

**ÇAYIRHAN UÇUCU KÜLÜ İLE ÜRETİLEN
BETONLARDA KÜR KOŞULLARININ BETON
ÖZELİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
DOKÜMAN TAYIN BİRİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Alper ATAÇ

501981085011

101441

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Ocak 2001

Tezin Savunulduğu Tarih : 08 Şubat 2001

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Canan TAŞDEMİR

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Saim AKYÜZ

Prof.Dr. Turan ÖZTURAN

ŞUBAT 2001

ÖNSÖZ

Sunulan çalışmada, Çayırhan uçucu külü içeren betonlarda kür koşullarının beton özellikleri üzerine etkileri üzerine araştırmalar ve yapılan deneylerin sonuçları belirtilmiştir.

Tez çalışmam sırasında çalışmalarımı yakından ilgilenip, yardım ve desteğini esirgemeyen, verdiği değerli bilgilerle çalışmalarına yardımcı olan sayın hocam Doç. Dr. Canan TAŞDEMİR'e çalışmalarına yapmış olduğu yardım ve tavsiyelerle yol gösteren sayın hocam Mehmet Ali TAŞDEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneylerin gerçekleştirilmesi sırasındaki yardımlarından dolayı İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilim Dalı araştırma görevlilerinden Sayın Özkan ŞENGÜL'e, Sayın Anıl DOĞAN'a, Sayın Hakan ATAHAN'a, Sayın Nilüfer ÖZYURT'a, Sayın Bekir PEKMEZCİ'ye ve laboratuvar personeline teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamda konu edilen uçucu küllü betonlara kür koşullarının etkilerinin iyi anlaşılması ve çalışmalara faydalı olmasını dilerim.

Şubat 2001

Alper ATAÇ

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	
Giriş	1
2.GENEL BİLGİLER	3
2.1Puzolanlar	3
2.1.1Puzolanların Tanımı ve sınıflandırılması	3
2.1.2 Puzolanik Reaksiyon	6
2.2 Uçucu Külün Toplanması	8
2.2.1 Uçucu Külün Oluşumu	9
2.3 Uçucu Külün Tanımı	12
2.4 Uçucu Küllerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	14
2.5 Uçucu kül içeren Betonların Karışım Oranlarını Hesaplama Metodları	16
2.6 k Etkinlik Faktörünün Bağlı Olduğu Faktörler	24
2.7 Uçucu Külün Taze Beton Özellikleri Üzerine Etkisi	28
2.8 Uçucu Külün Sertleşmiş Beton Özellikleri Üzerine Etkisi	36
2.9 Uçucu Külün Bulunduğu Ortam Şartlarına Dayanıklılık Özellikleri	41
2.10 Uçucu Külün Çeşitli Alanlarda Kullanılması	50
2.11 Diğer Kullanım Alanları	56
3.DENEYSEL ÇALIŞMALAR	57
3.1 Çalışmanın Amacı	57
3.2 Üretilen Betonların Özellikleri	57
3.3 Kullanılan Malzemeler	58
3.3.1 Uçucu Kül	58
3.3.2 Çimento	60
3.3.3 Agregası	61
3.4 Üretilen Betonların Taze Beton Özellikleri	64
3.5 Sertleşmiş Beton Deneyleri	66
3.6 Sertleşmiş Beton Deneyleri	66
3.6.1 Basınç Dayanımı	66

3.6.2 Eğilme Dayanımı	68
3.6.3 Kılcallık Katsayısının Belirlenmesi	68
3.6.4 Gevreklik İndisi, Poisson oranı ve Hacimsel Deformasyon	73
4.DENEYSEL SONUÇLARIN İRDELENMESİ	76
4.1 Taze Beton Deney Sonuçlarının İrdelenmesi	76
4.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	76
4.2.1 Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi	77
4.2.2 Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi	81
4.2.3 Kılcallık Katsayılarının Değerlendirilmesi	83
4.2.4 Gevreklik İndislerinin Değerlendirilmesi	86
5.GENEL SONUÇLAR	88
5.1 Taze Beton Özellikleri	88
5.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri	88
KAYNAKLAR	91
EKLER	94
ÖZGEÇMİŞ	102

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1.	Puzolanların sınıflandırılması ve Puzolan Türleri.....	5
Tablo 2.2.	Çeşitli Puzolanların Kimyasal Bileşimleri.....	6
Tablo 2.3.	TS 639’da Belirtilen Uçucu Kül Özellikleri.....	12
Tablo 2.4.	Türkiye’de Üretilen ve Satılan Toplam Uçucu Kül miktarı.....	13
Tablo 2.5.	ASTM C 618 Sınır Değerleri Tunçbilek ve Soma-B Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları.....	14
Tablo 2.6.	Türkiye Uçucu Küllerinin Minerolojik Kompozisyonları.....	15
Tablo2.7.	Türkiye’deki Bazı Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri.....	15
Tablo2.8.	28.Günde Eşit Elde Etmek Üzere Oranlanmış Şahit ve Uçucu Küllü Betonlar için Örnek Karışım Oranları.....	26
Tablo2.9.	Yüksek Mukavemetli Betonların Karışım Oranları.....	53
Tablo 3.1.	Çayırhan Uçucu Külünün Mekanik Deney Sonuçları.....	58
Tablo3.2.	Çayırhan Uçucu Külünün Kimyasal Analizi.....	59
Tablo3.3.	Çayırhan Uçucu Külünün Kimyasal Kompozisyonu.....	59
Tablo3.4.	Çimentonun Fiziksel Özellikleri.....	60
Tablo3.5.	Çimentonun Mekanik Özellikleri.....	60
Tablo3.6.	Çimentonun Kimyasal Özellikleri.....	61
Tablo3.7.	Agregaların Fiziksel Özellikleri.....	62
Tablo3.8.	Agregaların Elek Analizi.....	62
Tablo3.9.	Karışımın Analizi.....	63
Tablo3.10.	Üretilen Betonların Gerçek Bileşimleri.....	65
Tablo 3.10.a.	Silindir Basınç Dayanım Sonuçları.....	67
Tablo 3.10.b.	260 Günlük Basınç Dayanımı Değerleri.....	68
Tablo3.11.	Üretilen Prizmalar Üzerinde Yapılan Eğilme Deneyi Sonuçları.....	69
Tablo3.12	%5 Uçucu Kül İçeren 28 gün sualtı numulerinde 35. Günde elde edilmiş q Değerleri.....	70
Tablo3.13	Üretmiş Olduğumuz Betonların Kılcallık Katsayılarının Ortalama Değerleri.....	72
Tablo4.1	Silindir Basınç Deneyleri Sonucunda Elde Edilen Basınç Dayanım Değerleri.....	78
Tablo4.2	Prizmadan Kalan Parçalar Üzerinde Yapılan Basınç Deneyi Sonuçları	79
Tablo4.2.a	260 Günlük Basınç Dayanım Deney Sonuçları.....	80
Tablo4.3	Prizma Numuneler Üzerinde Yapılan Eğilme Deneyi Sonuçları.....	82
Tablo4.4	Kılcallık Katsayılarının Değişik Ortamlardaki Değerleri.....	84
Tablo4.5	260. Gündeki Kılcallık Katsayıları.....	85
Tablo4.6	Gevreklik indisinin Uçucu Kül Yüzdesiyle Gösterimi.....	87

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	Bir Hidrate portland –puzolan çimentosundaki kalsiyum hidroksit içeriğinin değişimi.....	7
Şekil 2.2	Uçucu Küllerin Nemlendirme Yöntemi ile Tutulması.....	8
Şekil 2.3.a.	Siklon ile Uçucu Küllerin Tutulması.....	9
Şekil 2.3.b.	Uçucu Külün Oluşum Safhaları.....	10
Şekil 2.3.c.	Bir Kömür Tanecığının Yanması ve Yanma Ürünleri.....	11
Şekil 2.4	Hidratasyon Isısı Değerlerinin Uçucu Kül Miktarıyla Değişimi	18
Şekil 2.5.a	Farklı Bağlayıcı Malzeme Harmanları için Herhangi bir Yaştaki Dayanım İlişkileri.....	22
Şekil 2.5.b	Farklı Bağlayıcı Malzeme Harmanları için Herhangi bir Yaştaki Dayanım İlişkileri.....	23
Şekil 2.6	Uçucu Küllü ile Şahit Beton Arasındaki Dayanım Yaş Kombinasyonu.....	27
Şekil 2.7	Test Edilen Uçucu Küllü ve Normal Betonlar İçin Sıcaklık artış Eğrileri	31
Şekil 2.8	Yüksek Kireçli Uçucu Kül Kullanarak Yapılmış Betonda Adiabatik Sıcaklık Artışı.....	33
Şekil 3.1	Karışımın Granülometri Eğrisi.....	63
Şekil 3.2	Kılcallık Katsayısı Hesabı için Elde Edilen Doğru.....	70
Şekil 3.3	Gerilme Boyuna Deformasyon İlişkisi ve Betonun Gevrekliği.....	74
Şekil 4.1	28 Günlük Silindir Basınç Dayanımlarının Kolon Grafikle Gösterilmesi.....	78
Şekil 4.2	28 Günlük Silindir Basınç Dayanımları.....	79
Şekil 4.3	Prizma Parçaları Üzerinde Yapılan Basınç Deneyi Sonuçlarının Uçucu Kül Yüzdesiyle Değişimi.....	80
Şekil 4.3.a	260. Günde Basınç Dayanımlarının Uçucu Kül yüzdesiyle Değişimi.....	81
Şekil 4.4	Eğilme Dayanımlarının Uçucu Kül Yüzdesiyle Gösterilmesi.....	81
Şekil 4.5	Kür Koşullarında Kılcallık Katsayısının Uçucu Kül Yüzdesiyle Değişimi.....	82
Şekil 4.6	Kılcallık Katsayısının Basınç Dayanımı ile Değişimi.....	83
Şekil 4.7	260. Günde Kılcallık Katsayılarının Uçucu Kül Yüzdesiyle Değişimi.....	86
Şekil 4.8	Gevreklik İndisinin Uçucu Kül Yüzdesiyle Değişimi.....	87
Şekil. A	Her Bir Üretime ait Gerilme- Boyuna Deformasyon, Gerilme- Poisson Oranı ve Gerilme-Hacimsel Deformasyon Eğrileri.....	94

SEMBOL LİSTESİ

σ	: Normal Gerilme(N/mm ²)
ϵ_b	: Boyuna Şekil Değişirme
ϵ_e	: Yanal Şekil Değişirme
ν	: Poisson Oranı
$\Delta V/V_0$	: Hacimsel Şekil Değişirme
E	: Elastisite Modülü
G_I	: Gevreklik indisi
S_I	: Tersinmez Deformasyon Enerjisi
S_{II}	: Tersinir Deformasyon Enerjisi



ÇAYIRHAN UÇUCU KÜLÜ İLE ÜRETİLEN BETONLARDA KÜR KOŞULLARININ BETON ÖZELİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

ÖZET

Türkiye’de elektrik enerjisinin sağlandığı başlıca iki kaynaktan biri kömür yakılarak çalışan termik enerji santralleri diğerleri hidroelektrik santrallerdir. Ülkede kömürün yakılmasıyla elektrik enerjisi üreten aktif olarak 11 adet termik santral vardır. Türkiye’deki yılda elde edilen toplam uçucu kül miktarı yaklaşık 13.5 milyon ton/yıl’dır. Türkiye’deki uçucu külün kullanımı ulaşılması gereken miktardan çok azdır. Bunun iki nedeni vardır:

- 1- İnşaat malzemesi olarak kullanım olanakları ve Türkiye uçucu küllerinin özellikleri üzerine veri yetersizliği.
- 2- Uçucu kül özelliklerinin üniform olmaması.

Bu çalışmada kalsiyum miktarı yüksek C tipi Çayırhan uçucu külünün içeriğinin sertleşmiş beton özellikleri üzerine etkisi incelendi. Uçucu kül ağırlıkça % 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında çimento ile yer değiştirildi. Bütün 7 karışımda bağlayıcı içeriği 300 kg/m³ ‘te su / bağlayıcı oranı ise 0.55’te sabit tutuldu. Her bir karışım için beton agregası karışımın agrega granulometrisi A 32 – B 32 arasında ve B 32’ye daha yakın tutuldu. Yaklaşık 120 ± 30 mm’lik bir çökmeyi sağlamak için bir süperakışkanlaştırıcı kullanıldı. Kılcallık deneyleri için her bir kısımda 70x70x280 mm’lik 3’er prizma üretildi. Her karışımdaki kılcallık deneyleri için 3 farklı kür koşulları uygulandı.

- i) Bu prizma 28. Güne kadar 20 ± 2 °C daki kirece doymuş su tankında tutuldu.
- ii) Bir prizmaya polietilen örtü ve ıslak çuval altında 7. Güne kadar kür uygulandı.
- iii) Diğer bir prizma ise sıcaklığı 20 ± 3 °C ve rutubeti %65 ± %5 olan bir odada açıkta bırakıldı.

Kılcallık deneyleri için 70x70x280mm’lik prizmalardan kesilen 4’er numune hazırlandı. Böylece kılcallık deneyleri 70x70x70mm’lik küpler üzerinde yapıldı. Bu araştırmanın esas konusu uçucu kül miktarının ve kür koşulunun betonun kılcallığını nasıl etkilediğini mukavemete uçucu kül içeriğinin nasıl etki ettiğini incelemektir. Bu çalışmada silindir numuneler kullanılarak uçucu kül içeriğinin betonun basınç mukavemetine, eğilme mukavemetine ve gevreklik indisine etkisi incelendi.

Labaratuar ortamında tutulan numuneler için uçucu kül içeriği arttıkça 28 günlük basınç mukavemetinin azaldığı sonucuna varılmaktadır. 28. Güne kadar su içinde tutulan diğer numuneler ile 7. Güne kadar nemli ortamda tutulan numuneler için basınç mukavemetleri hemen hemen aynıdır.

260 günlük basınç mukavemetinde de uçucu külün iğeiğine bağlı olarak azalma vardır. Diğer taraftan uçucu kl iğeriğindeki artmayla gevreklik indisi artmaktadır. Labaratuar ortamındaki numuneler için eğilme mukavemetinin uçucu kl iğeriğiyle bir miktar arttığı söylenebilir. Diğer kr koğulları için eğilme mukavemeti yaklaşık aynıdır.

Laboratuvar ortamında tutulan numunelerde uçucu kl iğeriği arttıkça kılcallık katsayısının belirgin biçimde arttığını, buna karęılık 28 gün su içinde tutulan numunelerde azalmanın olduğu ve 7 gün rutubetli ortamda tutulan numunelerde ise sabit kaldığını deney sonuçları göstermektedir. 260 günlük numunelerde ve laboratuvar ortamında tutulan numunelerde kılcallık katsayısı belirgin biçimde artmaktadır. Diğer kr koğulları için hemen hemen sabit kalmaktadır.



THE EFFECT OF CURING CONDITION ON THE PROPERTIES OF CONCRETE WITH ÇAYIRHAN FLY ASH

SUMMARY

Coal-burning thermal power plants are one of the two major sources of electric energy in Turkey. However, the others are hydroelectric power plants. Currently, there are eleven active coal-burning power plants, throughout the country. The total fly ash production in Turkey is about 13.5 million tons. The use of fly ash in Turkey is far less than the amount that should have been reached. The obvious reasons for this are: 1) Insufficient data on the properties of Turkish fly ash and the possibilities of using them as construction materials, 2) Non-uniformity of fly ash properties.

In this study, the effect of the amount of the Çayırhan fly ash C-type with high level of calcium on the properties of hardened concrete was investigated. The ash was used as 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 % of cement replacement on weight basis. In all the seven mixes binder content at 300 kg/m³ and water- binder ratio at 0.55 were kept constant. For each concrete mix, the grading curve of concrete aggregate was chosen between A32-B32, closer to B32 and kept constant. A superplasticizer was used to maintain approximately the same slump of 120±30 mm. For capillarity tests, three prism of 70x70x280 mm were cast from each mix. In each mix, three different curing conditions were used for capillarity tests:

- i) One prism was stored in the tank saturated with lime at 20°C ± 2°C until 28 days old,
- ii) One prism was moist- cured under polyethyleric sheet and wet burlap until 7 days old,
- iii) One prism was cured in air in a room of 65%± 5% relative humidity and 20°C±3 °C temperature.

The three specimens for capillarity test cut from the prism of 70x70x280 mm were prepared. Thus, the capillarity tests were performed on the 70x70x70mm cube specimens. The main object of the present study is to investigate how the amount of fly ash and curing condition affect the capillarity of concrete and how the fly ash content influences its contribution to the strength development. Thus, the effect of fly ash content on the compressive strength, flexural strength and brittleness index was also investigated using the cylinder specimens.

For specimens kept in the laboratory condition, it can be concluded that the dosage of fly ash in increases the 28 days compressive strength decreases. For the other specimens cored in a water tank until 28 days old or moist- cured until 7 days old, their compressive strength where almost identical. There was also reduction in the 260 days compressive strength depending on the amount on the fly ash. On the other hand, the brittleness index, increases with each increasing fly ash content. For the

specimens kept in the room condition it can also be concluded that the flexural strength increases with fly ash content. For the other curing conditions the flexural strength where approximately the same.

For specimens kept in the room condition, the results obtained show that as the amount of fly ash increase the capillarity coefficient increases significantly, however, it decreases in the specimens keep in a water tank for the 28 days and it becomes constant in the specimens moist-cured for 7 days.

For the 260 days old specimens kept in room condition coefficient increases substantially, but it becomes almost constant for the other curing conditions.



1.GİRİŞ

Yetmişli yıllarda üst üste yaşanan ve zaman zaman ortaya çıkan enerji krizleri, nüfus artışına paralel olarak, gelişen endüstrilerin giderek artan elektrik ihtiyacı, Türkiye’de yeni santrellerin yapılması gereğini ortaya çıkarmıştır. Bilindiği gibi ülkemiz, hidroelektrik potansiyel yönünden, Norveç’in ardından Avrupa’da ikinci sırada bulunmasına karşın, bu potansiyelin ancak küçük bir kısmı değerlendirebilmektedir. Hidroelektrik santrallerin yapımı, uzun süre alan ve çok büyük mali kaynaklara gerek duyulan yatırımlarla gerçekleştirilmesine karşılık, termik santraller çok daha kısa sürede inşaa edilebilmektedirler. Günümüzde, enerji açığının kısa sürede karşılanması amacıyla yapılan yeni termik santraller çevreyi kirleten birtakım atık maddelerin de üretim sonucunda açığa çıkmasına neden olmuştur. [1]

Günümüzde beton, kullanımı yaygın olan ve sektörün en önde gelen yapı malzemesidir. Ayrıca, sürekli olarak artan bir şekilde, ürünü kaliteden ödün vermeden olabildiğince ucuza üretme eğilimi yerleşmektedir. Ülkemizin ekonomik durumu düşünüldüğünde, beton gibi ülkemizin inşaat sektöründe çok yaygın olarak kullanılan bir malzeme için de bu tarz bir yaklaşım geçerli olmaktadır.

Gelişen sanayi ile birlikte endüstriyel alandaki üretimin sonucu birçok atık malzeme açığa çıkmaktadır. Bu atıkların büyük bir kısmı depo edilmekte bu da çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bunu önlemek amacıyla bu atık maddelerin çeşitli sektörlerde kullanılması gerekmektedir. Bu atık malzeme ve yan ürünlerin değerlendirilmesi, hem çok kısıtlı olan doğal malzemelerin kullanımını azaltarak doğanın tahrip edilmesini önlemekte, hem de malzemelerin atılmak üzere depolanması durumunda, çevrede meydana gelecek problemleri en aza indirmektedir. İnşaat mühendisliği alanı, atık malzeme ve yan ürünlerin değerlendirilmesi açısından, yüksek hacimlerde malzeme kullanımına olanak verdiği

için çok uygundur. Bir de inşaat mühendisliği uygulamalarında stabilitenin sağlanması için malzemelerin kompakt hale getirilmesi gerektiğinden, çevre kirliliği problemi minimuma inmektedir.[2]

Ülkemizde nüfus artışı, yaşama standardının yükselmesi, sanayileşme ve kentleşme enerji gereksiminin artmasında etken olmuştur. Bu gereksinim karşısında mevcut potansiyeller mümkün olduğu kadar çabuk bir biçimde harekete geçirilmiş ve hidroelektrik ve termik santraller kurulması bir çözüm olarak gerçekleşmiştir. Özellikle endüstriyel atık olarak kullanılma imkanı olmayan düşük kalorili kömür yatakları yakınına büyük kapasiteli termik santraller kurulması enerji üretimini arttırmak amacıyla yürütülen çalışmalar arasında başta gelenlerden birisidir. Ancak enerji üretiminin artırılmasında tutarlı bir çözüm olarak gözüken kömüre dayalı termik santrallerin sayısının artması ciddi ekonomik ve teknik sorunları da beraberinde getiren kül üretiminin de artmasına neden olmaktadır. Bu küllerin santrallerden uzaklaştırılması ve depolanması çevre kirliliğinin yanı sıra işletme, enerji ve üretim konularında parasal ve teknik problemleri yaratmaktadır.

Termik santrallerde enerji üretiminde yakıt olarak kullanılan pulverize (öğütülmüş) kömür atık malzeme olarak kül meydana getirmektedir. Bu külün büyük bir miktarı (yaklaşık % 75 – 80 'i) çok ince parçacıklar halinde bacadan gazlarla birlikte uçup dışarı gidebilecek durumdadır. Fakat “ uçucu kül ” isimli bu malzeme elektrostatik veya manyetik metodlarla bacadan çıkışı önlenerek atık malzeme olarak toplanmaktadır.

2.GENEL BİLGİLER

2.1 Puzolanlar

2.1.1 Tanımı ve Sınıflandırılması

Yalnız başına kullanıldıkları zaman bağlayıcı olmayan fakat kireç veya çimento ile karıştırıldığı zaman su ile yaptığı reaksiyon sonucu bağlayıcı madde özelliği kazanan maddelere puzolan denilmektedir.[3]

Puzolanlar, ilk olarak eski Romalılar devrinde, bundan yaklaşık olarak 2000 yıl öncesinden itibaren söndürülmüş kireç ile birleştirilerek hidrolik bağlayıcı olarak kullanılan ve adını ilk olarak kullanıldığı İtalya'daki Vezüv yanardağı eteklerindeki puzzouli kasabasından puzolan olarak alan volkanik küllerdir.[4] Eski Romalılar volkanik küllerin veya öğütülmüş tuğla ve kiremitlerin söndürülmüş kireç ile birleştirilmesiyle elde edilen bağlayıcı malzemeleri irili ufaklı çok sayıdaki yapıda kullanılmıştır. Bir diğeri de Almanya'nın ren bölgesinde çıkarılan puzolandır. Bu puzolana Tras adı verilmektedir. Üstün özelliklere sahip olduğu için ülkemizde ve birçok yerde tras kelimesi puzolanın yerini almıştır. Yüksek nitelikli puzolanların bulunduğu bir diğer yer de Ege denizinde Yunanistan'a bağlı Santorin adalarıdır. Ülkemizde ise Çorum civarında Mecitözü'nde geniş puzolan yatakları bulunmaktadır.[5] Ayrıca Libya'nın Trablus kenti civarındaki “ diatome” fosilli topraklarda(Kieselguhr) dünyaca kullanılmaktadır.[4]

Puzolanların portland çimentolu betonda kullanılması, su geçirimsizliğinin artması, hidrasyon ısısının düşmesi ile termal çatlakların azalması, alkali-agrega reaksiyonu ile oluşan çatlamalara karşı dayanımın artması, işlenebilirliğin artması ve sülfat ve asit ortamlarında durabilitenin artması gibi amaçlara yönelik olarak yerine getirilir.[6]

Mineral katkı maddeleri taze betonun işlenebilme ve su ihtiyacı ile reolojik özelliklerine; terleme, ayrışma, hava sürüklenme, hidrasyon ısı ve plastik rötre gibi özelliklerine etki ederler.[2]

Sertleşmiş betonda da puzolanlar mekanik özelliklere ve durabiliteye oldukça önemli etkiler yapar. Dayanım ve dayanım kazanma hızı ile elastisite modülü, sünme ve rötre mineral katkı kullanımından etkilenirler. Geçirimsizlik, asitlere ve sülfata dayanıklılık, alkali-agrega reaksiyonu, donma çözülme tekrarlarına dayanıklılık, deniz ortamına dayanıklılık ve donatı korozyonu gibi tüm durabilite özellikleri de bu katkıların kullanımından etkilenmektedir. Mineral katkı maddelerin özelliklere olan etkilerinin yönü ve şiddeti çoğu zaman katkının cinsi, kullanım miktarı, kullanım yöntemi, fiziksel, kimyasal ve puzolanik özellikleri gibi faktörlere bağlı olmaktadır.[2]

Puzolanlar, portland çimentosuna ilave edildiklerinde çimentonun hidrasyon sonucu meydana gelen Ca(OH)_2 ile SiO_2 ve Al_2O_3 arasındaki reaksiyon sonucunda puzolan yine bağlayıcılık özelliğine sahip olurlar. Puzolanlar silisli veya silisli ve daha az miktarda alüminli malzemelerdir. Kendi başlarına bağlayıcı özellikleri yoktur yada çok azdır; ancak, çok ince taneli olduklarında ve söndürülmüş kireçle birlikte su ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcı özelliği kazanan malzemelerdir.[7]

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

Puzolanlar elde edilişlerine göre doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere iki gruba

ayrılırlar. Her bir gruba giren puzolan türleri aşağıdaki Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Puzolanların Sınıflandırılması ve Puzolan Türleri[8]

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

Önemli yapay puzolanlardan birisi olan pişirilmiş kil, 600-900 °C arasında pişirmek suretiyle elde edilir. Bu madde çimento inceliğinde öğütüldükten sonra çimento ya belirli oranlarda karıştırılarak kullanılır. Tuğla ve kiremit tozunun bir bağlayıcı madde ile karıştırılması da aynı sonucu verir. Ülkemizde eski eserlerin , köprülerin yapımında tuğla tozu ve kireç karışımından Horosan denilen bu bağlayıcı maddenin harcı kullanılmıştır. Su karşısında çözülmeyen bu madde deniz yapılarında da kullanmaya elverişlidir. Çimento’nun icad edilmeden önce 1786 yılında inşaa edilen Cezayir limanında bağlayıcı madde olarak pişirilmiş kil ve kireç karışımı kullanılmıştır.[4]

Mineral katkı maddelerinin beton teknolojisinde kullanım yöntemleri puzolanın türüne göre değişebilmektedir. Doğal puzolanlar çoğunlukla katkılı portland çimentosu üretiminde kullanılmaktadırlar. Bu tür çimentoların kullanılmasıyla betonda önceden belirlenmiş oranlarda puzolan kullanılmış olmaktadır. Puzolanlarla belirli oranda puzolan içeren katkılı portland çimentosu kullanımıyla betona dahil edilirler veya betona karıştırma esnasında çimentoya ilave veya ikameli olarak

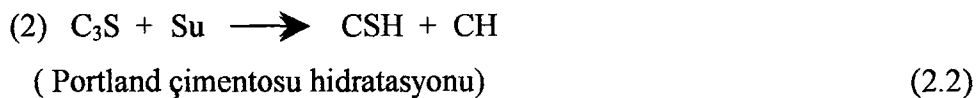
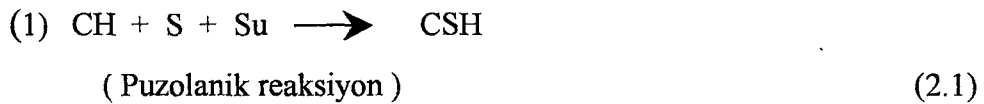
katılır. Aşağıdaki Tablo2.2 çeşitli puzolanların kimyasal bileşimleri verilmektedir.[7]

Tablo2.2 Çeşitli Puzolanların Kimyasal Bileşimleri [5,7]

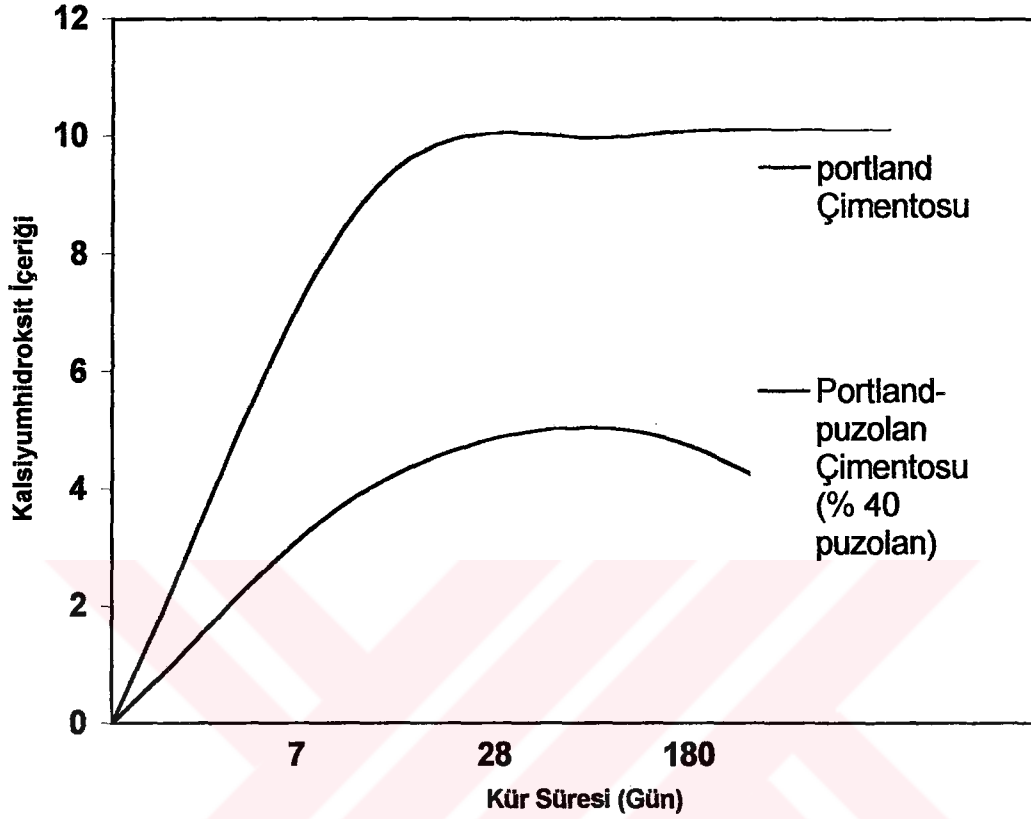
	Ren Trası	Santorin	Napoli	Mecitözü	Kayseri	Uçucu Kül	Pişirilmiş Kil
SiO ₂	%54,6	% 63,2	%55,7	%64,47	%63,08	%42-50	%50,2
Fe ₂ O ₃	%3,8	%4,9	%4,6	%1,50	%5,58	%5-10	%7,6
Al ₂ O ₃	%16,4	%13,2	%19,0	%14,38	%18,63	%16-30	%17,0
CaO	%3,8	%4,0	%5,0	%4,73	%5,07	%2-4	%5,1
MgO	%1,9	%2,1	%1,3	%1,38	%1,55	%0,5-9	%3,5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

2.1.2 Puzolanik Reaksiyon

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



Sadece portland çimentosu ve portland-puzolan çimentosundaki kalsiyum hidroksit içeriğinin zamanla değişimi aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.1 Bir hidrate portland-puzolan çimentosundaki kalsiyum hidroksit içeriğinin değişimi [6]

Puzolanik reaksiyon yavaştır; bunun neticesinde bu reaksiyon ile birlikte dayanım kazanma hızı ve hidratasyon ısısı düşüktür. Öte yandan, portland çimentosundaki C_3S hidratasyonu hızlıdır. Bu nedenle bu reaksiyon ile birlikte dayanım kazanma hızı ve hidratasyon hızı yüksektir. Aynı zamanda belirtilmelidir ki ,puzolanik reaksiyon kireç tüketen portland çimentosu reaksiyonu ise kireç üreten reaksiyondur. Puzolanik reaksiyon, sıcaklık, alkaliler ve sülfatlar gibi kimyasal katkılarla hız kazanabilir.[6]

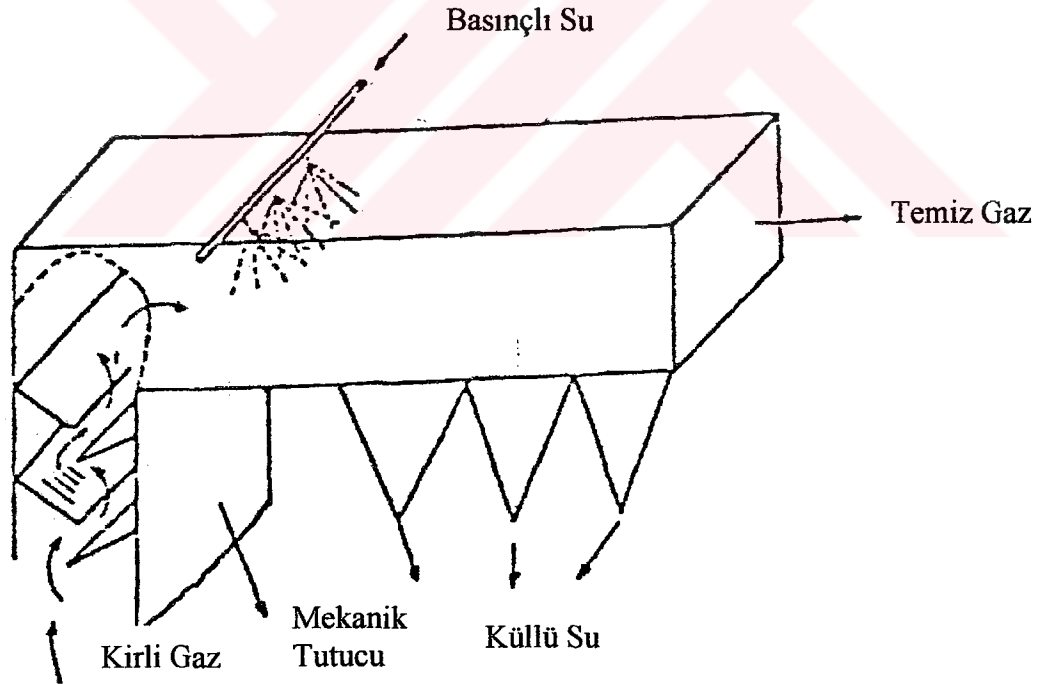
Portland çimentosunun bir puzolan ile karışımı hidrate olduğunda, puzolanik reaksiyonun ilerlemesi sonucu zamanla serbest kalsiyum hidroksitte ($Ca(OH)_2$) azalma oluşur.

2.2 Uçucu Külün Toplanması

Uçucu küllerin toplanmasında aşağıdaki yöntemler kullanılmaktadır:

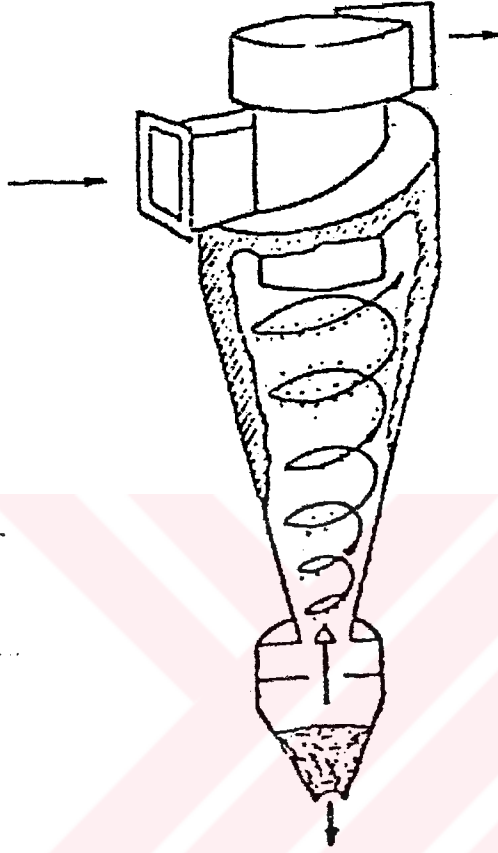
- Elektrofiltrelerde Toplama
- Siklonlarda Toplama
- Nemlendirme
- Filtrelerde Toplama
- Ultrasonik Çöktürme
- Kontrol Prosesleri

Termik santrallerde en çok kullanılan kül tutma yöntemleri, elektrofiltre ve siklonlarda toplamadır. Uçucu küllerin tane boyutunun büyük olduğu durumlarda siklon gibi mekanik tutucular, küçük olduğu durumlarda ise elektrofiltreler kullanılır. Uçucu küllerin su ile ıslatılarak çöktürülmesi esasına dayanan nemlendirme yöntemi



Şekil 2.2 Uçucu küllerin nemlendirme yöntemi ile tutulması[24]

çok su tüketmekte olup, toplanan küllerin değerlendirilememesi ve yüksek maliyeti sebebiyle pek kullanılmamaktadır.[9]



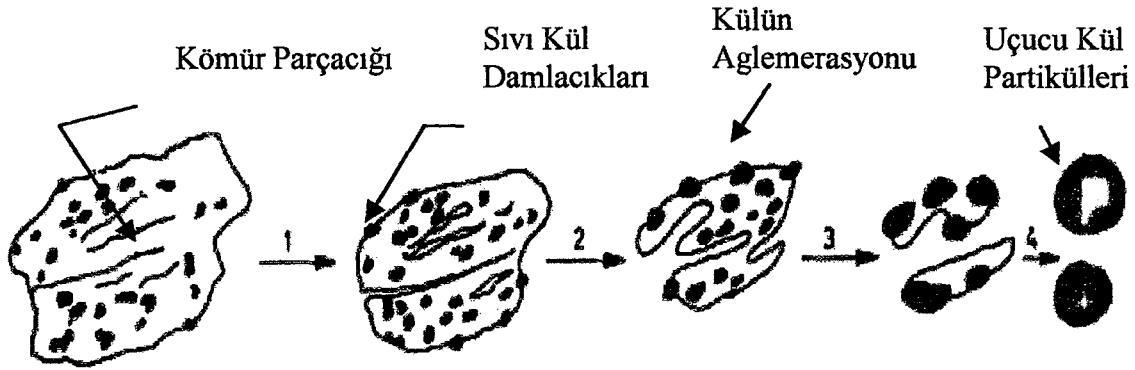
Kül

Şekil 2.3.a. Siklon ile uçucu küllerin tutulması[24]

2.2.1. Uçucu Külün Oluşumu

Yanma, yakıtların genellikle havadan sağlanan oksijen ile hızlı oksidasyonu sonucu ısı ve sıcak yanma ürünlerinin açığa çıktığı kimyasal reaksiyondur. Fosil yakıtlar esas olarak karbon, hidrojen ve oksijenden oluşur. Bunlara ilave olarak daha az oranlarda kükürt, azot, klor ve diğer elementleri içerir. Normal şartlarda ve yeterli oksijen ortamında yakıtlar çoğunlukla CO_2 ve H_2O 'ya dönüşür. Ayrıca az miktarda bulunan kükürt, azot ve diğer elementlerin oksitleri oluşur. Eğer yanma tam olarak gerçekleşmezse ürün gazları içerisinde CO , O_2 , metan, kurum ve katran oluşur. [10]

Yanma süresince kömür yapısında organik matris veya organik bileşik (organometalik yapı) içinde bulunan elementler sıcaklığın etkisiyle buharlaşarak gaz faza geçerler. Zamanla uçucu organik maddeler tükenir. Son olarak inorganik yapı içerisinde bulunan uçucu kül matris elemanları (aluminosilikat, SiO_2 , etc.) küresel uçucu kül partikülleri oluşturmak üzere erirler. Uçucu külün oluşumunun safhalarını açıklamak üzere en çok kullanılan mekanizma aşağıdaki şekil.2.4'te özetlenmiştir.

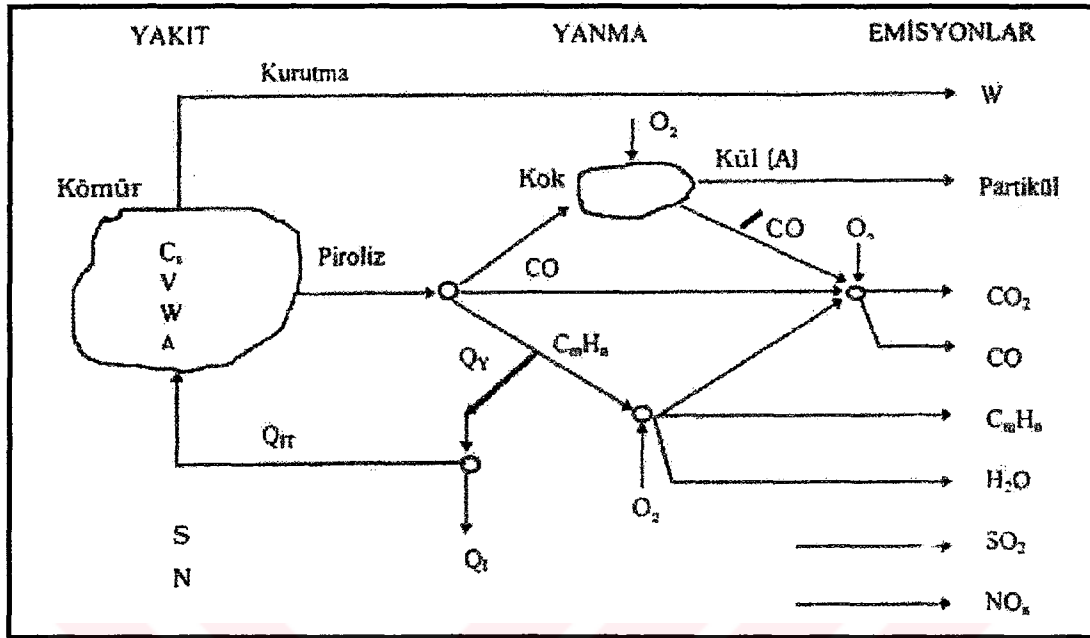


Şekil 2.3.b. Uçucu Külün Oluşum Safhaları [11]

Kömür yandığında kalan kül kömürün içerdiği mineral maddelerden oluşur. Kömürün yanması sonucu bir takım zararlı elementlerin emisyonu söz konusudur ki bu elementlere eser miktardaki elementler (trace elements) de denilmektedir. Bunlar As, Ba, Be, Br, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mo, Ni, Pb, Se, Si, Ti, V, Zn, Hg, B, Bi, Cs, Sr, Ta, Th, U, W, Y, Li, Sb, Ga, Ge, Na'dır. Kömürün mineral maddesi ile külü ne içerik ne de miktar bakımından aynı değildir. Kömürün kül içerdiğini söylemek yanlış olur. Kömür kül içermez ancak yandığı zaman, içerdiği mineral maddelerin şu temel değişikliklere uğraması sonucu kül oluşur[11] :

- Hidrat suyu kaybı ,
- Karbonatların parçalanması ,
- Sülfürlerin Parçalanması ,
- Kömürün yanması sonucu oluşan metal oksitlerin , organik ve piritik kükürdün bir kısmını kükürt trioksit halinde tutması,
- Eğer sıcaklık yeterince yüksek ise, oksitler, silikatlar ve serbest silikanın tepkimeye girerek yeni bileşikler oluşması.

Külün kökeni kömürün içerdiği mineral maddeler olduğundan, özellikleri mineral maddenin bileşimine ve oksidasyonun gerçekleştirdiği şartlara bağlıdır.[12]



Şekil 2.3.c. Bir Kömür Taneciğinin yanması ve yanma ürünleri[10]

ASTM D 3174 standartlarına göre , 0.25 mm 'nin altına öğütülmüş olan 1 gramlık kömür numunesi, yavaş yavaş 700-750 °C 'a çıkarılan hava sirkülasyonlu bir fırında ısıtılarak, ağırlığı sabit kalana kadar (0.001g) bekletilir. Kül miktarı kalan kütleinin tartılması sonucu saptanır. Alman ve ingiliz standartlarına göre yakma sıcaklığı 775 - 25 °C 'dır. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan diğer bir standart ise ISO 1016 'dır. Bu standarda göre 1 gr kömür 30 dakikada 250 °C'a , 250 °C'dan 500 °C 'a yine 30 dakikada, 500 °C'dan 815 °C'a ise 60 dakikada ısıtılır ve ağırlığı sabit kalana kadar fırında bekletilir.

Kömürün bıraktığı kül miktarı saptanırken içerdiği pirit ve karbonat minerallerinin miktarları gözönünde bulundurulmalıdır. Eğer kömürün pirit ve karbonat mineral içerikleri yüksek ise, kömür düşük sıcaklıkta yakılarak piritin, karbonat minerallerinin parçalanma sıcaklığının altında ayrışması sağlanmalıdır. Böylece, kömürde kalan ve yüksek sıcaklıkta oluşan bazlarla tepkimeye girebilecek olan kükürt miktarı azalmış olur. Bu amaçla, ASTM D 3174 standardına göre, soğuk fırına konulan kömür nümunesi bir saat içinde 500 °C'a ve iki saat içinde ise 750 °C'a ısıtılır ve ağırlığı sabit kalana kadar fırında bekletilir. Kömürün ince takaka halinde külleştirilmesi de külde kalan kükürt miktarını azaltmaktadır. [10]

2.3 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 siklonlarla havaya çıkışı engellenerek biriken toz halindeki puzolanik niteliğe sahip silisli ve alüminosilisli atık maddesidir. Uçucu kül termik santrallerin yan ürünü olup kömürün içindeki inorganik maddeler fırın ortamında erimekte ve bacadan atılma esnasında soğuyarak genellikle küresel tanecikler halinde oluşmaktadır.[13]

Tablo 2.3 TS 639 ‘da Belirtilen Uçucu Kül Özellikleri

Özellik	Standart Sınırları
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	En az %70
MgO	En çok %5
SO_3	En çok %5
Rutubet	En çok %3
Kızdırma kaybı	En çok %10
İncelik (Blaine)	En az 3000 cm^2/g
P.A.İ.	En az kontrolün %70

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

bakımından, sorun olan uçucu kül günümüzde Avrupa ülkelerinde bir ticari mal gibi satılır hale gelmiştir.

Türkiye’de yılda 10 milyon tonun üzerinde uçucu kül elde edilmekte ancak bu küllerin pek azı değerlendirilebilmektedir. Örneğin Soma Termik Santralından yılda 1.312.000 ton uçucu kül elde edilmektedir, bunun yaklaşık olarak yüzde biri değerlendirilmekte geriye kalan kısmı ise kül havuzlarında depo edilmektedir.[14]

Tablo 2.4 Türkiye’de Üretilen ve Satılan Toplam Uçucu Kül Miktarı (milyon ton /yıl) [15]

Yıl	Toplam Üretilen Uçucu Kül Miktarı	Toplam Satılan Uçucu Kül Miktarı
1992	12	0.09
1993	13	2

Uçucu Kül, termik santrallerde ince öğütülmüş kömürlerin yakılmasından sonra bacadan atılan gazlardan elektrostatik filtrelerle ayrılır. Uçucu külün niteliğini yakılan kömürün cinsi, kalitesi, ve fırının büyüklüğü belirler. 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 özelliği gösterebilmektedir. [16]

ASTM C 618 (American Society for testing materials) standardına göre Kimyasal kompozisyonları ve üretildikleri kömür cinsi gözönüne alınarak uçucu külü iki sınıfa ayrılmıştır:

- 1) C sınıfı uçucu küller
- 2) F sınıfı uçucu küller

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 küller ise bitümlü kömürden elde edilmektedir. Genel olarak, linyit kömürünün

yanması ile oluşan uçucu kül bitümlü kömürden elde edilen uçucu küle nazaran daha çok kalsiyum ve daha az miktarda demir içeriğine sahiptir.

Tablo 2.5 ASTM C 618 sınır değerleri ve Tunçbilek ve Soma-B Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları

Oksit, %	Düşük-Kireçli Uçucu kül (Tunçbilek)	YüksekKireçli Uçucu kül (Soma-B)	ASTM C 618	
			Sınırları	
			F sınıfı	C sınıfı
SiO ₂	57.31	48.21	—	—
Fe ₂ O ₃	3.65	6.43	—	—
Al ₂ O ₃	29.08	24.91	—	—
SiO ₂ +Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃	90.04	79.55	Min. 70	Min. 50
CaO	2.83	14.47	—	—
MgO	4.32	2.71	Max. 5	Max. 5
SO ₃	0.44	1.82	Max. 5	Max. 5
Kızdırma kaybı	2.25	0.72	Max. 12	Max. 6
Na ₂ O+K ₂ O	0.07	0.37	Max. 1.5	Max. 1.5

2.4 Uçucu Küllerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Elde edilen atık malzemenin %75 ila 80’ni oluşturan uçucu kül genel olarak gri veya kiremit kırmızısı rengindedir; içlerinde yanmamış karbon (yanmamış kömür parçacıkları) miktarı fazla olduğu takdirde renkleri daha koyudur. Tipik olarak küresel şekle sahip olan uçucu kül parçacıklarının çapları 0,5- 150 µm arasında değişim göstermektedir; bu parçacıkların %75’inin veya daha fazlasının çapı 45 Mm’den daha küçüktür. Kül parçacıklarının içi dolu veya boş olabilmektedir. İçleri boş olan kül parçacıklarının miktarı toplam külün ağırlık olarak yaklaşık %5 ‘i, hacim olarak %20’si kadardır. Uçucu küllerin yoğunluğu 2.2 - 2.7 g/cm³ aralığında değişmektedir. [3] İçerdiği maddeler bakımından incelendiğinde uçucu küllerin puzolanik özeliğe sahip olması beklenir. [4]

Kimyasal kompozisyonu incelendiği zaman uçucu küllerin genelinin %95'inden fazlasının silisyum, alüminyum, demir, kalsiyum ve magnezyum elementlerinden oluşan kimyasal bileşikleri içerdiği görülmektedir. Bir miktar yanmamış kömür karbon tanecikleri olarak uçucu kül ile birlikte toplanır.

Tablo 2.6 Türkiye Uçucu Küllerinin Minerolojik Bileşimleri

Mineral(%)	Uçucu Küller					
	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma-B	Tunçbilek	Yatağan
Mullit	1.0	18.1	1.2	4.3	8.8	6.0
Kuartz	4.5	10.9	5.6	5.1	13.9	22.4
Magnetit	0.8	0.2	2.5	0.6	4.1	2.9
Hematit	4.0	0.1	6.0	2.0	3.0	7.0
SerbestCaO	18.6	0.7	5.5	9.8	0.9	1.0
Anhidrit	12.2	-	9.3	7.4	-	-
Plagioclase	28	-	15	20	-	25
Camsı ve amorf faz	30	70	50	50	70	35

Linyit kömüründen elde edilen uçucu kül çok az yanmamış karbon içermektedir.

Tablo 2.7 Türkiye'deki Bazı Uçucu küllerin Fiziksel Özellikleri

Fiziksel özellikler		Uçucu Küller					
		Afşin – Elbistan	Çatal ağzı	Seyit ömer	Soma-B	Tunç bilek	Yatağan
İncelik	200 Mm elek	3.0	2.7	1.0	3.0	4.5	1.9
	90 Mm elek	14.9	11.5	3.0	19.0	13.5	12.8
Özgül ağırlık		2.63	1.97	2.46	2.42	1.99	2.15
Puzolanik Aktivite İndeksi	Kireçle (Kg/cm ²)	49.7	45.1	43.8	52.5	34.0	36.0
	P. Ç. ile (%Kontrol)	86.4	77.2	79.8	94.5	72.5	67.3
Su ihtiyacı(% Kontrol)		111.8	102.7	112.4	110.0	104.2	106.5

2.5 Uçucu Kül İçeren Betonların Karışım Oranlarını Hesaplama Metodları

Yapılan uygulamalarda betonda uçucu kül kullanımı aşağıdaki amaçları sağlamak için kullanılmaktadır[17]:

- Çimento miktarını azaltarak, maliyeti düşürmek
- Hidratasyon ısını düşürmek
- İşlenebilirliği artırmak
- 90 gün ve sonrasında betonda istenilen mukavemeti sağlamak

Uygulamada uçucu külün beton içerisinde kullanılması iki şekilde olmaktadır :

1. Uçucu küllü çimentoyu portland çimentosu yerine kullanmak,
2. Uçucu kül ilave bir bileşen olarak beton üretim sırasında betonun içine karıştırarak,

İlk uygulama ikinci uygulamaya göre daha basit ve daha kontrollüdür. Böylece uçucu kül ve çimento oranları önceden belirlenmiş olur ve karışım oranlarındaki değişimin belirli bir sınır aralığında kalması sağlanır. İkinci uygulama olan uçucu külün ilave olarak betona katılmasında, karışım oranlarının farklı olması nedeniyle uçucu külün özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekir. Bu uygulama ile uçucu kül özelliklerinin beton içinde tam olarak oluşmasına olanak sağlanır.[18]

Taze ve sertleşmiş betonda uçucu kül bir çok görevi yerine getirir. Taze betonda uçucu kül genelde ince agrega olarak görev yapar aynı zamanda su ihtiyacını da azaltabilir. Sertleşmiş beton halinde ise, puzolanik özelliğinden dolayı uçucu kül bağlayıcı matrisin bir bileşeni halini alır ve mukavemet ile durabilitayı artırır.

Uçucu küllü betonun karışım hesabıyla ilgili yaklaşımın seçiminde iki yaygın kabul yapılır:

- Uçucu kül genellikle erken yaşlarda beton dayanımını düşürür.
- Eşit işlenebilirlik için uçucu küllü beton sadece portland çimentosu içeren betondan daha fazla su gerektirir.

Her iki kabul de uçucu kül kullanılan beton karışım oranları problemine yaklaşım tarzını önemli ölçüde etkilemiştir.

Uygulamaların yapıldığı süreç içerisinde, uçucu küllü beton karışım oranlarını uçucu külsüz betonunki ile karşılaştırmak adet olmuştur. Taze ve sertleşmiş betonun özellikleri genellikle kontrol betonununki ile karşılaştırılmıştır. Bunun yanı sıra, uçucu kül, özellikle çimento, kum ve su gibi bileşenlerin fonksiyonlarını tamamlayan bir bileşen olmaktan çok genelde çimentonun yerini alan bir malzeme olarak düşünülmüştür. Son zamanlarda, uçucu küllü betonun bileşenlerini bir bütün olarak ele alma ve de uçucu küllü betonu bir denk referans bir denk referans betonla karşılaştırmadan tek bir malzeme olarak inceleme eğilimi vardır. Bu farklı görüşlerin sonucunda, uçucu külün betona katılımında üç temel karışım oranı metodu geliştirilmiştir[17] :

1-Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması

(Basit yerdeğiştirme yöntemi)

2-Uçucu külün ince agregası olarak kullanılması

(İlave yöntemi)

3-Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agregası yerine koyulması

(Kısmi yerdeğiştirme yöntemi)

bu yöntem ikiye ayrılır :

a) Modifiye edilmiş yerdeğiştirme yöntemi

b) Rasyonel oranlama yöntemi

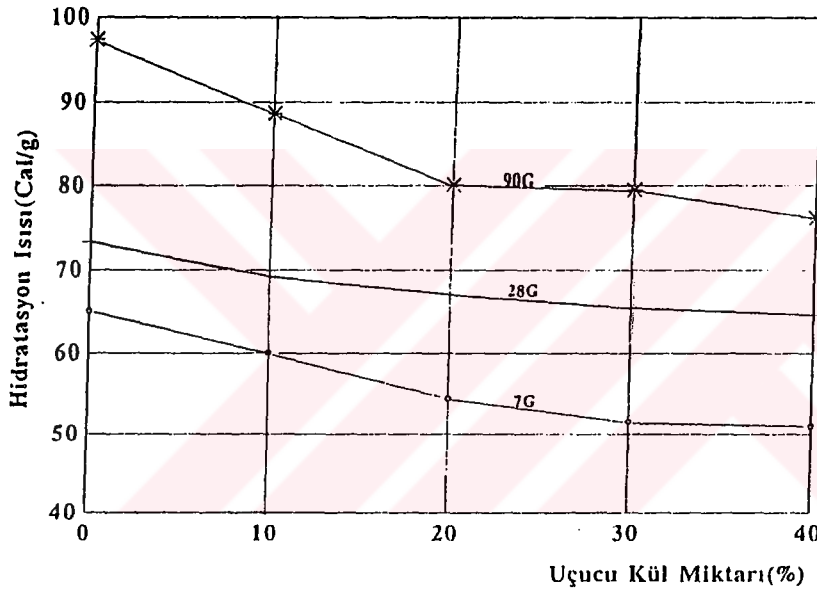
1- Basit Yerdeğiştirme Yöntemi

Basit ikame metodu, uçucu külün portland çimentosunun bir kısmı ile belirli bir oranda doğrudan yer değiştirmesi olarak tanımlanır. Yapılan araştırmaların çoğunluğu göstermektedir ki, portland çimentosunun hangi yüzdeyle olursa olsun ister hacmen ister ağırlıkça bire bir uçucu külle yer değiştirmesi halinde betonun basınç, eğilme dayanımının üç aya kadar olan nem kürü durumunda düşmekte olduğunu, altı aydan daha fazla sürede ise daha fazla dayanım artışı olduğunu göstermiştir. 3-6 ay sonrasında , % 20 'ye kadar uçucu kül ikamesi portland çimentosu betonuna göre bu yöntem dayanım artışına neden olmaktadır. Uçucu kül ilk defa kullanıma girdiği kütle beton uygulamalarında, bu erken yaş dayanım azalmaları arzu edilen ısı yükselişi azalmasına nazaran daha az yapısal öneme sahiptir. Çoğunlukla bu tip uygulamalarda bu metod kullanılmıştır. [19]

Sistemin davranışı, erken yaşlarda uçucu küllü betonun çok az bağlayıcılık göstermesi ve genelde ince agrega olarak davranması ile çelişmez. Geç yaşlarda bağlayıcılık aktivitesi dikkate değer bir hal alır ve önemli derecede dayanımda artış meydana gelebilir.

Bu konuda yüksek kireçli uçucu küller büyük oranda az kireçli uçucu küllere oranla farklılık gösterir.

Şekil 2.4'te Portland çimentosu-Uçucu kül karışımlarının hidrasyon ısıları değerleri uçucu kül yüzdesiyle değişimi aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.4 Hidratasyon Isısı Değerlerinin Uçucu Kül Miktarıyla Değişimi

2- İlave Yöntemi

Bu yöntemi, karışımda kullanılan çimento miktarında bir azaltma yapılmadan uçucu kül eklenir. Beton içerisindeki efektif bağlayıcı miktarı bu yöntem sayesinde artırılır. Diğer karışım ayarlamaları agrega bileşiminin değiştirilmesiyle yapılır.

Bu yöntemin bir uygulaması Price tarafından yapılan Güney Saskatchewan baraj inşaatı için beton malzeme araştırması sonucunda oluşmuştur. Sülfatın mukavemetinden dolayı minimum bir çimento faktörü ve çimentodan çok ince agrega yerine bir puzolan kullanmanın önemli olduğu düşünülmüştür. İlave yapılan uçucu külün tüm yaşlarda genellikle dayanım artışına sebep olduğu bulunmuştur. Artışların yedi güne kadar az olduğu fakat üç aylık ve bir yıllık periyotta 6.9 MPa. düzeylerine ulaştığı gözlenmiştir. Uçucu kül ilavesi ile elde edilen artışların aynı miktarda çimento ilave edilmesiyle edilen artışlara eşit veya bu artışlardan fazla olduğu gözlenmiştir.

3- Kısmi Yerdeğiştirme Yöntemi

Uçucu külün kullanılması için geliştirilen üçüncü yöntem, ince agregada ve su içeriğinde bir ayarlama yaparak, ağırlıkça bir miktar fazla uçucu külle yerdeğiştirilecek bir miktar çimento gerektirir. Çimento, su ve ince agrega yerine kısmi yerdeğiştirme yapılarak, çimento+uçucu kül miktarının arttığı durumlarda, dayanım gelişimi ve ekonomi için karışım optimizasyonu kavramı ortaya çıkar. Metodun iki değişik hali vardır. Orjinal şeklinde buna modifiye yerdeğiştirme denilmektedir. Son zamanlardaki uygulamada meydana gelen gelişmelerle rasyonel karışım yöntemi denilen yöntem ortaya çıkmıştır.

a - Modifiye Yerdeğiştirme Yöntemi

Bu yöntemde karışım oranlarının modifikasyonu ile ilk yaşlarda kontrol betonu ile kıyaslanabilir dayanıma sahip uçucu küllü beton üretilebileceğini göstermiş olan Lovewell ve Washa'nın 1958 yılında yaptıkları çalışmaya dayanmaktadır.

Bu çalışmanın temel esasları şu şekilde özetlenebilir[17] :

‘Uçucu kül ile yapılan, üç ve yirmisekizinci günler arasındaki yaşlarda, yaklaşık olarak aynı basınç dayanımını sağlayabilmek için uçucu kül ve çimento ağırlığı kıyaslanabilir dayanımlı portland çimentolu karışımdaki çimento ağırlığından fazla olmasının gerekliliğidir.’

1960'lı yılların başlarından itibaren yapılan çalışmalar sonucunda anlaşıldığı üzere, uçucu küllü betonun işlenebilirlik ve dayanım açısından istenilen koşullara uyması için, gerek dayanıma ve gerekse işlenebilirliğe etki eden uçucu külün özelliklerinin, karışım oranının belirlenmesi sırasında her yönüyle ele alınması gerekmektedir. Bu anlayış Abrams'ın dayanım ve su-çimento oranı arasındaki ilişkisinden yola çıkmış ve ilk karışım oranlama yöntemlerinin gelişimi sırasında oluşmuştur.

b - Rasyonel Oranlama Yöntemi

Bu yöntem uçucu kül içeren betonlar için ilk kez Smith(1967) tarafından teklif edildiği kabul edilmektedir. Smith, kullanılan uçucu külün bağlayıcılık özeliğine göre değişen bir “ etkinlik faktörü “ (k) ileri sürerek karışımında kullanılması gereken çimento miktarı ve su/çimento oranı değerlerini elde edebilmek için çoktan beri süregelen karışım oranlama prosedüründe değişiklik yapmıştır. Bu etkinlik faktörü her uçucu kül için farklılık göstermektedir. Faktör uçucu kül içeren beton karışımlarının göstereceği performanstan ya da başlangıç test programlarından saptanır

Uçucu külün bağlayıcılık özeliğine göre değişen etkinlik faktörünü daha net bir biçimde tanımlamak gerekirse; bir (F) uçucu kül ağırlığı (kF) kadarlık bir çimento ağırlığına karşılık gelmektedir. Bu sayede uçucu küllü betondan istenen dayanım ile su/(toplam bağlayıcı madde miktarı) arasındaki ilişki;

$$F_c = W / (C + (k \cdot F)) \text{ oranıyla ifade edilir.}$$

Bir betondan istenilen dayanım 300 kg. çimento, 0.50 su/çimento oranı ile sağlanabiliyorsa bu karışım için;

$$W/C = 0.5 \quad W = 300 \cdot 0.5 = 150 \text{ kg}$$

Örneğin karışımında etkinlik faktörü $k=0.3$ olan bir uçucu kül kullanılacağı düşünülürse ve buna bağlı olarak çimento miktarı 100 kg. azaltılırsa,

$kF=100$ olacağından, $F= 333$ kg. uçucu kullanılması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Sonuçta;

$$W/(C + (kF)) = 150/(200+333 \times 0,3) \text{ denklemi elde edilir. [19]}$$

Bu yöntem İngiltere’de uygulanmış ve oranlama prosedürlerini basitleştirmek için bir takım tablolar hazırlanmıştır. Buna karşın Munday (1983) ise bu yöntemin uygulamadaki bazı görünen zayıflıklarına dikkat çekmiştir:

1) k değeri aynı yerden temin edilen uçucu küller için bile sabit değildir. Bu değer kullanılan çimentoya, kür koşullarına ve oranlaması yapılan betonun öngörülen dayanımına bağlı olarak değişir.

2) Arzu edilen işlenebilirliğe ulaşabilmek için, beton için gerekli su miktarı kullanılan uçucu küle göre değişecektir. Bir kül su ihtiyacını arttırmayabilirken bir diğeri artırabilir. Bu değişkenlik agrega miktarı uygun şekilde ayarlanarak dengelenebilir ancak bu pratik bir yaklaşım olarak görülmemektedir. Uygulamada su miktarı ile ayarlama yapıldığından hedef dayanımda sapmalar da yüksek olmaktadır.

3) Bu metod birçok amaç için komplekstir ve belki de pratik olarak uygulanabilir değildir denilebilir.

Bazı araştırmacılar tarafından Abrams’ın ilişkisine dayanarak Kuzey Amerika’daki(1968) bazı uygulamalarda uygulanmak üzere uçucu küllü betonlar için oranlama yöntemleri geliştirme teklifi yapılmıştır. Cannon, Tenesse Valley Authority tarafından yürütülmüş “28 ve 90. Günlerde kontrol karışımlarına eşit dayanımlar elde etmek için uçucu küllü beton karışımlarını oranlama yöntemleri” konulu araştırmayı yayın halinde yayınlamıştır. Cannon, su/çimento oranı ve dayanım arasında Abrams’ın ilişkisini kullanmış ve uçucu kül ile portland çimentosunun birbiri ile karşılaştırmasını gözönüne alan bir faktör ortaya koymuştur. Bu yaklaşımın kapsamlı laboratuvar araştırmaları ve saha deneyimleri ile birleştirilmesi Cannon’a oranlama prosedürlerini kolaylaştırıcı tablolar ve grafikler geliştirme olanağı tanımıştır.

Lovewell ve Washa’nın da daha önce savunduğu gibi, Cannon’un yaklaşımından portland çimentosu ve uçucu külü toplam ağırlığını karşılaştırılabilir bir kontrol karışımında kullanılan çimento ağırlığından daha fazla olması gerektiği bulundu.

1975 yılında Ghosh, Lovewell ile Washa ve Cannon'un çalışmalarından yola çıkıp daha ileri, kapsamlı yaklaşımlar geliştirerek uçucu kül içeren beton karışım oranlamayı önemli ölçüde kolaylaştıran bir seri ampirik ilişki yayınlandı. Ghosh, Abrams'ın "iyice sıkıştırılmış bir betonun dayanımı ile su/çimento oranı ters orantılıdır" ilişkisini kullanmış, bunu yaparken su/çimento oranını uçucu külü de içine alarak genişletmiş neticede uçucu küllü beton ile kontrol betonlarının dayanımlarını aşağıdaki şekilde gösterildiği üzere eşitlenmiştir.[17]

$$R' = M + NR$$

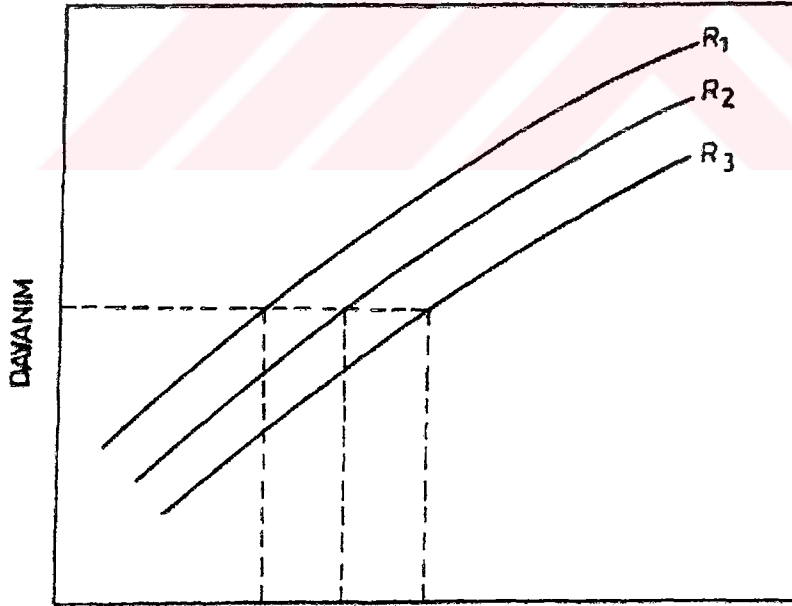
Burada :

R = Kontrol betonu su/çimento oranı,

R' = Uçucu küllü betonun su/(çimento+ uçucu kül) oranı,

M ve N sabitlerdir.

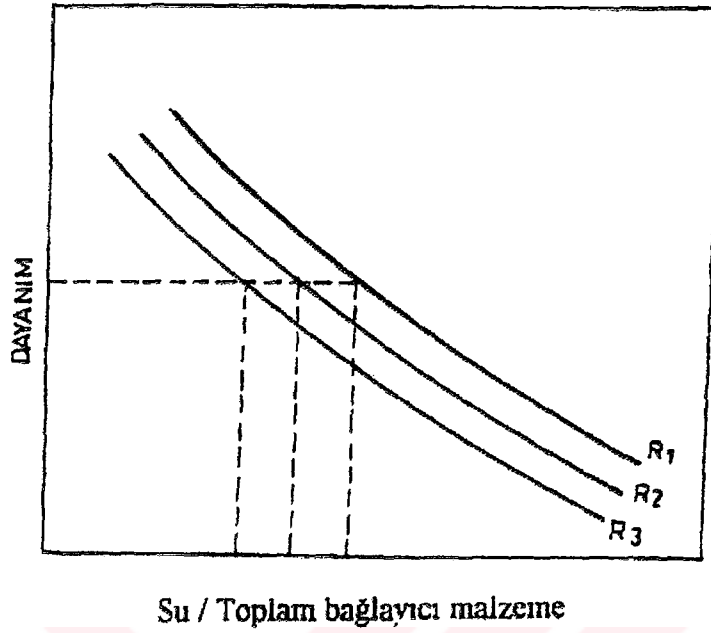
Sonuçta Ghosh, laboratuarda elde edilen kapsamlı deney sonuçları ile belirli yaşlarda farklı (uçucu kül/çimento) oranları için M ve N ampirik sabitlerini hesaplayarak tablo ve grafikler yoluyla karışım oranlarının seçilebileceği bir prosedür geliştirmiştir. (Şekil 2.5a ve 2.5b)



Toplam Bağlayıcı Malzeme

Şekil 2.5.a Farklı Bağlayıcı Malzeme Harmanları için Herhangi bir Yaştaki Dayanım İlişkileri

Su/Toplam bağlayıcı malzeme ile dayanım arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 2.5.b Farklı Bağlayıcı Malzeme Harmanları için Herhangi bir Yaştaki Dayanım İlişkileri

(R = İkincil bağlayıcı malzeme / Portland çimentosu oranı)

Amerikan Beton Enstitüsü (1981) “Normal, ağır ve kütle betonların karışım oranlarının seçimi için standart uygulama “ adı altında puzolanlı beton karışımların oranlanmasını da kapsayan kılavuzu revize edilmiş olarak yayınlanmıştır. Yayınlanan bu çalışmada ağırlıkça eşit miktarda malzeme kullanma ve mutlak hacimce eşit malzeme kullanma şeklinde iki ayrı yaklaşım ele alınmıştır. Bu yaklaşımlardan hangisi kullanılırsa kullanılsın sonuçta elde edilen karışım fiilen basit yerdeğiştirme ile oranlanmış olmaktadır.[17]

Kanada’da ilave bağlayıcı malzemeler ve beton uygulamalarında kullanımları ile ilgili bir ulusal standart yayınlanmıştır(1982). Standart uçucu külün betonda kullanımına ek olarak aynı zamanda uçucu küllü beton karışımlarını oranlamak için bir de kılavuz sunmuştur. Bu çalışmada benimsenen yaklaşım da Ghosh tarafından geliştirilmiş olan yöntem dayandırılmıştı.

İngiltere’de Munday ve arkadaşları(1983), 28. Günde yada daha erken yaşlarda hedeflenen herhangi bir mukavemeti elde etmek üzere uçucu küllü beton karışımları oranlamak için bir prosedür teklif ettiler. Bu yöntem ile karışım hesaplarını

belirlerken, kullanılacak uçucu kül kaynağı için geçerli aşağıda birbirini takip eden ve altı adımda sıralanan dataların toplanması gerekmektedir.[17]

- Su/çimento oranının belirlenmesi
- Serbest su miktarının seçilmesi
- Uçucu kül/çimento oranının belirlenmesi
- Çimento ve uçucu kül miktarının belirlenmesi
- Toplam agrega miktarının belirlenmesi
- Deneme karışımlarının yapılarak incelenmesi

Standart yöntemlerle hazırlanmış bir portland çimentosu betonu karışım oranları ve bu betona karşılık olarak yukarıda teklif edilen yöntem ile oranlanmış uçucu küllü betonların karışım oranları ile ilgili bir örnek Tablo2.6 verilmiştir.

Karışım oranlama için son zamanlarda ortaya çıkarılan yöntemleri, uçucu küllü betonları istenilen herhangi bir yaştaki dayanımlarının karşılaştırılabilir beton mukavemetinin daha da üstünde olacak şekilde oranlamanın mümkün olduğunu kanıtlamak üzerinde yoğunlaşmıştır(şekil 2.8). Bunlarla birlikte bu yaklaşımlar uygulamada kullanıldığında birkaç faktörün gözönüne alınması gerekir. Normal bir karışım oranlama prosedüründe olduğu gibi deneme karışımları yapılmalı ve beton bileşimleri düzenlenmelidir. Ayrıca, her uçucu kül farkı özeliğe sahip olduğundan deneme karışımının sağlıklı bir şekilde oluşturulması için kullanılan uçucu kül hakkında edinilen bilgilerden yararlanılması gerekir. Uçucu kül ile üretilmiş betonlar kür boyunca sıcaklık ve nem koşullarına sıradan bir betondan daha hassas olduğundan herhangi bir yapının beton karışımını oranlamak için deneme karışımlarından elde edilen dataalar kullanılırken bu faktörler gözönünde bulundurulmalıdır.

2.6 k Etkinlik Faktörünün Bağlı Olduğu Faktörler

Bolomey Dayanım Formülü :

$$F_c = K ((C/W) - 0.5)$$

Yukarıdaki formülde yer alan K katysayısının bağılı olduğı faktörler :

- Çimento dayanımı ,
- Agrega granülometrisi
- Agrega geometrisi,
- Sıkıştırma yöntemi,
- Ortam koşulları,
- Numune boyut ve geometrisi başlıcalarındandır.[25]

Bolomey formülünden etkinlik katsayısı k hesap edildiğinde, doğal olarak yukarıda sıralanan faktörlerde bağılı olmaktadır. Aynı zamanda diğerk bağılı olan etkenlerde şu şekilde sıralanabilir:

1. Uçucu külün cinsi ve kullanım miktarı
2. Çimentonun cinsi
3. Çimentonun dozajı
4. Öngörülen dayanım
5. Kür Koşulları
6. Agrega Boyutu
7. İşlenebilme (çökme miktarı)
8. Akışkanlaştırıcı katılırsa, akışkanlaştırıcının cinsi

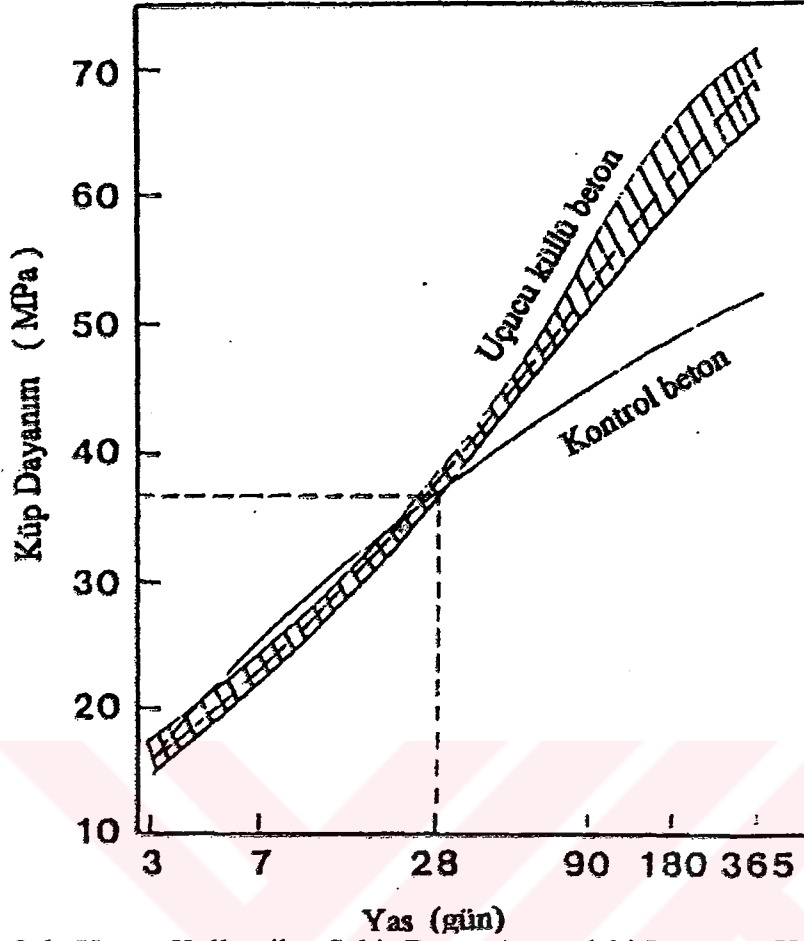
k etkinlik faktörü aynı sınıf uçucu küller için dahi sabit olmadığından her bir uçucu küle ait k değerini belirlemek için gerekli olan testler yapılmalı ve sonuçta uçucu külün puzolonik özelliğı belirlenmelidir. Çimentonun içerisinde bulunan kireç miktarıda k faktörünü etkilemekte ve dozajın $350 \text{ kg} / \text{m}^3$ 'ün üzerinde olması halinde bu etki önem kazanmaktadır. Sadece dayanım parametrelerine göre etkinlik faktörünün belirlenmesiyle uçucu külün kullanılabilirliğine karar verilmesi yeterli değildir. Dayanım ile birlikte kılcallık, su emme ve zararlı kimyasallara karşı dayanıklılık ve klor geçirimsizliği deneyleri de yapılmalıdır.[17]

Uçucu külün beton içerisinde kullanılmasının temelde iki önemli sebebi vardır. Segregasyon olayına imkan vermeden düşük dayanımlı beton dizaynına

Tablo 2.8 28. Günde Eşit Dayanım Elde Etmek Üzere Oranlanmış Şahit ve Uçucu Küllü Betonlar için Örnek Karışım Oranları

Uçucu Kül				Karışım Oranları(kg/m ³)			
	Kaynak	45 µm (%)	K.K. (%)	Çimento	Uçucu Kül	Su	Agrega
Kontrol Betonu	—	—	—	310	—	190	1890
Uçucu Küllü Beton	A	11,7	2,3	223	149	166	1838
	B	22,7	4,1	249	159	182	1740
	C	45,7	7,4	298	156	200	1666
	F	25,6	9,5	296	177	210	1612
	G	29,7	5,1	246	163	184	1752
	H	3,3	2,4	215	144	161	1875

Uçucu küllü ile şahit beton arasındaki dayanım-yaş kombinasyonu aşağıdaki Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Uçucu Küllü ile Şahit Beton Arasındaki Dayanım-Yaş Kombinasyonu [18]

olarak sağlaması ve maliyeti düşürmesidir. Uçucu külün düşük dayanımlı beton dizaynına olanak vermesiyle k etkinlik faktörü açısından karışımlarda bir minimum çimento dozajının gerektiği yapılan çalışmalarda görülmüştür. Uçucu külün tane boyutlarının $10\ \mu\text{m}$ - $45\ \mu\text{m}$ arasında kalması işlenebilmeyi olumlu yönde etkileyerek dayanıma olumlu katkısı olmakta ayrıca uçucu küllü betonların ıslak kür uygulanan ortamda bekletildiğinde dayanıklılığı yüksek bir beton elde edilmekte, dolayısıyla dayanımı etkileyen bu faktörler k etkinlik değerini de etkilemektedir.

Uygulamalar sonucunda %30'un üzerindeki uçucu kül eklenmesi dayanımı düşürmekte, maksimum etkinlik %10 ile %20 arasındaki yerdeğiştirme oranlarında ortaya çıkmakta ve bu aralıkta dayanım fazla etkilenmemektedir. k etkinlik faktörünün değeri %30 'dan daha az uçucu kül kullanıldığında 0.5 değerinin civarında, oran %30'u geçtiği zaman ise k değerinin 0.2'ye yaklaştığı görülmektedir.

2.7 Uçucu Külün Taze Beton Özellikleri Üzerine Etkisi

Taze beton, kireç ve bazı diğer bileşenlerden oluşan bir çözelti içinde büyük değişkenlik gösteren yoğunlukta, tanecik boyutunda, kimyasal bileşimde olan tanecik haldeki malzemelerin yoğunlaşmış süspansiyondur. Sistem içerisinde denge söz konusu değildir. Çimento su ile karışınca beton kütlelerini neticede birleştiren bağlayıcı oluşturacak reaksiyonlar başlar; yeni tanecikler oluşur ve ilk tanecikler çözünür veya bağlayıcı ürünler ile kaplanır. Dağılma, topaklaşma ve yerçekimi kuvvetleri değişen kütledeki malzemelerin ortam içi dağılımını belirlemek için çekişirler. Kimyasal reaksiyon esnasında, sıcaklık yükselir ve ısı açığa çıkar. Reaksiyonlar sırasında düşük kalsiyumlu küller, büyük oranda küresel formu ince agrega olarak rol oynarken yüksek karbonlu uçucu küller erken bağlayıcı reaksiyonlara katkıda bulunabilirler. [17]

Beton, genel olarak kesit içerisindeki sık donatıların bulunduğu kalıplar içerisine yerleştirilmektedir. Bu yüzden betonda belirli bir akıcılık ve işlenebilirlik gerekir. Bu nitelikler, tüm bileşenlerin etkilediği sistemin reolojik özellikleri tarafından belirlenir. İşlenebilirliğin kontrol edilmesi karışım hesabının amaçlarından bir tanesidir. Bundan dolayı uçucu külün optimum kullanımı gerçekleştirilecekse, taze beton reolojisindeki rolünün anlaşılması esastır.

2.7.1 İşlenebilirlik , Su İhtiyacı ve Terleme Üzerine Etkisi

Çimento ve uçucu kül içeren betonun mutlak hacmi, benzer uçucu külsüz betonunkini geçer. Bunun nedeni, çimento yerine ikame edilen uçucu kül kütlelerinin genellikle eşit veya fazla olmasından ve de uçucu külün düşük özgül ağırlığa sahip olmasından ileri gelir. Kullanılan oranlara bağlı olmakla birlikte, hamur yapısındaki hacim artışı, geliştirilmiş plastisiteli ve daha iyi kohezyonlu beton meydana getirir. Ayrıca, CaO üzerine SiO₂ konsantrisindeki artış ve yüksek alkaline taze beton içindeki çimento ve uçucu kül tanecikleri dağılımının stabilitesini artırır.

Uçucu kül çimento akış davranışını değiştirir, üstelik genellikle küresel olan uçucu kül tanecikleri belirli çökme değeri için yoğunlukla karışım suyunun azalmasına imkan verir. Uçucu kül, su azalmasına ilave olarak katı-sıvı oranını artırır. C sınıfı küller genellikle, beton işlenebilirliğini önemli ölçüde etkileyecek 10 µm'den ufak taneciklere yüksek oranda sahiptir.

Beton işlenebilirliği üzerinde Owens'a göre uçucu külün etkinliğini etkileyen en önemli faktör uçucu küldeki kaba malzeme ($>45\mu$) oranıdır. Yapılan çalışmada, örnek olarak, çimentonun ağırlıkça %50 oranında uçucu kül ile yer değiştirmesiyle su ihtiyacında değişme olmamaktadır.

Hindistan uçucu külü ile yapılan birçok deneylerde, betonun su ihtiyacının bütün deneylerde arttığı ortaya çıkmıştır. Çoğunlukla, zayıf su isteği karakteristikleri, fazla karbonlu ve kalın taneciklerin yaygın olarak bulunduğu eski santrallerde ortaya çıkmaktadır. İnce uçucu külün işlenebilirliğin gelişiminde daha kalın uçucu külden daha etkin olduğu bulunmuştur.[17]

Yüksek oranda uçucu kül içeren betonlar, sıcaklık yükselişinde ve dayanım gelişiminde olumsuz bir etki olmaksızın, 5m. yüksekliğindeki kalıba yerleştirilebilmektedir. Pompa ile yerleştirme esnasında, beton karışımının yeteri kadar hamur içeriğine sahip olması gerekir.

1961 yılında Price, South Saskatchewan River baraj inşaatında kullanılacak beton malzemelerin araştırılmasında uçucu külü de test etmiş, sabit beton içerikli olarak oranlanmış betonların yapımında uçucu kül kullanıldığında su ihtiyacının artmadığını gözlemlemiştir. Sonuçta, elde edilen betonların işlenebilirliği ve kohezyonu iyileşmiş, aynı zamanda suyun toplam bağlayıcıya oranı orani daha azalmıştır.

1962 yılında Pasko ve Larson beton karışımlarda 63 mm çökmeyi sağlayacak şekilde uçucu külün çimento ile kısmi yer değiştirmesi sonucu değişen su ihtiyacını incelediler. %20 çimento yerine % 30 oranında uçucu kül konan bir karışımın su ihtiyacında % 7.2 lik bir azalma görülmüştür.

1981 yılında Johnson, Cape Town'da yapılan çoğu betonda bölgesel olarak mevcut kum kaynaklarında yeterince ince malzeme olmamasına bağlı olarak aşırı terleme problemlerinin yaşandığını saptamış, bu betonlarda uçucu kül kullanarak toplam hamur hacminin artırılması ile terleme probleminin üstesinden gelinebileceğini belirtmiştir.[21]

1982 yılında Brown çimento ile eşit hacimde yer değiştirmeyi esas alarak uçucu kül ikame edilmiş dört farklı su/çimento oranlarındaki betonunun işlenebilirliğini incelemiştir. Her karışım için çökme ve sıkıştırma faktörü değerleri ölçülmüştür.

Yerdeğiştirme oranlarının artırılmasına paralel olarak çökme ve işlenebilirliklerin her ikisinin de arttığı gözlenmiştir. Sonuçta söz konusu değişimlerin uçucu kül yer değiştirme miktarına ve karışımın su içeriğine bağlı olduğu bulunmuştur.

Üzerinde çalıştığı deney serilerinde Brown, betonda diğer parametreleri sabit tutarak agrega veya kum yerine eşit hacimde uçucu kül ikame edilmesinin etkisini araştırmıştır. Test betonları ya kum hacminin ya da toplam agrega hacminin % 10,20,40 oranlarında uçucu kül ile yerdeğiştirilmesi ile üretilmiştir. Uçucu kül, kum hacmi ile olsun, toplam agrega hacmi ile olsun en fazla %8 yerdeğiştirme oranında işlenebilirlikte bir artış göstermiştir. Bunun ötesindeki ikame oranları işlenebilirlikte hızlı azalmalara sebep olmuştur. Toplam agrega hacminin %40'ı ile yerdeğiştirme işlenemez bir karışım ortaya çıkarmıştır.

1956 yılında Brink ve Halstead, yaptıkları çalışmada test harçlarında kullandıkları bazı uçucu küllerin su ihtiyacını azalttığını, daha yüksek karbon içeren numunelerde ise su ihtiyacında kontrol harçlarının üzerinde bir artış gösterdiklerini gözlemlemişlerdir.

1958 yılında Welsh ve Burton, bazı Avusturalya uçucu küllerinin basit yerdeğiştirme yöntemi ile su miktarı sabit tutularak üretilen betonlarda kullanılması ile karışımında çöme ve akış kaybının gözleendiğini belirtmişlerdir.

1982 yılında Copeland, normal haliyle terlemeye eğilimli olan kaba karışımlı betonlarda uçucu kül kullanımının terlemeyi azalttığını ileri sürmüştür.

1984 yılında CANMET'in yapmış olduğu 11 uçucu kül incelenmiş, ikisi hariç tamamının betonun terlemesini arttırdığı gözlenmiştir.

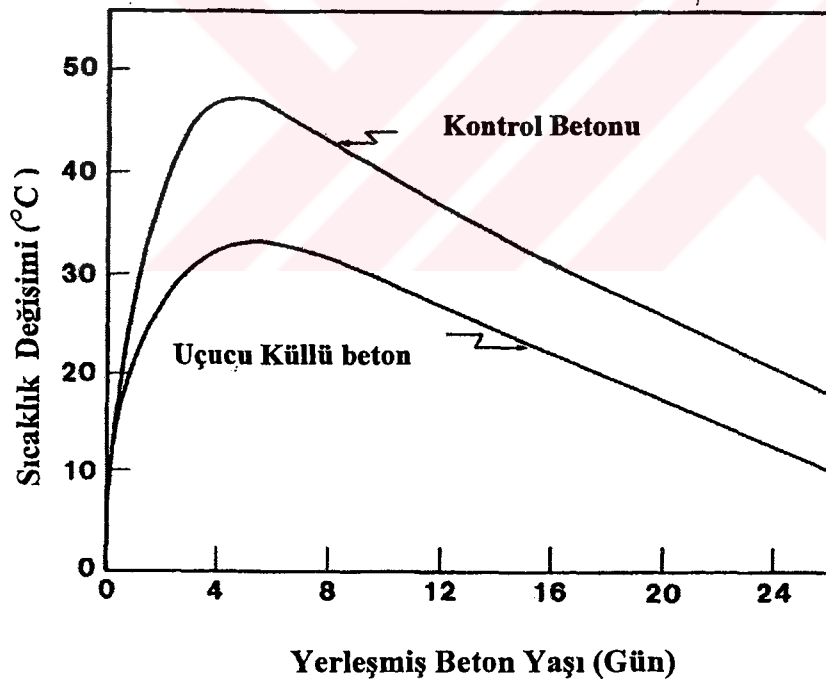
Okada ve arkadaşları kendi kendine yerleşebilen su altı betonlarında yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmasını araştırmışlar ve üretilen betonlarda uçucu kül ve cüruf oranının yükseltilmesiyle akıcılığın arttığı gözlenmiştir. Carles-Gibergues ve Husson desülfirizasyon işlemi sonucu uçucu külün özgül yüzeyinin arttığını ve sabit işlenebilme için daha fazla su gerektiğini gözlemişlerdir.[2]

Kim ve arkadaşları yüksek mukavemetli beton üretiminde %30'a varan yerdeğiştirme oranlarında uçucu külün işlenebilmeyi azalttığını gözlemişler ve kullandıkları uçucu kül tanelerinin pürüzlü yüzeyi ve boşluklu yapısının buna neden olduğunu ileri sürmüşlerdir.

2.7.2 Hidratasyon Isısı ve Sıcaklık Üzerine Etkisi

Çimento ile suyun karışması ile başlayan ısı gelişimi doğal olarak beton kütleinin sıcaklığını da artırır. Katılaşmanın ve sertleşmenin kimyasal nedeni olan hidratasyon, çimentolarda ekzotermik bir reaksiyon şeklinde gelişir. Karışıma giren çimento miktarının uçucu kül ikamesi ile azaltılması taze betonda yükselen sıcaklığı düşürmektedir. Bu olumlu etki özellikle büyük kütle betonları için çok önemlidir. Zaten uçucu kül ilk kez bir ağırlık barajı inşaatında betonun sıcaklık artışıını kontrol etmek amacıyla kullanılmıştır.[4]

1952 yılında Compton ve MacInnis, %30 yerdeğiştirme oranında bir doğu kanada uçucu külü kullanılarak yapılmış beton ile kontrol betonunun sıcaklık yükselmelerini karşılaştırılarak elde ettikleri verileri şekil 2.7’te görüldüğü üzere sıcaklık-zaman eğrileriyle açıklamışlardır.



Şekil 2.7 Uçucu Küllü ve Normal Betonlar için Sıcaklık Artış Eğrileri[17]

1980 yılında Bamforth, çimentoya ilave olarak uçucu kül ya da yüksek fırın cürufu içeren kütle betonları hakkında kapsamlı bir rapor hazırlanmıştır. Bu araştırmaya üç büyük temel elemanındaki sıcaklık artışının ve bunun sonucundaki deformasyonların incelenmesi de dahil edilmiştir. Üç çeşit beton yapılması öngörülmüştür :

1. 400 kg/m³ Portland çimentosu içeren bir kontrol karışımı
2. Portland çimentosunun % 75'i yerine yüksek fırın cürufunun kullanıldığı bir karışım
3. Portland çimentosunun %30 'u yerine bir taşkömürü uçucu külünün kullanıldığı bir karışım

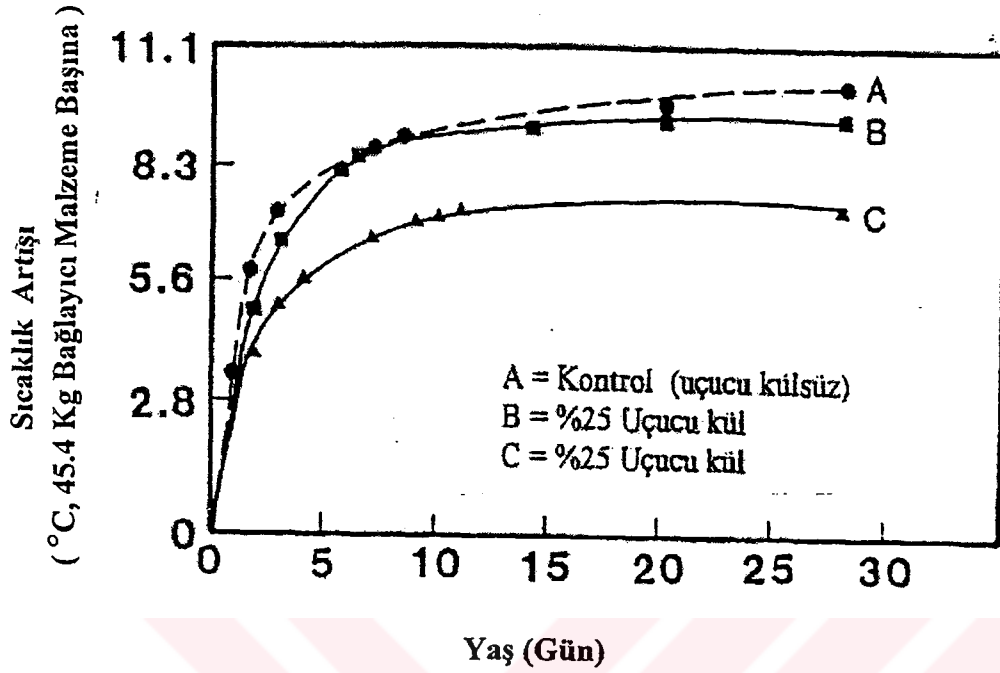
Elde edilen beton karışımları 4.5 m derinlikteki, hacimleri 144 ila 212 m³ arasında değişen üç adet temel elemanına yerleştirildi. Temel elemanları yerleştirilen betonlarda ısı açığa çıkan devrenin erken safhaları boyunca sıcaklık değişimlerini ve hareketini ölçmek için uygun şekilde donatıldı.

Çimento fazla miktarda uçucu kül ya da cüruf ile yer değiştirildiğinde sıcaklık artış oranı da buna bağlı olarak azalmış, beton kütlede oluşan maksimum sıcaklık düşmüştür. Çimento yerine konulan tüm düşük kireçli küllerin sıcaklık artışı oranını azaltacağını öne sürmek makul bir yaklaşımken yüksek kireçli uçucu küller su ile çok hızlı şekilde reaksiyona girdiklerinden ortaya çıkan ısı fazla olmaktadır.

1981 yılında Crow ve Dunstan beton karışımlarda adiabatik sıcaklık artışları arasında bir çalışma yaptılar. %25 yer değiştirme oranında düşük kireçli uçucu kül içeren betonun ısı açığa çıkarma oranı azalmıştır. %25 yer değiştirme oranında yüksek kireçli uçucu kül içeren beton ise Portland çimentolu kontrol betonu kadar ısı meydana getirmiştir. Bu olay şekil 2.8'de gösterilmiştir.[1]

2.7.3 Priz Süresi Üzerine Etkisi

Üretilmiş olan bir uçucu küllü betonda priz süresini etkileyen bir çok etmen vardır. Bunlardan başlıcaları arasında çimentonun tipi, içeriği ve inceliği, kullanılan katkının etkisi, uçucu külün miktarı, uçucu külün inceliği ve kimyasal bileşimi sayılabilir. Betonda uçucu kül kullanılması genel olarak bakıldığında priz süresini



Şekil 2.8 Yüksek Kireçli Uçucu Kül Kullanarak Yapılmış Betonda Adiabatik Sıcaklık Artışı[27]

geciktirmektedir.

Betonun üretiminin ardından geçen ilk bir iki saatlik süreçte priz aldığı aşamaların ilki priz başlangıç zamanı, sonuncusu ise priz bitiş zamanı olarak tanımlanır ve bu süreler penetrometre testleri ile tayin edilir. Uçucu külün çimentonun sertleşme hızını birkaç sebepten dolayı etkilemesi beklenmektedir. Bu sebepleri şu şekilde sıralayabiliriz:

- Uçucu külün kendisi bağlayıcı olabilmesi(yüksek kireçli)
- Uçucu kül – çimento harcının, uçucu külün varlığı nedeniyle daha az su içererek sertleşme hızını etkileyebilmesi,
- Uçucu kül taze beton reolojisini değiştirmek için ilave edilen aktif maddeleri (su azaltıcılar) emebilir, neticede yine harç fazının sertleşmesini etkilemiş olur.
- Uçucu kül tanecikleri çimento hidrasyon ürünlerinin kristalizasyonu için çekirdek rol oynayabilir.

1982 yılında Lane ve Best de uçucu külün genel olarak betonun prizini yavaşlattığı sonucuna varmışlardır. Gözlenen bu gecikme üzerinde karışım oranlama yönteminin, uçucu külün inceliği ve kimyasal kompozisyonunun etkili olabileceğini fakat çimento inceliği, hamurun su içeriği ve ortam sıcaklığının gecikmeyi çok daha fazla etkilendiğini iddia etmişlerdir.

1937 yılında Davis ve arkadaşları çimentolu karışımların yerini tutan uçucu kül-çimento karışımlarının daha yavaş priz aldığı fakat priz zamanlarının olağan, belirlenmiş olan limitlerin dışında kalmadığı sonucuna vardılar.

1983 yılında Mailvaganam ve arkadaşları farklı iki sıcaklıkta düşük kalsiyumlu bir uçucu kül ile yapılmış karışımların taze ve sertleşmiş beton özelliklerini incelemişlerdir. 5°C'de karıştırılmış betonlarda uçucu kül içeriğinden bağımsız olarak priz zamanından on saati geçen gecikmeler gözlenmiş, 20°C de karıştırılmış ve %30 uçucu kül içeren (çimentonun ağırlığınca) betonlarda ise gecikme süresinin 1 ila 1.75 saate kadar azaldığı saptanmıştır. Kashima ve arkadaşları su altı betonu üretiminde yüksek oranda uçucu kül kullanımının prizi aşırı geciktirmediğini belirtmişlerdir.

Rodway ve arkadaşları yüksek oranda C tipi uçucu kül ile 0.33 su/çimento oranında 22.5 çökme veren betonda priz sürelerinin normal olduğunu gözlemlemişlerdir.

2.7.4 Hava Sürüklenmesi Üzerine Etkisi

Kullanılan mineral katkı maddelerinin betonda hava sürüklenmesini olumsuz olarak etkilemektedir. Yüksek özgül yüzeye sahip uçucu küller ve içerdikleri karbon miktarı, hava miktarını önemli ölçüde etkilemektedir.

Üretilen beton belirli bir olgunluk seviyesine dek gerektiği şekilde saklanmış, dona dayanıklı iri agregaya ile yapılmış ise ve buna ilaveten betona uygun şekilde hava sürüklenmişse bu betonun dona karşı direnç göstermesi gerekir. Sertleşmiş betonun dona dayanıklılığı açısından gerekli olan ölçüde hava boşluğu elde etmek için karıştırma anında betona belirli bir dozajda hava sürükleyici katkı ilave edilir. Beton içerisinde hava sürükleyici katkı istenilen hacimde ve boyutta hava kabarcıkları meydana getirmeli, buna ek olarak betonun karıştırılması, taşınması ve

yerleştirilmesi esnasında hava içeriğinin sabit kalması, kararlı dağılmasını sağlayacak nitelikte olması gerekmektedir.

Nasser ve Lai C-tipi uçucu kül ile ürettikleri betonların durabilitesini incelerken taze betona % 4-6 arası hava sürüklendiğini açıklamışlardır.1953 yılında Larson, hava sürüklenmiş betonlarda uçucu kül kullanımı üzerine sunduğu çalışmadan ve diğer araştırmacıların çalışmalarından uçucu külün asıl etkisinin hava sürüklenme üzerine değil, hava sürükleyici katkı ihtiyacı üzerine olduğu sonucuna varmıştır.1983 yılında Gebler ve Klieger on tane farklı uçucu külü inceledikten sonra taze beton üzerinde hava sürüklenme ile ilgili ağağıdaki sonuçlara ulaştılar[17]:

- Genelde C sınıfı uçucu kül içeren betonlar F sınıfı uçucu kül içeren betonlardan daha az hava sürükleyici katkıya ihtiyaç duymaktadır.
- F sınıfı uçucu kül içeren plastik kıvamlı betonlardaki hava içeriği karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra % 59 oranında azalmıştır.
- C sınıfı uçucu kül içeren plastik kıvamlı betonlarda F sınıfı uçucu kül içeren betonlara nazaran hava kaybetmeye daha az eğilimdedir.
- Uçucu külde organik madde miktarı, karbon içeriği ve kızdırma kaybı artarken hava sürükleyici katkı ihtiyacı da artmaktadır.
- Genelde, uçucu külde toplam alkali miktarı artarken hava sürükleyici katkıya olan ihtiyaç azalmaktadır.
- C sınıfı(yüksek oranda kireç içeren) ve çok az miktarda organik maddeye sahip uçucu kül ile yapılan betonlar hava kaybından dolayı olumsuz olarak daha az miktarda etkilenirler. Bir uçucu külün özgül ağırlığı artarken, betonda hapsolan hava da artmaktadır.
- Genelde uçucu külün SO_3 içeriği artarken beton içerisindeki hapsolmuş hava miktarı da artar.

Uçucu külün yanında diğer mineral katkılar da benzer şekilde davranırlar ve hatta bazı çimentoların aşırı miktarda hava sürükleyici katkı katılmasına ihtiyaç duydukları da bilinmektedir.

Günümüzde hala hava sürükleyici maddelerle uçucu kül arasında netlik kazanmamış ilişkileri açıklayacak kadar tatmin edici herhangi bir teori geliştirilmemiştir. Betona hava sürüklenme mekanizması ve uçucu kül gibi ikincil bağlayıcı malzemelerin hava

sürükleyici katkıların davranışına etkileri hakkında yapılacak kapsamlı çalışmalara ihtiyaç olduğu bir gerçektir.

2.8 Uçucu Külün Sertleşmiş Beton Özellikleri Üzerine Etkileri

2.8.1 Mukavemet Gelişimi

Mukavemet gelişimi ile ilgili yapılmış çalışmaların çoğunda kullanılan uçucu küller eski güç santrallerinden elde edilmiş iri taneli, yanmamış kömür kalıntıları içeren dolayısıyla yeterince aktif olmayan uçucu küllerdi. Bu uçucu küllerin basit yerdeğiştirme yöntemi ile oranlanmış betonlarda kullanılması istisnasız olarak mukavemet gelişimini olumsuz yönde etkilemiştir. Bu tip gözlemler, uçucu kül her yaşta dayanımı azaltır gibi genel bir kanının hakim olmasına yol açmıştır. Buna karşın mukavemet kazanma performansını elde etmek için çalışmalara devam eden bir çok araştırmacı uçucu küllü betonun dayanımını etkileyen faktörleri ve bu faktörlerin hangi yönde etkili olduklarını anlamak üzere sarfettikleri çabalar sonucunda önemli bazı sonuçlara ulaştılar.

Uçucu kül içeren betonlarda, basınç ve eğilme mukavemetlerinin kazanımı bir çok faktöre bağlıdır. Bunlardan bazıları uçucu külün, betona yerleştirilme şekli (çimentoya ilave edilmesi veya çimentodan bir miktar azaltarak çeşitli miktarlarda kür eklenmesi), puzolanik aktivitesi, kimyasal ve fiziksel özellikleri, tanecik boyutu, ortam sıcaklığı ve diğer kür koşullarını sayabiliriz.[2]

Yapılmış olan bir çalışmada, yüksek miktarda uçucu kül içeren betonların basınç mukavemetlerinde 28 günden sonra önemli gelişmeler gözlemlendiğinde ve bu olayın da uçucu külün betonun uzun süreli mukavemetine olan olumlu katkı sağladığı belirtilmektedir.

Nasser ve Lai C – tipi uçucu külü %20,%35, %50 oranlarında çimento ile yerdeğiştirilerek betonlar üretilmiştir. Yedinci günde her üç beton içinde kontrol betonundan daha düşük mukavemetler elde etmişlerdir. 28. Günde %20, %35 kullanım oranlarında kontrol betonunun mukavemetine erişilirken, 80. Günde ise yalnızca %20 kül içeren karışımın kontrol betonunun mukavemetini geçtiğini gözlemişlerdir.

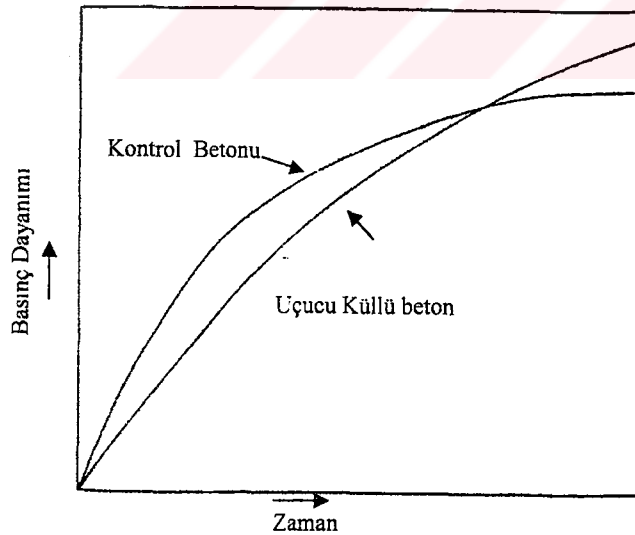
Kim ve arkadaşları F-tipi uçucu kül kullanarak yüksek mukavemetli beton üretiminde külün ilk mukavemetlerini düşürdüğünü ancak uzun süreli mukavemetleri arttırdığını gözlemişlerdir.

Bilodeau ve Malhotra bağlayıcı miktarı 300 ila 430 kg/m³ arasında, su-çimento oranı 0.27 ila 0.39 arasında değişen karışımlarda %58 oranında F - tipi uçucu kül içeren betonların basınç mukavemetlerinin kontrol betonuna oranla tüm yaşlarda daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

1983 yılında Pitt ve Demirel, eşdeğer ağırlık esasına dayalı olarak bazı C sınıfı uçucu küllerin Portland çimentosu kadar etkin olduklarını ileri sürmüşlerdir.

1992 yılında Hornain ve arkadaşları, uçucu külün içerisindeki yanmamış karbon miktarının mukavemet üzerinde olumsuz etkilerinin olmadığını saptamışlardır.[17]

Uçucu külün tipi ve kimyasal kompozisyonunun yapılan bir çok çalışmada da görüldüğü gibi mukavemet gelişimi üzerinde önemli etkisi vardır. Genel olarak C sınıfı uçucu küller F sınıfı uçucu küllere göre erken yaşlarda daha yüksek reaksiyon hızı gösterirler. Ayrıca uçucu külün reaksiyonunu devam ettirmesi için betondaki kalsiyum hidroksit varlığının önemi de oldukça büyüktür. Şekil 2.9 da uçucu küllü ve külsüz betonda basınç dayanımının zamanla değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.9 Uçucu Küllü ve Külsüz Betonda Basınç Dayanımının Zamanla Değişimi[17]

Mukavemet gelişimini uçucu külün tane boyutu açısından incelediğimizde incelik ve bağlayıcılık aktivitesi olmak üzere iki açıdan etkilemektedir. İncelik açısından

irdelediğimizde 45 μm 'den daha büyük taneler su ihtiyacını arttırdıklarından mukavemetin gelişimini de olumsuz yönde etkilemektedir. Bağlayıcılık aktivitesi açısından bakıldığı zaman konsantre hamurdaki katı fazın yüzeyinde meydana geldiği için mukavemet gelişimini etkilemektedir. Bundan dolayı, yüzey alanı bu tür aktivitelerin işleyişinde önemli ölçüde rol oynamaktadır.

1981 yılında Crow ve Dunstan, çok farklı özellikler içeren uçucu küller ile 36 adet beton karışımı ile yaptıkları çalışmada, külün inceliğinin pozolanik aktivitesi ile karşılaştırıldığı zaman, daha ince küllerin çimentoyla daha aktif olarak reaksiyona girdiğini saptamışlardır.

Uçucu külün inceliği çeşitli metodlarla artırılarak, beton mukavemet gelişimini etkileyebilmektedir. 1992 yılında Tazawa ve arkadaşları, inceliği 200000-1300000 cm^2/gr olan uçucu küller ile yapılan harçlarda mukavemetin ileri yaşlarda çok fazla arttığını gözlemlemişlerdir.[2]

Papayianni ve Goma yüksek oranda kireç ve sülfat içeren uçucu küllerin betonda kullanımını araştırmışlardır. Papayianni %80 uçucu kül içeren silindirlenmiş betonlarda 91 günde 24-34 MPa basınç mukavemetleri elde edilebildiğini ileri sürmektedir. Goma ise %60 uçucu kül içeren düşük işlenebilmeli betonların mukavemetlerinin erken yaşlarda daha düşük, 2 yıl sonra ise kontrol betonundan %18 daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir.

Ramyar, Türkiye'de üretilen 4 değişik uçucu kül ile yaptığı harç ve betonlarda erken mukavemetlerdeki olumsuz etkinin yüksek uçucu kül oranlarında daha belirgin olduğunu ileri sürmektedir.

Galeota ve arkadaşları F-tipi İtalyan uçucu külünü %18 ve %25 oranlarında kullanarak 30, 60 ve 90 günlerde kontrol betonundan daha yüksek mertebede mukavemetler elde edebilmişlerdir. Brooks ve Sikharulidze değişik sıcaklıklarda kür edilen uçucu küllü ve kontrol betonlarının altı ay boyunca basınç ve eğilme mukavemetleri ile kırılma enerjilerini ölçmüşler ve kür sıcaklığının mukavemet ve kırılmaya etkilerinin karmaşık olduğunu görmüşlerdir. Düşük kül oranlarında 20-60 $^{\circ}\text{C}$ arası kür sıcaklığının mukavemetleri pek etkilemediği, yüksek kül oranlarında ise basınç mukavemetlerinin tüm sıcaklıklarda düşük olduğu ancak eğilme mukavemetlerinin etkilenmediği gözlenmiştir.

Joaquin ve arkadaşları F-tipi uçucu külle yaptıkları betonlarda ilk mukavemetlerinin kür şartlarından çok etkilendiğini gözlemişlerdir.[2]

Wandewalle ve arkadaşları uçucu küllü harçların mukavemet kazanma hızlarının kür şartlarından çok fazla derecede etkilendiğini ve bu şartlara bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

2.8.2 Elastisite Modülü

Uçucu kül içeren betonların elastisite modülleri, betonların basınç dayanımlarına benzer nitelikte özellikler gösterir. Erken yaşlarda biraz düşük, ilerleyen yaşlarda ise daha büyüktür. Genelde uçucu kül, uçucu küllü ve külsüz aynı dayanımdaki betonlar kıyaslandığı zaman elastisite modülünü artırır. Betonun basınç dayanımını kontrol eden özellikler az miktarda elastisite modülünü de arttırmaktadır.[17]

Betonun elastisite modülü, büyük miktarda agrega miktarı ve rijitliği ile beton dayanımından (su/çimento oranı ve kür koşulları) etkilenir. Genel olarak dayanım azaldığı zaman elastisite modülü de azalır. Mineral katkı ilavesinden doğrudan etkilenmez.

Bilodeau ve Malhotra %58 oranında F- tipi uçucu kül içeren betonlarda yüksek elastisite modülleri elde edildiğini ve bunun da hidrate olmayan uçucu kül tanelerinin agrega niteliğinde etki yapmasından kaynaklanabileceğini ileri sürmüşlerdir. [21] Joaquin ve arkadaşları yüksek oranda F-tipi uçucu kül içeren betonlarda yüksek elastisite modülünün ilk yaşlarda düşük ancak ilerleyen yaşlarda daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

Uçucu külün betonun elastisite modülü üzerine olan etkisi, yapılan çalışmalar sonucunda, basınç dayanımı üzerine olan etkisi kadar belirgin değildir. Üstelik elastisite modülünü etkileyen, uçucu kül kullanımının etkisinde çok agrega ile çimento karakteristikleridir.

Galeota ve arkadaşları %18 ve %25 oranlarında F-tipi uçucu kül içeren betonların elastisite modüllerinin aynı mukavemetteki kontrol betonu ile birbiriyle aynı olduğunu ileri sürmektedir. Bu çalışmayla yapılan çalışmalara karşı bir tez ortaya koymuşlardır.

2.8.3. Sünme ve Rötire

Yapılan çalışmalara dayanarak, erken yaşlarda uçucu kül içeren betonlar kontrol betonlar ile kıyaslandığı zaman daha büyük, ilerleyen yaşlarda ise daha küçük sünme şekil değiştirmeleri yaptığı ortaya çıkmıştır. Bunun yanında, uçucu külün betonun sünmesi üzerinde yaptığı etkinin öncelikle basınç dayanımını etkileme miktarı ile sınırlı olduğu ile ortak bir fikir vardır. [20]

Sünme ve rötire davranışları mineral katkı ilavesinden direkt olarak etkilenmez. Bu beton davranışları büyük miktarda agrega miktarı ve rijitliği ile betonun dayanımından etkilenir. Genelde dayanım azaldığı zaman, sünme ve rötire artar. Sünme ve rötire betonun erken yaşlarında yüksek, ilerleyen yaşlarda ise öncekine göre daha düşüktür.

1982 yılında Gifford ve Ward dolgu kütle betonları üzerinde araştırma yapmışlar ve uçucu külün betonun elastisite modülünü arttırmasının yanında, toplam agrega miktarına katkıda bulunarak mevcut hamur hacmini azaltmakta olduğu sonucuna varmışlardır. [17]

1992 yılında Bilodeau ve Malhotra yüksek oranda uçucu kül kullanılan betonda sünme değerlerinin oldukça düşük olduğunu belirtmişlerdir. Bunun nedeni, düşük dayanıma ek olarak mineral katkının düşük yoğunluğu nedeniyle çimento hamurunun hacminin artmasından dolayı olabileceğini açıklamışlardır.[1]Kuruma rötresinin ise düşük olan sünme değerlerine göre biraz daha fazla olduğunu belirtmişlerdir..[2] Yüksek miktarda kireç içeren uçucu küller ile yapılan bir çalışmada, kontrol betonu ile %20 uçucu kül içeren betonların sünme şekil değiştirmeleri arasında çok az fark bulunmuştur. Yüksek oranda ağırlıkça uçucu kül eklenmesi ise (% 30-50) önemli derecede sünme şekil değiştirmelerine sebep olmaktadır. Çünkü, düşük dayanıma ek olarak mineral katkının düşük yoğunluğu nedeniyle çimento hamurunun hacminin artmasıdır.[20]

1937 yılında Davis yapmış olduğu çalışmada ince öğütülmüş, erken dayanımı yüksek çimento içeren çok ince beton elemanların rötresinin uçucu kül kullanılarak azaltılabileceği sonucuna ulaşmıştır.1992 yılında Aimin yaptığı çalışmalarda mukavemetleri 30-60 MPa arası olan harçlarda uçucu külün rötreyi azalttığını ileri sürmüştür.

İçerisinde mineral katkı bulunan betonların rötre davranışı genelde sünme davranışına benzerlik göstermektedir.Yapılmış çalışmalarda, %25 oranına kadar yerdeğiştirilerek uçucu kül kullanılmış ve iyi şekilde kür görmüş betonlarda önemli bir fark görülmemiştir. Bir başka çalışmada ise, pek çok uçucu küllü beton ile kontrol betonu arasında rötre yönünden çok az miktarda fark görülmüştür.[2]

2.9. Uçucu Külün Bulunduğu Ortam Koşullarına Dayanıklılık Özellikleri

2.9.1. Kılcal Geçirimsizlik

Beton içerisindeki geçirimsizlik bağlayıcı madde malzeme miktarı, su içeriği, agerganın dane dağılımı, kür koşulları gibi değişkenlere bağlıdır.Puzolanik özellikleri nedeniyle, uçucu küller oluşturdıkları C-S-H jelleriyle kalsiyum hidroksitin dışarı çıkma riskini azaltır ve böylece geçirimsizliği azaltmış olur.[17]

Uçucu kül sadece su geçirimsizliğini sağlamakla kalmaz, ayrıca betonun gaz geçirimsizliği (O_2 , CO_2) (Cl^-) özeliğini de iyileştirir.Mineral katkı maddelerinin betonda dayanıklılığı arttıran fonksiyonlarının en başında betonun boşluk yapısını iyileştirmesi bunun sonucunda da geçirimsizliği azaltmaları gelmektedir.Dunstan ve arkadaşları yüksek oranda uçucu kül kullanarak orta ve düşük geçirimsizlik katsayısına sahip betonlar üretilebildiğini belirtmişlerdir.[2]

1992 yılında Marusin %25 oranında uçucu kül içeren betonlarda rutubetli kür süresi arttıkça klor geçirimsizliğinin azaldığını gözlemişlerdir.Yapılmış olan bir çalışmada betonun belli bir yaşta geçirimsizliği hidrate olmuş bağlayıcı malzeme miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Biraz puzolanik aktivitenin olabileceği 28 günlük kür sonrası, uçucu küllü betonlar kontrol betonundan daha geçirgen olmaktadır.6 ay sonrasında, bu tersine çevrilmekte önemli miktarda su geçirimsizliği ortaya çıkmaktadır.

Beton kütlelerinin içine zararlı çözeltilerin hareket etmesi veya çözünmüş reaksiyon ürünlerinin betonun dışına çıkması kimyasal etkilerin sebep olduğu betondaki zararın gelişim hızının belirlenmesinde önemli rol oynar. Beton kütlelerinin geçirimsizliği, bu sebeple zararlı kimyasal olayla ilgili kütle taşınımının belirlenmesinde temel oluşturur. Tüm bağlayıcı hidratlar ve beton yapımında kullanılan agregalar sadece sülfatlardan, asitlerden, organik maddelerden kimyasal

etkiye maruz kalmazlar, tek başına sudan da zarar görebilirler. Betonun sulu ortamlarda işlevini görebilmesi aşağıda belirtilen maddelere bağlanabilir:

- Hidrate bileşenlerin düşük denge çözünübilirliği,
- İyi sıkıştırılmış ve kür edilmiş betonun düşük kütle taşınım hızı

Genellikle, beton ne kadar az geçirgen olursa aynı betonun su veya başka zararlı çözeltilere karşı dayanımının fazla olduğunu söylemek mümkündür.

Torii ve Kawamura, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanının betonun boşluk yapısı ve klor geçirimsizliğine etkilerini inceledikleri çalışmalarında kür ve ortam şartlarına bağlı olmadan mineral katkılı betonların daha geçirimsiz olduklarını gözlemlemişlerdir.[2]

2.9.2. Zararlı Kimyasallara Karşı Dayanıklılık

Zararlı kimyasallar serbest kireç ile reaksiyona girip su içerisinde çözünen tuzlar oluştururlar. Bu tuzların betondan yıkanmasıyla geçirimsizlik artmakta ve böylece zararlı kimyasalların beton içine girişi hızlanmaktadır. Sülfatlarda aynı tip reaksiyon sonucu genleşen ve betonda çatlaklar oluşturan etrenjit üretirler.[2]

Biledeau ve Malhotra yüksek oranda uçucu kül içeren hava sürüklenmiş ve süperakışkanlaştırıcı içeren betonlarda buz çözücü tuzlara dayanıklılığın iyi derecede olmadığını gözlemlemişlerdir.[17]

Yapılan çalışmalar sonucunda sülfata dayanıklılığı ölçmek için $\text{CaO/Fe}_2\text{O}_3$ oranının sülfat rezistans faktöründen daha uygun bir ölçek olduğunu ileri sürmektedir.

Uçucu küllü betonların sülfat dayanımı, uçucu külsüz betonlarda olduğu gibi, kür şartları, maruz kaldığı etkiler, su/bağlayıcı malzeme oranı gibi faktörlere bağlıdır. Bunun yanı sıra uçucu külün sülfata dayanıklılığı külün tipine, miktarına, fiziksel ve kimyasal özelliklerine de bağlıdır. Genel olarak, F-tipi uçucu küller sülfata karşı dayanım yönünden olumlu bir sonuç ortaya koymaktadır. Freeman ve Carrasquillo uçucu küllü çimento kullanmanın sülfata dayanıklılık açısından uçucu külün betona karıştırma sırasında katılmasından betona daha faydalı olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Erdoğan ve arkadaşlarının üç değişik yüksek kireçli uçucu kül ile ürettikleri harç numunelerinde uçucu kül miktarının artması ile boy uzaması lineer olarak artmaktadır.

2.9.3. Alkali –Agrega Reaksiyonu

Çimentonun içerisindeki alkali ve hidroksil iyonları bazı reaktif agregalar ile reaksiyona girerek genişleyen jel oluştururlar ve çimento hamurunun çatlamasına neden olurlar. Mineral katkı maddeleri genel olarak beton içerisinde alkali-agrega reaksiyonunu önleyici etkiye sahiptirler.

Ohga ve Nagataki uygun uçucu kül oranı ile deniz ortamındaki betonda alkali-agrega reaksiyonunu kontrol etmenin mümkün olduğunu gözlemişler ve uçucu külün etkisinin çimentodaki alkali miktarına bağlı olduğunu saptamışlardır.[2]

Tyson, alkali-agrega reaksiyonu sonucu hasara uğramış karayolu döşemesinin yenilenmesi amacıyla uçucu kül ve alkali miktarı düşük çimento kullanılmasının uygun olabileceği sonucuna ulaşmıştır.

Dunstan ve arkadaşları yüksek oranda uçucu kül içeren betonlarda diğer araştırmaların aksine 10 sene sonra bile alkali-agrega reaksiyonunu kontrol etmenin izlerine rastlanmadığını belirtmektedir.

Geiker ve Thaulow doymuş kalsiyum hidroksit ve sodyum klorür solüsyonları etkisine maruz harç çubuklarında 20 hafta boyunca uzamaları ölçmüşler ve uçucu kül alkali-agrega reaksiyonunu önlemede oldukça etkili olduğunu gözlemişlerdir.

Sonuçta genel olarak, uçucu küllerin beton üzerinde alkali-agrega reaksiyonunu önleyici bir etkiye sahip olduğu yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır. Uçucu kül kullanımı alkali-agrega reaksiyonunun ilerlemesini azaltıcı yönde rol oynar.[17]

2.9.4. Donma – Çözülme Dayanıklığı

Ortam şartları arasında en önemli olanı donma çözülme olayıdır. Betonda donma çözülme hasarlarına gösterilen en büyük direnç hava boşluğunun azaltılması aynı zamanda dolu bir beton elde edilmesidir. Uçucu kül içeren veya kontrol betonlarında

donma çözülmeden meydana gelebilecek hasara karşı,agreganın sağlamlığına, betonun yaşına, hidrasyon derecesine, çimento hamurunun dayanımına, rutubet şartlarına bağlıdır.

Donma- çözülme ortamlarında, mineral katkı içeren betonları korumak için özel hava sürükleyici katkı maddesi gerekmektedir. Mineral katkı maddesi içeren ve içermeyen betonların don dayanımları ile ilgili bir çalışmada, hava sürükleyici olmayan, uçucu kül içeren betonların,protland çimentolu kontrol betonuna göre daha düşük sonuçlar gösterdiği bulunmuştur.[2]

Bağlayıcı malzeme miktarının artması genelde, eşit hava miktarını elde edebilmek için birim hacimdeki hava sürükleyici katkı miktarının artırılmasını gerektirir.

Betonların ilk donma çözülme çevrimine maruz bırakıldığında yalnızca yeterli bir dayanıma (250 kg/cm² ve yukarısı) sahip olamalarını sağlamakla değil, aynı zamanda da kıyaslanabilir bir olgunluk düzeyinde olmalarını sağlamak için de karışım oranlarının belirlenmesine özen gösterilmesi için uyarıda bulunmaktadır.

1983 yılında Virtanen uçucu kül, silis dumanı ve cüruf içeren betonların donma ve çözülme dirençlerini karşılaştırarak aşağıdaki sonuçlara ulaşmışlardır[17]:

- Hava içeriği betonun donma - çözülme direnci üzerindeki en büyük etkidir.
- Dayanım ve hava miktarı sabit tutulduğunda uçucu kül ilavesi betonun donma- çözülme direnci üzerinde büyük etkisi olmadığı gözlenmiştir.
- Çimentonun büyük bir kısmı yerine yüksek fırın cürufu yada uçucu kül kullanıldığı zaman betonun donma çözülme direnci üzerinde olumsuz bir etki meydana getirebilmektedir.

Nasser ve Lai hava sürüklenmiş betonlarda hızlı donma-çözülme tekrarları yapmışlar ve %20 uçucu kül içeren betonların yeterli dayanım gösterdiğini ancak uçucu kül oranının artmasıyla durabilite faktörünün de azaldığını gözlemlemişlerdir.[2]

2.9.5. Deniz Ortamına Karşı Dayanıklılık

Deniz ortamındaki betonlarda deniz suyunun meydana getireceği korozyona karşı alınması gereken önlemlerin başında ortama uygun çimento seçimi gelmektedir. Sülfata dayanıklılık açısından ele aldığımızda hidrasyon sırasında açığa çıkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek boşluk yapısını azaltan puzolanik özeliği sahip uçucu kül gibi maddelerin kullanımının fayda sağlayacağı görülmektedir.

Dunstan ve arkadaşları yüksek oranda uçucu kül içeren beton ile yapılan deniz yapısının sürekli gel-git olayına maruz kalmasına karşın oldukça iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Paillere ve arkadaşları uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı harç içeren numuneleri yapay deniz suyu içinde tutmuşlar ve uçucu küllü harçların cüruf içeren harçlardan daha az şişme yaptığını gözlemlemişlerdir.[2]

Deniz suyundaki betonun dürabilitesini etkileyen en önemli faktör olan geçirimliliğidir. Fakat bunun dışında betonun durabilitesine bir çok açıdan uçucu külün katkısı vardır.

Sülfata karşı dayanıklılık düşük kalsiyum içeren uçucu kül sayesinde betonda iyileştirme gösterir.

2.9.6. Donatı Korozyonu

Betonda kullanılan çeliğin korozyonuna sebep olan faktörlerden nedenler, geçirimlilik, direnç ve karbonatlaşma sayılabilir. Betona mineral katkı ilavesi, beton geçirimliliğinin temel kaynağı olan mikro çatlakların azalmasına ve dolu bir beton yani direnç yönünden iyi bir beton üretilmesine katkıda bulunmaktadır. Korozyona karşı alınacak önlemler olarak, betonun çelik donatısının üzerini yeterli bir kalınlıkta pas payı ile örtmesi ve geçirimsiz olmasını gerektirmekdir.[17]

Nagataki ve Ohga uçucu kül içeren ve içermeyen harçlarda klor iyonu ve karbonatlaşmanın donatı korozyonuna ortak etkilerini incelemişler ve su-çimento oranı 0.35,0.50 ve 0.65 olan uçucu küllü betonlarda NaCl kürünün karbonatlaşmayı azaltıcı etki yaptığını gözlemlemişlerdir.[2]

Dunstan ve arkadaşları yüksek oranda uçucu kül kullanarak yapılmış deniz yapılarında 10 yıl sonra yapılan incelemelerde donatının iyi şekilde korunmuş olduğunu gözlemlemişlerdir.

Son zamanlarda buz çözücü tuzlar ve deniz suyundan kaynaklanan klor iyonları nedeniyle donatı korozyonuna maruz yapılarda uçucu küllü beton kullanımı ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Betonun, fiziksel ve kimyasal açıdan donatı için üç yönden koruyucu görevi vardır:

- Donatı yüzeyinin etrafında alkalin bir ortam meydana getirir.
- Rutubet, oksijen, karbondioksit, klor iyonları ve diğer agresif maddelere karşı fiziksel ve kimyasal örtü görevi görür.
- Çelik donatı elemanları etrafında elektriksel etkilere karşı nispeten dirençli bir ortam sağlar.

Yapılmış olan çalışmalar sonucunda uçucu külün donatı korozyonuna karşı olumlu etki yaptığı söylenebilir.

2.9.7. Karbonatlaşma

Portland çimentosunun hidratasyonu neticesinde ortaya çıkan serbest kireç Ca(OH)_2 atmosferde bulunan karbondioksit ile birleşerek kalsiyum karbonat (CaCO_3) meydana gelir. Tüm portland çimentolu betonlar için söz konusu olan bu olaya karbonatlaşma adı verilir. Betonda meydana gelen karbonatlaşma suya doygunluk derecesi, betonun geçirimliliği ve reaksiyon için mevcut kalsiyum hidroksit kütlesine göre belirlenir.[5]

İyi kür edilmiş düşük su/çimento oranına sahip betonlar ilk birkaç milimetrenin ötesinde karbonatlaşmanın ilerlemesine direnecek kadar yeterince geçirimsiz olacaktır. Bir beton kütlesinin içerisinde karbonatlaşma ilerlerse, geçirimlilik artması, rötire meydana gelmesi, ortamdaki donatının korozyona karşı direncinin azalması gibi istenmeyen sonuçlar doğurabilir.[17]

Branca ve arkadaşları su-çimento oranı 0.35,0.50 ve 0.65 olan uçucu küllü betonlarda uçucu kül ilavesi ile karbonatlaşmanın azaldığını gözlemişlerdir. Fakat uçucu kül çimento yerine kullanıldığında karbonatlaşmayı ve korozyon riskini arttırmaktadır.[2]

1980 yılında Tsukayama ve arkadaşları Japonya’da uçucu kül içeren betonlar üzerinde yürüttükleri çalışmalardan karbonatlaşma derinliği ile su/çimento oranı arasında lineer bir ilişki bulunmuşlardır. Uçucu kül ilavesi yapıldığında ise aynı su/çimento oranlarında karbonatlaşma derinliğinin az miktarda azaldığı sonucuna varmışlardır.

Carles-Gibergues ve Husson siliko-aluminöz uçucu küllü harçlarda karbonatlaşmanın daha erken başladığını belirtmektedir.

Gebauer 100cmx50cmx7cm boyutlarındaki betonarme plakların incelemiştir. Plakalara 7 gün 20 °C’de ve %95 bağıl nemli ortamda kür uygulanmıştır. Ardından her karışıma ait bir plak dış havada test edileceği ortamda, kontrolü olan plakta rutubetli kür koşulları altında saklanmıştır. 28. ve 365. Günlerde aynı betonların prizmaları üzerinde basınç dayanımları ölçülmüştür. Gebauer karbonatlaşma derinliğinin[17];

- Dayanım azaldıkça;
- Su/çimento oranı arttıkça;
- Çimento içeriği azaldıkça;
- Uçucu kül içeriği arttıkça arttığını belirtmiştir.

Sonuç olarak, iyi kür uygulanmamış ve çimento faktörünün düşük olduğu betonların karbonatlaşma ve diğer etkilere karşı dayanıksız olması muhtemeldir. Uçucu kül içeren bir beton normal bir betonla kıyaslanabilecek karbonatlaşmaya karşı etkisini göstermektedir.

2.9.8. Sülfat Etkisi

Zararlı kimyasallar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girip su içerisinde çözünen tuzlar oluştururlar. Bu tuzların betondan yıkanmasıyla geçirimsizlik artmakta ve bu sayede zararlı kimyasalların beton içerisine girişi hız kazanmaktadır. Sülfatlarda aynı tip reaksiyon sonucunda, genleşen ve betonda çatlaklara sebep olan ertenjit üretirler[2].

Freeman ve Carraquillo, uçucu küllü çimento kullanmanın sülfata dayanıklılık açısından uçucu külü betona karıştırma sırasında katmaktan daha faydalı olduğunu ileri sürmektedir.

Erdoğan ve arkadaşları sülfata dayanıklılığı ölçmek için $\text{CaO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ oranının sülfat dayanımı faktöründen daha uygun bir ölçek olduğunu ileri sürmektedirler.[20]

Uçucu külün nispi dayanımı Dunstan'ın tezinde uçucu külün sülfata dayanıklılığının uçucu külün Cao ve Fe₂O₃ içeriğine bağlı olduğunu savunmuştur. Uçucu küldeki CaO %5 gibi bir alt limitin üstüne çıktığında ya da Fe₂O₃ içeriği azaldığında sülfata dayanıklılığında azaldığını belirtmiştir ve buna bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmış bir (R) rezistans faktörünün kullanılmasını teklif etmiştir. Bunu da aşağıdaki denklemle,

$$R=(\%CaO-5)/(\%Fe_2O_3)$$

göstermiştir. [17]

Al-Amoudi ve arkadaşları mineral katkılı betonlarda yüksek konsantrasyonlu sülfat ve klor içeren ortamlardaki davranışını incelemişler ve Tip 1 çimentosu ile uçucu kül karışımlarının en iyi sonuçlar verdiğini, silis dumanı ve cüruf içeren betonların yüzeylerinde ise daha çok hasar oluştuğunu gözlemişlerdir.

2.9.9. Termal Şekil Değiştirme

Büyük kütle betonlarının döküldüğü inşaat yapılarında çimento hidratasyon ısısı, yapının çevre sıcaklığına kadar soğuduğu zaman oluşabilecek büzülme ve kırılmanın izlediği aşırı sıcaklık yükselişini önlemek için özel bir tedbir gerektirebilir. Ciddi çatlaklar, yapı güvenliği açısından tehlike teşkil eder. Yapının boyut ve geometrisine, çimento tip ve içeriğine, yerleştirme anındaki beton sıcaklığına bağlı olarak, normal beton ile yapılmış kütle yapılarında, ısı alışverişi olmadan sırasıyla 30-50 °C yükselişler normal görülmektedir. Yüksek dayanımlı beton karışımlarında daha da yüksek sıcaklıklar ortaya çıkmaktadır. Normal portland çimentosu ile üretilen grobeton durumunda ise, en yüksek sıcaklığa betonun yerleştirilmesini izleyen 2 ile 5 gün içerisinde ulaşılabilir; eğer çevre sıcaklığına düşme olursa, yapıda termal çatlaklar oluşmaktadır[20].

Amerika'da son 30 yıl içerisinde yapılmış beton ağırlık barajlarının genelinde, çimento ağırlığının %25'ten %35'e kadar uçucu kül kullanılmış, yine son zamanlarda yapılan rolkrit beton barajların çoğunda benzer oranlarda uçucu kül kullanılmıştır. Çimentonun %30 uçucu kül ile ikame edilmesi ile betonun sıcaklık yükselişindeki azalma %15 mertebelerinde olmaktadır. Kütle betonlarında uçucu kül kullanılması ile kazanılan diğer avantajlar ise su azaltma özelliği (Bunun neticesinde

verilen bir su/çimento oranında daha fazla çimento azaltma imkanı), ve portland çimentosundan daha iyi olan termal aktivasyon potansiyelidir. Yüksek kür sıcaklıklarında, sadece kalın taneli uçucu külün bile hidrasyon hızı yüksek hale gelmemekte, aynı zamanda portland çimentosu-uçucu kül hamurunun mikroyapısı ve mekanik özellikleri de genellikle katkısız portland çimentosu hamurundan daha üstündür.

Çimentonun bir kısmının yerine mineral katkı kullanılması sıcaklık yükselişini azaltmanın yollarından biridir. Bununla birlikte, uçucu kül gibi mineral katkı kullanımı arzu edilen dayanıma etki etmeden, beton içerisindeki termal büzülme çatlaklarını kontrol etmek için etkili bir yoldur.

Katkısız portland çimentolu kütle betonu karışımları ile %30 uçucu kül içeren beton karışımlarının (400 kg/m^3 bağlayıcı) nispi sıcaklıklarının yerinde ölçümleri sonucunda uçucu kül içeren betonda 47.5°C külsüz betonda ise 54.5°C 'lik sıcaklık yükselişleri ortaya çıkmıştır. Bu da uçucu külün sıcaklık üzerinde sağlamış olduğu %15'lik azalmayı doğrulamaktadır.

2.9.10. Aşınma ve Erozyon

Betonu aşınma ve erozyona karşı dayanımı, çoğunlukla agreganın dayanım karakteristiklerinden etkilenir. Belli bir agrega tipi ve çimento hamuru ile geçiş bölgesinin dayanımları, yüzey aşınmasını etkiler. Bu iki özellik su/çimento oranı ve kür koşullarına bağlı olduklarından, betonun aşınmaya karşı göstereceği dayanım üzerinde katkılı portland çimentolarının etkisi, kontrol betonunun kür ihtiyaçları ve su/çimento oranını değiştirme derecesinden etkilenecektir[22].

Liu, su altında aşınma testini kullanarak betonun aşınma erozyon direncini incelemişlerdir. Liu portland çimentosu yerine hacimce %25 oranında uçucu kül ikame edilmiş betonlar ile normal betonları kıyaslamıştır. 90 gün kür edilmiş, ortalama basınç dayanımı 49 MPa olan uçucu küllü betonun aşınmaya karşı dayanıklılığı, benzer karışım oranlarına sahip, 28 gün kür edilmiş, aşınmaya karşı dayanıklılığı, ile karşılaştırılmıştır. 36 saatlik test periyodu sonunda iki betonun aşınma dirençleri arasında önemsenmeyecek farklılıklar gözlenmiştir. 72 saatin ötesindeki daha uzun periyotlu testlerde uçucu küllü beton normal betonla karıştırıldığında, uçucu küllü betonun aşınma ve erozyona bağlı olarak yaklaşık %25 nispetinde daha fazla kütle kaybına uğradığı tespit edilmiştir.[21]

Tikalsky ve Carrasquillo uçucu kül içeren betonların aşınma dirençlerinin basınç dayanımları ile ilişkili olduğunu bulmuşlardır. Eşit yaşa ve uygun dayanıma sahip betonlar kıyaslandığında uçucu küllü betonun aşınma direncinin normal betona nazaran daha üstün olduğunu saptamışlardır. Bu çalışmada betonun hamur fazının hacmi ile aşınma direncinin ilişkili olduğu belirtilmiştir.

Ukita ve arkadaşları toplam çimentonun 0 - %30'u oranında düşük uçucu kül kullanarak betonun aşınma direncini araştırmışlardır. Deney sonuçları göstermiştir ki; betonun aşınma direnci uçucu kül inceliğiyle birlikte yükselmektedir. %30 uçucu kül içeren betonun aşınma dayanımı, uçucu külsüz portland çimentosu betonundan düşük olduğu bulunmuştur[21].

Barrow, yapmış olduğu araştırmada çimentonun 0 - %35 oranında uçucu kül kullanmıştır. Deney sonuçları, C veya F sınıfı uçucu kül içeren betonların aynı dayanımdaki uçucu külsüz betonlarla aynı aşınma dayanımını gösterdiğini ortaya çıkarmıştır.

Günümüz şartlarında, çeşitli yüzey koşullarında meydana gelen farklı aşınma ve erezyon durumları için uçucu kül kullanımıyla arasındaki ilişkinin ve betonun göstereceği performansın araştırılması gerekmektedir.

2.10. Uçucu Külün Çeşitli Alanlarda Kullanılması

2.10.1. Hafif Agregası ve Hafif Beton Üretimi

Uçucu küller genel olarak 1100-1200 °C sıcaklıkta bir miktar ergime göstererek ve uygulanan sertleşme yöntemine bağlı olarak yuvarlak veya silindirik taneli agregalar oluşturulmaktadır. Doğal agregaya oranla daha hafif olan bu agregaların kullanılması ile hafif beton bloklar ve yapıda hafif beton elde edilmektedir. Bu şekilde yapılan betonlar normal ağırlıklı betonlar kadar yüksek dayanıma sahip olmaktadır. Bunun yanı sıra hafiflikten dolayı yapılarda işçilikte kolaylaşmakta, ısı ve ses iletkenliği düşük özellikte malzeme elde edilebilmektedir. Elde edilen havada kurutulmuş betonların yoğunluğu 1100-1800 kg/m³ mertebesinde dir. Uçucu küllerden elde edilen iyi kalitedeki hafif agregalarla yapılan betonların 28 günlük basınç dayanımları yaklaşık 450 kg/cm² mertebelerinde olabilmektedir.[8]

1992 yılında Hwang ve arkadaşları F-tipi uçucu kül kullanarak hafif agregası üretimini incelemişlerdir. Üretimde çimento, kireç, alçı ve alüminyum tozu kullanılmış ve

hızlandırılmış kür uygulanmıştır. Araştırmacılar pelletleme hızının tablanın eğimine, dönme hızına, süresine ve katkı ilave yöntemlerine bağlı olduğunu, alüminyum tozunun birim ağırlığını azaltıp, mukavemeti yükselttiğini ve kür sıcaklığının artışının mukavemet artışına neden olduğunu gözlemlemişlerdir.[2]

Yamashita ve arkadaşları ise özel bir fırın kullanarak uçucu külden, hafif agrega üretiminde optimum sinterleme sıcaklığını saptamışlardır. Kuru özgül ağırlığı 1.40 civarında olan uçucu kül hafif agregasının su emme değeri %25 mertebesinde olmaktadır. Araştırmacılar bu agrega ile birim ağırlığı 1810 kg/m³ olan hafif beton üretilbildiğini ve 0.25 su-çimento oranında betonda 65 MPa basınç mukavemeti elde edilebildiğini belirtmektedir.

Endüstriyel atıklardan olan uçucu kül taşıyıcı hafif agregaya dönüştürülerek inşaat sektörüne sunulmaktadır. Bunun sağladığı yararlar şu şekilde sıralanabilir[2]:

- Bu atıkların çevreyi kirletmesi önlenecektir.
- Daha az doğal agrega tüketileceği için çevre korunacaktır.
- Enerji tasarrufu sağlanacaktır.
- Üretilen malzemenin kullanılması çeşitli yapı türlerinde ekonomi sağlayacağı için müteahhitlere tanıtılması durumunda özellikle tercih edilecektir.

Böyle bir alanda yatırım yapılmadan önce yapılması gereken bazı bir takım çalışmalar vardır:

- Konu edilen endüstriyel atıkların yıllık üretim miktarları saptanarak düzenli bir şekilde yayınlanmalıdır.
- Uçucu kül için kullanılabilir durumdaki mevcut rezervlerin hacmi belirlenmelidir.
- Üretim konusunda üniversitelerde deneysel çalışmalar yapılması sağlanmalıdır.
- Kapsamlı fizibilite raporları hazırlanmalıdır.
- Konuyla ilgili yönetmelikler daha kapsamlı hale getirilmelidir.
- Taşıyıcı hafif agregalar ve bunların sağladığı avantajlar inşaat sektörüne tanıtılmalıdır.

2.10.2. Yüksek Mukavemetli Beton

Yüksek mukavemetli beton uygulamalarının hemen hepsinde yüksek aktiviteli C-sınıfı uçucu küller yada silis dumanı kullanılmış olup, bazılarında ise bu iki puzolan birlikte kullanılmıştır.

Yüksek mukavemetli beton, yapılardaki taşıyıcı elemanların boyutlarını en aza indirmek, perkast ve öngermeli beton endüstrisinde daha hızlı üretim döngüsü sağlamak, büyük gerilmeler altındaki yüksek mukavemet ve elastisite modülü elde etmek gibi bir çok sebebe dayalı olarak uygulamada karşımıza çıkmaktadır. Yüksek mukavemetli betonlar üç ana grupta toplanırlar[17]:

- Bir çok yapı uygulamasında kullanılan 35-70 MPa aralığında dayanım gösteren betonlar
- 70-100 MPa dayanım aralığındaki betonlar
- Basınç dayanımı 100 MPa'ın ötesindeki betonlar

Yüksek dayanımlı beton üretiminde yoğun donatılı bir yapıda betonu yerleştirmeyi mümkün kılabilmek için yeterince işlenebilir, düşük su/çimento oranlı karışımlar gerekmektedir. Bunları karşılamak için aşağıda sözü geçen yaklaşımlar dikkate alınmalıdır:

- Beton içerisinde kullanılacak tüm malzemeleri büyük titizlikle seçmek ve sıkı bir kalite kontrol programı uygulayarak başarısızlığı enlelemek
- Su azaltıcı maddeler ve süper akışkanlaştırıcı kullanılması ile sağlanabilen düşük su/çimento oranları seçmek
- Puzolan ve özellikle nitelikli uçucu kül kullanmak

Chicago ve civarında 62 MPa ve daha yüksek mukavemetli betonlar yaygın olarak bina inşaatlarında kullanılmaktadır. Tablo 2.7 'de 1970'li yıllarda Chicago'da inşa edilmiş iki yapıda kullanılmış olan yüksek dayanımlı betonları karışım oranları verilmiştir.

Tablo 2.9 Yüksek Mukavemetli Betonların Karışım Oranları

Malzeme	Miktar/m ³	
	Water tower Place	River Plaza
Çimento(kg)	383,7	385,6
İnce agrega(kg)	464,9	471,7
İri agrega(kg)	816,5	784,7
Su(kg)	136,1	149,7
Su azaltıcı katkı(ml)	751,1	1271,5
Uçucu kül(kg)	45,4	45,4
Çökme (mm)	114,3	114,3
Hava içeriği(%)		1,5
Birim ağırlık(kg/m ³)	2433,4	2383,8

2.10.3. Katkılı Çimento Üretimi

Portland çimentosu üretiminde kullanılan çimento klinkerinin bir miktarı azaltılarak yerine uçucu kül konulmakta ve böylece sadece klinker öğütülmesi (küçük bir miktar alçıtaşı ile birlikte) sonucunda elde edilen portland çimentosu yerine uçucu kül katkılı portland çimentosu elde edilmektedir. Bu tür çimentolar, içlerine katılan uçucu kül miktarına bağlı olarak, Türkiye’de genelde doğal puzolanlarla üretilen kakılı çimentoya yada traslı çimentoya benzer karakteristikler göstermektedirler.[8]

2.10.4. Rolkrit (Silindirle Sıkıştırılmış) Beton

Ağırlık betonlarında betonun basınç dayanımı önem taşımaz. Yapının güvenlik açısından iki önemli niteliği devrilme ve kaymaya karşı stabilitesidir. Genelde bir yıllık basınç dayanımının 13 MPa mertebesinde olması yeterlidir. Rolkritlerde bu dayanım rahatlıkla aşılmakta ve hatta 30 MPa değerlerine bile varabilmektedir.[23]

Rolkrit uygulaması, bir çok yönden yapılan beton uygulamalarından çok geoteknik mühendisliğinde kullanılan prosedürlerle ilgilidir. Amerikan Beton enstitüsü rolkriti, titreşimli silindirler kullanarak yapılan harici vibrasyon ile konsolide edilmiş kuru beton malzeme olarak tanımlamıştır. Hedeflenen konsolidasyona ulaşmak için

rolkrit, yerleştirme ekipmanının ağırlığını kaldıracak kadar kuru, karıştırma ve kompaksiyon boyunca hamur fazın tüm kütleyle üniform dağılabilmesi için de yeterince akıcı olmalıdır. Rolkritler aşağıdaki dört koşulu yeine getirmelidir[17]:

- Minimum hava boşluğu ile yüksek yoğunluğa sahip olmalıdır.
- Beton tabakalar arasında aderansı sağlamalıdır.
- Baraj betonlarında açığa çıkan ısıyı en aza indirmelidir.
- Sertleşmiş halde termal çatlaklara yol açan çekme gerilmelerini karşılayabilecek performansa sahip olmalıdırlar.

Rolkritler için uçucu külün esas fonksiyonu ince malzeme hacmini genişletip, daha iri tanelerin arasındaki boşluğu doldurmaktır. Aksi durumda bu gereklilik çimento tarafından sağlanır. Rolkritin normal olarak yüksek hamur içeriğine ihtiyacı vardır. Dunstan'a göre hamur/harç oranı 0.35 ila 0.38'in altına düştüğünde sıkıştırılmış kütlelerin yoğunluğu önemli ölçüde azalmaktadır. Bu düzeyin altındaki hamur içeriğinde ince agregadaki boşlukların tümü dolmamaktadır. Maksimum yoğunluğu elde etmek için hamur içeriği artırılmalıdır. Çimento ilavesi ile çözüme gidildiği takdirde çimento iki dezavantajın ortaya çıkmasına sebep olacaktır:

- Sıcaklık yükselme oranı artar, buna paralel olarak termal çatlama olasılığı artmış olur.
- Beton maliyeti ekonomik olmayabilir.

En yoğun halde rolkrit elde etmek için tercih edilen en akılcı yaklaşım hamur içeriğini artırmak amacıyla büyük hacimlerde uçucu kül kullanmaktır.

Rolkritler için üç tip malzeme incelenmiş ve kullanılmıştır[17]:

- Çimento ile stabilize edilmiş zemin materyalleri
- Bağlayıcı dozajı 100 ila 150 kg/m³ arasında değişen ve bağlayıcı miktarının %30'u yerine uçucu kül kullanılabilen düşük dozajlı betonlar
- Bağlayıcı dozajı 180 ila 270 kg/m³ arasında değişen ve bağlayıcı miktarının %60-80'i yerine uçucu kül kullanılabilen yüksek hamur içerikli (High Paste Content RCC) zengin betonlar

Oliverson ve Richardson rolkrit betonunun donma ve çözülme durabilitesi hakkında yeni araştırmalar yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Gerçekten bazı uçucu küllerin

betonun donma-çözülme durabilitesi için handikap oldukları düşünüldüğünde eğer rolkritin Kanada'daki yol betonlarının maruz kaldığı gibi iklimsel koşullarda kullanılması söz konusu ise kullanılan uçucu küle bağlı olarak rolkritin donma-çözülme direnci kapsamlı olarak incelenmelidir.

Rolkritlerde genelde düşük kireçli küller tercih edilmektedir. Bunun yanında son zamanlarda C-tipi küller de kullanılmaya başlanmıştır.

1992 verilerine göre inşaatı tamamlanmış 49 adet RCC barajından 42'sinde F-tipi uçucu kül kullanılmıştır. C-tipi uçucu kül ise Amerika'da Stancy ve Willow Creek barajlarında kullanılmıştır. Platanovryssi bölgesinde 100 m yüksekliğinde inşaa edilmekte olan barajda Ptolemaida'da çıkan 350 km mesafeden getirilen yüksek kireçli ve sülfatlı uçucu kül kullanılmaktadır. Uçucu kül inşaat alanında kurulan değirmenlerde öğütülmektedir. Külün %65'i 43 µm eleğin üstünde kalmakta, özgül yüzey 400m²/kg değerine ulaşmaktadır. Rolkritte karışım oranları ise 35 kg/m³ protland çimentosu ve 250 kg/m³ uçucu kül olarak tasarlanmıştır, yani bağlayıcıdaki uçucu kül oranı %88 'dir. 1976 yılından beri yapılan araştırmalar sonunda inşaat aşamasına geçilmiştir. [23]

2.10.5. Hazır Beton

Dünyanın bir çok yerinde hazır beton üreticisi uçucu külü agrega granülometrisini iyileştirmek ya da pompa betonu için özel olarak oranlanmış karışımlar geliştirmek için kullanmaktadır. Buna karşın kullanılan uçucu küllerin fiziksel kimyasal ve minerolojik özelliklerinin belirli sınırlar içinde olması gerekir. Kontrolsüz kullanımlar zarar getirebilir.

Danimarka ,Honk Kong, İtalya, Meksika ve Hollanda gibi ülkeler ürettikleri uçucu külün %80'inden fazlasını inşaat endüstrisinde kullanırken, yılda 15 milyon ton mertebesinde uçucu kül üreten Türkiye'nin inşaat endüstrisinde uçucu kül kullanımı çok az olmaktadır. Türkiye'deki çimento üretiminin yılda toplam 25 milyon mertebesinde yer aldığı göz önünde tutulduğunda, yılda 15 milyon ton kül üretiminin çok büyük bir miktar olduğu anlaşılmaktadır.[8]

Büyük bir hızla yaygınlaşan ve gelişen hazır beton sektörünün içinde uçucu külün yerini alması gerekmektedir.

2.11. Diğer Kullanım Alanları

Belirttiğimiz alanların dışında uçucu külün kullanıldığı diğer alanları da şu şekilde sıralayabiliriz[2]:

- Tuğla Üretiminde
- Gaz beton üretiminde
- Harç Yapımında
- Yalıtım malzemesi olarak
- Püskürtme beton(shotcrete) uygulamalarında
- İlaç sanayisinde ham hadde olarak kullanılmaktadır.



3.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada Çayırhan termik santralinden sağlanan uçucu külün beton özellikleri üzerine etkileri araştırıldı. Uçucu kül betonda çimento ağırlığının %5, %10, %15, %20, %25, %30'u oranında yer değiştirilerek kullanıldı. Uçucu kül içeriğinin ve değişik kür koşullarının beton özellikleri üzerine ortak etkileri incelendi.

3.2 Üretilen Betonların Özellikleri

Beton üretiminde mutlak hacim yöntemi esas alındı. Biri kontrol betonu olmak üzere toplam 7 adet seri beton üretildi.

Bütün betonlarda nominal bağlayıcı miktarı 300 kg/m^3 'de su/bağlayıcı (uçucu kül + çimento) oranı 0.55'de sabit tutuldu. Süperakışkanlaştırıcı bir katkı maddesi ile çökmenin 12-15 cm aralığında kalması sağlandı. Üretilen betonlarda en büyük tane boyutu 32 mm ve malzeme granülometrisi sabit olan aynı tür agrega kullanıldı. Üretilen her seri için 42 litre beton üretilmiş ve buna karşılık gelen malzemeler kullanılmıştır.

Su ihtiyacı şehir şebekesinden sağlanan şebeke suyu ile sağlandı.

3.3 Kullanılan Malzemeler

3.3.1 Uçucu Kül

Bu çalışmalarda Ankara Çayırhan termik santralinden elde edilen uçucu küller kullanıldı. Kiremit kırmızısı rengine olan uçucu külün özgül ağırlığı 2.16 gr/cm^3 olarak bulundu. Kül üzerinde yapılan mekanik deneylerin sonuçları aşağıda belirtilmektedir.

Mekanik Deneyler

TS 639'a göre yapılan puzolanik aktivite deneylerinin sonuçları Tablo 3.1'de gösterilmektedir.

Tablo 3.1 Çayırhan uçucu külünün mekanik deney sonuçları

Kür Yaşı (Gün)	Karşılaştırma karışımı (Sadece Çimento) Basınç Mukavemeti (Kg/cm ²)	Deneme Karışımı (Kül +Çimento) Basınç Mukavemeti (kg/m ²)	Puzolanik Aktivite (%)
2	273.4	207.8	76 > 70
7	453.1	348.4	77 > 70
28	544.6	458.4	84 > 70

Kimyasal Deneyler

Deney sonuçlarına göre, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ toplamı(S+A+F) % 61.45 ile % 50'den fazla, MgO % 1.47 ile % 5'ten küçük ve SO₃ % 6.56 ile % 5 büyük olduğundan Çayırhan uçucu külü C-sınıfı uçucu küller sınıfına girmektedir. Yapılan Kimyasal deneylerin sonuçları Tablo 3.2'de verilmektedir.

Tablo 3.2 Çayırhan uçucu külünün kimyasal analizi

Kimyasal Analiz	Bulunan (%)
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<10
Bilinmeyen	1.33

Çayırhan uçucu külünün kimyasal bileşimi aşağıdaki Tablo3.3'te verilmektedir.

Tablo 3.3 Çayırhan uçucu külünün kimyasal bileşimi

Element	İçerik Yüzdesi(%)
S+A+F	61.47>50
MgO	1.47<5
SO ₃	6.56>5

3.3.2 Çimento

Beton üretiminde Akçansa Çimento Fabrikasının üretimi olan PÇ 42.5 cinsi çimento kullanıldı. Kullanılan çimentonun üzerinde yapılan deneyler sonucunda fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri aşağıda verilmektedir.

Tablo 3.4 Çimentonun Fiziksel Özellikleri

Blaine özgül yüzeyi [m^2/kg]	328
90 mikronluk elekte kalan [%]	0,2
200 mikronluk elekte kalan[%]	0
Özgül ağırlık[gr/cm^3]	3,16
Normal kıvam suyu [%]	30
Le Chatelier halkalarının toplam açılması[mm]	2,5
Priz başlangıcı	2 saat 40 dakika
Priz sonu	4 saat

Mekanik Özellikler

Rilem-Cembureau yöntemi sonucu bulunan mekanik özellikler Tablo3.1’de gösterilmektedir.

Tablo3.5 Çimentonun mekanik özellikleri

Basınç Dayanımları(N/mm^2)		Eğilme Dayanımları(N/mm^2)	
7 Günlük	28 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
40.3	54.6	7.2	7.8

Deneylerde kullanılan çimento Akçansa üretimi olup PÇ 42.5 cinsi çimentodur. Çimentonun kimyasal analizi aşağıdaki Tablo 3.6'da gösterilmektedir..

Tablo 3.6 Çimentonun Kimyasal Özellikleri

SiO ₂	=	% 20.03
Al ₂ O ₃	=	% 5.06
Fe ₂ O ₃	=	% 3.6
CaO	=	% 63.24
MgO	=	% 1.12
SO ₃	=	% 2.82
K ₂ O	=	% 0.78
Na ₂ O	=	% 0.27
Cl	=	% 0.03
TiO ₂	=	% 0.31
Kızdırma kaybı	=	% 2.75

Fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler bakımından kullanılan çimentonun, TS 19 standartlarına uygun olduğu görülmektedir.

3.3.3 Agreg

Yapmış olduğumuz beton üretimlerinde agreganın türü tüm serilerde sabit tutulmuştur. Deneylerde kalker esaslı kırmataş I, kırmataş II, deniz kumu ve kırmataş tozu kullanıldı.

3.3.3.1 Agregaların Özellikleri

Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri aşağıdaki Tablo 3.7’de verilmektedir.

Tablo 3.7 Agregaların fiziksel özellikleri

Agrega Türü → Fiziksel özellik ↓	Kum	Kırmataş I	Kırmataş II	Kırmataş tozu
Özgül Ağırlık(gr/cm ³)	2,6	2,71	2,70	2,65

Agrega karışımının granülometri eğrisi TS 706’da belirtilen B32 referans eğrisine yakın olacak şekilde toplam agrega hacminin kum %25’i, kırmataş I % 30’u, kırmataş II % 30’u, kırmataş tozu % 15’i oranında kullanıldı. En büyük agreg boyutu 32 mm olarak belirlendi. Agregalar üzerinde yapılan elek analizleri Tablo.3.8’de ve karışımın granülometrisi aşağıdaki Tablo3.9 ve Şekil 3.1’de gösterilmektedir.

Tablo3.8 Agregaların Elek Analizi

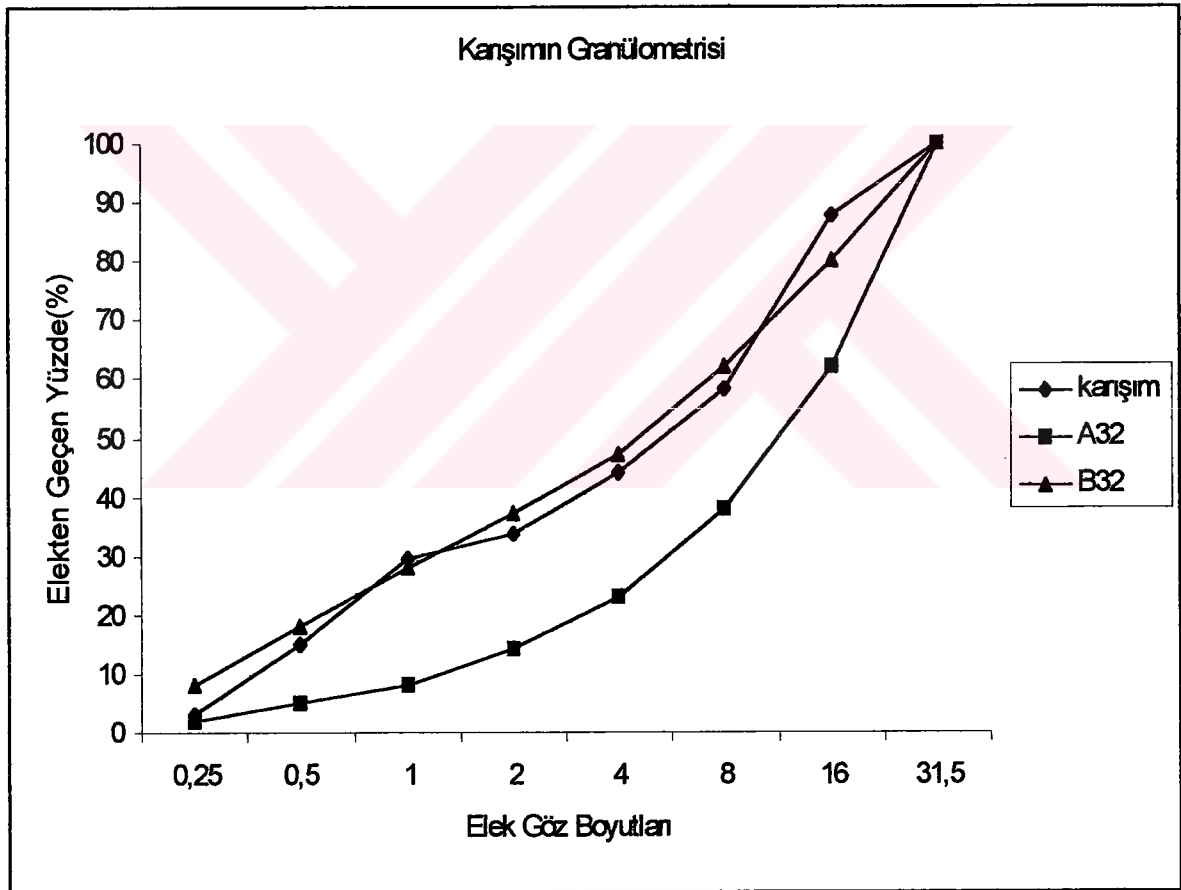
ElekBoyutu (mm)	Malzemenin Elekten Geçen Yüzdesi(%)			
	Kum	Kırmataş I	Kırmataş II	Kırmataş Tozu
31.5	100	100	100	100
16	100	100	59.1	100
8	100	57,8	2.86	100
4	99,4	14,3	1,1	98
2	97,5	2,97	0,72	55,36
1	92,5	2,35	0,72	36,4
0.5	42,6	1,99	0,57	22,88
0.25	3,3	1,07	0,18	12,6

Agregaların elek analizinden sonra karışım, B-32 eğrisine yakın şekilde ayarlandı.

Tablo 3.9 Agrega karışımının Granülometrisi

	Elekten Geçen Yüzde (%)							
Elek Boyutları(mm) →	31.5	16	8	4	2	1	0.5	0.25
Karışım	100	87.7	58.2	44.2	33.8	29.5	14.9	3.1

Maksimum dane çapı 32 mm kabul edilerek karışımın granülometri eğrisi aşağıda çizilmiştir.



Şekil 3.1 Karışımın Granülometri Eğrisi

3.3.4 Süperakışkanlaştırıcı Katkı Maddesi

Deneylerde sikanın üretimi olan süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanıldı.

3.4 Üretilen Betonların Taze Beton Deneyleri

Mutlak hacim yöntemi esas alınarak üretilen betonlar üzerinde birim ağırlık ve çökme deneyleri yapıldıktan sonra, gerçek bileşimler bulundu. Uçucu kül içermeyen kontrol betonuna NB, uçucu kül içeren betonlara da UKB kodları verildi. UKB'yi izleyen rakamlar ise çimento ağırlığının yüzdesi olarak uçucu kül içeriğini göstermektedir. Tablo 3.10'da beton bileşimleri ve taze beton özellikleri verilen betonlar 100mmx200mm boyutundaki silindir ve 70mmx70mmx280mm boyutundaki prizma şeklindeki kalıplara yerleştirildi.

Her seri beton için 13 adet silindir, 12 adet prizma şeklinde numune üretildi. Üretilen betonlar 24 saat sonra kalıbından çıkarıldı.

Her seri için elde edilen numuneler 3 gruba ayrıldı. 1. gruptakiler 20°C sıcaklığında ve % 60 rutubet içeren laboratuvar ortamına kondu. 2. grup numuneler ıslak çuval altına yerleştirildi. 3. Grup numuneler ise laboratuvarındaki kür havuzuna 20 °C sıcaklığındaki kirece doymuş su içine kondu.

Çökme deneyi T.S. 2871'e göre alt çapı 20 cm, üst çapı 10 cm ve yüksekliği 30 cm olan kesik çökme konisi kullanılmıştır. Koni üç kademeli doldurarak, her tabakada 16 cm çapındaki demir çubukla şişlenmiştir. Daha sonra koni sarsılmadan kaldırılarak betonun çökme miktar ölçülmüştür.

Üretilen taze betonların birim ağırlıkları, iç hacmi 8 litre olan ölçekli birim ağırlık kabına, çökme deneyinde kullanılan beton yerleştirilerek sarsma tablasında 3 saniye süreyle yerleşmesi sağlanmıştır. Yerleşmiş taze betonun ağırlığının kabın iç hacmine bölünmesi suretiyle üretilmiş olduğumuz betonların birim ağırlıkları bulunmuştur.

Tablo 3.10 Üretilen Betonların Gerçek Bileşimleri(1 m³ Betona Giren)

Seri No	Beton Grubu	Çimento (Kg)	Uçucu Kül (Kg)	Su (Kg)	K.taş1 (Kg)	K.taş 2 (Kg)	K.taş tozu (Kg)	Küm (Kg)	Su/Toplam bağlayıcı Oranı	Hava Oranı(%)	Kompasite	Katkı Miktarı (Kg)	Katkı Oranı (%)	Birim Ağırlık (Kg/m³)	Çökme (cm)
1	NB	300	0	166	587	584	287	469	0,553	1,3	0,821	5	1,8	2398	12
2	UKB5	286	16	165	587	585	288	470	0,546	1,2	0,823	6	2	2398	15
3	UKB10	272	27	164	585	582	286	467	0,548	1,4	0,822	5	1,6	2390	12
4	UKB15	263,2	40	167	592	589	290	473	0,551	0,7	0,826	4	1,4	2375	12
5	UKB20	252	51	166	591	588	289	472	0,548	0,7	0,827	6	2	2380	15
6	UKB25	243	61	167	594	591	291	475	0,550	0,4	0,829	5,8	1,9	2368	14
7	UKB30	234	70	167	595	592	291	475	0,549	0,3	0,830	5,7	1,9	2367	14

3.5 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri, 100mmx200mm boyutlarında silindir ve 70mmx70mmx280mm boyutlarında prizma numuneler üzerinde yapıldı.

Üretilen silindir numunelerin, 3 tanesi 28 gün 20 °C laboratuvar odasındaki hava ortamında, 3 tanesi 7 gün ıslak çuvalaltında, 21 gün laboratuvar odasında, 7 tanesi ise 28 gün 20 °C'deki laboratuvardaki kür havuzunda saklandı. Prizma şeklindeki numunelerin, 4 tanesi 28 gün 20 °C laboratuvar odasındaki hava ortamında, 4 tanesi 7 gün ıslak çuvalaltı 21 gün laboratuvar ortamında, 4 tanesi 28 gün 20 °C laboratuvardaki kür havuzunda saklandı.

Deneyler 28 gün laboratuvar ortamında, 7 gün ıslak çuvalaltı 21 gün laboratuvar ortamında, ve 28 gün kirece duygun su içinde bekletilen numuneler üzerinde 30. günde yapıldı. Silindir numunelerden, 3 tanesi laboratuvar ortamı 3 tanesi 7 gün çuvalaltı 3 tanesi 28 gün su altı olmak üzere, 9 tanesi basınç dayanımı, 4 tanesi ise gevreklik indisi, hacimsel deformasyon, poisson oranının hesabında kullanıldı. Prizma numunelerden ise, 3 tanesi laboratuvar ortamı 3 tanesi 7 gün ıslak çuvalaltı 3 tanesi 28 gün su altı olmak üzere 9 tanesi eğilme dayanımı ve kırılan parçalar üzerinde basınç dayanımı, 1 tanesi laboratuvar ortamı, 1 tanesi 7 gün ıslak çuvalaltı, 1 tanesi 28 gün sualtı olmak üzere 3 tanesi de beton kılcallık katsayısının hesabında kullanıldı.

Ayrıca prizma numuneleri keserek bunlar üzerinde 260. günde basınç deneyleri yapıldı.

3.6 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

3.6.1 Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı deneyi, 100mmx200mm boyutlarındaki silindir numuneler ile eğilme deneyinden elde edilen numuneler üzerinde 30. günlerde yapıldı. Deneyde 1000 kN'luk J.Amsler presi kullanılmıştır. Deneyler, 28 gün su altı, 7 gün çuvalaltı ve laboratuvar ortamında bekletilen numuneler üzerinde yapıldı. Kalıba temas eden yan yüzeyleri kuvvet yönüne dik olacak şekilde prese yerleştirildi. Aynı zamanda eğilme deneyinden kalan parçalar üzerinde 28 günlük basınç dayanımları hesaplandı.

Tablo 3.10.a 28 Günlük Silindir Basınç Dayanımları Ortalama Değerleri

		Ortalama Basınç Gerilmesi(N/mm ²)
LABARATUAR ORTAMI	NORMAL BETON	28,91
	% 5 UÇUCU KÜL	30,40
	%10 UÇUCU KÜL	28,02
	% 15 UÇUCU KÜL	27,56
	% 20 UÇUCU KÜL	27,47
	% 25 UÇUCU KÜL	24,17
	% 30 UÇUCU KÜL	24,47
7 GÜN ISLAK ÇUVALALTI ORTAMI	NORMAL BETON	38,95
	% 5 UÇUCU KÜL	35,26
	%10 UÇUCU KÜL	35,52
	% 15 UÇUCU KÜL	33,40
	% 20 UÇUCU KÜL	35,18
	% 25 UÇUCU KÜL	31,75
	% 30 UÇUCU KÜL	29,29
28 GÜN SUALTI ORTAMI	NORMAL BETON	42,25
	% 5 UÇUCU KÜL	39,62
	%10 UÇUCU KÜL	36,28
	% 15 UÇUCU KÜL	34,59
	% 20 UÇUCU KÜL	37,30
	% 25 UÇUCU KÜL	35,09
	% 30 UÇUCU KÜL	34,37

70mmx70mmx280mm boyutlarındaki prizma numuneleri 4 parçaya bölerek keserek bunlar üzerinde 260 günlük basınç deneyleri yapıldı.

Basınç dayanım değerleri, uygulanan basınç kuvveti $P(kN)$, basınç kuvvetinin uygulandığı alan $A(cm^2)$, bunun sonucunda elde edilen basınç dayanımı da $\sigma_b(N/mm^2)$ olmak üzere 3.1 bağıntısından hesaplandı. Elde edilen basınç dayanım değerleri Tablo 3.10.a ve Tablo 3.10.b’da gösterilmektedir.

$$\sigma_b = (P/A) \times 10$$

3.1

Tablo3.10.b 260 Günlük Basınç Dayanım Değerleri

Uçucu Kül Yüzdesi	Basınç Dayanımları(N/mm^2)		
	7 Gün Islak Çuvalaltı	Labaratuar Ortamı	28 gün Su altı
0	35,18	32,11	45,16
5	34,94	31,28	44,53
10	35,06	30,3	43,12
15	34,79	29,91	42,21
20	34,7	30,19	41,9
25	33,6	27,35	43,3
30	33,54	26,69	39,79

3.6.1 Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı deneyi, 70mmx70mmx280mm’lik prizmalar üzerinde üç farklı ortamda 28 gün su altı, 7 gün ıslak çuvalaltı ve labaratuar ortamında bekletilen numuneler üzerinde yapıldı. Deneyler üç noktadan yüklenmiş basit kiriş metoduyla yapıldı. 20 KN kapasiteli ring kullanıldı. Eğilme dayanım değerleri, moment $M(kN-cm)$, mukavemet momenti $W(cm^3)$ ve elde edilen dayanımı da $\sigma_e(N/mm^2)$ olmak üzere 3.2 bağıntısından hesaplandı.

$$\sigma_e = M/W = [(Px l/4)/(bxh^2/6)] \times 10$$

3.2

Yukarıdaki bağıntıda belirtilen, P(kN) uygulanan kuvvet, l(cm) mesnetler arası mesafe b(cm) ve h(cm) değerleri de numunenin dikdörtgen kesitine ait kenar uzunluklarıdır. Tablo 3.11’de yapılan deneylerden elde edilen eğilme dayanım sonuçları gösterilmektedir.

3.6.2 Kılcallık Katsayılarının Belirlenmesi ve Ağırlıkça Su Emme

Kılcallık katsayılarının belirlenmesi ve ağırlıkça su emme deneyleri, 28 gün laboratuvarımızdaki kür havuzundaki kirece doygun su ortamında, 7 gün ıslak çuvalaltında ve laboratuvar ortamında bekletilen numuneler üzerinde 35. Günde yapıldı. 7x7x28 cm ebadındaki numuneler 4 eşit parçaya bölünerek 70mmx70mmx70mm boyutundaki küp numuneler haline getirildi. Elde edilen 4 adet parçanın üzerinde kılcallık deneyleri yapıldı.

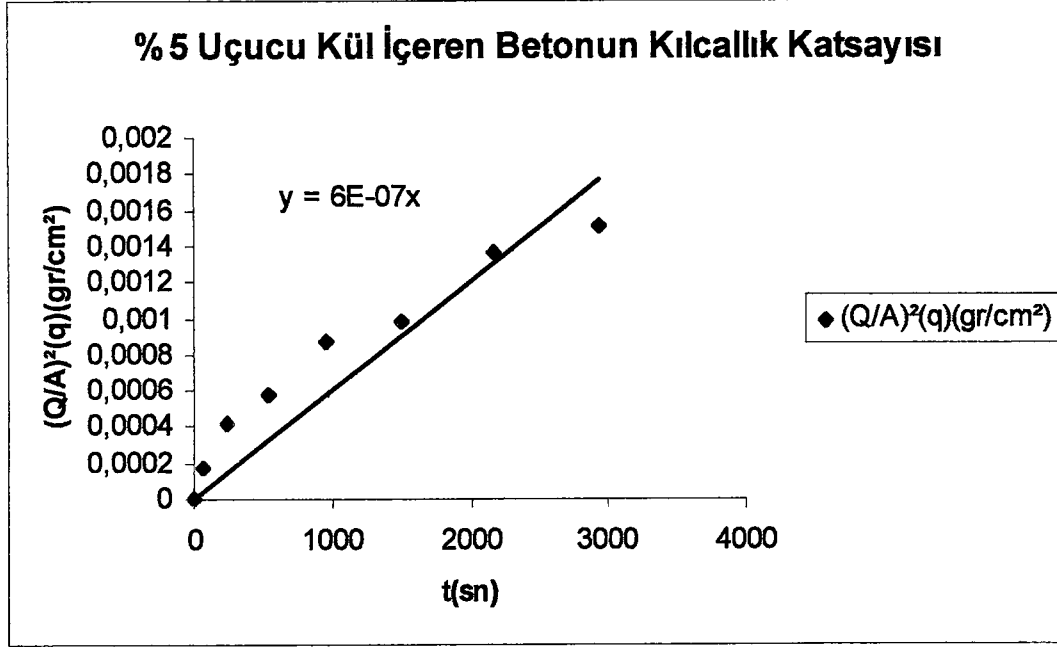
Kılcallık deneyi uygulanacak numuneler 70°C etüvde 24 saat bekletilmiştir. Etüvden çıkarılan numuneler oda sıcaklığına geldikten sonra deneyin yapılacağı dik yan yüzeylerin alt kenarları parafin ile kaplandı. Daha sonra numuneler su dolu deney kabının içine konulan 12 cm çapındaki demir çubukların üzerine konularak sadece bir yüzeyden su alınması sağlandı. Başlangıç anından itibaren kuru ağırlıkları tartıldıktan sonra 1., 2., 4., 9., 16., 25., 36., 49. dakikalarda su içerisinden çıkartılarak numune ağırlıkları 6 kg kapasiteli terazide tartılarak numune içerisine kılcallık yoluyla giren su miktarı bulundu. Tablo 3.12 ve Şekil3.2’de % 5 Uçucu kül içeren 35 günlük numunelerden bir numune parçası üzerinde 35. günde yapılan kılcallık deneyi sonuçları görülmektedir.

Tablo 3.12 % 5 Uçucu Kül İçeren 28 Gün Kirece Doygun Su içinde Saklanan Numune İçin Elde Edilmiş q Değerleri

to(sn)	Kuru Ağırlık(gr)	Emilen Toplam Su(Q=gr)	Alan(cm ²)	Q/A(q)(gr/cm ²)
0	790,8	-	-	-
60	791,5	0,7	51,68	0,013544892
240	791,6	0,8	51,68	0,015479876
540	791,8	1,0	51,68	0,019349845
960	792,1	1,3	51,68	0,025154799
1500	792,4	1,6	51,68	0,030959752
2160	792,6	1,8	51,68	0,034829721
2940	792,8	2	51,68	0,03869969

Tablo 3.11 Üretilen Prizmalar Üzerinde Yapılan Eğilme Deneyi Sonuçları

Eğilme Dayanımları				
Ortam Koşulları	Beton Cinsi	Ring okuması	Eğilme Kuvveti	Eğilme Dayanımı(N/mm ²)
Laboratuvar Ortamı	NB	105,0	36,1	3,2
	UKB5	147,7	50,7	4,4
	UKB10	139,3	47,9	4,2
	UKB15	119,3	41,0	3,6
	UKB20	129,7	44,6	3,9
	UKB25	489,0	52,9	4,6
	UKB30	505,0	54,6	4,8
	NB	133,3	45,8	4,0
7 Gün Çuvalaltı	UKB5	186,0	63,9	5,6
	UKB10	146,7	50,4	4,4
	UKB15	131,0	45,0	3,9
	UKB20	173,3	59,6	5,2
	UKB25	523,0	56,5	4,9
	UKB30	555,0	60,0	5,2
	NB	151,7	52,1	4,6
	UKB5	178,0	61,2	5,4
Sualtı	UKB10	171,3	58,9	5,1
	UKB15	150,3	51,7	4,5
	UKB20	188,3	64,7	5,7
	UKB25	532,0	57,5	5,0
	UKB30	551,7	59,6	5,2



Şekil 3.2 %5 Uçucu Kül İçeren ve 28 Gün Kirece Doygun Su İçinde Saklanan Numuneye ait Zaman-Birim Alanda Emilen Su Miktarı Grafiği

Kılcallık katsayısı aşağıdaki bağıntıdan elde edildi:

$$k = q^2/t \quad \longleftrightarrow \quad q^2 = k \times t \quad \longleftrightarrow \quad q = k^{1/2} \times t^{1/2} \quad \longleftrightarrow \quad k^{1/2} = q / t^{1/2} = m \quad (3.3)$$

Bu denklemlerde;

k: Kılcallık katsayısı (cm²/sn)

q: Birim alanda emilen su miktarı(Q/A)

t: süre (sn)

m: doğrunun eğimi olarak gösterilmektedir.

1., 4., 9., 16., 25., 36., 49., 64. dakikalardaki su emme değerlerinin (q), zamanın kareköküyle ($t^{1/2}$) değişiminden elde edilen ve şekil 3.2’de gösterilen doğrunun eğimi m olmak üzere, kılcallık katsayısı;

$$k = m^2 \quad (3.4)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplandı. Yukarıdaki örnekte kılcallık katsayısı:

$$k = m^2 = (0.0008)^2 \longrightarrow k = 6,4 \times 10^{-7} \text{ olarak belirlendi.}$$

Diğer betonlar için de hesaplanan k kılcallık katsayıları Tablo3.13 ile gösterilmektedir.

3.6.3 Gevreklik indisi, Poisson Oranı ve Hacimsel Deformasyon Hesabı

Betonların gevreklik indisleri, silindir numunelerin basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden elde edildi. Bunun için, numunelere bir kez yükleme, basınç dayanımının yaklaşık %90 değerine ulaşıldığında boşaltma ve ardından yeniden kırılana kadar yükleme yapıldı. Tüm bu süreçte içerisinde 10 kN arayla numunelerdeki enine ve boyuna şekil değiştirmeler ölçüldü. İlk yüklemede uygulanacak maksimum yük miktarı boyuna şekil değiştirmelerin artış oranlarına göre, deney sırasında belirlendi. Şekil değiştirmelerin önemli derecede arttığı, artarak hızlanmaya başladığında yük boşaltılmaya başlandı.

Bu deneyde elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 3.3'te şematik olarak gösterilmektedir. Bu yükleme boşaltma eğrileri histerisis eğrileri veya çevrimleri olarak adlandırılmaktadır. Betonun gevreklik indisi (G.İ.) basınç dayanımının %80-%100'ü arasında “tersinir deformasyon enerjisinin tersinmez deformasyon enerjisine oranı” şeklinde tanımlanır. Gevreklik indisi aşağıdaki denklemle belirlenir.

$$G.İ. = S_{II} / S_I \quad (3.5)$$

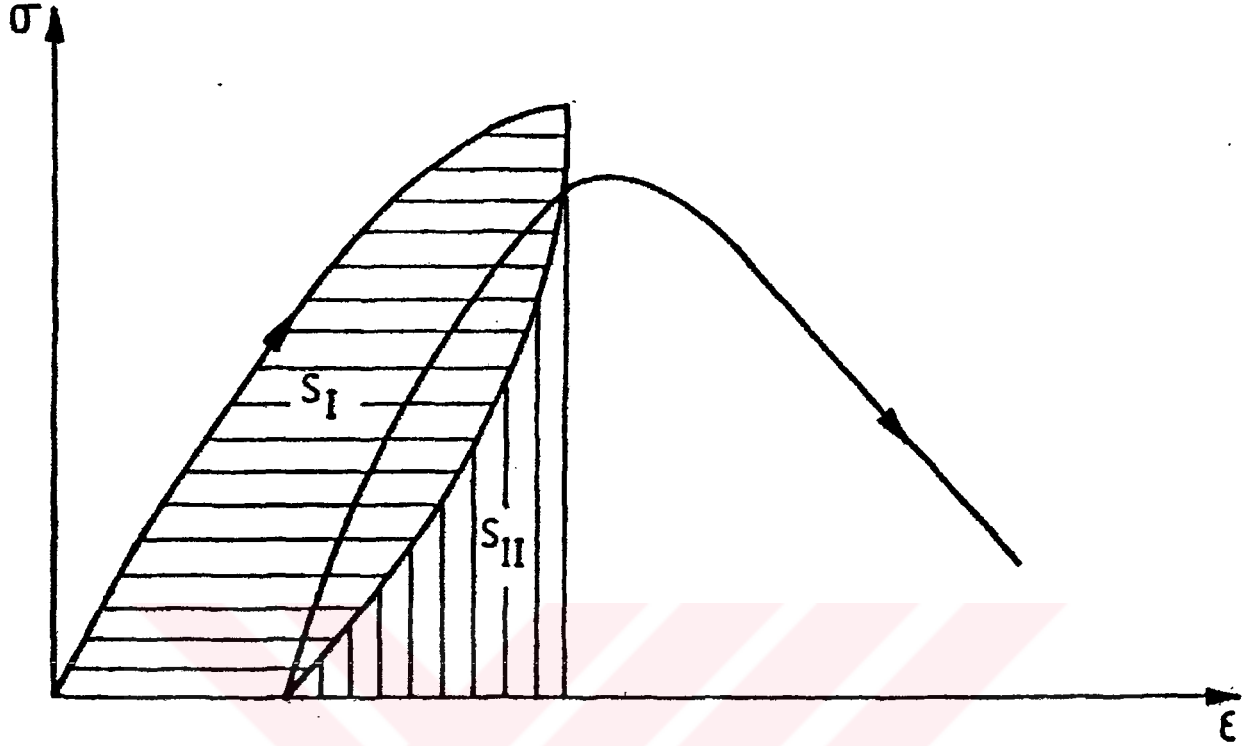
Şekil 3.3 'te gösterildiği gibi, S_I numunedeki hasara bağlı olarak tersinmez (kalıcı) deformasyon enerjisi, S_{II} ise tersinir (elastik) deformasyon enerjisidir.

S_{II} / S_I oranı sıfıra yaklaştıkça enerjinin tümü tersinmez, S_{II} / S_I oranı sonsuza yaklaştıkça enerjinin tümü tersinir olur. Gevreklik indisinin büyümesi, malzemenin gevrekliğinin arttığını gösterir.

Tablo 3.13 Betonların 35 Günlük Kılcallık Katsayılarının Ortalama Değerleri

Kılcallık Katsayıları (cm ² /sn)				
Uçucu Kül Yüzdesi(%)	Labaratuar Kılcallık katsayıları	Çuvalaltı Kılcallık Katsayıları	Sualtı Kılcallık Katsayıları	
0	1,7 x 10 ⁻⁶	8,1 x 10 ⁻⁷	4,9 x 10 ⁻⁷	
5	2,9 x 10 ⁻⁶	1,2 x 10 ⁻⁶	6,4 x 10 ⁻⁷	
10	1,8 x 10 ⁻⁶	1,0 x 10 ⁻⁶	1,0 x 10 ⁻⁶	
15	5,2 x 10 ⁻⁶	2,4 x 10 ⁻⁶	2 x 10 ⁻⁶	
20	3,6 x 10 ⁻⁶	1,2 x 10 ⁻⁶	6,4 x 10 ⁻⁷	
25	2,2 x 10 ⁻⁶	7,7 x 10 ⁻⁷	2,5 x 10 ⁻⁷	
30	3,2 x 10 ⁻⁶	9,6 x 10 ⁻⁷	4,8 x 10 ⁻⁷	

Gevreklik indisinin hesaplanmasında kullanılacak olan S_{II} ve S_I alanlar, planimetre denilen bir alet yardımıyla belirlenmiştir.



Şekil 3.3 Gerilme - Boyuna Deformasyon İlişkisi ve Betonun Gevrekliği

Boşaltma ve yeniden yükleme eğrilerinin birbirine yaklaşması arayüzeyin daha iyi olduğunu ve agregaların beton ile iyi aderans sağladığını gösterir.

Bunun yanısıra numunelerin poisson oranları belirlenerek, bunların grafikleri çizildi. Poisson oranları(γ), her yükleme kademesindeki enine deformasyonun(ϵ_e) boyuna deformasyona(ϵ_b) oranı ile bulundu. Bu oran aşağıdaki denklemde verilmektedir.

$$\gamma = \epsilon_e / \epsilon_b \quad (3.6)$$

Belirli bir gerilme değerinden sonra basınç yükleri altında betonun hacmi artmaya başlar. Kısa süreli tek eksenli basınç altında ϵ_b boyuna ve ϵ_e enine şekil değiştirmeleri gösterdiğine göre ve daha yüksek merteye terimler ihmal edilerek birim hacimsel şekil değiştirme denklem (3.7) ile hesaplandı.

$$\Delta V/V_0 = \epsilon_b - 2\epsilon_e \quad (3.7)$$

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen ϵ_b ve ϵ_e değerleri (3.7) denkleminde yerine konularak bulunan birim hacimsel şekil değiştirmelerin $(\Delta V / V_0)$ minimumdan geçtiği gerilme değeri önem taşımaktadır. Çalışmada elde edilen gerilme – hacimsel değişirme grafikleri ekler bölümünde verilmektedir.



4.DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Bu bölümde deney sonuçlarının değerlendirilmesi yapıldı. Çayırhan uçucu külü içeren betonlara uygulanan kürün beton özelliklerine etkileri irdelendi.

4.1 Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Üretilen her seri beton için su / bağlayıcı(çimento+uçucu kül) oranı 0.55’de sabit tutuldu. Betonların taze haldeki işlenebilme değeri 12-15 cm arasında tutuldu. Bunu sağlamak için süper akışkanlaştırıcı bir katkı maddesi kullanıldı. Agregas karışım oranları da bütün serilerde sabit tutuldu.

Beton birim ağırlıkları uçucu kül oranındaki artış ile bir miktar düşme göstermektedir. Bu da uçucu külün taze beton özellikleri üzerine yapmış olduğu bir etki olarak göze çarpmaktadır.Yapılan deneylerde uçucu kül oranının artmasıyla betonun işlenebilmesinin de arttığı gözlenmiştir.

4.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

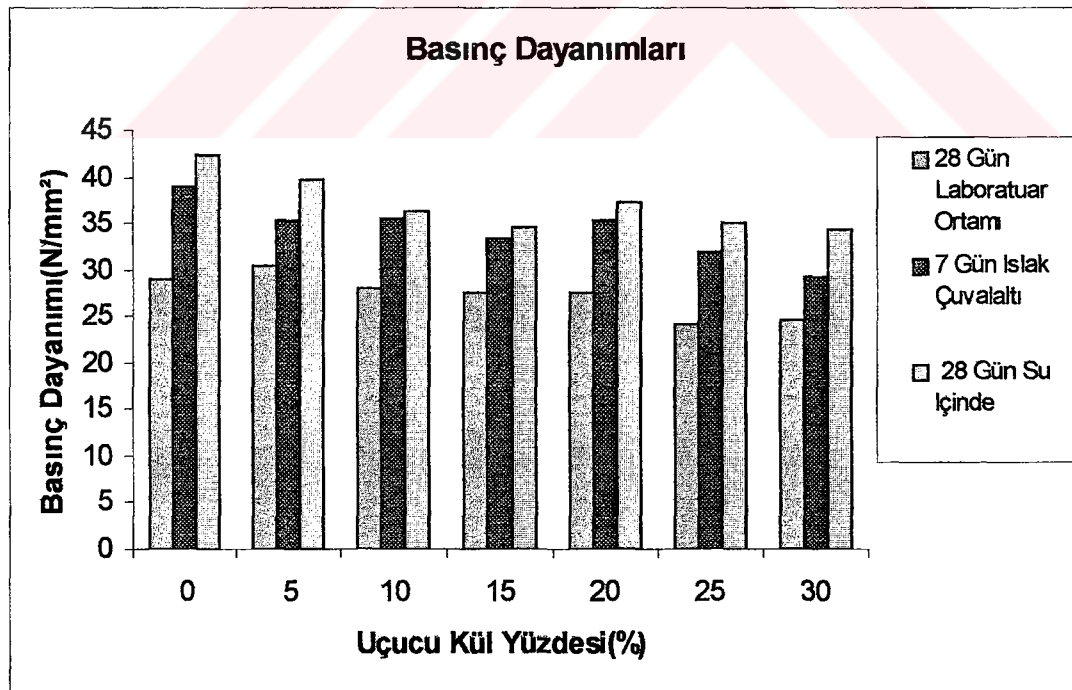
4.2.1 Basınç Dayanımı Sonuçlarının İrdelenmesi

Silindir basınç deneyleri 3 adet numune üzerinde yapıldı ve bunların ortalaması alındı. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.1 ‘de ve şekil 4.1 ve şekil4.2’de gösterilmektedir.

Tablo 4.1 Silindir Basınç deneyleri sonucunda elde edilen basınç dayanım değerleri

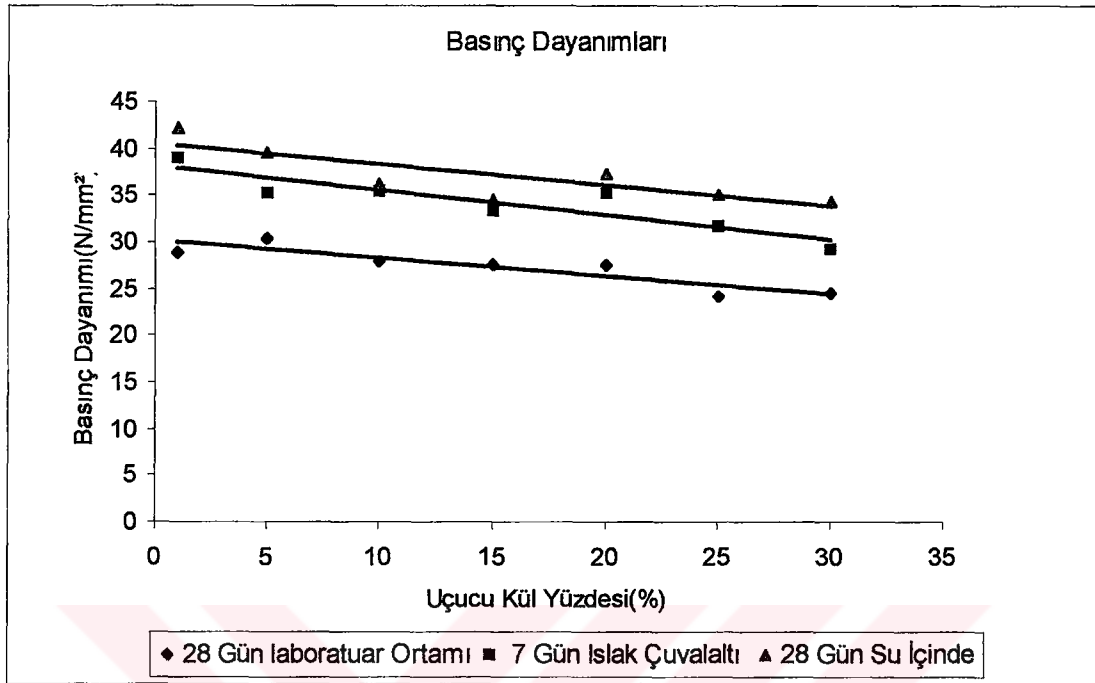
Uçucu Kül Yüzdesi(%)	28 Gün Laboratuar Ortamı Basınç Dayanımları (N/mm ²)	7 Gün Islak Çuvalaltı Basınç Dayanımları (N/mm ²)	28 Gün Su İçinde Basınç Dayanımları (N/mm ²)
0	28,91	38,95	42,25
5	30,4	35,26	39,62
10	28,02	35,52	36,28
15	27,56	33,4	34,59
20	27,47	35,18	37,3
25	24,17	31,75	35,09
30	24,47	29,29	34,37

Silindir basınç dayanımlarının grafikte ifadesi aşağıdaki Şekil4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 28 Günlük Silindir Basınç Dayanımlarının Karşılaştırılması

Aynı sonuçların ışığında basınç dayanımları arasındaki ilişki lineer doğru olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.2 28 Günlük Silindir Basınç Dayanımları

Eğilmeden kalan prizma numune parçaları üzerinde yapılan deneylerde ise aynı şekilde iki parçanın ortalaması alındı. Bu deney sonuçları Tablo4.2’de ve Şekil4.2’te görülmektedir.

Silindir basınç dayanımları %5, %10 uçucu kül içeren ve kür uygulanan numunelerde uçucu kül içermeyen kontrol betonuna yakın veya %5 civarında azalmalar göstermiştir. %30’a kadar uçucu kül içeren numunelerde ise %15 civarında azalmalar olmuştur. 7 gün çuvalaltı ve 28 gün su altında bekletilen numuneler birbirine yakın dayanımlar göstermektedir.

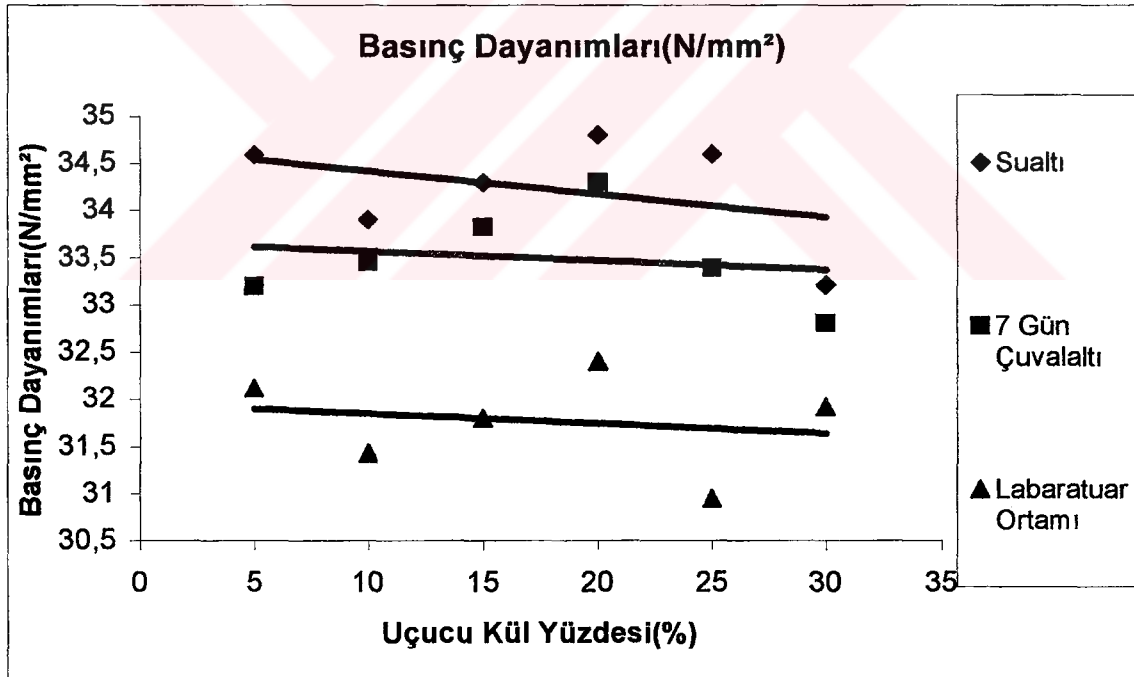
Eğilmeden kalan parçalar üzerinde yapılan basınç dayanımı deneylerinde ise, 28 gün kirece doymun su içinde tutulan numuneler dayanımlarıyla 7 gün çuvalaltı kürü uygulanan numunelerin dayanımları birbirine yakın dayanımlar göstermektedir.

Bu prizma parçaları üzerinde, uçucu kül miktarını artmasıyla basınç dayanımlarında %0 - %30 arasında uçucu kül kullanılan numunelere kadar, %5 ila %10 arasında değişen oranlarda azalmalar olmuştur.

4.2 Prizmadan Kalan Parçalar Üzerinde Yapılan 28 Günlük Basınç Deneyi Sonuçları

Basınç Dayanımları(N/mm ²)			
Beton Cinsi	28 Gün Su İçinde	7 Gün Islak Çuvalaltı	28 Gün Labo ratuar Ortamı
NB	34,59	33,2	32,12
UKB5	33,9	33,45	31,43
UKB10	34,3	33,82	31,8
UKB20	34,8	34,3	32,4
UKB25	34,60	33,39	30,95
UKB30	33,21	32,8	31,92

Bu numuneler üzerinde yapılan basınç deneyinin sonuçlarının uçucu kül yüzdesiyle değişimi Şekil4.3'te gösterilmiştir.



Şekil4.3 Prizma Parçaları Üzerinde Yapılan 28. Günde Basınç Deneyi Sonuçlarının Uçucu Kül yüzdesiyle Değişimi

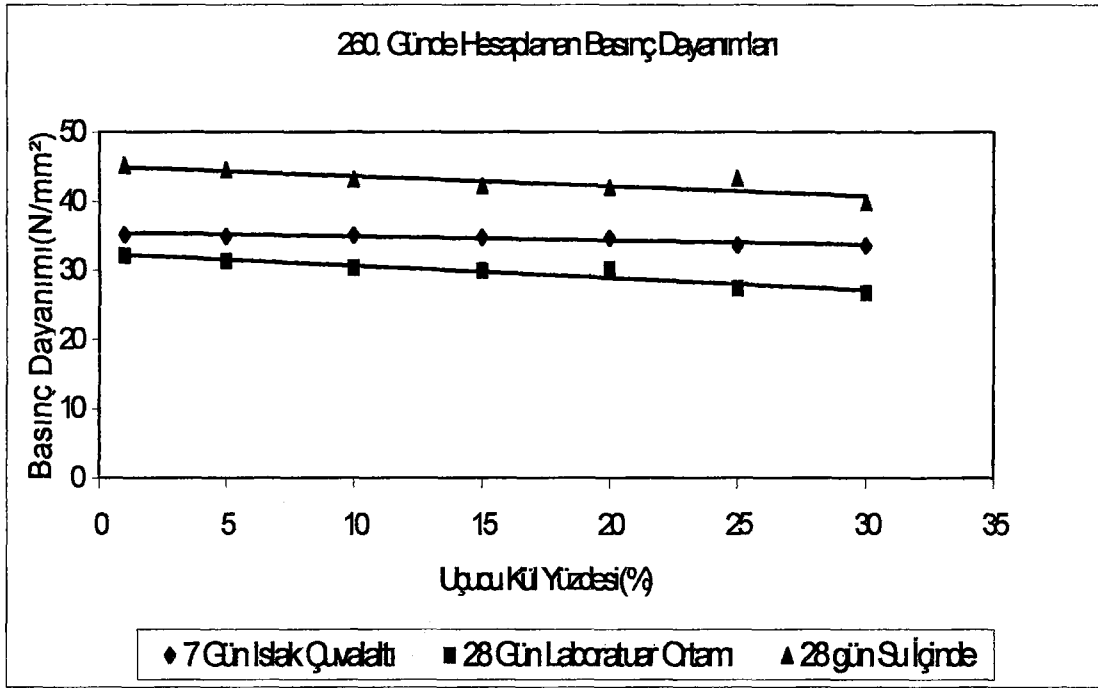
70mmx70mmx280mm boyutlarındaki prizmaların 4 parçaya bölünmesiyle yapılan 260 günlük basınç dayanım deneylerinde, 7 gün ıslak çuvalaltında bekletilen

numunelerin dayanımlarında önemli bir değişiklik olmamıştır. Laboratuvar ortamında tutulan numunelerde ise, %0- %15 arasında azalmalar olmuştur. 28 gün sualtında bekletilen numunelerde %0-%11 oranlarında azalmalar olmuştur. Elde edilen dayanımlar Tablo 4.2.a ve Şekil 4.3.a 'te gösterilmiştir.

Tablo 4.2.a 260 Günlük Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Uçucu Kül Yüzdesi	Basınç Dayanımları (N/mm ²)		
	7 Gün Islak Çuvalaltı	28 Gün Laboratuvar Ortamı	28 Gün Sualtı
0	35,18	32,11	45,16
5	34,94	31,28	44,53
10	35,06	30,3	43,12
15	34,79	29,91	42,21
20	34,7	30,19	41,9
25	33,6	27,35	43,3
30	33,54	26,69	39,79

260 günlük değişik kür koşullarında basınç dayanımı sonuçlarının grafikte ifadesi aşağıda verilmektedir.



Şekil 4.3.a 260 Günlük Basınç Dayanımlarının Uçucu Kül Yüzdesi ile Değişimi

4.2.2 Eğilme Dayanım Sonuçlarının İrdelenmesi

70mmx70mmx280mm'lik prizma numuneleri üzerinde yapılan eğilme deneylerinde 20 kN'luk ring kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda uçucu kül miktarının artmasıyla beraber eğilme dayanımlarında artış gözlenmektedir. Üretilen betonlar içerisindeki uçucu kül miktarının artışı, eğilme dayanımı üzerinde %10 ila %20 arasında dayanım artışlara neden olmaktadır.

Betonlar üzerinde kür koşullarının etkisini incelediğinde, 7 gün çıvaltı ve 28 gün kirece doygun su altında saklanan numunelerin dayanımlarının birbirine yakın olduğu, laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin ise bunların bir miktar daha altında kaldığı görüldü. Yapılan deneyler sonucunda elde ettiğimiz eğilme değerleri Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Grafiklerde de görüldüğü üzere üretilen betonlarda uçucu kül yüzdesinin artmasıyla birlikte basınç dayanımlarının %10 ila %15 arasında değişen oranlarda düşmeler gösterdiği ortaya çıkmıştır.

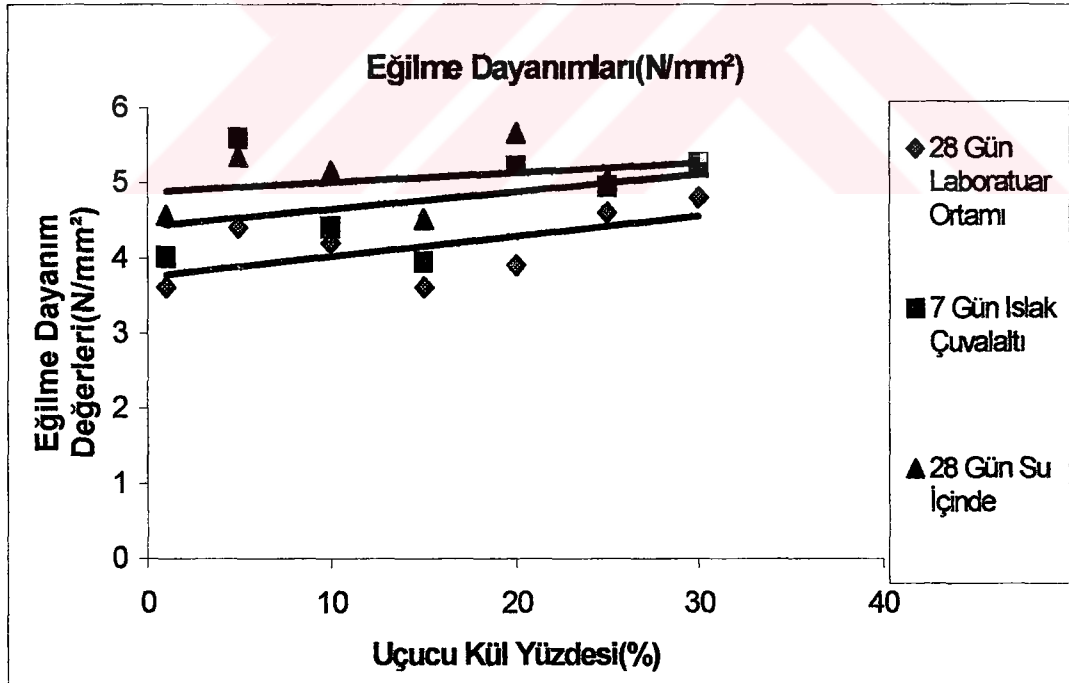
Eğilmeden kalan parçalar üzerinde yapılan basınç deneyleri de silindir numunelere yakın sonuçlar vermiştir. Prizmalar üzerinde yapılan eğilme dayanımları test

sonuçlarına göre, üretimdeki uçucu kül miktarı arttıkça eğilme dayanımlarında önemli bir değişiklik olmamıştır.

Tablo4.3 Prizma Numuneler Üzerinde Yapılan 28 Günlük Eğilme Deneyi Sonuçları

Eğilme Dayanımları(N/mm ²)			
Beton Cinsi	28 Gün Laboratuar Ortamı	7 Gün Çuvalaltı	28 Gün Su İçinde
NB	3,6	4,0	4,6
UKB5	4,4	5,6	5,4
UKB10	4,2	4,4	5,1
UKB15	3,6	3,9	4,5
UKB20	3,9	5,2	5,7
UKB25	4,6	4,9	5,0
UKB30	4,8	5,2	5,2

Eğilme dayanımlarının uçucu kül yüzdesiyle değişimi Şekil 4.4'te ve Tablo4.4'te görülmektedir. Eğilme dayanımları uçucu kül içeriğindeki artış ile yatay bir seyir izlemektedir.



Şekil 4.4 28 Günlük Eğilme Dayanımlarının Uçucu Kül Yüzdesiyle Değişimi.

4.2.3 Kılcallık Katsayılarının Değerlendirilmesi

Üretilen betonlara betonun 35 günde kılcallık deneyi uygulandı ve kılcallık katsayıları bulundu.

Deney sonuçlarına göre, Labaratuar ortamında bekletilen numunelerin kılcallık katsayılarının yüksek, 7 gün çuvalaltı ve 28 gün kirece doymun su içinde bekletilen numunelerde ise daha düşük olduğu görüldü.

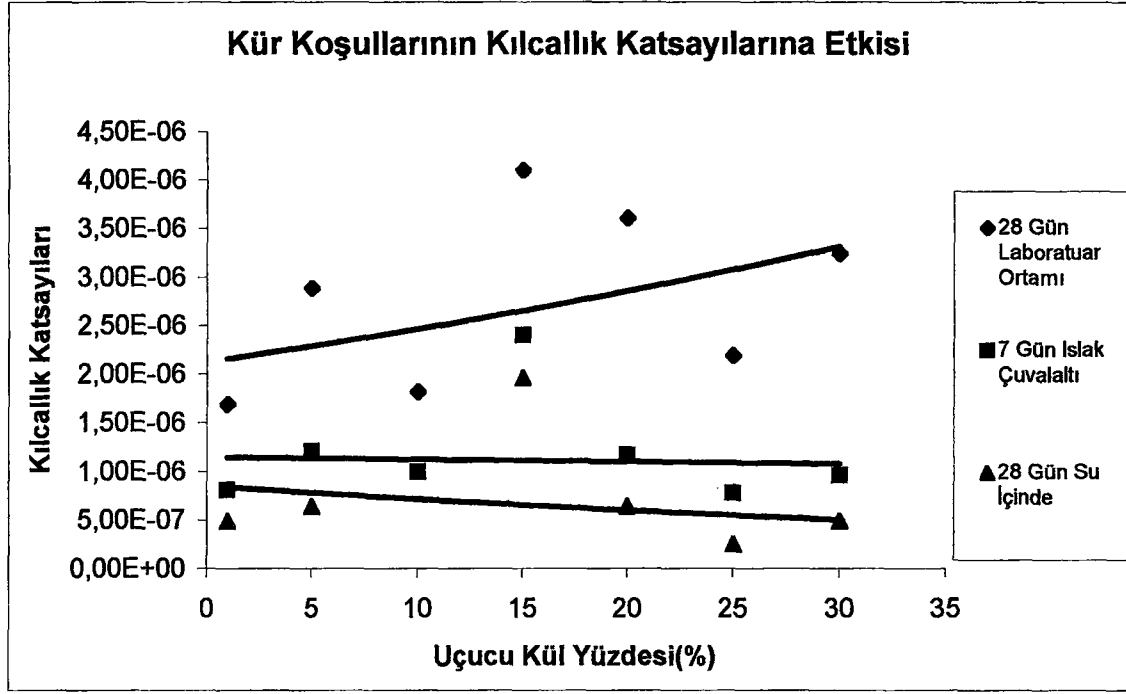
Labaratuar ortamında bekletilen numunelerde, uçucu kül miktarının artmasıyla kılcallık katsayısında artış gözlemlendi. Bunun nedeni, puzolanik reaksiyon için gerekli suyun buharlaşma yoluyla betonu terketmesidir.

7 gün çuvalaltı ve 28 gün sualtı numunelerinde ise uçucu kül miktarının artmasıyla , kılcallık katsayısında azalma olmuştur. Bunun nedeni ise kür uygulanan bu numunelerin içindeki uçucu külün reaksiyonu için gerekli olan ortamda tutulmuş olmasıdır. Kılcallık katsayıları ve uçucu kül yüzdesiyle değişimi Tablo4.4 ve Şekil4.5'te gösterilmektedir.

Tablo4.4 35. Günde Kılcallık Katsayılarının Değişik Ortamlardaki Değerleri

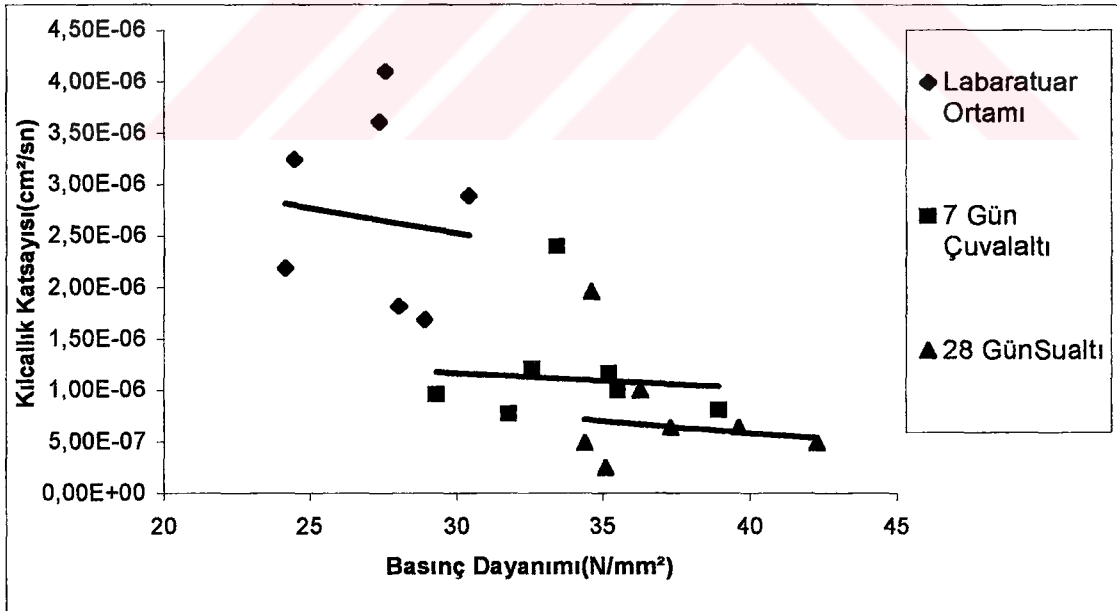
Kılcallık Katsayıları(cm ² /sn)			
Uçucu Kül Yüzdesi(%)	28 Gün Laboratuar Ortamında	7 Gün Islak Çuvalaltı	28 gün Su İçinde
0	1,69E-06	8,10E-07	4,90E-07
5	2,89E-06	1,21E-06	6,40E-07
10	1,82E-06	1,00E-06	1,00E-06
15	5,20E-06	2,40E-06	1,96E-06
20	3,61E-06	1,17E-06	6,40E-07
25	2,19E-06	7,74E-07	2,50E-07
30	3,24E-06	9,60E-07	4,90E-07

Değişik kür koşulları altındaki uçucu kül içeren betonların uçucu kül yüzdesiyle değişimi aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.5 35, Günde Değişik Kür Koşullarında Kılcallık katsayısının Uçucu Kül Yüzdesiyle Değişimi

Aşağıdaki grafikte ise kılcallık katsayısının değişik kür koşullarındaki numunelerin basınç dayanımı ile değişimi görülmektedir.



Şekil4.6 35. Günde Kılcallık Katsayısının Basınç Dayanımı ile Değişimi

260. günde yapılan kılcallık deneyleri yapıldı. Deneyler sonunda, kılcallık katsayılarında 35. Güne göre artışlar gözlemlendi. Deney sonuçları aşağıdaki Tablo 4.6 ve Şekil4.8’de gösterilmiştir.

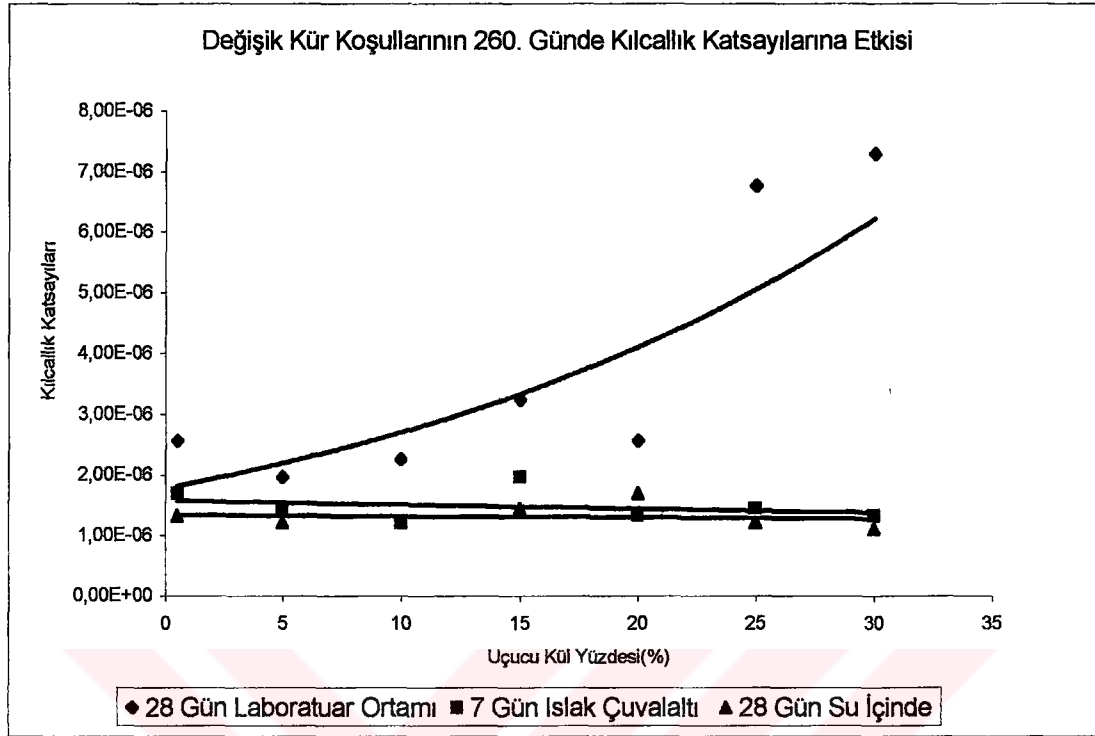
Tablo 4.5 260. Gündeki Kılcallık Katsayıları

Uçucu Kül Yüzdesi(%)	Kılcallık Katsayıları(N/mm ²)		
	28 Gün Laboratuar Ortamı	7 Gün Islak Çuvalaltı	28 Gün Su İçinde
0	2,56E-06	1,69E-06	1,32E-06
5	1,96E-06	1,44E-06	1,21E-06
10	2,25E-06	1,21E-06	1,21E-06
15	3,24E-06	1,96E-06	1,44E-06
20	2,56E-06	1,33E-06	1,69E-06
25	6,76E-06	1,44E-06	1,21E-06
30	7,29E-06	1,32E-06	1,10E-06

Deneyler sonucunda kılcallık katsayılarının değişimine baktığımız zaman laboratuar ortamındaki numunelerde uçucu kül oranının artmasıyla kılcallık katsayılarında artış gözlenmiştir.

7 gün ıslak çuvalaltı ve 28 gün kirece doymun sualtında bekletilen numunelerde ise uçucu kül miktarının artışı kür uygulanmasının sonucunda kılcallık katsayılarında azalmalara neden olmaktadır.

260. günde kılcallık katsayıları ile uçucu kül yüzdesinin değişimi aşağıdaki grafikte verilmiştir.



Şekil 4.7 260. Günde Kılcallık Katsayılarının Uçucu Kül Yüzdesiyle Değişimi

İlerleyen zamanda kül kullanımının kür uygulamasıyla desteklendiğinde, kılcal geçirimsizliğe karşı olumlu sonuç verdiği görüldü.

4.2.4 Gevreklik İndislerinin Değerlendirilmesi

Yapılan üretimlerden her birinde 28 gün sualtında bekletilen 4 numunede gevreklik indisi hesaplanarak ortalamaları alındı. 7 seri beton üretiminin sonunda toplam 28 adet gevreklik indisi hesabı yapıldı.

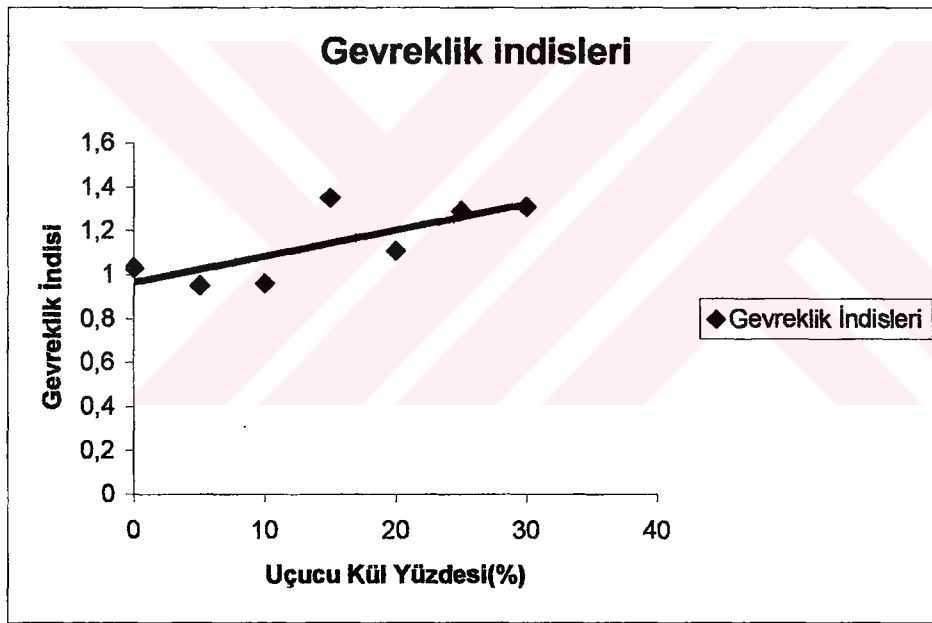
Deney sonunda gevreklik indisinin uçucu kül yüzdesinin artışıyla birlikte arttığı ve agregaların ara yüzeylerinin uçucu kül ilavesiyle iyileştiği görüldü.

Uçucu kül yüzdesi ile gevreklik indisinin değişimi ile ilgili sonuçlar Tablo4.6'te görülmektedir.

Tablo4.6 Gevreklik indisinin uçucu kül yüzdesiyle Gösterimi

Uçucu Kül Yüzdesi	Gevreklik İndisleri
0	1,03
5	0,95
10	0,96
15	1,35
20	1,11
25	1,29
30	1,31

Gevreklik indisinin uçucu kül yüzdesiyle değişiminin grafik ifadesi de Şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.8 Gevreklik İndisinin Uçucu Kül Yüzdesiyle Değişimi

5. GENEL SONUÇLAR

5.1 Taze Beton Özellikleri

Betondaki uçucu kül içeriğinin artmasıyla betonların birim ağırlıklarında azalma gözlemlendi.

Üretimlerde uçucu kül miktarının artmasının işlenebilmeyi arttırdığı görüldü.

5.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri

5.2.1 Basınç Dayanımları

Seri betonlar üzerinde yapılan 28 günlük silindirik basınç dayanımlarının uçucu kül içeriği arttıkça düştüğü gözlemlendi. %5-%20 uçucu kül içeren betonların dayanımlarda %5 ila %15 arasında, %25, %30 uçucu kül içeren betonların dayanımlarında ise %10 ila %20 arasında düşmeler saptandı.

Eğilme deneyinden kalan parçalar üzerinde yapılan basınç deneyinden, elde edilen sonuçlar, silindirik numuneye göre daha yakın çıktı. Kül miktarının artmasıyla dayanımlarda daha az bir düşme gözlemlendi.

7 gün ıslak çuvalaltında bekletilen numuneler ile 28 gün kirece doymun su içinde saklanan numunelerin dayanımları birbirine çok yakın bulundu. Islak çuvalaltında tutulan numunelerin basınç dayanımları su içinde tutulan numunelerin basınç dayanımlarının %90 ila %95 oranında olduğu görüldü.

Labaratuar ortamı, 7 gün ıslak çuvalaltı ve 28 gün kirece doymuş su içinde bekletilen numunelerde, 260. Günde yapılan basınç deneylerinde kür uygulanmasının etkisi açıkça görüldü. 70mmx70mmx70mm boyutlarındaki numuneler üzerinde yapılan basınç dayanım deneyi sonuçları, 28 günlük basınç dayanımları ile karşılaştırıldığında, 7 gün ıslak çuvalaltında bekletilen ve laboratuvar ortamında tutulan numunelerin dayanımlarında önemli bir değişiklik olmazken, kirece doymuş su içinde bekletilen numunelerin dayanımlarında artışlar gözlemlendi.

5.2.2 Eğilme dayanımları

Üretilen 70mmx70mmx280mm boyutlarındaki prizma numuneler üzerinde yapılan 28 günlük eğilme deneyi sonuçlarında, dayanımların, uçucu kül miktarı ile yatay kaldığı görüldü. Bunun sebebi ise uçucu kül kullanımıyla agrega ara yüzeylerini kür uygulanmasının da etkisiyle iyileşmesi ve dayanımın yatayda tutulmasını sağlaması olarak açıklanabilir.

Kür uygulanması sonucu 7 günlük ıslak çuvalaltında ve 28 gün kirece doymuş su içinde tutulan numunelerde yakın dayanımlar, laboratuvar ortamında tutulan numunelerde ise daha düşük dayanımlar elde edildi.

5.2.3 Kılcallık Katsayıları

Yapılan deneyler sonucunda betonların kılcallık katsayıları hesaplandı. Değişik ortamlarda bekletilen numuneler, üzerinde deneyler yapıldı.

Labaratuar ortamında bekletilen numunelerde, beton içerisindeki uçucu kül yüzdesinin artmasıyla kılcallık katsayılarında yükselme gözlemlendi.

7 gün ıslak çuvalaltında ve 28 gün kirece doymuş su içinde tutulan numunelerin kılcallık katsayıları içerdikleri uçucu kül miktarının artmasıyla azaldı. Bunu temel nedeni ise, uçucu külün içinde bulunduğu suya doymuş ortamlarda reaksiyona girerek, beton içerisindeki boşlukları tıkanmasıdır. Kür uygulanan bu betonların üzerinde kürün olumlu etkisi gözlemlenmiştir.

260. günde yapılan kılcallık deneyleri sonucunda kılcallık katsayılarının laboratuvar ortamındaki numunelerde uçucu kül oranının artmasıyla yükseldiği gözlemlendi.

7 gün ıslak çuvalaltı 21 gün laboratuvar ortamı ve 28 gün kirece doygun su içinde bekletilen numunelerde ise uçucu kül miktarının artışı ile kılcallık katsayılarının azaldığı görüldü.

5.2.4 Gevreklik İndisleri

Bu deney, 28 gün kirece doygun su içinde bekletilen numunelerden üzerinde her seri için 4 numune üzerinde yapıldı. Yapılan deneyler sonucunda, uçucu kül miktarının artmasıyla, gevreklik indislerinin dolayısıyla betonun gevrekliğinin arttığı sonucuna varıldı. Gevreklik indislerinin artmasıyla betonların gevreklikleri artmıştır.



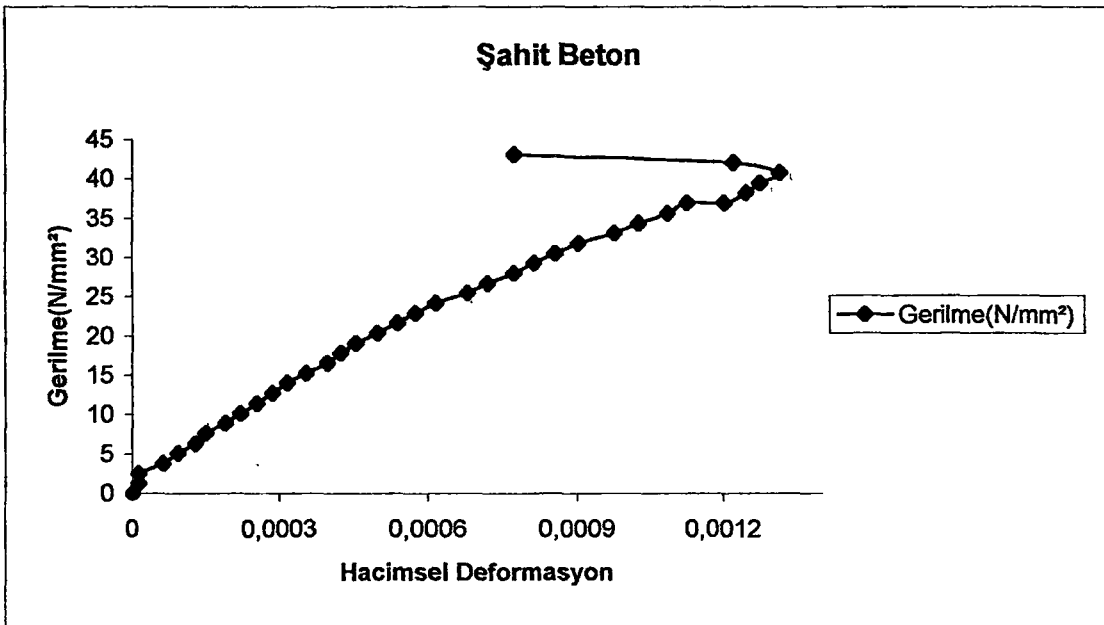
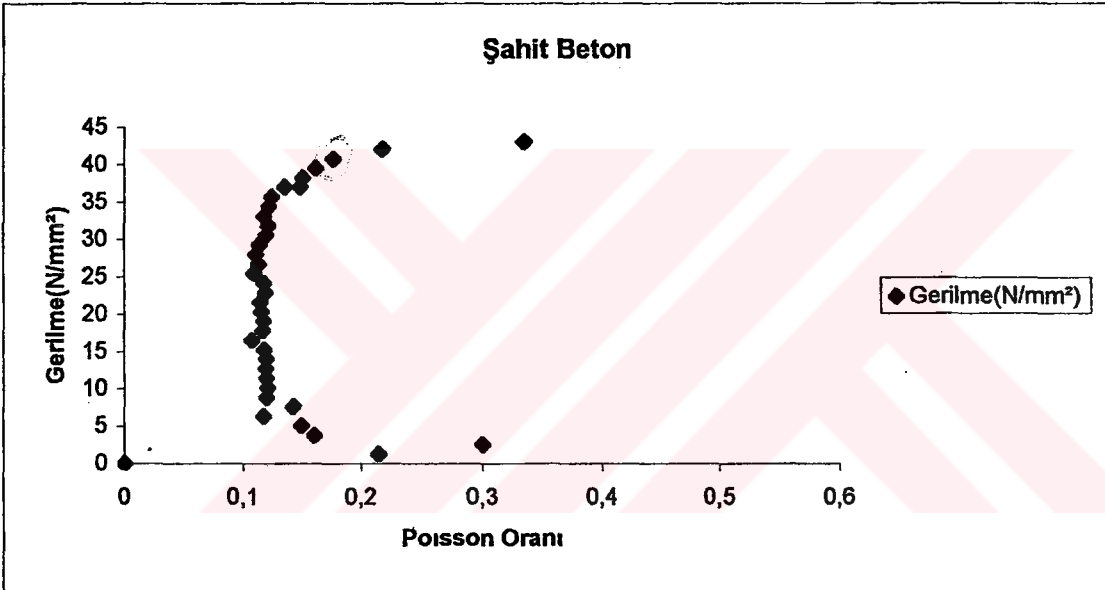
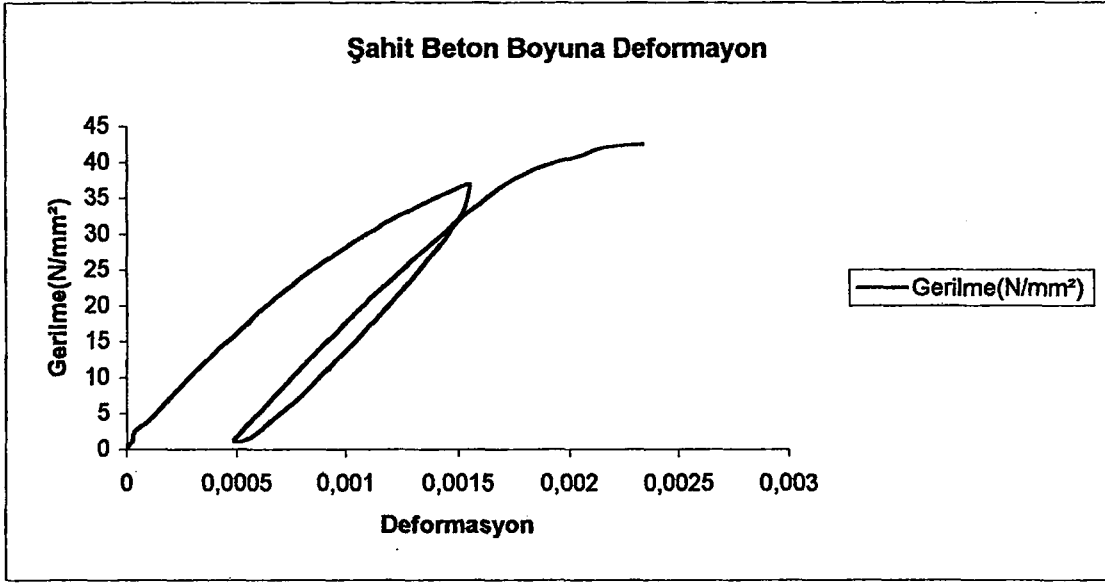
KAYNAKLAR

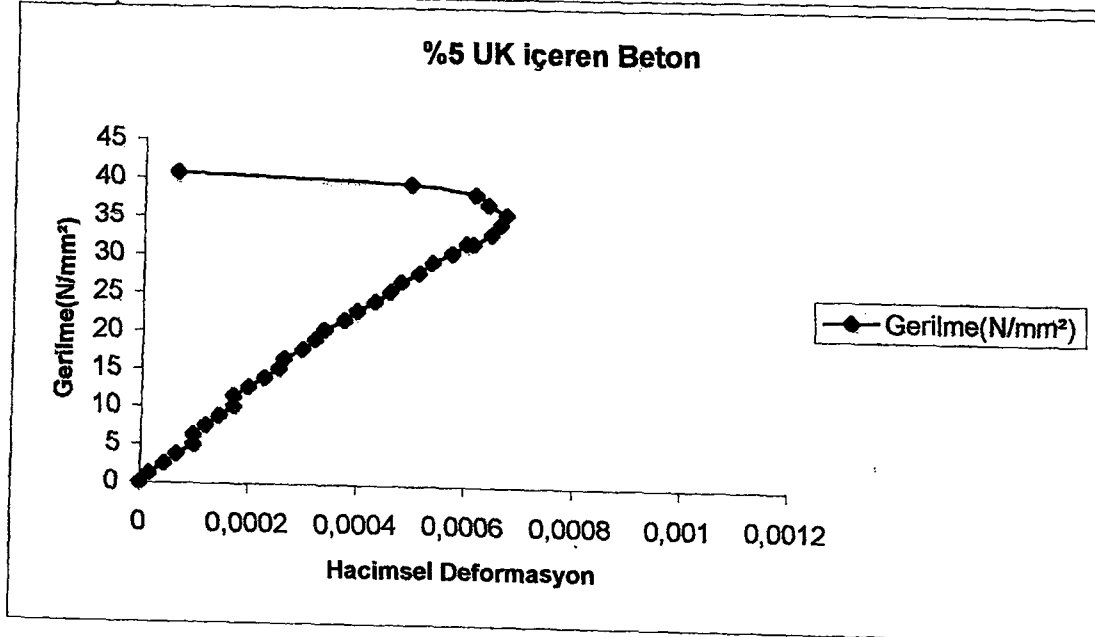
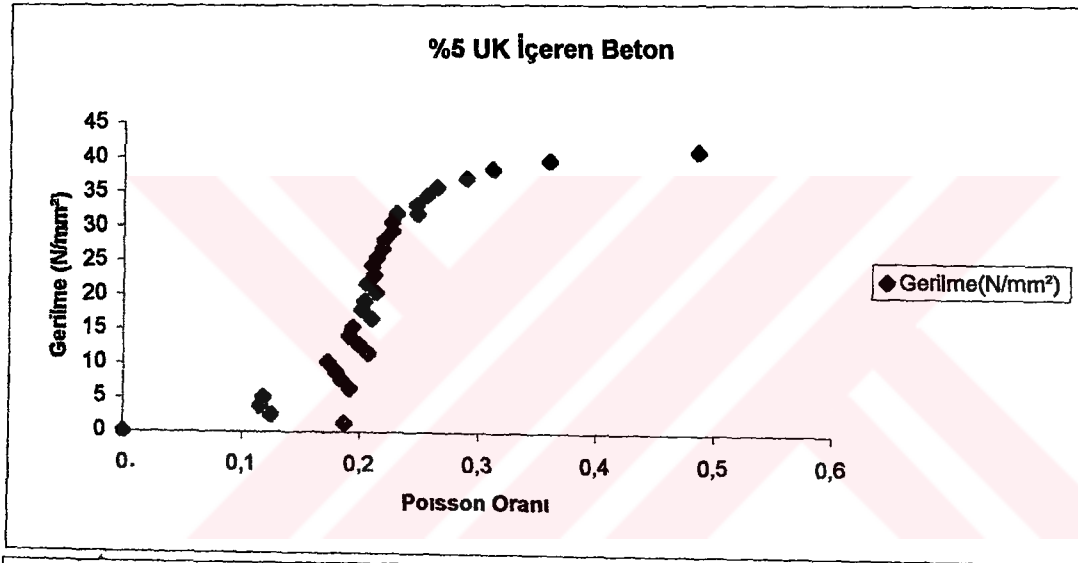
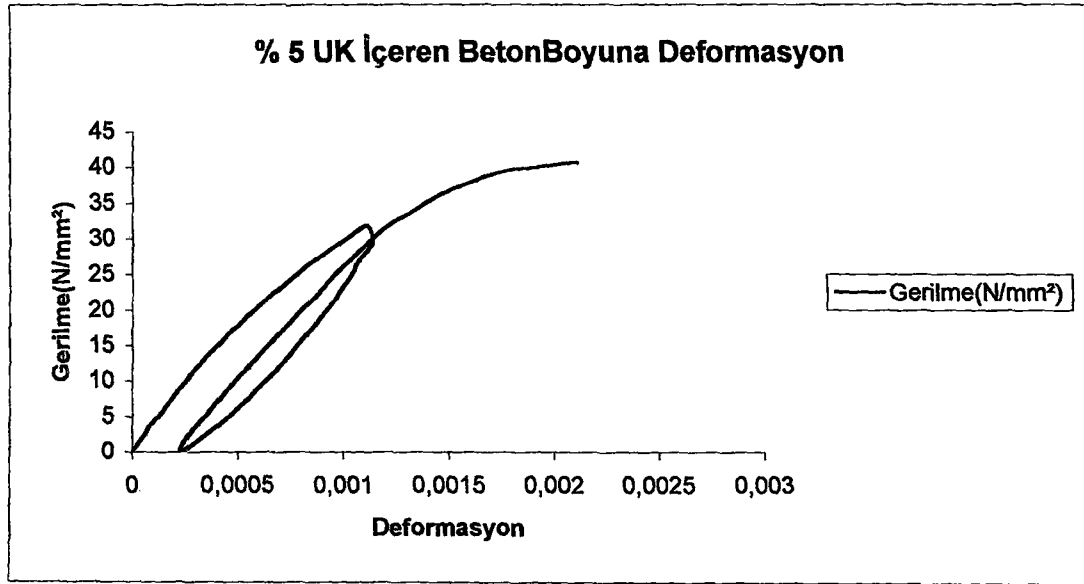
- [1] **Özbayoğlu Fahri Uluç**, Uçucu Küllerin Betonit, kireç ve Çimento Kartkılılarıyla Kumlu Zeminlerin Stabilizasyonunda Kullanımı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması 1993
- [2] **Özturan Turan**, Uluslararası IV. CANMET-ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf ve Doğal Pozolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması 1993
- [3] **Postacioğlu Bekir**, Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar Cilt-2
- [4] **Akman Süheyl**, Yapı Malzemeleri İTÜ inşaat Fakültesi
- [5] **Postacioğlu Bekir**, Yapı Malzemesi Dersleri Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton İTÜ İnşaat Fakültesi.
- [6] **Mehta P.K.** Natural Pozzolans Department of Civil Engineering, University of California Berkeley, California USA
- [7] **Postacioğlu Bekir**, Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar Cilt-1
- [8] **Erdoğan Turhan**, Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın cürufu, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması 1993
- [9] **E.İ.E.** Genel Müdürlüğü Yayını Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanılma Olanakları
- [10] **Kural Orhan**, Kömür Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri 1998
- [11] **INTRON Institute for Material and Enviromental Research B.V.** Fly -Ash As Addition to Concrete
- [12] **Kural Orhan**, Kömür 1991
- [13] **TSE 639** Uçucu Kül
- [14] **Yıldırım Bekir, Kuloğlu Necati, Güngör Mustafa** Afşin Elbistan Uçucu Külünün Asfalt Betonu Kaplamalarında Kullanılması, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması 1997 Eskişehir

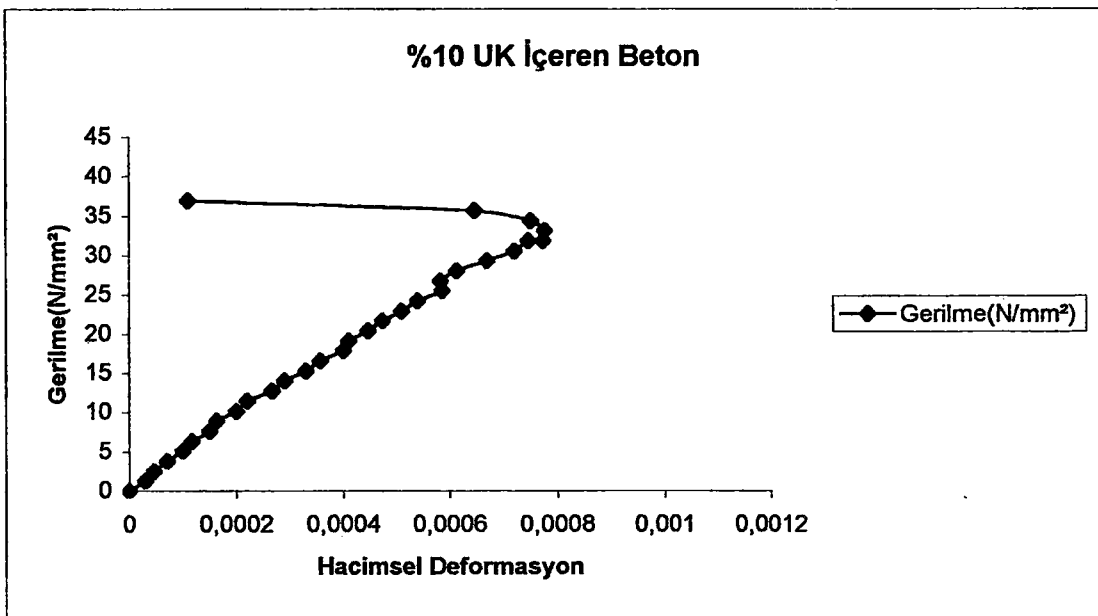
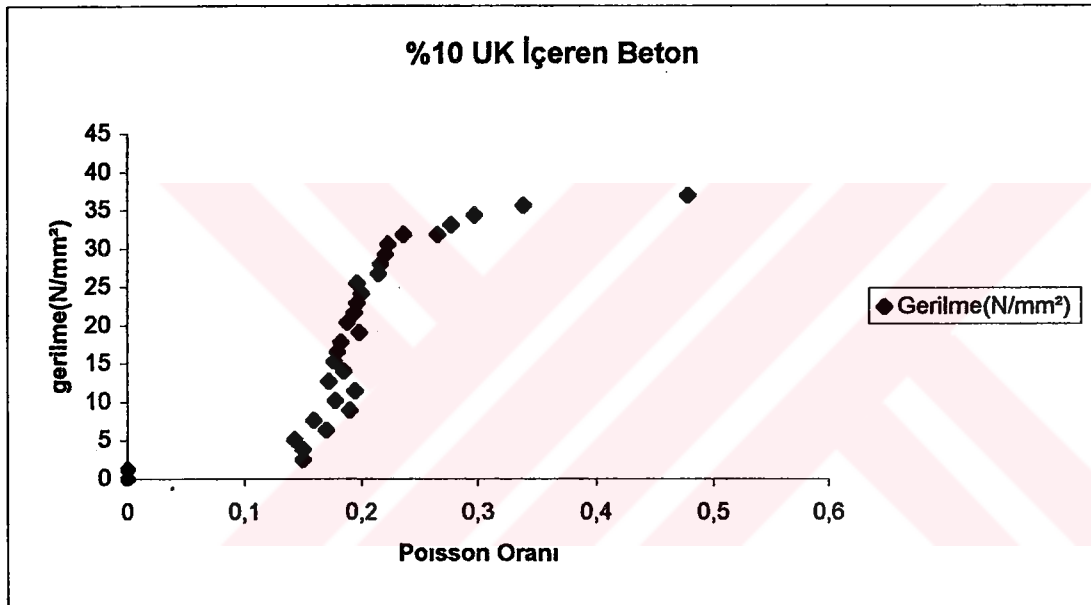
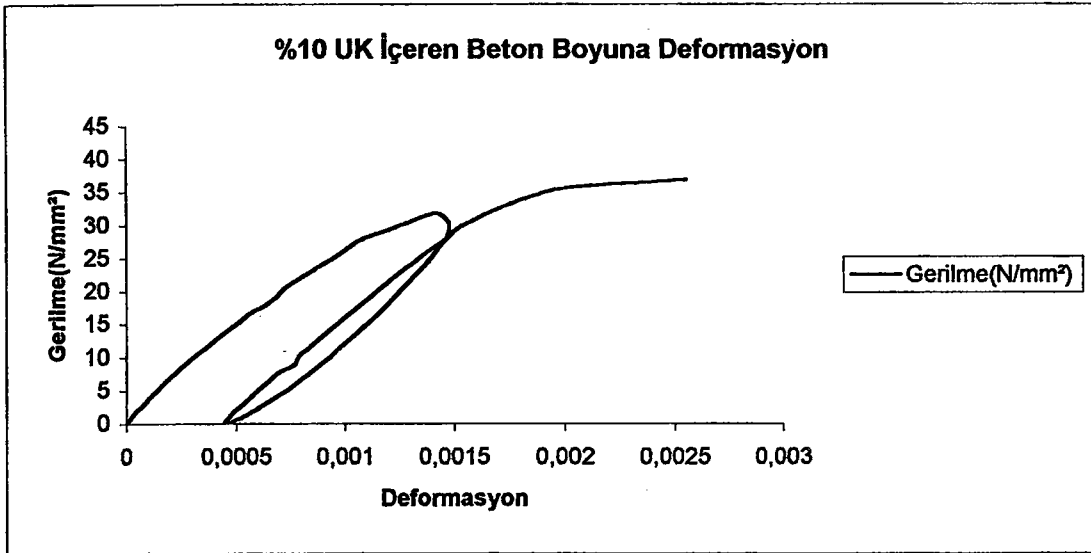
- [15] **Tokyay Mustafa**, Betonda Uçucu Kül Kullanımı (Türkiye Deneyimi) Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması 1993
- [16] **Turanlı Lütfullah, Erdoğan Turhan, Koraer Kutlan, Çayırhan Uçucu Külünün Portland Çimentosu-Uçucu Kül Hamur ve Harçların Özelliklerine Etkileri Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması 1997 Eskişehir**
- [17] **Berry,E.E., Malhotra V.M.**, Fly Ash in Concrete, Mineral sciences Laboratory Canmet February 1986
- [18]. **Munday John G.L., Ong T.Lean**, Mix Proportioning of Concrete with PFA a Critical Rewiew
- [19] **Mehta P.K.**, Pozzolanitic and Cementitious by Products as Mineral Admixture For Concrete
- [20] **Massazza F., Costa U.**, Some Properties of Pozzolanitic cements containing Fly Ashes
- [21] **Prepared by The University of Wisconsin- Milwaukee**, High Volume Fly Ash Concrete Tecnology
- [22] **Tokyay Mustafa, Erdoğan Korhan**, Cüruf ve Cürufllu Çimentolar Mayıs 1997
- [23] **Akman Süheyl, Erdinç Mehmet** Uçucu Küllü Betonlarda Klor Geçirimliliği Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması 1997 Eskişehir
- [24] **Saçaklı Emel**, Kömür Yakılan Kazanda ve sobada Ağır Metal Emisyonlarının İncelenmesi İTÜ Kimya Fakültesi
- [25] **Akman M.Süheyl, T.Yücel Kemal**, Efficiency Factors of Turkish C Class ly Ashes İstanbul Technical University
- [26] **Taşdemir Mehmet Ali**, A Report on Properties of Turkish Fly Ashes, ITU Civil Engineering Faculty
- [27] **TSE 640 Uçucu Küllü Çimento**
- [28] **Taşdemir Canan**, Mineral Katkıların ve Kür Koşullarının Betonun Kılcal Geçirimliliğine Etkileri İTÜ İnşaat Fakültesi
- [29] **Özkul Hulusi, Koral Sema**, Endüstriyel Atıkların Desülfojips ve Uçucu Külün Bağlayıcı Malzemeler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması 1997 Eskişehir

EKLER

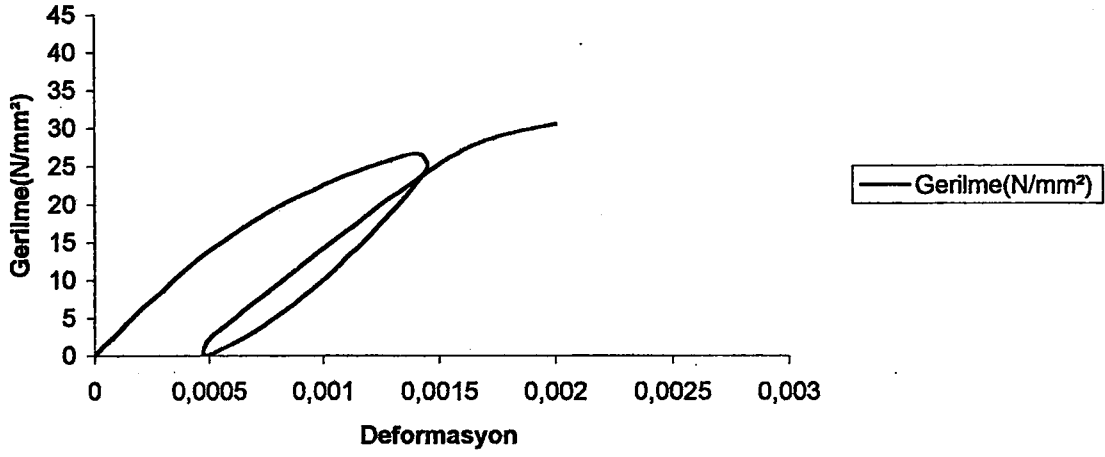
EK-A : Her üretim için (% 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 uçucu kül içeren) Poisson Oranları, Boyuna ve Hacimsel Deformasyonların Şekil ile Gösterilmesi.



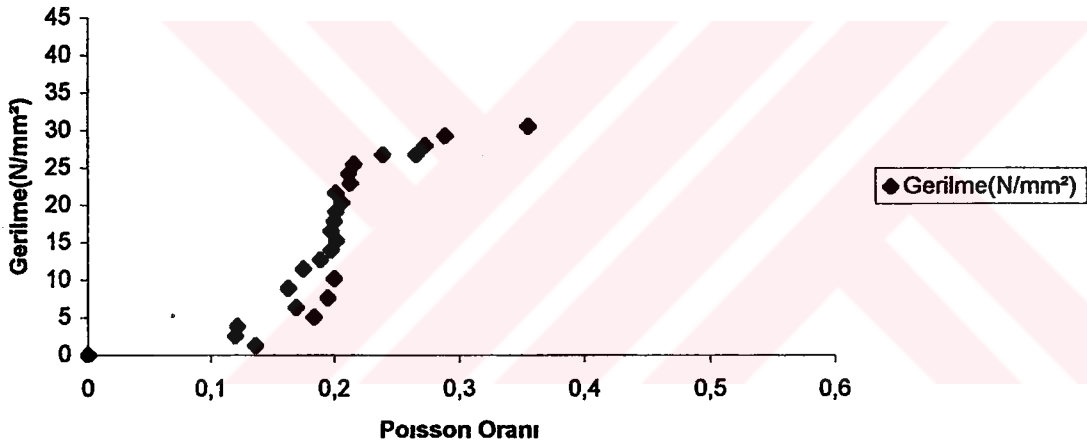




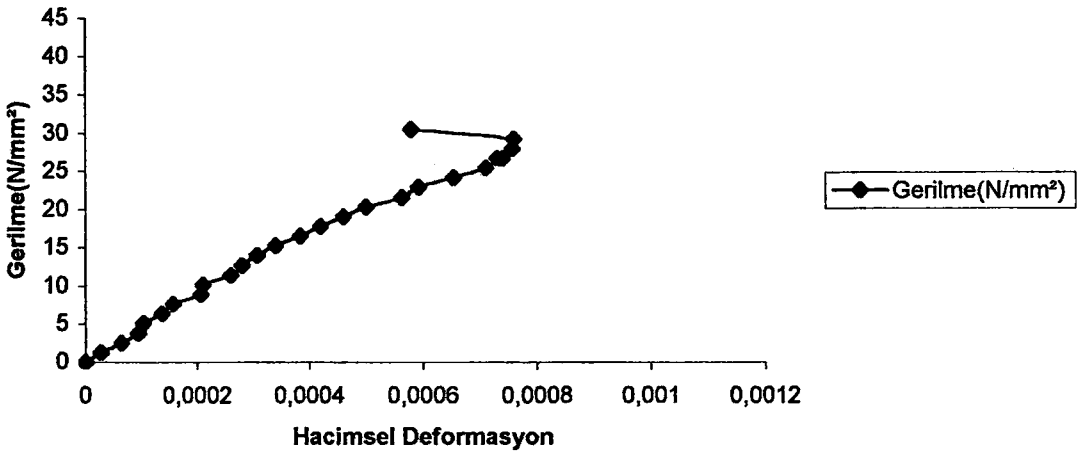
%15 UK İçeren Beton Boyuna Deformasyon

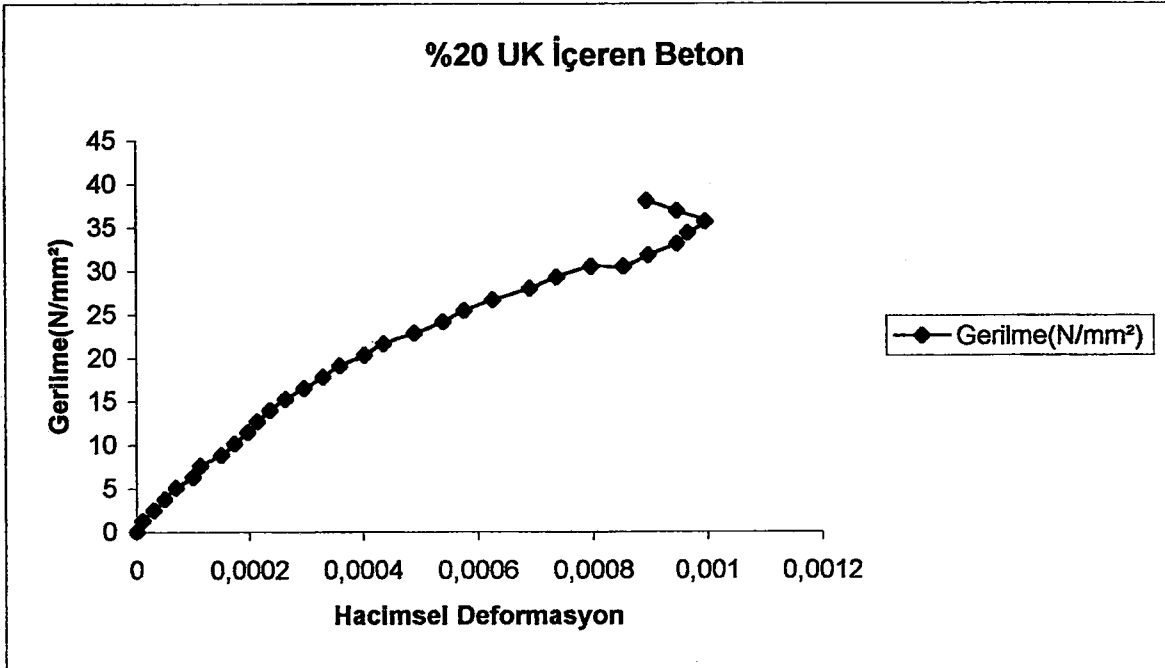
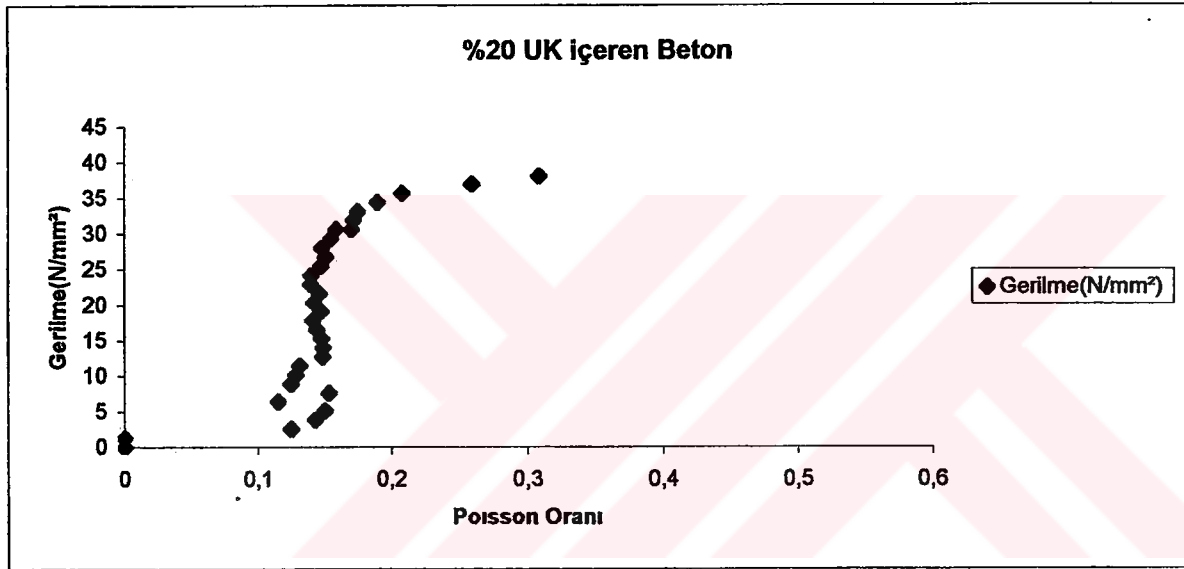
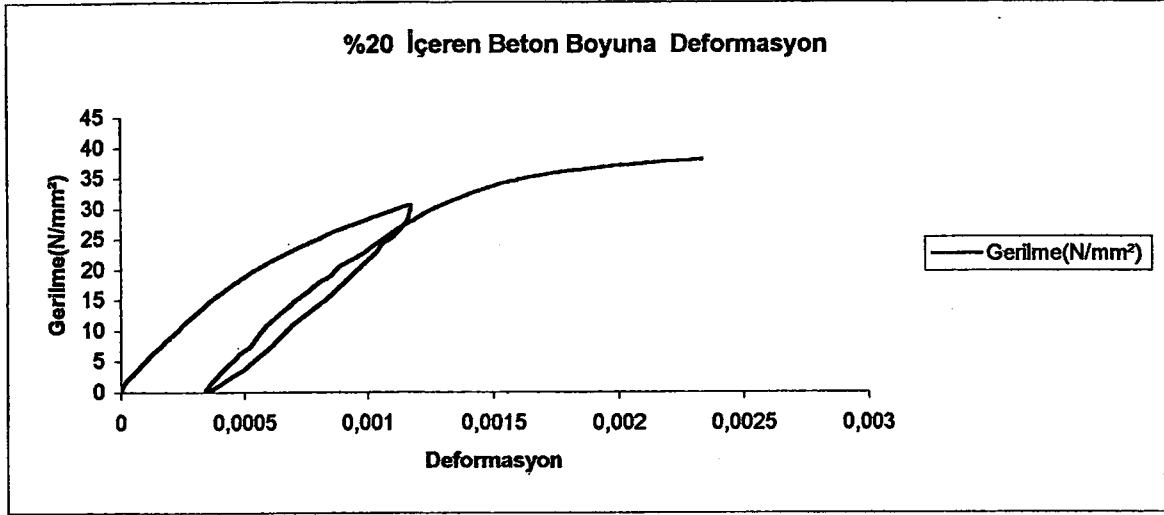


%15 UK İçeren Beton

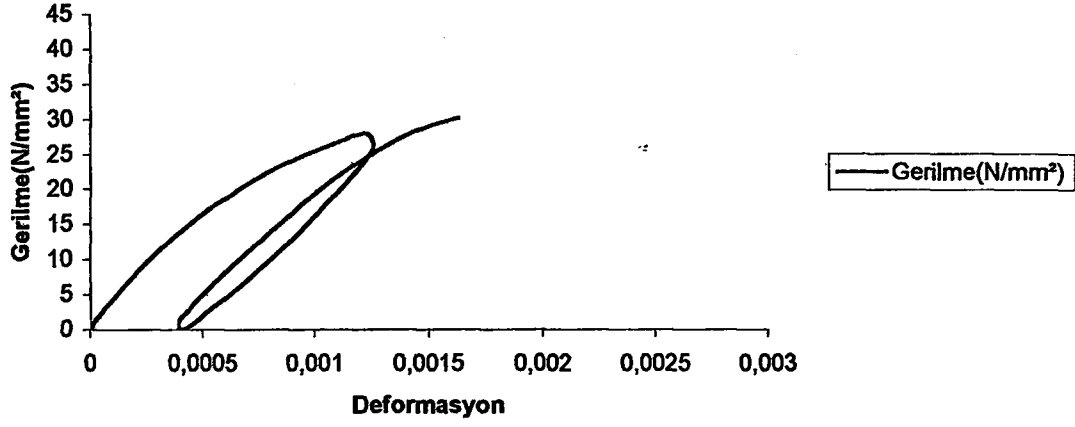


%15 UK İçeren Beton

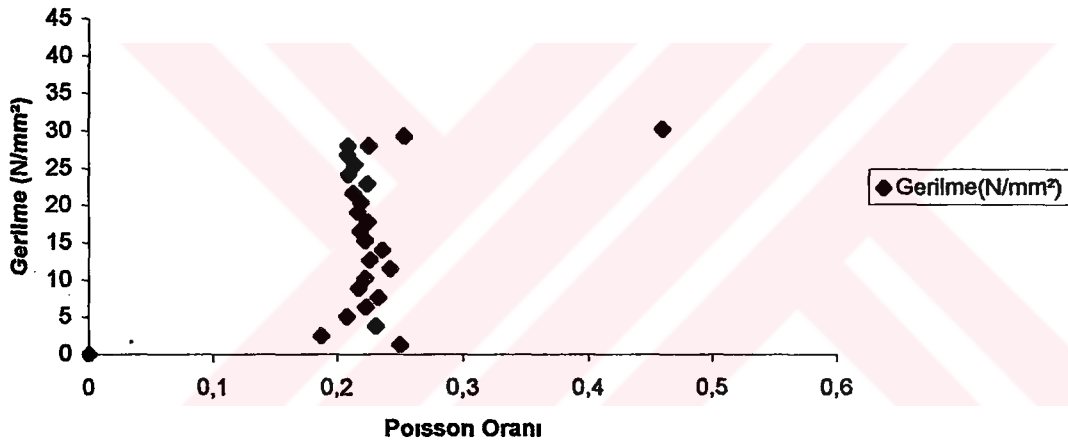




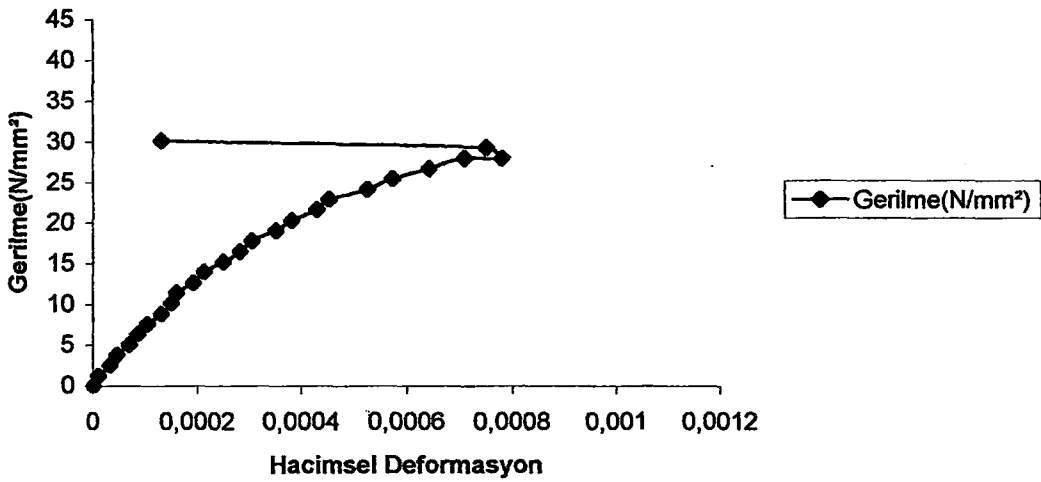
%25 UK İçeren Beton Boyuna Deformasyon

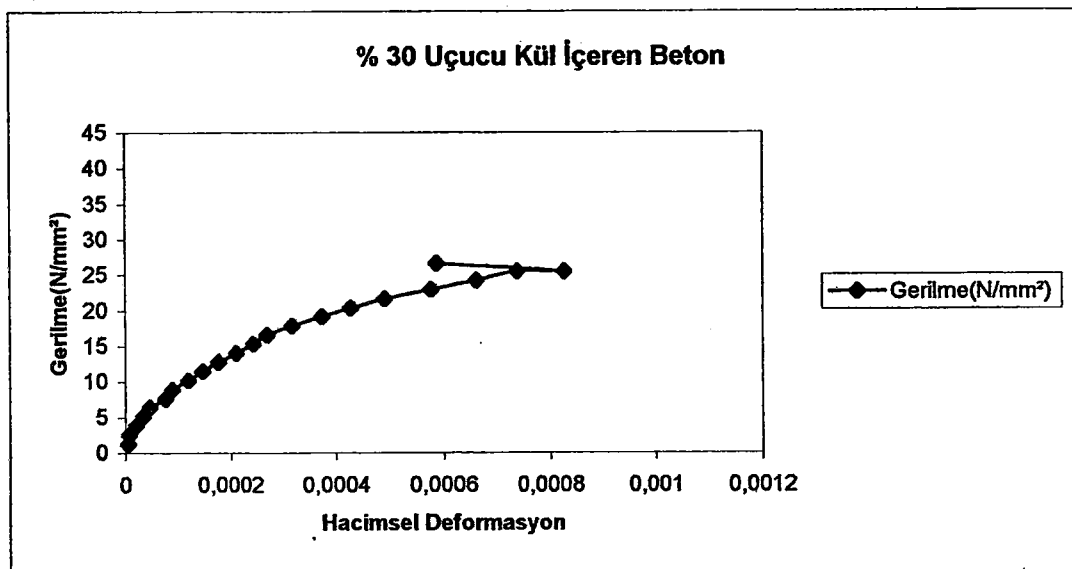
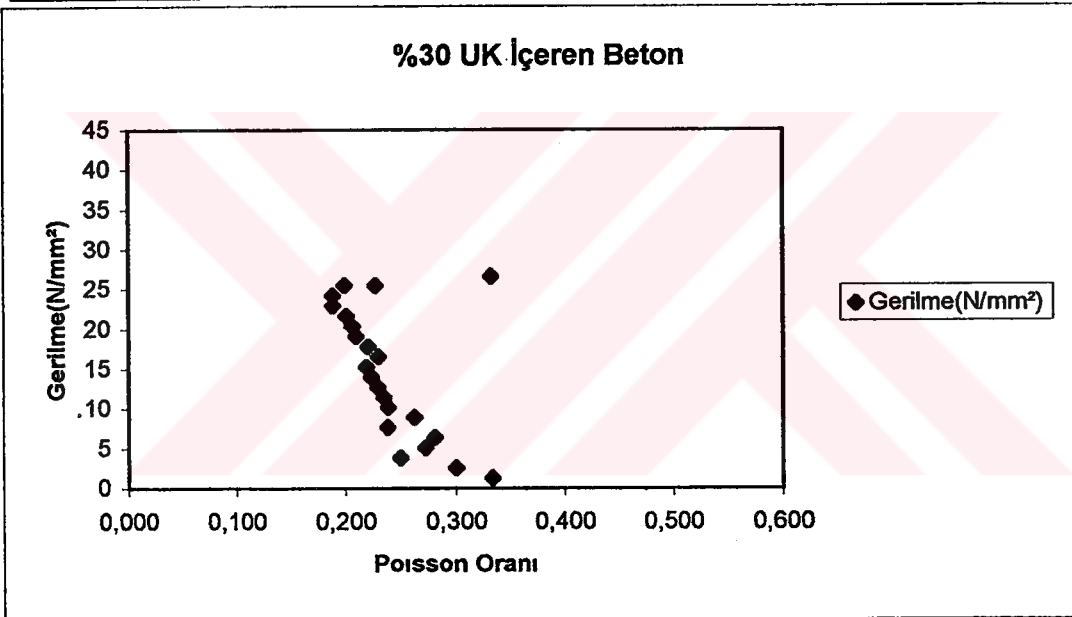
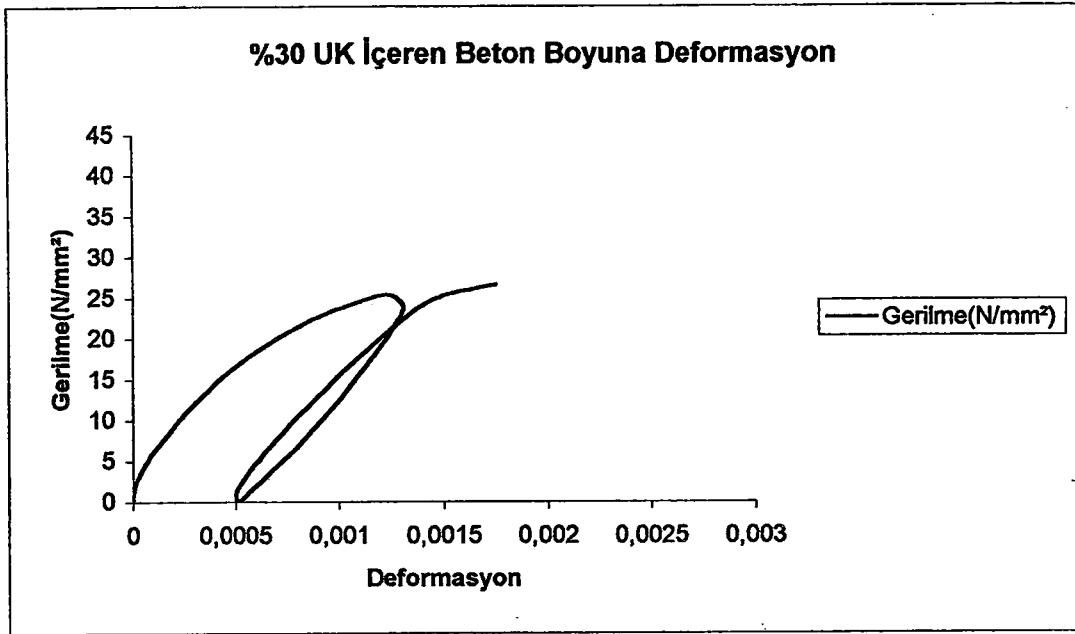


%25 UK İçeren Beton



%25 UK İçeren Beton





ÖZGEÇMİŞ

Alper ATAÇ 1976 yılında İstanbul'da doğdu. İlkokulu İzmir Ertuğrul Gazi İlkokulu'nda, liseyi İzmir 60. Yıl Anadolu Lisesi'nde tamamladı.

1994 yılında Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazandı. 1998 yılında inşaat mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yılı takibeden dönemde İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsünün bilim sınavı ve ingilizce yeterlilik sınavında başarılı olarak, İnşaat Fakültesi Yapı Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen bu bölümde öğrenim görmektedir.

