İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CEM I 42.5 ÇİMENTOLU DÜŞÜK DOZAJLI BETONLARDA F TİPİ UÇUCU KÜLÜN ETKİNLİĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Onur ANUK

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

MAYIS 2004

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CEM I 42.5 ÇİMENTOLU DÜŞÜK DOZAJLI BETONLARDA F TİPİ UÇUCU KÜLÜN ETKİNLİĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Onur ANUK
(501021062)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Nisan 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Mayıs 2004

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet UYAN
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Fevziye AKÖZ (Y.T.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. Hasan YILDIRIM (İ.T.Ü.)

MAYIS 2004

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimimin son aşaması olan bu çalışmanın hazırlanmasında her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen, değerli düşünceleri ile bana yol gösteren ve tezin yazımı tamamlandıktan sonra çalışmayı okuyarak hatalı ve gözden kaçan yerleri düzelten danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet UYAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma sırasında ilgi ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Araştırma Görevlisi Bekir PEKMEZCİ'ye teşekkür ederim.

İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilim Dalın'daki hocalarıma, araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve labaratuvar personeline samimi yardım ve desteklerinden dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Öğrenimimin bu aşamasına gelmemde maddi manevi her türlü yardımlarından dolayı aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

MAYIS 2004 ONUR ANUK

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
SEMBOL LİSTESİ **ix**
ÖZET **x**
SUMMARY **xi**

1. GİRİŞ **1**

2. GENEL BİLGİLER **4**
2.1. Puzolanların Tanımı ve Sınıflandırılması 4
2.2. Puzolanik Reaksiyon 5
2.3. Uçucu Küller 6
2.3.1. Uçucu küllerin özellikleri 7
2.3.1.1. Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik özellikleri 8
2.3.1.2. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri 11
2.3.2. Uçucu küllerin taze beton özelliklerine etkisi 12
2.3.2.1. İşlenebilme, su İhtiyacı ve terleme 12
2.3.2.2. Priz süresi 14
2.3.2.3. Hidratasyon ısısı ve sıcaklık yükselmesi 14
2.3.2.4. Hava sürüklenme 15
2.3.3. Uçucu küllerin sertleşmiş beton özelliklerine etkileri 16
2.3.3.1. Mukavemet kazanımı, basınç ve eğilme mukavemetleri 16
2.3.3.2. Elastisite modülü 18
2.3.3.3. Sünme ve rötre 19
2.3.4. Uçucu küllerin ortam şartlarına dayanıklılık özellikleri 20
2.3.4.1. Geçirimlilik 20
2.3.4.2. Zararlı kimyasallara dayanıklılık 21
2.3.4.3. Alkali-agrega reaksiyonu 22
2.3.4.4. Donma çözülme dayanıklılığı 23
2.3.4.5. Deniz ortamına dayanıklılık 23
2.3.4.6. Donatı korozyonu 24
2.4. Uçucu Küllü Betonlarda Karışım Oranlama Metodları 24
2.4.1. Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması 26
2.4.2. Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması 26
2.4.3. Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine koyulması 27

2.4.3.1. Modifiye edilmiş ikame metodu 27
2.4.3.2. Rasyonel oranlama metodu 28
2.5. k Etkinlik Faktörü ve Bu Konuda Yapılmış Çalışmalar 31

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 40
3.1. Çalışmanın Amacı 40
3.2. Üretilen Betonların Özellikleri 40
3.3. Kullanılan Malzeme Özellikleri 41
3.3.1. Çimento 41
3.3.2. Agregalar 42
3.3.3. Uçucu külün özellikleri 43
3.3.4. Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi 44
3.4. Beton Karışımları 45
3.5. Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme, Saklama ve Numune Boyutları 45
3.6. Taze Beton Deneyleri 46
3.7. Sertleşmiş Beton Deneyleri 46

4. DENEY SONUÇLARI 48
4.1. Taze Beton Deney Sonuçları 48
4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları 49
4.2.1. Basınç dayanımı 49
4.2.2. Kılcallık deneyleri 50
4.2.3. k etkinlik faktörünün belirlenmesi 52

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 55
5.1. Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 55
5.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 56
5.2.1. Basınç dayanımı sonuçlarının irdelenmesi 56
5.2.2. Kılcallık deney sonuçlarının irdelenmesi 61
5.2.3. k etkinlik faktörünün İrdelenmesi 65

6. SONUÇLAR 74

KAYNAKLAR 77

ÖZGEÇMİŞ 80

KISALTMALAR

ASTM	: American Society For Testing and Materials
ACI	: American Concrete Institue
TS	: Türk Standartları
CEN	: The European Standart Organization

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1.	Puzolanların sınıflandırılması ve türleri …….....	5
Tablo 2.2.	Türkiye'de üretilen bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri ve TS EN 450, TS 639 ile ASTM C 618 limit değerleri …….....	9
Tablo 2.3.	Türkiye'deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları ..	10
Tablo 2.4.	Bazı Türkiye uçucu küllerinin fiziksel özellikleri	12
Tablo 2.5.	Yaşlara göre k etkinlik katsayısı değerleri ….....	29
Tablo 2.6.	28. günde eşit dayanım elde etmek üzere oranlanmış şahit ve uçucu küllü betonlar için örnek karışım oranları	31
Tablo 3.1.	Üretilen betonların isimlendirilmesi …….....	41
Tablo 3.2.	Portland çimentosunun mekanik özellikleri …….....	41
Tablo 3.3.	Portland çimentosunun fiziksel özellikleri ……...	42
Tablo 3.4.	Portland çimentosunun kimyasal özellikleri …….....	42
Tablo 3.5.	Agregaların birim ağırlık ve özgül ağırlık değerleri …….....	43
Tablo 3.6.	Agregaların elek analizi sonuçları …….....	43
Tablo 3.7.	Çatalağzı uçucu külünün kimyasal bileşimi	44
Tablo 3.8.	Çatalağzı uçucu külünün fiziksel özellikleri ….....	44
Tablo 3.9.	Çatalağzı uçucu külünün puzolanik aktivitesi ….....	45
Tablo 3.10.	Üretilen betonların gerçek bileşimleri…….....	47
Tablo 4.1.	Taze beton deney sonuçları ……....	48
Tablo 4.2.	Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımı değerleri ……	49
Tablo 4.3.	28 günlük KON60 betonu için elde edilmiş q değerleri ……....	50
Tablo 4.4.	Üretilen betonların kılcallık katsayısı değerleri …….....	51
Tablo 4.5.	k etkinlik faktörü değerleri …….....	54
Tablo 5.1.	Kontrol betonuna kıyasla su ihtiyacı değişimi …….....	55
Tablo 5.2.	Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımı değerlerinin 28 günlük kontrol betonlarına göre yüzdesel olarak karşılaştırılması ..	56

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi-kp diyagramı 34
Şekil 2.2 : Uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi- etkinlik faktörü (k=ke+kp).... 34
Şekil 2.3 : Uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi-k etkinlik faktörü..... 35
Şekil 2.4 : k etkinlik faktörünün belirlenme şekli..... 36
Şekil 2.5 : Su/çimento oranı ve k etkinlik faktörü arasındaki ilişki..... 37
Şekil 2.6 : Lineer metot için k değerinin hesabı..... 38
Şekil 3.1 : TS 706 referans ve karışım granülometri eğrileri..... 43
Şekil 4.1 : Kılcallık katsayısının hesabı için çizilen su emme-zaman grafiği 50
Şekil 4.2 : 28 günlük su içerisinde saklanmış, 0.70 su/çimento oranlı %50 uçucu küllü numunede k etkinlik faktörünün bulunması..... 53
Şekil 5.1 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.5 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri... 57
Şekil 5.2 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.5 olan eşit işlenebilmeli hava ortamındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri..... 57
Şekil 5.3 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.6 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri... 58
Şekil 5.4 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.6 olan eşit işlenebilmeli hava ortamındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri 58
Şekil 5.5 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.7 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri... 59
Şekil 5.6 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.7 olan eşit işlenebilmeli hava ortamındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri 59
Şekil 5.7 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.8 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri... 60
Şekil 5.8 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.8 olan eşit işlenebilmeli hava ortamındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri 60
Şekil 5.9 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.5 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 28 günlük kılcallık katsayısı-uçucu kül yüzdesi grafikleri 61
Şekil 5.10 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.5 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük kılcallık katsayısı-uçucu kül yüzdesi grafikleri 62
Şekil 5.11 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.6 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 28 günlük kılcallık katsayısı-uçucu kül yüzdesi grafikleri 62

Şekil 5.12 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.6 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük kılcallık katsayısı-uçucu kül yüzdesi grafikleri 63
Şekil 5.13 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.7 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 28 günlük kılcallık katsayısı-uçucu kül yüzdesi grafikleri 63
Şekil 5.14 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.7 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük kılcallık katsayısı-uçucu kül yüzdesi grafikleri 64
Şekil 5.15 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.8 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 28 günlük kılcallık katsayısı-uçucu kül yüzdesi grafikleri 64
Şekil 5.16 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.8 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük kılcallık katsayısı-uçucu kül yüzdesi grafikleri..... 65
Şekil 5.17 : Su ortamındaki numunelerin 7., 28. ve 90. gündeki k etkinlik faktörü-uçucu kül yüzdesi grafikleri 66
Şekil 5.18 : Hava ortamındaki numunelerin 7., 28. ve 90. gündeki k etkinlik faktörü-uçucu kül yüzdesi grafikleri 67
Şekil 5.19 : Su ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü-gün grafikleri ... 68
Şekil 5.20 : Hava ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü-gün grafikleri 68
Şekil 5.21 : Su ortamındaki numunelerin 28. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri 69
Şekil 5.22 : Hava ortamındaki numunelerin 28. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri 69
Şekil 5.23 : Su ortamındaki numunelerin 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri 70
Şekil 5.24 : Hava ortamındaki numunelerin 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri 70
Şekil 5.25 : Babu ve Rao ile Tuygun'un elde etmiş olduğu su içerisinde 28 günlük numunelerin k etkinlik faktörü-uçucu kül yer değiştirme yüzdesi grafikleri 72
Şekil 5.26 : Bu tez çalışmasında elde edilmiş olan su içerisinde 28 günlük numunelerin k etkinlik faktörü-uçucu kül yüzdesi grafikleri 72

SEMBOL LİSTESİ

C : Çimento
f : Uçucu kül
W : Su
k : Etkinlik faktörü
φ : Uçucu kül/çimento oranı
σ_b : Basınç mukavemeti

CEM I 42.5 ÇİMENTOLU DÜŞÜK DOZAJLI BETONLARDA F TİPİ UÇUCU KÜLÜN ETKİNLİĞİ

ÖZET

Çeşitli ürünlerin elde edilmesi esnasında üretim amacının dışında yan ürün olarak üretilen birçok atık malzeme türü bulunmaktadır. Bu malzemeler arasında gerek miktar olarak ve gerekse kullanım olanakları bakımından en önemli yeri uçucu küller almaktadır. Uçucu küller kömürle çalışan termik santrallerin bir yan ürünü olarak elde edilen, puzolanik özelliklere sahip mineral katkı maddeleridir.

Bu çalışmada Çatalağzı santralinden sağlanan F sınıfı uçucu küller ve CEM I 42.5 çimento kullanılmıştır. Çimento miktarı sabit tutularak belirli oranlarda (%17,%33 ve%50) uçucu kül eklenerek betonlar üretilmiş ve uçucu külün betonun mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi incelenmiştir. Numuneler hava ve su olmak üzere 2 farklı ortamda bekletilmiş, basınç dayanımına bağlı olarak CEN TC 104 SC1 adına çalışma grubunun önerdiği metotlardan eşit işlenebilme metodu kullanılarak uçucu külün etkinliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

240 kg/m^3 dozlu çimento kullanılarak yapılmış olan çalışmada 4'ü kontrol betonu olmak üzere 16 seri beton üretilmiştir. Kontrol betonları 4 farklı oranda olup (0,50, 0,60, 0,70 ve0,80), bunlarla eşit işlenebilirlik verecek şekilde uçucu küllü betonlar üretilmiştir. 3 farklı oranda (%17, %33 ve%50) uçucu kül eklenmiştir. Her seride 10 adet 15x15x15 cm boyutlarında küp numune ve 1 adet 10x10x50 cm boyutlarında prizma numune üretilmiştir. Üretilmiş olan betonlar 23±2 ^oC su içerisinde ve 20 ^oC ile 65±5 rutubetli ortam olmak üzere 2 farklı kür koşulunda saklanmıştır. Agrega granülometrisinin sabit olduğu çalışmada , maksimum dane çapı 32 mm seçilmiştir. İşlenebilirlik, dört farklı oranda da kendi içinde sabit tutulmuş ve her seri için ön beton dökülerek ihtiyaç duyulan su miktarı belirlenmiştir.

Taze beton deneyleri olarak, çökme, taze birim ağırlık ve hava miktarı, sertleşmiş beton deneyleri olarak ise 7. 28. ve 90. günler sonunda su ve hava ortamındaki numuneler üzerinde basınç dayanımı ile 28. ve 90. güne ait kılcallık deneyleri yapılmıştır. Elde edilen basınç dayanımı değerleri kullanılarak uçucu küle ait k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur.

Deneyler sonucunda uçucu küllerin betonda işlenebilirliği iyileştirdiği ve betonda su ihtiyacını azalttığı gözlemlenmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında genel olarak, erken yaşlarda uçucu küllü betonlar kontrol betonuna çok yakın değerler almışlar, ileriki yaşlarda ise kontrol betonunun üstünde değerler vermişlerdir. Kılcallık deneyleri sonucunda ise %33 uçucu kül eklenen numunelerin kılcallık katsayısı kontrol betonunun altında kalıp iyi performans göstermiştir. k etkinlik faktörü değerlerinde de en iyi sonucu kılcallık deneylerinde olduğu gibi %33 uçucu kül eklenen numuneler sağlamıştır. Kür koşullarında ise, k etkinlik faktörü su ortamında hava ortamından daha yüksek değerler almıştır.

EFFICIENCY OF TYPE F FLY ASH IN THE LOW DOSAGE CONCRETES WITH CEM I 42.5 CEMENT

SUMMARY

In the process of making various products, we come up with many wastes as side products. The most prominent of such wastes are fly ash, with regard to its amount or field of use. The fly ashes are mineral additives with puzzolanic properties and are side products of the power plants working on coal.

In this study, the type F fly ash from the Catalagzi power plant and CEM I 42.5 cement were used. Maintaining the cement amount fixed and at certain rates (17%, 33% and 50%) fly ashes were added to concrete and the influence of the fly ashes on the mechanical and durability properties of the concrete were examined. The specimens were retained in 2 different cure, i.e. air and water and depending on the pressure strength, the efficiency factor k of the fly ash was searched.

In the study using 240 kg/m^3 dosage cement, 16 series of concrete were produced of which 4 are controls. The control concretes had 4 different ratios (0.50, 0.60, 0.70 and 0.80) and fly ash concretes were produced so that they will be provided with equal workability. Fly ashes at three different ratios (17%, 33% and 50%) were added. In each series, 10 units of 15x15x15 cm cubic specimen and 1 unit of 10x10x50 cm prismatic specimen was produced. The produced specimens were cured in 23±2°C water and 20°C with 65±5 moistured air. Maximum aggregate size is selected 32 mm and aggregate granulometry is constant. Workability was maintained constant within itself in the four different ratios and for each series, a preliminary concrete was laid to determine the amount of water needed.

As for the fresh concrete tests, slump, Ve-Be, fresh density and air content while for the hardened concrete tests, the compressive strength at the end of 7th, 28th and 90th day in the water and air cure as well as the capillarity tests for the 28th and 90th days were performed. Using the compressive strength so obtained, the k efficiency coefficient for the fly ash was obtained.

At the end of the tests it was found that fly ashes improved the workability of the concrete while reducing the water requirement of the concrete. Considering the compressive strength results, the fly ash concretes realized very close values to the control concrete at the early ages, while they provided higher values than the control concrete at the later ages. The capillarity tests revealed that the samples to which 33% fly ash is added had a capillarity coefficient less than the control concrete and showed a good performance. The 33% fly ash added specimens also provided the best result in the k efficiency coefficient values. Under the curing conditions, the k coefficient was higher in water medium when compared to air.

1. GİRİŞ

Betonda en önemli bileşen olan bağlayıcı maddelerin geçmişi günümüzden 5000 yıl öncelere kadar gitmekte ve eski Mısır kalıntılarında rastlanan alçı harçları ile başlayıp, eski Yunan ve Roma kalıntılarında rastlanan kireç harcı ile devam etmekte, yine eski Roma kalıntılarında rastlanan ve suda da sertleşebilen "kireç-puzolan" harç ve betonlarından geçerek yakın çağlara kadar gelmektedir. Kimyasal analiz metotlarının geliştirildiği yeni çağlarda ise su-kireci, tabii çimento, portland çimentosu gibi yüksek kaliteli bağlayıcı maddelerin hızla geliştiği, bunlarda gerçek bileşimlerin ve kristal yapıların araştırmalarla ortaya konduğu, amaca uygun özel portland çimentoları ve özel çimento türlerinin geliştirildiği, yine araştırmalarla hidratasyon ürünleri, hidratasyon ısısı, priz ve sertleşme, hacim genişlemesi, rötre ve sünme gibi olayların da açıklandığı görülmektedir. Son yıllarda ise bu gelişmeleri katkı maddelerinin kullanılması ve uçucu kül, silis dumanı, piriç kabuğu külü gibi bağlayıcı atıkların kullanılması yenilikleri izlemiştir [1].

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 ürünlerinin 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.

Ülkemizde doğayı kirletmesi ve aynı zamanda inşaat endüstrisinde kullanım olanağı açısından en iyi örnek, elektrik enerjisi elde edebilmek amacıyla kullanılan genellikle yakıt olarak pulverize kömürünün kullanıldığı termik santrallerdir. Ülkemizde enerji

üretiminin yarısından fazlası kömür veya linyit ile çalışan termik santrallerden sağlanmaktadır. Bu üretim sonucunda elde edilen elektrik enerjisi ile birlikte yan ürünler olarak ortaya uçucu kül adı verilen çok ince taneler çıkmakta ve bunlar ya kuru olarak atık depolarına atılmakta ya da suyla karıştırmak suretiyle kül barajlarına pompalanmaktadır. Kimyasal kompozisyonu itibariyle betonun ana bağlayıcısı olan portland çimentosuna oldukça benzeyen ve puzolanik özelliğe sahip olan uçucu küller, inşaat sektöründe katkılı çimento ve beton üretiminde bağlayıcılık sağlayan malzeme olarak kullanılmaktadır. Gerek portland çimentosunun bir kısmını oluşturarak katkılı çimento üretiminde gerekse beton yapımında kullanılan portland çimentosunun bir miktarının yerine kullanılmasıyla hem çevresel problemlerin azaltılması sağlanmakta hem de beton maliyeti açısından küçümsenmeyecek bir ekonomi sağlanmış olmaktadır.

Uçucu kül harç ve beton üretiminde büyük çoğunlukla ikincil bağlayıcı madde fonksiyonunda portland çimentosunun ağırlık yüzdesi oranında çimentonun bir kısmı yerine veya ilave olarak bazen de çimentoya önceden karıştırılarak katkılı çimento şeklinde kullanılırlar. Mineral katkı maddesi olan uçucu küller taze betonun işlenebilme ve su ihtiyacı ile reolojik özellikleri ve terleme, ayrışma, hava sürükleme, hidratasyon ısısı ve plastik rötre gibi özelliklerine etkirler. Sertleşmiş betonda da bu maddeler mekanik özelliklere ve durabiliteye oldukça önemli etki yaparlar. Mukavemetler ve mukavemet kazanma hızı ile elastisite modülü, sünme ve rötre mineral katkı maddelerin 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 maddelerin kullanımından etkilenmektedir. Uçucu küllerin özelliklere olan etkilerinin yönü ve şiddeti çoğu zaman uçucu külün cinsine, kullanım miktarına, kullanım yöntemine, fiziksel, kimyasal ve puzolanik özellikleri gibi faktörlere bağlı olmaktadır.

Bu çalışmada Lafarge Aslan çimentodan elde edilmiş CEM I 42.5 çimento ve Çatalağzı santralinden sağlanan F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Çimento miktarı sabit tutularak belirli oranlarda (%17, %33 ve%50) uçucu kül eklenerek eşit işlenebilirliğe sahip 4'ü kontrol betonu olmak üzere 16 seri beton üretilmiştir. Çimento dozajı 240kg/m^3 olarak seçilmiştir. Her karışım için üretilen betonların yarısı hava ortamında yarısı da su içinde saklanmıştır. 7., 28. ve 90. günlerde numuneler

üzerinde basınç dayanımı deneyleri ve kılcallık deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucu uçucu küllerin betonun mekanik ve durabilite özelliklerine olan etkisi incelenmiş ve CEN TC 140 SC1 adına çalışma grubunun önerdiği metotlardan eşit işlenebilme metodu kullanılarak k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Puzolanların Tanımı ve Sınıflandırılması

Yalnız başına kullanılacağı vakit bağlı madde olmayan fakat kireç veya çimento ile karıştırıldığı vakit su ile yaptığı reaksiyon sonunda bağlayıcı madde özelliği kazanan maddelere puzolan denilmektedir. Puzolan denilen maddelerin içinde fazla miktarda kolloidal halde silis ve alümin bulunmaktadır. Bu maddelerin kireçle yapmış olduğu reaksiyon sonunda puzolan bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır [2].

Puzolanik özelliklere sahip birçok doğal ve yapay madde çok eski zamanlardan günümüze değin yapım alanında ve beton üretiminde çeşitli amaçlarla kullanılmışlardır. Betonun temel bileşenlerinden olmayan bu maddeler, gelişen beton teknolojisinde betonun çeşitli fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini değiştirmek ve de üretimde ekonomi sağlamak amaçlarıyla kullanılan bir tür katkı maddeleridirler. Bu nedenle de bu tür puzolanik maddeler mineral katkı maddeleri olarak da adlandırılmaktadırlar. Betonda kullanılan mineral katkı maddeleri portland çimentosuna benzer mineralojik ve kimyasal bileşimler ile fiziksel özelliklere sahip olmalarına rağmen büyük çoğunluğunun kendi başlarına bağlayıcılık yetenekleri yoktur. Bu nedenle, bunlar ikincil bağlayıcı maddeler olarak da anılmaktadırlar. Efektif bir dolgu maddesi fonksiyonu görebilen bu maddeler, puzolanik aktiveleri nedeniyle hidratasyon ürünlerinin oluşumunda etkinlik göstererek bağlayıcı hamur yapısını değiştirirler. Böylece betonun çeşitli özellikleri iyileştirilirken; bilhassa puzolanik aktivitesi yüksek olan mineral katkı maddeleri, boşluk yapısını iyileştirerek daha yoğun bir bağlayıcı hamurun oluşmasını, agrega-hamur ara yüzeyindeki aderansın artmasını sağlamakta, ve bunların süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddeleriyle birlikte kullanımlarıyla beton üretiminde yüksek mukavemetlere erişilmesi mümkün olabilmektedir [3].

ASTM C 618' e göre ise, kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan, ancak uygun rutubet şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile kimyasal reaksiyona girip, bağlayıcı özelliklere sahip bileşenlerin oluşmasını

sağlayan, ince toz halindeki ilisli veya silisli ve alüminli maddelere puzolan denir [4]. Puzolan sınıflandırılması ve türleri Tablo 2.1'de gösterilmiştir [3].

Tablo 2.1 Puzolanların Sınıflandırılması ve Türleri

Puzolanlar	
Doğal puzolanlar	**Yapay Puzolanlar**
Volkanik cüruflar	Yüksek fırın cürufu
Volkanik tüfler	Uçucu kül
Kalşine kil ve şeyl	Silis dumanı
Opalin silika	Pirinç kapçığı külü
	Demirli olmayan cüruflar

Mineral katkı maddelerinin beton teknolojisinde kullanım yöntemleri puzolanın türüne göre değişmektedir. Doğal puzolanlar çoğunlukla katkılı portland çimentosu üretiminde kullanılmaktadırlar. Yapay puzolanlardan yüksek fırın cürufu ve uçucu küller beton üretiminde iki yoldan kullanılmaktadırlar. Birinci yöntemde puzolan, belirli oranda uçucu kül veya cüruf içeren, katkılı portland çimentosu kullanımıyla betona katılmış olur. İkinci yöntemde ise uçucu kül veya ince öğütülmüş cüruf, betona, karıştırma sırasında, çimentoya ilave ya da ikame olarak katılır [3].

2.2 Puzolanik Reaksiyon

Puzolan içeren betonlarda temel puzolanik reaksiyon, puzolandaki silika (S) ile portland çimentosu hidratasyonu sonucu açığa çıkan serbest kireç (CH) arasında sulu ortamda aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\text{Portland çimentosu} + \text{Su} \longrightarrow \text{C-S-H} + \text{CH} \qquad (2.1)$$

(Portland Çimentosu Hidratasyonu)

$$\text{CH} + \text{S} + \text{Su} \longrightarrow \text{C-S-H} \qquad (2.2)$$

(Puzolanik Reaksiyon)

(2.2) denklemiyle gösterilen puzolanik reaksiyon sonucu portland çimentosunun silikatlı bileşenleri ile aynı hidrate ürünler açığa çıkmaktadır. Ancak, bu reaksiyonun hem serbest kireç oluşumunu beklemesi, hem de oldukça yavaş seyreden bir reaksiyon olması sonucu puzolanik etki nedeniyle mukavemet kazanma da yavaş olmaktadır. Kür sıcaklığının artması ve alkali ve sülfatlı bazı kimyasal katkı

maddelerinin varlığı ise reaksiyonu hızlandırmaktadır. (2.2) denklemindeki temel puzolanik reaksiyonun yanında, serbest kireç ile puzolandaki alümin ve demir oksitin reaksiyonları sonucu hidratasyon ürünleri de oluşmaktadır. Böylece, portland çimentosu hidratasyon reaksiyonu ile puzolanik reaksiyon arasında hem açığa çıkan ürünlerin kompozisyonu hem de reaksiyonların hızı açısından farklılıklar bulunmaktadır [3].

Puzolan ve portland çimentosu karışımı hidratasyona girince puzolanik reaksiyonun etkisiyle bağlayıcı hamurundaki serbest kireç miktarı giderek azalmaktadır. Buna göre belirli bir süre sonunda puzolan içeren betonların serbest kireç ve daha çok kalsiyum silikat hidrate elemanları bulunmaktadır. Daha çok bağlayıcı ürün oluşması mukavemet artışına neden olurken, serbest kirecin azalması ve hamur boşluk yapısının iyileştirilmesi geçirimsizliği ve dolayısıyla zararlı dış etkilere dayanıklılığı arttırmaktadır. Puzolanik reaksiyonun, portland çimentosu hidratasyonundan daha yavaş gelişmesi puzolanlı betonların mukavemet kazanma hızlarını da etkilemektedir. Genelde bu tür betonlarda ilk yaşlardaki mukavemetler daha düşük olmakta, ancak puzolanların aktivitesinin yüksekliğine göre 28, 56 veya 90 gün sonraki mukavemetler referans betonunu yakalamakta veya geçmektedir [3].

2.3 Uçucu Küller

Çeşitli ürünlerin elde edilmesi elde edilmesi esnasında üretim amacının dışında yan ürün olarak üretilen birçok atık malzeme türü bulunmaktadır. Bu malzemeler arasında gerek miktar olarak ve gerekse kullanım olanakları bakımından en önemli yeri uçucu küller almaktadır. Uçucu kül kömürle çalışan termik santrallerin bir yan ürünü olarak elde edilmektedir. Kömürün içinde bulunan inorganik malzemeler fırında erimekte ve bacadan atılma esnasında soğuyarak küresel tanecikler oluşturmaktadır. Uçucu kül adı verilen bu tanecikler elektrofiltrelerde (elektro statik yöntemlerle) ve siklonlarda yakalanmakta, baca gazları ile atmosfere çıkışları önlenmektedir. Böylece hava kirliliği de mümkün olduğu kadar önlenmiş olmaktadır [5,6]. TS EN 450 'ye göre uçucu küller, pulverize kömürün yakılmasından elde edilen, puzolonik özelliklere sahip olan ve esas olarak SiO_2 ve Al_2O_3 'den meydana gelen, reaktif SiO_2 muhtevası kütlece en az %25 olan, başlıca küresel ve camsı taneciklerin ince tozudur. Yine TS EN 450' ye göre uçucu kül, pulverize edilmiş

antrasit, linyit veya bitümlü kömürün yakıldığı fırınların baca gazlarındaki toz benzeri taneciklerin elektrostatik veya mekanik çöktürülmesi ile elde edilir [7].

Uçucu kül terimi 1930'lu yıllarda elektrik enerjisi endüstrisinin gelişmesi ile yayılmaya başlamıştır. 1937 yılında R.E. Davis, Californiya üniversitesinde uçucu külün betonda kullanımı ile ilgili ilk deneysel sonuçları elde etmiştir. İnşaat sektöründe kullanımı ise 1948 yılında Hungry Horse barajının inşaatı ile başlamıştır [8]. Türkiye' de ise betonda uçucu kül kullanımı ile ilgili çalışmaların başlangıcı 1960' lı yıllara dayanmaktadır. D.S.İ 'ce yürütülen iki yıllık kapsamlı bir araştırma programından sonra 1968'den 1973'e kadar geçen süre içerisinde, Porsuk ve Gökçekaya barajlarının yapımında 55000 tonun üzerinde uçucu kül kullanılmıştır. 1970 yılında da Kütahya-Tavşanlı yolunun bir bölümünde uçucu kül çimento karışımı ile zemin stabilizasyonu çalışması yapılmıştır. Çimento endüstrisinin uçucu külle tanışması ise yine 1970'lerde olmuştur. Bu yıllarda Afyon ve Balıkesir çimento fabrikalarında Soma ve Seyitömer termik santralleri uçucu külleri kullanılarak deneme amaçlı çimento üretimi gerçekleştirilmiştir [9].

Bugün dünyada ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 600 milyon ton civarındadır. Türkiye'de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermekte olup bu santrallerden yılda 13 milyon ton kadar uçucu kül elde edilmektedir[10].

Günümüzde uçucu küllerin kullanım alanlara oldukça fazladır. Bunlar arasında; katkılı çimento ve beton üretiminde, Portland çimentosu üretiminde hammadde olarak, yol yapımında ve geoteknik uygulamalarda, hafif agrega üretiminde, tuğla, kiremit ve seramik üretiminde beton plaklarda, dolgu malzemesi olarak kullanımı sayılabilir[6,11].

2.3.1 Uçucu Küllerin Özellikleri

Uçucu külün özellikleri kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Genellikle silisli ve alüminli olan bileşimi sebebiyle puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak yararlı olur. İnce ve küresel taneleri nedeniyle ile taze betonda işlenilmeyi artırır, ayrıca hidratasyon ısısını azaltır. Çimento hidratasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur, çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betona

dayanıklılık kazandırır. Linyit kömürü yakılması ile elde edilen uçucu külde kireç oranı genellikle yüksek olup bu tür küller aynı zamanda bağlayıcılık özelliği gösterir. Antrasit kömüründen veya iyi yakılmayan diğer kömürlerden elde edilen uçucu küllerde karbon miktarı yüksek olur. Bu da çimento ve betonda su ihtiyacını artırır, puzolanik özelliği ve kaliteyi olumsuz etkiler. Uçucu kül genellikle çimentodan daha ince taneli olarak elde edilir. Dolayısıyla ilave öğütme gerektirmeden kullanılabilir. Gerektiğinde seperatörden geçirilerek inceliği daha da artırılır ve olumlu özellikleri daha etkin hale getirilir [10].

2.3.1.1 Uçucu Küllerin Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri

Uçucu külün kimyasal bileşimi, kullanılan kömürün yapısı, jeolojik orjini ve proses koşullarına (kömür hazırlama, yanma, toz kaplama, desülfirizasyon gibi) bağlıdır. Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler silisyum (SiO_2), alüminyum (Al_2O_3), demir (Fe_2O_3) ve kalsiyum (CaO) olup bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Magnezyum (MgO), sülfür (SO_3) ve alkali oksitlerde minör bileşen olarak bulunmaktadır. Temel oksitler olan SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 ve CaO'in miktarları, uçucu külün silisli veya kireçsi yapıda olmasına göre geniş aralıklarda değişmektedir. Buna göre SiO_2 %25-60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_3 %1-15 ve CaO %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Diğer oksitlerden MgO en fazla %5, alkali oksitler (Na_2O+K_2O) %5'in altında bulunmaktadır. SO_3 genellikle %2-2,5 arasında değişmekle birlikte, kömürün yapısı ve proses koşullarına göre %10' kadar yükselmektedir. Ancak TS EN 450 standardı SO_3 değerini en fazla %3 olarak sınırlamaktadır [7,10].

Kızdırma kaybı, esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozulması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya CO_2 kaybını da içine almaktadır. TS EN 450 standardı kızdırma kaybını %5 olarak sınırlamıştır [7,10].

Uçucu külde reaktif silis ve reaktif kireç, çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan ve dayanım gelişiminde önemli rolü olan kalsiyum silikat hidrat jeli oluşturan silisyum ve kalsiyum oksitleri temsil etmektedir. Özellikle reaktif silis, külün aktif bileşeni olup, puzolanik reaksiyonlara girmek üzere, alkali ortamda çözülen silistir. Bu bileşik, amorf veya camsı faz halinde bulunurken; mullit ve kuvars gibi diğer silisli bileşenler inert olup kristalize halde bulunurlar. Reaktif silis miktarının, uçucu külün tipine bağlı olmaksızın en az %25 olması gerekmektedir. Reaktif kireç ise,

düşük kireçli küllerde %10'un altında olmakta; yüksek kireçli küllerde %10-15 arasında değişmektedir [10,12].

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır.

ASTM C 618 standardına göre uçucu kül F ve C sınıflarına ayrılırlar. F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 yüzdesi %70' den fazla olan uçucu küller girmektedir. CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 yüzdesi %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde CaO>%10 olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanısıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler[4].

Ülkemizde üretilen bazı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları ile TS EN 450, TS 639 ve ASTM C 618 standartlarına göre limit değerleri Tablo 2.2'de verilmiştir[10].

Tablo 2.2 Türkiye'de üretilen bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri ve TS EN 450, TS 639 ile ASTM C 618 limit değerleri

Uçucu kül oksit %'si	Orhaneli	Seyitömer	Yatağan	Soma	TS EN 450	TS 639	ASTM C 618	
							F	C
SiO_2	47.48	54.49	51.50	43.39	-	-	-	-
Al_2O_3	24.17	20.58	23.08	21.71	-	-	-	-
Fe_2O_3	8.03	9.27	6.07	4.07	-	-	-	-
S+A+F	79.68	84.34	80.65	70.76	-	>70.00	>70.00	>50.00
CaO	11.38	4.26	10.53	22.23	-	-	-	-
MgO	2.27	4.48	2.42	1.65	-	<5.00	-	-
SO_3	2.49	0.52	1.32	2.07	<3.00	<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	2.47	2.01	2.54	1.09	-	-	-	-
Na_2O	0.35	0.65	0.77	0.30	-	-	-	-
K.K	1.11	3.01	1.06	2.64	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00

TS EN 197-1' göre sınıflandırmada uçucu küller silisli (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum

dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı uçucu küller ise, hidrolik veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif SiO_2 ve Al_2O_3'den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10' dan fazla, reaktif silis miktarının da %25' den fazla olması gerekmektedir [12].

Uçucu külün mineralojik bileşimi, kömürde bulunan minerallere (kil, kuvars, pirit, alçıtaşı, karbonatlar) ve proses koşullarına bağlıdır. Uçucu külün mineralojik yapısı, külün tipine göre değişen dağılımda olmak üzere, camsı (kristalsiz) ve kristal yapılı bileşenlerden oluşmaktadır. Uçucu külün mineralojik bileşimi (camı fazın durumu, kristal yapıları), külün puzolanik özelliklerini etkilemektedir. Özellikle camsı fazın durumu uçucu külün reaktivitesinde etkin olmaktadır. Düşük kireçli uçucu küldeki camsı fazın yapısı, SiO_2 açısından zengin, oldukça polimerize silisli veya alüminyum da içeren alüminosilikat bilişimindendir. Silisli veya alüminosilikat camsı fazı, düşük kireçli reaktif bileşeni olup, su ve kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek, küle puzolanik özellik kazandırmaktadır. Yüksek kireçli külde ise, aktif bileşen içinde silisyum da içeren kalsiyum alüminat camsı fazının yanısıra aktif kristalize fazlardır. Burada, saf silika camı, Ca ve Al iyonları ile modifiye olmuştur. Yüksek kireçli külün camsı ve kristalize fazları, külün puzolanik özelliğin yanı sıra, kısmen kendiliğinden bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlamaktadır[10].

Tablo 2.3'de Türkiye'de üretilen bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları verilmiştir [9].

Tablo 2.3 Türkiye'deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları

Mineral %	Uçucu Kül					
	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
Serbest CaO	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

2.3.1.2 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Tanecik şekli ve büyüklük dağılımında, kömürün orjini ve uniform olması, kömürün pulverizasyon durumu yanma koşulları (sıcaklık ve oksijen seviyesi), yanmanın uniformluğu ve toz toplama sistemi tipi gibi prosese bağlı faktörler etkili olmaktadır.Uçucu külde, büyüklükleri 0.5 μm-150 μm arasında değişen hem camı küresel, hem de düzensiz şekilli tanecikler bulunmaktadır. Bu taneciklerin şekil ve büyüklük açısından farklılıkları, uçucu külün tipinden (düşük veya yüksek kireçli) kaynaklanmaktadır. Düşük kireçli küllerde, çoğunlukla camsı faza karşılık gelen, içi boşluksuz tam küresel tanecikler ve bunun yanısıra senosfer ve plerosferler bulunmakta olup; bu küller şekil dağılımı açısından genellikle homojen olan mikro yapıya sahiptirler. Yüksek kireçli küllerde, mikro yapı içinde hem küresel hem de köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunması sonucunda, homojen olmayan şekil dağılımı mevcuttur. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de, düşük kireçli küller kadar düzgün değildir [10].

Taneciklerin şekli ve büyüklük dağılımları, taze betonun su ihtiyacı ve işlenebilirlik gibi reolojik özelliklerine etki etmektedir. Bu etki özellikle küresel taneciklerin kayganlaştırıcı nitelik taşıması ve dolgu maddesi özelliğine sahip olma; şekilsiz, pürüzlü yüzeye sahip olanların su ihtiyacını arttırma şeklinde olmaktadır. Ayrıca, uçucu külün tane büyüklük dağılımının çok değişken olması halinde de su ihtiyacı artmaktadır. Uçucu külün granülometrik bileşiminin çoğunun 40 μm' nin altında olması (10-20 μm) ve şeklinin de genelde küresel olması puzolonik aktiviteye olumlu etki etmektedir. Özellikle yüzeyi pürüzsüz ince küresel tanecikler büyük yüzey alanına sahip olduğu için kireç-silikat reaksiyonlarına daha hızlı girmektedirler. Buna bağlı olarak yüksek kireçli külün aktivitesinde kristalize aktif fazlar (anhidrit, kireç) ve az camsı fazı rol oynamakta, düşük kireçli de ise taneciklerin şekli, büyüklük dağılımı ve camsı fazın fazlalığı önem taşımaktadır [10].

Uçucu külün özgül ağırlıkları 1,97 ile 3,02 gr/cm^3 arasında değişmekle birlikte beton teknolojisinde kullanılan uçucu küllerin özgül ağırlıkları 2,2 ile 2,8 gr/cm^3 arasındadır. Özgül ağırlığı etkileyen faktörler uçucu küldeki demirli bileşen ve karbon miktarlarıdır. Demirli bileşen miktarı fazla olan uçucu küllerin özgül ağırlığı daha yüksektir. Karbon miktarı fazla olan uçucu küllerin özgül ağırlıkları daha düşüktür [13].Tablo 2.4' de bazı Türkiye uçucu küllerinin fiziksel sonuçları verilmiştir[10].

Tablo 2.4 Bazı Türkiye uçucu küllerinin fiziksel özellikleri

Uçucu Kül	Özgül Ağırlık gr/cm^3	90 µm Elek Bakiyesi %	45 µm Elek Bakiyesi %
Orhaneli	2.18	2.6	7
Yatağan	2.12	24.7	50.1
Kemerköy	2.83	26.4	47.8
Seyitömer	2.13	3.2	47
Çatalağzı	2.00	21.4	38.7
Çayırhan	2.36	6.7	24.5

2.3.2 Uçucu Küllerin Taze Beton Özelliklerine Etkisi

2.3.2.1 İşlenebilme, Su İhtiyacı ve Terleme

Beton üretiminde amaç kalıbına dökülmüş halde kompozitenin büyük bir değer alması ve mukavemetinin de yüksek olmasıdır. Betoniyerden çıkan taze betonun taşıma ve kalıbına yerleştirme sırasında kohezyonunu ve homojenliğini kaybetmemesi ve kalıplarda kolaylıkla yayılarak kabil olduğu kadar az boşluk bırakarak bunları doldurma özelliklerinin hepi birden işlenebilme özelliği ile ifade edilmektedir[14]. Bu nedenle karışım hesaplarında işlenebilme en önemli faktörlerden birisidir. Uçucu küllü betonlarda işlenebilirlik üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Ukita ve arkadaşları değişik tane gruplarına ayrılmış uçucu kül kullanarak betonlar üretmişler, maksimum tane boyutu 10 mikron ve özgül yüzeyi 7670 cm^2/gr olan uçucu külün işlenebilmeyi iyileştirdiği, betonda su ihtiyacını azalttığını gözlemlemişlerdir [15].

Kim ve arkadaşları yüksek mukavemetli beton üretiminde %30'a varan ikame oranlarında uçucu külün işlenebilmeyi azalttığını ve sabit çökme değeri için gerekli su miktarının arttığını gözlemlemişler ve kullandıkları uçucu kül tanelerinin pürüzlü yüzeyi ve boşluklu yapısının buna neden olduğunu ileri sürmüşlerdir [15].

Schieβl ve Hardtl, uçucu küllü betonlarda taze betonun işlenebilirliliğin artmasının uçucu küllerin inceliğinin artması sonucu olduğunu söylemişlerdir [16].

Mora ve arkadaşlarını, değişik tane gruplarına ayrılmış uçucu kül ile ürettikleri ıslak kıvamlı harçlarda uçucu kül miktarının artışıyla yayılma değerinin arttığını ve uçucu külün ortalama tane boyutunun azalmasıyla da harcın akıcılığı arttığını saptamışlardır [15].

Okada ve arkadaşları kendi kendine yerleşebilen su altı betonlarında yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmasını araştırmışlar ve üretilen betonlarda uçucu külün ve cürufun artışıyla akıcılığın arttığını gözlemlemişlerdir [15].

Rodway ve Fedirto %45 ağırlık oranında C tipi uçucu kül kullanarak yüksek işlenebilmeli beton üretimini incelemişler ve 0.33 su-çimento oranında uygun miktarda süperakışkanlaştırıcı ile 22,5 cm çökme değerlerini elde etmişlerdir [15].

Owens yaptığı çalışmalarda, uçucu küldeki kaba malzeme (>45μ) oranının, uçucu külün işlenebilirliği açısından en önemli faktör olduğunu saptamıştır [8].

Pasko ve Larson yaptığı çalışmada, karışımda 63 mm çökme sabit kalacak şekilde uçucu külün çimentoyla kısmi yerdeğiştirmesi ile değişen su ihtiyacını incelemişler, %20 çimento yerine %30 oranında uçucu kül koyulan karışımın su ihtiyacında % 7,2'lik bir azalma olduğunu söylemişlerdir [8].

Terleme, suyun kütleden ayrılması olayıdır. Terlemenin bir nedeni segregasyon diğer bir nedeni de çimentonun bir araya toplanmasıdır. Suyla temasa geçen çimento taneleri, tek tek ıslanmak yerine bir araya toplanarak ıslanırlar ve hidratasyon için gerekenden fazla su tutarlar; daha sonra da bu suyu kusarlar. Bunu önlemek için bazen betona %5'i aşmayacak şekilde silt katılır yada daha ince öğütülmüş çimento kullanılır. Uçucu küllerinde inceliğinin fazla oluşu sebebiyle terlemeyi azaltacağı söylenebilir [17].

Copeland yaptığı çalışmada normal haliyle eğilimli olan kaba karışımlı betonlarda uçucu kül kullanımının terlemeyi azalttığını belirtmiştir [8].

Johnson, Cape Town'da yapılan çoğu betondaki kumun içinde yeterince ince malzeme olmamasından dolayı terleme probleminin ortaya çıktığını saptamış, bu betonlarda uçucu kül kullanılarak terleme probleminin çözülebileceğini belirtmiştir [8].

Sivasundaram, Carette ve Malhotra, uçucu külle ürettikleri betonlarda terleme olmadığını saptamışlardır [18].

Sonuç olarak yapılan çalışmalara bakıldığında terlemedeki en önemli etkenin incelik olup, uçucu küllerin bu konuda iyileştirme sağladığı söylenebilir.

2.3.2.2 Priz Süresi

Uçucu küller, çimentonun priz süresini bazı nedenlerden dolayı etkilemektedirler. Bu nedenleri şu şekilde sayabiliriz:

-Yüksek kalsiyum içeren küllerin kendiliğinden bağlayıcı olabilmesi

-Uçucu küldeki bazı sülfatların portland çimentosuna eklenen jips ile aynı etkiyi göstermesi

-Uçucu kül tanelerinin çimento hidratasyon ürünlerinin kristalleşmesinde ana rol oynaması

Okada ve arkadaşları yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanımıyla priz süresinin arttığını söylemişlerdir [15].

Kashima ve arkadaşları su altı betonu üretiminde yüksek oranda uçucu kül ve cüruf kullanımının prizi aşırı geciktirmediğini belirtmişlerdir [15].

Rodway ve arkadaşları yüksek oranda C tipi uçucu kül ile 0.33 su-çimento oranında 22.5 cm çökme veren betonda priz sürelerinin normal olduğunu gözlemişlerdir [15].

Sivasundaram, Carette ve Malhotra, uçucu kül kullanımı ile priz süresinin kontrol betonuna göre 3 saat arttığını söylemişlerdir. Bunun nedeni olarak da düşük çimento miktarı, yüksek uçucu kül kullanımı olduğunu belirtmişlerdir [18].

Canmet'in yaptığı deneylerde, 11 uçucu küllü betondan sadece biri hariç diğer hepsinin priz süresini arttırdığı ortaya çıkmıştır [8].

Lane ve Best yaptığı çalışmada, uçucu külün priz süresini yavaşlattığını söylemiş, bunun nedeni olarak da çimento inceliği, hamurun su miktarı ve ortam sıcaklığını göstermişlerdir [8].

Davis ve arkadaşları, uçucu küllü karışımların daha yavaş priz aldığını söylemişlerdir. Ama bu priz süresinin limitler içinde kaldığını belirtmişlerdir [8].

Sonuç olarak, yapılan çalışmalarda uçucu külün genellikle priz süresini arttırdığı saptanmıştır.

2.3.2.3 Hidratasyon Isısı ve Sıcaklık Yükselmesi

Bağlayıcı maddeler priz ve sertleşme esnasında bir miktar ısı açığa çıkarırlar ki buna hidratasyon ısısı denir. Bu ısı doğrudan doğruya çimentoyu oluşturan karmaşık bileşimlerin su ile yapmış oldukları kimyasal reaksiyonda veya hidratasyonda

meydana gelmektedir. Priz ve sertleşme esnasında meydana gelen bu ısı sonunda betonun sıcaklık derecesi artar. Bu artış özellikle büyük kütleli beton yapılarda, barajlarda, yollarda ve büyük beton plaklarda büyük değerler alır. Hidratasyon ısısına karşı alınacak önlemler için uygun çimento seçimi, yavaş beton dökümü, betondaki agrega ve suyu soğutma ve betondaki çimento miktarını azaltmayı sayabiliriz [2,17]. Karışıma giren çimento miktarının azaltılıp yerine uçucu kül eklenmesiyle sıcaklık artışında belirli bir azalma sağlanmış olacaktır.

Kanazowa ve arkadaşları, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı çimento ile yapılan betonlarda sıcaklık artışında azalma gözlemlemişlerdir [15].

Hinczak ve arkadaşları, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı ve portland çimentosunun 3'lü ve 4'lü bağlayıcı istemlerinde hem toplam açığa çıkan ısı miktarının, hem de ısının açığa çıkma hızının daha düşük olduğunu ileri sürmektedirler [15].

Compton ve Maclnnis, %30 ikame oranında uçucu kül kullanarak yaptıkları çalışmada, uçucu küllü betonlarda sıcaklığın kontrol betonuna göre daha düşük olduğunu belirtmişlerdir [8].

Barrow, Hadchiti, Carrasqıillo F ve C sınıfı uçucu kül kullanarak beton üretmişler, F sınıfı uçucu küllerin hidratasyon ısısını düşürdüğünü ve sıcaklık artışını yavaşlattığını saptamışlardır. C sınıfı uçucu küllerin ise yalnızca sıcaklık artışını yavaşlattığını tespit etmişlerdir [19].

2.3.2.4 Hava Sürüklenme

Mineral katkı maddelerinin kullanımı harç ve betonda hava sürüklenmeyi zorlaştırmaktadır. Belirli bir hava miktarını sağlamak için gereken katkı miktarı daha fazla olmaktadır. Mineral katkıların yüksek özgül yüzeyleri ve içerdikleri karbon miktarı bunda etkili olmaktadır.

Nasser ve Lai C tipi uçucu kül ile ürettikleri betonların durabilitesini incelerken taze betona %4-6 arası hava sürüklediğini söylemişlerdir [15].

Gebber ve Klieger 10 farklı uçucu külü inceledikten sonra hava sürüklenme ile ilgili şu sonuçlara vardılar [8]:

-Betonda, C sınıfı uçucu küller F sınıfı uçucu küllere oranla genelde daha az hava sürükleyici katkıya ihtiyaç duymaktadırlar.

-C sınıfı uçucu kül içeren betonlar F sınıfı uçucu kül içeren betonlara oranla daha az hava kaybetmektedirler.

-F sınıfı uçucu kül içeren betonlardaki hava, 90 dakika karıştırma tamamlandıktan sonra %59 azalmıştır.

-Genel olarak, uçucu külde alkali miktarı artarken hava sürükleyici katkı ihtiyacı azalmaktadır.

-Genelde, uçucu küldeki SO_3 miktarı artarken betondaki hava miktarı da artmaktadır.

2.3.3 Uçucu Küllerin Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkileri

2.3.3.1 Mukavemet Kazanımı, Basınç ve Eğilme Mukavemetleri

Uçucu küllü betonlarda mukavemet kazanımları, uçucu kül tipleri, kimyasal ve fiziksel özellikleri, tanecik şekli, uçucu kül reaktivitesi, sıcaklık ve diğer kür koşulları ve kullanım oranları gibi faktörlere bağlıdır.

Yapılan çalışmalarda genel olarak, C sınıfı uçucu küllerin, F sınıfı uçucu küllere oranla erken yaşlarda reaksiyon hızının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni de C sınıfı uçucu küllerin daha yüksek miktarda CaO içermesidir. Yüksek miktarda kireç (CaO=%30) içeren C sınıfı uçucu küllerle yapılan deneyler sonucu mukavemet kazanma hızlarının referans betonuyla hemen hemen aynı olduğu söylenmektedir [3].

Tane boyutu mukavemet gelişimini iki yönde etkilemektedir. Bunlar incelik ve bağlayıcılık aktivitesidir. 45 μm'den daha büyük taneler su ihtiyacını olumsuz yönde etkilemektedir. Bağlayıcılık aktivitesi ise, konsantre hamurdaki katı fazın yüzeyinde meydana geldiğinden yüzeyden merkeze doğru reaksiyona katılmamış ya da hidrate olamamış kısımlar mukavemet kazanımını etkilemektedir. Bu sebeple yüzey alanı bu tür aktivitelerin işleyişinde önemli rol oynar [8].

Mukavemet gelişimini puzolanik aktivite açısından ele aldığımızda, puzolanik reaksiyonun hem serbest kireç oluşumunu beklemesi, hem de yavaş seyreden bir reaksiyon olması sonucu puzolanik etki nedeniyle mukavemet kazanma da yavaş olmaktadır. Genelde bu tür betonlarda ilk yaşlardaki mukavemetler düşük olmakta, ancak puzolanların aktivitesinin yüksekliğine göre 28, 56 veya 90 gün sonraki mukavemetler referans betonunu yakalamakta veya geçmektedir [3].

Uçucu küllü betonlarda sıcaklık artışıyla birlikte dayanımlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Bu özellik kütle beton inşaatlarında ya da yüksek sıcaklıklara maruz beton kostrüksiyonlarda oldukça önemlidir [8].

Dunston ve arkadaşları yüksek miktarda uçucu kül içeren betonların basınç mukavemetlerinde 28 günden sonra önemli gelişmeler gözlemlendiğini ve bunun da uçucu külün betonun uzun süreli mukavemetine olan olumlu katkısını gösterdiğini ileri sürmektedirler [15].

Nasser ve Lai C tipi uçucu külün %20, %35 ve %50 oranlarında çimento yerine kullanılma durumlarında 7. günde kontrol betonundan daha düşük dayanımlar elde etmişlerdir. %20 ve %35 kullanım oranlarında 28. günde kontrol betonuna erişirken, 80. günde %20 kül içeren karışımın mukavemeti kontrol betonunu geçmekte, %50 kül içeren beton ise daha düşük mukavemette kalmaktadır [15].

Bilodeu ve Malhotra bağlayıcı miktarı 300 ile 430 kg/m^3 arasında, su çimento oranı 0.27 ile 0.39 arasında değişen karışımlarda %58 oranında F- tipi uçucu kül içeren betonların basınç mukavemetlerinin kontrol betonuna oranla tüm yaşlarda daha düşük olduğunu görmüşlerdir. Kontrol betonu 1 ile 7 günler arası, uçucu kül betonları ise 7 ve 28 günler arası daha hızlı mukavemet kazanmaktadır [15].

Tuygun kısmi ikame metodu ile yaptığı çalışmada %10, %30, ve %50 oranlarında uçucu kül kullanarak betonlar üretmiş, uçucu küllü betonların erken yaşlardaki dayanımlarının bütün yerleştirme yüzdelerinde düşük olduğunu gözlemlemiştir. 28. ve 90. günkü basınç dayanımlarının ise, %10 uçucu küllü numunelerin kontrol betonuna yakın, bazen ise kontrol betonunun üzerinde değerler verdiğini söylemiştir. %30 ve %50 uçucu küllü numunelerin ileriki yaşlardaki dayanımlarının ise kontrol betonuna göre düşük olduğunu saptamıştır [20].

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 düşük, 2 yıl sonra ise kontrol betonundan %18 daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir [15].

Kim ve arkadaşları F tipi uçucu kül ile yüksek mukavemetli beton üretiminde uçucu külün ilk mukavemetleri düşürdüğünü ancak uzun süreli mukavemetleri arttırdığını gözlemlemiştir [15].

Galeota ve arkadaşları F tipi İtalyan uçucu külünü %18 ve %25 oranlarında kullanarak 30, 60 ve 90. günlerde kontrol betonundan daha yüksek mukavemetler elde etmişlerdir [15].

Gökçe farklı inceliklere sahip Seyitömer uçucu külüyle yapmış olduğu çalışmada 91. gün bakımından en iyi performansı %10 ikame oranında ince uçucu kül içeren serinin gösterdiğini belirtmiş, aynı yaştaki kontrol betonunun hem basınç dayanımı hem de eğilme dayanımını sadece bu serinin aştığını söylemiştir [21].

Tazawa ve arkadaşları inceliği 200.000-1.300.000 cm^2/gr olan uçucu küller ile yapılan harçlarda mukavemetin ileri yaşlarda çok hızlı arttığını gözlemlemişlerdir [15].

Crow ve Dunstan farklı özellikler gösteren uçucu küllerle 36 beton üretimi yapmış olduğu çalışmada, daha ince küllerin çimento ile daha aktif reaksiyona girdiğini saptamışlardır [8].

Matsufuji ve arkadaşları özel bir yöntemle uçucu külden en ince taneleri ayırabilmişler ve inceliği $30m^2/gr$ olan kül ile 0.2 su-çimento oranında ürettikleri betonda 91 günde 127 MPa mukavemet elde etmişlerdir [15].

Kabayashi, Japonya'daki bir güç santralinin giriş tüneli için betonda çimento yerine %25 oranında uçucu kül kullanıldığını söylemiştir. Bunun nedeni olarak da tünelin sıcaklığı 100 ile 160^0 C olduğu kaya tabakasının içinden geçmesi olduğunu belirtmiş, yalnız Portland çimentosu ile yapılmış betonun dayanımında azalma olabileceği düşünülerek uçucu kül kullanılmıştır [8].

2.3.3.2 Elastisite Modülü

Uçucu küllü betonların elastisite modülü basınç dayanımıyla benzer özellikler göstermektedir. Yapılan çalışmalar elastisite modülünün erken yaşlarda kontrol betonuna göre daha düşük, ileriki yaşlarda kontrol betonundan çok az yüksek olduğunu göstermektedir. Çalışmalar çimento ve agrega karakteristiklerinin, uçucu kül kullanımından daha çok etki yaptığını göstermiştir [13].

Lane ve Best yaptıkları çalışmada uçucu kül özelliklerinin az da olsa elastisite modülünü etkilediğini söylemişlerdir. Elastisite modülünün, kontrol betonu ile karşılaştırıldığında düşük dayanımlarda düşük, yüksek dayanımlarda yüksek olduğunu saptamışlardır [8].

Bilodeau ve Malhotra %58 oranında F tipi uçucu kül içeren betonlarda yüksek elastisite modülleri elde edildiğini ve bunun da hidrate olamayan uçucu kül tanelerinin agrega gibi etki yapmasından kaynaklanabileceğini ileri sürmüşlerdir [15].

Galeota ve arkadaşları %18 ve %25 oranlarında F tipi uçucu kül içeren betonların elastisite modüllerinin aynı mukavemetteki kontrol betonu ile aynı olduğunu ileri sürmüşlerdir [15].

Joaquin ve arkadaşları yüksek oranda F tipi uçucu kül kullanımında elastisite modülünün ilk yaşlarda düşük ancak ileriki yaşlarda başlangıç kür koşullarına çok hassas olduğunu gözlemlemişlerdir [15].

2.3.3.3 Sünme ve Rötre

Betondaki sünme deformasyonu bazı faktörlere göre değişmektedir. Bu faktörler için, ortam sıcaklığı ve nem koşulları, betonun dayanımı, elastisite modülü, agrega miktarı, yükleme anındaki beton yaşı ve yükleme anındaki sünme gerilmesinin dayanıma oranını sayabiliriz. Uçucu kül, betonun son dayanımına ve dayanım kazanma hızına etki ettiğinden betonun sünme davranışına da etki edecektir [13].
Bilodeau ve Malhotra yüksek oranda uçucu kül kullanılan betonda sünme değerlerinin oldukça düşük ancak kuruma rötrelerinin biraz fazla olduğunu rapor etmişlerdir [15].

Aimin ise yaptığı çalışmada mukavemetleri 30-60 MPa arası olan harçlarda uçucu külün rötreyi azalttığını söylemiştir [15].

Yuan ve Cook yaptıkları çalışmada yüksek kalsiyumlu uçucu kül kullanmışlar, %30 ve %50 oranlarında uçucu kül ikame edilmiş betonların kontrol betonundan daha fazla sünme yaptığını söylemişlerdir [8].

Gifford ve Ward yaptıkları çalışmalarda uçucu küllerin sünmeyi azalttığını tespit etmişlerdir. Bunun sebebi olarak da, uçucu külün elastisite modülünü artırması ve

uçucu külün toplam agrega miktarını artırırken sünmeye sebep hamur hacmini azaltması olduğunu belirtmişlerdir [8].

Sonuç olarak genelde, uçucu kül içeren betonların sünme ve rötre davranışının betonu olumlu yönde etkilediği görülmektedir.

2.3.4 Uçucu Küllerin Ortam Şartlarına Dayanıklılık Özellikleri

2.3.4.1 Geçirimlilik

Durabilite problemlerinin başında geçirimsizlik gelir. Tüm durabilite problemlerinde ilk çare boşluk oranı düşük dolu bir beton üretebilmektir. Dolu bir beton mekanik yönden yüksek mukavemetli olması yanında aynı zamanda geçirimsizdir. Geçirimlilik üzerine pek çok faktör etkir. Bunlar arasında çimento dozajı, su/çimento oranı, agrega granülometrisi ve çabuk sertleşen çimento sayılabilir [17].

Puzolanik bir madde olan uçucu külün bağlayıcı fazın iç yapısını daha sıkı ve boşluksuz yapacağı, agrega-hamur ara yerini iyileştireceği ve böylece geçirimsizliği olumlu yönde etkileyeceği beklenir.

Dunstan ve arkadaşları yüksek oranda uçucu kül kullanarak orta ve düşük geçirimlilik katsayısına sahip betonlar üretilebildiğini uygulamadan örnekler vererek göstermişlerdir [15].

Sarıçimen ve arkadaşları arazi ve laboratuvar kür şartlarının normal ve uçucu küllü betonların geçirimliliğe etkilerini incelemişler ve geçirimsizlik sağlaması için sürekli su kürünün gerekli olduğu sonucuna varmışlardır. Yazarlar uçucu küllü betonların da geçirimsiz olduğunu saptamışlardır [15].

Torri ve Kawamura uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanının betonun boşluk yapısı ve klor geçirgenliğine etkilerini inceledikleri çalışmalarında kür ve ortam şartlarına bağlı olmaksızın mineral katkılı betonların daha geçirimsiz olduklarını gözlemlemişlerdir [15].

Kanitakis düşük kireçli (CaO=%2) uçucu küllerle yaptığı çalışmada erken yaşlarda uçucu küllü betonların düşük dozajlı betonlar gibi davrandığını ve bu yüzden geçirimliliğin kaçınılmaz olduğunu ileri sürmüşlerdir [8].

Marusin %25 uçucu kül içeren betonlarda rutubetli kür süresi arttıkça klor geçirgenliğinin azaldığını gözlemiştir [15].

Akman ve Erdinç F sınıfı uçucu kül kullanarak yaptığı çalışmada yüksek oranda uçucu kül katılımı ile klor geçirimliliğinin büyük oranda (%50-100) azaldığını saptamışlardır. Uçucu külün klor geçirimsizliğini azaltan etkisinin ileriki yaşlarda daha fazla olduğunu saptamışlardır. Bu çalışmadan çıkan başka bir sonuç ise uçucu kül miktarı çok düşük olursa, örneğin %20'nin altında, geçirimsizlikte beklenen yarar elde edilememektedir [22].

2.3.4.2 Zararlı Kimyasallara Dayanıklılık

Betonların kimyasal etkilere dayanıklılığını iki grupta toplayabiliriz.
-Dış Etkiler:Betonu çevreleyen ortamın oluşturduğu zararlı etkiler
-İç Etkiler:Beton içindeki bileşenlerin, agrega-çimento-su gibi, karşılıklı etkileşimi sonucu ortaya çıkan zararlı etkiler

Betonların kimyasal yönden zarar görmesinde ağırlık, çimento hamuru fazında ve/veya çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansın bozulmasıdır.

Betonlarda kimyasal hasar oluşturan iç etkileri şöylece sıralayabiliriz:
-Çimento hamurunun hacim sabitliğini bozan kimyasal öğeler
-Beton karma suyunun oluşturduğu ve ileriki yaşlarda oluşturacağı etkiler
-Alkali-agrega reaktivitesi

Sertleşmiş beton üzerindeki çevrenin oluşturduğu dış etkiler genellikle betonla temasta bulunan zemin, ırmak ve deniz sularının ve endüstri gazları ile kirlenmiş havanın etkileri şeklinde ortaya çıkar [17].
Beton gruplar kullanım sırasında değişik şekillerde sülfatlı ortamlarla karşılaşabilmektedir. Özellikle temel betonlarının bulunduğu doğal zeminler yanında yeraltı suları da sülfat tuzlarını taşıyabilir. Deniz suları değişik oranlarda sülfat içerirken asit yağmurları da bir başka sülfat etkisi oluşum şeklidir. Bunların dışında sanayi atıklarının uzaklaştırılması ve gübre uygulamalarında sülfat etkisi ortaya çıkabilir. Betonu sülfat etkisinden korumak için geçirimliliği azaltmak fiziksel bir önlem olarak düşünülebilir. Bunu sağlamak için daha iyi yerleştirme, doluluk oranını yükseltme, su/çimento oranını azaltma (akışkanlaştırıcı ile) gibi yöntemler düşünülebilir. Öte yandan yüksek sıcaklıkta kür uygulamasının da sülfata dayanıklılığı artırdığı belirtilmiştir [23]. Uçucu küllerinde puzolanik reaksiyon sonucu serbest kireci bağlaması ve geçirimsizliği artırması nedeniyle zararlı kimyasallara dayanıklılığı artırdığı söylenebilir.

Bilodeau ve Malhotra yüksek oranda uçucu kül içeren hava sürüklenmiş ve süperakışkanlaştırıcılı betonlarda buz çözücü tuzlara dayanıklılığın iyi olmadığını gözlemlemişlerdir [15].

Erdoğan ve arkadaşları 3 değişik yüksek kireçli uçucu kül ile ürettikleri harç numunelerinde uçucu kül miktarının artması ile boy uzamaları lineer olarak artmaktadır. Yazarlar sülfata dayanıklılığı ölçmek için CaO/Fe_2O_3 oranının sülfat rezitans faktöründen daha uygun bir ölçek olduğunu ileri sürmüşlerdir [15].

Freeman ve Carrasquillo uçucu küllü çimento kullanmanın sülfata dayanıklılık açısından uçucu külün betona karıştırma katılmasından daha faydalı olduğunu ileri sürmüşlerdir. Ayrıca uçucu kül ile üretilen betonların sülfata dayanıklılıkları Tip II çimentosu ile üretilenden daha iyi olmaktadır [15].

Tikalsky ve Carrasquillo %25, %35 ve %45 oranlarında uçucu kül kullanarak yaptıkları çalışmada yüksek kireçli uçucu küllerin sülfata dayanıklılığı azalttığını, düşük kireçli küllerinde sülfata karşı dayanıklılığı artırdığını söylemişlerdir [24].
Fidjestol, uçucu küllerle ürettiği betonlarda organik asitlere karşı dayanıklılığı incelemiş ve uçucu küllerin betondaki asitlere karşı dayanıklılığı arttırdığını gözlemlemişlerdir[25].

2.3.4.3 Alkali-Agrega Reaksiyonu

Agregalarda bulunan aktif silisin çimento içinde yer almış olan alkali maddeleri yani Na_2O ve K_2O ile bir reaksiyon yapması ve bunun sonucunda genişleme kabiliyetine sahip bir jelin meydana gelmesi olayına alkali-agrega reaksiyonu denir. Jelin su emdikçe hacminin artması nedeniyle daha zararlı şekilde sonuçlanmaktadır [14].
Dunstan ve arkadaşları yüksek oranda uçucu kül içeren betonlarda 10 sene sonra dahi alkali-agrega reaksiyonu izlerine rastlanmadığını belirtmektedirler [15].

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 [15].

Geiker ve Thaulow doymuş kalsiyum hidroksit ve sodyum klorür solüsyonları etkisine maruz harç çubuklarında 20 hafta boyunca uzamaları ölçmüşler ve uçucu kül ve silis dumanının alkali-agrega reaksiyonunu önlemede oldukça etkili olduğunu gözlemişlerdir [15].

Sonuçta uçucu küller alkali-agrega reaksiyonundan dolayı betonda oluşan genleşme ve çatlamaları azaltmaktadırlar. Çimento hamurundaki alkali konsantrasyonu uçucu kül tarafından azaltılmakta ve böylece zararlı reaksiyon riski azalmaktadır.

2.3.4.4 Donma Çözülme Dayanıklılığı

Beton içinde önemli miktarda boşluk içeren bir malzemedir. Bu boşluklarda da ya betonun üretilmesi sırasında kullanılan karma suyu ya da betonun geçirimliliği nedeniyle dışarıdan içeriye girmiş su bulunmaktadır. Böylelikle beton, boşluklarında önemli miktarda su bulunduran bir malzeme olduğuna göre, donma olayının etkisi altında kalmaya ve bu olay sonunda hasar görmeye elverişli bir malzemedir. Sıcaklığın sıfırın altına düşmesiyle başlayan olay kendini önce betondaki iri boşluklarda gösterir. İri boşluklarda başlayan donma olayı küçük boşluklara doğru gelişir ve bunun sonunda da kılcal borulardaki su donmaya başlar. Beton içindeki suyun donması sonunda meydana gelen genlik cisimde bir takım çekme gerilmeleri meydana gelir. Bu gerilmelerin çekme mukavemetine ulaştığı bölgelerde çatlaklar oluşur veya var olan çatlaklar biraz daha büyür [14].

Nasser ve Lai hava sürüklenmiş betonlarda hızlı donma-çözülme tekrar deneyleri yapmışlar ve %20 uçucu kül içeren betonların yeterli dayanım gösterdiğini ancak uçucu kül oranının artması ile durabilite faktörünün azaldığını gözlemişlerdir [15].

Virtanen, uçucu kül, silis dumanı ve cüruf içeren betonların donma ve çözülme dirençlerini karşılaştırmışlar, dayanım ve hava miktarı sabit tutulduğunda uçucu kül ikame edilmesinin betonun donma çözülme direnci üzerinde büyük etkisinin olmadığını saptamışlardır [8].

2.3.4.5 Deniz Ortamına Dayanıklılık

Beton yapı temellerinin sahil alanlarda tuzlu yeraltı suyu seviyesinin altında yapılması, kılcal su emme ve buharlaşma nedeniyle toprak altındaki betonda kristalleşmelere sebep olarak çimento hamurunda kimyasal hasara ve çeliğin korozyonuna sebep olur. Geçirimsiz bir beton, korozyonun durdurulması veya zararsız bir düzeyde bırakılması için gereklidir. Bu açıdan geçirimlilik deniz suyundaki betonun durabilitesini etkileyen en önemli faktördür.

Dunstan ve arkadaşları yüksek oranlarda uçucu kül içeren beton ile yapılan deniz yapısının sürekli gel-git olaylarına maruz kalmasına rağmen gayet iyi performans gösterdiğini söylemişlerdir [15].

Paillere ve arkadaşları uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı harç numunelerini yapay deniz suyu içinde tutmuşlar ve uçucu küllü harçların cüruflu harçlardan daha az şişme yaptığını gözlemişlerdir [15].

2.3.4.6 Donatı Korozyonu

Betonda kullanılan çeliğin korozyonuna sebep olarak 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. Betonun çelik donatının üzerini yeterli bir kalınlıkta paspayı ile örtmesi be betonun geçirimsiz olması donatı korozyonunu azaltacaktır.

Dunstan ve arkadaşları yüksek oranda uçucu kül ile yapılmış deniz yapılarında 10 yıl sonra yapılan incelemelerde donatının iyi korunmuş olduğunu gözlemişlerdir [15].

Nagataki ve Ohga uçucu kül içeren ve içermeyen harçlarda klor iyonu ve karbonatlaşmanın donatı korozyonuna ortak etkilerini incelemişler ve su/çimento oranı 0,5 ve uçucu kül oranı %30 olan betonlarda NaCl kürünün karbonatlaşmayı azaltıcı etki yaptığını gözlemişlerdir [15].

Branca ve arkadaşları su/çimento oranı 0,35, 0,50 ve 0,65 olan uçucu küllü betonlarda uçucu kül ilavesi ile karbonatlaşmanın azaldığını gözlemişlerdir. Ancak uçucu kül çimento yerine kullanıldığında karbonatlaşmayı ve korozyon riskini arttırmaktadır [15].

Odsuki ve arkadaşları değişik korozif ortamlarda saklanan harç numunelerinde yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu külün klor geçirgenliğini ve donatı korozyonunu azalttığını gözlemişlerdir [15].

2.4 Uçucu Küllü Betonlarda Karışım Oranlama Metodları

Uçucu külün betonda kullanılmasının amaçları şu şekilde sıralanabilir [8].

- Çimento miktarını azaltarak maliyeti düşürmek
- Hidratasyon ısısını düşürmek

- İşlenebilirliği artırmak
- 90 gün ve sonrasında betonda istenilen mukavemeti sağlamak

Her uçucu kül sahip olduğu kendine özgü özellikleri ile kullanıldığı betonun özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Karışım oranlama metodlarının ulaşmak istediği ana hedef, uçucu küller arasındaki bu farklılıkların betonun performansına olan etkilerini minimize etmektir.

Yapılan araştırmalarda çimentonun özellikle yüksek miktarlarda uçucu külle yer değiştirmesi (betondan belirli bir miktar çimento çıkartılarak yerine aynı miktarda uçucu kül koyulması) sonucu üretilen betonların dayanımlarının uçucu kül içermeyen kontrol betonlarının dayanımlarına göre genellikle daha düşük dayanımlara sahip olduğu görülmüştür. Ancak bununla birlikte düşük miktarda uçucu kül kullanımıyla kontrol betonundan daha iyi dayanımların elde edildiği çalışmalar da yapılmıştır. Araştırmacılar uçucu küllü betonlardaki uçucu kül miktarının değiştirilerek erken yaşlardaki istenen mukavemetlerin elde edilebileceğini ileri sürmüşler ve bununla ilgili yöntemler üretmişlerdir [26].

Uygulamada uçucu külün beton içerisinde kullanılması iki şekilde olmaktadır:

- Portland çimentosu yerine uçucu küllü çimento kullanımı
- Uçucu külün beton içerisinde ilave bir bileşen olarak kullanımı

Beton içinde uçucu küllü çimento kullanılması diğer kullanım şekline göre daha kontrollüdür. Böylece uçucu kül ve çimento oranları önceden belirlenmiş olur ve karışım oranlarındaki değişim belirli sınır aralığında kalmış olur. Diğer yöntem, yani uçucu külün ilave olarak beton içine katılmasında ise uçucu külün özelliklerinin çok iyi bilinmesi ve sürekli denetlenmesi gerekir [8].

Taze ve sertleşmiş betonda uçucu kül birçok görevi yerine getirir. Taze betonda uçucu kül genelde ince agrega olarak görev yapar, aynı zamanda da su ihtiyacını azaltabilir. Sertleşmiş betonda ise, puzolanik özelliğinden dolayı uçucu kül bağlayıcı matrisin bir bileşeni halini alır ve mukavemet ile durabiliteyi artırır. Uçucu külün betonun karışım hesabıyla ilgili yaklaşımın seçiminde iki kabul yapılır [8].

- Uçucu kül genellikle erken yaşlarda beton dayanımını düşürür.
- Eşit işlenebilirlikte uçucu küllü beton sadece Portland çimentosu içeren betondan daha az su gerektirir.

Uçucu külün beton içerisinde kullanılması açısından 3 temel karışım oranlama metodu geliştirilmiştir [8].

1-Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması (Basit İkame Metodu)

2-Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması (İlave Metodu)

3-Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine koyulması (Kısmi İkame Metodu)

2.4.1 Çimentonun Yerine Kısmi Olarak Uçucu Kül Kullanılması (Basit İkame Metodu)

Basit ikame metodunda, çıkartılan Portland çimentosunun yerine aynı miktar uçucu kül koyulması (bir miktar çimentonun aynı miktardaki uçucu külle yer değiştirmesi) esası geçerlidir. Yapılan çalışmalar uçucu külün ağırlıkça veya hacimce Portland çimentosuyla birebir yer değiştirmesi sonucu hazırlanan betonlarda elde edilen eğilme ve basınç dayanımlarının 3 aylık süre içinde azaldığını ancak 6 ayın ötesinde daha yüksek dayanımlara erişildiğini göstermektedir. Uçucu külün ilk kez ciddi olarak kullanıldığı kütle beton uygulamalarında hidratasyon ısısındaki azalmanın sağlandığı düşünüldüğünde erken yaşlardaki dayanım düşüklüğü gibi yapısal sorunlar önemsiz mertebede kalmıştır [8].

Basit ikame metodunda, uçucu küllü betonun genel davranışı, erken yaşlarda uçucu külün çok az bağlayıcılık niteliği göstermesi ve daha çok ince agrega gibi davranmasıdır. İleriki yaşlarda ise bağlayıcılık aktivitesi bariz halde görülür ve son dayanıma büyük katkısı olur [8].

2.4.2 Uçucu Külün İnce Agrega Olarak Kullanılması (İlave Metodu)

İlave metodunda karışımda kullanılacak çimento miktarında azaltma yapılmaksızın uçucu kül karışıma eklenir. Beton içerisindeki etkin bağlayıcı miktarı bu yöntem sayesinde artırılır. Karışım düzenlemeleri agrega miktarındaki değişikliklerle ve karışımın kullanılacağı uygulamanın özelliğine bağlı olarak yapılır. Bu yöntemin bir uygulaması, Price tarafından yapılan baraj inşaatı için beton malzeme araştırma sonucunda olmuştur. Sülfatın direncinden dolayı minimum bir çimento faktörü ve çimentodan çok ince agrega yerine bir puzolan kullanmanın önemli olduğu düşünülmüştür. İlave yapılan uçucu külün tüm yaşlarda dayanım artışına sebep

olduğu saptanmıştır. Artışların 7 güne kadar düşük fakat 3 aylık ve 1 yıllık periyotlarda 6.9 MPa düzeylerine ulaştığı gözlenmiştir [8].

Bu metotta uçucu külün ilave edilmesi ile elde edilen ileriki yaşlardaki mukavemet artışlarının, aynı miktarda çimento ilave edilmesiyle elde edilen artışlardan daha fazla olduğu belirtilmektedir.

2.4.3 Uçucu Külün Kısmi Olarak Çimento ve İnce Agrega Yerine Koyulması (Kısmi İkame Metodu)

Bu metot, çimentonun bir kısmının azaltılarak, karışıma çıkarılan çimento miktarından farklı miktarda uçucu kül eklenmesi ve ince agrega ve su miktarında değişiklik yapılarak ayarlanması şeklinde uygulanır. Bu metodun uygulanma neticesinde çimentoyla uçucu kül miktarının, yani toplam bağlayıcı miktarının kontrol betonundan fazla olduğu durumlarda dayanım gelişimi ve ekonomikliği sağlamak açısından, karışım oranlarında bir optimizasyona gidilmesi gerekir [8].

Kısmi ikame metodu, kendi içerisinde, modifiye edilmiş ikame metodu ve rasyonel oranlama metodu olmak üzere iki farklı formda incelenir.

2.4.3.1 Modifiye Edilmiş İkame Metodu

Bu metot karışım oranlarının değiştirilmesiyle, erken yaşlarda kontrol betonu ile uçucu küllü betonların kıyaslanabilir dayanıma sahip hale gelebileceğini göstermiş olan Lovewell ve Washa tarafından 1958 yılında ortaya çıktığı kabul edilmiştir. Bu çalışmanın temel esasları şu şekilde özetlenebilir [8]:

‘Erken yaşlardaki (3 ve 28 günler arası) dayanım kayıplarını telafi edebilmek için uçucu kül ile yapılmış karışımlarda kullanılan toplam uçucu kül ve çimento ağırlığı karşılaştırılabilir dayanımdaki uçucu kül içermeyen karışımın çimento ağırlığından fazla olmak zorundadır’.

1960’lı yılların başından itibaren yapılan çalışmalar sonucunda anlaşıldığı üzere, uçucu küllü betonun işlenebilirlik ve dayanım açısından istenilen koşullara uyması için, gerek dayanıma gerekse işlenebilirliğe etki eden uçucu külün özelliklerinin, karışım oranının belirlenmesi sırasında her yönüyle ele alınması gerekmektedir. Bu anlayış Abrams’ ın dayanım ve su/çimento oranındaki ilişkisinden yola çıkmış ve ilk karışım oranlama yöntemlerinin gelişimi sırasında oluşmuştur [8].

2.4.3.2 Rasyonel Oranlama Metodu

Bu metodun ilk defa Smith (1967) tarafından önerildiği kabul edilmektedir. Bu metodun modifiye edilmiş ikame metodundan farkı bir 'k' etkinlik faktörünün tanımlanmış olmasıdır. Smith, ağırlığı f olan uçucu külün, ağırlığı kxf olan çimentoya eşdeğer olduğunu ve buradaki k değerinin "bağlayıcı etkinlik faktörü" olduğunu belirtmiştir. Bu etkinlik her uçucu kül için farklılık göstermektedir. Burada uçucu külün puzolanik aktivitesi dikkate alınmaktadır. Buna göre etkinlik faktörü k; uçucu kül miktarını eşdeğeri çimento miktarına çeviren katsayı olarak tanımlanabilir. Smith'in çalışmasıyla ilgili bazı bilgiler ve elde ettiği sonuçlar şöyledir [27];

1) Normal betonlarda dayanımı etkileyen iki ana faktör vardır. Bunlar çimentonun tipi ve su/çimento oranıdır. Sertleşme oranları farklı olan iki çimento için, su/çimento oranında ayarlama yaparak aynı dayanıma ulaşmak mümkündür. Dayanımdaki istenilen değişikliğin su/çimento oranındaki oynamayla elde edilmesi, Abrams'ın su/çimento oranı ile dayanım arasındaki ilişkiden elde ettiği eğride de ispatlanmıştır.

2) Uçucu külün betonda kullanılmasıyla ilgili üç belirsizlik vardır. Bu belirsizlikler uçucu külün, çimentoyla birebir yer değiştirmesiyle, katkı olarak kullanılmasıyla ve ince agrega yerine kullanılmasıyla ortaya çıkar. %20 çimento yerine uçucu kül kullanılmasıyla, %25 çimento ilave edilmesi sonucu oluşan etki aynı olacaktır (oranlama açısından). Uçucu kül kullanımı işlenebilirliği azaltıyorsa ve bunu karşılamak için agrega/çimento oranını azaltıyorsa o zaman uçucu külle ince agreganın yer değiştirildiği düşünülebilir. Üç durumda da düşünce tarzı yanlıştır. Uçucu kül içeren beton yeni bir beton olarak düşünülmeli ve incelenmelidir.

3) Rasyonel metodun kullanılmasından önce uçucu küllerin basınç dayanımına etkisi incelenmelidir. Uçucu küllü ve kontrol betonlarının basınç dayanımı su/çimento grafikleri incelenerek, uçucu küllü betonların kontrol betonu ile aynı basınç dayanımı elde etmesi için gerekli su/çimento oranı bulunur.

4) Özellikleri bilinen küllerin test sonuçlarıyla ilgili karşılaştırma yapabilmek için, her külün bağlayıcılık etkinliği k, külün ağırlığı f ise çıkarılan çimento ağırlığının kxf'ye eşit olduğu kabul edilmiştir. Bir betonda suyun ağırlığı W, çimentonun ağırlığı C ve uçucu külün ağırlığı f ise etkin su/çimento oranı:

$$(W/C)_c = \frac{W}{C+kf} = \frac{W}{C}\left[\ \frac{1}{1+(kf/C)}\ \right] \qquad (2.3)$$

5) Smith etkin su/çimento oranıyla dayanım arasında ilişki kurarak k etkinlik katsayılarını hesaplamış ve bunların ortalamasını alarak etkinlik katsayılarını bulmuştur. Elde ettiği k etkinlik katsayısının yaşlara göre değerleri Tablo 2.5'de verilmiştir.

Tablo 2.5 Yaşlara göre k etkinlik katsayısı değerleri

Yaş	7. Gün	28. Gün	56. Gün	90. Gün	180. Gün
k değeri	0.225	0.231	0.256	0.268	0.352

6) Uçucu küllü betonların kontrol betonuna göre yaklaşık olarak eşit işlenebilirliğe sahip olduğunu, ayrıca uçucu külün betona ilavesinin normal olarak taze betonun kohezyonunu artırdığını gözlemlemiştir.

Bu yöntem İngiltere'de uygulanmış ve oranlama prosedürlerini basitleştirmek için bir takım tablolar hazırlanmıştır. Buna karşın Munday (1983) ise bu yöntemin uygulamasındaki bazı görünen zayıflıklarına dikkat çekmiştir [8];

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) İstenilen işlenebilirliğe ulaşabilmek için, beton için gerekli su miktarı kullanılan uçucu küle göre değişecektir. Bir kül su ihtiyacını arttırmayabilirken bir diğeri artırabilmektedir. Bu değişkenlik agrega miktarı uygun şekilde ayarlanarak dengelenebilir ancak bu pek pratik bir yaklaşım olmamaktadır. Uygulamada genelde su miktarı ile ayarlama yapıldığından hedef dayanımda sapmalar da yüksek olmaktadır.

3) Metod çoğu amaç için komplekstir.

1968 yılında Kuzey Amerika'daki bazı uygulamalarda tatbik etmek üzere birkaç araştırmacı yazar tarafından Abrams'ın ilişkisine dayanarak uçucu küllü betonlar için oranlama metodları 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 metodları" konulu araştırmayı rapor halinde yayınlamıştır. Cannon su/çimento oranı ve dayanım arasında Abrams'ın ilişkisini kullanmış ve uçucu kül ile Portland çimentosunun birbiri ile mukayesesini göz önüne alan bir faktör ortaya konulmuştur. Bu yaklaşımın kapsamlı

laboratuvar araştırmaları ve saha deneyimleri ile birleştirilmesi Cannon'a oranlama prosedürlerini kolaylaştırıcı tablolar ve grafikler geliştirme imkanı tanımıştır [8].

Ghost (1975) Abrams'ın "iyice sıkıştırılmış bir betonun dayanımı ile su/çimento oranı ters orantılıdır" ilişkisinden yola çıkarak su/çimento oranını uçucu külü de içine alarak genişletmiş ve sonuçta uçucu küllü ve kontrol betonlarının dayanımları arasında aşağıdaki şekilde bir ilişki kurmuştur [8].

$$R' = M + NR \tag{2.4}$$

R=Kontrol betonun su/çimento oranı,
R'=Uçucu küllü betonun su/çimento oranı,
M ve N sabitlerdir.

Sonuçta Ghost, laboratuvarda elde edilen kapsamlı deney sonuçları ile belirli yaşlarda farklı (uçucu kül/çimento) oranları için M ve N amprik sabitlerini hesaplayarak tablo ve grafikler vasıtası ile karışım oranlarının seçilebileceği bir prosedür geliştirmiştir.

İngiltere'de Munday ve arkadaşları, 28. günde yada daha erken yaşlarda hedeflenen herhangi bir mukavemeti elde etmek üzere uçucu küllü beton karışımlarını oranlamak için bir prosedür teklif ettiler. Buna göre karışım oranlamasının yapılması için bazı verilerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu veriler şöyle belirtilmiştir [8];

- 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 belirlenmesi

Munday ve arkadaşlarının altı farklı uçucu külle yaptıkları araştırmalar sonucu ile ilgili bir örnek Tablo 2.6'da verilmiştir. Bütün uçucu küllü numunelerde 28. gündeki mukavemete erişmek için eklenen uçucu kül miktarının çıkarılan çimento miktarından daha fazla olduğu ve bu miktarın uçucu külün cinsine göre değiştiğini saptamışlardır [8].

Tablo 2.6 28. günde eşit dayanım elde etmek üzere oranlanmış şahit ve uçucu küllü betonlar için örnek karışım oranları

	Kontrol Betonu	A	B	C	D	E	F
45 µm üstü	-	11.7	22.7	45.7	25.6	29.7	3.3
Çimento miktarı (kg)	310	223	249	298	296	246	215
Uçucu kül miktarı (kg)	-	149	159	156	177	163	144
Su miktarı (kg)	190	166	182	200	210	184	161
Agrega miktarı (kg)	1890	1838	1740	1666	1612	1752	1875

2.5 k Etkinlik Faktörü ve Bu Konuda Yapılmış Çalışmalar

İlk defa Smith tarafından kullanılan k etkinlik faktörü ile ilgili bugüne kadar birçok çalışma yapılmış, değişik yöntemler denenmiş fakat bu konuda tam bir fikir birliğine varılamamıştır.

Harrison yapmış olduğu çalışmada betona ilave edilen çimento ve uçucu kül için üç faktörün kontrol edilmesi gerektiği üzerinde durmuştur. Bu faktörler aşağıda verilmiştir [28].

1) Minumum (C+kf) miktarı
   C=Çimento miktarı (kg/m^3)
   f=Uçucu kül miktarı (kg/m^3)
   k=Avrupa şartnamesi EN 206'ya göre dizayn edilmiş etkinlik faktörü
2) Maksimum W/(C+kf) oranı
3) İstenilen beton dayanımını elde etmek için gerekli olan su/bağlayıcı oranı (R)

Bu faktörler ışığında Tip 1 çimentosu ile yapılan çalışmada kullanılan uçucu kül için k değerinin yaklaşık olarak 0,3 ile 0,5 arasında olduğunu belirtmiştir. Normalde bileşen olarak uçucu kül için k değeri çimento içinde kullanıldığında 1 olmaktadır. Bu açıdan uçucu külün dayanıma gerçek katkısının eşitlikte yer alması gereklidir, dolayısıyla su/etken bağlayıcı oranı şu şekilde olmalıdır:

$$R=W(C+kgf) \tag{2.5}$$

Yapılan çalışmada Tip 1 42,5 çimento ve %30 uçucu kül kullanımı ile gerçek k değerinin 0,2 ile 0,45 arasında olduğunu bulmuştur. Uçucu külün daha az kullanıldığı durumlarda aralığın daha yukarıya ilerlediği yani uçucu külün daha reaktif hale geldiğini, yüksek yüzdelerde ise aralığın daha aşağıya çekildiğini yani külün daha az reaktif olduğunu belirtmiştir

Akman ve Yücel, etkinlik faktörünü, uçucu külün bağlayıcılığının çimentonun bağlayıcılığına oranı olarak tanımlamışlar, belirlenmesinde Bolomey formulünü kullanmışlardır [29].

$$f_c=K_B\left[\ \frac{C}{s+h}-k'\ \right] \qquad (2.6)$$

Yazarlar, Bolomey formulünün kullanımı sırasında ilk önce yalnız Portland çimentosu kullanarak kontrol betonu üretmişlerdir. Elde edilen basınç dayanımı vasıtasıyla k' ve K_B katsayıları bulunmuştur. Uçucu küllü beton üretiminde ise bu katsayılar kullanılmaktadır. C çimento miktarı yerine bağlayıcı madde miktarını ifade etmek üzere C'+(kxf) değeri kullanılır. Böylece uçucu kül üretiminde Bolomey formülü şöyle olmaktadır;

$$f_c=K_B\left[\ \frac{C'+(kf)}{S+h}-k'\ \right] \qquad (2.7)$$

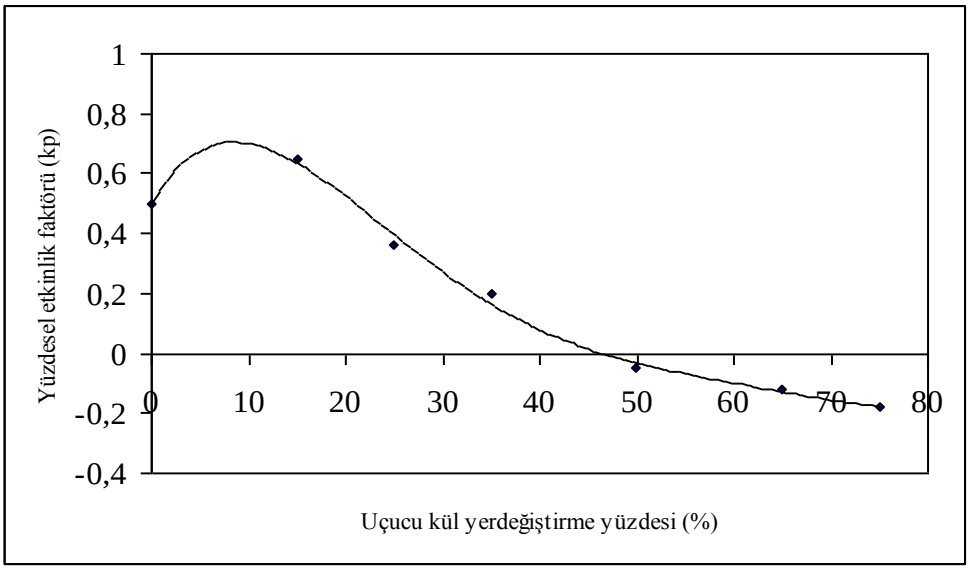
Uçucu küllü beton üretildikten sonra, bilinmeyen tek değer olan k faktörü yerine konularak bulunmaktadır. Yazarlar, C sınıfı uçucu külleri kullanarak yaptıkları çalışmada, k etkinlik katsayısının 0,14 ile 0,57 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir [29].

Özcan yaptığı çalışmada belirli oranlarda (%10,%20,%30) çıkarılan çimentonun yerine farklı miktarlarda Seyitömer ve Tunçbilek uçucu küllerini ekleyerek beton üretmiştir. k etkinlik faktörünün bulunmasında Bolomey formülünü kullanmış ve k etkinlik katsayısını Tunçbilek uçucu külü için 0,62, Seyitömer uçucu külü için 0,79 olarak bulmuştur. C tipi (Seyitömer) uçucu külde daha yüksek k etkinlik katsayısının elde edilmesinin, içerdiği CaO miktarının etkisiyle erken yaşlardan itibaren puzolanik reaksiyonun daha hızlı gelişmesine bağlamıştır. Etkinlik katsayısının C tipi (Seyitömer) uçucu külde yüksek çıkmasının bir nedenide, eşit kıvam için ihtiyaç duyduğu su miktarının fazla olmasıdır. Yani etkinlik katsayısının sadece uçucu külün miktarına değil aynı zamanda içerdiği su miktarına da bağlı olduğunu belirtmiştir[28].

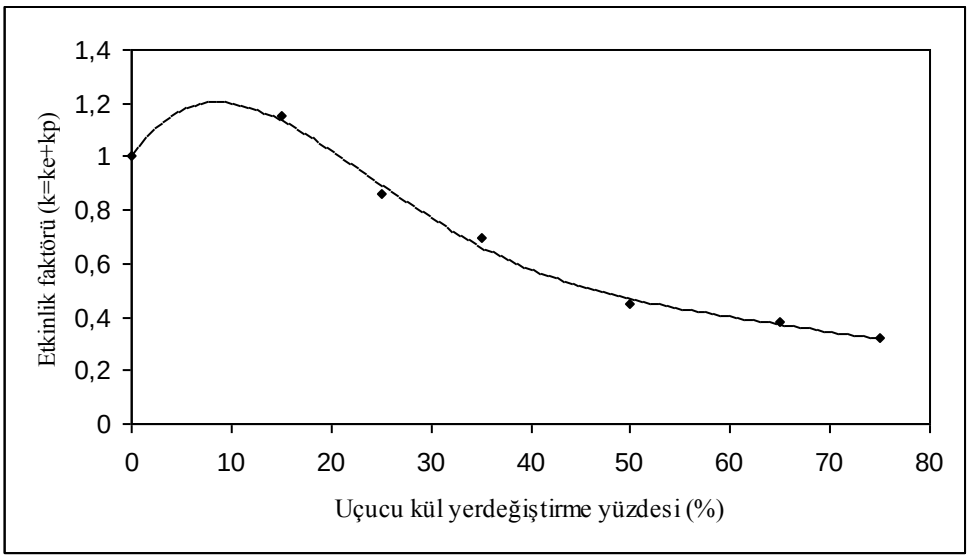
Babu ve Rao yaptıkları çalışmada k etkinlik faktörünün belirlenmesinde su/bağlayıcı oranı-dayanım arasındaki ilişkiyi kullanmıştır. Uçucu küllü betonun su/bağlayıcı oranındaki azalma kontrol betonunun su/çimento oranı ile karşılaştırılarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [30];

$$\Delta w = \frac{W}{C} - \frac{W}{C' + kf} = \frac{W}{C' + kf} - \frac{W}{C' + f} = \frac{W}{C'} \left[\frac{1}{1 + \frac{kf}{C'}} - \frac{1}{1 + \frac{f}{C'}} \right] \quad (2.8)$$

Babu ve Rao'ya göre uçucu kül miktarının artması ile külün etkinliği azalma eğilimine girmektedir. Aynı zamanda uçucu külün etkinliği su/çimento oranının artması ile birlikte azalmaktadır. Ayrıca uçucu külün özelliklerindeki önemli farklılıklar (incelik), 28. gündeki basınç dayanımlarını etkilemiş ve uçucu külün etkinliği %20 ile %28 yer değiştirme aralığında çok değişkenlik göstermiştir. Babu ve Rao, etkinlik faktörünün tüm uçucu kül oranları için aynı değerde olmamasından yola çıkarak, etkinlik faktörünü k=ke+kp şeklinde iki bileşene ayırmışlardır. Yazarlar, ke'yi genel etkinlik faktörü, kp'yi de uçucu kül oranına bağlı olan yüzdesel etkinlik faktörü olarak tanımlamışlardır. Bu etkinlik faktörlerini su/bağlayıcı oranı-dayanım arasındaki ilişkiyi kullanarak bulmuşlardır. Bunun için uçucu kül içermeyen (kontrol), yüksek dozajda uçucu kül içeren ve düşük dozajda uçucu kül içeren betonlar üretmişler ve her bir seri için sırasıyla dayanım-su/bağlayıcı oranı ile değişimini gösteren diyagramları çizmişlerdir. Daha sonra uçucu küllü beton diyagramlarının normal kontrol beton diyagramlarına çakışmasını sağlayarak ke ve kp değerlerini bulmuşlardır. Yazarlar, farklı yüzdelerle ve farklı uçucu küller kullanarak elde ettikleri betonlarda genek etkinlik faktörünün (ke) 0,2 ile 0,8 arasında değiştiğini gözlemişler ve bu değerin tüm yer değiştirme yüzdelerinde 0,5 olarak alınmasını uygun görmüşlerdir. Yazarların bulduğu yüzdesel etkinlik faktörünün (kp) ve etkinlik faktörünün (k) uçucu kül yüzdesi ile değişimi Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de gösterilmiştir [30].



Şekil 2.1 Uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi-kp diyagramı

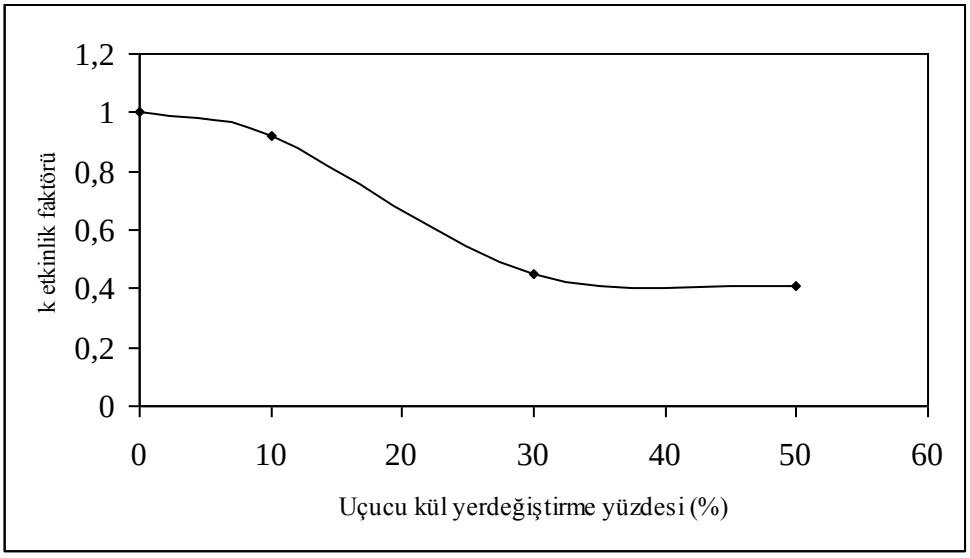


Şekil 2.2 Uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi- etkinlik faktörü (k=ke+kp)

Tuygun C sınıfı Çayırhan uçucu külünü üç farklı yer değiştirme yüzdesinde (%10,%30,%50) kullanarak ürettiği betonlarda k etkinlik faktörünü bulmak çin Babu ve Rao'nun kullanmış olduğu grafiksel metodu kullanmıştır. Yalnız bu çalışmada Babu ve Rao'nun ke ve kp olarak ikiye ayırmış oldukları k etkinlik faktörü tek bir sayı olarak, bir seferde bulunmuştur. Tuygun bu çalışmada aynı basınç dayanımında uçucu külle üretilmiş olan numunenin su/bağlayıcı madde oranında, uçucu kül miktarının önüne bir k etkinlik faktörü eklemiş ve uçucu küllü betonun su/bağlayıcı madde oranını kontrol betonunun su/çimento oranına eşitleyerek k etkinlik katsayısını bulmuştur.

$$\frac{W}{C} = \frac{W'}{C' + kf} \tag{2.9}$$

Tuygun yaptığı bu çalışmada, uçucu kül yüzdesine bağlı olarak değişen k etkinlik faktörünün tek bir değer olarak kullanılmaması gerektiğini ve tek bir k etkinlik değeri yerine yüzdeye bağlı değişik k etkinlik değerleri kullanmanın daha doğru olacağını söylemiştir. Şekil 2.3'de Tuygun'un çalışması sonucu bulunan 28 günlük numunelerin k etkinlik faktörü-uçucu kül yer değiştirme yüzdesi grafiği gösterilmiştir [20].



Şekil 2.3 Uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi-k etkinlik faktörü

1996 yılında The European Standart Organization (CEN) k etkinlik faktörünün saptanması için bir çalışma grubu kurulmasını kararlaştırdı. 2000 yılında da CEN TC 140 SC1 adına çalışma grubu (WG 12) yayınladığı raporunda k etkinlik katsayısının belirlenmesi için çeşitli metodlar önermiştir. Bu raporda k etkinlik faktörünün hesabındaki temel nokta, kontrol betonu ve uçucu kül eklenen betonların basınç dayanımının su/çimento oranıyla ilşkisidir. Yani önerilen metodda, uçucu kül çimento miktarından çıkarılmamakta, belirli oranlarda eklenip basınç dayanımı-su/bağlayıcı oranı grafiği yerine, basınç dayanımı-su/çimento oranı grafiği çizilmekte ve daha sonra aynı basınç dayanımındaki uçucu küllü beton diyagramlarının normal beton diyagramlarına çakışması sağlanarak k etkinlik faktörü bulunmaktadır. Bununla ilgili grafik Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Bu metodu diğer metotlardan ayıran en önemli nokta çimento miktarının sabit olması ve onun üzerine belirli oranlarda uçucu kül eklenmesidir. Bununla ilgili formulasyon şu şekildedir [31];

$$\frac{W}{C}=\frac{W'}{C+kf}=\frac{W'}{C(1+\frac{kf}{C})}$$ Buradan; (2.10)

$W_o=W_\varphi/(1+k\varphi)$ denklemi elde edilir . (2.11)

k=Etkinlik faktörü

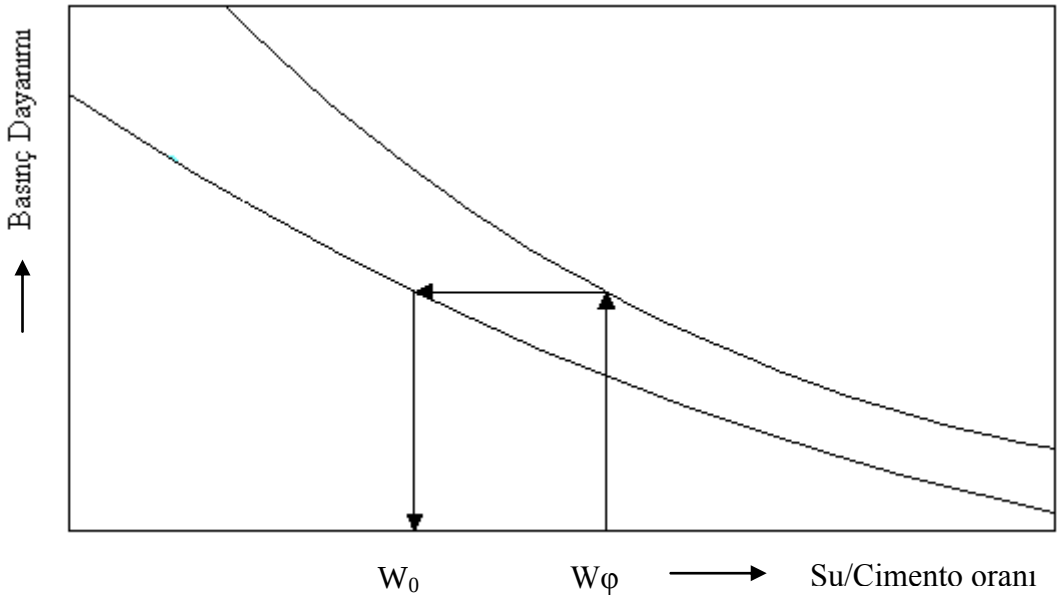
φ=Uçucu kül/çimento oranı

W_o=Kontrol betonunun su/çimento oranı

W_φ=Uçucu küllü betonun su/çimento oranı

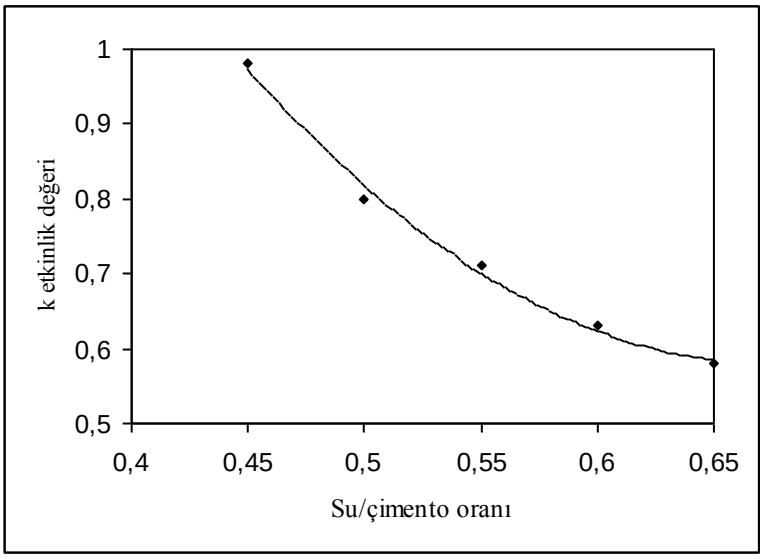
2.9 denkleminden k değerini çekersek;

$k=[(W_\varphi/W_o)-1]*(1/\varphi)$ (2.12)



Şekil 2.4 k etkinlik faktörünün belirlenme şekli

CEN TC 140 SC1 adına çalışma grubu k etkinlik faktörünü etkileyen birçok faktör olduğunu belirtmiştir. Bunlar, eklenen uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri, uçucu külün eklenme miktarı, çimento tipi, su/çimento oranı, kür koşulları, uçucu kül/çimeno oranı, sıcaklık gibi faktörlerdir. Şekil 2.5'de çalışma grubunun bulduğu k etkinlik değerleri-su/çimento oranı grafiği verilmiştir [31].



Şekil 2.5 Su/çimento oranı ve k etkinlik faktörü arasındaki ilişki

CEN TC 140 SC1 adına çalışma grubu k etkinlik faktörünü bulmak için üç çeşit grafiksel metot önermiştir. Bu üç metodunda temeli daha önce belirtildiği gibi aynıdır. Bu metotların hepsinde su/çimento oranı dayanım arasındaki ilişkiden k etkinlik faktörü hesaplanmaktadır [31].

1) Lineer İlişki Metodu: Bu metot sınırlı bir arada basınç dayanımı-su/çimento oranı arasında lineer bir ilişki kurularak uygulanmaktadır. Bu metodu uygulayabilmek için en az iki kontrol betonu karışımı ve eklenen uçucu küllü beton karışımı olması gerekmektedir.

$$\beta_{D0}=a_0-b_0w_0 \quad (2.13)$$

$$\beta_{DF}=a_f-b_fw\varphi \quad (2.14)$$

W_0:Kontrol betonunun su/çimento oranı

$W\varphi$:Uçucu küllü betonun su/çimento oranı

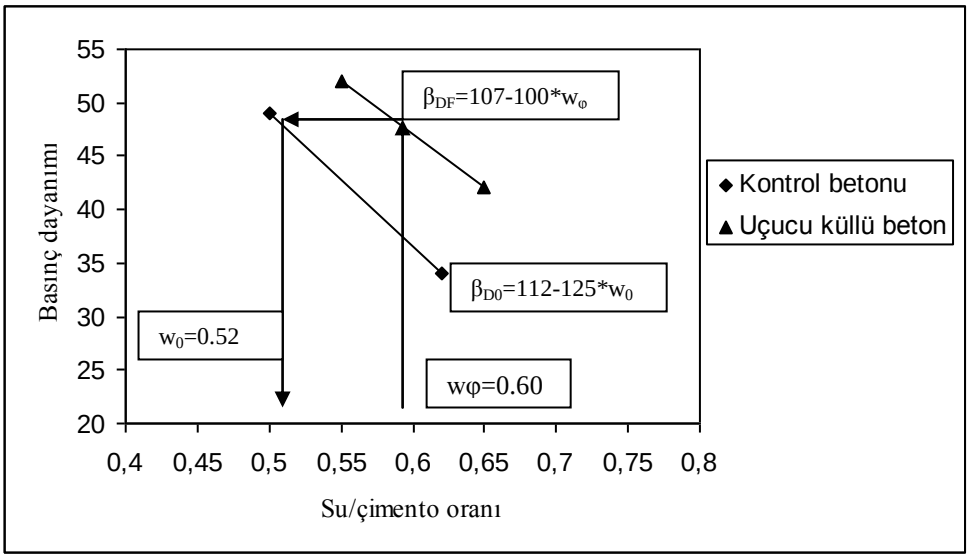
β_{D0}:Kontrol betonunun basınç dayanımı

β_{DF}:Uçucu küllü betonunun basınç dayanımı

a_0, b_0, a_f, b_f:Baınç dayanımı su/çimento oranı arasındaki lineer parametrelerdir

Burada $\beta_{DF}= \beta_{D0}$ eşitliğini uygulayarak ve 2.12 denklemini kullanarak k değerini çekilirse aşağıdaki denklem elde edilir;

$$k=[w_0b_0/a_0-(a_f-b_fw_\varphi)-1]*1/\varphi \quad (2.15)$$



Şekil 2.6 Lineer metot için k değerinin hesabı

2) Karşıt İlişki metodu: Bu metot sınırlı bir arada basınç dayanımı-1/su/çimento oranı arasındaki lineer ilişki kullanılarak uygulanmaktadır. Buradaki ilişki şu formüllerle açıklanabilir;

$$fc_1=A+B/W_0 \quad (2.16)$$

$$fc_2=P+Z/W\varphi \quad (2.17)$$

Bu metotta da daha önceki metotta olduğu gibi fc_1 ve fc_2 denklemleri eşitlenip, 2.12 denklemi kullanılarak k etkinlik değeri bulunmaktadır.

3) Eşit işlenebilme metodu:Bu metodun temel noktası kontrol betonlarının ve uçucu kül eklenen betonların eşit çökmeye sahip olmasıdır. Bu eşit çökme uçucu kül eklenen betonlara su ekleyerek veya akışkanlaştırıcı kullanılarak sağlanır. Daha sonra kontrol betonlarının ve uçucu küllü betonların daha önceki metotlardaki gibi dayanım-su/çimento oranı grafikleri çizilerek 2.12 denkleminden k etkinlik faktörü bulunur.

Şimdiye kadar yapılan çalışmalar sonucunda uçucu küller için farklı etkinlik faktörü değerleri verilmiştir. Smith 20 ayrı kaynaktan aldığı küllerle yaptığı çalışma sonucunda bu değeri 28 gün için 0.231 olarak elde etmiş ve optimum etkinlik faktörü değerini 0.25 olarak teklif etmiştir. Alman standartı DIN 1045 etkinlik faktörünün 0.30 olarak alınmasını önermiştir. Avrupa standartı prEN 206 uçucu kül etkinlik faktörünün kullanılabilmesi için kütlece uçucu kül/çimento oranının 0.33'den küçük olması gerektiğini belirterek k'nın CEM I 32.5 çimento için 0.2, CEM I 42.5 çimento

için 0.4 alınmasını önermiştir. Şubat 2001 tarihli TS 11222'de etkinlik faktörü kavramı, eşdeğerlik katsayısı adıyla içeriğe katılmış ve prEN 206 ile aynı değer kullanılarak CEM I 32.5 çimento için 0.2, CEM I 42.5 çimento için 0.4 olarak kabul etmiştir.

Yukarıdaki sonuçlardan görüldüğü gibi, k etkinlik faktörünün hesabında fikir birliğine varılamamıştır. Bunun nedeni de k etkinlik değerinin birçok faktöre bağlı olması ve k etkinlik faktörünün bulunması için çok farklı yöntemlerin olmasıdır. Bu tez çalışmasında k etkinlik faktörünü bulmak için CEN TC 140 SC1 adına çalışma grubunun önerdiği grafiksel metotlardan eşit işlenebilme metodu kullanılmıştır. Karşılaştırılacak olan kontrol betonu ve uçucu küllü betonlar eşit çökme değerleri verilecek şekilde üretilmiştir. Çalışmada Çatalağzı santralinden sağlanan F tipi uçucu kül ve CEM I 42.5 çimento kullanılmıştır. Çimento dozajı 240 kg/m^3 seçilerek düşük CEM I 42.5 çimentolu düşük dozajlı betonlardaki F tipi uçucu külün etkinliği bulunmuştur. Bunun yanında yüksek dozajda uçucu kül kullanmanın durabiliteye olan etkisini incelemek için kılcallık deneyleri de yapılmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada Çatalağzı santralinden sağlanan F tipi uçucu kül ve Lafarge Aslan çimento fabrikasından sağlanan CEM I 42.5 çimento kullanılmıştır. Düşük çimento dozajı seçilerek (240 kg/m^3) F tipi Çatalağzı uçucu külünün betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmekte ve etkinliği belirlenmektedir. Çalışmanın ana amacı olan k etkinlik faktörünün belirlenmesinde bugüne kadar birçok çalışma yapılmış ve çok farklı yöntemler denenmiştir. Avrupa standartı prEN 206 uçucu külün etkinlik faktörünü CEM I 32.5 çimento için 0.2, CEM I 42.5 çimento için 0.4 alınmasını önermesine rağmen yapılan çalışmalarda çok farklı değerler elde edilmiştir. Bu çalışmada basınç dayanımı-su/çimento oranı arasındaki ilişki kullanılarak k etkinlik katsayısının belirlenmesi amaçlanmış ve CEN TC 140 SC1 adına çalışma grubunun önerdiği metotlardan eşit işlenebilme metodu kullanılmıştır.

3.2 Üretilen Betonların Özellikleri

İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Labaratuvarında yapılan çalışmada üç farklı uçucu kül ekleme oranı (%17, %33 ve %50), dört farklı su/çimento oranı ve kontrol betonu da olmak üzere toplam on altı seri beton üretilmiştir. Numuneler 23 ± 2°C'lik su içerisinde ve 20°C ile %65±5 rutubetli ortamda saklanmıştır

Üretilen betonlarda CEM I 42.5 çimento ve F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Çimento dozajı sabit olarak 240 kg/m^3 seçilmiştir. İlk önce dört çeşit oranda (0,50, 0,60, 0,70 ve 0,80) kontrol betonu üretilmiş daha sonra aynı işlenebilirliği verecek şekilde üç farklı oranda uçucu kül eklenen (%17, %33 ve %50) betonlar üretilmiştir. Aynı işlenebilirlik uçucu kül eklenen betonlarda su ilave edilerek sağlanmıştır. 0,50, 0,60 ve 0,70 oranlarında üretilen kontrol betonu ve uçucu kül eklenen betonlarda süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Çalışmada agrega granülometrisi ve agrega türü

aynı kalmış, maksimum dane çapı 32 mm seçilmiştir. Üretilen betonların karışım oranlarına göre isimlendirilmesi Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Üretilen Betonların İsimlendirilmesi

Uçuçu Kül Ekleme Yüzdesi (%)	Üretim Grupları
0	Kon50
17	U17K50
33	U33K50
50	U50K50
0	Kon60
17	U17K60
33	U33K60
50	U50K60
0	Kon70
17	U17K70
33	U33K70
50	U50K70
0	Kon80
17	U17K80
33	U33K80
50	U50K80

Kon 50; Su/çimento oranı 0.5 olan kontrol betonu

U17K50; Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.5 olan eşit işlenebilmeli %17 uçucu kül eklenmiş beton

3.3 Kullanılan Malzeme Özellikleri

3.3.1 Çimento

Beton üretiminde Lafarge Aslan çimento fabrikasının üretimi olan CEM I 42.5 tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal özelliklerini gösteren deneyler Lafarge Aslan çimento fabrikasında yapılmış, fiziksel ve mekanik özelliklerini gösteren deneyler İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Labaratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin sonuçları Tablo 3.2, Tablo 3.3 ve Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.2 Portland çimentosunun mekanik özellikleri

Gün	Basınç Dayanımları (N/mm^2)	Eğilme Dayanımları (N/mm^2)
7	39.5	6.9
28	55.1	7.4

Tablo 3.3 Portland çimentosunun fiziksel özellikleri

Özgül Ağırlık (kg/dm^3)		3.10
Priz süresi	Başlangıç	3 saat 15 dakika
	Son	4 saat 15 dakika
Hacim Sabitliği (Le Chatelier) Toplam (mm)		1
İncelik	Özgül Yüzey (Blaine) cm^2/gr	3532
	200 μm elek üstünde kalan yüzde (%)	0.9
	90 μm elek üstünde kalan yüzde (%)	1.5

Tablo 3.4 Portland çimentosunun kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasal Bileşimin Yüzdesi
Çözünmeyen SiO_2	0.41
Çözünen SiO_2	20.87
Al_2O_3	5.35
Fe_2O_3	2.85
CaO	64.42
MgO	1.47
SO_3	3.15
K_2O	0.70
Kızdırma Kaybı	0.97
Tayin Edilemeyen	0.22
Serbest CaO	0.92
C_3S	50.86
C_2S	21.55
C_3A	9.36
C_4AF	8,67
MS	2.55
MA	1.88

3.3.2 Agregalar

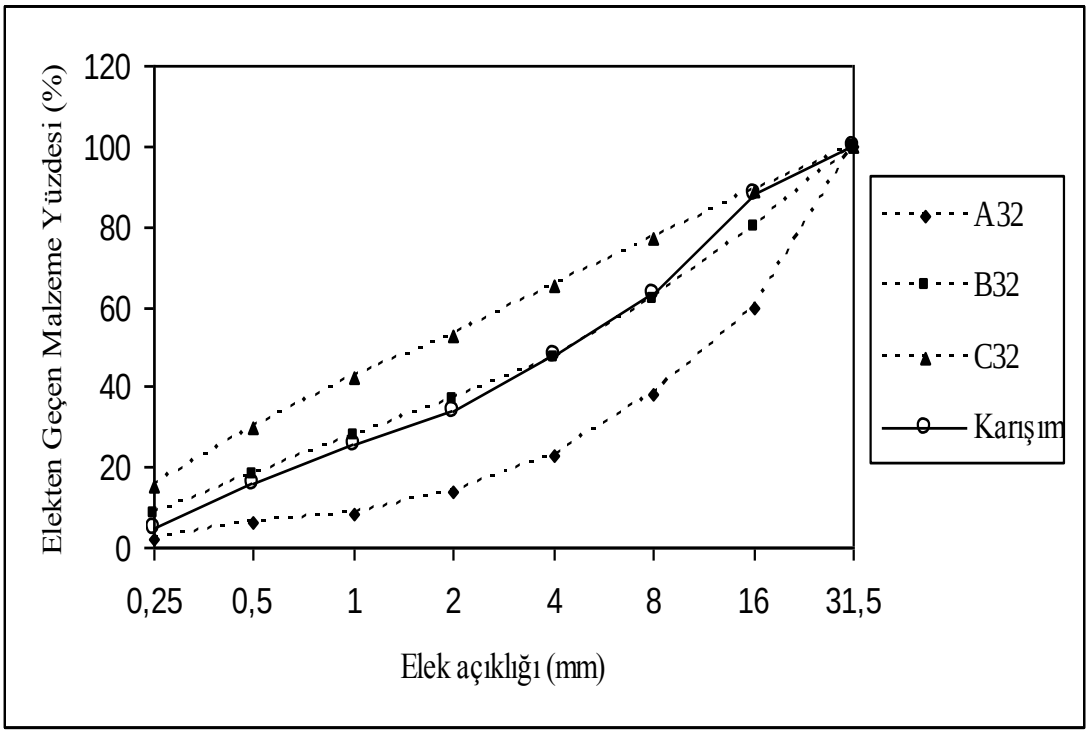
Çalışmada agrega olarak Kum, Kırmataş Tozu, Kırmataş I ve Kırmataş II kullanılmıştır. Agregaların TS 3529'a göre ölçülmüş birim ağırlıkları ve TS 3526'ya göre ölçülmüş özgül ağırlıkları Tablo 3.5'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan TS 3530'a göre yapılan elek analizi sonuçları Tablo 3.6'da görülmektedir. Agrega karışım granülometrisi B32 eğrisine yakın seçilmiş olup Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.5 Agregaların birim ağırlık ve özgül ağırlık değerleri

Malzeme	Birim ağırlık kg/dm^3	Özgül ağırlık kg/dm^3
Kum	1,5	2,62
Kırmataş tozu	1,48	2,69
Kırmataş 1	1,46	2,72
Kırmataş 2	1,43	2,72

Tablo 3.6 Agregaların elek analizi sonuçları

Elek Boyutu	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25
Kum %27	100	100	100	96,2	76,4	61,3	36,9	4,8
Kırmataş Tozu %21	100	100	100	98,1	61,7	43,1	27,5	15,6
Kırmataş 1 %24	100	100	61,2	5,63	0,4	0,4	0,4	0,3
Kırmataş 2 %28	100	57	1,8	1	0	0	0	0
Karışım	100	88,0	63,2	48,2	33,7	25,7	15,8	4,6



Şekil 3.1 TS 706 referans ve karışım granülometri eğrileri

3.3.3 Uçucu Külün Özellikleri

Çalışmada kullanılan uçucu küller Çatalağzı termik santralinden elde edilmiştir. Uçucu külün kimyasal özellik deneyleri Lafarge Aslan çimento fabrikasında yapılmıştır. Uçucu külün fiziksel özelliklerini gösteren deneyler İstanbul Teknik

Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Labaratuvarında yapılmıştır. TS EN 450'ye göre yapılan deneylerde uçucu külün özgül ağırlığı 1,88 kg/dm^3 olarak bulunmuştur. Uçucu külün puzolanik aktivitesinin belirlenmesinde %25 uçucu kül ile %75 portland çimentosu karışımı kullanılırken, hacim genişlemesi deneylerinde %50 uçucu kül ile %50 portland çimentosu karışımı kullanılmıştır. Bu deneylere ait veriler Tablo 3.7, Tablo 3.8 ve Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.7 Çatalağzı uçucu külünün kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasal Bileşimin Yüzdesi (%)
SiO_2	57.66
Al_2O_3	24.11
Fe_2O_3	7.63
S+A+F	89.4
CaO	4.80
MgO	0.91
SO_3	0.17
K_2O	2.72
Na_2O	-
Kızdırma Kaybı	0.93
Tayin Edilemeyen	1.16
Cl	0.0053

Tablo 2.2'ye göre; Çatalağzı uçucu külü, SiO_2, Al_2O_3 ve Fe_2O_3 toplamı %89.4 ile %70'den fazla ve CaO oranı %4.80 ile %10'dan düşük olduğu için F sınıfı uçucu küller sınıfına girmektedir.

Tablo 3.8 Çatalağzı uçucu külünün fiziksel özellikleri

Özgül Ağırlık (kg/dm^3)		1.88
Hacim Sabitliği (Le Chatelier) Toplam (mm)		1
İncelik	Özgül Yüzey (Blaine) cm^2/gr	3175
	200 μm elek üstünde kalan yüzde (%)	2.5
	90 μm elek üstünde kalan yüzde (%)	12.9
	45 μm elek üstünde kalan yüzde (%)	38.7

Tablo 3.9 Çatalağzı uçucu külünün puzolanik aktivitesi

Gün	Aktivite Endeksi (%)	TS EN 450
7	76	-
28	78	>75

3.3.4 Süperakışkanlaştırıcı Katkı Maddesi

Çalışmada yoğunluğu 1.1 kg/dm^3 olan polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Süperakışkanlaştırıcı, su/çimento oranı 0.5 olan kontrol betonu ve eşit işlenebilmeli uçucu küllü betonlarda %2.5, su/çimento oranı 0.6 olan kontrol betonu ve eşit işlenebilmeli uçucu küllü betonlarda %1.5 ve su/çimento oranı 0.7 olan kontrol betonu ve eşit işlenebilmeli uçucu küllü betonlarda %1 oranlarında kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0.8 olan kontrol betonu ve eşit işlenebilmeli uçucu kül eklenen betonlarda ise süperakışkanlaştırıcı kullanılmamıştır.

3.4 Beton Karışımları

Çimento dozajı 240 kg/m^3 seçilerek en büyük agrega boyutu, granülometrisi ve karşılaştırılacak kontrol betonu ve uçucu küllü betonlarda işlenebilirlik sabit tutulmuştur. Üç farklı uçucu kül ekleme oranında (%17, %33 ve %50) ve dört farklı su/çimento oranında beton üretilmiştir. Her serisi 42 dm^3 üretilen 16 seri beton için 1 m^3'e giren gerçek malzeme miktarları Tablo 3.10'da verilmiştir.

3.5 Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme, Saklama ve Numune Boyutları

Beton üretimi, 45 dm^3 kapasiteli düşey eksenli karıştırıcıda yapılmıştır. Eşit işlenebilirliği sağlamak için uçucu kül eklenen her seri için deneme betonları yapılmış ve eklenecek su miktarları bulunmuştur. Her seride toplam 42 dm^3 beton dökülmüş ve malzemeler ilk önce kuru olarak 2 dakika karıştırılmıştır. Ardından koyulacak suyun ¾'ü eklenerek 2 dakika karıştırılmıştır. En son olarak suyun geri kalan kısmı süperakışkanlaştırıcı ile karıştırılarak beton karışımına ilave edilmiş ve gerekli kıvama gelene kadar karıştırma devam etmiştir. Daha sonra numuneler yağlanmış olan kalıplara yerleştirilmiştir. Su/çimento oranı düşük olan numuneler kısım kısım kalıplara yerleştirilerek vibrasyon uygulanmış ve betonun iyi bir şekilde yerleşmesi sağlanmıştır.

Toplam 10 adet 15x15x15 cm boyutlarındaki küp ve 1 adet 10x10x50 cm boyutlarındaki prizma 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak 23 ± 2°C'lik su içerisinde ve 20°C ile %65±5 rutubetli ortamda saklanmıştır. 7, 28 ve 90. günler sonunda üretilen numuneler hava ve su ortamından alınarak sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır.

3.6 Taze Beton Deneyleri

Her seride istenilen işlenebilirliği sağlamak amacıyla su ihtiyacını tespit etmek için 10 dm^3'lük deneme betonları üretilmiştir. Karışım için gerekli su miktarı bulunuktan sonra 42 dm^3'lük asıl betonlar dökülmüştür. Her seride işlenebilirliğin belirlenebilmesi için çökme konisiyle ve Ve-Be aletiyle deneyler yapılmış, karışımların çökme miktarları ve Ve-Be hızları saptanmıştır. 8 dm^3'lük kapta taze beton ağırlığı ölçülerek taze beton birim ağırlığı hesaplanmıştır. Üretilmiş olan karışımların birim ağırlıklarının belirlenmesi sonucu karışımdaki gerçek malzeme ve hava miktarları bulunmuştur. Bu değerler Tablo 2.10' gösterilmiştir.

3.7 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri 15x15x15 cm boyutlarındaki küp numunelerde ve 10x10x50 cm'lik prizma numunelerde yapılmıştır. Toplam 10 adet üretilen küp numunelerin 5 tanesi 23±2°C su içerisinde ve 5 tanesi de 20°C ile %65±5'lik labaratuvar odasında saklanmıştır. Her seride 1 adet üretilen prizma numuneler 3. gün ikiye kesilmiştir. Kesilen prizmalardan 1 tanesi 23±2°C su içerisinde diğeri de 20°C ile %65±5'lik labaratuvar odasında saklanmıştır.

Gerek suda gerekse hava ortamında bekletilen küp numuneler üzerinde 7, 28 ve 90. günlerde sabit yükleme hızı altında basınç deneyleri yapılmıştır.

Su ve hava ortamında bekletilen prizma numuneler 26. gün 10x10x10 cm boyutlarında olacak şekilde tekrar kesilmiştir. Bu numuneler üzerinde 28. ve 90. günlerde kılcallık deneyleri yapılmıştır.

4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Taze Beton Deney Sonuçları

Taze beton deneylerinde, çökme deneyi, Ve-Be deneyi ve birim ağırlık deneyi yapılarak hava miktarı değerleri hesaplanmıştır. Çökme deneyi için alt çapı 20 cm, üst çapı 10 cm ve yüksekliği 30 cm olan kesik çökme konisi kullanılmıştır. Koni 3 kademede doldurularak, her kısım 25 kere demir çubukla şişlenmiştir. Daha sonra koni sarsılmadan kaldırılarak çökme miktarı ölçülmüştür. Ve-Be deneyinde de koni kullanılmış, koni çıkarıldıktan sonra Ve-Be aleti içerisindeki taze betonun üzerine ağırlık yerleştirilmiş ve vibrasyon uygulanmıştır. Vibrasyon sonucu taze beton yayılana kadar geçen zaman ölçülmüştür. Birim ağırlık deneyi için, iç hacmi 8 dm^3 olan birim ağırlık kabı kullanılmıştır. Taze betonun iyice yerleşmesi için vibrasyon uygulanmış ve daha sonra da tartılmıştır. Üretilen serilere ait taze beton deney sonuçları Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Taze beton deney sonuçları

Beton Kodu	Çökme (cm)	Ve-Be (sn)	Hava Miktarı (%)	Birim Ağırlık (kg/m^3)
KON50	3	8	4,4	2,39
U17K50	3	8	4,5	2,36
U33K50	3	7	3,6	2,35
U50K50	3	7	2,8	2,35
KON60	6	7	3	2,39
U17K60	6	6	3,7	2,34
U33K60	6	7	3,8	2,32
U50K60	6	6	3	2,32
KON70	8	5	2	2,38
U17K70	8	5	2,7	2,33
U33K70	8	4	2,9	2,31
U50K70	8	4	1,1	2,33
KON80	9	4	1,1	2,36
U17K80	9	3	1,1	2,33
U33K80	9	4	1,2	2,31
U50K80	9	4	1,2	2,28

4.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

4.2.1 Basınç Dayanımı

Su ve hava ortamında bekletilen numuneler üzerinde 7, 28 ve 90. günler sonunda basınç deneyi yapılmıştır. Numuneler, kalıba temas eden yan yüzeyleri kuvvet yönüne dik olacak şekilde prese yerleştirilmiştir. Basınç dayanım değerleri, uygulanan basınç kuvveti P (KN), basınç kuvvetinin uyguladığı alan A (cm^2), elde edilen basınç dayanımı da σ_b (N/mm^2) olmak üzere 4.1 bağıntısından hesaplanmış ve Tablo 4.2'de basınç dayanım sonuçları gösterilmiştir.

$$\sigma_b = \frac{P}{A} * 10 \qquad 4.1$$

Tablo 4.2 Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımı değerleri

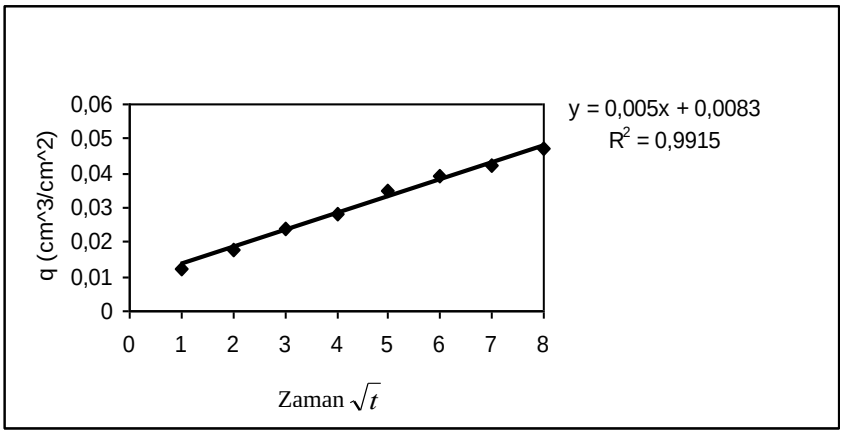
BETON KODU	BASINÇ DAYANIMI (N/mm^2)					
	SU			HAVA		
	7.GÜN	28.GÜN	90.GÜN	7.GÜN	28.GÜN	90.GÜN
KON50	41,7	44,7	46,5	41,6	43,5	44,1
U17K50	40,8	44,3	48,6	40,6	43,7	45,3
U33K50	41,1	45,2	51,1	40,8	44,1	47,3
U50K50	41,1	45,6	50,6	41,3	44,6	46,3
KON60	33,4	36,8	38,7	32,2	34,6	35,8
U17K60	33,3	37,1	40,6	31,8	34,4	36,2
U33K60	33,7	38,1	44,2	32,1	35,2	38,1
U50K60	33,6	38,6	43,4	32,3	35,7	37,7
KON70	27,5	31,2	33,0	26,1	28,5	29,9
U17K70	26,4	31,1	35,4	25,7	28,8	31,0
U33K70	26,8	32,2	37,6	26,0	29,6	32,6
U50K70	26,9	32,5	36,8	26,1	30,4	32,2
KON80	19,1	23,6	26,9	18,2	21,2	24,1
U17K80	19,0	24,5	29,0	18,0	21,9	25,7
U33K80	19,3	25,3	31,7	18,4	22,7	27,5
U50K80	19,3	26,1	30,1	18,5	23,4	27,6

4.2.2 Kılcallık Deneyleri

Kılcallık deneyleri suda ve labaratuvarda hava ortamında bekletilen numuneler üzerinde 28. ve 90 günlerde yapılmıştır. 10x10x50 cm ebatındaki numuneler 3. gün ikiye kesilerek beklemeye bırakılmıştır. Numuneler 26. gün tekrar kesilerek 10x10x10 cm'lik küp haline getirilmiş ve kılcallık deneyi bu numunelerde yapılmıştır. Kılcallık deneyi uygulanacak numuneler 60°C'lık etüvde 48 saat bekletilmiştir. Etüvden çıkarılan numuneler oda sıcaklığına geldikten sonra suyla temas edecek alt yüzeyin kenarları parafin ile kaplanmıştır. Daha sonra numuneler su dolu kabın içindeki çubukların üzerine konularak sadece bir yüzeyden su alması sağlanmış ve başlangıçtan itibaren 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 ve 64. dakikalarda numune ağırlıkları hassas terazide tartılarak emilen su miktarı bulunmuştur. Bulunan değerler dikkate alınarak kılcallık katsayısı hesaplanmıştır. Tablo 4.3 ve Şekil 4.1'de kılcallık katsayısının hesaplanması ile ilgili örnek gösterilmiştir.

Tablo 4.3 28 günlük KON60 betonu için elde edilmiş q değerleri

Zaman (dakika)	Numune Ağırlıkları (gr)	Emilen Su Miktarı (Q=gr)	Suyun Emildiği Yüzeyin Alanı (cm^2)	q=Q/A (cm^3/cm^2)
kuru ağırlık	2387,2	-	-	-
1	2388,4	1,2	100	0,012
4	2389,0	1,8	100	0,018
9	2389,6	2,4	100	0,024
16	2390,0	2,8	100	0,028
25	2390,7	3,5	100	0,035
36	2391,1	3,9	100	0,039
49	2391,4	4,2	100	0,042
64	2391,9	4,7	100	0,047



Şekil 4.1 Kılcallık katsayısının hesabı için çizilen su emme-zaman grafiği

Kılcallık katsayısını hesaplamak için bulunan birim alanda su emme değerlerinin (q), zamanın karaköküyle ($t^{1/2}$) değişimini gösteren grafik çizilmiş ve Şekil 4.1'de de gösterildiği gibi bilgisayar programı yardımıyla doğru geçirilmiştir. Bu doğrunun eğimi m olmak üzere kılcallık katsayısı aşağıdaki denklem kullanılarak bulunmuştur.

$$\frac{Q}{A}=q=\sqrt{k}\ x\ \sqrt{t} \longrightarrow \sqrt{k}=\frac{q}{\sqrt{t}} \longrightarrow \sqrt{k}=m \longrightarrow k=m^2 \qquad 4.2$$

Bu denklemlerde;

k: Kılcallık katsayısı (cm^2/dak)

q: Birim alanda emilen su miktarı (cm^3/cm^2)

t: süre (dakika)

m: doğrunun eğimi

Herbir seri için iki numune üzerinde kılcallık deneyi yapılmış daha sonra bunların ortalaması alınarak kılcallık katsayısı bulunmuştur. Yukarıda örnek olarak verilen numune için kılcallık katsayısı ;

$k=m^2=0.005^2=2.5x10^{-5}$ olarak bulunur. Tüm numuneler için kılcallık katsayısı değerleri Tablo 4.4'de gösterilmiştir.

Tablo 4.4 Üretilen Betonların Kılcallık Katsayısı Değerleri

BETON KODU	KILCALLIK KATSAYISI (cm^2/dk)			
	SU (10^{-5})		HAVA (10^{-5})	
	28.GÜN	90.GÜN	28.GÜN	90.GÜN
KON50	2,7	0,2	4,8	1,0
U17K50	3,4	0,3	6,4	1,9
U33K50	2,1	0,2	4,2	0,8
U50K50	1,9	0,2	3,6	1,3
KON60	3,3	0,4	5,9	2,1
U17K60	4,7	0,7	10,0	4,3
U33K60	2,6	0,3	7,4	2,8
U50K60	3,8	0,6	5,2	1,6
KON70	8,4	0,6	19,0	7,8
U17K70	10,5	1,5	24,5	16,0
U33K70	6,9	0,6	15,0	9,6
U50K70	10,0	1,2	21,5	13,0
KON80	19,0	1,5	45,0	24,0
U17K80	22,5	2,7	40,0	26,5
U33K80	18,5	1,6	28,5	24,0
U50K80	21,0	2,0	35,0	22,1

4.2.3 k Etkinlik Faktörünün Belirlenmesi

Bu çalışmada k etkinlik faktörü, üretilen betonların basınç dayanımları ve su/çimento oranları incelenerek bulunmuştur. CEN TC 104 SC1 adına çalışma grubunun önerdiği metotlardan eşit işlenebilme metodu kullanılarak k etkinlik faktörü değerleri hesaplanmıştır. Bunun için önce dört farklı oranda (0,50, 0,60, 0,70 ve 0,80) kontrol betonları üretilmiş ve kontrol betonlarının çökme değerleri bulunmuştur. Daha sonra çimento miktarı sabit tutularak üç farklı oranda (%17, %33 ve %50) uçucu kül eklenerek betonlar üretilmiştir. Uçucu küllü betonların üretimindeki temel nokta, kontrol betonuyla uçucu kül ilave edilen betonların eşit işlenebilirliğe sahip olmasıdır. Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kontrol betonu ve eşit işlenebilmeli uçucu kül eklenen betonlarda aynı oranda kullanılmıştır. Eşit işlenebilme uçucu kül eklenen betonlarda su ilave edilerek sağlanmıştır.

k etkinlik faktörünün belirlenmesi için öncelikli olarak, numunelerin basınç dayanımları ve su/çimento oranları arasındaki grafik çizilmiştir. Bu grafik üzerinde kontrol betonu ve uçucu küllü beton arasındaki ilişki incelenmiştir. Aynı basınç dayanımındaki uçucu küllü beton diyagramlarının normal beton diyagramlarına çakışması sağlanarak k etkinlik faktörü bulunmuştur. Bu şekilde, deneyler sonucunda grafik üzerinde elde edilmiş her bir nokta için k etkinlik faktörü bulmak mümkündür. Elde edilen değerler, uçucu kül yüzdesine göre ayrılarak ortalaması alınmış ve böylece her bir uçucu kül yüzdesi için ayrı ayrı k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur. k etkinlik faktörüyle ilgili formulasyon şu şekildedir;

$$\frac{W}{C}=\frac{W'}{C+kf}=\frac{W'}{C(1+\frac{kf}{C})} \qquad \text{Buradan;} \qquad (4.3)$$

$W_o=W_\varphi/(1+k\varphi)$ denklemi elde edilir . (4.4)

k=Etkinlik faktörü

φ=Uçucu kül/çimento oranı

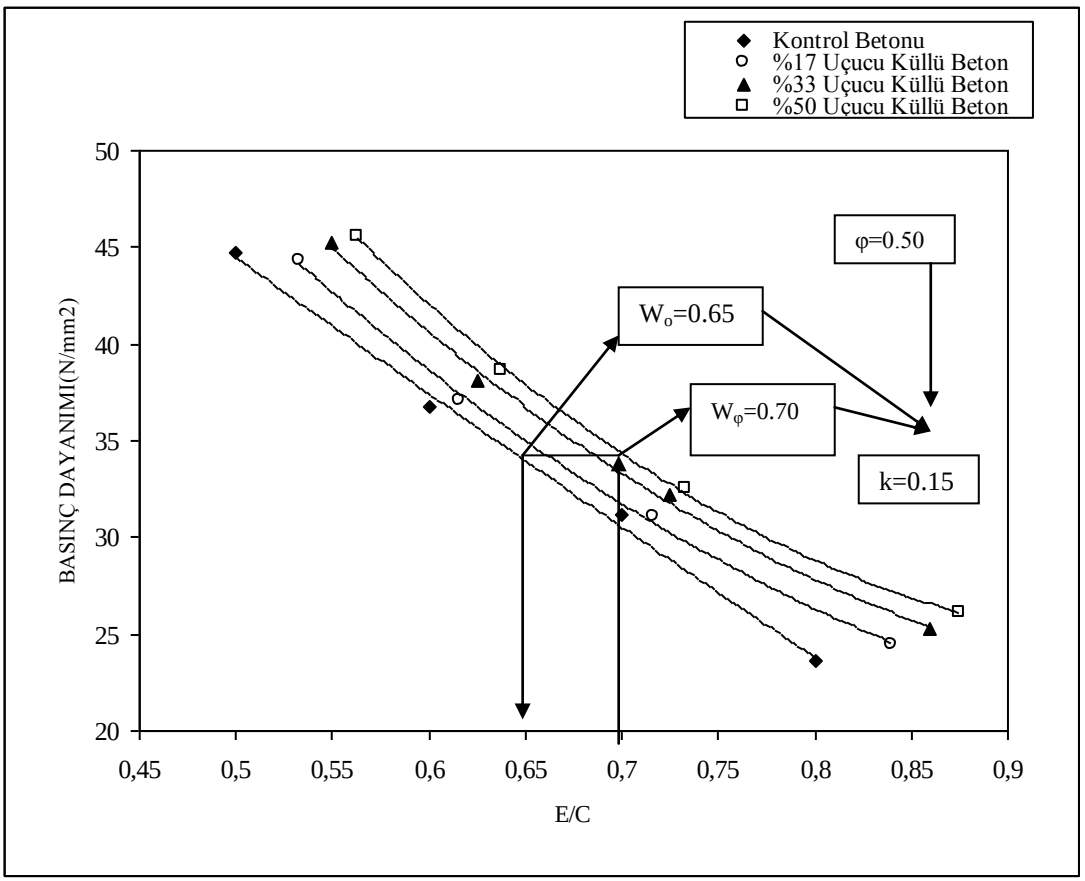
W_o=Kontrol betonunun su/çimento oranı

W_φ=Uçucu küllü betonun su/çimento oranı

4.4 denkleminden k değerini çekersek;

$k=[(W_\varphi/W_o)-1]*(1/\varphi)$ (4.5)

Bu metodun daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 4.2'deki örneğin incelenmesi uygun olacaktır.



Şekil 4.2 28 günlük su içerisinde saklanmış, 0.70 su/çimento oranlı %50 uçucu küllü numunede k etkinlik faktörünün bulunması

Şekil 4.2'de görülen örnekte 0,70 su/çimento oranı ile üretilmiş %50 uçucu küllü numunenin 28 günlük basınç dayanımı, 0,65 su/çimento oranı ile üretilmiş kontrol betonunun basınç dayanımına eşittir. Bu şekilde, 0,70 su/çimento oranı ile üretilmiş %50 uçucu küllü numunenin k etkinlik faktörü 4.5 denklemini kullanılarak 0.15 olarak bulunmaktadır. Aynı şekilde grafikteki her su/çimento oranı için aynı uygulamayı yaparak, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75 ve 0.80 oranında su/çimento içeren betonlar için k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur. Herbir uçucu kül yüzdesi için bunların ortalamaları alınarak k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur. Tablo 4.5'de 7.,28. ve 90. günlerde uçucu küllü numunelerin k etkinlik faktörü değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.5 k etkinlik faktörü değerleri

BETON KODU	k ETKİNLİK FAKTÖRÜ					
	Su İçinde			Hava Ortamında		
	7. GÜN	28.GÜN	90. GÜN	7. GÜN	28. GÜN	90. GÜN
U17K50	0,38	0,51	0,91	0,38	0,58	0,65
U17K55	0,22	0,34	0,64	0,22	0,28	0,46
U17K60	0,10	0,22	0,53	0,15	0,20	0,31
U17K65	0,09	0,19	0,49	0,10	0,14	0,24
U17K70	0,08	0,17	0,45	0,08	0,15	0,23
U17K75	0,12	0,20	0,51	0,16	0,16	0,25
U17K80	0,15	0,31	0,56	0,18	0,26	0,39
%17 kort	0,16	0,28	0,58	0,18	0,25	0,36
U33K50	0,41	0,54	0,94	0,34	0,49	0,76
U33K55	0,30	0,37	0,72	0,24	0,30	0,57
U33K60	0,16	0,28	0,61	0,18	0,25	0,41
U33K65	0,12	0,20	0,55	0,15	0,17	0,31
U33K70	0,11	0,18	0,50	0,11	0,18	0,28
U33K75	0,13	0,22	0,52	0,13	0,19	0,31
U33K80	0,16	0,27	0,54	0,16	0,22	0,38
%33 kort	0,20	0,30	0,63	0,19	0,26	0,43
U50K50	0,38	0,50	0,67	0,42	0,44	0,56
U50K55	0,29	0,34	0,56	0,28	0,29	0,43
U50K60	0,16	0,26	0,45	0,18	0,24	0,29
U50K65	0,12	0,20	0,36	0,13	0,20	0,24
U50K70	0,10	0,15	0,33	0,12	0,17	0,21
U50K75	0,11	0,19	0,31	0,11	0,18	0,22
U50K80	0,13	0,20	0,32	0,13	0,19	0,25
%50 kort	0,18	0,26	0,43	0,20	0,24	0,31

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kontrol betonu ve uçucu küllü betonlarda eşit işlenebilirlik için ihtiyaç duyulan su miktarları bulunarak, karışıma giren su miktarları, su/bağlayıcı oranı ve kontrol betonun su miktarı 100 kabul edilerek hesaplanan su miktarları Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Kontrol Betonuna Kıyasla Su İhtiyacı Değişimi

Beton Kodu	Su (Kg)	Kontrol Betonuna Göre Su Değişimi	Su/Toplam Bağlayıcı Oranı	Çökme (cm)
KON50	119	100	0.50	3
U17K50	127	107	0,45	3
U33K50	133	112	0,42	3
U50K50	137	115	0,38	3
KON60	144	100	0.60	6
U17K60	147	102	0,52	6
U33K60	149	103	0,47	6
U50K60	153	106	0,43	6
KON70	167	100	0.70	8
U17K70	171	102	0,61	8
U33K70	172	103	0,54	8
U50K70	177	106	0,49	8
KON80	193	100	0.80	9
U17K80	205	106	0,73	9
U33K80	208	108	0,65	9
U50K80	211	109	0,59	9

Tablo 5.1'deki değerler incelendiğinde kontrol betonları uçucu küllü betonlardan daha az karışım suyuna sahiptirler. Bunun sebebi üretilen betonlarda çimento miktarı sabit tutularak çeşitli oranlarda uçucu kül eklenmesidir. Yani toplam bağlayıcı miktarındaki artıştır. Su/toplam bağlayıcı oranlarına baktığımızda uçucu küllü

betonların almış olduğu değerler kontrol betonlarından daha düşük çıkmıştır. %17, %33 ve %50 ilave edilen uçucu küllü betonların hepsinde görülen ortak özellik, ilave edilen uçucu kül miktarı arttığında su/bağlayıcı miktarının daha düşük çıkmasıdır. Bu değerlendirmeler sonucu, uçucu kül kullanımının taze betonda işlenebilirliği artırdığı söylenebilmektedir.

5.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

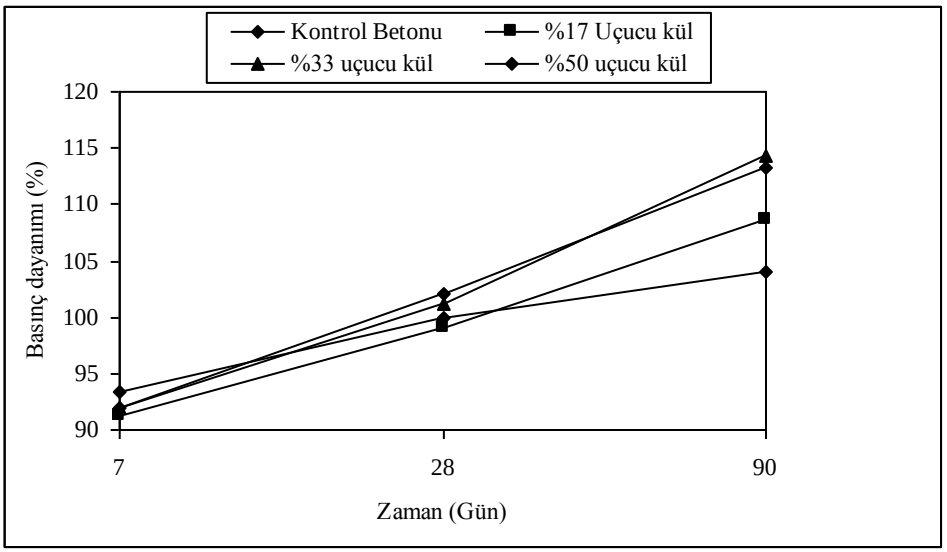
5.2.1 Basınç Dayanımı Sonuçlarının İrdelenmesi

Tablo 4.2'de verilmiş olan basınç dayanımı deney sonuçları, Tablo 5.2'de görüldüğü gibi kontrol betonu dayanımına göre yüzde olarak kıyaslanarak verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi yüksek su/çimento oranlı betonların dayanım kazanma hızları, düşük su/çimento oranlı betonlardan daha yavaştır.

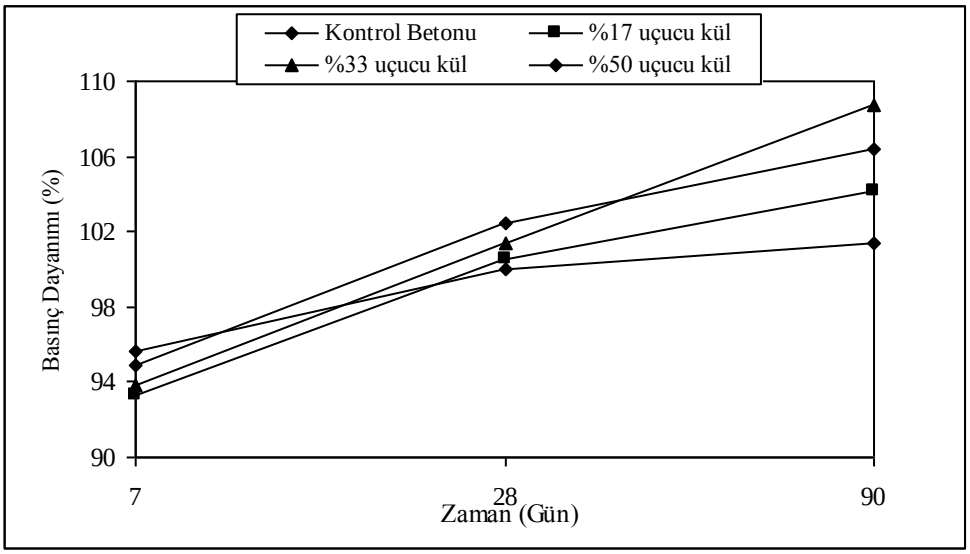
Tablo 5.2 Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımı değerlerinin 28 günlük kontrol betonlarına göre yüzdesel olarak karşılaştırılması

BETON KODU	BASINÇ DAYANIMLARI (%)					
	Su İçinde			Rutubetli Kür Odasında		
	7.GÜN	28.GÜN	90.GÜN	7.GÜN	28.GÜN	90.GÜN
KON50	93,3	**100,0**	104,0	95,6	**100,0**	101,4
U17K50	91,3	99,1	108,7	93,3	100,5	104,1
U33K50	92,0	101,1	114,3	93,8	101,4	108,7
U50K50	92,0	102,0	113,2	94,9	102,5	106,4
KON60	90,8	**100,0**	105,2	93,1	**100,0**	103,5
U17K60	90,5	100,8	110,3	91,9	99,4	104,6
U33K60	91,6	103,5	114,2	92,8	101,7	110,1
U50K60	91,3	104,9	112,1	93,4	103,2	109,0
KON70	88,1	**100,0**	105,8	91,6	**100,0**	104,9
U17K70	84,6	99,7	113,5	90,2	101,1	108,8
U33K70	85,9	103,2	120,5	91,2	103,9	114,4
U50K70	86,2	104,2	117,9	91,6	106,7	113,0
KON80	81,3	**100,0**	114,0	85,8	**100,0**	113,7
U17K80	80,5	103,8	122,9	84,9	103,3	121,2
U33K80	81,8	107,2	134,3	86,8	107,1	129,7
U50K80	81,8	110,6	127,5	87,3	110,4	130,2

Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de numunelerin basınç dayanımları yüzdeleri kür koşullarına ve uçucu kül yüzdelerine göre zamana bağlı olarak incelenmiştir.



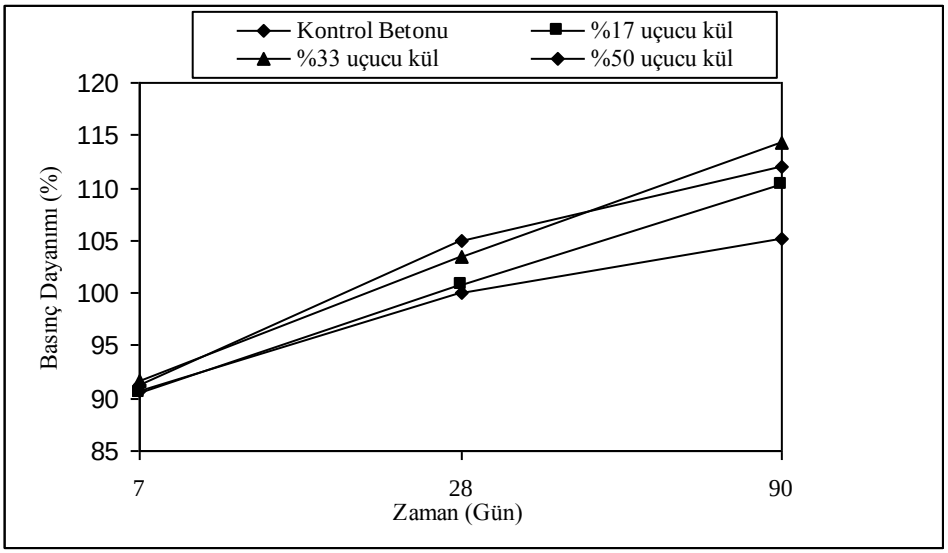
Şekil 5.1 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.5 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri



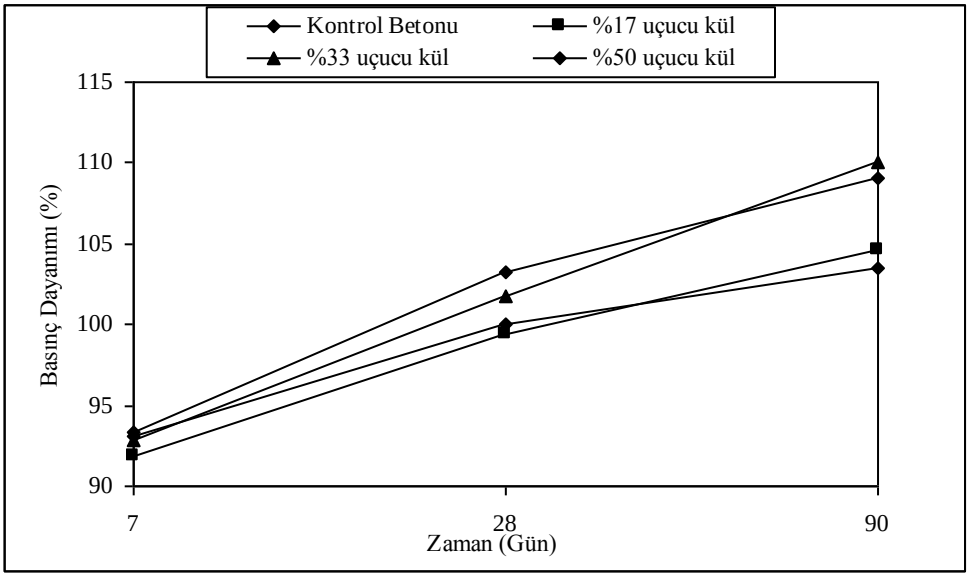
Şekil 5.2 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.5 olan eşit işlenebilmeli hava ortamındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 incelendiğinde, uçucu kül eklenen betonların erken yaşlarda kontrol betonuna göre daha düşük dayanımlara sahip oldukları görülmektedir. Bunun sebebi puzolanik reaksiyonun geç başlamasıdır. Nitekim ileriki yaşlarda uçucu kül eklenen betonların dayanımları kontrol betonuna göre daha fazla artış göstermektedir. %33 uçucu kül eklenen betonların dayanımları 28 ile 90. gün

arasında %50 uçucu kül eklenen betonların dayanımını geçmektedir. Kür koşulları karşılaştırıldığında ileriki yaşlarda, su ortamındaki numunelerin dayanım kazanma hızları hava ortamındaki numunelerden daha fazla olduğu gözükmektedir.



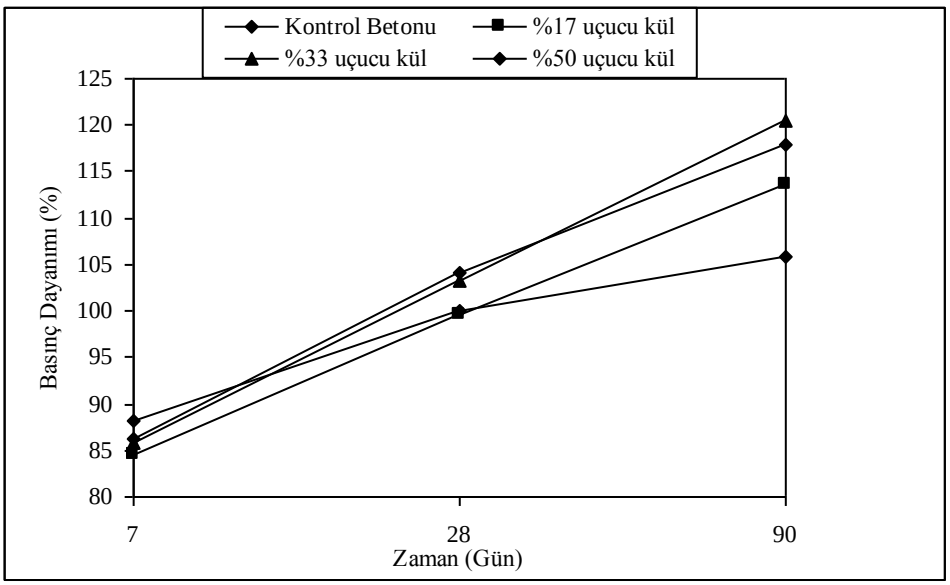
Şekil 5.3 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.6 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri



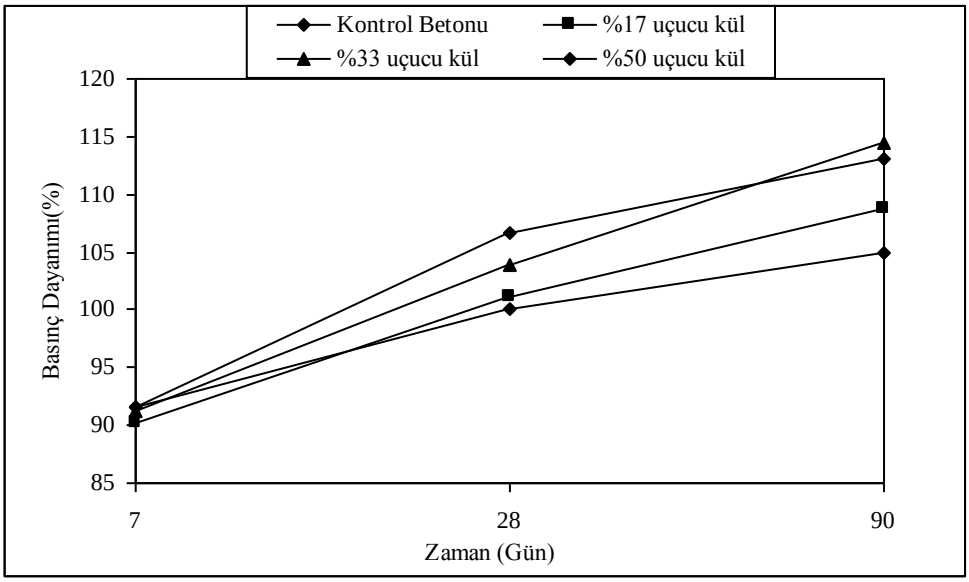
Şekil 5.4 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.6 olan eşit işlenebilmeli hava ortamındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 incelendiğinde 7. günkü dayanımların hem su hem de hava ortamındaki numunelerde birbirine çok yakın çıktığı görülmektedir. Daha sonraki yaşlarda ise uçucu kül eklenen betonların dayanım kazanma hızları kontrol betonundan fazladır. Her iki ortamda da en iyi sonucu %33 uçucu kül eklenen betonlar sağlamıştır. Şekil 5.3'e bakıldığında ileriki yaşlarda, %17 ve %33 uçucu kül

eklenen betonların dayanım kazanma hızlarının kontrol betonu ve %50 uçucu kül eklenen betondan daha fazla olduğu görülmektedir.



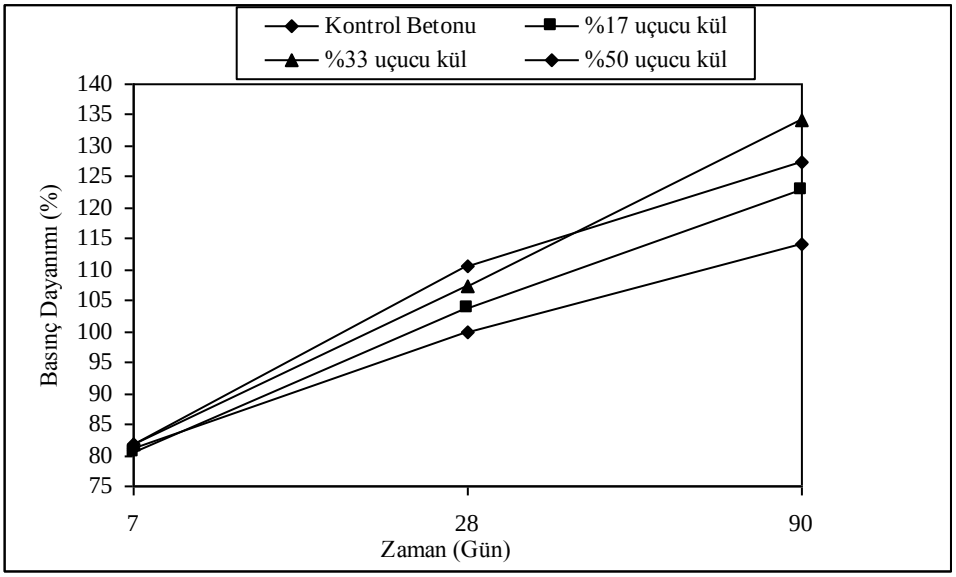
Şekil 5.5 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.7 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri



Şekil 5.6 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.7 olan eşit işlenebilmeli hava ortamındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri

Şekil 5.5 incelendiğinde uçucu kül eklenen bütün numunelerin erken yaşlardaki dayanımlarının kontrol betonunun dayanımından düşük olduğunu görülmektedir. Şekil 5.6' da ise erken yaşlardaki dayanım değerleri birbirlerine çok yakındır. Diğer grafiklerde olduğu gibi ileriki yaşlarda dayanım kazanma hızları, bütün uçucu küllü numunelerde kontrol betonundan fazladır. Bunda da temel etken daha önce de

belirtildiği gibi puzolanik reaksiyonun hem serbest kireç oluşumunu beklemesi, hem de yavaş seyreden bir reaksiyon olmasıdır. Kür koşullarına baktığımızda ise ileriki yaşlarda su ortamındaki numunelerin dayanım kazanma hızlarının hava ortamındaki numunelerden daha fazla olduğu gözükmektedir.



Şekil 5.7 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.8 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri



Şekil 5.8 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.8 olan eşit işlenebilmeli hava ortamındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'deki sonuçlarında diğer grafiklerdeki sonuçlarla paralellik gösterdiği görülmektedir. Erken yaşlardaki dayanımların birbirine yakın ileriki yaşlardaki dayanımların uçucu kül eklenen numunelerde daha fazla olduğu

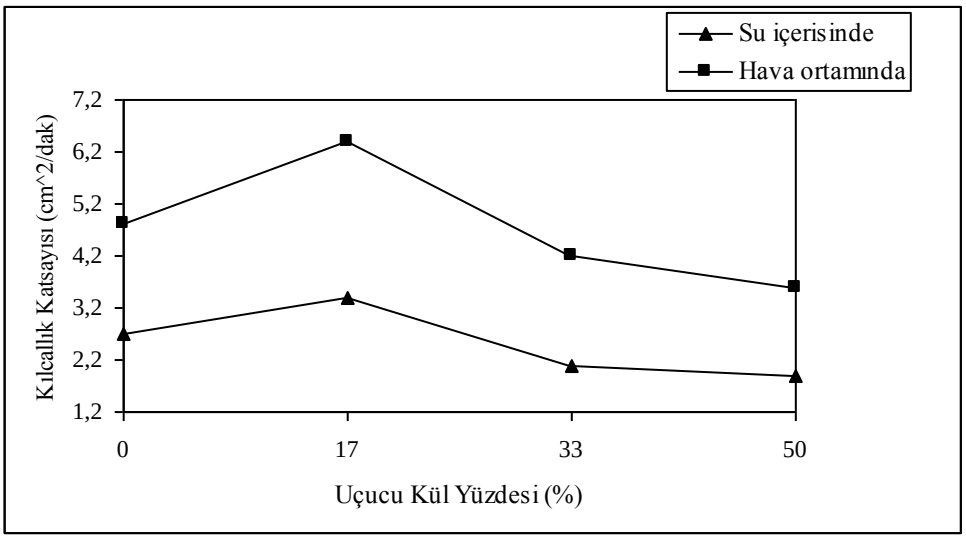
gözükmektedir. %17 ve %50 uçucu kül eklenen betonların ve kontrol betonunun dayanım kazanma hızları 28. günden sonra azalmaktadır.

Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 birarada incelendiğinde, ileriki yaşlarda uçucu kül eklenen numunelerin basınç dayanımlarının kontrol betonundan daha fazla olduğu gözükmektedir. Bunun sebebi ise çimento miktarının sabit olması ve bunun üzerine uçucu kül eklenmesidir.

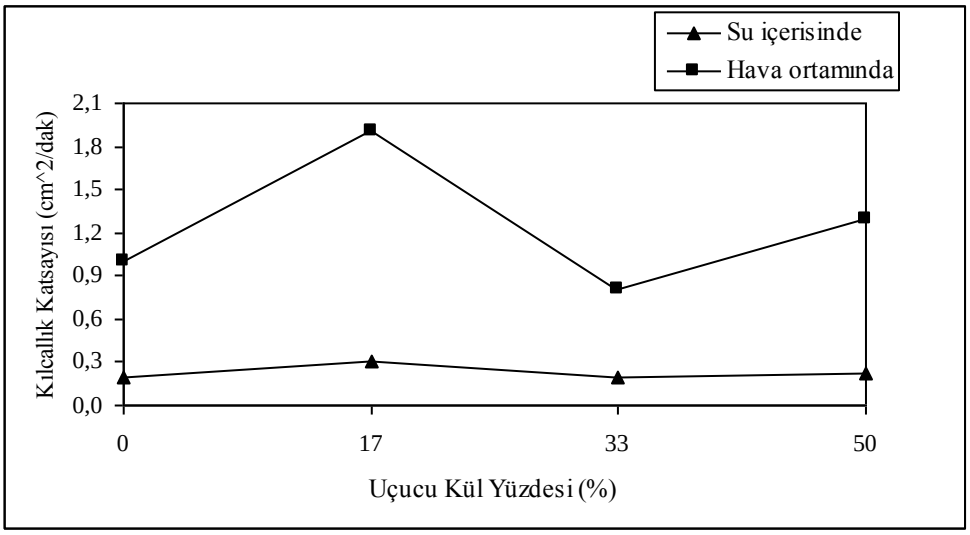
Elde edilen deney sonuçları incelendiğinde dayanım açısından en iyi sonucu %33 uçucu kül eklenen serilerin sağladığı gözükmektedir. %50 uçucu kül eklenen betonların dayanımları ise 28. günden sonra %33 uçucu kül eklenen betonların dayanımlarının altında kalmıştır. Bunun nedeni olarak çimento dozajının düşük olmasından dolayı %50 uçucu küllü betonlar için yeterli miktarda kirecin olmaması düşünülebilir.

5.2.2 Kılcallık Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da su ve hava ortamındaki numunelerin 28. ve 90. günlerde bulunan kılcallık katsayısı değerlerinin uçucu kül yüzdesine bağlı grafikleri gösterilmiştir.

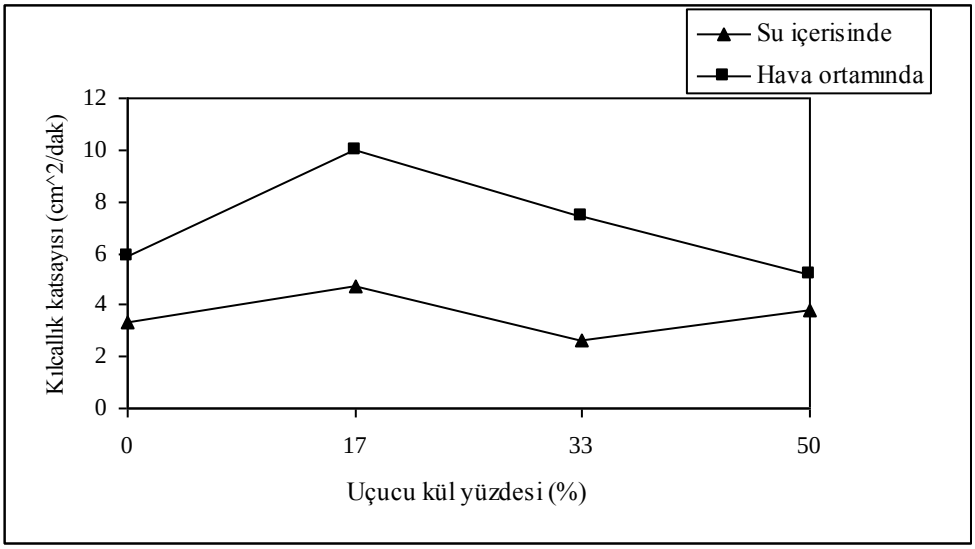


Şekil 5.9 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.5 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 28 günlük kılcallık katsayısı-uçucu kül yüzdesi grafikleri

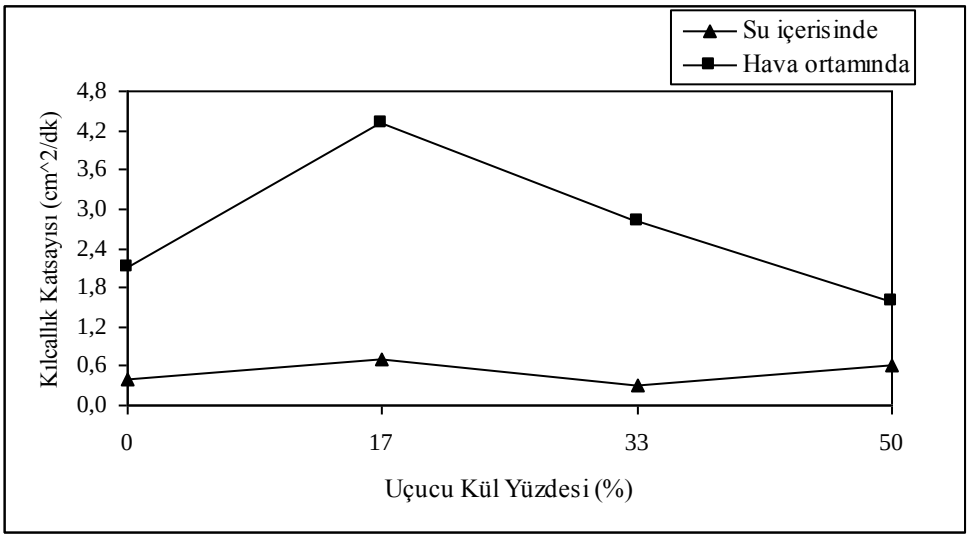


Şekil 5.10 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.5 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük kılcallık katsayısı-uçucu kül yüzdesi grafikleri

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 incelendiğinde su ortamındaki numunelerin kılcallık değerleri hava ortamına göre daha düşük çıkarak daha az su emdiği görülmüştür. Hava ve su ortamında bekletilen numunelerin kılcallık katsayıları, %17 uçucu kül eklenen numunelerde kontrol betonunun üstünde, %33 ve %50 uçucu kül eklenen numunelerde kontrol betonunun altında ya da yakın değerler almıştır. Her iki ortamda da 28. günde %50 uçucu kül eklenen betonların kılcallık katsayıları en düşük değeri alırken 90. günde %33 uçucu kül eklenen betonların kılcallık katsayıları en düşük değeri almıştır.

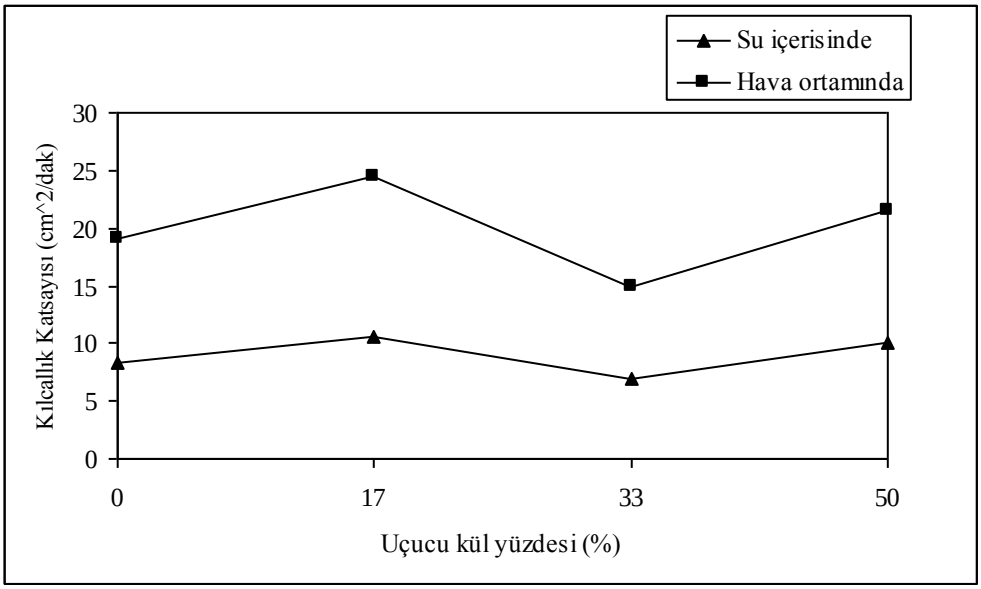


Şekil 5.11 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.6 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 28 günlük kılcallık katsayısı-uçucu kül yüzdesi grafikleri

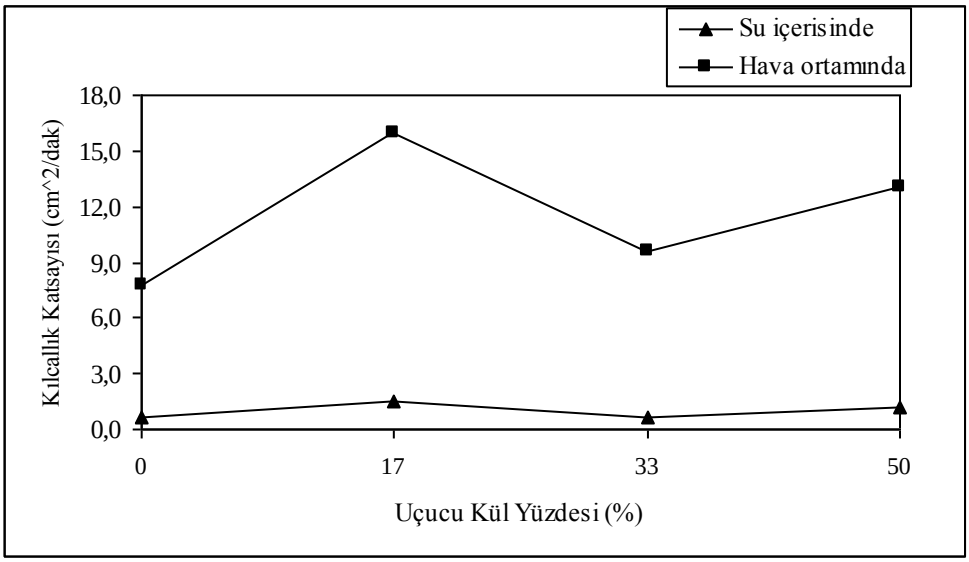


Şekil 5.12 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.6 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük kılcallık katsayısı-uçucu kül yüzdesi grafikleri

Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'deki grafikte görüldüğü gibi su ortamında bekletilen numunelerde en iyi sonucu %33 uçucu kül eklenen numuneler vermiştir. %17 ve %50 uçucu kül ilave edilen betonlardaki kılcallık katsayıları kontrol betonunun üstünde kalmıştır. Hava ortamında ise %17 ve %33 uçucu kül eklenen numunelerin kılcallık katsayıları kontrol betonunun üzerinde, %50 uçucu kül eklenen numunelerin kılcallık katsayıları ise kontrol betonunun altında değerler almıştır..

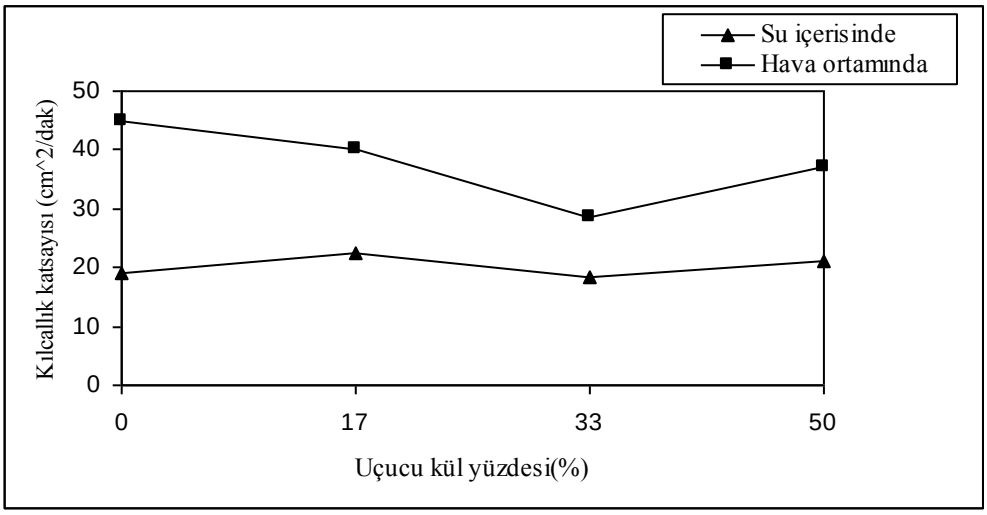


Şekil 5.13 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.7 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 28 günlük kılcallık katsayısı-uçucu kül yüzdesi grafikleri

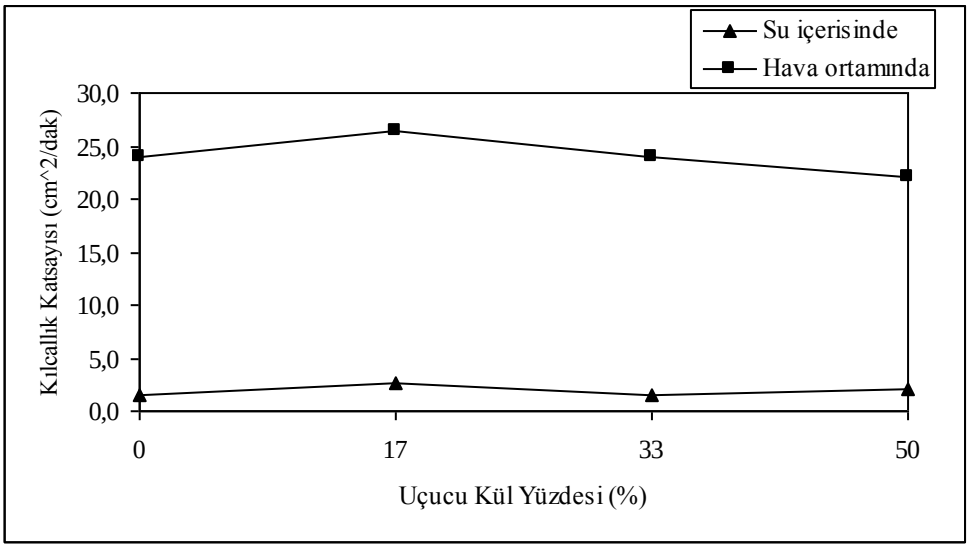


Şekil 5.14 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.7 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük kılcallık katsayısı-uçucu kül yüzdesi grafikleri

Şekil 5.13 incelendiğinde hava ve su ortamında bekletilen numunelerin benzer davranış gösterdiği gözükmektedir. İki farklı ortamda da %33 uçucu kül eklenen numunelerde kılcallık katsayısı kontrol betonuna göre daha düşük çıkmıştır. %17 ve %33 uçucu kül ilave edilen numunelerde ise kılcallık katsayıları kontrol betondan daha yüksek değerler alarak kılcal su emme katsayıları artmıştır. Şekil 5.14'de ise su ortamında kılcallık değerleri birbirine yakın, hava ortamında ise %17, %33 ve %50 uçucu kül eklenen betonların kılcallık katsayıları kontrol betonundan daha yüksek değerler almıştır.



Şekil 5.15 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.8 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 28 günlük kılcallık katsayısı-uçucu kül yüzdesi grafikleri



Şekil 5.16 Kontrol betonunun su/çimento oranı 0.8 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük kılcallık katsayısı-uçucu kül yüzdesi grafikleri

Şekil 5.15 incelendiğinde %33 uçucu kül eklenen numunelerin kılcallık katsayıları en düşük değeri alırken, %17 uçucu kül eklenen hava ortamındaki numunelerin kılcallık katsayısı kontrol betonundan düşük, su ortamındaki numunelerin ise kontrol betonundan yüksektir. %50 uçucu kül eklenen numunelerin kılcallık katsayıları ise kontrol betonuna yakın değerler almıştır. Şekil 5.16'da ise su ortamında en iyi sonucu %33 uçucu kül eklenen betonlar, hava ortamında ise %50 uçucu kül eklenen betonlar sağlamıştır. %17 uçucu kül eklenen betonların kılcallık değerleri ise kontrol betonundan daha fazla çıkarak kılcal su emme katsayısı artmıştır.

Sonuç olarak, gerek hava gerekse su ortamında uçucu kül yüzdesine bağlı olarak kılcallık değerleri farklılık göstermiştir. Genelde %33'lük serilerde kılcallık katsayıları kontrol betonundan daha düşük çıkarak iyi performans sağlamışlar, %17'lik serilerde ise her iki ortamda da kılcallık katsayıları kontrol betonundan daha yüksek çıkarak daha fazla su emdikleri görülmüştür. Bunun sebebi olarak %17 uçucu kül eklenmesiyle boşluk çaplarının küçülmesine rağmen kılcal boru çaplarının irtibatının kesilmemesi düşünülebilir. %50 uçucu kül eklenen seriler ise bazısında kontrol betonundan daha düşük değerler almış, bazılarında ise kontrol betonunu geçerek daha fazla su emdikleri tespit edilmiştir.

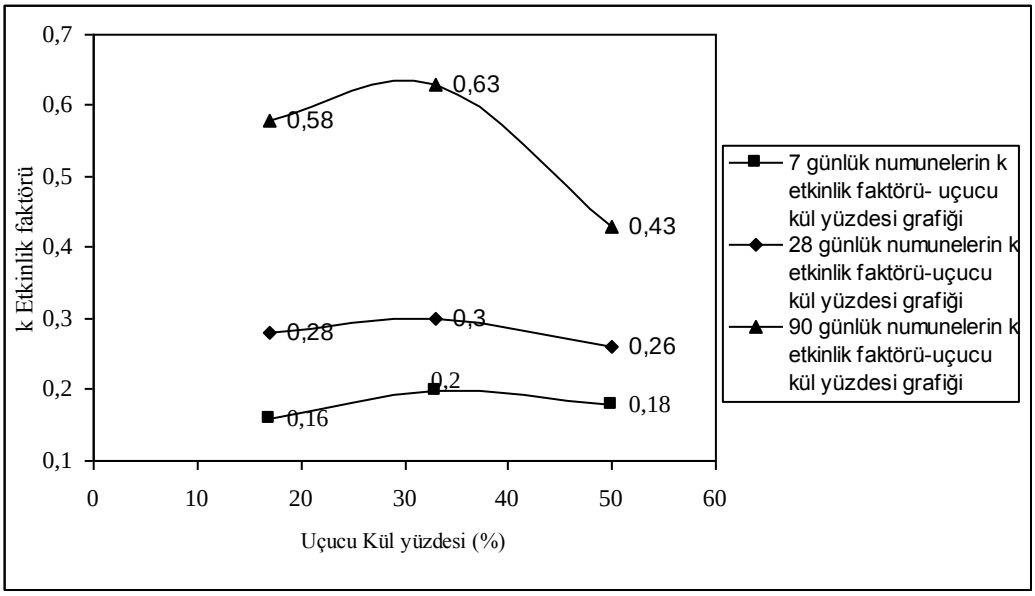
5.2.3 k Etkinlik Faktörünün İrdelenmesi

Bu tez çalışmasında yapılmış olan deneysel çalışmaların asıl hedefi deneyler sonucu bulunan basınç dayanımı değerlerini kullanarak k etkinlik faktörünün bulunmasıdır.

Bu amaçla bölüm 4.2.3'de belirtilen CEN TC 140 SC1 adına çalışma grubunun önerdiği metotlardan eşit işlenebilme metodu kullanılarak k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur.

Kullanılmış olan metotta basınç dayanımı,su/çimento oranı grafiklerinde herbir nokta için ayrı ayrı k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur. Bulunan k etkinlik faktörü değerleri uçucu kül yüzdesine göre aritmetik ortalaması alınarak sınıflandırılmıştır.

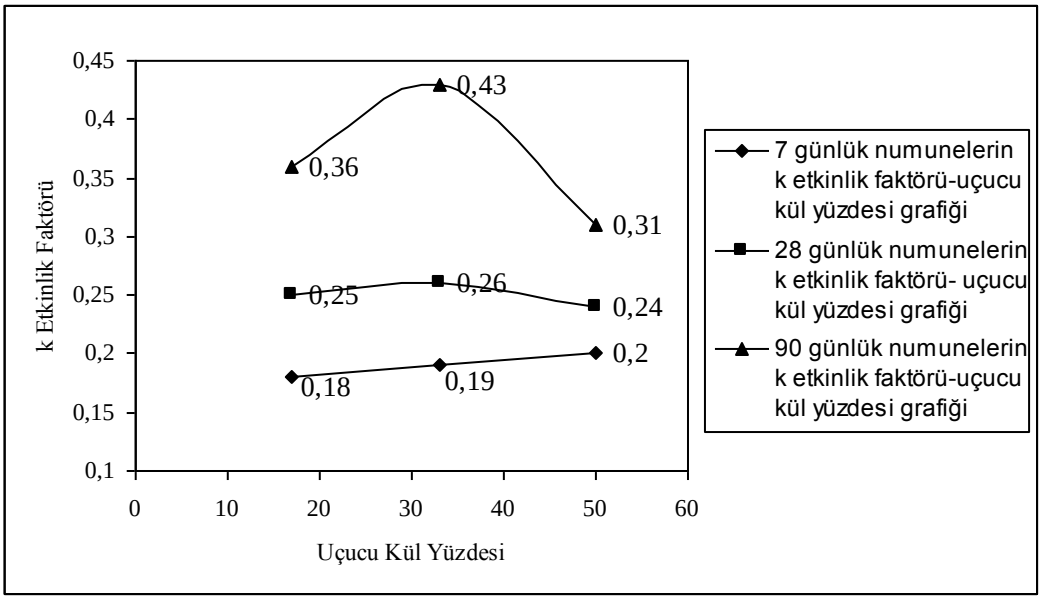
Üretilen betonların basınç deneyi sonuçlarının kullanılması sonucu elde edilen k etkinlik faktörü değerleri Tablo 4.5'de görülmektedir. Bu sonuçların daha iyi incelenebilmesi için k etkinlik faktörü-uçucu kül yüzdesi grafikleri, k etkinlik faktörü-gün grafikleri ve k etkinlik faktörü-E/C grafikleri Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20, Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'de gösterilmektedir.



Şekil 5.17 Su ortamındaki numunelerin 7., 28. ve 90. gündeki k etkinlik faktörü-uçucu kül yüzdesi grafikleri

Şekil 5.17 incelendiğinde k etkinlik faktörü değerlerinin erken yaşlarda düşük olduğu gözükmektedir. Bunun nedeni erken yaşlarda puzolanik reaksiyonun gerçekleşememesidir. Nitekim ileriki yaşlarda puzolanik reaksiyonun gerçekleşmesiyle etkinlik faktörü değerleri artmıştır. 7., 28. ve 90. günkü k etkinlik faktörü değerlerine bakıldığında %33 uçucu kül eklenen numunelerin etkinlik faktörü değerleri %17 ve %50 uçucu küllü numunelere göre fazladır. %50 uçucu kül eklenen numunelerin k etkinlik faktörü değerleri, 7. ve 28. günde %17 ve %33 uçucu kül eklenen numunelerin etkinlik faktörü değerlerine yakın değerler almıştır. Fakat 90.

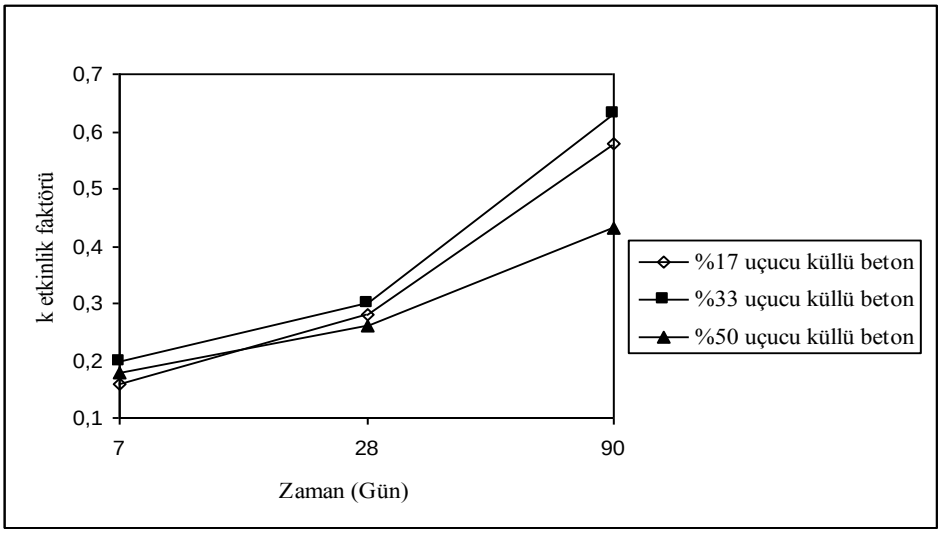
günkü etkinlik faktörü değerlerine bakıldığında %17 ve %33 uçucu kül eklenen numunelerdeki etkinlik faktöründeki artış %50 uçucu kül eklenen numunelerden daha fazla olmuş, dolayısıyla aradaki fark açılmıştır



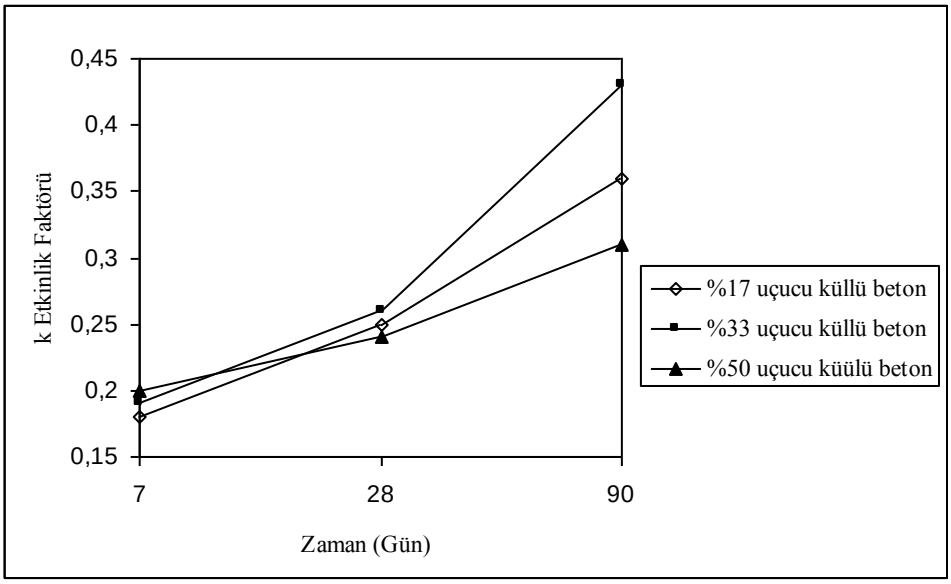
Şekil 5.18 Hava ortamındaki numunelerin 7., 28. ve 90. gündeki k etkinlik faktörü-uçucu kül yüzdesi grafikleri

Şekil 5.18'de ise hava ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü değerleri gösterilmiştir. Hava ortamında da erken yaşlarda uçucu külün etkinliğinin düşük olduğu gözükmektedir. 28 ve 90. günkü etkinlik faktörü değerlerine bakıldığında suda bekletilmiş numunelerde olduğu gibi %33 uçucu kül eklenen numunelerin etkinlik faktörü değerleri %17 ve %50 uçucu küllü numunelere göre daha fazladır. Su ortamında olduğu gibi %50 uçucu kül eklenen numunelerin etkinlik faktöründeki artış diğer uçucu kül yüzdelerine göre daha düşük olmuştur. %50 uçucu kül eklenen betonların etkinlik faktörü değeri 7. gün en yüksek değeri almasına rağmen ileriki yaşlarda diğer uçucu kül yüzdelerinin etkinlik faktörü değerlerinin altında kalmıştır..

Tüm k etkinlik faktörü değerleri incelendiğinde zaman içerisinde puzolanik reaksiyonun gerçekleşmesi ile k etkinlik faktörü değerlerinin arttığı görülmektedir. Kür koşulları göz önüne alındığında suda bekletilen numunelerin etkinlik faktörü değerlerinin hava ortamında bekletilen numunlerden daha fazla olduğu görülmektedir. Özellikle 28. günden sonra suda bekletilen numunelerin etkinliği hava ortamında saklanan numunelere göre çok daha fazla artmıştır.



Şekil 5.19 Su ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü-gün grafikleri

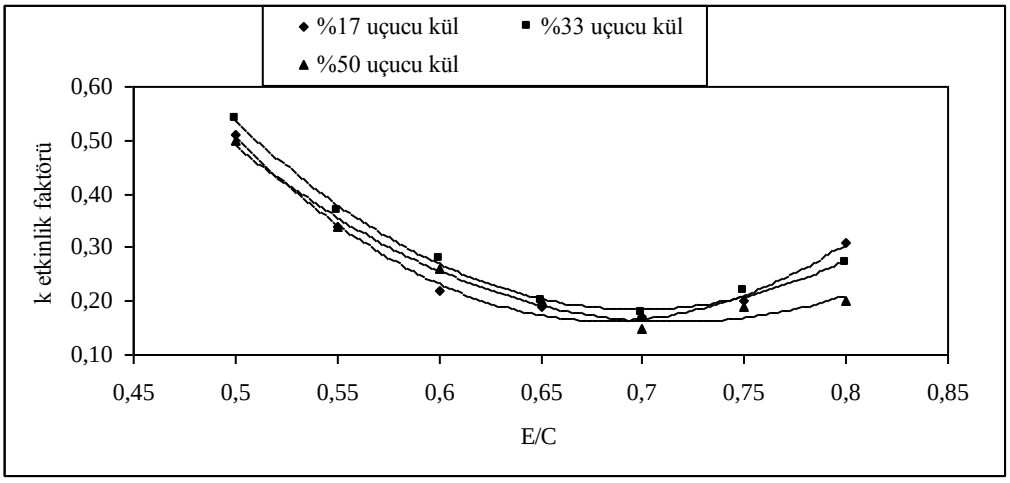


Şekil 5.20 Hava ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü-gün grafikleri

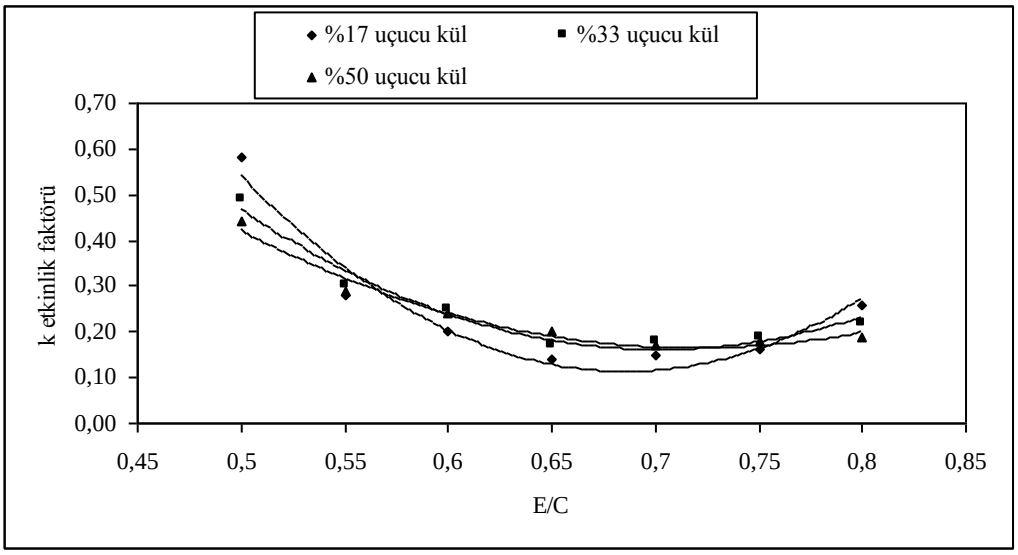
Şekil 5.19'da elde edilen grafikte görüldüğü gibi uçucu külün etkinlik faktörü 28. günden sonra daha fazla artmaktadır. Bunun nedeni daha önce belirtildiği gibi uçucu külün puzolanik reaksiyonunun yavaş olmasıdır. Grafikte dikkat çeken diğer bir nokta ise 28. günden sonra %17 ve %33 uçucu kül eklenen numunelerin etkinlik faktöründeki artış %50 uçucu kül eklenen numunelere göre daha fazladır. Bunun sebebi çimento dozajının düşük olmasından dolayı %50 uçucu kül eklenen numunelerin yeterli miktarda kireçle reaksiyona girememesi olarak düşünülebilir.

Şekil 5.20'deki grafik incelendiğinde erken yaşlardaki etkinlik faktörü değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 5.19'daki grafikle de

paralellik göstermektedir. İleriki yaşlarda ise %33 uçucu kül eklenen numunelerin etkinlik faktöründeki artış hızı %17 ve % 50 uçucu kül eklenen numunelere göre daha fazla olduğu gözükmektedir.

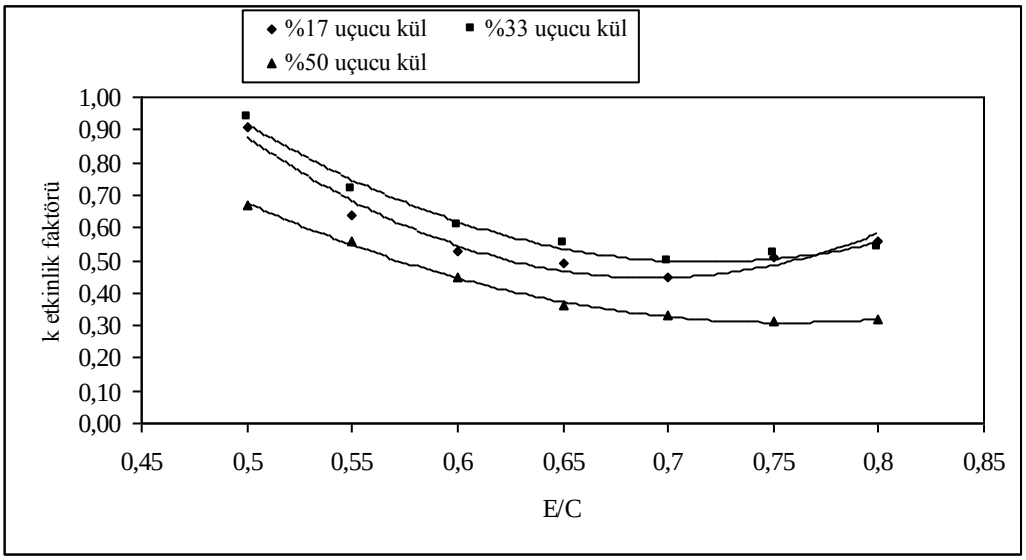


Şekil 5.21 Su ortamındaki numunelerin 28. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri

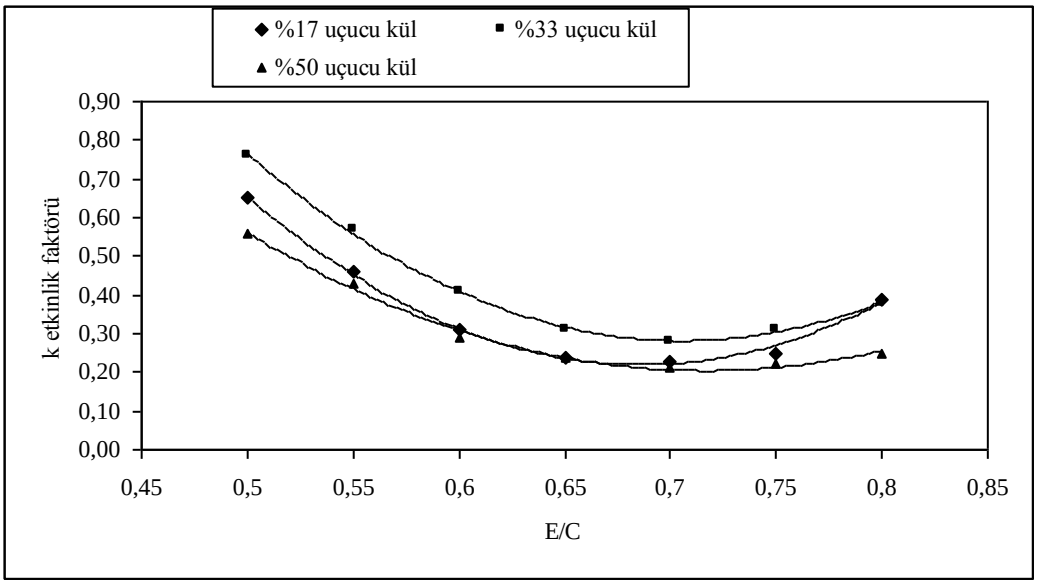


Şekil 5.22 Hava ortamındaki numunelerin 28. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri

Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'de görüldüğü gibi k etkinlik faktörü değerleri su/çimento oranı 0.7'ye kadar azalmakta, su/çimento oranı 0.7'den sonra tekrar artmaya başlamaktadır. Su/çimento oranı 0.8 olan kontrol betonu ve eşit işlenebilmeli uçucu kül eklenen betonlarda süperakışkanlaştırıcı kullanılmamasının bunda etken olduğu düşünülebilir. Burdaki grafikler incelendiğinde su/çimento oranlarının hepsinde k etkinlik faktörü değerlerinin %17, %33 ve %50 uçucu kül eklenen numunelerde birbirine çok yakın değerler aldığı gözükmektedir.



Şekil 5.23 Su ortamındaki numunelerin 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri



Şekil 5.24 Hava ortamındaki numunelerin 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri

Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'deki grafikler incelendiğinde yine su/çimento oranı 0.7'e kadar k etkinlik faktörü azalmakta, su/çimento oranı 0.70'den sonra k etkinlik faktörü artmaya başlamaktadır. 28. günde aynı su/çimento oranında k etkinlik faktörü değerleri uçucu kül yüzdelerinde birbirlerine çok yakın değerler alırken, 90. gün sonunda uçucu kül yüzdelerine göre farklılıklar oluşmuştur.

Bölüm 2.5'de de anlatıldığı gibi k etkinlik faktörü ile ilgili bugüne kadar birçok çalışma yapılmış, değişik yöntemler denenmiş fakat bu konuda tam bir fikir birliğine varılamamıştır. Yapılan bu tez çalışmasının daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırılmasında fayda vardır.

Smith 20 ayrı kaynaktan aldığı küllerle yaptığı çalışma sonucunda bu değeri 28 gün için 0.231 olarak elde etmiş ve optimum etkinlik faktörü değerini 0.25 olarak teklif etmiştir.

Harrison Tip 1 çimentosu ile yaptığı çalışmada uçucu kül için k değerinin yaklaşık olarak 0,3 ile 0,5 arasında olduğunu belirtmiştir. Yine yaptığı bu çalışmada Tip 1 42,5 çimento ve %30 uçucu kül kullanımı ile k değerinin 0,2 ile 0,45 arasında olduğunu bulmuştur.

Akman ve Yücel, C sınıfı uçucu külleri kullanarak yaptıkları çalışmada, k etkinlik katsayısının 0,14 ile 0,57 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir.

Özcan yaptığı çalışmada belirli oranlarda (%10,%20,%30) çıkarılan çimentonun yerine farklı miktarlarda Seyitömer ve Tunçbilek uçucu küllerini ekleyerek beton üretmiştir. k etkinlik faktörünün bulunmasında Bolomey formülünü kullanmış ve k etkinlik katsayısını Tunçbilek uçucu külü için 0,62, Seyitömer uçucu külü için 0,79 olarak bulmuştur.

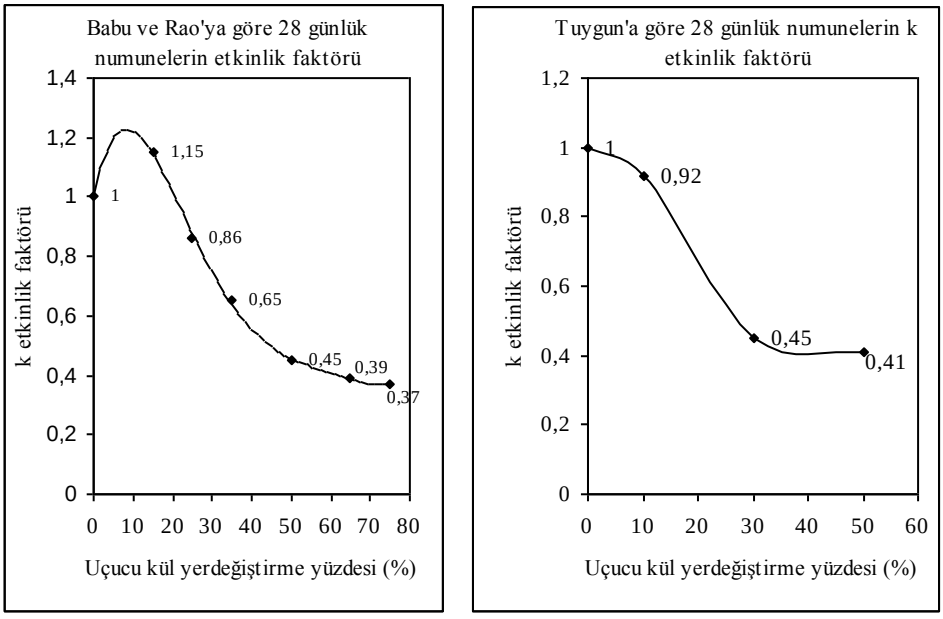
Alman standartı DIN 1045 etkinlik faktörünün 0.30 olarak alınmasını önermiştir. Avrupa standartı prEN 206 uçucu kül etkinlik faktörünün kullanılabilmesi için kütlece uçucu kül/çimento oranının 0.33'den küçük olması gerektiğini belirterek k'nın CEM I 32.5 çimento için 0.2, CEM I 42.5 çimento için 0.4 alınmasını önermiştir. Şubat 2001 tarihli TS 11222'de etkinlik faktörü kavramı, eşdeğerlik katsayısı adıyla içeriğe katılmış ve prEN 206 ile aynı değer kullanılarak CEM I 32.5 çimento için 0.2, CEM I 42.5 çimento için 0.4 olarak kabul etmiştir.

Babu ve Rao k etkinlik faktörünü uçucu külün yapısına bağlı olan genel etkinlik faktörü (ke) ve uçucu kül yüzdesine bağlı olan yüzdesel etkinlik faktörü (kp) olarak iki bileşene ayırmışlardır. Bu etkinlik faktörlerini su/bağlayıcı oranı-dayanım arasındaki ilişkiden faydalanarak bulmuş ve tek bir değer yerine uçucu kül yüzdesine bağlı değerlerin alınmasının uygun olacağını belirtmişlerdir.

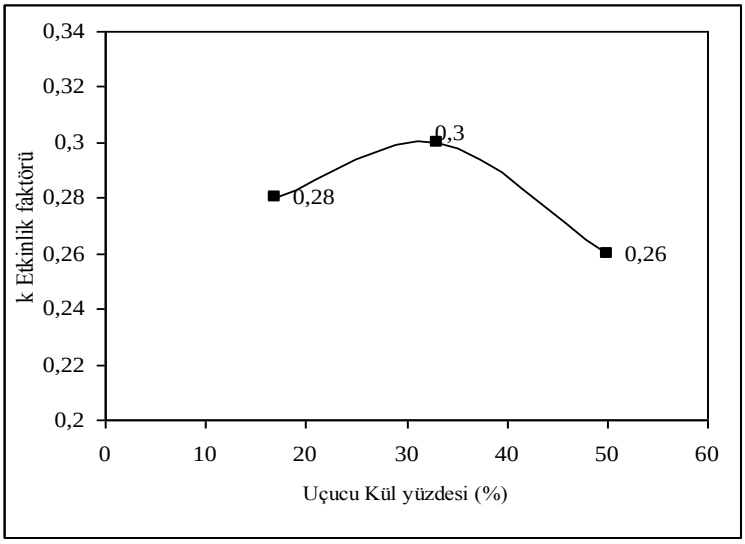
Tuygun C sınıfı Çayırhan uçucu külünü üç farklı yer değiştirme yüzdesinde (%10,%30,%50) kullanarak ürettiği betonlarda k etkinlik faktörünü bulmak çin Babu ve Rao'nun kullanmış olduğu grafiksel metodu kullanmıştır. Yalnız bu çalışmada Babu ve Rao'nun ke ve kp olarak ikiye ayırmış oldukları k etkinlik faktörü tek bir sayı olarak, bir seferde bulunmuştur. Tuygun bu çalışmada aynı basınç dayanımında uçucu külle üretilmiş olan numunenin su/bağlayıcı madde oranında, uçucu kül

miktarının önüne bir k etkinlik faktörü eklemiş ve uçucu küllü betonun su/bağlayıcı madde oranını kontrol betonunun su/çimento oranına eşitleyerek k etkinlik katsayısını bulmuştur.

Şekil 5.25'de Babu ve Rao ile Tuygun'un 28 günlük su içerisinde saklanmış numuneler ile bulmuş oldukları k etkinlik faktörü değerlerinin uçucu kül yüzdesine bağlı grafikleri gösterilmiştir. Şekil 5.26'da ise bu tez çalışmasında bulunan 28 günlük su içerisinde saklanmış k etkinlik faktörleri değerlerinin eklenen uçucu kül yüzdesi ile değişimini gösteren grafik gösterilmiştir.



Şekil 5.25 Babu ve Rao ile Tuygun'un elde etmiş olduğu su içerisinde 28 günlük numunelerin k etkinlik faktörü-uçucu kül yer değiştirme yüzdesi grafikleri



Şekil 5.26 Bu tez çalışmasında elde edilmiş olan su içerisinde 28 günlük numunelerin k etkinlik faktörü-uçucu kül yüzdesi grafikleri

Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'daki grafikler incelendiğinde Babu ve Rao ile Tuygun'un sonuçları ile bu tez çalışması sonuçları arasında farklılıklar olduğu görülmektedir. Bunun sebebi uygulanan yöntemlerin farklı olmasıdır. Babu ve Rao ile Tuygun'un yaptığı çalışmalarda uçucu kül yüzdesi artmasıyla k etkinlik faktörü değerleri azalmaktadır. Çünkü uçucu kül yüzdesi artmasıyla çimento miktarı azalmakta ve asıl bağlayıcı olan çimentonun azalmasıyla da uçucu külün etkinliği düşmektedir. Bu tez çalışmasında ise çimento miktarı bütün serilerde aynı olup değişken sadece uçucu kül miktarıdır. Dolayısıyla çimento miktarı sabit olduğu için eklenen uçucu kül arttıkça k etkinlik faktörü uçucu kül yüzdesine göre çok büyük farklılıklar göstermemiştir.

6 SONUÇLAR

Çatalağzı santralinden elde edilen F sınıfı uçucu küllerle üretilen betonlarda mekanik ve durabilite özellikleri eklenen uçucu kül yüzdelerine göre incelenmiş ve elde edilen basınç dayanımı sonuçları kullanılarak k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur. Bulunmuş olan k etkinlik faktörü değerlerinin, uçucu kül yüzdesine, zamana ve kür şartlarına bağlı olarak almış olduğu değerler irdelenmiştir. Numuneler üzerinde kılcallık deneyleri yapılarak uçucu kül yüzdesine ve ortama göre elde edilen sonuçlar araştırılmıştır. Yapılan bu çalışma neticesinde ulaşılan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1- Taze Beton Deney Sonuçları

Yapılmış olan taze beton deneyleri sonucunda değişik oranlarda uçucu kül ilave edilmesiyle yani toplam bağlayıcı miktarının artmasıyla, eşit işlenebilirlik için ihtiyaç duyulan su miktarında artış olmuş, ancak su/toplam bağlayıcı oranlarına bakıldığında, uçucu küllü betonlarda kontrol betonuna göre daha düşük değerler elde edilmiştir. %17, %33 ve %50'lik serilerin hepsinde görünen ortak özellik uçucu kül miktarının artmasıyla daha düşük su/bağlayıcı oranının elde edilmesidir. Buradan çıkarılan sonuç uçucu külün işlenebilirliği iyileştirdiği ve betonda su ihtiyacını azalttığıdır.

2- Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

a-Basınç Deney Sonuçları

Basınç dayanımı deneyleri sonucunda, genelde uçucu kül eklenen betonların erken yaşlarda kontrol betonuna çok yakın değerler aldığı görülmüştür. Bunun nedeni uçucu küllerin puzolanik reaksiyona girmesi için çimentonun hidratasyonu sonucu oluşacak kireci beklemesidir. 28. ve 90. günkü basınç dayanımları incelendiğinde uçucu kül eklenen betonların dayanımlarının kontrol betonlarının dayanımlarından fazla olduğu gözükmektedir. Özellikle 28. günden sonra su içerisinde bekletilen uçucu küllü betonların basınç dayanımlarındaki artışın kontrol betonlarından çok daha fazla olduğu görülmüştür. Basınç dayanımları sonuçlarına bakıldığında erken yaşlarda su/çimento oranı yüksek olan numunelerin dayanım kazanma hızları,

su/çimento oranı düşük olan numunelerden daha yavaş olduğu görülmektedir. Basınç dayanımları kür koşullarına göre incelendiğinde ise hava ortamındaki numunelerin su ortamındaki numunelere göre daha düşük mukavemet verdiği görülmektedir.

b- Kılcallık Deney Sonuçları

Kılcallık deney sonuçları incelendiğinde %33 uçucu kül eklenen numunelerin kılcallık katsayıları her iki ortamda da kontrol betonundan daha düşük değerler alarak iyi performans sağlamışlardır. %17 uçucu kül eklenen numunelerin kılcallık katsayıları ise her iki ortamda da kontrol betonundan daha yüksek çıkarak daha fazla su emdiği görülmüştür. Bunun sebebi olarak %17 uçucu kül eklenmesiyle boşluk çaplarının küçülmesine rağmen, kılcal boru çaplarının irtibatının kesilmemesi düşünülebilir. %50 uçucu kül eklenen numunelerin kılcallık katsayıları ise bazı su/çimento oranlarında kontrol betonundan düşük, bazılarında ise kontrol betonundan daha yüksek değerler almıştır. Kılcallık katsayıları ortam koşullarına bakılarak incelendiğinde, bütün serilerde su ortamındaki kılcallık değerleri hava ortamına göre çok daha düşük çıkarak daha az su emdiği görülmüştür.

c- k Etkinlik Faktörü

Basınç dayanımı sonuçlarına göre CEN TC 140 SC1 adına çalışma grubunun önerdiği eşit işlenebilme metodu kullanılarak elde edilen k etkinlik faktörü değerleri incelendiğinde erken yaşlardaki etkinliğin ileriki yaşlardaki etkinlikten düşük olduğu tüm serilerde görülmektedir. Bunun nedeni daha önce de anlatıldığı gibi puzolanik reaksiyonun geç başlamasıdır.

Kür şartlarına göre k etkinlik katsayısının almış olduğu değerlere bakıldığında su ortamında saklanmış olan numunelerin etkinliği hava ortamında saklanmış olan numunelerin etkinliğinden daha yüksek çıkmıştır. Özellikle 90. günkü etkinlik faktörü değerlerini incelendiğinde su ortamındaki numunelerin etkinlik faktöründeki artışın hava ortamındaki numunelere göre çok daha fazla olduğu görülmüştür. Puzolanik reaksiyonun nemli ortamda daha hızlı gelişmesinin bunda önemi büyüktür.

7. ve 28. ve 90. günkü etkinlik faktörü değerlerine bakıldığında her iki ortamda da %33 uçucu kül eklenen numunelerin etkinliği en yüksek değeri almıştır. %50 uçucu kül eklenen numunelerin etkinlik faktörü erken yaşlarda %17 ve %33 uçucu kül eklenen numunelere yakın olmasına rağmen, ileriki yaşlardaki etkinlik faktörü

değerindeki artış diğer uçucu kül yüzdelerine göre daha az olmuştur. Bunun sebebi ise eklenen uçucu kül yüzdesinin yüksek, çimento dozajının düşük olması nedeniyle puzolanik reaksiyon için yeterli miktarda kirecin oluşmamadır.

Avrupa standartı prEN 206 uçucu külün etkinlik faktörünü CEM I 32.5 çimento için 0.2, CEM I 42.5 çimento için 0.4 alınmasını önermiştir. Yapılan bu çalışmada ise en iyi sonucu %33 uçucu kül eklenen betonların sağladığı görülmüş ve 28. gündeki etkinlik faktörü değeri 0.3 olarak bulunmuştur. k etkinlik faktörünün uçucu külün cinsine ve dozaja bağlı olarak değişebileceği dikkate alınmalıdır.

Yapılmış olan bu çalışma sonucunda Çatalağzı uçucu külünün betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve etkinliği belirlenmiştir. Bu konuda ileride farklı uçucu kül tipleriyle, değişik dozajlarda çimento kullanımı ile ilgili çalışmalar yapılmalı ve bulunan k etkinlik faktörü değerleri bu çalışmadaki sonuçlarla karşılaştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

[1] **Kocataşkın, F.,** 1991. Betonun Dünü, Bugünü, Yarını, *2. Ulusal Beton Kongresi,* İstanbul, Türkiye, s.23-31.

[2] **Postacıoğlu, B.,** 1986. Bağlayıcı Maddeler Cilt-1, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.

[3] **Özturan, T.,** 1991. Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği, *2. Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, Türkiye, s.280-291.

[4] **ASTM C 618**, 1978. Spefication for Fly Ash & Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use As a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete.

[5] **Baykal, G., Özturan, T., Savaş, M.ve Ramadan K.,** 1993. Uçucu Külün İnşaat Mühendisliğinde Bazı Kullanım Olanakları, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu,* Ankara, Türkiye, s.89-99.

[6] **Erdoğan, T.,** 1993. Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu,* Ankara, Türkiye, s.1-8.

[7] **TS EN 450,** 1998. Uçucu Kül, Betonda Kullanılan Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

[8] **Berry, E.E and Malhotra, V.M.,** 1986. Fly Ash in Concrete, Ottawa.

[9] **Tokyay, M.,** 1993. Betonda Uçucu Kül Kullanımı, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, s.29-36.

[10] **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği,** 2003. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Ankara.

[11] **Manz, O.E., Faber, J.H. and Takagi, H.,** 1989. Worldwide Production of Fly Ash and Utilization in Concrete, *Supplementary Papers of Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Puzzolans in Conrete,* Trodheim, Norway, pp. 1-15

[12] **TS EN 197-1**, 2002. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

[13] **ACI Comittee,** 1987. Use of Fly Ash in Concrete, *ACI Materials Journal,* **84,** 381-409.

[14] **Postacıoğlu, B.,** 1987. Bağlayıcı Maddeler Cilt-2, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.

[15] **Özturan, T.,** 1993. Uluslararası IV. CANMET-ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, s.57-78.

[16] **Schieβl, P., and Hardtl, R.,** 1989. The Change of Mortar Properties as Result of Fly Ash Processing, *Supplementary Papers of Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Puzzolans in Conrete,* Trodheim, Norway, pp. 277-294.

[17] **Akman, M.S.,** 1987. Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

[18] **Sivasundaram, V., Carette, G.G and Malhotra, V.M.,** 1989. Properties of Concrete Incorporating Low Quantitiy of Cement and High Volumes of Low-Calcium Fly Ash, *Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Puzolans ın Concrete Volume I,* Trodheim, Norway, pp. 45-73.

[19] **Barrow, R.S., Hadchiti, K.M., Carrasquillo, P.M., and Carrasquillo, R.L.,** 1989. Temperature Rise and Durability of Concrete Containing Fly Ash, *Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Puzolans ın Concrete Volume I,* Trodheim, Norway, pp. 331-347.

[20] **Tuygun, C.,** 2002. Çayırhan Uçucu Külünün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Faktörünün İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[21] **Gökçe, A.,** Farklı İnceliklerdeki Uçucu Küllerin Betondaki Performanslarının Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[22] **Akman, M.S., Erdinç, M.,** 1997. Uçucu Küllü Betonlarda Klor Geçerimliliği, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Eskişehir, Türkiye, s.1-19.

[23] **Artırma, Ş., Özkul, H., Akalın, Ö.,** 1996. Doğal Puzolanların Sodyum Sülfata Dayanıklılığa Etkisi, 4. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, Türkiye, s.337-347.

[24] **Tikalsky, P.J. and Carrasquillo, R.L.,** 1992. Influence of Fly Ash on the Sulfate Resistance of Concrete, *ACI Materials Journal,* **92,** pp. 69-75

[25] **Fidjestol, P.,** 1989. Durability of Silica Fume and Fly Ash Concretes Exposed to Organic Acids, *Supplementary Papers of Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Puzzolans in Conrete,* Trodheim, Norway, pp. 459-485.

[26] **Pekmezci, S.M. ve Uyan, M.,** 2001. Uçucu Küllerde Etkinlik Faktörü Kavramı, Hazır Beton, Mayıs-Haziran 2001, s.65-71.

[27] **Smith, I.A., 1967.** The Design of Fly Ash Concretes, *Proc Inst Civil Engineers,* London, pp. 769.790.

[28] **Özcan, M.,** 1997. Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Beton Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Katsayılarının Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[29] **Akman, S.M. and Yücel,K.T.,** 1995. Efficiency Factor of Turkish C Class Fly Ashes, *Türkiye Hazır Beton Birliği XI. Beton Kongresi*, İstanbul, Türkiye.

[30] **Babu, K.G. and Rao, G.S.N.,** 1993. Efficiency of Fly Ash in Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 15, pp. 223-229.

[31] **CEN TC 104 SC1,** 2000. k-Value Determination for Type II Additions, Arnherm, Holland.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Isparta'da doğan Onur Anuk, orta öğrenimini 1997 yılında Antalya Anadolu Lisesinde tamamladı. Aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne girerek öğrenim hayatını sürdürdü. 2001 yılında bu bölümden mezun oldu. 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilim dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen bu bölümde öğrenim görmektedir.