroksitle normal sıcaklıklarda reaksiyona girerek bağlayıcı nitelikleri olan bileşikler meydana getirme yeteneğine sahip silisli veya silisli ve alüminli bir malzeme olarak tanımlanır [2]. Puzolanların sınıflandırılması Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Puzolanların Sınıflandırılması [3]

Puzolanlar	
Doğal Puzolanlar	Yapay Puzolanlar
1- Volkanik Kül	1- Uçucu Kül
2- Volkanik Tüfler	2- Yüksek Fırın Cürufu
3- Diyatome Toprağı	3- Silis Dumanı
4- Ponza Taşı	4- Pişirilmiş Kıl
5- Killi Şişt	5- Demirli Olmayan Cüruf
6- Traslar	6- Pirinç Kapçığı Külü
7- Opalin Silika	

2.2 Uçucu Külün Tanımı

En önemli yapay puzolanlardan biri olan uçucu kül enerji üretmek amacıyla kurulan termik santrallerde toz halinde veya pulverize(öğütülmüş) taşkömürü ya da linyitin yüksek sıcaklıklarda yakılması sonucu ortaya çıkan baca gazlarıyla sürüklenen elektrofiltre ve siklonlarda havaya çıkışı engellenerek biriken toz halindeki puzolanik

niteliğe sahip silisli ve alümino silisli atık maddesidir. Çimento inceliğinde olan bu malzemenin genel olarak puzolanik özeliği vardır.

Kömür külünün bileşiminin ağırlıkça %10 ile %20'sini kömür oluşturur. Kömürün yanmasından elde edilen her kül uçucu kül değildir. Belirli bir kısmı taban külü diye anılır [4].

TS 639'da belirtilen uçucu kül özellikleri Tablo 2.2'de gösterilmektedir.

Tablo 2.2 Uçucu Kül Özellikleri (TS 639)

Özelik	Standart Sınırları
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq \%70$
MgO	$\leq \%5$
SO_3	$\leq \%5$
Rutubet	$\leq \%3$
Kızdırma Kaybı	$\leq \%10$
İncelik (Blaine)	$\geq 3000 \text{ cm}^2/\text{gr}$
P.A.İ.	$\geq \text{kontrolün } \%70$

Uçucu kül, termik santrallerde ince öğütülmüş kömürlerin yakılmasından sonra bacadan atılan gazlardan elektrostatik filtrelerle ayrılır. ASTM'ye göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar. F sınıfı puzolanik, C sınıfı ise %10'u geçebilen kireç miktarı dolayısı ile hem puzolanik hem de bağlayıcılık özeliği gösterebilmektedir [5].

C sınıfı uçucu küller yüksek kireçli uçucu küllerdir. Linyit veya bitüm miktarı düşük kömürden elde edilmektedir. F sınıfı uçucu küller ise düşük kireçli küllerdir. Bu kömürler ise bitümlü kömürden elde edilmektedir.

2.3 Uçucu Külün Betonda Kullanımı

Uçucu küller beton üretiminde iki yoldan kullanılmaktadırlar. Birinci yöntemde puzolan, belirli oranda uçucu kül içeren katkıli portland çimentosu kullanımıyla betona katılmış olur. İkinci yöntemde ise uçucu kül betona karıştırma sırasında çimentoya ilave ya da ikame olarak katılır [6].

Uçucu küller puzolanik aktivite gösterirler. Çoğu uygulamada uçucu külün betona katılmasının amacı aşağıdaki faydaların bir veya birkaçıdır:

- çimento miktarı azalmasıyla maliyet azaltmak
- düşük hidrasyon ısısı elde etmek
- işlenebilirliği arttırmak(su ihtiyacını arttırmadan)
- 90 gün sonrasındaki yaşlarda istenen yüksek beton mukavemetlerine ulaşmak

Uçucu kül betonda birden fazla rol oynar. Taze karışım halinde, ince agrega gibi davranır ve belli ölçülerde su miktarını düşürebilir. Sertleşmiş halde, puzolanik özeliğinden dolayı, bağlayıcı matrisin bir bileşeni olur ve dayanım ve dayanıklılığı etkiler [7].

Taşdemir ve diğ., uçucu külün erken yaşlarda mukavemete etkisinin fazla olmadığını bunun da puzolanik reaksiyondaki gecikmeden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır [8].

Daha çok bağlayıcı ürün oluşması mukavemet artışına neden olurken, serbest kirecin azalması ve hamur boşluk yapısının iyileştirilmesi geçimsizliği ve dolayısıyla zararlı dış etkilere dayanıklılığı arttırmaktadır [6].

2.4 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Kimyasal yapıları bakımından ise uçucu külleri 3 ana sınıfa ayırmak mümkündür.

- Siliko-Alüminoz Uçucu Küller:

Yapılarının büyük bir kısmını (%80-%90) silis (SiO_2) ve bir miktar alümin (Al_2O_3) meydana getirmektedir. Kireç ile birlikte sulu ortamda mükemmel bir bağlayıcı oluşturmaktadırlar. Genellikle taş kömürü uçucu külleridirler.

- Siliko-Kalsik Uçucu Küller:

Yapılarındaki ana oksitler silis (SiO_2) ve kireç (CaO)'tir. Diğer bir değişle zayıf bağlayıcı özellikleri vardır [9].

- Sülfo-Kalsik Uçucu Küller:

Yapısının büyük bir bölümü kükürt oksit (SO_3) ve kireçten (CaO) oluşmaktadır. Puzolanik etkinlikleri zayıf olan bu küllerin ileri yaşlarda mukavemetleri pek artmaz. Bazı tür linyitlerin uçucu külleri bu sınıfa girmektedirler [9].

ASTM C 618'e göre uçucu kül, iki kategoriye ayrılmaktadır:

- F tipi uçucu kül antrasit ve bitümlü kömürün yanmasından elde edilir. Genellikle %10'dan daha az CaO içerir ve düşük kireçli veya düşük kalsiyumlu uçucu kül olarak adlandırılırlar.

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%70 \rightarrow \text{F sınıfı}$

- C tipi uçucu kül linyit ve bitümlü olmayan kömürün yanmasından elde edilir. %15'ten %35'e kadar CaO içerir ve yüksek kireçli veya yüksek kalsiyumlu uçucu kül olarak adlandırılırlar.

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%50 \rightarrow \text{C sınıfı}$

Düşük kireçli uçucu küller puzolanik özeliğe sahiptirler. Yüksek kireçli küller ise bir yandan puzolanik özellik gösterirken, içerdikleri serbest kireç, anhidrit, trikalsiyum alüminat, amorf alümina v.b. nedeniyle kendi başlarına da bağlayıcı özeliğe sahip olabilirler [10].

Düşük kalsiyumlu uçucu kül genelde küresel şekliyle ince malzeme gibi davranır. Yüksek kalsiyum içeren uçucu kül genellikle daha fazla reaktif olduğu için, hidrasyon ısını düşürmede düşük kalsiyum içeren kadar etkili olmamaktadır [11].

2.5 Uçucu Küllerin Fiziksel ve Kimyasal Yapıları

Elde edilen atık malzemenin %75 ile %80'ini oluşturan ve açık bejden kahverengine, griden siyaha kadar değişik tonlarda olabilen uçucu küllerin renkleri genel olarak gri veya kiremit kırmızısı rengindedir. İçinde yanmamış karbon miktarı arttıkça uçucu küllerin renkleri koyulaşır.

Bir uçucu külün tane boyutları termik santraldeki kül toplama yöntem ve ekipmanına bağlıdır. Tipik olarak küresel şekle sahip olan uçucu kül parçacıklarının çapları 0.5-150 μm arasında değişim göstermektedir. Bu taneciklerin çoğunluğunun çapı 45 μm 'den daha azdır. Uçucu küllerin yoğunluğu genelde 2.2–2.8 gr/cm^3 aralığında değişmektedir [12].

Uçucu küller ya da pulverize yakıt külleri, özellikle elektrik üretim tesislerinin pulverize kömür ile işleyen fırınlarının toz tutma ünitelerinden sağlanan malzemelerdir. Küresel biçimde olup, SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içerirler. Genellikle uçucu küllerin %85'ini SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO ve MgO oluşturur. Puzolanik maddeler gibi Ca(OH)_2 ile tepkimelerinde hidrolik bağlayıcı nitelik kazanırlar. Diğer taraftan yanmış karbon kalıntılarını da içermesi olasıdır. Bu da çimentonun düşük direncine ve betonun dayanıklılığına olumsuz yönde etki yapar. Uçucu küllerin özgül yüzeyi ne kadar büyükse reaktivitesi de o kadar yüksektir [13].

Şimdiye kadar yapılan araştırmalar sonucu uçucu küllerin özgül yüzeylerinin 1800-5000 cm^2/g arasında değiştiğini göstermektedir [10].

Küresel tanelerin yoğunluğu büyüklüklerine(boyutlarına) bağlıdır. Boyutu küçülttükçe yoğunluğu artar. Genel kural olarak uçucu kül yoğunluğu düştüğü zaman külün puzolanik aktivitesinin düşmesi beklenir [4].

2.6 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

a) Tanecik Şekli

Bir uçucu külün tanecik şekli ve şekil özellikleri, kömürün kaynak ve üniformluğuna, yanmadan önceki toz haline getirilme derecesine, yanma ortamına, yanmanın üniformluğuna ve kullanılan toplama sisteminin mekanik ayırıcılı, biriktirici filtreli veya elektrostatik çöktirici olup olmadığına, yani toplama sisteminin tipine bağlıdır [13].

b) İncelik

Uçucu küldeki tek tanelerin maksimum boyutu 1mm'nin biraz üstündeki değerlere ulaşabilir. C ve F sınıfı küllerin tanecik boyutu dağılımı hakkındaki bilgiler, büyük oranda 10 μm 'den ufak taneciklerin dayanım üzerinde pozitif etkisi olduğunu göstermiştir [14].

Şengül ve diğerleri, çimentonun çok ince öğütülmüş (Blaine Özgül Yüzeyi = 604 m^2/kg) uçucu kül ile %40'a kadar kısmi yer değiştirilmesi ile 28 günlük kür süresinde, uçucu kül içeren betonların dayanımlarının uçucu kül içermeyenlere göre çok az düşüşler gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Bu miktarın ötesinde ise dayanımda azalma olmuştur. Düşük su/bağlayıcı oranlarında da belirgin sonuçlar elde edilmiştir. Dayanım, çimentonun uçucu külle %70 yer değiştirmesine rağmen, 28 günlük basınç dayanımında 34 MPa'a ulaşılmıştır [15].

Son deneysel çalışmalar, kullanılan uçucu külün inceliğinin artmasıyla, uçucu küllü betonlarının karakteristik dayanımlarının arttığını göstermiştir [16].

c) Özgül Ağırlık:

Katı uçucu kül taneciklerinin özgül ağırlığı 1.97 ile 3.02 g/cm^3 arasında değişmekte, fakat genelde 2.2 ile 2.8 g/cm^3 arasında bir değer almaktadır.

100 μm veya daha büyük ortalama tane çapına sahip uçucu küller maksimum 1.5–2.0 g/cm^3 arasında özgül ağırlığa sahiptir. 50 μm veya daha küçük ortalama tane çapına sahip uçucu küller 2.0-2.5 g/cm^3 özgül ağırlığa sahiptirler [17]. Yani yüksek özgül ağırlık çoğu zaman ince taneciklerin göstergesidir. F sınıfı küllerin C sınıfı küllere göre daha büyük özgül ağırlığa sahip olma eğiliminde olduğu belirtilmektedir.

2.7 Uçucu Küllerin Diğer Kullanım Alanları

Uçucu kül kimyasal, minerolojik ve puzolanik özellikleri nedeniyle inşaat sektöründe pek çok alanda kullanılmaktadır.

1-Yol Yapımındaki Uygulamalarda

Uçucu kül yollarda ve jeoteknik uygulamalarda şu amaçlar için kullanılır:

-Dolguların stabilizasyonunda;

Uçucu küllerin genel olarak geçirimsizliği düşüktür ve sıkışabilir. Sıkıştırılan uçucu kül zamanla sertleşir ve serbest basınç dayanımlarında önemli artış meydana gelir [18,19].

-Alt yapı ve taban malzemesi olarak;

Ekonomik miktarlarda kireç veya çimento karışımı ile stabilizasyon sağlanmaktadır [20].

-Alt drenaj tabakası;

Burada ocak altı külleri, curufları kullanılmaktadır [21].

-İri stabilize malzemenin filleri olarak;

İri agregaların boşluklarının uçucu küle doldurulması agregaların yan kuvvetlere karşı dayanımını arttırmaktadır [21].

-Zemin enjeksiyonlarında;

Katı atık sahalarının kullanıma açılması için kireçle karıştırılarak enjeksiyonu çimentoya nazaran daha ekonomik olmaktadır.

2-Hafif Agregra Üretiminde

Tane özgül ağırlığı $1300\sim 2100\text{ kg/m}^3$, birim hacim ağırlığı $600\sim 1100\text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir. Bu agregalardan elde edilen betonların kuru birim hacim ağırlıkları $1100\sim 1800\text{ kg/m}^3$ mertebesinde dir. Bu agregalarda yapılan betonların 28 günlük basınç dayanımları ise 45 MPa değerine ulaşabilmektedir [14].

3-Ağırlık Barajlarında Uçucu Küllü Rolkrit Kullanımı

Rolkritler çok düşük çimento dozajları ile hiç çökme vermeyen ve titreşimli yol silindirlerini taşıyacak kadar kuru ve bu araçlarda sıkıştırıldıklarında alt tabakalara yapışacak kadar nemlenen betonlardır.

Ağırlık barajlarında betonun basınç dayanımı önem taşımaz; yapının güven açısından iki önemli niteliği devrilme ve kaymaya karşı stabilitesidir.

Rolkritler, baraj betonlarında aranılan, geçirimsizlik, çekme dayanımı, çekme deformasyon kapasitesi, elastisite modülü, sünme hızı termik gerilme katsayısı, termik difüzyon ve iletim katsayıları, hacim sabitliği, kavitasyon ve erozyon dayanıklılığı ve kayma dayanımı açısından yeterli niteliklere sahiptir [22].

4-Boşluklu Gaz (Gaz Beton) Üretiminde

Uçucu küllü gaz beton çimento veya kireç harcına gaz sürüklenmesi ile üniform hücreli bir yapı oluşturarak üretilen hafif betondur.

Birim hacim ağırlıkları kullanılacakları yere göre 400~1600 kg/m³ arasında değişen beton üretimi mümkündür [23].

5-Tuğla Üretiminde Kullanımı

Uçucu kül tuğla üretiminde iki şekilde kullanılır.

-Yardımcı ve düzeltme malzemesi olarak:

-Esas malzeme olarak

Uçucu kül puzolanik özeliği ve inceliği nedeniyle pişmiş malzemedeki dayanımın önemli miktarda artmasını sağlamaktadır [14,21].

Uçucu kül yukarıda anlatılan alanlar dışında ek olarak;

-Tarımda yoğun toprağın gevşetilmesi ve rutubet tutma yeteneğini arttırmakta,

-Maden ocaklarında filtre olarak,

-Isı yalıtım malzemesi olarak ve

-Bataklık kurutmada kullanılabilmektedir [20].

2.8 Uçucu Küllerin Taze Beton Özelliklerine Etkisi

Taze betonun reolojik özellikleri esas olarak ince parçacıklar ve su ile değerlendirilir. Uçucu kül bu özellikleri etkiler.

Uçucu külün reolojik özelliklere etkisinin önemi şu maddelerle açıklanabilir:

-Uçucu külün inceliği genellikle çimentonunkinden daha yüksektir,

-Yuvarlak tane şekline sahiptir,

-Uçucu kül aktif kömür parçacıkları içerir,

-Akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici gibi katkıların adsorbe edilmesi anlamında çimentodan daha farklı bir zeta potansiyeline sahiptir.

Eşit ağırlıkta uçucu kül ile çimentonun yer değiştirmesiyle aşağıdaki durumlar beklenir:

-Daha geniş özgül yüzey nedeniyle yüzeyde daha fazla suyun adsorblanması.

-Uçucu külün hacmi yer değişen çimentonunkinden daha yüksektir. Portland çimentosunun özgül ağırlığı 3100 kg/m^3 , uçucu külün özgül ağırlığı ise yaklaşık olarak 2200 ve 2600 kg/m^3 arasındadır [24].

2.8.1 İşlenebilme, Su İhtiyacı ve Terleme

Taze betonun donatılı kalıplar içerisine rahat bir şekilde yerleşmesi için karışımın akıcı olması, yani işlenebilirliğin iyi olması gerekmektedir. Beton içerisinde çimentonun hidratasyonu için gerekli su ve çimento taneleri arasında kalacak adsorplanmış jel suyunun miktarı, çimento ağırlığının %25'dir. Ancak pratikte işlenebilirliği arttırmak için bu oran %40'ın altına çok nadir olarak düşmektedir. Bu nedenle beton içerisindeki suyu azaltırken işlenebilirliği sabit tutmak önemlidir. Uçucu küllerin işlenebilirliğe katkısı bu yönden olumlu yönde olmaktadır [25].

Çimento aynı ağırlıkta iyi nitelikli bir uçucu külle yer değiştirirse, sabit bir karışımdaki su miktarında azalma olacaktır [24].

Uçucu küllerin puzolanik bağlayıcı özeliği nedeniyle su ihtiyacını arttıracak dikkate alınmalıdır. Bu nedenle beton içerisinde ince agrega kullanılması, betonun su ihtiyacını arttıracaktır. Basit yer değiştirme yöntemi ile üretilen betonlarda çıkarılan çimentoya eşit miktarda uçucu kül kullanılması, uçucu küllerin işlenebilirliğe katkısının belirlenmesinde referans olabilir. Modifiye edilmiş yer değiştirme yöntemi ve rasyonel oranlama yöntemi, çıkarılan çimento yerine farklı miktarda uçucu kül eklenmesi nedeniyle işlenebilirlik konusunda göreceli sonuçlar vermektedir.

İşlenebilirliği etkileyen bir diğer faktör ise kullanılan uçucu küllerin, içerdiği CaO miktarına bağlı olarak farklılık göstermesidir.

Sivasundaram, Carette ve Malhotra, F sınıfı uçucu külleri basit yer değiştirme yöntemi ile yüksek oranlarda beton içerisinde kullanarak deneyler yapmışlar, elde edilen sonuçlara göre uçucu küllerin işlenebilirliği arttırdığını ve su ihtiyacını azalttığını belirtmişlerdir [26].

Haque, Day ve Kangan, C sınıfı yüksek kireçli uçucu küllerle basit yer değiştirme yöntemini kullanarak hava sürükleyici katkı olarak ürettikleri betonlarda, işlenebilirliğin uçucu külsüz olarak üretilen betonlara göre arttığı sonucuna varmışlardır [27].

Olek ve Diamond, C sınıfı küllerle basit yer değiştirme yöntemiyle ürettikleri betonlarda her iki sınıf uçucu külün işlenebilirliği arttırdığını gözlemişler, C sınıfı uçucu küllerin F sınıfı uçucu küllere göre işlenebilirliği daha fazla arttırdığını belirtmişlerdir [28].

Owens ince parçacıklı uçucu kül ile çimentonun %50 oranında yer değiştirmesinin su miktarını %25 düşürdüğünü, 45 μm 'den daha büyük parçacıklı külün çimentoyla %50 yer değiştirmesinin su ihtiyacı üzerinde bir etki yapmadığını göstermiştir.

Pasko ve Larson %30 uçucu kül ile %20 çimento yer değiştirmesinin su ihtiyacını %7.2 düşürdüğünü bulmuşlardır.

Güney Suskachuwan Nehiri Barajı'nın inşası için beton malzeme araştırmaları sırasında, Price su ihtiyacının betona uçucu kül eklendiği zaman artmadığını bulmuştur. Sonuç betonunun işlenebilirliği ve kohezyonu artarken su/toplam bağlayıcı oranında bir azalma olmuştur.

Compton ve Maclinnis doğu Kanada uçucu külünün %30 oranında çimento ile yer değiştirmesiyle yapılan betonun aynı çökme değerindeki kontrol betonunkinden %7 daha az su ihtiyacı olduğu sonucuna varmışlardır.

Brown aynı hacimde çimento ile külün yer değiştirdiği farklı su/çimento oranlarındaki 4 betonun işlenebilirliğini araştırmıştır. Her karışım için çökme ve Ve-

Be zamanı ölçülmüştür. Hem çökmenin hem de Ve-Be işlenebilirliğinin uçucu kül eklenmesiyle arttığı bulunmuştur.

Bir başka deneysel çalışmada, Brown bir betonda eşit hacimde agrega veya kum ile uçucu külün yer değiştirmesinin etkilerini araştırmıştır. Deney betonu %10, 20, 30 veya 40 oranlarında kumun veya agreganın külle yer değiştirmesi esaslı ile üretilmiştir. %40 oranında agreganın külle yer değiştirmesi karışımı işlenemez hale getirmiştir. Brown'un çalışmasından hacimce max. %8 kül ile agreganın yer değiştirmesinin işlenebilirliği arttığı sonucu çıkarılabilir. Daha fazla oranlar işlenebilirlikte hızlı bir düşüşe neden olur [4].

Terleme, genellikle segregasyon sonucu oluşan, artması halinde erken rötreye neden olan bir durumdur. Segregasyon, üretilen betonun yeterli kohezyona sahip olmamasından kaynaklanmaktadır. Uçucu küllerin inceliğinin fazla oluşu nedeniyle, beton karışımının kohezyonu arttıracak ve segregasyonu azaltacak, bu nedenle de erken rötreyi engelleyeceği düşünülmektedir [25].

Uçucu küller, çoğu mineral katkılardan farklı olarak taze betonun işlenebilirliğini artırır. Hassan ve diğerleri, her %10'luk uçucu kül ile normal Portland çimentosu yer değiştirmesinde su ihtiyacının %3-4 azaldığını göstermişlerdir. Bu, beton içeriklerinin doluluk kapasitesini artırır ve boşlukları azaltır. Yaş ilerledikçe uçucu küllü betonun boşluk oranı önemli ölçüde azalır [29].

Copeland, terleme konusunda yaptığı çalışmalarda, terleme eğilimli kaba karışımlarda uçucu kül kullanımının terlemede azalmaya neden olduğunu gözlemlemiştir [7].

Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 ve benzer işlenebilirlikte bir beton üretmek için çimento ile ince uçucu külün %10 yer değiştirmesinin, karışım suyunu %35 oranında azaltabileceği görülmüştür. 400 kg/m^3 bağlayıcı miktarı için buna karşı gelen oran ise sadece %6 olmuştur. Optimum çimento yer değiştirmesi miktarı %10 olarak bulunmuştur. %15 çimento yer değiştirmesinde betonun işlenebilirliğinde hızlı bir düşüş olmuştur [30].

Sivasundaram, Carrette ve Malhotra, yüksek miktarda uçucu kül kullanarak ürettiği betonlarda hiç terlemeye rastlamadıklarını göstermişlerdir [26]. Ukiha, Shigematsu

ve Ishii ise inceliği fazla olan uçucu küllerle yaptıkları çalışmada yine uçucu küllerin terlemeyi ve segregasyonu azalttığı sonucuna varmışlardır [20].

2.8.2 Priz Süresi

Betonda priz süresini etkileyen birçok faktör bulunmakla beraber genellikle uçucu küllerin priz süresini arttırdığı söylenmektedir. Bunun ana nedeni, uçucu küllerin bağlayıcı özelliklerini kazanabilmeleri ve kimyasal reaksiyona girmeleri için çimento prizi ile ortaya çıkan CaO'ya olan ihtiyaçlarıdır.

Uçucu külün genellikle ilk ve son priz sürelerinde bir artma oluşturduğu gözlenir. Buna karşın, başlangıç ve bitiş priz süreleri arasında önemli bir değişiklik olmaz [24].

Lane ve Best uçucu külün genelde betonun priz süresini yavaşlattığını belirtmiştir. Gözlemlenen bu durumun külün miktarı, inceliği ve kimyasal içeriğinden etkilendiği sonucuna varmışlardır.

Davis ve arkadaşları uçucu kül içeren betonların, çimentolu karışımlardan daha geç priz aldığı sonucuna varmışlardır [7].

2.8.3 Hidratasyon Isısı ve Sıcaklık Yükselmesi

Hidratasyon ısının belirlenmesi, büyük kütle betonlarının üretiminde önemlidir. Erken yaşta ortaya çıkan rötre, büyük sorunlar yaratır. Kütle betonlarında, iç kısımdaki beton yavaş, dış kısımdaki beton hızlı soğur. Bu şekilde dış kısımdaki betonun büzülmesi önlenirken, çekme gerilmeleri oluşur ve beton çatlar. Termik rötre çatlakları, derin ve geniş olmaktadır. Termik rötreyi engellemek için beton içinde soğutma su boruları geçirilmesi, agregaların ve suyun soğutulması gibi yöntemler kullanılmaktadır [25].

Uçucu kül ile Portland çimentosunun %30 yer değiştirmesi betonun maksimum sıcaklık artışını katkısız betonda 33°C'ye düşürmüştür [11].

Çimento ile uçucu külün yer değiştirmesinin taze betonun sıcaklık artışında bir düşüşe neden olduğu bilinmektedir [24].

Atiş, F sınıfı uçucu külleri kullanarak yaptığı çalışmada hidratasyon ısısının maksimum değerinin düştüğünü ve uçucu kül miktarının arttırılması ile ısı artışının da yavaşladığını gözlemlemiştir. Buradan yola çıkarak, termik rötreden dolayı oluşan büyük çatlakları önlemek amacıyla, büyük oranda uçucu kül içeren betonların baraj inşaatlarında, büyük temellerde ve kısmen nükleer reaktör binalarında kullanabileceğini belirtmiştir [31].

Normal Portland çimentosunda oluşan dayanım kaybının aksine, uçucu küllü betonlar sıcaklık etkisinde dayanımda artış gösterirler.

Kabayashi, Kurobegwa No.3 Enerji İstasyonu Tünelinde %25 çimento ile uçucu külün yer değiştirilerek kullanıldığını yazmıştır. Bu tünel 100-160°C arasındaki kayalar içerisinde yer aldığı için, normal Portland çimentolu beton kullanıldığında ortaya çıkacak dayanım kaybını yok etmek amacıyla uçucu kül kullanılmıştır [7].

Yapılan bir araştırmada şu sonuçlara varılmıştır:

-Uçucu külün normal kür koşulları altında 28 güne kadar mukavemete çok sınırlı katkısına karşı yüksek sıcaklıklarda kürlenmiş betonda yüksek miktarlarda etkin bir şekilde kullanılabilir.

-Kürlemenin yüksek sıcaklıklarda kaba ve ince uçucu küllü beton üzerinde erken yaşlarda önemli ölçüde faydalı etkisi vardır ve bu etki ilerki yaşlarda da devam eder [7].

Langley, Carrette ve Malhotra, F sınıfı uçucu küllerle yapmış oldukları deneylerde yine hidratasyon ısısının düştüğünü ve sıcaklık artışının yavaşladığını gözlemlemişlerdir [32].

Barrow, Hadchiti, Carrasquillo, F sınıfı uçucu küller ile dört farklı cins çimentoyu farklı oranlarda karıştırarak beton üretmişler ve uçucu kül cinsinin hidratasyon ısısını değiştirdiğini gözlemlemişlerdir. Yazarların belirttiğine göre, F sınıfı uçucu küller, hidratasyon ısısını düşürmekte ve sıcaklık artışını yavaşlatmakta, C sınıfı uçucu küller ise, hidratasyon ısısını değiştirmemekle beraber sıcaklık artışını yavaşlatmaktadırlar [33].

2.8.4 Hava Sürüklenme

Hava sürükleyici katkı maddeleri kullanılarak beton içerisine hacminin %4 ile %6'sı oranında küçük kapalı baloncuklar şeklinde dağıtık hava boşlukları oluşturulması, hem malzemeyi daha elastiki yaparak buz basınçlarına dayanımları artmakta, hem boşluklar kılcal kanalları kestikleri için kılcal su emmeyi azaltmakta, hem de suyun kolay boşalmasına ve hidrostatik basınçların azalmasına imkan verecek boşlukları sağlamaktadır.

Uçucu kül betonun içindeki hava içeriğini azaltır. Uçucu kül ne kadar ince olursa hava içeriğindeki azalış da o kadar çok olur [24].

Gebler ve Klieger C ve F sınıfı uçucu külleri basit yer değiştirme yöntemi ile beton içerisinde kullanarak ürettikleri betonlarda %6 hava oranını sağlamak için hava sürükleyici katkı kullanmışlardır. Sonuç olarak, C sınıfı uçucu küllerin F sınıfı uçucu küllere oranla daha az hava sürükleyici katkıya ihtiyacı olduğu görülmüştür. Her iki uçucu küllünde kontrol betonuna göre hava sürükleyici ihtiyacı artmıştır.

Su azaltıcı katkılar, priz kontrol eden katkılar ve hava sürükleyiciler gibi kimyasal katkılar betonda birçok uçucu külle beraber kullanılabilirler. Ama bazı durumlarda katkı ihtiyacı Portland çimentolu betonunkinden daha fazladır [17].

2.9 Uçucu Küllerin Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi

Uçucu kül, sertleşmiş betonun dayanım gelişimi, elastisite modülü, sünme, rötre ve termal genleşme gibi birçok özeliğini etkiler.

Katkısız betonla karşılaştırıldığında uçucu küllü betonun basınç mukavemeti ve elastiklik modülünün erken yaşta azaldığı fakat 90 günde daha yüksek olduğu bulunmuştur. Sünme, betonun basınç mukavemeti ve elastiklik modülünden etkilendiği için uçucu küllü betonda erken yaştaki yüklemelerde yüksek sünme şekil değiştirmesi bulunmuştur. Buna karşın geç yaşta sünme hızı azalmıştır. Genel olarak %25 oranına kadar çimento ile uçucu kül yer değiştirmesi 100 güne kadar sünmede önemli bir farklılık göstermemiştir. Bu yaştan sonra uçucu küllü betonda düşük sünme olmuştur [11].

2.9.1 Betonun Basınç Dayanımına ve Kırılma Davranışına Uçucu Külün Etkileri

Düşük oranlarda(%20) betona katılan uçucu kül puzolanik malzeme gibi hareket ederken, yüksek oranlarda(%50'den fazla) katılan külün bir kısmı puzolanik reaksiyona katılır, diğer kısmı ise uzun bir kür süreci sonrasında bile reaksiyona girmez.

Yüksek hacimde uçucu küllü çimento hamurunun basınç gerilmesi-şekil değiştirme eğrisi külsüz hamurunkinden daha az doğrusaldır. Yüksek hacimde uçucu kül, çimento hamurunun mikroyapısını değiştirir ve bu değişiklik betonun makromekanik davranışını etkileyebilir. Yüksek oranlarda uçucu kül ile çimento yer değiştirmesi betonun kırılma özelliklerini geliştirir.

Daha önceki çalışmalarda yüksek hacimde uçucu kül içeren betonların, eşit basınç dayanımlarında ve uçucu kül içermeyen betonlar ile karşılaştırıldığında genelde daha yüksek elastisite modülüne, daha düşük rötre ve sünmeye sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, reaksiyona girmeyen uçucu kül parçaları çimento hidratasyonu ürünlerinden daha yüksek elastiklik modülüne sahip olmalarıdır.

28 gün sonunda %15 uçucu kül içeren karışımın dayanımı uçucu kül içermeyen karışımından çok az (%4) düşüktür. Ancak %55 uçucu kül içeren karışımda %44 dayanım düşüşü gözlenmiştir. İlerleyen yaşlarda uçucu külün basınç dayanımına katkısı daha büyük olmuştur. Uçucu külün basınç dayanımına etkisinin düşük su/çimento oranlarında daha fazla olduğu görülmüştür.

Uçucu kül arayüzey aderansını da geliştirir. %15-25 civarında kül içeren karışımlar kül içermeyenlerinkinden daha büyük çekme dayanımına sahiptirler. %45-55 oranlarında uçucu kül içeren karışımlar daha düşük çekme dayanımına sahiptirler. Çünkü çimento hidratasyonu ürünlerinin düşük konsantrasyonda olması, yüksek miktarda uçucu kül içeren betondaki arayüzey aderans gelişiminin daha uzun bir kür süreci ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır [34].

2.9.2 Dayanım Kazanımı, Basınç ve Eğilme Dayanımları

Uçucu külle üretilen betonların dayanım kazanımları, uçucu küllerin kimyasal ve fiziksel özellikleri, tanecik boyutu gibi farklılıkları yanında betona eklenme şekline yani karışım oranlama yöntemlerine bağlıdır. Sahip oldukları puzolanik bağlayıcı özellikleri nedeniyle betonun dayanımını önemli ölçüde değiştirirler.

Genellikle betonun dayanımındaki artış hızı sadece yüksek kalsiyumlu uçucu külden etkilenme eğilimdedir. Bir kısım araştırmacılar, yüksek kalsiyumlu uçucu kül içeren betonun eşit ağırlık veya hacimde yer değiştirme esasıyla erken yaşlarda dayanımda hiçbir önemli etki yaratmadan üretilebileceğini belirtmişlerdir. F sınıfı olarak adlandırılan düşük kalsiyumlu uçucu küller basit yer değiştirme yöntemi ile betonda kullanıldığında bu küller dayanım artışında düşük hızlar göstermiştir [7].

Mehta ve Gjorv, yaptıkları çalışmada %30 oranında F sınıfı uçucu kül içeren çimentolarla ürettiği betonlarda ilk 7. ve 28. gündeki dayanımların düşük olduğunu, 90. gündeki dayanımların ise ancak kontrol betonuna eriştiğini gözlemlemiştir [35].

CANMET'in bir çalışmasında, benzer koşullarda üretilen betonların aynı çimento ve agrega fakat farklı uçucu kül içerdiklerinden dolayı değişik oranlarda dayanım gelişimi oluşturdıkları gösterilmiştir.

Uçucu külü betonun dayanım gelişimini birçok değişken etkiler. En önemlileri:

- uçucu külün özellikleri,
- kimyasal karışımı,
- tanecik büyüklüğü,
- reaktifliği,
- sıcaklık ve diğer kür koşulları [7].

Yüksek miktarda uçucu kül (%40-%75) katkılı beton üreten, Haque, Langen ve Ward, elde edilen sonuçlar ışığında bağlayıcı madde miktarı 325-400 kg/m³ arasında değişen betonların yüzey uygulamaları için yeterli dayanım, dayanıklılık ve hacim

sabitliğine sahip olduğunu belirtmiş, ancak daha fazla çalışma yapılmasını öngörmüşlerdir [36].

Uzun süreli kür sonunda güçlü agrega-çimento hamuru aderansı nedeniyle uçucu küllü betonda eğilme dayanımının basınç dayanımına oranı katkısız betonunkinden daha yüksek olmuştur [11].

Genel olarak, uçucu küllerin ilk dayanımlarının kontrol betonuna oranla düşük, ileriki yaşlarda dayanımlarının yüksek olduğu kabul edilmiştir [7].

Hassan, Cabrera ve Maliche mineral katkıların yüksek performanslı beton özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Mineral katkıların yüksek performanslı betonların özelliklerini arttırdıkları görülmüştür. Uçucu kül hamur matrisindeki boşluk oranında azalma sağlar ve agrega arayüzünü geliştirir. Uçucu küllü beton erken yaşlarda düşük basınç dayanımı değerleri vermiş, buna karşın 28 günde kontrol betonunkine benzer, 1 yılda ise yüksek dayanım değerleri vermiştir. 20°C ve %65 nemli kür koşullarında mineral katkıları yüksek performanslı betonun basınç dayanımında bir artış sağlamıştır [29].

%10 ince uçucu kül içeren betonlar yüksek erken dayanımların ardından zamanla dayanımlarda artış göstermişlerdir. 28 günde uçucu külsüz betonla karşılaştırıldıklarında %20 daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olmuşlardır.

Uçucu kül içeren betonların su geçirimsizliği kontrol betonlarınkinden %28 daha azdır. Bu sonuçlar göstermiştir ki uygun uçucu kül kullanımıyla yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı beton üretilir [30].

2.9.3 Elastisite Modülü

Yayınlanan veriler uçucu külün betonun elastik özellikler üzerinde az bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ancak, genel düşünce, uçucu küllerin erken yaşlarda beton elastisite modülünü düşürdüğü, ileriki yaşlarda ise arttırdığı yönündedir. Uçucu küllü üretilen betonların elastisite modülünün, kontrol betonuna oranla çok az bir oranda da olsa daha büyük olduğu kabul edilmektedir [7].

Abdun-Nur literatür araştırmalarında şu gözlemleri yapmıştır [7]:

“Uçucu küllü betonun elastisite modülü erken yaşlarda düşük, geç yaşlarda yüksektir. Genellikle aynı dayanımda uçucu küllü veya uçucu külsüz betonlar karşılaştırıldığında, uçucu kül betonun elastisite modülünü arttırır.”

Crow ve Dunston ise araştırmalarında şunları belirtmişlerdir [7]:

“Portland çimentosu ve uçucu kül içeren betonların elastik özellikleri uçucu külsüz betonunkine benzerdir. Basınç dayanımı artışına paralel olarak elastisite modülü ve Poisson oranı zamanla artar.”

Ghosk ve Timusk eşit 28 günlük dayanım değerlerinde uçucu küllü betonlar üzerinde araştırma yapmışlar ve bütün dayanım kademelerinde uçucu küllü betonun elastisite modülünün genelde referans betonunkine yakın olduğu sonucuna varmışlardır [7].

Nassar ve Marzouk uçucu külle yapılan betonun elastisite modülüne sıcaklığın etkisini araştırmışlar ve 21°C ‘den 232°C’ye kadar artan sıcaklıklarda elastisite modülünde %40’a varan düşüşler olduğunu belirtmişlerdir [7].

2.9.4 Sünme ve Rötire

Uçucu küllü betonların hidratasyon ısısı azaldığından, beton elemanlarında ısı artışının fazla olmaması ve çok az miktarda kıvam suyuna ihtiyaç görülmesi, uçucu küllü betonlarda rötrenin normal betonlardaki rötreye oranla daha az olmasına neden olmaktadır.

Ortam ısı, nem agreganın elastisite modülü ve miktarı rötrede etkindir. Bunlara ek olarak, sünme için, betonun basınç dayanımı, yükleme hızı ve miktarı etken faktörlerdir [25].

Lohtia ve diğerleri yaptıkları çalışmada şu sonuçlara varmışlardır [7]:

-%15 oranında çimento ile uçucu kül yer değiştirmesi dayanım, elastiklik, rötire ve sünme açısından optimum değer olarak bulunmuştur.

-Uçucu külsüz ve uçucu küllü betonlar için sünme-zaman eğrileri logaritmik zamanda doğrusal sünme olacak şekilde benzerdir.

-%15 uçucu kül oranına kadar sünmede ihmal edilebilecek miktarda artış olmuştur. Ancak %15'ten fazla uçucu kül miktarı biraz daha yüksek sünme oluşturmıştır.

-0 ile %25 arasında uçucu kül içeren malzemelerde sünme katsayıları benzerdir.

-%15'in üzerinde çimento ile uçucu kül yer değiştirmesinde sünme geri dönüşü daha düşüktür.

Daha sonraki çalışmalarda, Ghosk ve Timusk'un değişik karbon içerikli ve değişik inceliklerdeki bitümlü uçucu küllerle yaptıkları araştırmalarında, uçucu küllü betonların referans betonlarından daha düşük sünme yaptığını göstermişlerdir [7].

Yuan ve Cook yüksek kalsiyumlu uçucu kül içeren yüksek dayanımlı betonlar üzerinde yaptıkları çalışmalarında, %30 ve %50 uçucu kül içeren betonların hem kontrol betonundan hem de %20 uçucu kül içeren betondan daha fazla sünme yaptığını belirtmişlerdir [7].

Gifford ve Ward uçucu külün sünmeyi düşürmesinin nedenlerini şöyle belirtmişlerdir [7]:

-Uçucu kül elastisite modülünü artırır.

-Uçucu kül agrega olarak katılır ve sünmeye yol açan hamur hacmini azaltır.

%15-%20 oranlarında kullanılan uçucu küller, sünmenin ve rötrenin belirlenmesinde optimum değerler olarak belirlenmiş, genel olarak uçucu küllerin sünme ve rötreyi azalttığı belirtilmiştir [7].

2.10 Uçucu Küllerin Ortam Şartlarına Dayanıklılık Özellikleri

Boşluk oranı düşük dolu bir beton mekanik yönden yüksek dayanımlı olmasının yanında, aynı zamanda geçirimsizdir [25].

Uçucu kül genelde betonun kimyasal etkilere karşı direncini artırır. Betonun kimyasal etkilere karşı direncini etkileyen 2 ana faktör; 1)çimento ve diğer beton bileşenlerinin kimyasal bileşimleri, 2)betonun geçirimsizliğidir. Betonun geçirimsizliği

su/çimento oranı, incelik, C_3S içeriği, kür süresi ve çimento hidratasyonu hızını etkileyen koşullar gibi çeşitli diğer faktörlere bağlıdır [17].

2.10.1 Geçirimsizlik

Dayanıklı bir beton üretiminde göz önüne alınan en önemli faktör betonun geçirimsiz olmasıdır. Mineral katkıları, genellikle boşluk yapısını iyileştirerek geçirimsizliği azaltmakta ve dayanıklılığı arttırmaktadır [2].

Araştırmacılar, C sınıfı uçucu küllerin F sınıfı uçucu küllere oranla geçirimsizliği daha da azalttığını belirtmişlerdir.

Betonun geçirimsizliği azaldıkça agresif etkilere ve saf suya karşı direnci artar.

Davis'in çalışmasına göre beton geçirimsizliği, herhangi bir anda hidrate olmuş bağlayıcı malzeme miktarı ile doğrudan ilişkilidir. 28 günlük kürden sonra, puzolanik aktivite olduğu zaman uçucu küllü beton kontrol betonundan daha geçirimsiz olmuştur. 6 ayda bunun tersi görülmüştür [7].

Short ve Page'in çalışmalarından uçucu küllü çimentoların klor difüzyonunu önlemede normal veya sülfata karşı dirençli çimentolardan daha etkili olduğu sonucu çıkarılabilir [7]. Uçucu küllü betonun oksijen geçirimsizliğinin yaş ilerledikçe azaldığı görülmüştür. Buna benzer olarak oksijen difüzyonu ve klor geçirimsizliğinde de yaş ilerledikçe belirgin bir azalma olduğu görülmüştür [29].

2.10.2 Zararlı Kimyasallara Dayanıklılık

Portland çimentosu açığa çıkarttığı $Ca(OH)_2$ nedeniyle kuvvetli bir bazdır ve tüm asitlerden zarar görür. Mg^{++} , Mn^{++} ve NH_4^+ gibi iyonlar yer değiştirme özellikleri nedeniyle betona zarar veren bir diğer faktördür [25]. Uçucu küllerin, serbest kirecin kullanımını sağladığı ve geçirimsizliği arttırdığı için zararlı kimyasallara dayanıklılığı da arttırdığı söylenebilir. F sınıfı uçucu küller betonun zararlı kimyasallara karşı dayanıklılığını arttırmaktadır. C sınıfı uçucu küller ise içermiş oldukları yüksek kireç yüzünden zararlı kimyasallara dayanıklılığı azaltmaktadır [7].

Uçucu kül kullanımıyla sülfatların neden olduğu kimyasal etkilere karşı direnç sağlanabilir ve genellikle alkali-agrega reaksiyonundan dolayı oluşan genleşme ve çatlama kontrol altına alınabilir [17].

2.10.3 Donma-Çözülme Dayanıklılığı

Donma-çözülme etkisine betonun direnci uçucu kül kullanımıyla azalabilir. Buna karşın eşit dayanımda ve eşit hava içeren Portland çimentolu betonla karşılaştırıldığında, donma-çözülme dayanımında belirgin farklılıklar yoktur [17].

Uçucu küllerin daha az hava oluşmasına neden olarak donmaya karşı dayanıklılığı azalttığı söylenebilir [27]. Donma çözülme dayanımının belirlenmesi için yapılan çalışmalarda C ve F sınıfı uçucu küllerin genelde dayanımı azalttığı görülmüştür.

Virtana ise çalışmasında şu sonuçlara varmıştır [7]:

-Uçucu kül eklenmesinin dayanım ve hava içeriği sabit tutulursa betonun donma-çözölmeye karşı direncinde önemli bir etkisi yoktur.

-Uçucu kül eklenmesinde, çimentonun bir kısmı çıkarılırsa betonun donma-çözölme direncine olumsuz bir etki yapabilir.

2.10.4 Deniz Ortamında Dayanıklılık

Uçucu küllerin geçirimliliği azaltması nedeniyle deniz ortamına dayanıklılığı da arttıracığı düşünülebilir.

Deniz ortamında beton çeşitli çevresel etkiler altında kalmaktadır. Bunlardan en önemlisi olarak klor difüzyonu gösterilebilir. Yapılan araştırmalar, uçucu kül kullanımının betonun klor geçirimliliğini çok düşürdüğünü göstermektedir. Mineral katkıların zamanla artan puzolanik reaksiyonuyla beraber klor geçirimlilikleri belirgin olarak azalmaktadır. Mineral katkı kullanımıyla sertleşmiş betonun boşluk yapısı değişir ve daha ince bir boşluk yapısı oluşur. Toplam boşluk miktarı azaldığı ve daha yoğun bir iç yapı elde edildiği için betonun geçirimliliği de azalır.

2.10.5 Donatı Korozyonu

Geçirimliliği az olan bir beton üretimi, donatı korozyonunun engellenmesinde önemlidir. Malhotra, Zlang ve Leaman, F sınıfı uçucu küller kullanarak farklı su/çimento oranlarıyla ürettikleri betonlarda yaptıkları çalışmalarda, 8 yıllık süreç içerisinde yalnızca su/çimento oranı yüksek olan betonlarda korozyona rastlamışlardır. Klor geçirimliliği ile ilgili olarak yaptıkları çalışmalarda ise uçucu kül kullanımının klor geçirimliliğini azalttığını görmüşlerdir [37].

Donatı korozyonu yurdumuzda yaygın olarak görülen bir sorundur. Betondaki donatı korozyonu nedeniyle donatı hacmi artar ve beton paspayını çatlatır. Çatlamış betondan donatıya zararlı kimyasalların ulaşması daha kolay olur. Betonun karbonatlaşması sonucu pH'nın düşmesiyle pasivasyon tabakası kaybolur. Betonun pH'nı düşüren etkenlerden biri de klor etkisidir. Uçucu kül kullanımıyla betonun bu gibi dayanıklılık özellikleri iyileştirilebilmektedir.

2.10.6 Alkali-Agrega Reaksiyonu

Beton üretiminde kullanılan çimentonun alkalileri ile agregadaki bazı aktif mineraller, alkali-agrega reaksiyonuna girerek betonun yapısını bozan ve dış etkilere karşı dayanıksız hale getiren genleşme ve çatlamalara neden olurlar.

Alkali-agrega reaksiyonunun gelişmesi, çimentonun alkali silikatkarından alkaliyi serbest hale getirecek serbest kirecin bulunmasına bağlıdır. Uçucu kül serbest kireci bağlayabilme özelliği ile söz konusu reaksiyonun oluşumunu azaltmaktadır.

2.10.7 Karbonatlaşma

Karbonatlaşma betonun içine doğru ilerledikçe 3 olumsuz sonuç oluşabilir:

-Geçirimlilik artabilir.

-Rötre oluşabilir.

-Karbonatlaşmanın çelik donatıya hemen ulaşması korozyona karşı direnci düşürür.

Tsukayama ve diğerleri 1980'de uygun su/çimento oranlarında uçucu kül eklendiğinde karbonatlaşma derinliğinin yavaş olarak azaldığını bulmuşlardır [7].

Ho ve Lewis yaptıkları çalışmada 90 günlük kürden sonra, uçucu kül içeren betonun uçucu külsüz ve akışkanlaştırıcı betonla karşılaştırıldığında daha düşük karbonatlaşma hızı gösterdiğini belirtmişlerdir [7].

Yuan ve Cook ise yüksek kalsiyumlu betonun donma-çözülme direnci üzerinde yaptıkları araştırmalarında şu gözlemleri yapmışlardır:

-%20 uçucu kül içeren betonun donma-çözülme durabilitesi kontrol betonunkinden daha yüksektir.

-Hava sürüklenmiş betondaki uçucu kül miktarı %50'ye çıkartıldığında, 400 tekrardan sonra daha belirgin hasarlar gözlenmiştir [7].

2.11 Uçucu Küllü Betonlarda Karışım Oranlama Yöntemleri

Uçucu külün betonlarda kullanılmasının amaçları şu şekilde sıralanabilir:

- 1- Maliyetin önemli unsurlarından biri olan çimento miktarını azaltması
- 2- Hidratasyon ısını düşürmesi
- 3- Kohezyonun artması
- 4- 90. ve sonraki günlerde betonda istenilen mukavemet düzeyine erişmesi

Uçucu külün içinde kullanılması açısından üç temel karışım oranlama yöntemi geliştirilmiştir.

- 1) Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması (Basit yer değiştirme yöntemi)
- 2) Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması (Ekleme yöntemi)
- 3) Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine koyulması (Kısmi yer değiştirme yöntemi)
 - a) Modifiye edilmiş yer değiştirme yöntemi
 - b) Rasyonel oranlama yöntemi

2.11.1 Çimentonun Yerine Kısmi Olarak Uçucu Kül Kullanılması (Basit Yer Değiştirme Yöntemi)

Basit ikame metodunda çıkartılan Portland çimentosunun yerine doğrudan uçucu kül ile yer değiştirmesi esas geçerlidir [7].

Kütle betonlarında bu yöntemin uygulanması sonucunda meydana gelen erken yaşlardaki dayanım azalmalarının, istenilen hidratasyon ısısının azalmasının yanında daha az yapısal öneme sahip olduğu gözlenmiştir.

İleriki yaşlarda külün puzolanik özeliğine göre bağlayıcılık aktivitesi dikkate değer bir halde görülür ve son dayanıma büyük katkısı olur.

2.11.2 Uçucu Külün İnce Agregada Olarak Kullanılması (Ekleme Yöntemi)

Ekleme yönteminde karışımda kullanılacak çimento miktarında azaltma yapılmaksızın uçucu külün karışıma eklenmesidir.

Uçucu külün eklenmesi ile elde edilen ilerdeki yaşlardaki dayanım artışlarının, aynı miktarda çimento eklenmesiyle elde edilen artışlardan daha fazla olduğu belirtilmektedir.

2.11.3 Uçucu Külün Kısmi Olarak Çimento ve İnce Agregada Yerine Koyulması (Kısmi Yer Değiştirme Yöntemi)

Uçucu külün bu yöntemde uygulanma şekli, çimentonun bir kısmının azaltılarak ve ince agregada ile su miktarında da ayarlama yaparak yer değiştirmesi şeklindedir.

İki farklı forma sahip olan bu yöntem, orijinal ifadesinde ‘modifiye edilmiş yer değiştirme yöntemi’ olarak anılmış olup, rasyonel oranlama yöntemi adı verilen ikinci bir hali de yer almıştır.

2.11.3.1 Modifiye Edilmiş Yer Değiştirme Yöntemi

Bu yöntem, karışım oranlarının değiştirilmesiyle, erken yaşlarda kontrol betonu ile uçucu küllü betonların kıyaslanabilir dayanıma sahip hale gelebileceğini göstermiş olan Lovewell ve Washa tarafından 1958 yılında ortaya konduğu kabul edilmiştir. Lovewell ve Washa’nın yöntemde belirttikleri temel nokta şudur:

‘Erken yaşlarda (3. ve 28. günler arasında) uçucu küllü beton karışımlarının kontrol betonunkıyla aynı dayanımı sağlayabilmek için, uçucu külün toplam ağırlığının kontrol betonundaki çimento ağırlığından fazla olmasıdır.’ [7]

2.11.3.2 Rasyonel Oranlama Yöntemi

Bu yöntemin ilk kez Smith tarafından teklif edildiği kabul edilmektedir. Smith, f uçucu kül ağırlığının bir kxf çimento ağırlığına eşit olabileceğini söylemiş ve bağlayıcı etkinlik faktörünün k olduğunu teklif eden kişi olmuştur [38].

Smith uçucu küllerin beton içinde karakterize etmek anlamında kül etkinliği (K) kavramını geliştirmiştir. w betondaki ağırlıkça su, c ağırlıkça çimento ve f de ağırlıkça uçucu kül olmak üzere;

$$(w/c)_e = w / (c + Kxf) = (w/c) \times (1/(1 + Kx(f/c))) \quad K : \text{kullanılan uçucu küle bağlı}$$

olarak 0,25 civarında bir katsayı

Etkinlik katsayısı (K) yerine, Dodson uçucu külün beton mukavemetine etkisini hesaplamak için çimento faktörünün (cxF) su/çimento (w/c) oranına oranını kullandı. (cxF)/(w/c) = Omega indeksi faktörü. Dodson farklı w/c ve cxF’ye sahip fakat aynı çimento ve agregalarla yapılan betonlar için dayanımın Omega indeksi faktörüyle doğrusal olarak arttığını göstermiştir.

Uçucu kül yer değiştirmesi veya eklenmesiyle beton yeniden tasarlandığında priz süreleri aynı Omega indeksi faktörüne sahip uçucu kül içermeyen betonunkilerle eşit olmuştur. Bazı uçucu küller prizi hızlandırmaktadırlar [17].

3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada uçucu küllü betonlarda kırmakum içeriğinin beton özelliklerine etkileri araştırıldı. Uçucu kül çimento miktarının %30'u oranında yer değiştirilerek, kırmakum ise ince agreganın %0, %25, %50, %75, %100 oranlarında kullanıldı. Numuneler 3 değişik kür ortamında saklanarak beton özelliklerine etkileri incelendi.

3.2 Üretilen Betonların Özellikleri

Beton üretiminde mutlak hacim yöntemi esas alınarak 5 seri normal, 5 seri de uçucu küllü olmak üzere toplam 10 seri beton üretildi.

Bütün betonlarda toplam bağlayıcı miktarı 300 kg/m^3 'te, su/toplam bağlayıcı oranı 0,65'te sabit tutuldu. Üretilen betonlarda rafine linyosülfonat ve modifiye polimer karışımı esaslı akışkanlaştırıcı bir katkı maddesi kullanılarak çökmenin 16-20 cm aralığında olması sağlandı. En büyük dane çapı 32 mm ve malzeme granülometrisi sabit olan aynı tür agrega kullanıldı.

3.3 Kullanılan Malzemeler

3.3.1 Çimento

Bu çalışmada Lafarge Arslan Çimento Fabrikasının üretimi PÇ 42.5 cinsi çimento kullanıldı. Kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1 Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Blaine Özgöl Yüzeyi (cm ² /g)	3230
Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	3,06
Le Chatelier halkalarının toplam açılması (mm)	1,0
Priz Başı (dk)	157
Priz Sonu (dk)	195
1 Günlük Basınç Dayanımı (N/mm ²)	19,3
2 Günlük Basınç Dayanımı (N/mm ²)	32,1
7 Günlük Basınç Dayanımı (N/mm ²)	47,8
28 Günlük Basınç Dayanımı (N/mm ²)	58,5

Bu çalışmada kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri de Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Çimentonun Kimyasal Özellikleri

Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,91
MgO (%)	1,68
SO ₃ (%)	2,99
K ₂ O (%)	0,68
Kızdırma Kaybı (%)	2,46
Cl (%)	0,01
Serbest CaO (%)	0,88
C ₃ A (%)	9,61
C ₃ S (%)	50,64

3.3.2 Uçucu Kül

Üretilen betonlarda Ankara Çayırhan termik santralinden elde edilen ve ortalama dane çapı 71µm olan C sınıfı uçucu kül kullanıldı. İ.T.Ü yapı malzemeleri laboratuvarlarında yapılan deneyde özgül ağırlığı 2.0 gr/cm³ olarak bulundu. Çayırhan uçucu külünün kimyasal özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3 Çayırhan Uçucu Külünün Kimyasal Özellikleri

Toplam SiO ₂ (%)	38,60
Çözünmeyen Kalıntı (%)	36,67
Al ₂ O ₃ (%)	15,44
Fe ₂ O ₃ (%)	7,41
CaO (%)	24,40
MgO (%)	1,47
K ₂ O (%)	1,21
SO ₄ (%)	2,62
SO ₃ (%)	6,36
Cl (%)	1,42
Kızdırma Kaybı (%)	3,58
Bilinmeyen	1,33

3.3.3 Katkı Maddesi

Üretilen betonlarda rafine linyosülfonat ve modifiye polimer esaslı akışkanlaştırıcı bir katkı maddesi kullanıldı.

3.3.4 Agregası

Yapılan deneylerde doğal kum, kırmakum, kalker esaslı kırmataş I ve kırmataş II kullanıldı. Agregaların fiziksel özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4 Agregaların Fiziksel Özellikleri

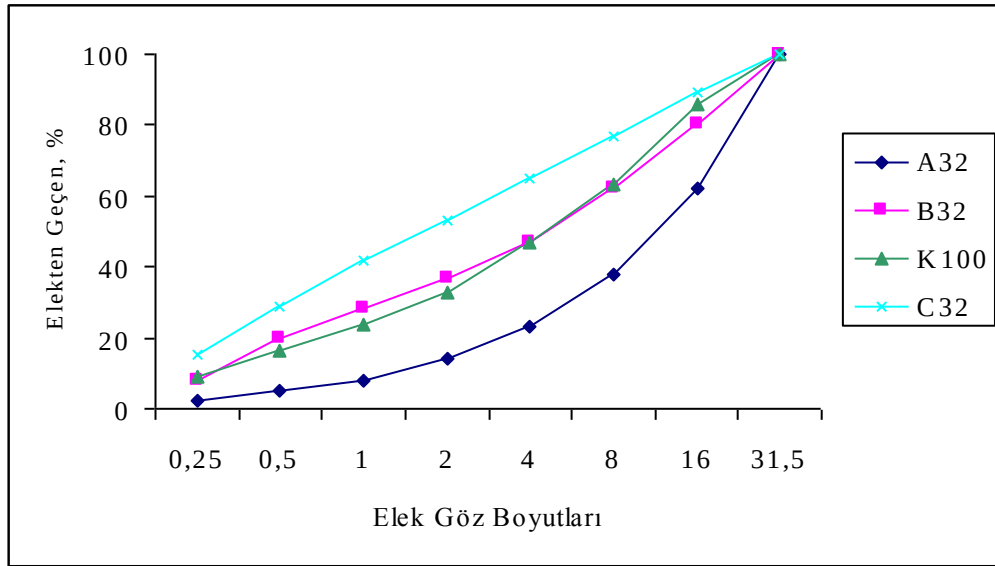
Agrega Cinsi	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Su Emme (%)
Kırmataş II	2,70	0,64
Kırmataş I	2,70	0,69
Kırmakum	2,70	1,92
Doğal Kum	2,60	0,96

Kalker esaslı kırmakumun 74 µ'luk elekten geçen(filler) malzeme miktarı %8,8 bulundu. Agregaların elek analizi Tablo 3.5'te verilmektedir.

Tablo 3.5 Agregaların Elek Analizi

Elek Göz Boyutu (mm)	Elekten geçen (%)			
	Kırmataş II	Kırmataş I	Kırmakum	Doğal Kum
31,5	100	100	100	100
16	53	100	100	100
8	0	72	100	100
4	0	8	100	100
2	0	0	73	99
1	0	0	53	93
0,5	0	0	36	82
0,25	0	0	20	15
0,074	0	0	8,8	0,47

Karışımlarda agreganın granülometrisi ISO A32-B32 eğrileri arasında ve B32 referans eğrisine yakın olacak şekilde seçildi. Kırmakum/ince agreganın oranı %100 olan karışımın granülometrik eğrisi Şekil 3.1'de verilmektedir. Diğer karışımların granülometrik eğrileri ekler bölümünde verilmiştir.



Şekil 3.1 Kırmakum/İnce Agrega Oranı %100 Olan Karışımın Granülometrisi

3.4 Taze Beton Deneyleri

Mutlak hacim yöntemi esas alınarak üretilen betonlarda birim ağırlık ve çökme deneyleri yapıldı ve gerçek bileşimler hesaplandı. Betonlara verilen kodlardan K harfi ve onu takip eden rakamlar o betondaki kırmakum/ince agrega oranını, U harfi de o betonun uçucu kül içerdiğini göstermektedir. Tablo 3.6’da beton bileşimleri ve taze beton özellikleri verilmiştir.

Her seri beton için 3 adet $\phi 150\text{mm}$ –300mm boyutlarında silindir, 3 adet $\phi 100\text{mm}$ –200mm boyutlarında silindir ve 12 adet 70mmx70mmx280mm boyutlarında prizma numuneler üretildi. Üretilen betonlar 1 gün sonra kalıplarından çıkarıldı.

Her seri için üretilmiş numuneler 3 değişik kür ortamında saklandı. 1. kür ortamındakiler $+20^{\circ}\text{C}\pm 2$ sıcaklığındaki kirece doymuş su içine, 2. kür ortamındakiler ilk 7 gün ıslak çuval altına daha sonra laboratuvar ortamına, 3. kür ortamındakiler ise laboratuvar ortamına kondu.

Taze betonda çökme deneyi alt çapı 20 cm, üst çapı 10 cm ve yüksekliği 30 cm olan kesik çökme konisinde yapıldı. Koni üç kademeli doldurularak her tabakada 16 mm çapındaki demir çubukla 25’er kez şişlendi. Daha sonra koni sarsılmadan kaldırılıp ters çevrildi ve betonun çökme miktarı cm olarak ölçüldü.

Taze betonların birim ağırlıkları, iç hacmi 8 dm³ olan birim ağırlık kabına üretilen taze betondan konarak ve sarsma tablasında vibrasyon uygulanarak yerleştirilmesi ve yerleşmiş taze betonun ağırlığının kabın iç hacmine bölünmesiyle bulundu.

3.5 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri, $\phi 150\text{mm}$ –300mm ve $\phi 100\text{mm}$ –200mm boyutlarında silindir ve 70mmx70mmx280mm boyutlarında prizma numuneler üzerinde yapıldı.

Üretilen $\phi 150\text{mm}$ –300mm boyutlarındaki silindir numuneler 28 gün kirece doymuş su içinde bekletildi ve standart basınç dayanımı, elastisite modülü, hacimsel deformasyon, poisson oranı, çözülme sınırı ve süreksizlik sınırının hesabında kullanıldı.

$\phi 100\text{mm}$ –200mm boyutlarındaki silindir numunelerin 1 tanesi 90 gün $+20^{\circ}\text{C}\pm 2$ kirece doymuş su içerisinde, 1 tanesi ilk 7 gün ıslak çuval altında daha sonra 90. güne kadar laboratuvar ortamında, 1 tanesi de 90 gün sürekli laboratuvar ortamında bırakıldı. Bu numuneler üzerinde hızlı klor geçirimsizliği deneyi yapıldı.

70mmx70mmx280mm boyutlarındaki prizma numunelerin 4 tanesi 90 gün $+20^{\circ}\text{C}\pm 2$ kirece doymuş su içerisinde, 4 tanesi ilk 7 gün ıslak çuval altında daha sonra 90. güne kadar laboratuvar ortamında, 4 tanesi de 90 gün sürekli laboratuvar ortamında bırakıldı. Her kür şartındaki numunelerin 3 tanesinde eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri, 1 tanesinde ise kılcal geçirimsizlik deneyi yapıldı.

Tablo 3.6 Beton Bileşimleri ve Taze Beton Özellikleri														
karışımın kodu	çimento	uçucu kül	su	kırmataş 1	kırmataş 2	kırmakum	doğal kum	su/bağlayıcı	katkı miktarı	katkı / bağlayıcı	birim ağırlık	kompozite	hava	çökme
	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(%)	(Kg)	(%)	(Kg/m ³)	(%)	(dm ³ /m ³)	(cm)
K100	305	0	198	467	561	839	0	0,65	1,74	0,57	2370	79	11	18
K75	300	0	195	459	552	619	198	0,65	1,20	0,40	2324	78	27	16
K50	298	0	193	455	548	411	396	0,65	1,13	0,38	2300	77	34	18
K25	298	0	193	455	548	205	592	0,65	2,36	1,19	2292	77	34	16
K00	290	0	189	444	534	0	769	0,65	5,51	1,90	2225	75	59	16
UK100	229	68	193	455	548	819	0	0,65	0,80	0,27	2313	78	23	18
UK75	228	68	192	453	544	609	195	0,65	0,44	0,15	2290	78	29	18,5
UK50	228	68	192	452	544	408	393	0,65	0,89	0,30	2283	78	29	19
UK25	226	67	191	449	540	202	584	0,65	3,37	1,15	2260	77	57	16
UK00	221	66	186	439	528	0	760	0,65	4,53	1,58	2200	75	58	20

3.6 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

3.6.1 Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı deneyi, 28. günde $\phi 150\text{mm}$ – 300mm boyutlarındaki silindir numuneler ile 90. günde eğilme deneyinden kalan numuneler üzerinde yapıldı. Uygulanan yük: $P(\text{ton})$, basınç kuvvetinin uygulandığı alan: $A(\text{mm}^2)$ olmak üzere basınç dayanımı: $f_c (\text{N/mm}^2)$ aşağıdaki bağıntıdan hesaplandı.

$$f_c = (P/A) \times 10000 \times 9.81 \quad (3.1)$$

28 günlük silindir numunelerin basınç dayanımları ve elastisite modülleri Tablo 3.7’de gösterilmektedir.

Tablo 3.7 28 Günlük Silindir Numunelerin Basınç Dayanımları ve Elastisite Modülleri

Numune Kodu	Basınç Dayanımları (Mpa)	Elastisite Modülleri (MPa)
K100	37,9	35460
K75	35,5	33017
K50	33,07	31542
K25	34,6	37810
K00	30,55	27808
UK100	29,2	30073
UK75	24,3	28215
UK50	23,3	28424
UK25	22,5	25369
UK00	17,25	21708

90. günde eğilme deneyinden kalan prizma numunelerin basınç dayanımları Tablo 3.8’ de verilmiştir.

Tablo 3.8 90 Günlük Prizma Numunelerin Basınç Dayanımları

Seri No	Basınç Dayanımları (MPa)		
	Kirece Doygun Su İçerisinde	7 Gün Islak Çuvalaltında	Laboratuvar Ortamında
K100	49,8	48,42	38,47
K75	49,59	46,87	42,76
K50	48,95	46,12	37,71
K25	46,02	45,88	37,3
K00	44,54	43,57	38,06
UK100	43,67	38,2	33,47
UK75	37,52	34,29	31,19
UK50	36,39	29,83	27,55
UK25	35,63	33,21	28,67
UK00	25,64	25,17	24,73

3.6.2 Hacimsel Deformasyon, Poisson Oranı, Çözülme ve Süreksizlik Sınırı

Basınç dayanımı deneyi sırasında, belirli yük değerlerinde boyuna ve enine deformasyonlar ölçüldü. Boyuna deformasyonlar komparatörden, enine deformasyonlar da LVDT(Linear Voltage Direct Transducer) aletinden okundu. Hacimsel deformasyon yüksek mertebeli terimler ihmal edildiğinde elde edilen 3.2'deki denklem ile hesaplandı.

$$\Delta V/V_0 = \varepsilon_b - 2\varepsilon_e \quad (3.2)$$

Bu bağıntıda $\Delta V/V_0$ hacimsel deformasyon, ε_b boyuna deformasyon, ε_e enine deformasyondur.

Poisson oranları, her yükleme kademesindeki enine deformasyonun boyuna deformasyona oranı ile bulundu.

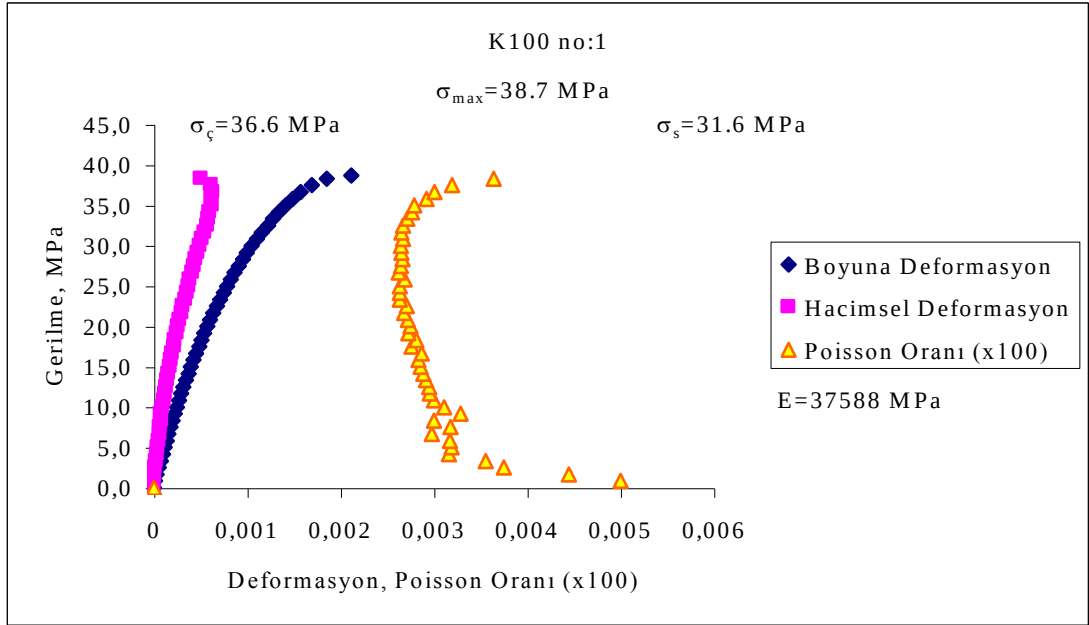
$$\nu = \varepsilon_b / \varepsilon_e \quad (3.3)$$

Çözülme sınırı olarak, hacimsel deformasyonun artma eğiliminden azalma eğilimine geçtiği noktaya karşılık gelen basınç dayanım değeri alınırken, süreksizlik sınırı olarak da poisson oranının azalma veya sabit kalma eğilimden artma eğilimine geçtiği noktaya karşılık gelen basınç dayanımı değeri alındı.

Tablo 3.9 Çözülme ve Süreksizlik Sınırları

Numune Kodu	Çözülme Sınırları (MPa)	Süreksizlik Sınırları (MPa)
K100	37,9	29,95
K75	35,5	26,93
K50	31,1	26,37
K25	32,73	26,9
K00	27,85	21,6
UK100	28,3	24,15
UK75	23,3	21,1
UK50	21,63	20,8
UK25	21,37	19,93
UK00	16,35	14,7

Elde edilen çözülme ve süreksizlik sınırı değerleri Tablo 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.2 K100 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği

Hacimsel deformasyon, poisson oranı, boyuna deformasyon, çözülme sınırı ve süreksizlik sınırı değerlerini içine alan K100 serisinin 1 nolu numunesinin grafiği Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Diğer numunelerin grafikleri ekler bölümünde verilmiştir.

Tablo 3.10 Çözülme ve Süreksizlik Sınırlarının Basınç Dayanımlarına Oranları

Numune Kodu	Çözülme Sınırı / Basınç Dayanımı	Süreksizlik Sınırı / Basınç Dayanımı
K100	0,94	0,79
K75	0,94	0,76
K50	0,94	0,79
K25	0,94	0,78
K00	0,91	0,7
UK100	0,97	0,83
UK75	0,96	0,87
UK50	0,96	0,89
UK25	0,95	0,88
UK00	0,95	0,85

Çözülme ve süreksizlik sınırlarının basınç dayanımlarına oranları Tablo 3.10’da verilmiştir. Uçucu küllü betonlarda bu oranlar daha yüksek elde edilmiştir.

3.6.3 Hızlı Klor Geçirirnililiği Deneyi

Hızlı klor geçirirnililiği deneyi 90. günde $\phi 100\text{mm}$ – 200mm boyutlarındaki silindir numunelerden kesilen parçalar üzerinde ASTM C 1202 standardına göre yapıldı.

Silindirlerden kesilmiş 100 mm çapında, 51 ± 2 mm kalınlığındaki numunelerin yan yüzleri elektrik iletmeyen bir malzeme ile kaplandıktan sonra numunelere 3 saat boyunca vakum uygulandı. Hemen sonra vakum haznesine su doldurularak numunelerin vakum etkisinde 1 saat su emmesi sağlandı. Bu işlemlerden sonra numuneler su içine bırakılarak deney başlayana kadar suya doymun halde bırakıldı. Daha sonra sudan çıkartılan numuneler, içine doldurulan çözeltilerin numuneyle temasına izin veren çözelti hücreleri arasına yerleştirildi. Hücrelerden birisi % 3' lük sodyum klorür, diğeri ise 0,3 N sodyum hidroksit ile dolduruldu. 60 V sabit potansiyel farkı uygulanarak beton numuneden geçen elektrik akım şiddeti miktarı 30 dakika arayla okundu. 6 saat süren deney sonunda numuneden geçen akım miktarı coulomb cinsinden bulundu.

90. günde yapılan deneyler sonucunda elde edilen klor geçirirnililiği değeri Tablo 3.11'de verilmektedir.

Tablo 3.11 90 Günlük Numunelerin Hızlı Klor Geçirirnililikleri

Seri No	Geçen Elektriksel Yük Miktarı (Coulomb)		
	Kirece Doymun Su İçerisinde	7 Gün Islak Çuval altında	Laboratuvar Ortamında
K100	5266,35	6182,1	7687,35
K50	5360,4	7036,65	9169,2
K00	9751,05	> 11000	> 12000
UK100	2351,25	10398,2	> 12000
UK50	2650,5	10534,5	> 13000
UK00	3033	> 12000	> 14000

Bu işlemlerin hepsi 3 farklı kür ortamındaki numuneler üzerinde de yapıldı. Kırmakum/ince agrega oranı % 0, % 50 ve % 100 olan seriler üzerinde hızlı klor geçirimsizliği deneyi yapılarak kırmakum içeriğinin de etkisi araştırıldı.

3.6.4 Kılcal Geçirimsizlik Deneyi

Kılcal geçirimsizlik deneyi, 70mmx70mmx280mm boyutlarındaki 3 değişik kür ortamında 90 gün saklanan prizma numunelerin 3 eşit parçaya kesilmesi ile elde edilen numuneler üzerinde yapıldı.

Kılcallık deneyinde kullanılacak numuneler 70°C’de sabit ağırlığa gelinceye kadar tutulduktan sonra yan yüzleri parafinlenerek 70mmx70mm’lik kesilmiş yüzeyleri su ile temas edecek şekilde içinde su bulunan kaba konuldu. Numunelerin başlangıç anından itibaren kuru ağırlıkları tartılarak 1., 4., 9., 16., 25., 36., 49., 64. dakikalarda kılcal su emmeleri belirlendi. Elde edilen kılcal geçirimsizlik katsayıları Tablo 3.12’de gösterilmiştir.

Tablo 3.12 90 Günlük Numunelerin Kılcal Geçirimsizlik Katsayıları

Seri No	Kılcal Geçirimsizlik Katsayıları (cm ² /sn), x10 ⁻⁶		
	Kirece Doygun Su İçerisinde	7 Gün Islak Çuval altında	Laboratuvar Ortamında
K100	3	3,48	8,6
K75	5,92	6,76	10,67
K50	7,29	7,29	12,72
K25	2,89	3,24	9
K00	2,25	3,24	4,41
UK100	4,84	8,22	12,48
UK75	3,24	12,25	14,69
UK50	3,61	13,69	23,68
UK25	5,29	7,29	12,25
UK00	4,41	6,25	7,47

Kılcal geçirimsizlik katsayıları aşağıdaki bağıntıyla elde edildi.

$$q^2 = k \times t \leftrightarrow k = q^2 / t \quad (3.4)$$

Bu bağıntıda k kılcallık katsayısını (cm^2/sn), q birim alandan emilen su miktarını (cm^3/cm^2), t süreyi (sn) ifade etmektedir.

3.6.5 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ultrases hızı deneyi 90. günde 3 farklı kür ortamında tutulan $70\text{mm} \times 70\text{mm} \times 280\text{mm}$ boyutlarındaki prizma numunelerde yapıldı. Ultrases hızı ölçümü sırasında numunelerin deneye tabi tutulan yüzeyleri, gres yağı ile yağlanarak deney aleti ve numune arasındaki hava boşluğu giderildi. Ultrases aleti yardımıyla numune üzerinden ses geçirilirken, bu sesin numuneden geçiş zamanı μs olarak ölçülmüş, sesin numune üzerinden geçtiği mesafe mm olarak belirlenmiştir. Geçiş mesafesi geçiş zamanına bölünerek ultrases geçiş hızı, km/sn olarak bulunmuştur. Elde edilen değerler Tablo 3.13'te verilmiştir.

Tablo 3.13 90 Günlük Numunelerin Ultrases Geçiş Hızları

Seri No	Ultrases Geçiş Hızları (km/sn)		
	Kirece Doygun Su İçerisinde	7 Gün Islak Çuval altında	Laboratuvar Ortamında
K100	4,91	4,78	4,62
K75	4,89	4,77	4,59
K50	4,86	4,73	4,53
K25	4,81	4,67	4,45
K00	4,67	4,42	4,34
UK100	4,91	4,67	4,51
UK75	4,87	4,58	4,46
UK50	4,8	4,44	4,31
UK25	4,7	4,43	4,3
UK00	4,46	4,17	4,15

3.6.6 Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımı deneyi, 70mmx70mmx280mm boyutlarındaki 3 değişik kür ortamında 90 gün saklanan prizma numuneler üzerinde 3 noktadan yüklenmiş basit kiriş metoduyla yapıldı. Deney aletinden okunan değer P(ton), moment M(kN-mm), mukavemet momenti W(mm³) olmak üzere eğilme dayanımı, σ_e (N/mm²) aşağıdaki bağıntıdan hesaplandı.

$$\sigma_e = M/W = [(Px l/4)/(bxh^2/6)] \quad (3.5)$$

Bu bağıntıdaki l(mm) mesnetler arası mesafe, b(mm) ve h(mm) değerleri de kuvvet uygulanan kesitin boyutlarıdır. Eğilme dayanımı deneyi sonuçları Tablo 3.13’de gösterilmektedir.

Tablo 3.14 90 Günlük Numunelerin Eğilme Dayanımları

Seri No	Eğilme Dayanımları (MPa)		
	Kirece Doygun Su İçerisinde	7 Gün Islak Çuval altında	Laboratuvar Ortamında
K100	7,4	8,04	7,25
K75	7,88	7,87	7
K50	7,58	7,51	6,86
K25	7,51	7,4	6,54
K00	6,54	6,81	6,18
UK100	6,7	6,44	6,11
UK75	7,4	5,72	5,31
UK50	6,85	5,63	4,93
UK25	6,14	5,47	5,24
UK00	5,13	4,8	4,31

4 DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

4.1 Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bütün betonlarda toplam bağlayıcı miktarı 300 kg/m^3 'te, su/toplam bağlayıcı oranı 0,65'te sabit tutuldu. Üretilen betonlarda rafine linyosülfonat ve modifiye polimer karışımı esaslı akışkanlaştırıcı bir katkı maddesi kullanılarak çökmenin 16-20 cm aralığında olması sağlandı. En büyük dane çapı 32 mm ve malzeme granülometrisi sabit olan aynı tür agrega kullanıldı.

Beton birim ağırlıkları kırmakumun artışıyla akışkanlaştırıcı katkı maddesinin azalması ve hava boşluklarının azalması nedeniyle artış gösterdi. Ayrıca uçucu küllü betonların birim ağırlıkları normal betonlarınkinden düşük oldu.

16–20 cm arası çökme sağlanabilmesi için akışkanlaştırıcı katkı maddesi uçucu küllü betonlarda normal betona göre daha az kullanıldı. Bu özellik de uçucu külün işlenebilmeyi arttırdığının göstergesidir. Kırmakum/ince agrega oranının artmasıyla kullanılan akışkanlaştırıcı katkı miktarı azalmaktadır.

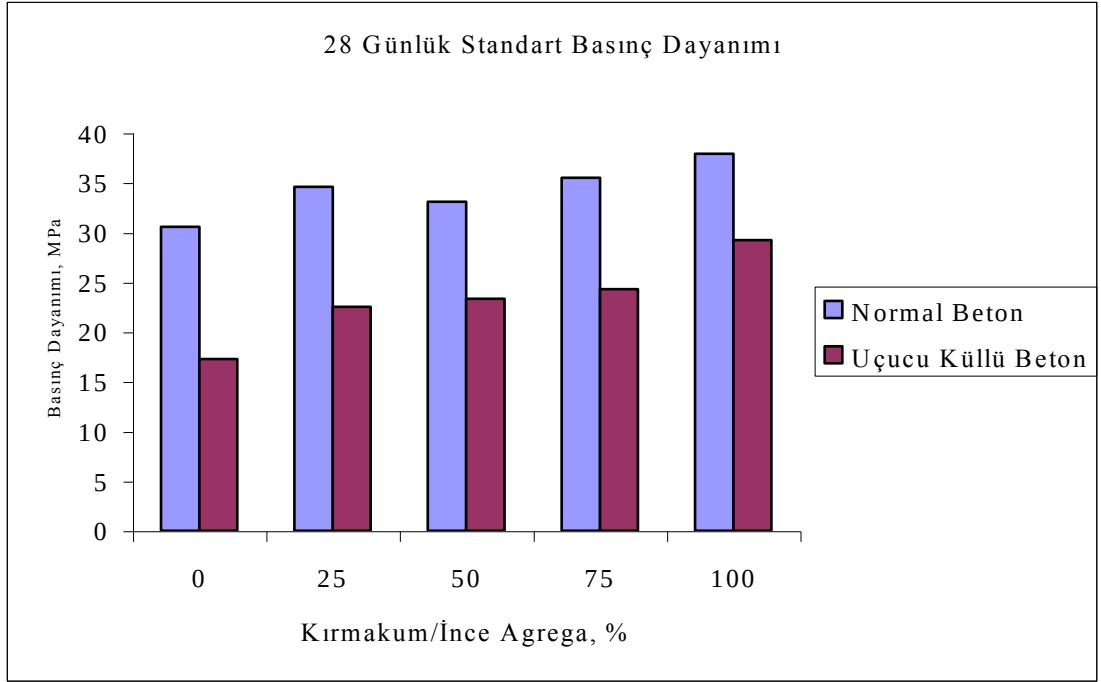
4.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.2.1 Basınç Dayanımı Sonuçlarının İrdelenmesi

Standart basınç dayanımı değerleri 28 gün kirece doymun su içerisinde bırakılmış 3'er adet $\phi 150\text{mm}-300\text{mm}$ boyutlarındaki silindir numuneler üzerinde yapıldı. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

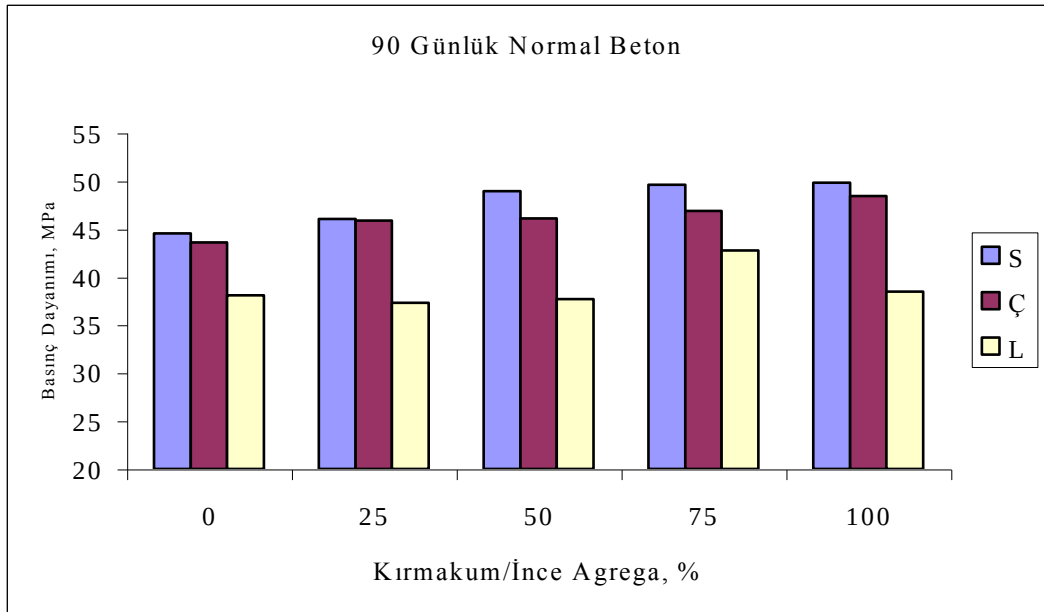
Uçucu küllü betonların basınç dayanımlarının normal betonlarınkinden daha düşük olduğu görüldü. Kırmakum/ince agrega oranı arttıkça hem normal betonda hem de uçucu küllü betonda basınç dayanımlarının arttığı görüldü. Kırmakumun içindeki

ince malzeme beton içindeki boşlukları doldurup sahip olduğu olumlu mekanik etki sebebiyle dayanımların artmasını sağlamıştır.



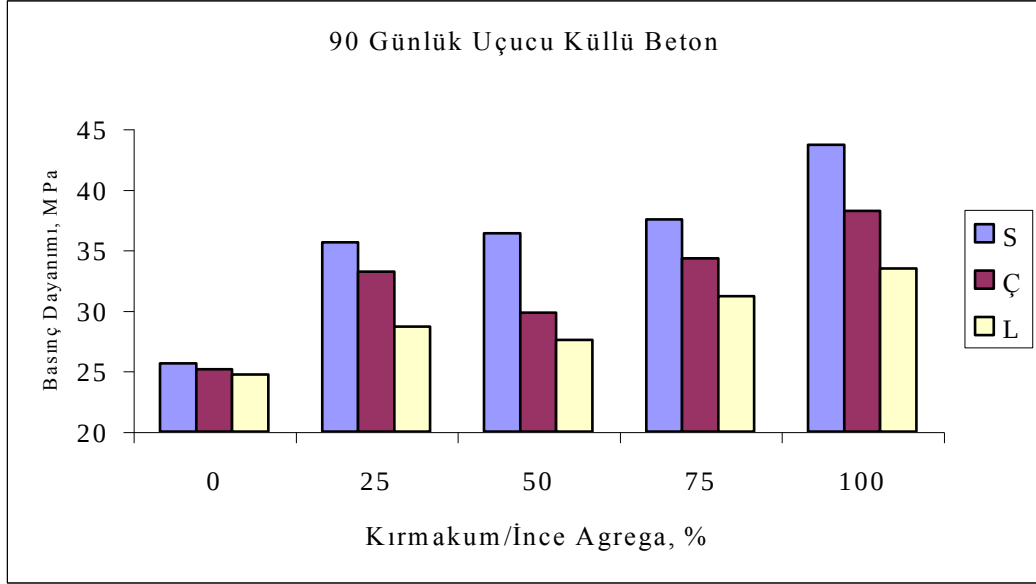
Şekil 4.1 28 Günlük Silindir Numunelerin Basınç Dayanımı

90. günde eğilme deneyinden kalan, 3 farklı kür ortamında tutulmuş prizma numuneler üzerinde yapılan basınç dayanımı deneylerinde de benzer sonuçlar elde edildi.



Şekil 4.2a 90 Günlük Normal Betonların Basınç Dayanımı

Farklı kür ortamındaki numuneler karşılaştırıldığında su kürünün önemi ortaya çıkmaktadır. 90 gün kirece doymun su içerisinde kalan numuneler, 7 gün ıslak çuval altında daha sonra laboratuvar ortamında ve 90 gün laboratuvar ortamında kalan numunelerden daha yüksek dayanımlar gösterdiler. 90 günlük prizma numunelerin basınç dayanımları Şekil 4.2a ve Şekil 4.2b’de gösterilmektedir.



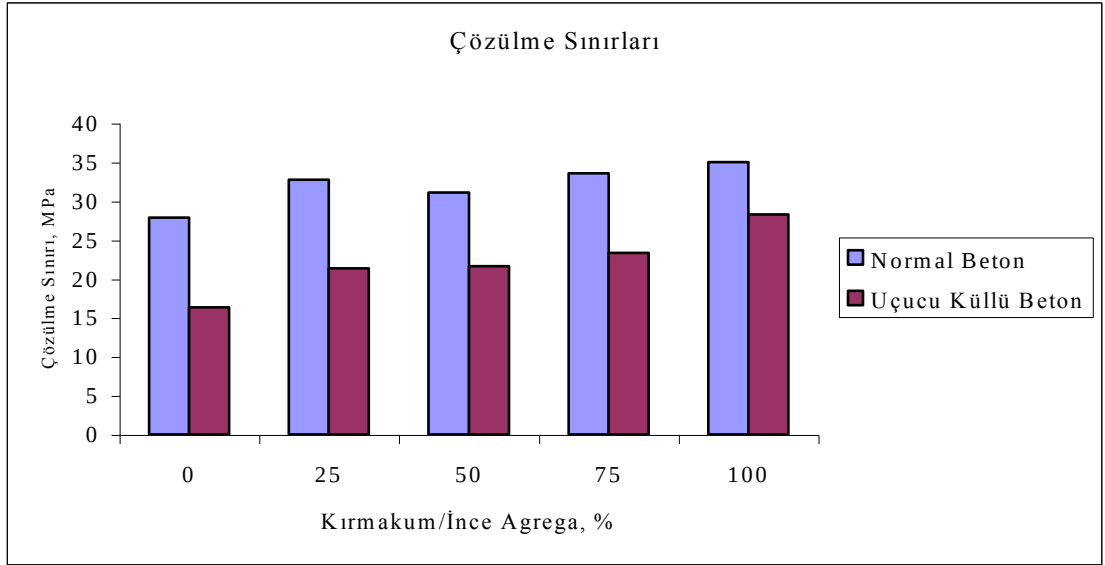
Şekil 4.2b 90 Günlük Uçucu Küllü Betonların Basınç Dayanımı

28 günlük silindir numunelerin elastisite modülü ve kür şartlarına göre çizilmiş 90 günlük basınç dayanımı grafikleri ekler bölümünde verilmiştir.

4.2.2 Çözülme ve Süreksizlik Sınırı Değerlerinin İrdelenmesi

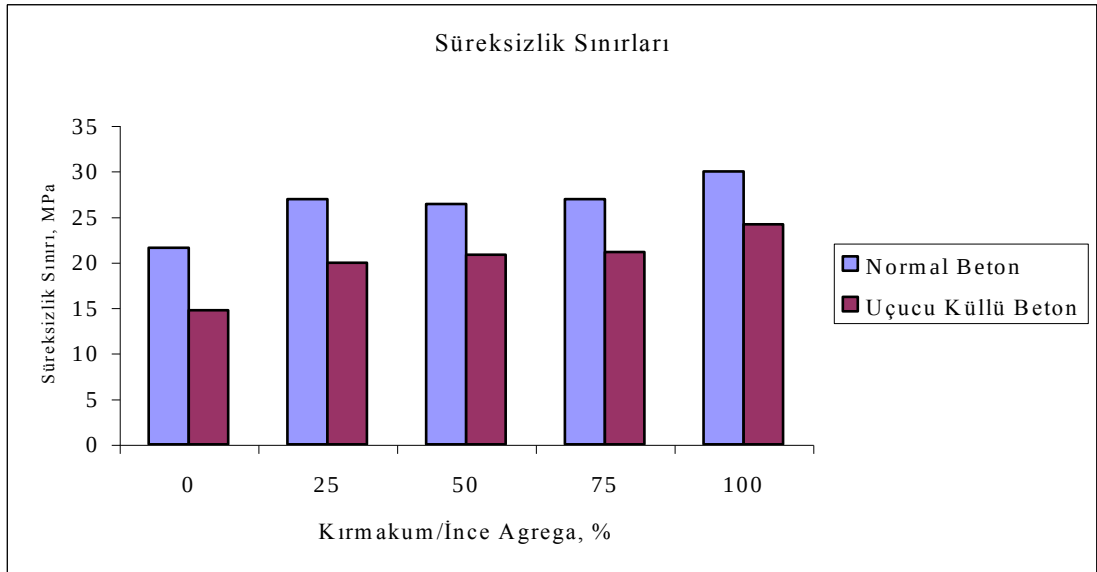
Çözülme ve süreksizlik sınırı değerleri basınç dayanımı sonuçlarına paralel olarak kırmakum/ince agrega oranının artmasıyla artışlar gösterdi. Uçucu küllü betonlarda normal betonlara göre daha düşük çözülme ve süreksizlik sınırı değerleri bulundu.

Çözülme ve süreksizlik sınırlarının basınç dayanımlarına oranları incelendiğinde, uçucu küllü betonlarda bu oranların daha yüksek olduğu görüldü. Bunun nedeni, uçucu külün betonun basınç dayanımı düşürürken çözülme ve süreksizlik sınırlarını belirgin olarak düşürmemesidir.



Şekil 4.3 28 Günlük Silindir Numunelerin Çözülme Sınırları

28 günlük silindir numunelerden elde edilen çözülme ve süreksizlik sınırları Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir.

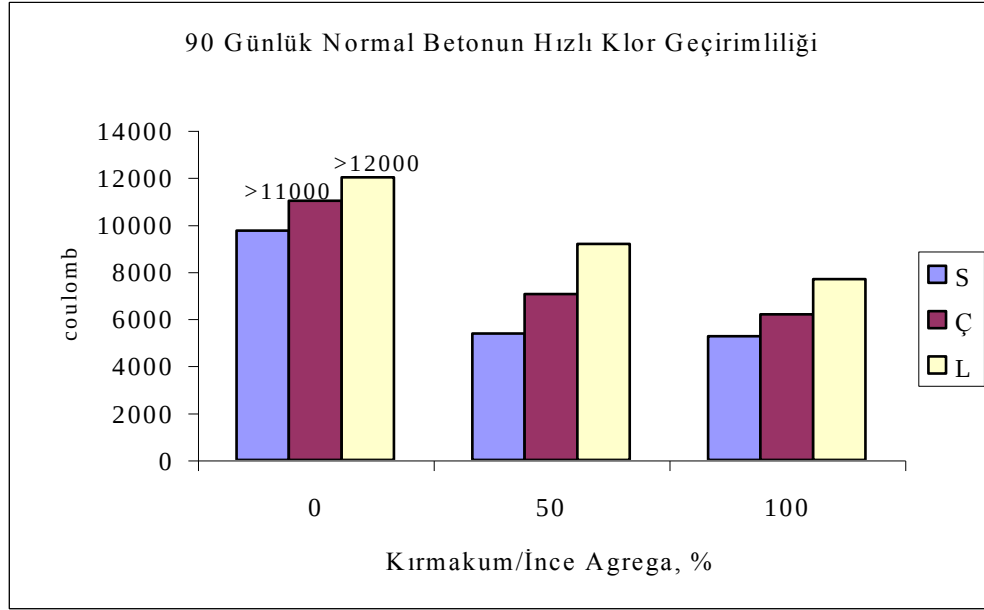


Şekil 4.4 28 Günlük Silindir Numunelerin Süreksizlik Sınırları

4.2.3 Hızlı Klor Geçirirliğı Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi

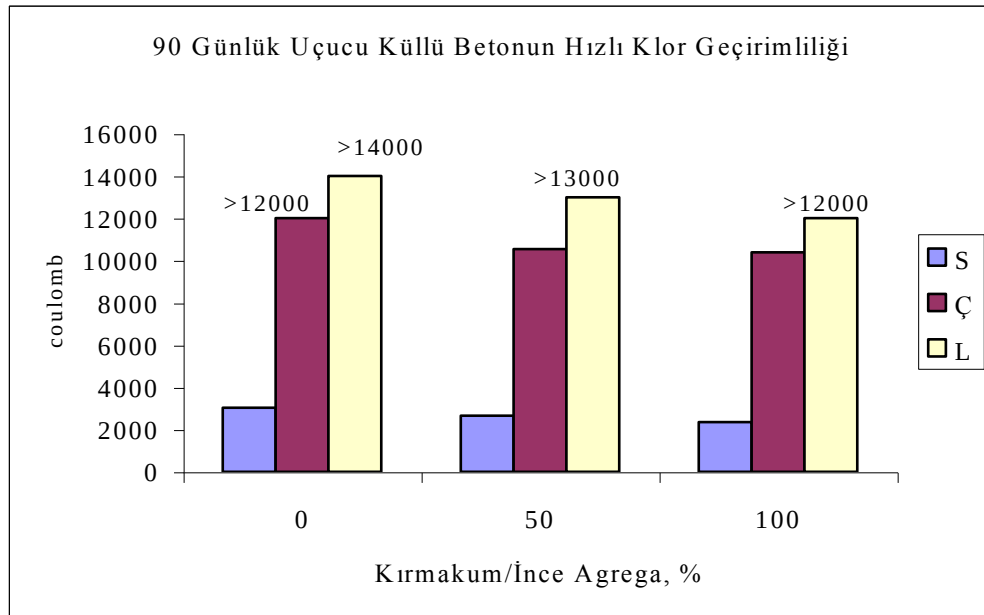
90. günde $\phi 100\text{mm}$ – 200mm boyutlarındaki silindir numunelerden kesilen parçalar üzerinde ASTM C 1202 standardına göre yapılan hızlı klor geçirirliğı deneylerinde kırnakum/ince agrega oranının artmasıyla betonun klor geçirirliğinde

azalma görüldü. Elde edilen klor geçirimliliği grafikleri Şekil 4.5a ve Şekil 4.5b’de verilmektedir.



Şekil 4.5a 90 Günlük Normal Betonun Hızlı Klor Geçirimliliği

90 gün kirece doymuş su içerisinde kalan numunelerin klor geçirimlilikleri 7 gün ıslak çuval altında daha sonra laboratuvar ortamında ve 90 gün laboratuvar ortamında kalan numunelerinkinden daha az oldu.



Şekil 4.5b 90 Günlük Uçucu Küllü Betonun Hızlı Klor Geçirimliliği

Özellikle uçucu küllü betonlarda kirece doymuş su içerisinde kalan numunelerin klor geçirimsizlikleri diğerlerine göre çok düşük elde edildi. Bu da uçucu küllü betonlarda kürün önemini ortaya koymaktadır. Çünkü uçucu kül, çimentonun hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan kireci kullanarak bağlayıcı özellik kazanmaktadır.

Tablo 4.1’de verilmiş ASTM C 1202’de belirtilen kriterlere göre klor iyonu geçirimsizliği yönünden kirece doymuş su içinde tutulmuş uçucu küllü betonlar orta derecede yer almakta, diğer betonlar yüksek derecede klor iyonu geçirmektedir.

Tablo 4.1 Klor İyonu Geçirimsizliği Sınıfları (ASTM C 1202)

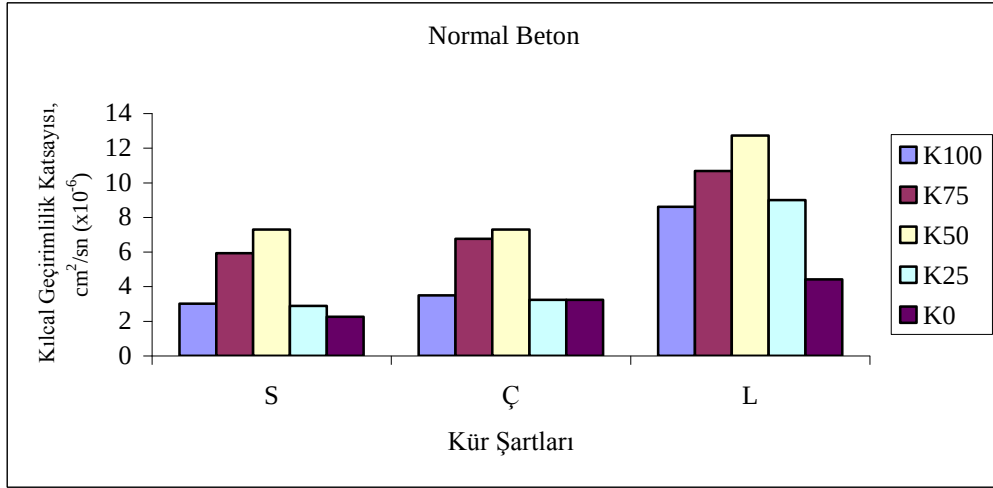
Geçen Elektriksel Yük Miktarı (Coulomb)	Klor İyonu Geçirimsizliği Yönünden Değerlendirme
> 4000	Yüksek
2000 - 4000	Orta
1000 - 2000	Düşük
100 - 1000	Çok Düşük
< 100	İhmal Edilebilir

Elde edilen hızlı klor geçirimsizliği sonuçlarının uçucu kül içeriği ve kür şartları açısından gösterimi ekler bölümünde verilmiştir.

4.2.4 Kılcal Geçirimsizlik Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi

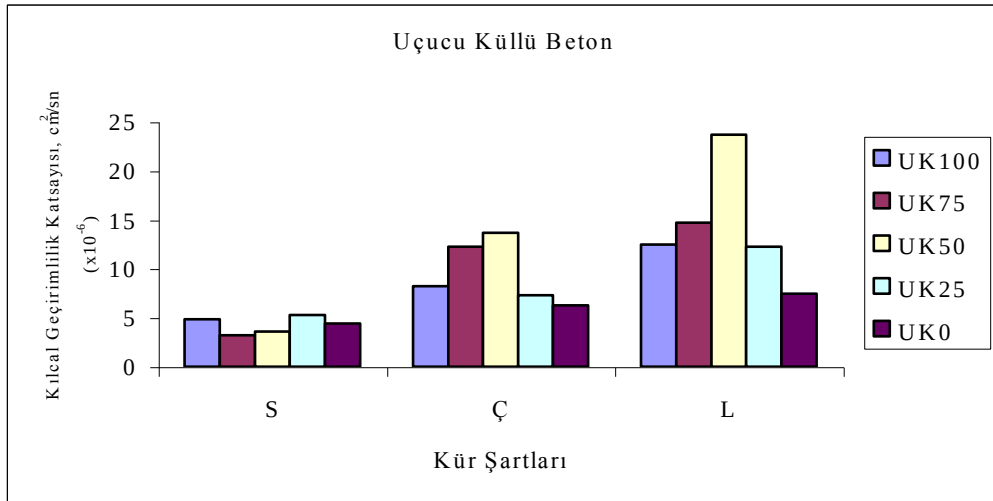
70mmx70mmx280mm boyutlarındaki 3 değişik kür ortamında 90 gün saklanan prizma numunelerin 3 eşit parçaya kesilmesi ile elde edilen numuneler üzerinde yapılan kılcal geçirimsizlik katsayısı deneylerinde uçucu küllü betonların kılcal geçirimsizlik katsayıları normal betonlarınkine göre daha yüksek bulundu. Elde edilen kılcal geçirimsizlik katsayılarının grafiklerle gösterimi Şekil 4.6a ve Şekil 4.6b’de verilmiştir.

Kür şartları açısından incelendiğinde ise 90 gün kirece doymuş su içerisinde kalan ve 7 gün ıslak çuval altında daha sonra laboratuvar ortamında tutulan numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayıları yakın sonuçlar verirken, 90 gün laboratuvar ortamında tutulan numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayıları daha yüksek elde edildi. Bunun nedeni olarak çimentonun hidratasyonu için ortamda yeterli suyun olmaması ve bunun sonucunda betonun daha boşluklu bir yapıda olmasıdır.



Şekil 4.6a 90 Günlük Normal Betonun Kılcal Geçirimsizlik Katsayıları

Kırmakum/ince agrega oranı açısından incelendiğinde ise de bu oran %0'dan %50'ye kadar arttırıldığında kılcal geçirimsizlik katsayılarında artma gözlenirken, %50'den %100'e arttırıldığında ise kılcal geçirimsizlik katsayılarında azalma görüldü. Kırmakum/ince agrega oranı %50'ye kadar arttıkça kılcal kanallar daralmakta ve çapı küçülmekte ve dolayısıyla kılcallık katsayısı artmakta, bu oranın ötesinde ise kılcal kanallar tıkanmaya başlamakta ve kılcallık katsayısı azalmaktadır.



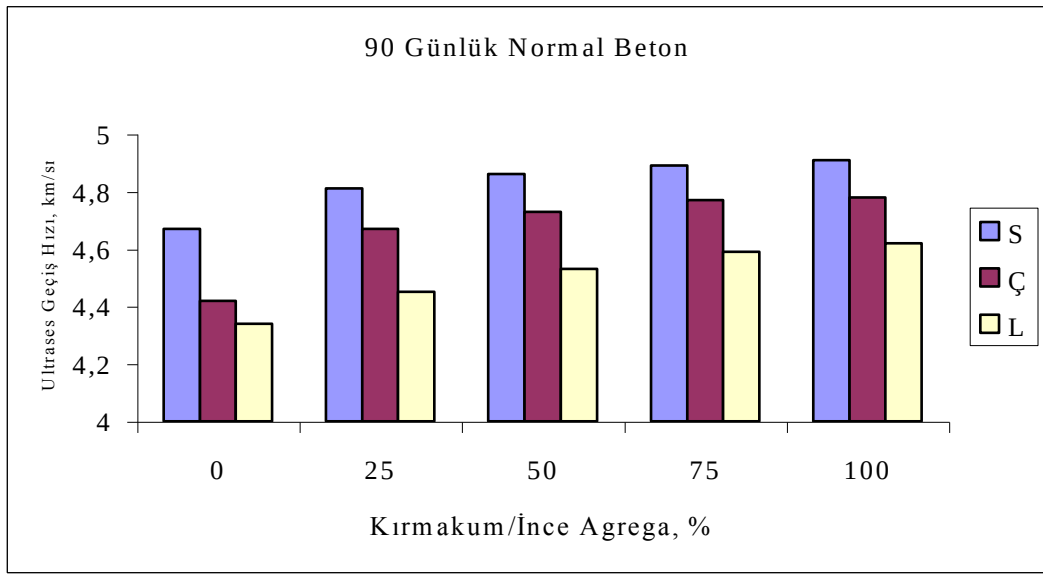
Şekil 4.6b 90 Günlük Uçucu Küllü Betonun Kılcal Geçirimsizlik Katsayıları

Uçucu kül içeriğinin kür şartlarıyla kılcal geçirimsizliğe etkisini gösteren grafikler ekler bölümünde verilmiştir.

4.2.5 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi

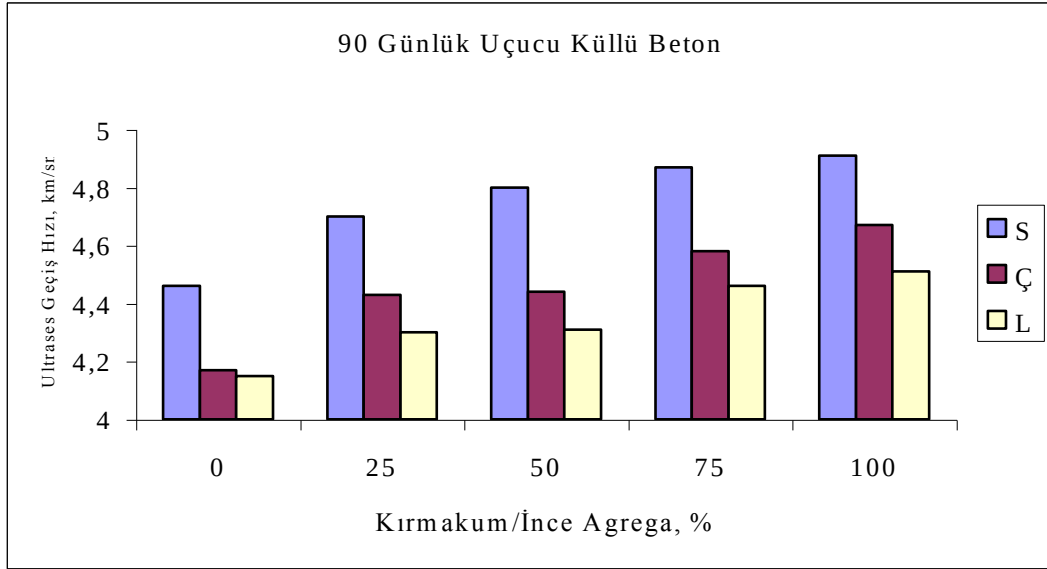
90. günde 3 farklı kür ortamında tutulan 70mmx70mmx280mm boyutlarındaki prizma numunelerde yapılan ultrases geçiş hızı deneylerinde uçucu küllü betonların ultrases geçiş hızı değerleri normal betonlarınkinden çok az düşmeler gösterdi. Beton içindeki hava miktarlarına bakıldığında uçucu küllü betonlarda daha çok hava boşluğu olduğu ve bu nedenle ultrases geçiş sürelerinin artıp ultrases geçiş hızlarının azaldığı görüldü.

Elde edilen ultrases geçiş hızı sonuçları Şekil 4.7a ve Şekil 4.7b’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7a 90 Günlük Normal Betonun Ultrases Geçiş Hızları

Kırnakum içeriğinin artmasıyla hem uçucu küllü hem de normal betonlarda, ultrases geçiş hızı değerlerinde bir artış gözlemlendi. Kırnakum içeriğinin artmasıyla kompasitede de artma olmakta ve ultrases geçiş hızı değerleri yükselmektedir.



Şekil 4.7b 90 Günlük Uçucu Küllü Betonun Ultrases Geçiş Hızları

Kür şartlarına göre ultrases geçiş hızlarında ise 90 gün kirece doymun su içerisinde kalan numunelerde en yüksek değerler elde edilirken, 90 gün laboratuvar ortamında tutulan numunelerde en düşük değerler elde edilmiştir. Bunun nedeni, laboratuvar ortamında çimentonun hidrasyonunu tamamlaması için ortamda yeterli suyun olmaması ve boşluklu beton yapısı oluşmasıdır.

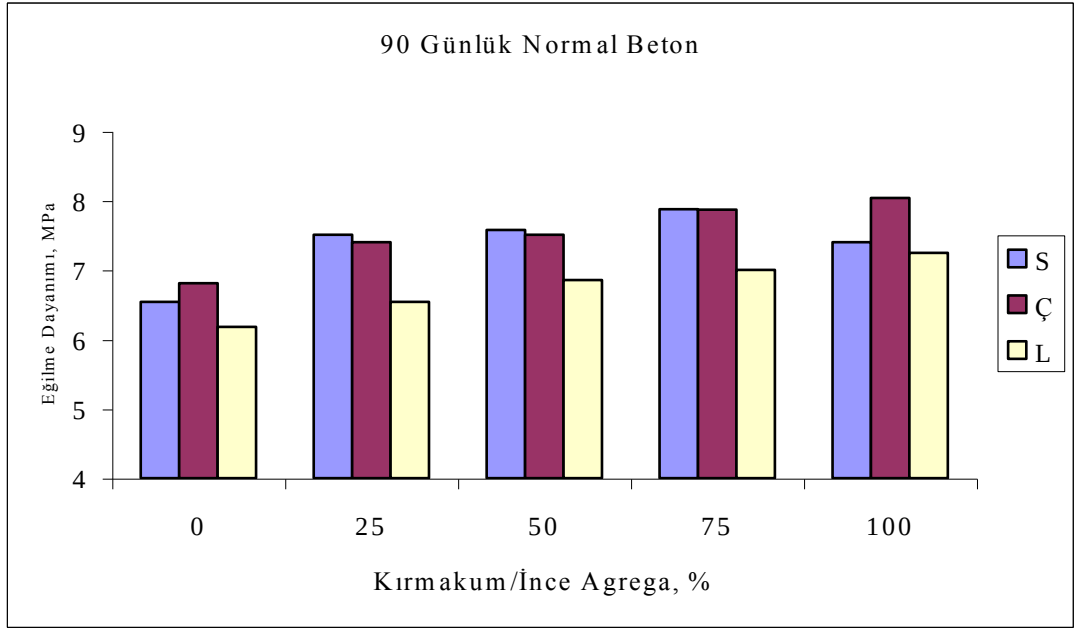
Uçucu kül içeriğiyle kür şartlarına göre çizilmiş ultrases geçiş hızı grafikleri ekler bölümünde verilmiştir.

4.2.6 Eğilme Dayanımı Sonuçlarının İrdelenmesi

3 farklı kür ortamında 90 gün saklanmış 70mmx70mmx280mm boyutlarındaki prizma numuneler üzerinde yapılan eğilme dayanımı deneylerinde kırma kum/ince agrega oranı arttıkça dayanımların arttığı görüldü.

Uçucu küllü betonlarda eğilme dayanımları, normal betonlarınkinden daha düşük oldu. Bunun nedeni, uçucu külün puzolanik reaksiyonunun yavaş olması ve uçucu külün 90. günden sonra puzolanik etkisini göstermesidir.

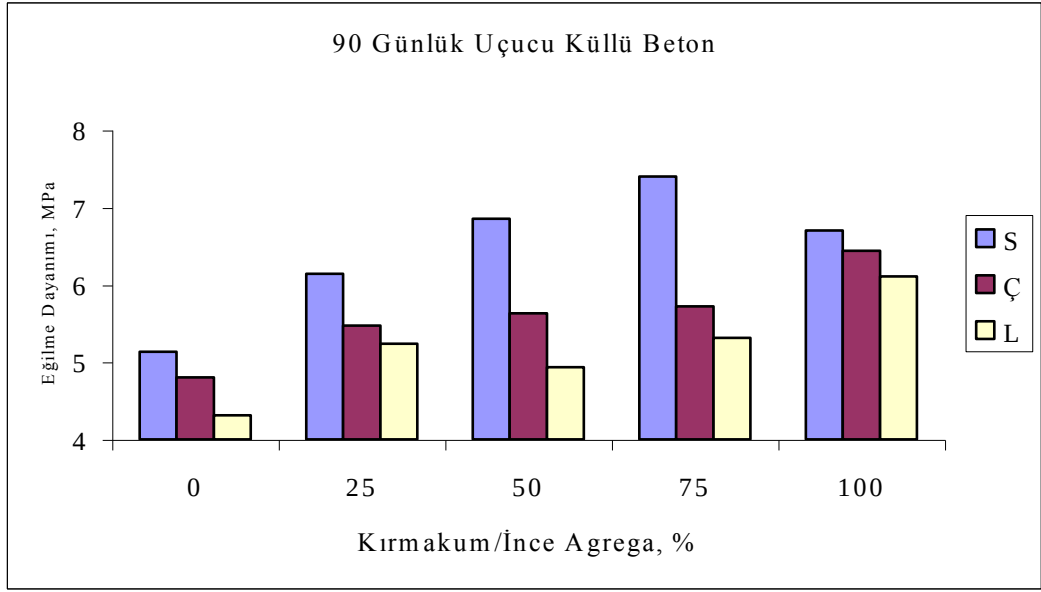
Eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.8a ve Şekil 4.8b’de verilmektedir.



Şekil 4.8a 90 Günlük Normal Betonun Eğilme Dayanımları

Uçucu küllü betonlarda 90 gün kirece doygun su içerisinde tutulan numunelerin eğilme dayanımları, 7 gün ıslak çuval altı daha sonra laboratuvar ortamında tutulan numunelerin dayanımlarından daha yüksek olurken; normal betonlarda bu iki kür ortamında tutulan numunelerin eğilme dayanımları birbirlerine daha yakın oldu. Hem uçucu küllü hem de normal betonlarda 90 gün laboratuvar ortamında tutulan numunelerin eğilme dayanımları en düşük değerleri aldı. Çimentonun hidratasyonu için ihtiyaç duyduğu suyun, ortamda yeterli miktarda bulunmaması dayanımlarda azalmaya neden olmaktadır.

Uçucu kül içeriği ve kür şartlarına göre çizilmiş eğilme dayanımı grafikleri ekler bölümünde verilmiştir.



Şekil 4.8b 90 Günlük Uçucu Küllü Betonun Eğilme Dayanımları

5 GENEL SONUÇLAR

5.1 Taze Beton Özellikleri

Uçucu küllü betonların birim ağırlıklarının normal betonların birim ağırlıklarından daha az olduğu görüldü. Ayrıca uçucu küllü betonların işlenebilmeyi arttırdığı ve aynı işlenebilirliği sağlamak için daha az akışkanlaştırıcı katkı maddesine ihtiyaç olduğu görüldü.

Kırmakum içeriğinin artmasıyla betonların kompasitelerinde de artış gözlemlendi. Kırmakumdaki filler malzeme beton içerisindeki boşlukları doldurarak daha dolu bir beton üretilmesini sağlamaktadır.

5.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri

5.2.1 Basınç Dayanımları, Çözülme ve Süreksizlik Sınırları

Yapılan deneylerde 28 günlük silindir basınç dayanımlarının uçucu küllü betonlarda daha düşük çıktığı gözlemlendi. Uçucu küllü betonların basınç dayanımlarının yaklaşık %20 ile %35 arasında azaldığı görüldü.

Aynı şekilde eğilme deneyinden kalan 90 günlük parçalar üzerinde yapılan deneylerde uçucu küllü betonların dayanımlarının daha az olduğu görüldü. Normal betonlara göre uçucu küllü betonların dayanımlarında %15 ile %25 arasında düşüşler gözlemlendi.

Bu deneylerde kirece doymuş su içinde bırakılmış numuneler ile 7 gün ıslak çuvalaltında daha sonra laboratuvar ortamında bırakılmış numunelerin dayanımları birbirlerine yakın, buna karşın laboratuvar ortamında tutulmuş numunelerin dayanımları ise yaklaşık %15 ile %25 civarında düşük elde edildi.

Deneylerde ince agrega olarak kırmakum kullanımının betonun basınç dayanımını arttırdığı görüldü. Hem normal betonlarda hem de uçucu küllü betonlarda 28. ve 90. günlerde yapılan deneylerde kırmakum/ince agrega oranı arttıkça betonların basınç dayanımlarının arttığı gözlemlendi.

Çözülme ve süreksizlik sınırlarının da basınç dayanımı değerlerine paralel olarak uçucu küllü betonlarda daha düşük çıkmakla beraber kırmakum içeriğinin artmasıyla arttığı görüldü.

5.2.2 Hızlı Klor Geçirirliiği

Hızlı klor geçirirliiği deneylerinde betonların klor iyonu geçirirliliklerinin kırmakum/ince agrega oranının artmasıyla azaldığı görüldü. Kırmakumdaki filler malzemenin boşlukları doldurma özeliği geçirirliliğın azalmasında etkili olmaktadır.

Yapılan deneylerde uçucu küllü betonlarda su kürünün önemi açıkça görülmüştür. 90 gün kirece doygun su içinde tutulan uçucu küllü betonların klor geçirirlilikleri hem normal betonlarıkinden hem de diğerkür ortamlarında tutulmuş uçucu küllü betonlarıkinden çok daha düşük çıkmıştır. Uçucu külün puzolanik etki özeliği klor geçirirliliğının azalmasında etkili olmaktadır.

5.2.3 Kılcal Geçirirlilik Katsayıları

3 farklı kür ortamında 90 gün tutulmuş numuneler üzerinde yapılan kılcal geçirirlilik deneylerinde de uçucu küllü betonlarda su kürünün önemi görülmektedir. Uçucu küllü betonların su içinde tutulmuş olanlarında kılcallık katsayılarının diğerkür ortamında tutulmuş olanlardan çok daha düşük olduğı gözlemlendi.

Normal betonlarda ise su içinde ve ilk 7 gün ıslak çuvalaltında tutulmuş numunelerin kılcallık katsayılarının birbirlerine yakın, laboratuvar ortamında tutulmuş numunelerinkinin ise bunlardan daha yüksek olduğı görüldü.

Kırmakum/ince agrega oranı %0'dan %50'ye kadar arttırıldığında kılcal geçirirlilik katsayılarında artma gözlenirken, %50'den %100'e arttırıldığında ise kılcal

geçirimsizlik katsayılarında azalma görüldü. Kılcal geçirimsizliğin azalmasında kırmakumdaki filler malzemenin boşlukları doldurması etkili olmaktadır.

5.2.4 Ultrases Geçiş Hızları

90 günlük numuneler üzerinde yapılan deneylerde, kırmakum içeriğinin artırılmasıyla daha dolu bir beton edilmesi, ultrases geçiş hızlarını arttırmıştır.

Kirece doymuş su içinde tutulmuş numunelerin uçucu küllü olanlarında normal betonla yaklaşık değerler elde edildi. Diğer 2 kür ortamında tutulmuş uçucu küllü numunelerde normal betondan düşük ultrases geçiş hızları bulundu.

5.2.5 Eğilme Dayanımları

Yapılan deneylerde kırmakum içeriğinin artışıyla eğilme dayanımlarının arttığı görüldü. Kırmakum, agregalar arasındaki boşlukları doldurarak dayanımı arttırmaktadır.

Su içinde tutulmuş uçucu küllü betonların eğilme dayanımlarında normal betonlarınkine yakın değerler elde edilirken, diğer 2 kür ortamında tutulmuş uçucu küllü betonların eğilme dayanımlarında oldukça düşük değerler elde edildi. Bunun nedeni de ortamda yeterli suyu bulamayan uçucu külün reaksiyonunu tamamlayamaması sonucu boşluklu bir beton elde edilmesidir.

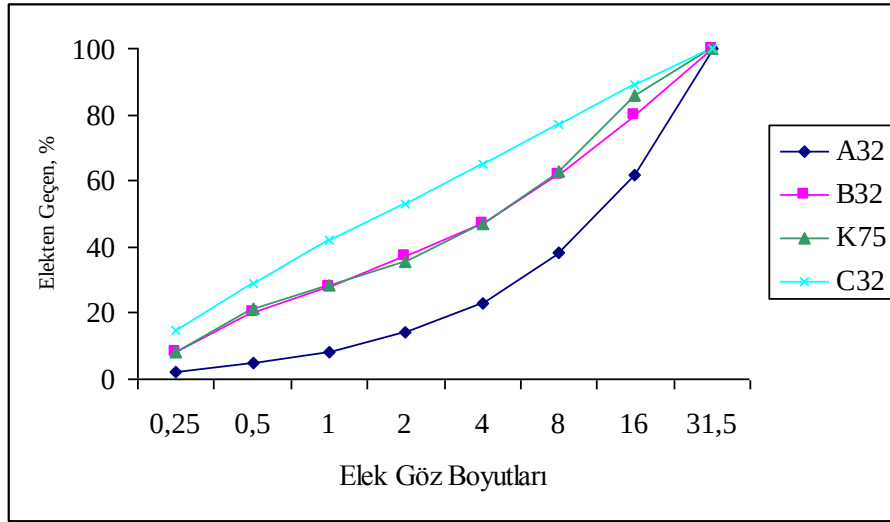
KAYNAKLAR

- [1] **Schiessl, P. ve Haerdtl, R.** (1993). Betonda Uçucu Kül – Etki ve Hesaplanabilirlik Üzerine İncelemeler, Aachen, s.1-3.
- [2] **ASTM C618** (1978). Specification for Fly Ash & Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use As a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete.
- [3] **Erdoğan, T.**, (1993). Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması.
- [4] **Dodson, V.H.** (1990). Concrete Admixtures. Van Nostrand Reinhold, New York, s.160-163.
- [5] **Turanlı, L., Erdoğan, T. ve Koraer, K.** (1977). Çayırhan Uçucu Külünün Portland Çimentosu-Uçucu Kül Hamur ve Harçlarının Özelliklerine Etkileri Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması, Eskişehir.
- [6] **Özturan, T.** (1991). Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği. 2. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.
- [7] **Berry, E.E. ve Malhotra, V.M.** (1986). Fly Ash in Concrete. CANMET, Ottawa, s.223-229.
- [8] **Taşdemir, M.A., Demir, M., Erenoğlu, T. ve Ekim, H.** (2003). Uçucu Kül İnceliğinin ve Miktarının Beton ve Harçlarda Dayanım Gelişimine Etkileri, Hazır Beton, Ocak-Şubat, s.72-78.
- [9] **Aitcin, P.C. et al** (1986). Comparative Study of the Cementitious, Properties of Different Fly Ashes. Proc. of the Inter. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, VI, s.91-144.
- [10] **Tokyay, M. ve Erdoğan, K.** (1998). Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu. TÇMB / AR-GE, s.7-15.
- [11] **Ramachandran, V.S.** (1984). Concrete Admixtures Handbook. Properties, Science and Technology, Park Ridge, N.J., Noyes Publications.
- [12] **Postacıoğlu, B.** Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar Cilt-2.
- [13] **T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı** Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Çimento Hammaddeleri ve Yapı Malzemeleri Çalışma Grubu Raporu (1996). Çimento Hammaddeleri ve Yapı Malzemeleri Cilt-1, Ankara, s.53.
- [14] **ACI Committee 226**, (1987). Use of Fly Ash in Concrete. ACI Materials Journal, September-October, s.381-409.
- [15] **Şengül, O., Taşdemir, C., Yüceer, Z., Erbaydar, M. ve Taşdemir, M.A.** (2002). Mechanical Behaviour of High Strength Concretes with High Volume Ash. 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Leipzig, June 16-20, s.1407-1420.
- [16] **Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M.V., Peris, E. ve Gonzalez-Lopez, E.** (1997). Mechanical Treatments of Fly Ashes. Part III : Studies on Strength Development of Ground Fly Ashes-Cement Mortars. Cement and Concrete Research, Vol.27, No.9, s.1365-1377.
- [17] **Helmuth, R.** (1987). Fly Ash in Cement and Concrete. Portland Cement Association, s.8-13,203.

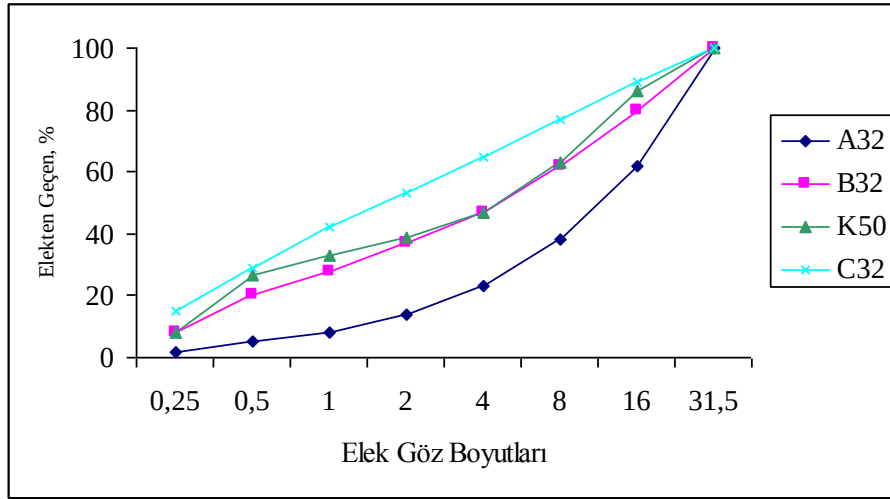
- [18] **Sirivnatnanon, V. et al** (1994). Mechanical and Durability Properties of High Volume Fly Ash Concrete. 3. CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Supplementary Papers, Nice France, s.967-983.
- [19] **Raymar, K.** (1993). Uçucu Küllerin Çimento Harcının Büzülmesine ve Betonun Karbonatlaşmasına Olan Etkileri. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Ankara, s.135-150.
- [20] **Wasti, Y.** (1993). Uçucu Küllerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanımı. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Ankara, s.37-44.
- [21] **Jarrige, A.** (1971). Les Volantes Propriete–Applications–Industrielles. Editions Eyrolles, Paris.
- [22] **Akman, M.S.** (1993). Ağırılık Barajlarında Uçucu Küllü Rolkrit Kullanımı. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Ankara, s.9-22.
- [23] **Gürsel, O.** (1982). Uçucu Küller. Türkiye İnşaat ve Tesisat Müteahitliği İşveren Sendikası, Ankara, Haziran.
- [24] **Centre For Civ. En. Re. and Co.** (1992). Fly Ash as Addition to Concrete. Rotterdam A.A. Balkema, s.32-65.
- [25] **Akman, M.S.** (1978). Yapı Malzemeleri. İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [26] **Sivasundaram, V., Carette, G.G. ve Malhotra, V.M.** (1989). Properties of Concrete Incorporating Low Quantity of Cement and High Volumes of Low-Calcium Fly Ash. Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete Volume 1, Trondheim, Norway, s.219-240.
- [27] **Haque, M.N., Day, R.L. ve Langen, B.W.** (1988). Realistic Strenght of Air-A-Entrained Concretes with and without Fly Ash. ACI Materials Journal, Vol.85, s.241-247.
- [28] **Olek, J. ve Diamond, S.** (1989). Proportioning of Consant Paste Composition Fly Ash Processing Mixes. ACI Materials Journal, Vol.86, s.159-165.
- [29] **Hassan, K.E., Cabrera, J.G. ve Maliche, R.S.** (2000). The Effect of Mineral Admixtures on the Properties of High-Performance Concrete. Cement and Concrete Composites, Vol.22, s.267-271.
- [30] **Haque, M.N. ve Kayalı, O.** (1998). Properties of High-Strength Concrete Using a Fine Fly Ash. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No.10, s.1445-1452.
- [31] **Atış, C.D.** (2000). Heat Evolution and Drying Shrinkage of Concrete Containing Hihg Volume Fly Ash. Proceedings of Second International Symposium in Cement and Concrete Technology in the 2000's İstanbul, Turkey, September 6-10, s.359-369.
- [32] **Langley, W.S., Carette, G.G. ve Malhotra, V.M.** (1992). Strenght Development and Temperature Rise in Large Concrete Blocks Containing High Volumes of Low-Calcium (ASTM Class F) Fly Ash. ACI Materials Journal, Vol.89, s.362-368.
- [33] **Barrow, R.S., Hadchiti, K.M., Carrasquillo, P.M. ve Carrasquillo, R.L.** (1989). Temperature Rise and Durability of Concrete Containing Fly Ash. Proocedings of Third International Conferensec on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete Volume 1, Trondheim, Norway, s.331-347.
- [34] **Lam, L., Wong, Y.L. ve Poon, C.S.** (1998). Effect of Fly Ash and Silica Fume on Compressive and Fracture Behaviors of Concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No.2, s.271-283.

- [35] **Mehta, P.K. ve Gjorv, O.E.** (1982). Properties of Portland Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica Fume. Cement and Concrete Research, Vol.12, s.587-595.
- [36] **Haque, M.N., Langen, B.W. ve Ward, B.A.** (1984). High Fly Ash Concretes. ACI Journal, 81, s.54-60.
- [36] **Malhotra, V.M., Zang, M.H. ve Leaman, G.H.** (2000). Long-Term Performance of Steel Reimforcing Bars in Portland Cement Concrete Incorporating Moderate and High Volumes of ASTM Class F Fly Ash. ACI Material s Journal, Vol.97, s.409-417.
- [37] **Smith, I.A.,** (1967). The Design of Fly Ash Concrete. Proc. Inst. Civil Engineers, London, s.769-789.

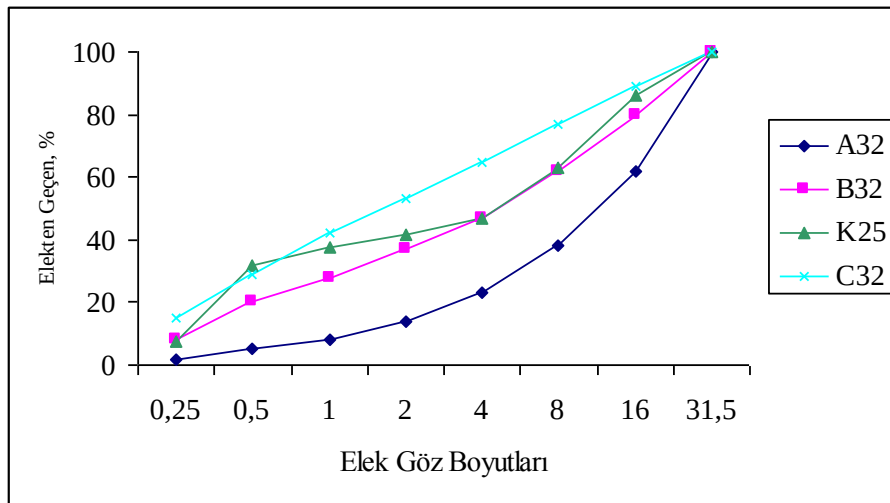
EKLER



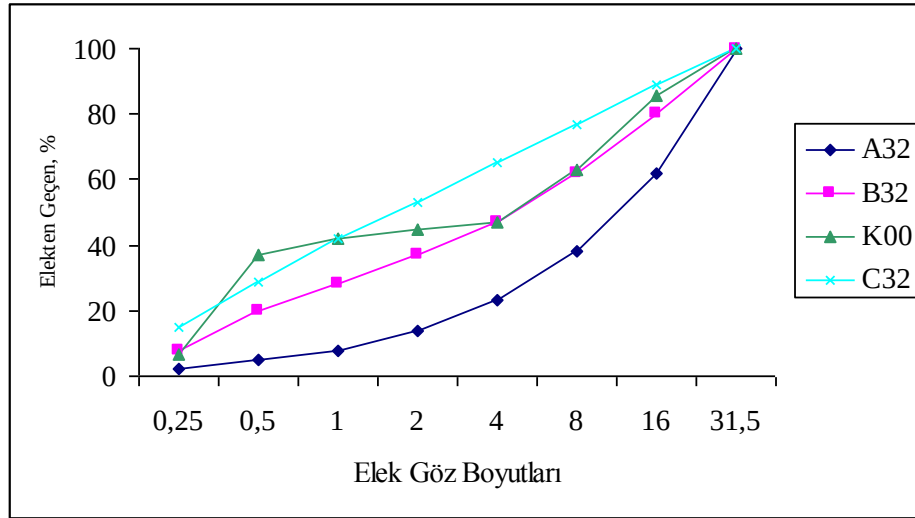
Şekil Ek.1 Kırmakum/İnce Agrega Oranı %75 Olan Karışımın Granülometrisi



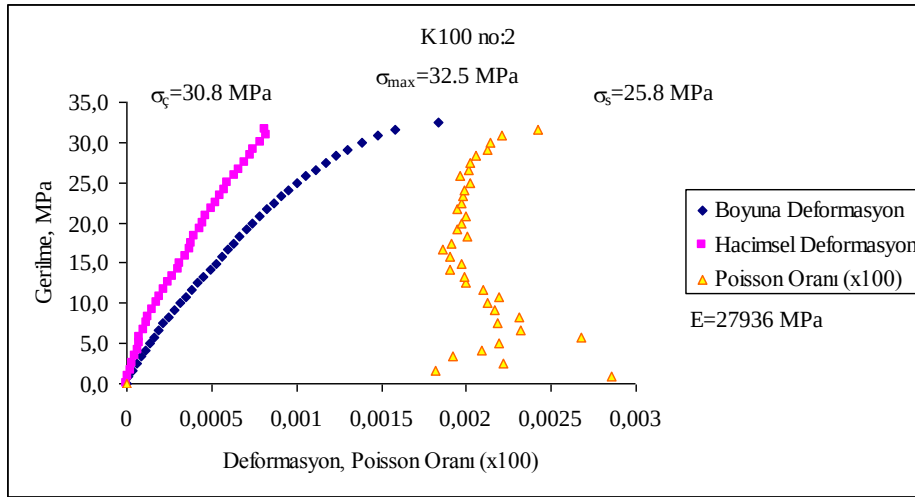
Şekil Ek.2 Kırmakum/İnce Agrega Oranı %50 Olan Karışımın Granülometrisi



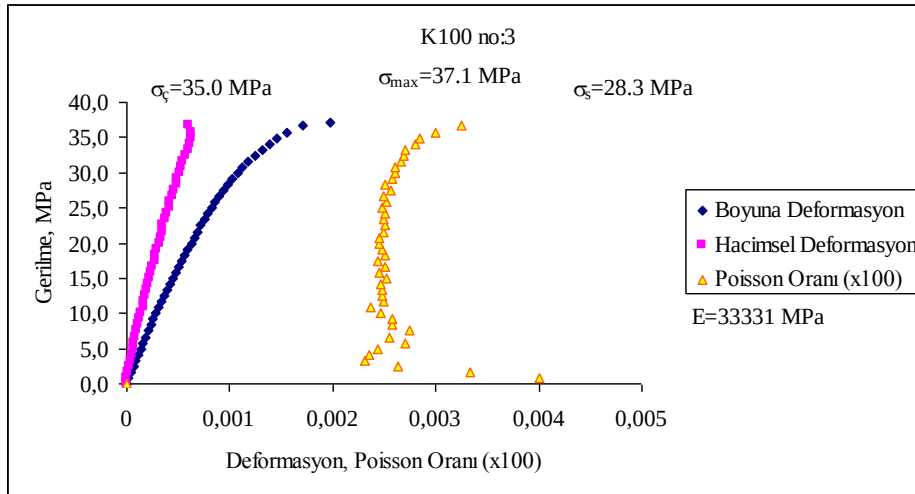
Şekil Ek.3 Kırmakum/İnce Agrega Oranı %25 Olan Karışımın Granülometrisi



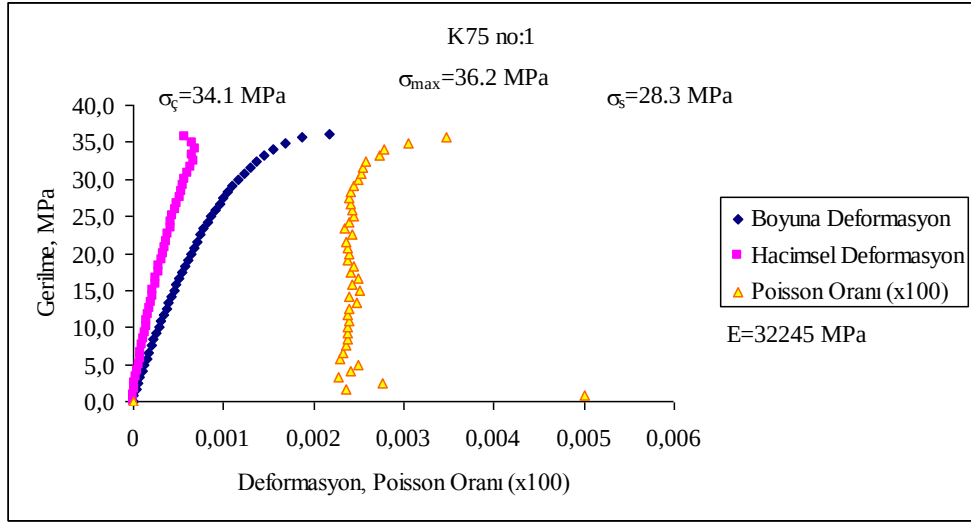
Şekil Ek.4 Kırma Kum/İnce Agrega Oranı %25 Olan Karışımın Granülometrisi



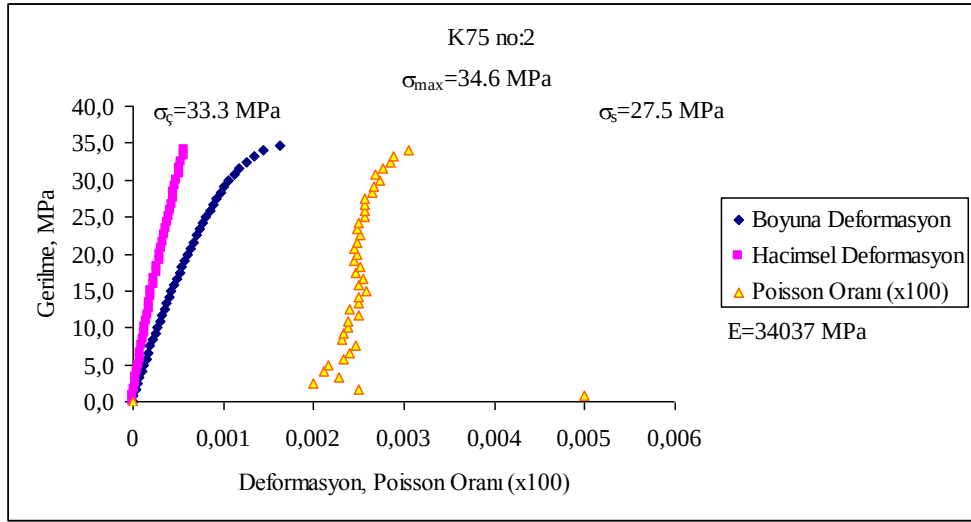
Şekil Ek.5 K100 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



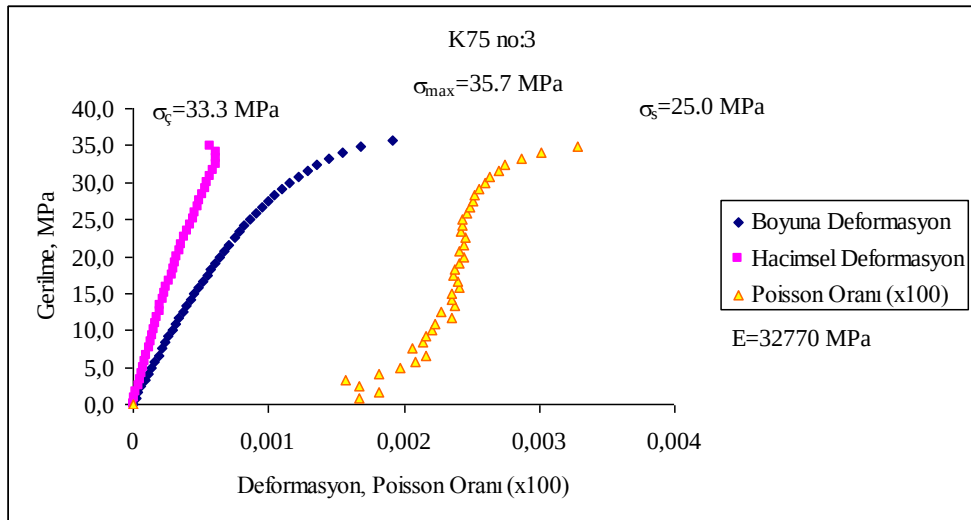
Şekil Ek.6 K100 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



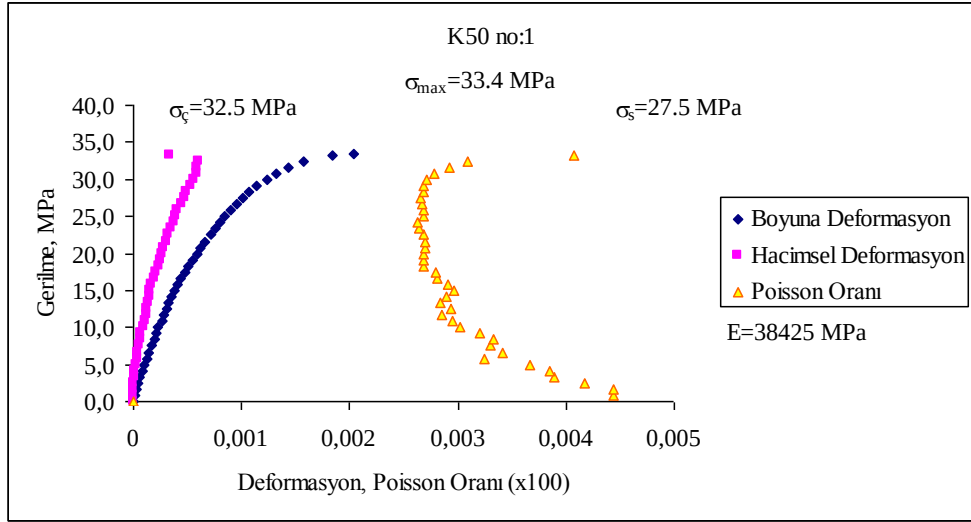
Şekil Ek.7 K75 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



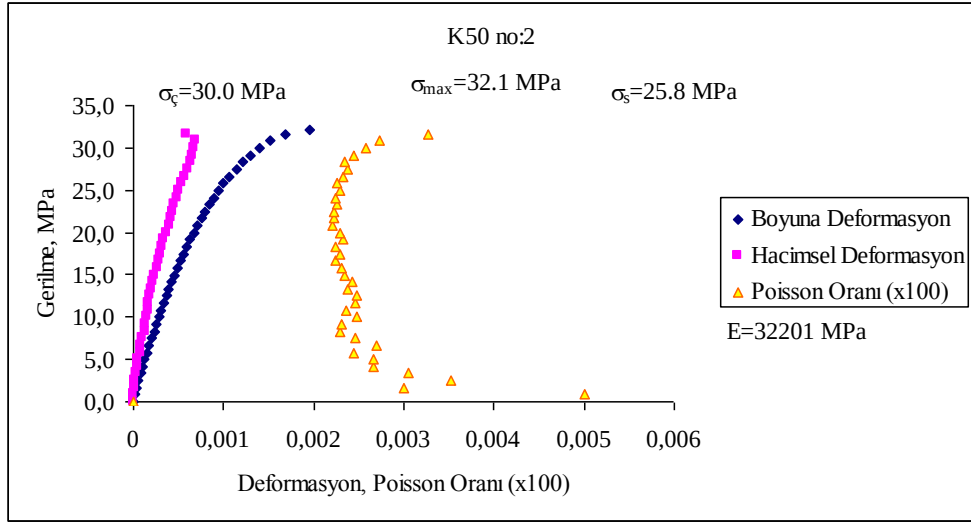
Şekil Ek.8 K75 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



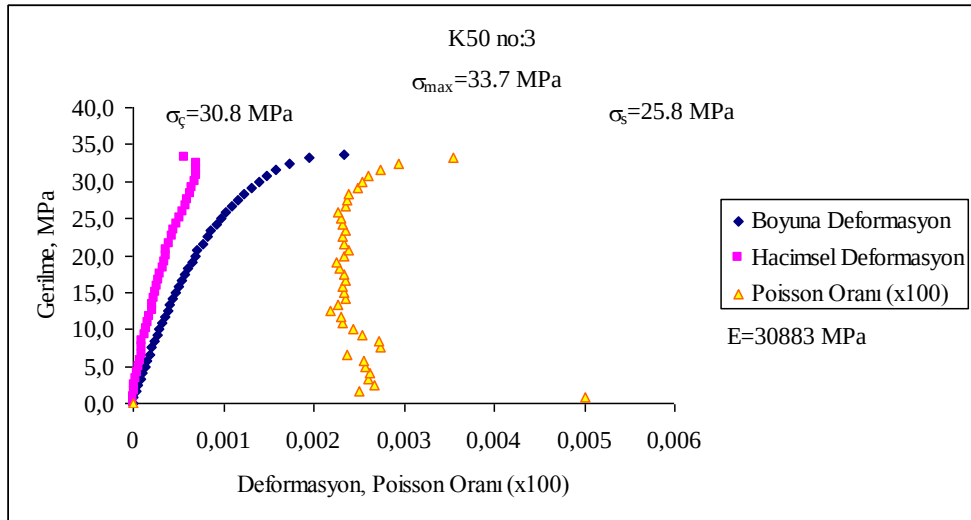
Şekil Ek.9 K75 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



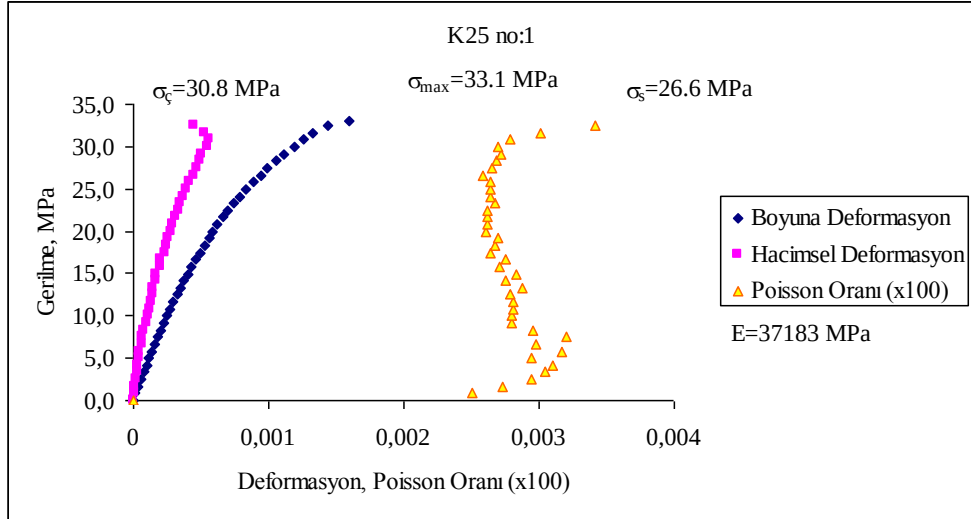
Şekil Ek.10 K50 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



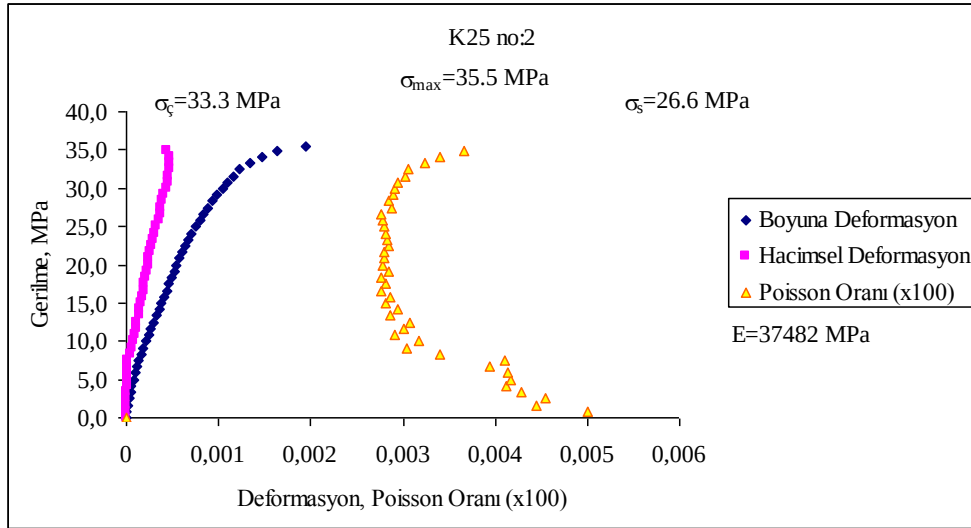
Şekil Ek.11 K50 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



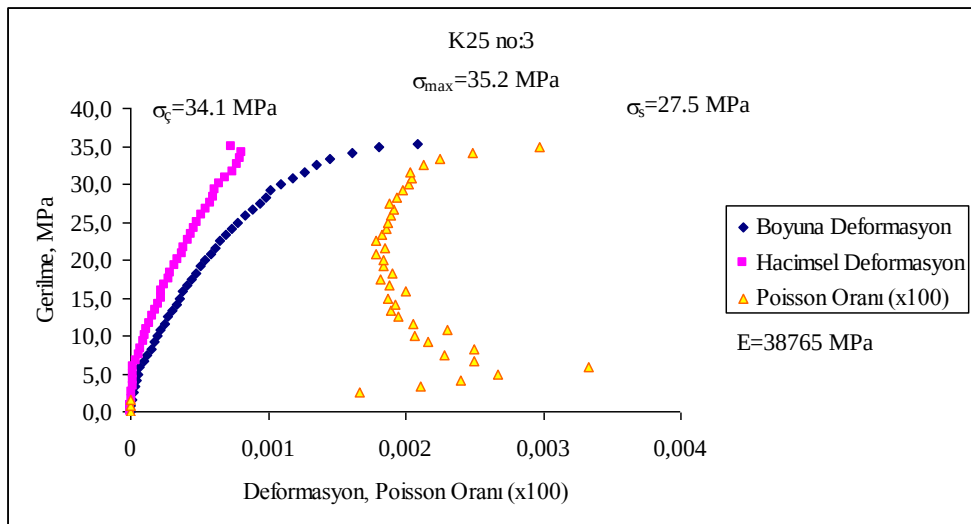
Şekil Ek.12 K50 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



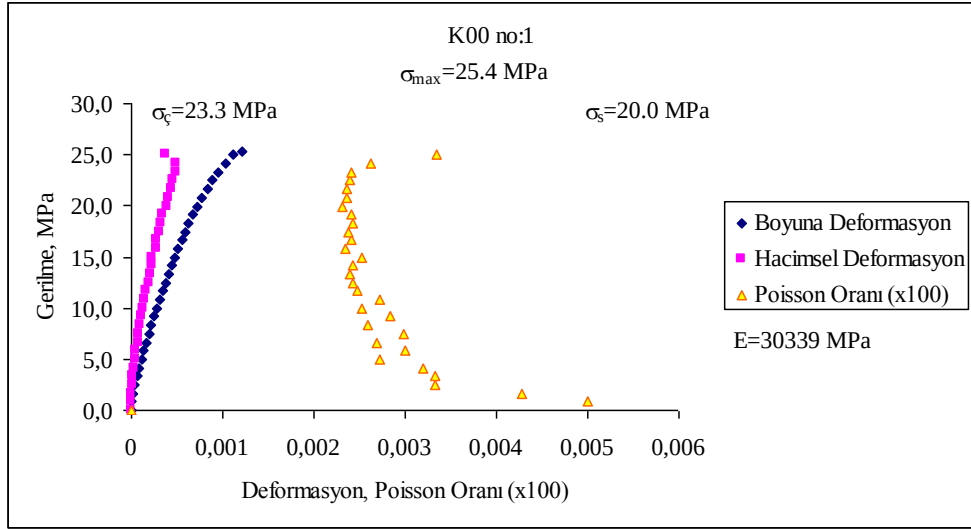
Şekil Ek.13 K25 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



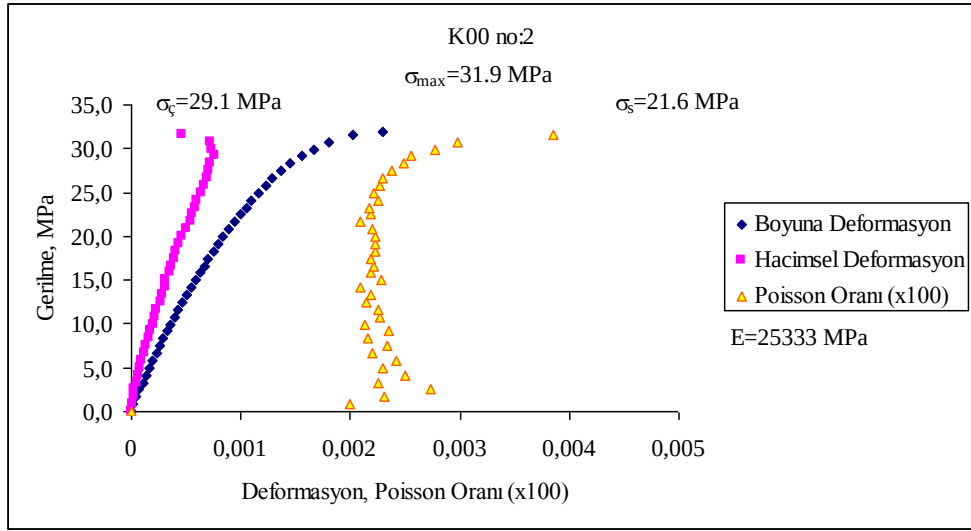
Şekil Ek.14 K25 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



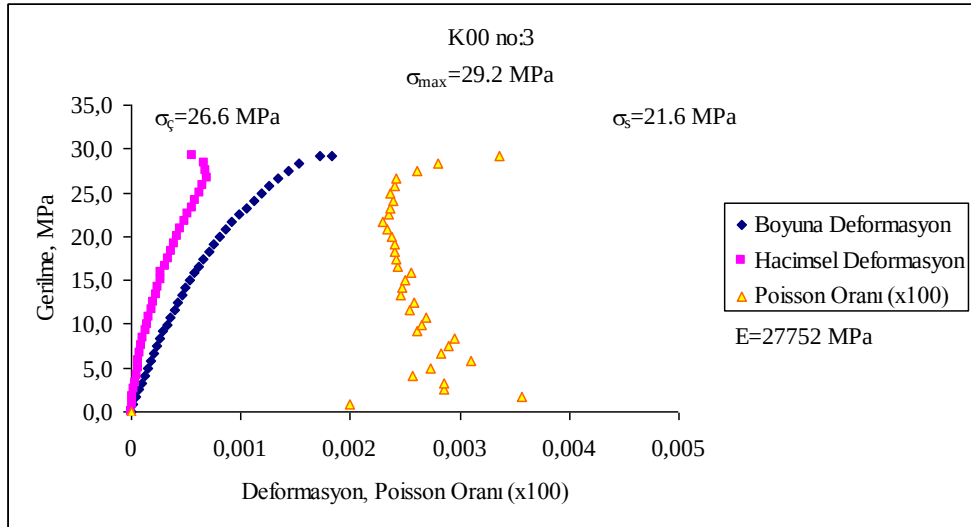
Şekil Ek.15 K25 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



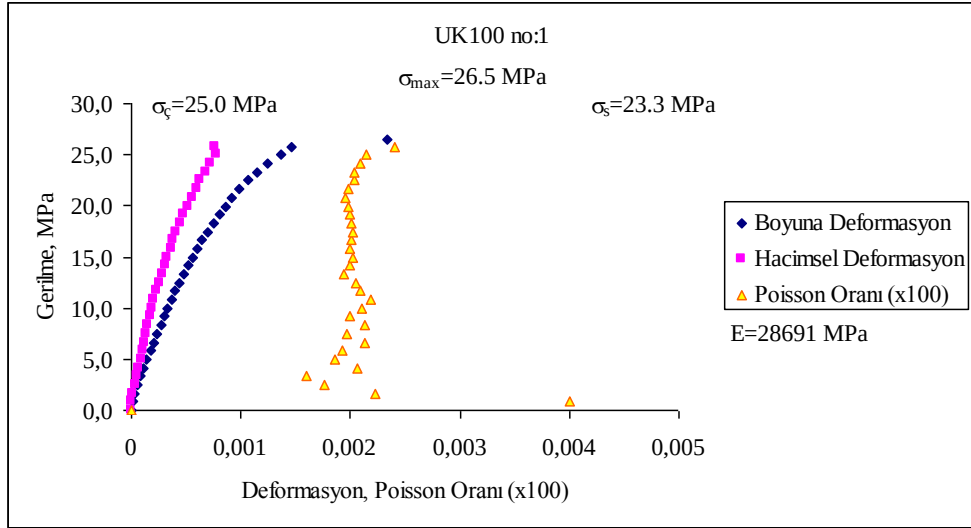
Şekil Ek.16 K00 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



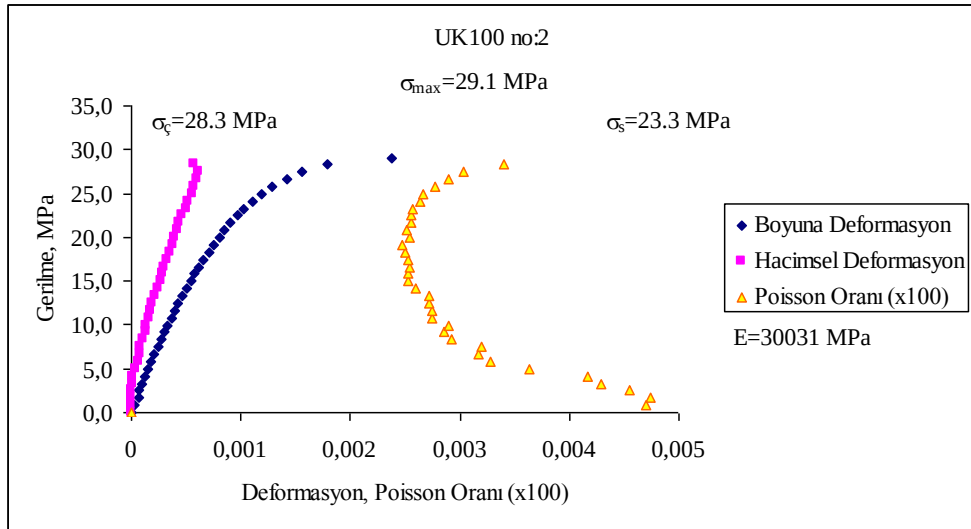
Şekil Ek.17 K00 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



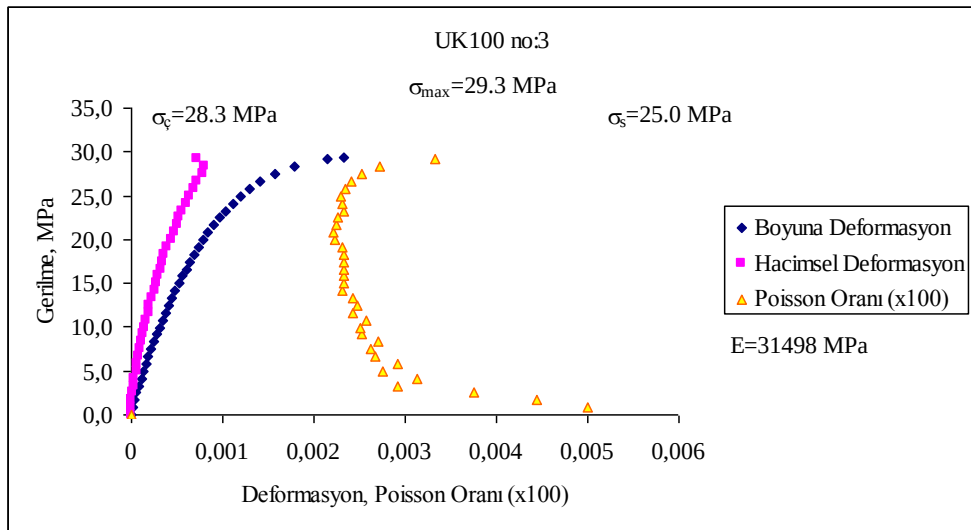
Şekil Ek.18 K00 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



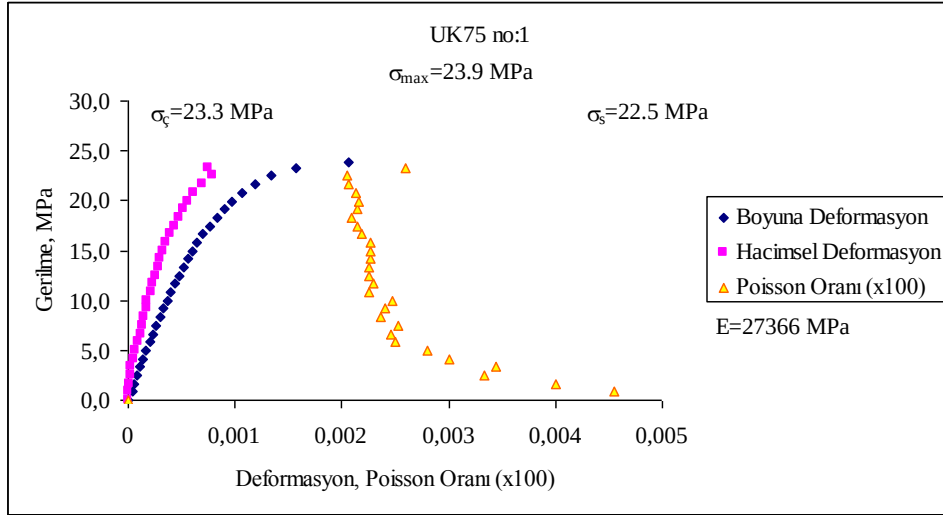
Şekil Ek.19 UK100 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poiss. Oranı Grafiği



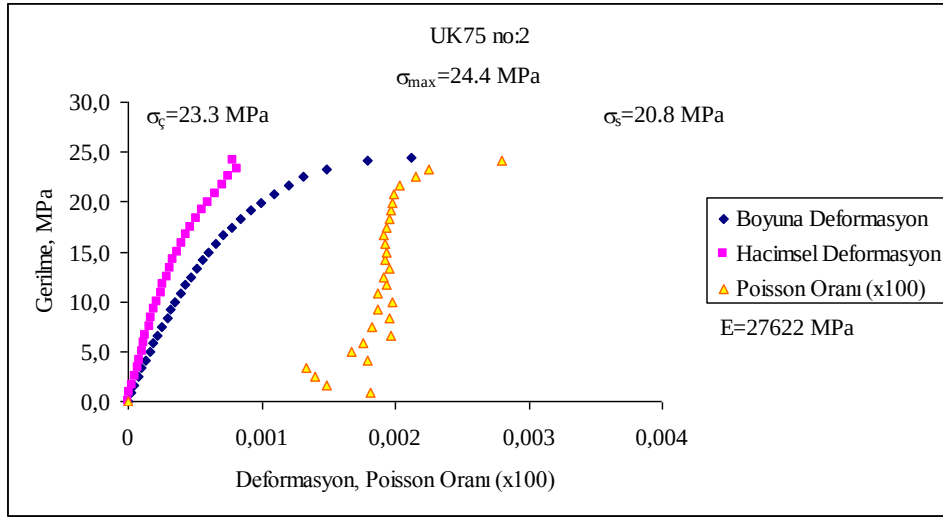
Şekil Ek.20 UK100 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poiss. Oranı Grafiği



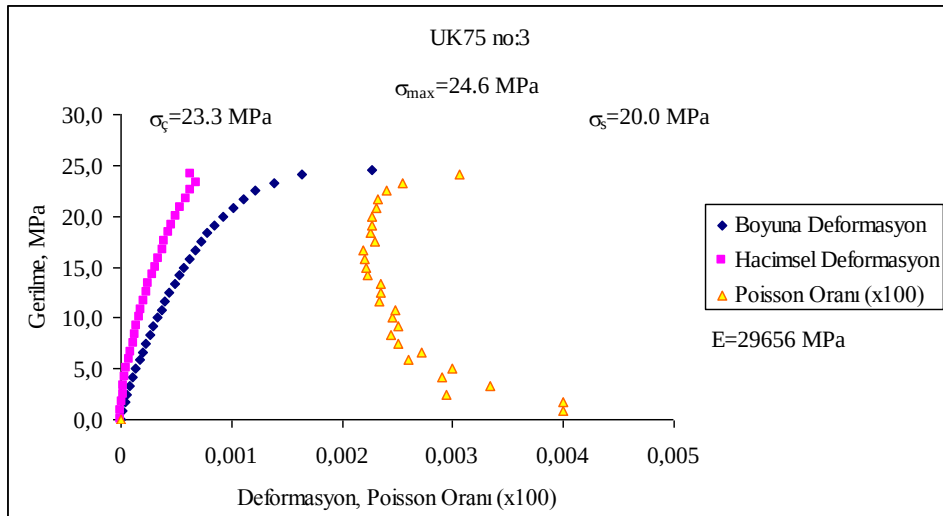
Şekil Ek.21 UK100 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poiss. Oranı Grafiği



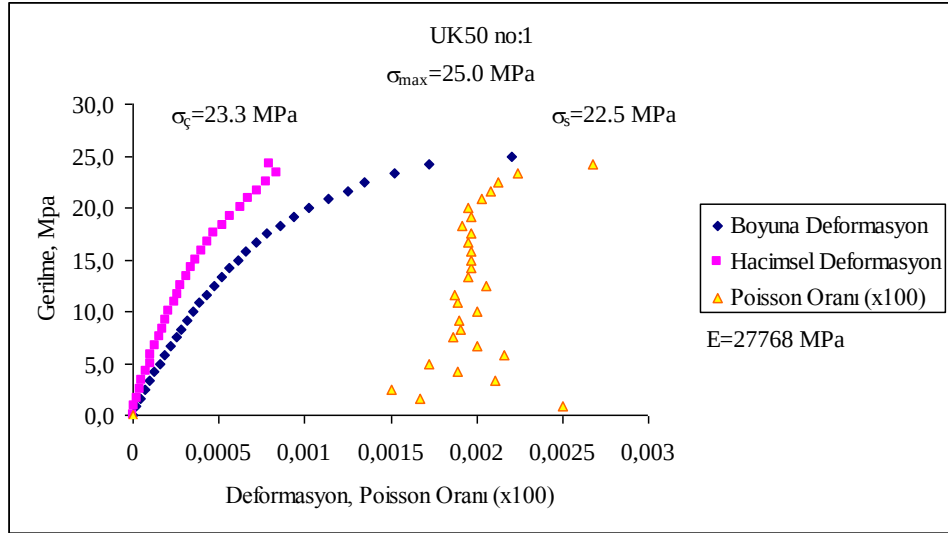
Şekil Ek.22 UK75 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



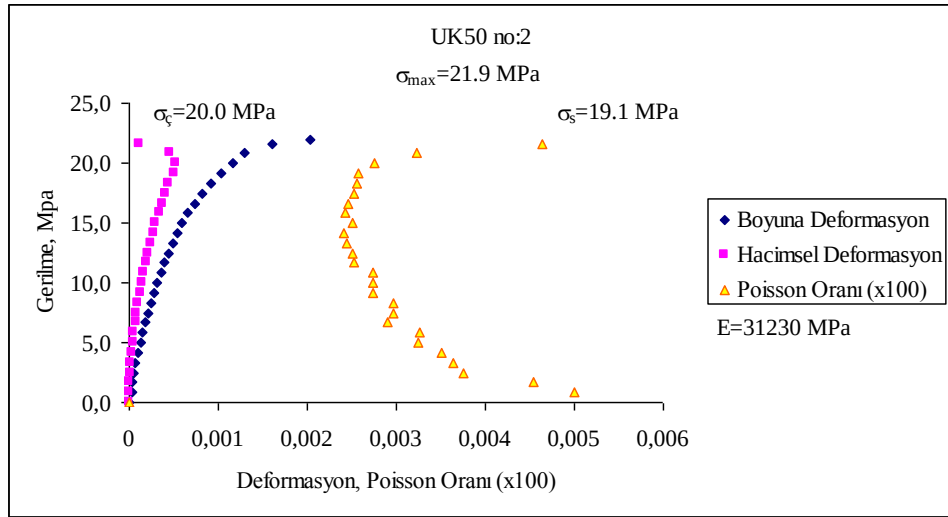
Şekil Ek.23 UK75 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



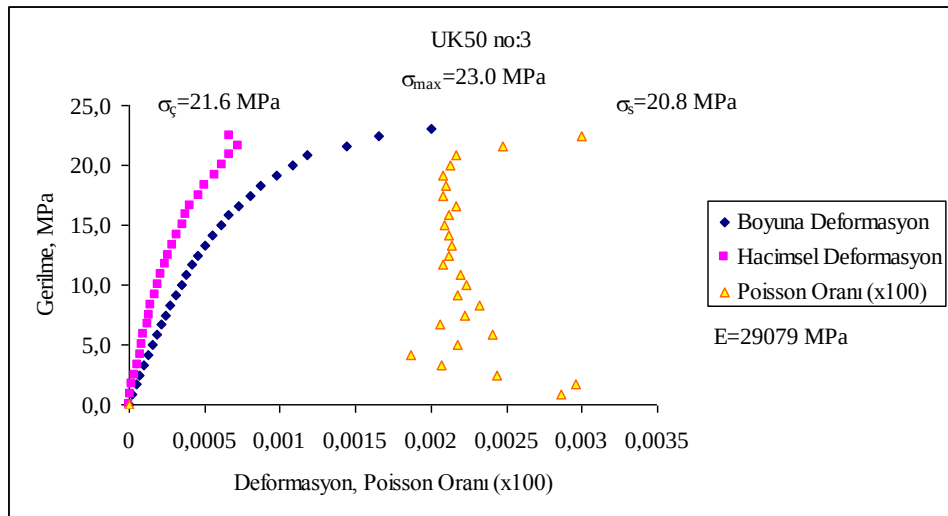
Şekil Ek.24 UK75 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



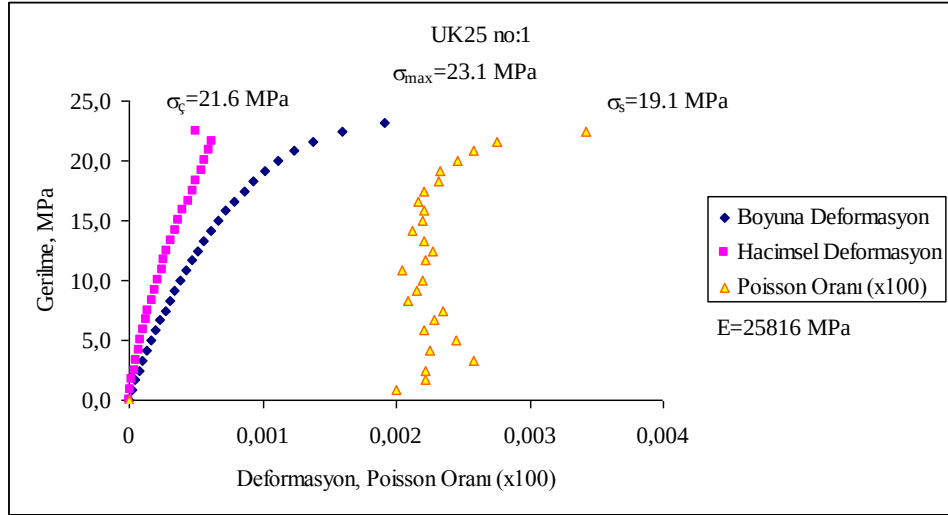
Şekil Ek.25 UK50 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



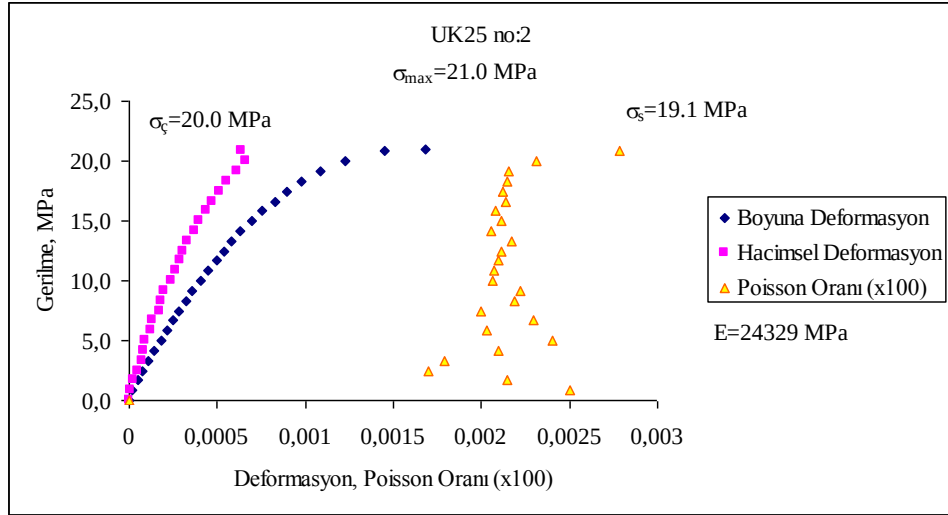
Şekil Ek.26 UK50 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



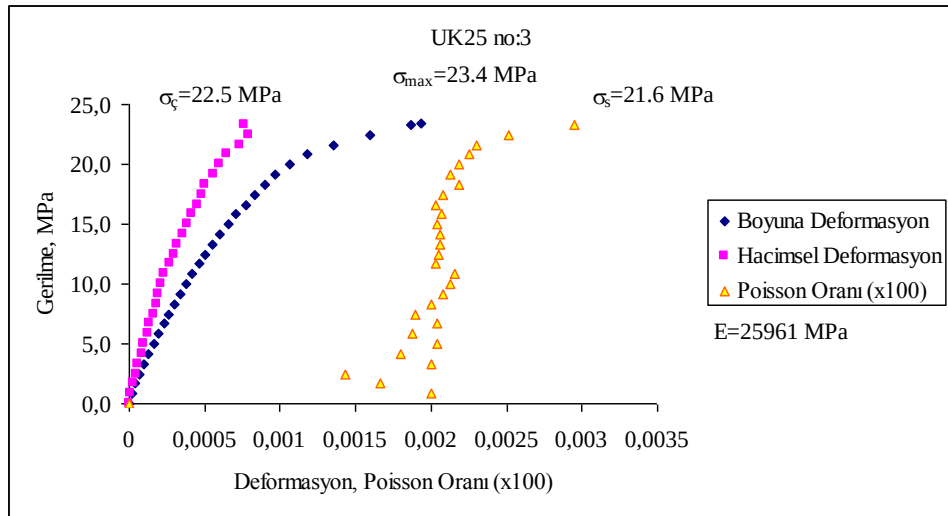
Şekil Ek.27 UK50 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



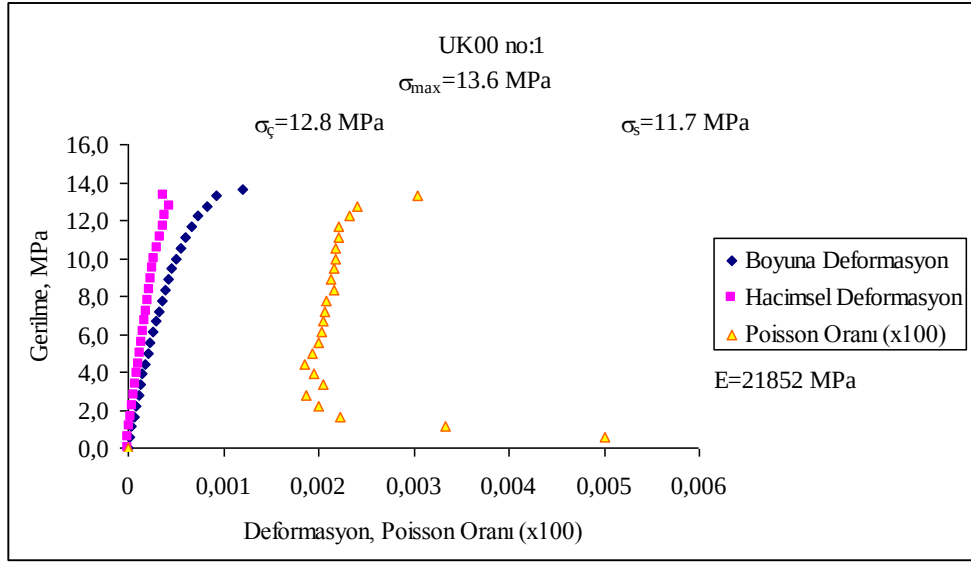
Şekil Ek.28 UK25 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



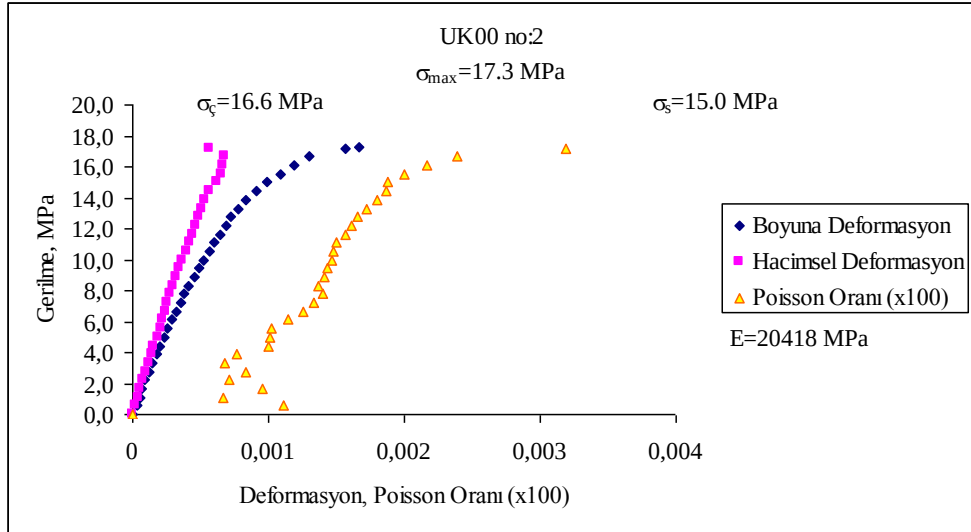
Şekil Ek.29 UK25 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



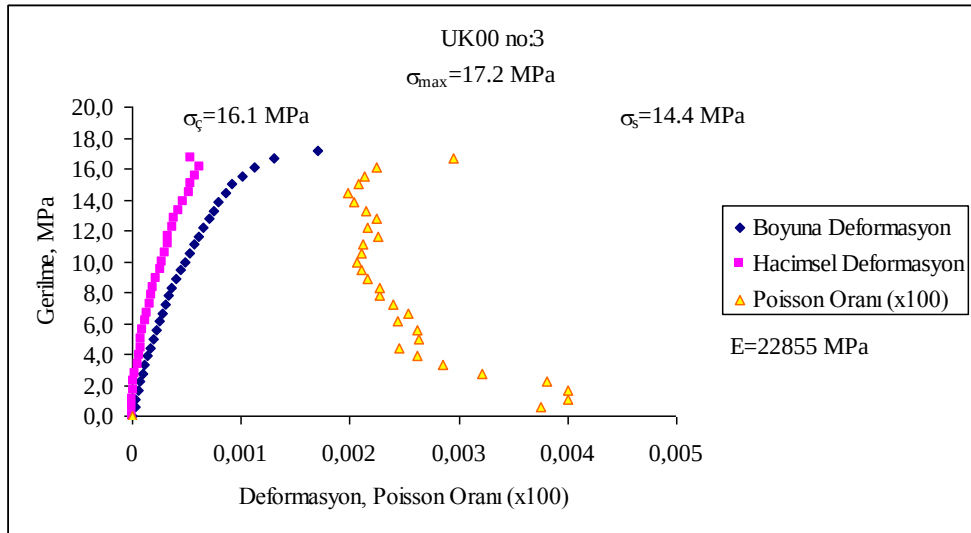
Şekil Ek.30 UK25 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



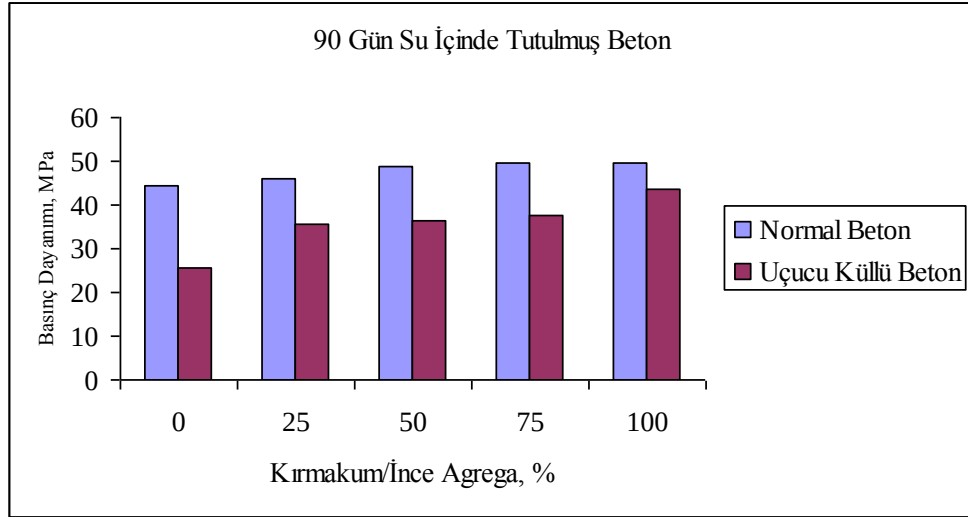
Şekil Ek.31 UK00 Serisi 1 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



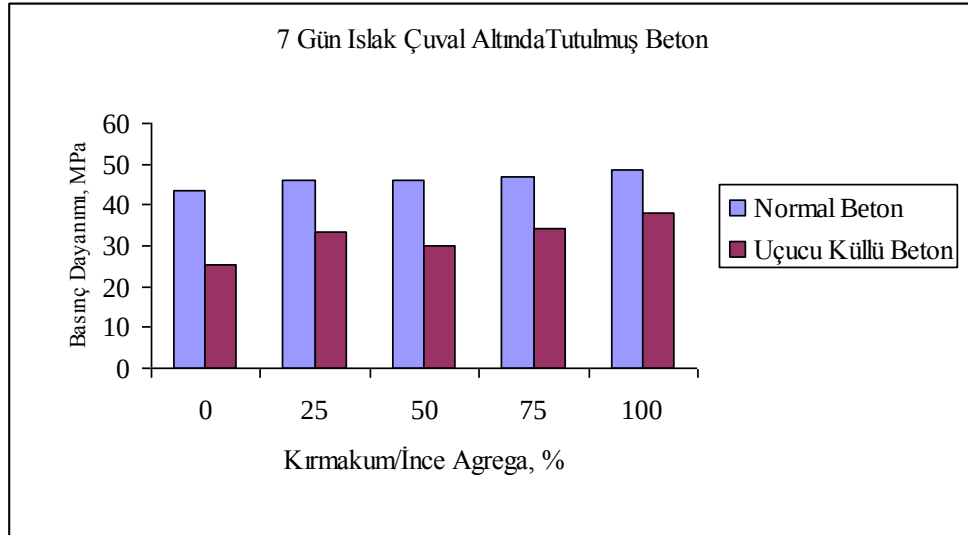
Şekil Ek.32 UK00 Serisi 2 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



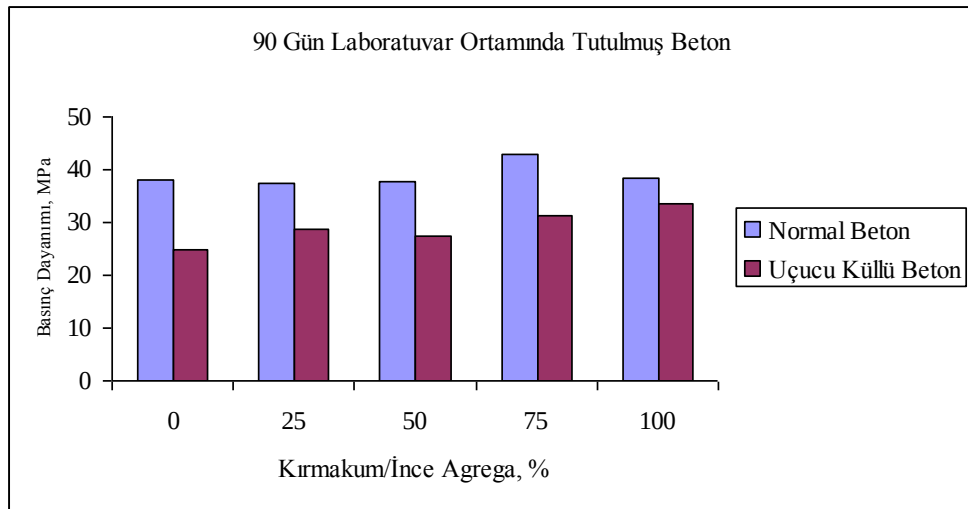
Şekil Ek.33 UK00 Serisi 3 Nolu Numunenin Deformasyon ve Poisson Oranı Grafiği



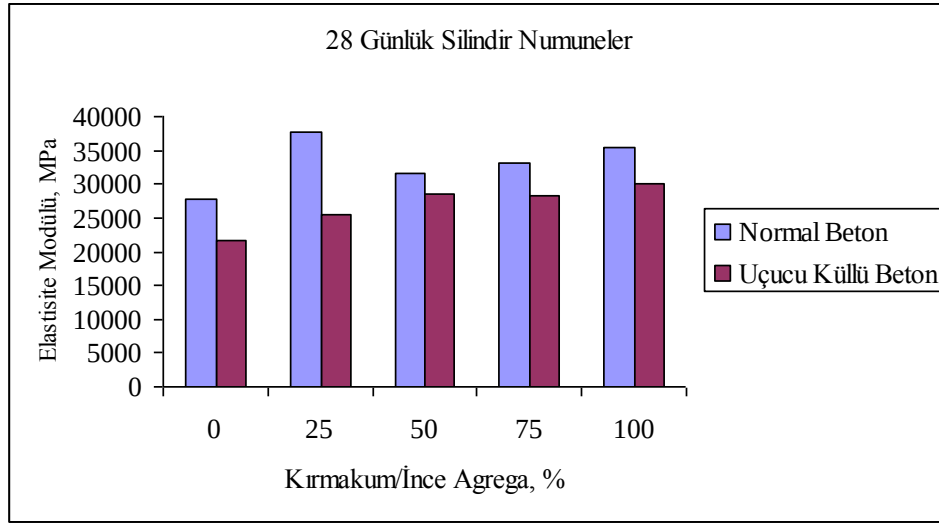
Şekil Ek.34 90 Gün Kirece Doygun Su İçinde Tutulmuş Betonların Basınç Dayanımı



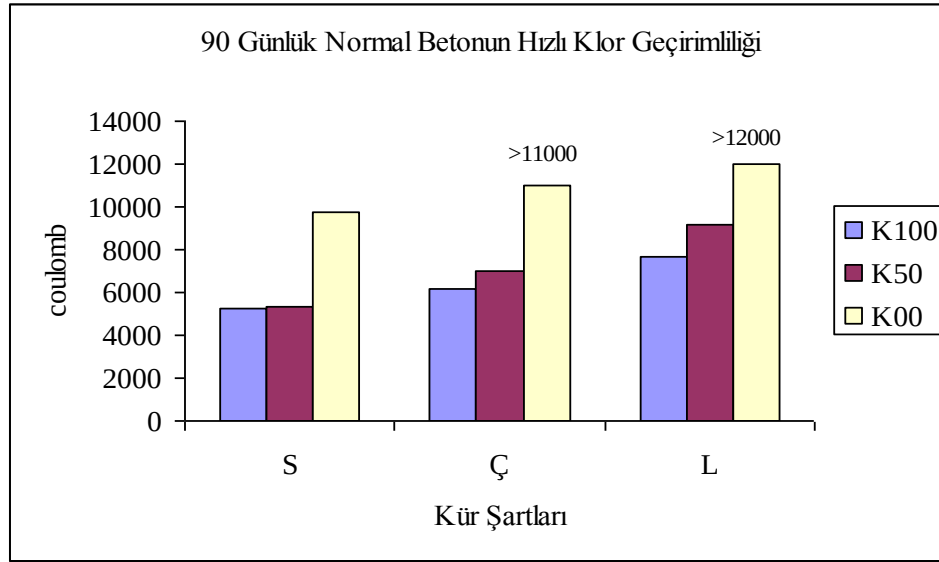
Şekil Ek.35 7 Gün Islak Çuval Altında Tutulmuş Betonların Basınç Dayanımı



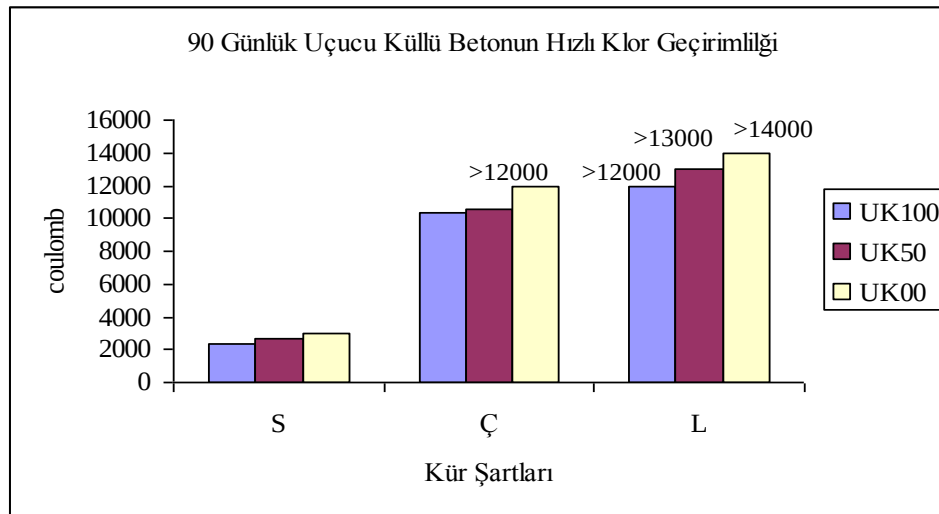
Şekil Ek.36 90 Gün Laboratuvar Ortamında Tutulmuş Betonların Basınç Dayanımı



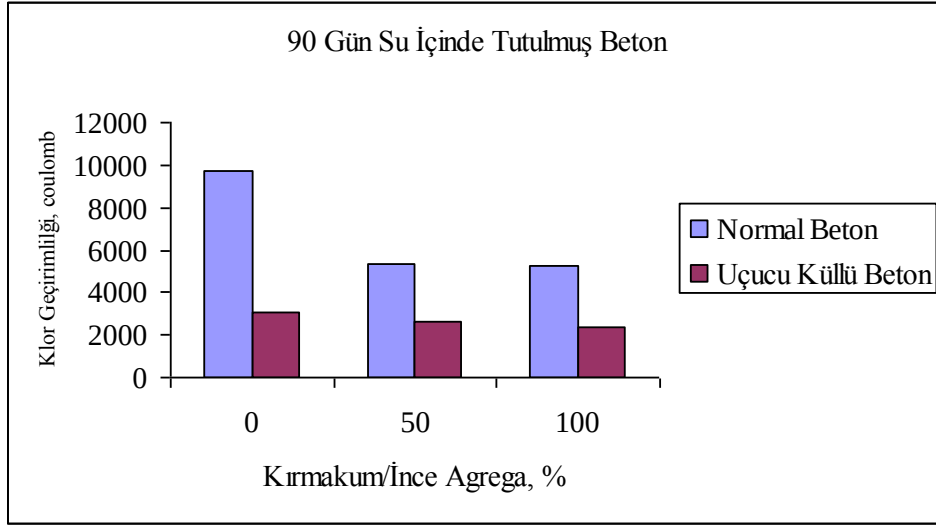
Şekil Ek.37 28 Günlük Silindir Numunelerin Elastisite Modülleri



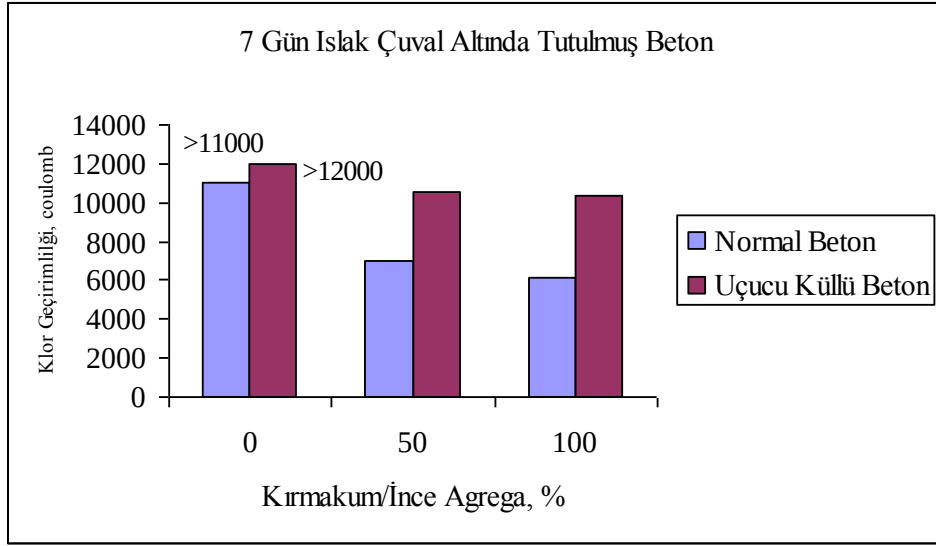
Şekil Ek.38 90 Günlük Normal Betonların Hızlı Klor Geçirirliği



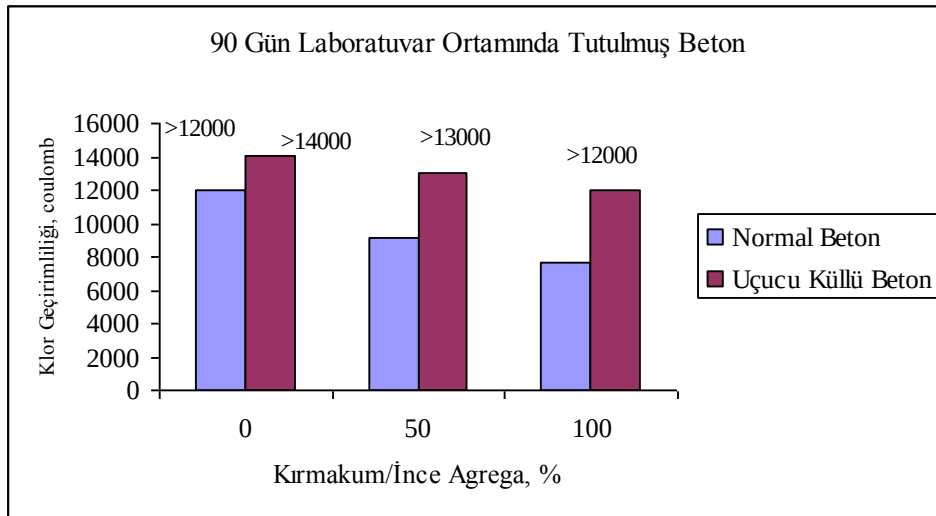
Şekil Ek.39 90 Günlük Uçucu Küllü Betonların Hızlı Klor Geçirirliği



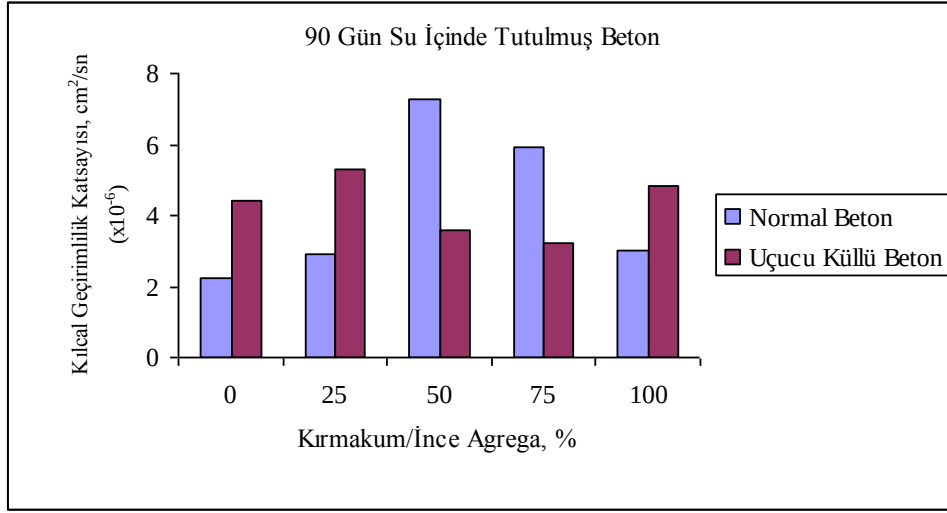
Şekil Ek.40 90 Gün Su Kürü Uygulanmış Betonların Hızlı Klor Geçirirliği



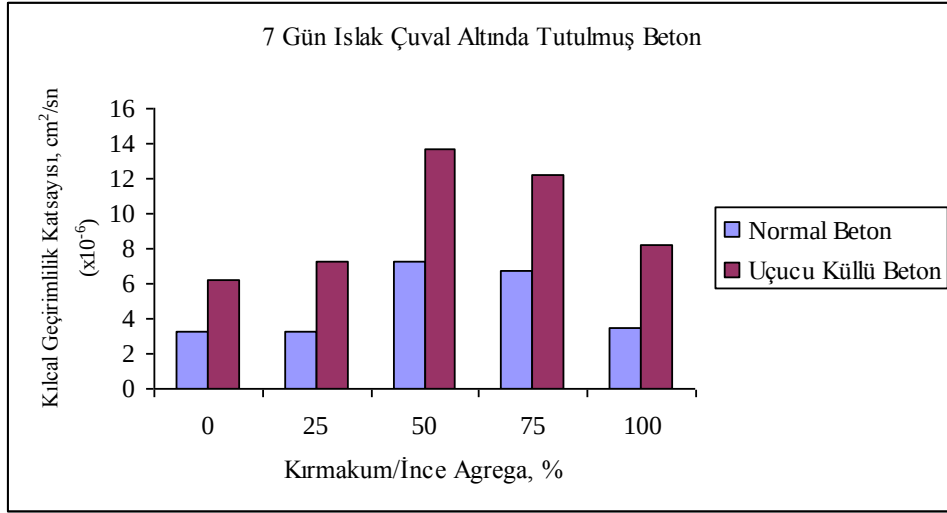
Şekil Ek.41 7 Gün Islak Çuval Altında Tutulmuş Betonların Hızlı Klor Geçirirliği



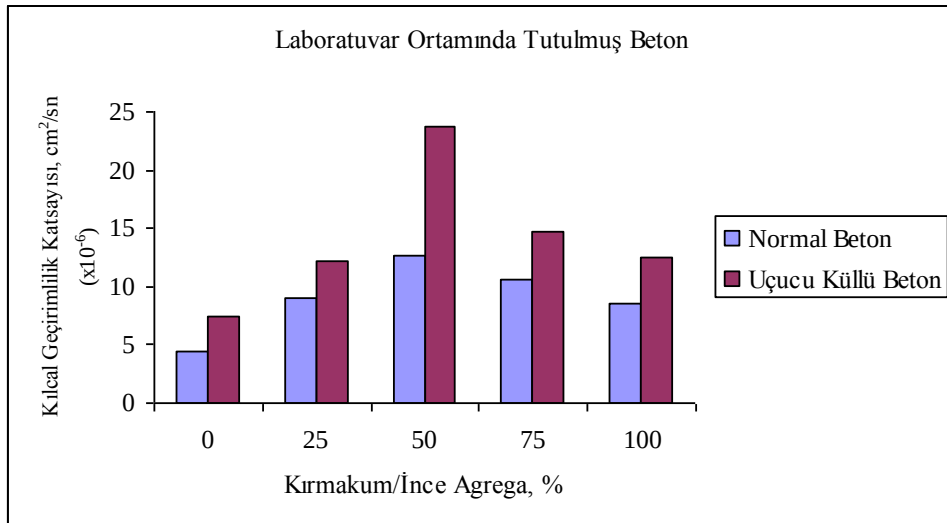
Şekil Ek.42 90 Gün Laboratuvar Ortamında Tutulmuş Betonların Hızlı Klor Geçirirliği



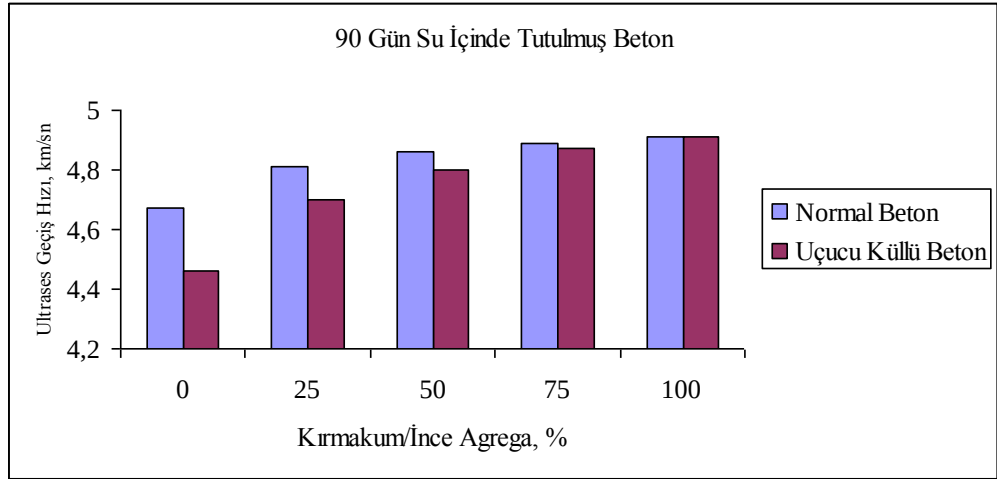
Şekil Ek.43 90 Gün Su Kürü Uygulanmış Betonların Kılcal Geçirimsizliği Katsayıları



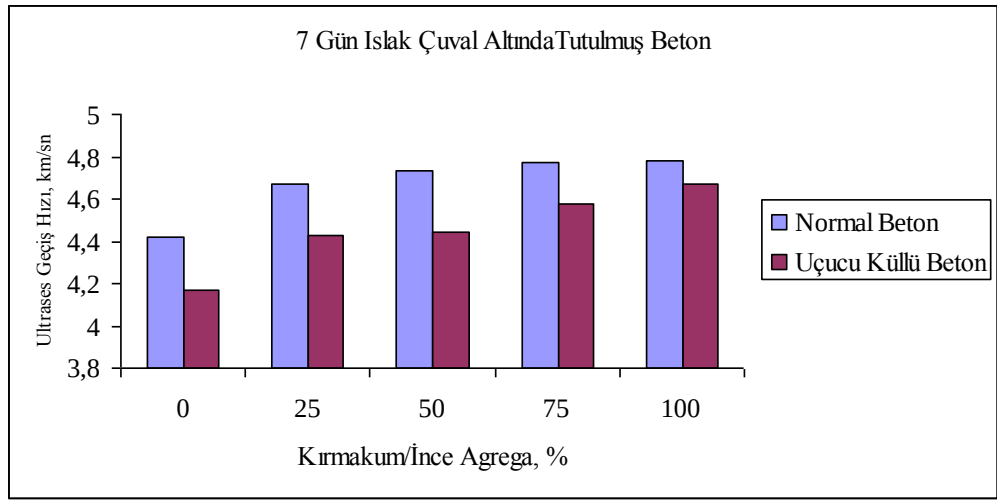
Şekil Ek.44 7 Gün Islak Çuval Altında Tutulmuş Betonların Kılcal Geçirimsizliği Katsayıları



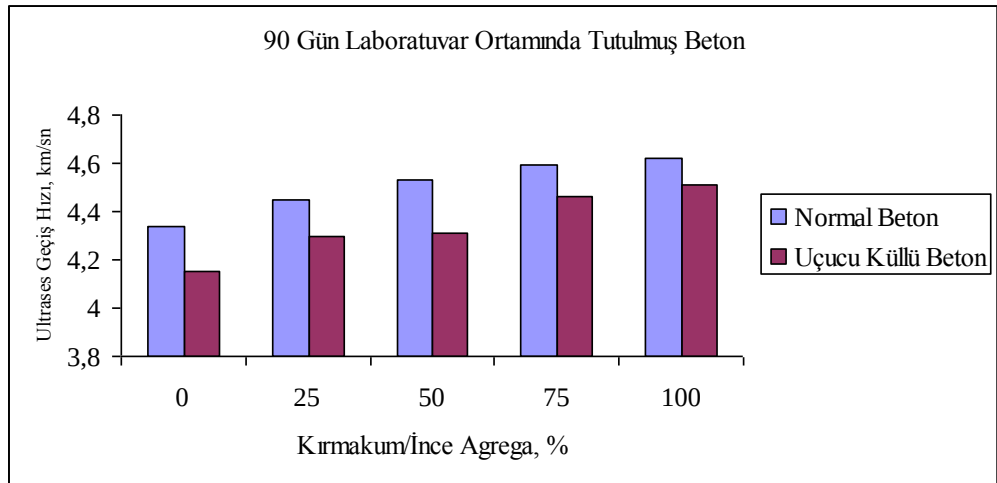
Şekil Ek.45 90 Gün Laboratuvar Ortamında Tutulmuş Betonların Kılcal Geçirimsizliği Katsayıları



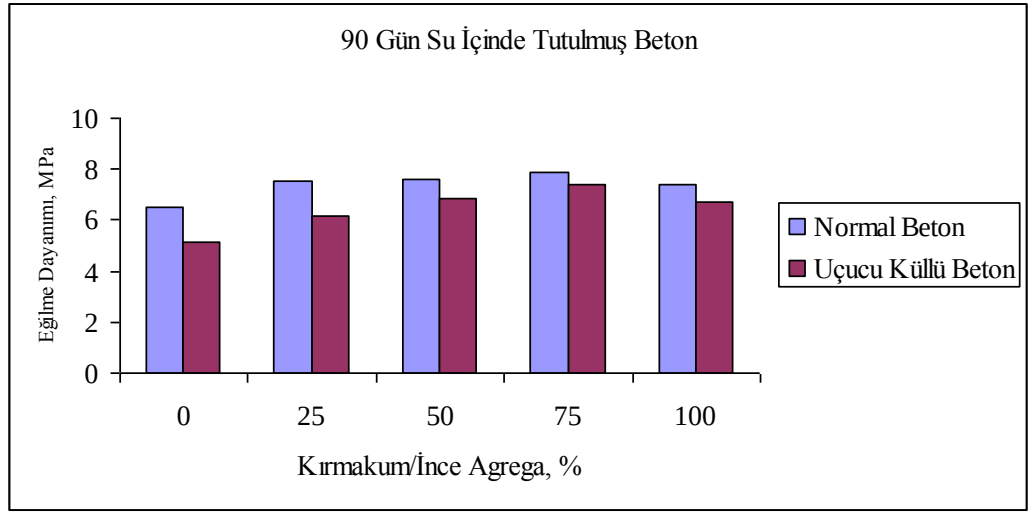
Şekil Ek.46 90 Gün Kirece Doygun Su İçinde Tutulmuş Betonların Ultrases Geçiş Hızları



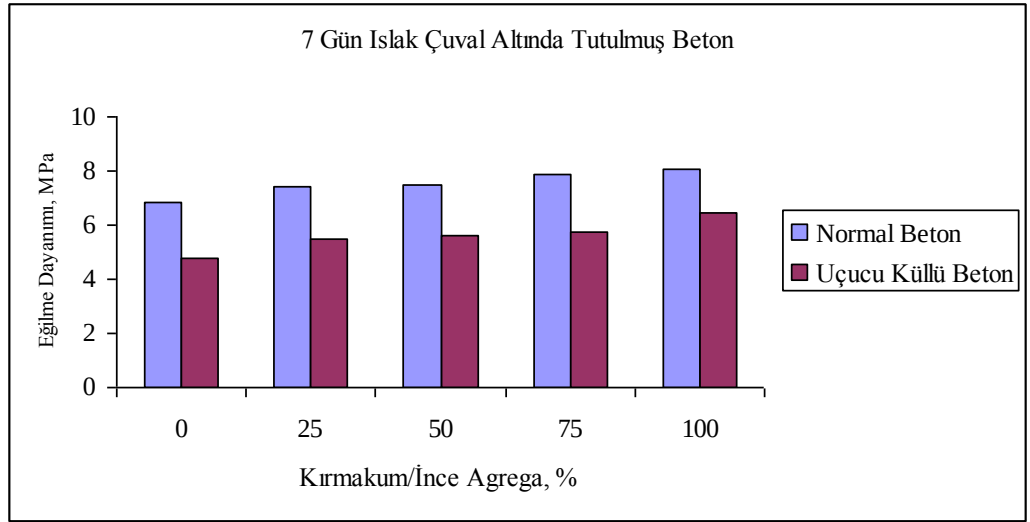
Şekil Ek.47 7 Gün Islak Çuval Altında Tutulmuş Betonların Ultrases Geçiş Hızları



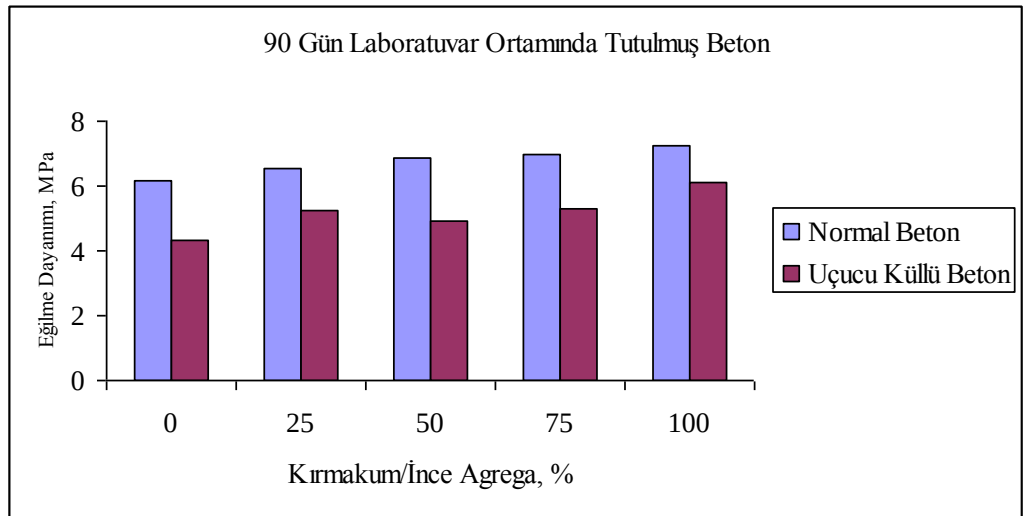
Şekil Ek.48 90 Gün Labotatuvar Ortamında Tutulmuş Betonların Ultrases Geçiş Hızları



Şekil Ek.49 90 Gün Kirece Doygun Su İçinde Tutulmuş Betonların Eğilme Dayanımları



Şekil Ek.50 7 Gün Islak Çuval Altında Tutulmuş Betonların Eğilme Dayanımları



Şekil Ek.51 90 Gün Laboratuvar Ortamında Tutulmuş Betonların Eğilme Dayanımları

ÖZGEÇMİŞ

Çağatay ALICI 1978 yılında Akçakoca’da doğdu. İlkokulu İstanbul Fuat Baymur İlkokulu’nda, liseyi İstanbul Haydarpaşa Lisesi’nde tamamladı.

1996 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2000 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi’nden inşaat mühendisi olarak mezun olup aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Mühendisliği Yapı Malzemesi programında yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen bu bölümde öğrenimine devam etmektedir.