

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**F TİPİ UÇUCU KÜL KULLANILMIŞ BETONLARIN KÜL ETKİNLİK
KATSAYILARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Sadık Kerem KARATEKE**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**F TİPİ UÇUCU KÜL KULLANILMIŞ BETONLARIN KÜL ETKİNLİK
KATSAYILARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Sadık Kerem KARATEKE
(501071097)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 05 Haziran 2009

Tez Danışmanı : Y. Doç. Dr. Hasan YILDIRIM (İTÜ)

**Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR (İTÜ)
Prof. Dr. Fevziye AKÖZ (YTÜ)**

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin her aşamasında yardım ve desteğini benden esirgemeyen, danışman hocam Sayın Y. Doç. Dr. Hasan YILDIRIM'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam sırasında ilgi ve yardımlarını esirgemeyen VARYAP İnşaat çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilim Dalı'ndaki hocalarıma, asistan arkadaşlara ve laboratuvar personeline yardım ve desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Öğrenim hayatım boyunca bana maddi manevi her türlü yardımlarından dolayı aileme sonsuz teşekkür ederim.

Mayıs 2009

Sadık Kerem KARATEKE
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
KISALTMALAR.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Puzolanların Tanımı ve Sınıflandırılması.....	3
2.2 Puzolanik Reaksiyon	4
2.3 Uçucu Küller	6
2.3.1 Uçucu küllerin özellikleri	7
2.3.1.1 Uçucu küllerin fiziksel özellikleri	7
2.3.1.2 Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik özellikleri	8
2.3.2 Uçucu küllerin taze beton özelliklerine etkisi.....	12
2.3.2.1 İşlenebilme, su ihtiyacı 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	18
2.3.4 Uçucu küllerin ortam şartlarına dayanıklılık özellikleri.....	19
2.3.4.1 Geçirimsizlik	19
2.3.4.2 Zararlı kimyasallara dayanıklılık	20
2.3.4.3 Alkali-agrega reaksiyonu	21
2.3.4.4 Donma-çözülme dayanıklılığı.....	21
2.3.4.5 Deniz ortamına dayanıklılık.....	22
2.3.4.6 Donatı korozyonu	23
2.3.4.7 Karbonatlaşma.....	23
2.4 Uçucu Küllü Betonlarda Karışım Oranlama Metodu.....	24
2.4.1 Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması	25
2.4.2 Uçucu küllün ince agrega olarak kullanılması.....	26
2.4.3 Uçucu küllün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine kullanılması....	26
2.4.3.1 Modifiye edilmiş ikame metodu	26
2.4.3.2 Rasyonel oranlama metodu.....	27
2.5 k Etkinlik Faktörü ve Bu Konuda Yapılmış Çalışmalar.....	30
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
3.1 Çalışmanın Amacı.....	37

3.2 Üretilen Betonların Özellikleri	37
3.3 Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	39
3.3.1 Çimento	39
3.3.2 Agregalar	41
3.3.3 Uçucu külün özellikleri	42
3.3.4 Orta akışkanlaştırıcı katkı maddesi	43
3.3.5 Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi	44
3.4 Beton Karışımları.....	45
3.5 Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme, Saklama ve Numune Boyutları.....	45
3.6 Taze Beton Deneyleri.....	48
3.7 Sertleşmiş Beton Deneyleri	48
4. DENEY SONUÇLARI.....	49
4.1 Taze Beton Deney Sonuçları	49
4.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları.....	50
4.2.1. Basınç dayanımı	50
4.2.2. Ultrases hızı	53
4.2.3 Elastisite modülü hesabı	56
4.2.4 Maliyet analizi	58
4.2.5 Etkinlik faktörünün (k) belirlenmesi	59
4.2.5.1 Bolomey formülü kullanılarak k etkinlik katsayısının hesabı	62
4.2.5.2 Feret formülü kullanılarak k etkinlik katsayısının hesabı.....	63
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	67
5.1 Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	67
5.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	68
5.2.1 Basınç dayanımı sonuçlarının değerlendirilmesi	68
5.2.2 Ultrases hızı deney sonuçlarının değerlendirilmesi	72
5.2.3 Su/bağlayıcı sonuçlarının değerlendirilmesi.....	73
5.2.4 Basınç dayanımı-elastisite modülü arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi.....	75
5.2.5 Ultrases hızı ile elastisite modülü arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi ..	76
5.2.6 k Etkinlik faktörünün değerlendirilmesi.....	77
5.2.6.1 Bolomey formülüyle k etkinlik faktörü	77
5.2.6.2 Feret formülüyle k etkinlik faktörü	78
5.2.7 Etkinlik faktörü ile elastisite modülü arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi	80
5.2.7.1 Bolomey formülüyle etkinlik katsayısı elastisite modülü ilişkisi	80
5.2.7.2 Feret formülüyle etkinlik katsayısı elastisite modülü ilişkisi	81
5.2.8 Etkinlik faktörü ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi	82
5.2.8.1 Bolomey formülüyle etkinlik katsayısı basınç dayanımı ilişkisi	82
5.2.8.2 Feret formülüyle etkinlik katsayısı basınç dayanımı ilişkisi	85
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	95

KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
DIN	: Deutsche Institut für Normung (Alman Standart Enstitüsü)
PÇ	: Portland Çimentosu
TS	: Türk Standartları

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Puzolanların sınıflandırılması ve türleri.....	4
Çizelge 2.2 : Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları.....	9
Çizelge 2.3 : Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri standart değerleri.....	10
Çizelge 2.4 : Türkiye’deki bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri.....	10
Çizelge 2.5 : Uçucu küllerin mineralojik bileşimleri.....	12
Çizelge 3.1 : Üretilen betonların isimlendirilmesi.....	38
Çizelge 3.2 : CEM I PÇ 42,5 çimentonun fiziksel özellikleri.....	39
Çizelge 3.3 : CEM I PÇ 42,5 çimentonun kimyasal özellikleri.....	40
Çizelge 3.4 : CEM I PÇ 42,5 çimentonun mekanik özellikleri.....	40
Çizelge 3.5 : Agregaların birim ağırlık ve özgül ağırlık değerleri.....	41
Çizelge 3.6 : Agregaların elek analizi sonuçları.....	41
Çizelge 3.7 : Çatalağzı uçucu külünün kimyasal bileşimi.....	43
Çizelge 3.8 : Çatalağzı uçucu külünün fiziksel özellikleri.....	43
Çizelge 3.9 : Çatalağzı uçucu külünün puzolanik aktivitesi.....	43
Çizelge 3.10 : Orta akışkanlaştırıcı katkı maddesinin standardı.....	44
Çizelge 3.11 : Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin standardı.....	45
Çizelge 3.12 : Üretilen betonların gerçek bileşimleri (1 m ³ beton için).....	47
Çizelge 4.1 : Taze beton deney sonuçları.....	50
Çizelge 4.2 : Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanım değerleri.....	51
Çizelge 4.3 : Deney sonuçlarından elde edilen ultrases hızı değerleri.....	54
Çizelge 4.4 : Deney sonuçlarından elde edilen elastisite modülü değerleri.....	57
Çizelge 4.5 : Uçucu küllü betonların maliyetleri (1 m ³ beton için).....	69
Çizelge 4.6 : Optimum basınç dayanımlı uçucu küllü betonlarda etkinlik katsayıları (Bolomey).....	63
Çizelge 4.7 : Optimum basınç dayanımlı uçucu küllü betonlarda etkinlik katsayıları (Feret).....	65
Çizelge 5.1 : Kontrol betonuna kıyasla su ihtiyacı değişimi (%).....	67
Çizelge 5.2 : Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımı değerlerinin 28 günlük kontrol betonlarına göre yüzdesel olarak karşılaştırılması....	69
Çizelge 5.3 : Deney sonuçlarından elde edilen ultrases hızı değerlerinin 28 günlük kontrol betonlarına göre yüzdesel olarak karşılaştırılması.....	72

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Portland çimentolu beton karışımı ile portland çimentosu ve puzolanlı beton karışımının hidrasyonda serbest bıraktığı kirecin zamanla değişimi.....	5
Şekil 1.4 : Uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi – k_p diagramı.....	33
Şekil 1.5 : Uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi – etkinlik faktörü ($k=k_e+k_p$) Diagramı.....	34
Şekil 3.1 : TS 706 referans ve karışım granülometri eğrileri.....	42
Şekil 4.1 : Küp numunelerin 28. gündeki basınç dayanımları.....	52
Şekil 4.2 : Küp numunelerin 90. gündeki basınç dayanımları.....	52
Şekil 4.3 : Silindir numunelerin 28. gündeki basınç dayanımları.....	53
Şekil 4.4 : Küp numunelerin 28. gündeki ultrases hızları.....	55
Şekil 4.5 : Küp numunelerin 90. gündeki ultrases hızları.....	55
Şekil 4.6 : Silindir numunelerin 28. gündeki ultrases hızları.....	56
Şekil 4.7 : Silindir numunelerin 28. gündeki elastisite modülleri.....	58
Şekil 4.8 : 260 dozlu serinin 28.gün basınç dayanımı-uçucu kül yüzdesi grafiği.....	60
Şekil 4.9 : 320 dozlu serinin 28.gün basınç dayanımı-uçucu kül yüzdesi grafiği.....	60
Şekil 4.10 : 400 dozlu serinin 28.gün basınç dayanımı-uçucu kül yüzdesi grafiği.....	60
Şekil 4.11 : 260 dozlu serinin 90.gün basınç dayanımı-uçucu kül yüzdesi grafiği.....	61
Şekil 4.12 : 320 dozlu serinin 90.gün basınç dayanımı-uçucu kül yüzdesi grafiği.....	61
Şekil 4.13 : 400 dozlu serinin 90.gün basınç dayanımı-uçucu kül yüzdesi grafiği.....	61
Şekil 5.1 : 260 dozlu serinin 28. gündeki basınç dayanımı değişimi.....	70
Şekil 5.2 : 320 dozlu serinin 28. gündeki basınç dayanımı değişimi.....	70
Şekil 5.3 : 400 dozlu serinin 28. gündeki basınç dayanımı değişimi.....	70
Şekil 5.4 : 260 dozlu serinin 90. gündeki basınç dayanımı değişimi.....	71
Şekil 5.5 : 320 dozlu serinin 90. gündeki basınç dayanımı değişimi.....	71
Şekil 5.6 : 400 dozlu serinin 90. gündeki basınç dayanımı değişimi.....	71
Şekil 5.7 : Su/bağlayıcı oranının elastisite modülüne etkisi.....	73
Şekil 5.8 : Su/bağlayıcı oranının 28. gün basınç dayanımına etkisi.....	74
Şekil 5.9 : Su/bağlayıcı oranının 90. gün basınç dayanımına etkisi.....	74
Şekil 5.10 : Basınç dayanımı-elastisite modülü arasındaki ilişki.....	75
Şekil 5.11 : TS 500 ile deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	76
Şekil 5.12 : Uçucu küllü numunelerin ultrases hızı-elastisite modülü ilişkisi.....	77
Şekil 5.13 : k Etkinlik katsayısının çimento dozajıyla değişimi.....	78
Şekil 5.14 : k Etkinlik katsayısının çimento dozajıyla değişimi.....	78
Şekil 5.15 : k Etkinlik katsayısının çimento dozajıyla değişimi.....	79
Şekil 5.16 : k Etkinlik katsayısının çimento dozajıyla değişimi.....	79
Şekil 5.17 : Bolomey etkinlik katsayısı-Elastisite modülü ilişkisi.....	80
Şekil 5.18 : Bolomey etkinlik katsayısı-Elastisite modülü ilişkisi.....	81
Şekil 5.19 : Feret etkinlik katsayısı-Elastisite modülü ilişkisi.....	81
Şekil 5.20 : Feret etkinlik katsayısı-Elastisite modülü ilişkisi.....	82
Şekil 5.21 : Bolomey etkinlik katsayısı-Basınç dayanımı (28.gün) ilişkisi.....	83
Şekil 5.22 : Bolomey etkinlik katsayısı-Basınç dayanımı (28. gün) ilişkisi.....	83

Şekil 5.23 : Bolomey etkinlik katsayısı-Basınç dayanımı (90. gün) ilişkisi.....	84
Şekil 5.24 : Bolomey etkinlik katsayısı-Basınç dayanımı (90.gün) ilişkisi.....	84
Şekil 5.25 : Feret etkinlik katsayısı-Basınç dayanımı (28. gün) ilişkisi.....	85
Şekil 5.26 : Feret etkinlik katsayısı-Basınç dayanımı (28. gün) ilişkisi.....	85
Şekil 5.27 : Feret etkinlik katsayısı-Basınç dayanımı (90. gün) ilişkisi.....	86
Şekil 5.28 : Feret etkinlik katsayısı-Basınç dayanımı (90. gün) ilişkisi.....	86

F TİPİ UÇUCU KÜL KULLANILMIŞ BETONLARIN KÜL ETKİNLİK KATSAYILARI

ÖZET

Uçucu küller, termik santrallerde kömürün yakılmasıyla ortaya çıkan, puzolanik özelliklere sahip mineral katkı maddeleridir. Tek başlarına kullanıldıklarında bağlayıcılık özelliği göstermezler fakat çimento ile birlikte beton karışımına eklendiklerinde, çimento hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan kireci kullanıp bağlayıcı özellik kazanırlar. Böylece betonun mukavemetine ve durabilitesine etki ederler.

Bu çalışmada, F tipi uçucu kül ile PÇ 42.5 çimento kullanılmıştır. Eşit işlenebilme metoduna göre üretilen uçucu küllü betonların mekanik özellikleri incelenmiş ve basınç dayanımına bağlı olarak bulunan k etkinlik faktörü araştırılmıştır.

Deneyler için 260 kg/m^3 , 320 kg/m^3 ve 400 kg/m^3 dozlu kontrol betonları üretilmiştir. Toplamda 21 seri olmak üzere her kontrol betonu için 6 seri küllü beton üretilmiştir. Bu 6 serinin 3'ünden %10 diğer 3'ünden %17 oranında çıkarılan çimentonun yerine ağırlıkça aynı miktarda, 1.5 kat ve 2 kat uçucu kül eklenip (260 kg/m^3 dozda %10 çıkarıldığında 1.5 , 2 ve 2.5 kat) eşit işlenebilirlikte ($15,5 \pm 1,5 \text{ cm}$ çökme) betonlar üretilmiştir. Her seride 6 adet $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$ boyutlarında küp numune ve 6 adet 10 cm taban çapında, 20 cm yüksekliğinde silindir numune üretilmiştir. Üretilen betonlar $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığındaki su dolu kür havuzu içerisinde saklanmıştır. Her seri için ön beton dökülerek su miktarları bulunmuştur.

Taze beton deneyleri olarak çökme, taze birim ağırlık ve hava miktarı ölçülmüştür. Sertleşmiş beton deneyleri olarak ise 28. ve 90. günler sonunda su ortamındaki küp numunelere basınç dayanımı ve ultrases deneyleri, 28. gün sonunda gene su ortamındaki silindir numunelere basınç dayanımı, ultrases deneyleri ve elastisite modülü ölçüm deneyleri yapılmıştır. Elde edilen basınç dayanım değerleri kullanılarak uçucu küle ait k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur.

Yapılan deneyler sonucunda; uçucu küllerin ekonomik açıdan avantajlarının yanında betonda su ihtiyacını azaltarak işlenebilirliği iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Özellikle düşük yüzdeli uçucu kül kullanılmış betonlarda basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında; 28. günde uçucu küllü betonların kontrol betonuna yakın değerler aldığı, 90. günde ise kontrol betonunun üzerinde değerlere ulaştığı gözlemlenmektedir. Aynı şekilde elastisite modülünün de 28. günde kontrol betonuna yakın değerler aldığı gözlemlenmektedir. Ultrases deneyleri sonucunda ise uçucu küllerin betondaki boşluk miktarını azalttığı böylece betonun kompasitesinin de yükseldiği gözlemlenmiştir.

EFFICIENCY OF CLASS F FLY ASH IN CONCRETE

SUMMARY

Fly ashes, which come into existence after combustion process of coal in thermal power plants, have pozzolanic properties and they are mineral additive materials. When they used alone, they have no binding effect. But when they are added with cement into the fresh concrete mixture, they use the lime, which comes into existence after hydration of cement and they achieve binding characteristics. So they effect stability and durability of concrete.

In this experimental study, class F fly ash and PC 42.5 cement were used. Concretes with fly ashes were produced according to the equal workability method. The aimed workability was 14-17 cm slump for the concretes produced. Their mechanical properties were analysed and the efficiency factor k depending on the compression strength was investigated.

Witness concrete samples with 260 kg/m^3 , 320 kg/m^3 and 400 kg/m^3 cement doses were produced for the experiments. For each witness sample 6 series of concrete with fly ash were produced. Totally 21 series of concrete were produced. From 3 of these 6 series %10 of cement as weight was removed. From other 3 of these 6 series %17 of cement as weight was removed. Instead of removed cement fly ashes with three different ratios (1, 1.5 and 2 time of removed cement weight) were added. In 260 kg/m^3 for %10 removal of cement 1.5, 2 and 2.5 time fly ash of removed cement weight were added. All the concrete samples with fly ash were produced according to the equal workability method. In each series 6 pieces of cubical samples (15x15x15 cm) and 6 pieces of cylinder samples (R=10cm h=20cm) were produced. Produced samples were kept in a tank with full of water $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ temperature. To determine the water ratios of all concretes pre-samples were produced.

As fresh concrete experiments slump, fresh unit weight and air content of concrete were measured. As hard concrete experiments compression strength, ultrasonic pulse velocity and modulus of elasticity tests were applied on the specimens at the end of the curing period. Efficiency factor k were calculated according to the compression strength values of concrete.

In conclusion; fly ashes have economically many advantages. They also decrease the water demand in concrete. Consequently the workability in concrete is improved. The compressive strength values especially in low fly ash used concretes are close to the witness samples during 28. days. Also it can be seen that their compressive strength values during 90. days are over the witness samples. The modulus of elasticity values in fly ash used concretes are close to the witness samples during 28. days. According to the ultrasonic pulse velocity values, fly ashes decrease the compacity of concrete.

1. GİRİŞ

Betonun önemli bileşenlerinden olan bağlayıcı maddelerin geçmişi günümüzden çok eskiye dayanmaktadır. Eski Mısırlılar bağlayıcı madde olarak alçı harçlarını, eski Yunan ve Romalılar kireç harçlarını kullanmışlardır. Ayrıca yine eski Roma kalıntılarında suda da sertleşen kireç puzolan harca rastlamak mümkündür. Yeni çağlarda ise gelişen teknoloji ve kimyasal analiz metodlarıyla su kireci, tabii çimento ve portland çimentosu gibi kaliteli bağlayıcı maddelerin hızla geliştiği görülmektedir. Bunların dışında kullanım amaçlarına göre portland çimentosu ve özel çimento türlerinin geliştiği, ayrıca yapılan araştırmalarla hidrasyon ürünleri, hidrasyon ısı, priz süresi ve priz olayı, sertleşme, hacim genişlemesi, rötre ve sünme gibi olayların açıklandığı görülmektedir. Günümüzde ise bu gelişmeleri uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve pirinç kabuğu külü gibi bağlayıcı maddelerin kullanılması izlemiştir [1].

Sanayinin gelişimi ile birlikte endüstriyel alandaki üretimin sonucunda birçok atık madde ve yan ürün açığa çıkmaktadır. Bunların çok az kısmı tekrar kullanılmakta, büyük kısmı ise depo edilmektedir. Bu da çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bunun önlenmesi için bu atık maddelerin kullanımlarının yaygınlaştırılması gerekmektedir. Böylece hem sınırlı olan doğal kaynakların kullanımı azalmakta hem de doğada oluşabilecek zararlar en aza indirilmektedir [2].

Ülkemizde bunun en iyi örneği uçucu küldür. Uçucu kül, kömürle çalışan termik elektrik santrallerinde ortaya çıkan bir atık üründür. Bunlar çok ince tanelidirler ve baca gazları ile taşınırlar. Küller, çevreyi olumsuz etkiledikleri için mekanik ve elektrostatik yöntemlerle toplanarak depolanırlar. Bugün Dünya’da yılda 600 milyon ton uçucu kül açığa çıkmaktadır. Bu rakam ise ülkemizde faaliyet gösteren 11 adet termik santralden toplam 13 milyon tondur. Artan nüfus ve enerji ihtiyacıyla bu miktarın gelecekte ülkemizde ve dünyada artacağı tahmin edilmektedir [3].

Uçucu küller özellikle inşaat mühendisliğinde kullanılırlar. Harç ve beton üretiminde çoğunlukla ikincil bağlayıcı madde olarak kullanılırlar. Yani; portland çimentosunun ağırlık yüzdesi oranında bir kısmı yerine veya çimentoya önceden karıştırılarak

katkılı çimento olarak kullanılırlar. Taze betonun işlenebilme ve su ihtiyacı ile terleme, ayrışma, hava sürüklenme, hidrasyon ısı ve plastik rötre gibi özelliklerine etkiler. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur, çimento hamurundaki boşlukları doldurarak kompoziteyi artırır ve betona dayanıklılık kazandırır. Sertleşmiş betonda ise durabiliteye ve mekanik özelliklere etkileri vardır. Basınç mukavemetleri, mukavemet kazanma hızları, elastisite modülü, sünme ve rötre mineral katkı maddelerinin kullanımından etkilenirler. Bunların yanında geçirimsizlik, asitlere ve sülfata dayanıklılık, alkali-agrega reaksiyonu, donma-çözülme tekrarlarına dayanıklılık ve donatı korozyonu gibi durabilite özellikleri de mineral katkı maddelerinin kullanımından etkilenirler. Uçucu küllerin bu özelliklere etkisi genellikle uçucu külün cinsine, kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine, kullanım miktarına, kullanım yöntemine, fiziksel, kimyasal ve puzolanik özelliklerine bağlıdır [2, 4].

Bu çalışmada Akçansa çimentodan temin edilmiş CEM I PÇ 42.5 cinsi çimento ve Çatalağzı Termik Santrali'nden temin edilmiş F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Çimento ve uçucu küllerin kimyasal bileşimlerinin analizleri, Akçansa çimento fabrikası laboratuvarında yapılmıştır. Farklı karışım oranlarında toplam 21 karışım hazırlanmıştır. Bunlardan 3 tanesi 260, 320 ve 400 kg/m³ çimento dozajlarında kontrol betonlarıdır. Her gruptan %10 ve %17 oranında ağırlıkça çimento çıkarılmış, yerine çıkarılan çimentonun ağırlıkça 1, 1.5 ve 2 katında uçucu kül eklenerek değişik karışımlar hazırlanmıştır. Bütün karışımlarda işlenebilirlik sabit tutulmuştur. 260 ve 320 dozlu karışımlarda orta, 400 dozlu karışımlarda süper akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler, 28 ve 90 gün boyunca kür havuzunda uygun kür ortamında bekletilmiştir. Daha sonra bu numunelere basınç dayanımı, ultrases ve elastisite modülü deneyleri uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen verilerle, uçucu küllerin betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve k etkinlik sayıları belirlenmiştir. Böylece F tipi uçucu küllerin betonda kullanılması ile ilgili elde edilen veriler ışığında bazı sonuçlara varılması amaçlanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Puzolanların Tanımı ve Sınıflandırılması

Tek başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan fakat kireç veya çimento ile karıştırıldığında su ile yaptığı reaksiyon sonucunda bağlayıcı madde özelliği kazanan maddelere puzolan denir. Puzolan maddelerin içinde koloidal halde silis ve alümin bulunmaktadır. Bu maddelerin hidrasyon sonucu ortaya çıkan kireçle reaksiyona girmesiyle, puzolanlar bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır [17].

Puzolanik özelliklere sahip birçok yapay ve doğal madde çok eski zamanlardan günümüze dek beton üretiminde çeşitli amaçlarla kullanılmışlardır. Puzolanlar, günümüz gelişen beton teknolojisiyle betonun bazı fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirmek ve ekonomik katkı sağlamak amacıyla kullanılan mineral katkı maddeleridir. Bu mineral katkı maddeleri portland çimentosuna benzemelerine rağmen kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri olmadığı için ikincil bağlayıcı maddeler olarak adlandırılmaktadırlar. Bir dolgu malzemesi fonksiyonunda olan bu maddeler, puzolanik aktiviteleriyle hidrasyon ürünlerinin oluşumunda etkinlik gösterir ve bağlayıcı hamurun yapısını değiştirirler. Böylece betonun çeşitli özelliklerinde iyileşme görülür. Özellikle puzolanik aktivitesi yüksek olan mineral katkı maddeleri kompasiteyi artırarak (boşlukları azaltarak) daha yoğun bir bağlayıcı hamurun oluşmasını sağlamaktadırlar. Böylece agrega ile bağlayıcı hamur yüzeyi arasındaki aderans artmaktadır. Mineral katkı maddelerinin, betonda akışkanlaştırıcı katkı maddeleriyle birlikte kullanılmasıyla yüksek basınç dayanımlarına ulaşmak mümkün olmaktadır [2].

ASTM C 618' e göre, kendi başına bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan, ancak uygun rutubet şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile kimyasal reaksiyona girip, bağlayıcı özellik kazanan silisli ve alüminli maddelere puzolan denir [5]. Puzolanların türleri ve sınıflandırılması Çizelge 2.1' de gösterilmiştir [4].

Çizelge 2.1 : Puzolanların sınıflandırılması ve türleri [4].

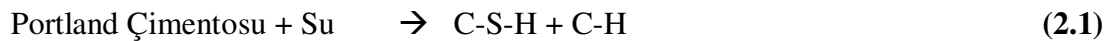
Puzolanlar	
Doğal Puzolanlar	Yapay Puzolanlar
Volkanik camlar	Uçucu kül
Volkanik tüfler ve tras	Silis dumanı
Killer ve şeyller	Yüksek fırın cürufu
Diatomitler	Pirinç kabuğu külü
	Demirli olmayan cürüflar

Doğal puzolanlar genellikle katkıli portland çimentosu üretiminde kullanılmaktadırlar. Yapay puzolanlardan yüksek fırın cürufu ve uçucu küller beton üretiminde iki türlü kullanılabilirler. Birinci yöntemde puzolan, belirli oranda uçucu kül veya yüksek fırın cürufu içeren katkıli portland çimentosu kullanımıyla betona katılır. İkinci yöntemde ise uçucu kül veya ince öğütülmüş cüruf, betona karıştırma sırasında veya çimentoya ilave ya da ikame olarak katılır [4].

2.2 Puzolanik Reaksiyon

Puzolan içeren betonlarda puzolanik reaksiyon, puzolandaki silika (S) ile portland çimentosu (C₂S+C₃S) hidratasyonu sonucu açığa çıkan serbest kireç (C-H) arasında aşağıdaki denklemlerdeki gibi olmaktadır.

1) Portland çimentosu hidratasyonu



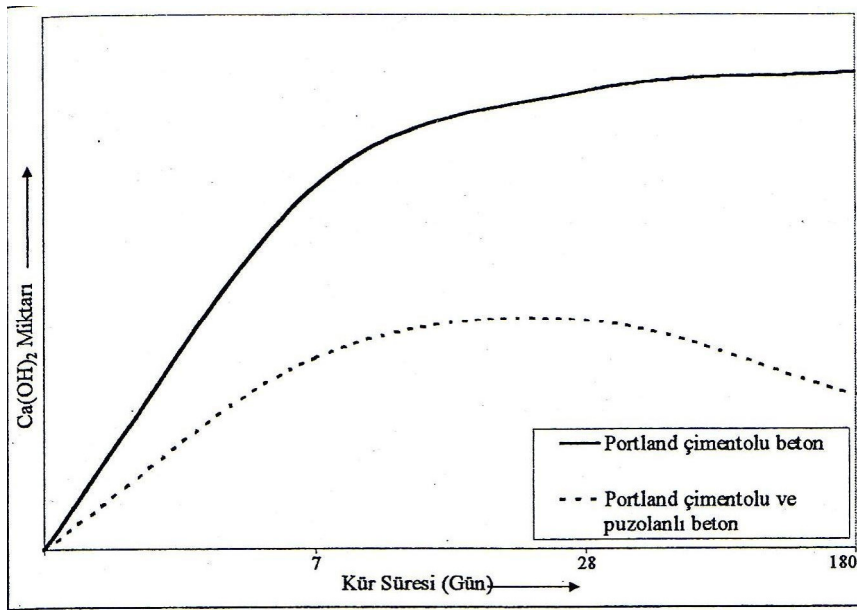
2) Puzolanik reaksiyon



(2.1) denkleminde sonra olan (2.2) denklemindeki puzolanik reaksiyon sonucu portland çimentosunun silikatlı bileşenleri ile aynı hidrate ürünler açığa çıkmaktadır. Ancak bu reaksiyon hem serbest kireç oluşumuna ihtiyaç duyması hem de yavaş bir reaksiyon olması dolayısıyla puzolanik etkiyle mukavemet kazanma da yavaş olmaktadır. Kür sıcaklığının artması, alkali ve sülfatlı bazı kimyasal katkı maddelerinin varlığı reaksiyonu hızlandırmaktadır. (2.2) denkleminde, serbest kireç ile puzolandaki alümin ve demir oksitlerin reaksiyonları sonucunda hidratasyon ürünleri

de oluşmaktadır. Böylece portland çimentosu hidratasyonu ile puzolanik reaksiyon arasında hem açığa çıkan ürünler açısından hem de reaksiyonların hızları açısından farklılıklar bulunmaktadır [4].

Puzolan ve portland çimentosu karışımı hidratasyona girince bağlayıcı hamurundaki serbest kireç miktarı da giderek azalmaktadır. Bağlayıcı ürünlerin bu reaksiyon sonucunda artması mukavemet artışına sebep olurken, karışımdaki serbest kirecin azalması ise durabiliteyi iyileştirmektedir. Puzolanik reaksiyonun, portland çimentosu hidratasyonundan daha sonra ve daha yavaş gelişmesi de puzolanlı betonların mukavemetlerini daha geç yaşlarda kazanmalarına sebep olmaktadır. Bu tür betonlarda erken yaşlardaki mukavemetler genellikle daha düşük olmasına rağmen ilerki yaşlarda mukavemetler puzolanik aktiviteyle beraber kontrol betonunu yakalamakta veya geçmektedir [4]. Zamana bağlı olarak, puzolan ve portland çimentosu karışımı ile yalnız portland çimentosunun kullanıldığı beton karışımlarında serbest kireç miktarının değişimi Şekil 1.1’de gösterilmiştir [13].



Şekil 1.1 : Portland çimentolu beton karışımı ile portland çimentosu ve puzolanlı beton karışımının hidratasyonda serbest bıraktığı kirecin zamanla değişimi [13].

Puzolan ve portland çimentosu hidratasyona girince puzolanik reaksiyon sonucu bağlayıcı hamurdaki serbest kireç miktarı giderek azalmaktadır. Çünkü zamanla daha çok bağlayıcı ürün oluşmaktadır. Bu olay mukavemet artışına sebep olurken aynı zamanda serbest kirecin azalması ve hamur boşluk yapısının iyileştirilmesi

durabiliteye de önemli katkılar sağlamaktadır. Puzolanik reaksiyonun, portland çimentosu hidratasyonundan daha yavaş gelişmesi puzolanlı betonların mukavemet kazanma hızlarını da etkilemektedir. Bu tür betonlarda erken yaşlardaki mukavemetler kontrol betonuna göre düşük olmakta ancak ilerki yaşlarda puzolanik aktivitenin yüksekliğine göre kontrol betonunu yakalamakta veya geçmektedirler [4].

2.3 Uçucu Küller

Uçucu küller, kömürle çalışan termik santrallerin yan ürünleridir. Ayrıca günümüzde gerek miktarları gerekse kullanım olanakları bakımından önemli yer tutan atık ürünlerin başında gelmektedirler. Kömürün içinde bulunan bazı inorganik maddeler yanma sırasında oluşan yüksek sıcaklıklarla ayrılmakta ve bacadan atılırken soğuyarak küresel tanecikler oluşturmaktadır. Uçucu kül adı verilen bu tanecikler elektrofiltrelerle ve siklonlarla yakalanmaktadır. Bu sayede doğrudan atmosfere karışımları engellenmektedir. Böylece çevre ve hava kirliliği de mümkün olduğunca önlenmiş olmaktadır [18, 19]. TS EN 450'ye göre uçucu küller, pulverize kömürün yakılmasından elde edilen, puzolanik özelliklere sahip, esas olarak SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan, reaktif SiO_2 muhtevası kütlece en az %25 olan, küresel ve camsı taneciklerin ince tozudur. Yine TS EN 450'ye göre uçucu küller, pulverize edilmiş antrasit, linyit veya bitümlü kömürün yakıldığı fırınların baca gazlarındaki toz benzeri taneciklerin elektrostatik veya mekanik çöktürülmesi ile elde edilir [6].

Uçucu kül terimi, 1930'lu yıllarda elektrik enerjisi endüstrisinin gelişmesi ile yayılmaya başlamıştır. 1937 yılında R. E. Davis, Kaliforniya Üniversitesi'nde uçucu külün betonda kullanımı ile ilgili ilk deneysel sonuçları elde etmiştir. Bu çalışma ilk şartnamelerin, test metodlarının ve uçucu kül kullanımının temelini oluşturmuştur. Uçucu küllerin ilk olarak inşaat sektöründe kullanımı ise 1948 yılında Hungry Horse barajının inşaatı ile başlamıştır [12]. Türkiye' de ise bu çalışmaların başlangıcı 1960'lı yıllara dayanmaktadır. Çimento endüstrisinin uçucu küllerle tanışması ise 1970' lerde olmuştur. Bazı çimento fabrikalarında deneme amaçlı uçucu küllü beton üretilmiştir [20].

Bugün Dünya' da ortaya çıkan uçucu kül miktarı yıllık 600 milyon ton civarındadır. Türkiye' de ise bu rakam toplam 11 termik santralden olmak üzere yılda 13 milyon ton kadardır [3].

Uçucu küller, günümüzde inşaat sektörü başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe ise katkılı çimento ve beton üretiminde, Portland çimentosu üretiminde hammadde olarak, beton ve asfalt yol yapımında, bazı geoteknik uygulamalarda, hafif agrega üretiminde, tuğla, kiremit ve seramik üretiminde, dolgu malzemesi olarak kullanımı örnekler olarak sayılabilir [19, 21].

2.3.1 Uçucu küllerin özellikleri

Uçucu küllerin özellikleri, kömürün özellikleri ve yakılma yöntemine göre farklılıklar gösterebilir. Bileşimi genellikle silisli ve alüminli olduğundan puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılabilirler. İnce ve küresel taneleri nedeniyle betonda işlenebilmeyi artırır ayrıca hidrasyon ısısını azaltırlar. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturarak çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betonun durabilitesini artırır. Linyit kömürünün yakılmasıyla elde edilen uçucu külde ise kireç oranı genellikle yüksektir. Bu nedenle bu tür küllerin aynı zamanda bağlayıcılık özellikleri de vardır. Antrasit kömüründen veya iyi yakılmayan kömürden elde edilen uçucu küllerde ise karbon miktarı yüksek olur. Bu da çimento ve betonda su ihtiyacını artırır, puzolanik özelliği ve kaliteyi olumsuz etkiler. Uçucu küller genellikle çimentodan daha ince taneli oldukları için ilave öğütme gerektirmeden kullanılabilir [22].

2.3.1.1 Uçucu küllerin fiziksel özellikleri

Uçucu küllerin tanecik şekli ve büyüklük dağılımında, kömürün orjini ve üniform olması, kömürün pulverizasyon durumu ve yanma koşulları (sıcaklık ve oksijen seviyesi), yanmanın üniformluğu ve toz toplama sistemi tipi gibi proseslere bağlı faktörler etkili olmaktadır. Uçucu külde, farklı büyüklüklerde hem camsı küresel hem de düzensiz şekilli tanecikler bulunmaktadır. Bu taneciklerin şekil ve büyüklük açısından farklılıkları, uçucu külün düşük veya yüksek kireçli olmasından kaynaklanmaktadır. Düşük kireçli küllerde, çoğunlukla camsı faza karşılık gelen içi boşluksuz tam küresel tanecikler bulunmaktadır ve bu küller şekil dağılımı açısından genellikle homojen ve mikro yapıya sahiptirler. Yüksek kireçli küllerde ise, mikro yapı içinde hem küresel hem de köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunmasıyla heterojen şekil dağılımı mevcuttur. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyleri de düşük kireçli küller kadar düzgün değildir [22].

Uçucu küllerin şekli, inceliği, boyut dağılımları, özgül ağırlığı ve bileşimi; beton karışım oranlarını, taze beton özelliklerini, sertleşmiş betonun mukavemetini ve durabilitesini etkilemektedir. Bu etki artan yüzey alanı ile küresel taneciklerin kayganlaştırıcı nitelik taşıması ve dolgu maddesi özelliklerine sahip olması, şekilsiz ve pürüzlü yüzeye sahip olanların ise su ihtiyacını arttırma şeklinde olmaktadır. Uçucu külün taneciklerinin çok ince olması ve genelde küresel olmaları puzolanik aktiviteye de olumlu yönde etki etmektedir. Özellikle pürüzsüz yüzeyli ince küresel tanecikler büyük yüzey alanına sahip olduklarından kireç-silikat reaksiyonlarına daha hızlı girmektedirler. Buna bağlı olarak yüksek kireçli külün aktivitesinde kristalize aktif fazlar (anhidrit, kireç) ve az camsı faz rol oynamaktayken, düşük kireçlide ise taneciklerin şekli, büyüklük dağılımı ve camsı fazın çokluğu belirleyicidir [22].

Uçucu küllerin rengi ise belirleyici olmamakla beraber üretilmiş oldukları santraldeki kömür cinsinin değişimini, kızdırma kaybını ve yanma koşullarındaki değişikliği gözlememize yardımcı olarak, uçucu kül özelliğinde değişim olup olmadığını anlamamızı sağlar [2].

Uçucu küllerin özgül ağırlıkları 1,97 ile 3,02 gr/cm³ arasında değişmektedir. Beton teknolojisinde kullanılan uçucu küllerin özgül ağırlıkları ise 2,2 ile 2,8 gr/cm³ arasındadır. Özgül ağırlığı etkileyen faktörler, uçucu küldeki demirli bileşen ve karbon miktarıdır. Demirli bileşen miktarı fazla olan uçucu küllerin özgül ağırlıkları daha yüksektir. Karbon miktarı fazla olan uçucu küllerin ise özgül ağırlıkları daha düşüktür. Yüksek özgül ağırlık, ince taneciklerin göstergesidir. C sınıfı uçucu küllerin daha ince taneciklere ve daha az senofere sahip olmalarından dolayı, özgül ağırlıkları F sınıfı uçucu küllere göre daha yüksektir [22].

2.3.1.2 Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik özellikleri

Uçucu külün kimyasal bileşimi, kullanılan kömürün yapısı, jeolojik orijini ve kömür hazırlama, yanma, toz kaplama ve desülfirizasyon gibi proses koşullarına bağlıdır. Uçucu küllerin kimyasal yapılarında ana elementler olarak Si, Al, Ca, Fe ve S bulunur. Gene uçucu küllerin kimyasal yapısında bulunan başlıca bileşenler SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO ve SO₃ olup MgO, Na₂O, K₂O, TiO₂ ve benzeri oksitler bulunabilir. Bunların miktarları uçucu külün silisli veya kireçli yapıda olmasına göre farklılıklar göstermektedir. Buna göre SiO₂ %25-60, Al₂O₃ %10-30, Fe₂O₃ %1-15 ve CaO %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Diğer oksitlerden MgO en fazla %5, alkali oksitler (Na₂O+K₂O) %5' in altında bulunmaktadır. SO₃ ise genellikle %2-2,5

arasında bir değerde bulunmakla birlikte, kömürün yapısı ve proses koşullarına göre %10' a kadar yükselebilmektedir. Ancak TS EN 450-2 standardı SO₃ değerini en fazla %3 olarak sınırlandırmaktadır. Kızdırma kaybı esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozulması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya CO₂ kaybını da içine almaktadır. TS EN 450-2 standardında kızdırma kaybı %5 olarak sınırlandırılmıştır. Uçucu küllerin tipik kimyasal kompozisyonları Çizelge 2.2' de verilmiştir [3, 7].

Çizelge 2.2 : Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları [3, 7].

Bileşen	F Sınıfı Kül (%) (CaO < %10)	C Sınıfı Kül (%) (CaO > %10)
SiO ₂	43,6-64,4	23,1-50,5
Al ₂ O ₃	19,6-30,1	13,3-21,3
Fe ₂ O ₃	3,8-23,9	3,7-22,5
CaO	0,7-6,7	11,5-29
MgO	0,9-1,7	1,5-7,5
Na ₂ O	0-2,8	0,4-1,9
C (Kızd. Kay.)	0,4-7,2	0,3-1,9

Uçucu küllerde reaktif silis ve reaktif kireç, çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan ve mukavemetin gelişmesinde önemli rol oynayan 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 halde bulunurken; mullit ve kuvars gibi diğer silisli bileşenler inert olup kristalize halde bulunurlar. Reaktif silis miktarının, uçucu külün tipinden bağımsız olarak en az %25 olması gerekmektedir. Reaktif kireç ise düşük kireçli küllerde %10' un altında, yüksek kireçli küllerde ise %10-15 arasında değişmektedir [22, 23].

Uçucu küllerin sınıflandırılmalarında, kimyasal bileşen yüzdesi dikkate alındığında ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır.

Bu standartlardaki kimyasal sınırlar Çizelge 2.3 'te verilmiştir [5, 6].

Çizelge 2.3 : Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri standart değerleri [5, 6].

Bileşenler (%)	TS EN 450	TS 639	ASTM C 618	
			F	C
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃		> 70	> 70	> 50
SO ₃	< 3	< 5	< 5	< 5
Nemlilik		< 3	< 3	< 3
C (Kızdırma Kaybı)	< 5	< 10	< 6	< 6
MgO		< 5		
Alkaliler		< 1,5	< 1,5	< 1,5
Cl ⁻	< 0,10			
Serbest CaO	< 1			
Reaktif SiO ₂	> 25			

Çizelge 2.4 'te Türkiye'deki bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri ve ASTM C 618 standardıyla karşılaştırılmaları verilmiştir [3].

Çizelge 2.4 : Türkiye'deki bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri [3].

Bileşim (%)	Orhaneli	Çatalağzı	Çayırhan	Yatağan	Tunçbilek	ASTM C 618	
						F	C
SiO ₂	48,53	58,75	50,98	51,50	57,43		
AL ₂ O ₃	24,61	25,24	13,11	23,08	16,07		
Fe ₂ O ₃	7,59	5,76	9,74	6,07	13,41		
S+A+F	80,73	89,75	73,83	80,65	86,92	> %70	> %50
CaO	9,48	1,46	11,82	10,53	2,22		
MgO	2,28	2,22	3,91	2,42	5,62		
SO ₃	2,48	0,08	3,94	1,32	0,92	< %5	< %5
K ₂ O	2,51	4,05	1,91	2,54	1,58		
Na ₂ O	0,35	0,60	2,71	0,77	0,37		
Kızd. Kay.	1,69	1,12	0,86	1,06	1,92	< %6	< %6
Cl ⁻	0,005	0,015	0,014	0,003	0,002		

ASTM C 618 standardına göre, uçucu küller C ve F sınıflarına ayrılırlar. F sınıfı uçucu küller, bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küllerdir. CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küllerin bağlayıcılık özellikleri yoktur, puzolanik özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu küller, linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ yüzdesi %50' den

fazla olan küllerdir. CaO yüzdesi %10' dan büyük olduğu için yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küllerin puzolanik özelliklerinin yanında bağlayıcılık özellikleri de vardır [5].

TS EN 197-1' e göre sınıflandırmada ise, 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 SiO₂ ve Al₂O₃' ten oluşan, geri kalanı Fe₂O₃ ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'ten fazla olması gerekmektedir. W sınıfı uçucu küller ise, hidrolik veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup, esas olarak reaktif SiO₂ ve Al₂O₃'ten oluşan, geri kalanı Fe₂O₃ ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde reaktif CaO oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25'ten fazla olması gerekmektedir. Ayrıca her iki türde de kızdırma kaybının %5'ten küçük olması gerekmektedir [23].

Uçucu küllerin mineralojik bileşimleri, kömürde bulunan minerallere (kil, kuvars, pirit, alçıtaşı, karbonatlar) ve proses koşullarına bağlıdır. Uçucu külün mineralojik yapısı, külün tipine göre değişen dağılımdadır. Camsı (kristalsız) ve kristal yapılu bileşenlerden oluşmaktadır. Mineralojik bileşim (cam fazın durumu, kristal yapıları) puzolanik özellikleri de etkilemektedir. Özellikle camsı fazın durumunun uçucu külün reaktivitesinde etkinliği büyüktür. Düşük kireçli uçucu küldeki camsı fazın yapısı, SiO₂ açısından zengin ve yüksek oranda polimerize silisli veya alüminyum da içeren alüminosilikat bileşimindedir. Silisli veya alüminosilikat camsı fazı, düşük kireçli reaktif bileşen olup su ve kalsiyum hidroksitle reaksiyona girdiğinden küle puzolanik özellik kazandırmaktadır. Yüksek kireçli külde ise, aktif bileşen içinde silisyum da içeren kalsiyum alüminat camsı fazının yanısıra aktif kristalize faz da vardır. Burada saf silika camı Ca ve Al iyonları ile modifiye olmuştur. Yüksek kireçli külün camsı ve kristalize fazları, külün puzolanik özelliğinin yanında kısmen bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlamaktadır [22]. Çizelge 2.5'te uçucu küllerin mineralojik bileşimleri verilmiştir [7].

Çizelge 2.5 : Uçucu küllerin mineralojik bileşimleri [7].

Mineral (%)	Silikoaluminöz Küller	Sulfokalsik Küller	Silikokalsik Küller
Camsı ve Amorf Faz	60	35	50
Mullit	20	1	5
Hematit	7	4	3
Manyetit	6	1	1
Kuvars	5	5	5
Anhidrit		15	5
Serbest Kireç		20	10
Feldispat ve Gehlenit		≥ 20	≥ 15

2.3.2 Uçucu küllerin taze beton özelliklerine etkisi

2.3.2.1 İşlenebilme, su ihtiyacı ve terleme

Betonları üretirken amaç kalıbına dökülmüş halde kompazitenin büyük bir değer alması ve mukavemetin de yüksek olmasıdır. Taze betonun kalıbına yerleştirme sırasında kohezyonunu ve homojenliğini kaybetmemesi, kalıplarda kolayca yayılıp mümkün olduğu kadar az boşluk bırakarak bunları doldurma özelliklerinin hepsine birden işlenebilme özelliği denilmektedir [24]. İşlenebilirliğin sabit tutulduğu bu çalışmada, karışım hesapları yapılmadan önce aynı işlenebilirliği sağlamak için çok sayıda deneme üretimi yapılmıştır. Bu yüzden beton içerisindeki suyun azaltılması ve bağlayıcı miktarının artması, işlenebilirliğin sabit tutulması açısından önemlidir. Uçucu küllerin de işlenebilirliğe katkısı bu açıdan olumlu yönde olmaktadır.

Sivasundaram, Carette ve Malhotra, F sınıfı uçucu külleri basit ikame metodu ile yüksek dozlu betonlarda kullanarak yaptıkları deneyler sonrasında ulaştıkları sonuçlarda, uçucu küllerin işlenebilirliği arttırdığı ve su ihtiyacını azalttığı kanısına varmışlardır [8].

Ukita ve arkadaşları değişik tane gruplarına ayrılmış uçucu kül kullanarak betonlar üretmişler, maksimum tane boyutu 10 mikron ve özgül yüzeyi 7670 cm²/gr olan uçucu külün işlenebilmeyi iyileştirdiğini ve betonda su ihtiyacını azalttığını gözlemlemişlerdir [9].

Kim ve arkadaşları, yüksek mukavemetli beton üretiminde %30' a varan ikame oranlarında uçucu külün işlenebilmeyi azalttığını ve sabit çökme değeri için gerekli olan su miktarının arttığını gözlemlemişlerdir. Buna, kullandıkları uçucu kül

tanelerinin pürüzlü yüzeyi ve boşluklu yapısının neden olduğunu düşünmüşlerdir [9].

Olek ve Diamond, C ve F sınıfı uçucu küllerle basit ikame metoduyla ürettikleri betonlarda her iki tip uçucu külün de işlenebilirliği arttırdığını gözlemlemişler, C tipi uçucu küllerin ise F tipi uçucu küllere göre işlenebilirliği daha fazla arttırdığını söylemişlerdir [10].

Schiessl ve Härdtl yapmış oldukları çalışmalarda, uçucu küllü betonlarda uçucu küllerin inceliğinin artması ile taze betonun işlenebilirliğinin de arttığını söylemişlerdir [11].

Welsh ve Burton (1958), bazı Avustralya küllerinin basit ikame metodu ile su miktarı sabit tutularak yapılan betonlarda kullanılması ile karışımda çökme kaybının gözlemlendiğini belirtmişlerdir [12].

Terleme genellikle segregasyon sonucu oluşan, artması halinde erken rötreye neden olan bir olaydır. Segregasyon olayı, üretilen betonun yeterli kohezyona sahip olmamasından kaynaklanmaktadır. Uçucu küllerin ise inceliklerinin fazla oluşu nedeniyle, beton karışımının kohezyonunu artıracak ve segregasyonu azaltacak, bu nedenle de erken rötreyi engelleyeceği düşünülmektedir [1, 2].

Copeland, yaptığı çalışmalarda terlemeye eğilimli kaba karışımlarda uçucu kül kullanımının terlemede azalmaya sebep olduğunu gözlemlemiştir [12].

Sivasundaram, Carette ve Malhotra yaptıkları çalışmalarda, yüksek miktarda uçucu kül kullanarak ürettikleri betonlarda hiç terlemeye rastlamadıklarını belirtmişlerdir [8].

Ukita, Shigematsu ve Ishii ise inceliği fazla olan uçucu küllerle yaptıkları araştırmalarda, uçucu küllerin terlemeyi ve segregasyonu azalttığını söylemişlerdir [25].

Rehsi (1973), bir kaç Hindistan külü ile yaptığı deneylerde incelenen tüm küllerin betonun su ihtiyacını arttırdığını gözlemlemiştir [12].

Bu çalışmalardan yola çıkarak, uçucu küllerin betonda terlemeyi ve işlenebilirliği iyileştirdiği söylenebilir. Ancak bu konudaki en önemli etkenlerin uçucu küllerin inceliği ve kimyasal bileşimi oldukları unutulmamalıdır.

2.3.2.2 Priz süresi

Betonda priz süresini etkileyen birçok faktör vardır. Çimentonun tipi, içeriği, inceliği, katkı kullanımının etkisi, uçucu külün miktarı, uçucu külün inceliği ve kimyasal bileşimi bu faktörlere örnek olarak gösterilebilir. Genellikle uçucu kül kullanılan betonlarda priz sürelerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun esas sebebi, uçucu küllerin bağlayıcı özellik kazanabilmeleri ve kimyasal reaksiyona girebilmeleri için çimento prizi sonrasında ortaya çıkan CaO'yu kullanmalarıdır. Ayrıca CaO'yu kullanma sırasındaki reaksiyon hızının da yavaş olmasıdır.

Sivasundaram ve arkadaşları, yüksek uçucu kül kullanımı ile priz süresinin arttığını söylemişlerdir [8].

Davis ve arkadaşları, uçucu kül kullanımının tüm etkenler sabit olduğu zaman priz süresini arttırdığını söylemişlerdir [12].

Lane ve Best, uçucu küllerin prizi geciktirdiğini söylemiş ve bunda uçucu kül karışım oranlarının, inceliğinin ve kimyasal bileşiminin etkili olduğunu belirtmişlerdir. Fakat, kullanılan çimentonun inceliğinin, hamurun su miktarının ve ortam sıcaklığının etkilerinin daha fazla olduğunu söylemişlerdir [12].

Okada ve arkadaşları yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanımıyla priz süresinin arttığını söylemişlerdir [25].

Canmet, yaptığı deneylerde 11 uçucu küllü betondan hemen hemen hepsinin priz sürelerinin arttığını söylemiştir [12].

Yapılan çalışmalardan, uçucu küllerin betonun priz süresini yani sertleşme hızını etkiledikleri görülmektedir. Bu etkinin genellikle priz süresini geciktirici nitelikte olduğu da söylenebilmektedir.

2.3.2.3 Hidratasyon ısı ve sıcaklık yükselmesi

Bağlayıcı maddelerde, priz alma ve sertleşme olayları sırasında ısı açığa çıkar. Bu ısı hidratasyon ısıdır. Hidratasyon ısı, bu maddelerin su ile yapmış oldukları reaksiyon sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu artış özellikle büyük kütle betonlarında ortaya çıkar. Hidratasyon ısısına karşı alınacak önlemler; uygun çimento seçimi, yavaş beton dökümü, çimento miktarını azaltma ile betondaki agrega ve suyu soğutma olarak sayılabilir [17, 25]. Ayrıca çimento miktarının azaltılıp, yerine uçucu kül eklenmesiyle de hidratasyon ısısında belirli bir azalma sağlanabilir.

Compton ve McLannis, %30 ikame oranında uçucu kül kullanılarak yaptıkları çalışmada, uçucu küllü betonlarda sıcaklığın kontrol betonuna göre daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir [12].

Barrow, Hadchiti ve Carrasquillo F ve C sınıfı uçucu küller kullanarak ürettikleri betonlarla yapmış oldukları deneylerde, F sınıfı uçucu küllerin hidrasyon ısısını düşürdüğünü ve sıcaklık artışını yavaşlattığını saptamışlardır. C sınıfı uçucu küllerin ise sadece sıcaklık artışını yavaşlattığını gözlemlemişlerdir [14].

Crow ve Dunstan yaptıkları çalışmada, düşük kireçli uçucu kül içeren betonun kontrol betonuna göre daha az ısı çıkardığını ama yüksek kireçli uçucu kül içeren betonun kontrol betonuna yakın ısı meydana getirdiğini belirtmişlerdir [12].

Langley, Carrette ve Malhotra, F sınıfı uçucu küller kullanarak yapmış oldukları deneylerde hidrasyon ısısının düştüğünü ve sıcaklık artışının yavaşladığını gözlemlemişlerdir [26].

Kanazowa ve arkadaşları, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı çimento ile üretilen betonlarda sıcaklık artışında azalma gözlemlemişlerdir [9].

Yapılan çalışmalar göstermektedir ki hidrasyon ısısını düşürmek amacıyla çimentonun azaltılması ve F sınıfı uçucu kül kullanımı büyük kütleli betonlarda hem ekonomik açıdan hem de işlev olarak büyük yararlar sağlamaktadır.

2.3.2.4 Hava sürüklenme

Mineral katkı maddelerinin kullanımı, betonda hava sürüklenmesini zorlaştırmaktadır. Belirli bir hava miktarına ulaşmak için gereken katkı miktarı daha fazla olmaktadır. Mineral katkıların içerdikleri karbon miktarları ve yüksek özgül yüzeyleri bunda etkilidir.

Haque, Day ve Langan, basit ikame metoduyla ürettikleri C sınıfı uçucu küllü betonlarda hava sürükleyici katkı kullanmışlar ve uçucu kül kullanımının hava sürükleyici katkı ihtiyacını artırdığını gözlemlemişlerdir [27].

Gebler ve Klieger, farklı C ve F sınıfı uçucu küllerle basit ikame metoduyla ürettikleri betonlarda; genellikle C sınıfı uçucu küllerin F sınıfı uçucu küllere kıyasla daha az hava sürükleyici etkiye sahip olduklarını ancak her iki uçucu külün de kontrol betonuna oranla hava sürükleyici ihtiyaçlarının arttığını gözlemlemişlerdir. Uçucu küldeki organik madde miktarı, karbon miktarı ve kızdırma kaybında bir artış

olursa bunun hava sürükleyici katkı ihtiyacını da arttıracakını fakat uçucu küldeki toplam alkali miktarındaki artışın hava sürükleyici katkı ihtiyacını azaltacağını söylemişlerdir. Uçucu külün özgül ağırlığındaki artışın betondaki hava miktarını da artırdığı ayrıca yüksek oranda kireç içeren uçucu küllerin betonda daha az hava kaybına neden olduğu kanısına varmışlardır. Bunlara ilave olarak, uçucu külün kimyasal bileşimindeki SO₃ miktarındaki artışın betondaki hava miktarını da arttıracakını söylemişlerdir [12].

2.3.3 Uçucu küllerin sertleşmiş beton özelliklerine etkileri

2.3.3.1 Mukavemet kazanımı, basınç ve eğilme mukavemetleri

Uçucu küllü üretilen betonların mukavemet kazanımları, basınç ve eğilme mukavemetleri bir çok faktöre bağlıdır. Bunlar uçucu küllerin betona ilave şekli, puzolanik aktivitesi, kimyasal ve fiziksel özellikleri, tanecik boyutu, kür ortamının sıcaklığı ve diğer kür koşulları olarak sayılabilir.

Yapılan çalışmalarda genel kanı, C sınıfı uçucu küllerin, F sınıfı uçucu küllere oranla erken yaşlardaki reaksiyon hızlarının daha yüksek olduğu yönündedir. Bunun nedeni olarak da C sınıfı uçucu küllerin daha yüksek miktarda CaO (kireç) içermeleri gösterilmiştir [4].

Mehta ve Gjorv yaptıkları çalışmada, %30 oranında F tipi uçucu kül içeren çimentolarla ürettiği betonlarda 7.ve 28. günlerdeki dayanımların düşük, 90. gündeki dayanımların ise kontrol betonuna eriştiğini gözlemlemişlerdir [28].

Galeota ve arkadaşları F tipi İtalyan uçucu külünü %18 ve %25 oranlarında betonda kullanmışlar ve 30, 60 ve 90. günlerde kontrol betonundan daha yüksek mukavemetler elde etmişlerdir [9].

Kim ve arkadaşları F tipi uçucu kül ile yüksek mukavemetli beton üretiminde uçucu külün, betonların erken yaştaki mukavemetlerini düşürdüğünü ancak ilerki yaşlardaki mukavemetleri arttırdığını gözlemlemişlerdir [9].

Dunston ve arkadaşları yüksek miktarda uçucu kül içeren betonların basınç mukavemetlerinde 28. günden sonra önemli gelişmeler gözlemlendiğini, bunun da uçucu külün betonun uzun süreli mukavemetine olan olumlu etkisi olduğunu belirtmiştir [9].

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. günlerdeki basınç dayanımlarının ise %10 uçucu kül içerern numunelerin kontrol betonuna yakın ve üzerinde değerler verdiğini söylemiştir. %30 ve %50 uçucu küllü numunelerin ise ilerki yaşlardaki dayanımlarının ise kontrol betonuna göre düşük olduğunu saptamıştır [13].

Bilodeu ve Malhotra, bağlayıcı miktarı 300 ile 430 kg/m³ arasında, su/çimento oranı 0.27 ile 0.39 arasında değişen karışımlarla yaptıkları deneylerde F tipi uçucu kül içeren betonların basınç mukavemetlerinin kontrol betonuna oranla tüm yaşlarda daha düşük olduğunu gözlemlemiştirler [9].

Mukavemet gelişimini uçucu külün tane boyutu açısından ele alırsak incelik ve bağlayıcılık aktivitesi olarak iki yönde etkilediğini görürüz. İncelik açısından, büyük taneler betonun su ihtiyacını artırdıklarından mukavemet gelişimini de olumsuz yönde etkilerler. Bağlayıcılık aktivitesi hamurdaki katı fazın yüzeyinde meydana geldiğinden, mukavemet gelişimini etkilemektedir. Bu sebeple yüzey alanı bağlayıcılık aktivitesinde önemli rol oynar.

Crow ve Dunstan uçucu küllerin inceliğini araştırmışlar, inceliği fazla olan uçucu küllerin çimentoyla daha iyi reaksiyona girdiğini ve daha iyi mukavemet kazandığını söylemişlerdir [12].

Mukavemet gelişimini puzolanik aktivite açısından değerlendirdiğimizde, puzolanik reaksiyonun hem çimento hidrasyonu ile oluşan serbest kireç oluşumunu beklemesi hem de yavaş bir reaksiyon olması sebebiyle puzolanik etkiyle mukavemet kazanma da yavaş olmaktadır. Genelde bu tür betonlarda erken yaşlardaki mukavemetler düşük, ancak puzolanik aktivitenin yüksekliğine göre ilerki yaşlardaki mukavemetler referans betonunu yakalamakta veya geçmektedir. [4].

Sıcaklık ve kür koşulları da mukavemetleri etkilemektedir. Uçucu küllü betonların sıcaklık artışıyla birlikte dayanımlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kür koşulları da mukavemet artışında önemli bir etkiye sahiptir [29].

2.3.3.2 Elastisite modülü

Uçucu kül kullanılan betonlarda, elastisite modülünün basınç dayanımına benzer özellikler gösterdiği kabul edilmektedir. Yani uçucu küllü betonlarda elastisite modülü erken yaşlarda kontrol betonuna oranla düşük, ileriki yaşlarda ise daha yüksek olduğu söylenmektedir [30].

Lane ve Best yapmış oldukları çalışmada, uçucu kül özelliklerinin az da olsa elastisite modülünü etkilediğini söylemişlerdir. Elastisite modülünün, kontrol betonuyla karşılaştırıldığında düşük dayanımlarda düşük, yüksek dayanımlarda ise yüksek değerlerde olduğunu saptamışlardır [12].

Bilodeau ve Malhotra, %58 oranında F tipi uçucu kül içeren betonlarda yüksek elastisite modülleri elde edildiğini, bunun da hidrate olmayan uçucu kül tanelerinin agrega gibi etki yapmasından kaynaklanabileceğini ileri sürmüşlerdir [9].

Galoeta ve arkadaşları, %18 ve %25 oranlarında F tipi uçucu kül içeren betonlarla yaptıkları çalışmalarda, elastisite modüllerinin aynı mukavemetteki kontrol betonu ile aynı olduğunu söylemişlerdir [9].

Joaquin ve arkadaşları, yüksek oranda F tipi uçucu kül kullandıkları betonlarda, elastisite modülünün erken yaşlarda düşük değerler verdiğini gözlemlemişlerdir [15].

Giaccio ve arkadaşları, uçucu kül ve farklı çimento türleri kullanarak ürettikleri betonlarla yaptıkları araştırmalarda, elastisite modülünün ilerki yaşlardaki artışının çok az olduğunu gözlemlemişlerdir [9].

Yapılan çalışmalar sonucunda, uçucu külün elastisite modülü üzerindeki etkisi, basınç dayanımı üzerindeki etkisi kadar belirgin değildir. Elastisite modülünü, uçucu kül kullanmanın etkisinden çok, agrega ve çimento özelliğinin belirlediği bilinmektedir [29].

2.3.3.3 Sünme ve rötre

Uçucu küller, kullanıldıkları betonun dayanımına ve dayanım kazanma hızına etki ettiğinden dolayı, betonda sünme ve rötreye de etki etmektedir. Sünme ve rötre dayanımla ters orantılıdır. Yani dayanım azaldığında artar. Erken yaşlarda yüksek, ileriki yaşlarda ise düşüktür. Betondaki sünme ve rötreye etki eden faktörleri, ortamın sıcaklığını ve nem koşulları, betonun dayanımı, elastisite modülü, agrega

miktarı, yükleme anındaki beton yaşı ve yükleme anındaki sünme gerilmesinin dayanıma oranı olarak sayabiliriz [30].

Atiş'in F tipi yüksek miktarda uçucu kül içeren betonlarda yaptığı çalışmalar, uçucu kül kullanımının rötreyi azalttığını göstermektedir [31].

Brooks ve Farrugia, %30 ve %70 ikame oranlarında ürettikleri uçucu küllü betonda sünmenin, uçucu kül miktarının artışı ile arttığını betlirmişlerdir [32].

Gifford ve Ward yaptıkları çalışmalarda uçucu küllerin sünmeyi azalttığını, bunun sebebinin ise uçucu küllerin elastisite modülünü artırması ve toplam agrega miktarını arttırırken sünme için uygun hamur hacmini azaltması olduğunu söylemişlerdir [12].

Bilodeau ve Malhotra yüksek oranda uçucu kül kullanılan betonda sünme değerlerinin çok düşük, kuruma rötrelerinin ise biraz fazla olduğunu söylemişlerdir [12].

Sonuç olarak, uçucu küllü betonlarda rötre davranışıyla sünme davranışı benzemekte ve betona olumlu yönde etki ettiği söylenebilmektedir.

2.3.4 Uçucu küllerin ortam şartlarına dayanıklılık özellikleri

2.3.4.1 Geçirimsizlik

Boşluk oranı düşük, dolu bir beton mekanik yönden avantajlı olmasının yanında aynı zamanda geçirimsizdir. Mineral katkı maddelerinin en önemli işlevleri betonda boşluk yapısını iyileştirmeleri ve geçirimsizliği azaltmalarıdır. Geçirimsizlik; çimento dozajı, su/çimento oranı, agrega granülometrisi, çimento cinsi ve uçucu kül kullanımından etkilenmektedir [25].

Dunstan ve arkadaşları, yüksek oranda uçucu kül kullanarak orta ve düşük geçirimsizlik katsayısına sahip betonlar üretilbildiğini göstermişlerdir [9].

Torri ve Kawamura uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanının betonun boşluk yapısı ve klor geçirgenliğine etkilerini inceledikleri çalışmalarında kür ve ortam şartlarında bağımsız olarak mineral katkılı betonların daha geçirimsiz olduklarını gözlemlemişlerdir [9].

Kanitakis düşük kireçli uçucu küllerle yaptığı çalışmada, erken yaşlarda uçucu küllü betonların düşük dozlu betonlar gibi davrandığını ve bu yüzden geçirimsizliğin kaçınılmaz olduğunu söylemişlerdir [12].

Akman ve Erdiñç F tipi uçucu kül kullanarak yaptıkları çalışmada, yüksek oranda uçucu kül ilavesi ile klor geçirimsizliğinin büyük oranda azaldığını saptamışlardır. Uçucu külün klor geçirimsizliğini azaltan etkisinin ileriki yaşlarda daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca uçucu kül miktarı düşük olan betonlarda (< %20) geçirimsizlikte beklenen yararın elde edilemediğini söylemişlerdir [33].

Sonuç olarak, uçucu küller oluşturdukları C-S-H jelleriyle kalsiyum hidroksitin dışarı çıkma riskini azaltarak geçirimsizliği de azaltmış olurlar.

2.3.4.2 Zararlı kimyasallara dayanıklılık

Betondaki zararlı kimyasal etki ikiye ayrılır. Bunlar; betonun bulunduğu ortamın oluşturduğu zararlı etki ve beton içindeki bileşenlerin reaksiyonu sonucu ortaya çıkan zararlı etki olarak söylenebilir.

Portland çimentosunun reaksiyon sonucu açığa çıkardığı $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bir bazdır ve asitlerden zarar görür. Asitler, serbest kireç ile reaksiyona girer ve suda çözünen tuzlar oluştururlar. Bu tuzların betondan yıkanmasıyla geçirimsizlik artmakta ve zararlı kimyasalların beton içerisine girişi hızlanmaktadır [25].

Mangat ve Khatib, basit ikame metoduyla %22 ve %32 oranlarında ürettikleri F tipi uçucu küllü betonlarda sülfata karşı direncin arttığını gözlemlemişlerdir. %55 nemli ve 20 °C sıcaklığındaki kür koşullarında saklanan betonlarda sülfata karşı dayanıklılığın arttığını gözlemlemişlerdir [34].

Tikalsky ve Carrasquillo yaptıkları çalışmalarda, yirmi farklı uçucu külü basit ikame metoduyla beton içerisinde kullanmışlar ve yüksek kireçli uçucu külün sülfata karşı dayanıklılığı azalttığını gözlemlerken düşük kireçli uçucu külün sülfata karşı dayanıklılığı arttırdığını belirlemişlerdir [35].

Fidjestol, uçucu küllerle ürettiği betonlarda organik asitlere karşı dayanıklılığı incelemiş ve uçucu küllerin betondaki asitlere karşı dayanıklılığı arttırdığını tespit etmiştir [36].

Freeman ve Carrasquillo uçucu kül ile üretilen betonların sülfata dayanıklılıklarının Tip II çimentosu ile üretilenden daha iyi olduğunu söylemişlerdir [9].

Sonuç olarak; uçucu küller serbest kireci kullanıp geçirimsizliği arttırdıkları için zararlı kimyasallara dayanıklılığı da arttırırlar.

2.3.4.3 Alkali-agrega reaksiyonu

Çimento hammaddesinde bazı alkali oksitler bulunur. Bu alkali oksitler, agregada içinde aktif silis dumanı bulunması durumunda ise silikat jeline dönüşürler. Sodyum, potasyum ve kalsiyum silikatı olan bu jel şişme ve genleşme yapar. Bu da betonun hacim sabitliğini bozar ve ağ şeklinde sık çatlaklar meydana getirerek alkali-agrega reaksiyonuna sebep olur. Bu olayın gerçekleşmesi için, çimento alkali oksit içermeli ve agregalar içerisinde aktif silis bulunmalıdır [25].

Kabayasaki ve arkadaşları, F tipi uçucu külleri %10, %20 ve %30 oranlarında kullanarak basit ikame metoduyla ürettikleri betonlarda, uçucu kül oranı arttıkça alkali-agrega reaksiyonunun kontrol altına alındığını söylemişlerdir [37].

Dunstan ve arkadaşları yüksek oranda uçucu kül içeren betonlarda 10 sene sonra bile alkali-agrega reaksiyonu izlerine rastlamadıklarını belirtmişlerdir [9].

Ohga ve Nagataki, uygun uçucu kül oranı ile deniz ortamındaki betonda alkali-agrega reaksiyonunu kontrol etmenin mümkün olduğunu gözlemlemişler ve uçucu külün etkisinin çimentodaki alkali miktarına bağlı olduğunu söylemişlerdir [9].

Geiker ve Thaulow, doymuş kalsiyum hidroksit ve sodyum klorür solüsyonları etkisine maruz harç çubuklarında 20 hafta boyunca uzamaları ölçmüşler, uçucu kül ve silis dumanının alkali-agrega reaksiyonunu önlemede oldukça etkili olduğunu gözlemlemişlerdir [9].

Sonuç olarak; uçucu küller alkali-agrega reaksiyonunda dolayı betonda oluşan genleşme ve çatlakları azaltmaktadırlar. Çimento hamurundaki alkali konsantrasyonu uçucu kül tarafından seyrekleştirilir. Böylece zararlı reaksiyon riski azaltılır.

2.3.4.4 Donma-çözülme dayanıklılığı

Donma çözülme dayanıklılığı betondaki fiziksel etkenler arasında en önemli etkenlerdendir. Beton, içerisinde önemli miktarda boşluk içeren bir maddedir. Bu boşluklarda ise ya betonun üretilmesi sırasında kullanılan su ya da betonun geçirimsizliği nedeniyle içeriye sızan su bulunmaktadır. Beton içerisindeki suyun donması sonucu oluşan genleşme, betonda çekme gerilmeleri oluşturur. Bu gelişmeler sonucunda çatlaklar oluşur veya oluşmuş çatlaklar büyür. Bunu engellemenin en iyi yolu betondaki hava boşluğunun azaltılması ve kompasitesi yüksek dolu bir beton elde edilmesidir. Bunun dışında diğer etkenler olarak,

agregaların sağlamlığı, hidrasyon derecesi, çimento hamuru dayanımı ve rutubet şartları sayılabilir [29].

Haque, Day ve Langan yaptıkları çalışmalarda uçucu küllerin hava sürükleyici ihtiyacını arttırdığını gözlemlemiştir [27].

Virtanen yaptığı çalışmalarda, uçucu külün yüksek oranda kullanımının donma çözülme direncini azalttığını gözlemlemiştir. Hava sürükleyici katkı kullanılarak yaptığı çalışmalarda ise hava miktarı sabit tutularak katkı miktarı artırılırsa, uçucu küllerin olumsuz etkilerinin ortadan kalkacağını söylemiştir [12].

Sonuç olarak, uçucu küllerin beton içerisindeki boşlukları daha iyi doldurarak donma çözülme dayanıklılığını artırdığı söylenebilir.

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 kristalleşmeye sebep olur. Böylece çimento hamurunda kimyasal hasar meydana gelir ve donatı korozyona uğrayabilir. Geçirimsiz bir beton, bunların durdurulması veya zararsız bir düzeyeye indirilmesi için çok önemlidir. Bu açıdan geçirimsizlik deniz suyundaki betonun durabilitesini etkileyen en önemli faktördür.

Dunstan ve arkadaşları yüksek oranlarda uçucu kül içeren beton ile yapılan deniz yapısının gel-git olayına maruz kalmasına rağmen performansının iyi olduğunu gözlemlemiştir [9].

Onabolu, F sınıfı uçucu külleri %30 oranında kullanarak basit ikame metoduna göre ürettiği betonları deniz ortamında saklamış ve kontrol betonuna göre basınç dayanımlarının ve geçirimsizliğin arttığını gözlemlemiştir. Böylece yazar uçucu kül kullanımının deniz ortamına dayanıklılığı arttırdığını belirtmiştir [38].

Sonuç olarak, deniz suyunun korozyonuna karşı alınması gereken önlemlerin başında uygun çimento seçimi gelir. Uçucu kül puzolanik özelliği sayesinde, hidrasyon sırasında açığa çıkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek boşluk yapısını azaltır ve durabiliteye önemli katkı sağlar.

2.3.4.6 Donatı korozyonu

Betondaki donatının korozyonuna neden olan faktörler, geçirimsizlik, direnç ve karbonatlaşma olarak sayılabilir. Korozyona karşı alınacak önlemler, betonun donatının üzerini yeterli kalınlıkta örtmesi ve geçirimsiz olması olarak sayılabilir. Betona uçucu kül gibi mineral katkıların ilave edilmesi, beton geçirimsizliğinin temel sebebi olan mikro çatlakların azalmasına ve kompasitesi yüksek daha dolu bir beton elde edilmesine yardımcı olmaktadır.

Dunstan ve arkadaşları, yüksek oranda uçucu kül ile yapılmış deniz yapılarında 10 yıl sonra yapılan incelemelerde donatının iyi durumda olduğunu gözlemlemişlerdir [9].

Branca ve arkadaşları, su/çimento oranı 0.35, 0.50 ve 0.65 olan uçucu küllü betonlarda uçucu kül ilavesi ile karbonatlaşmanın azaldığını gözlemlemişlerdir. Ancak uçucu kül çimento yerine kullanıldığında karbonatlaşmayı ve korozyon riskini arttırmaktadır [9].

Odsuki ve arkadaşları, değişik korozif ortamlarda saklanan harç numunelerinde yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu külün klor geçirgenliğini ve donatı korozyonunu azalttığını gözlemlemişlerdir [9].

Malhotra ve arkadaşları F sınıfı uçucu külleri kullanarak farklı su/çimento oranlarıyla ürettikleri betonlarda yaptıkları çalışmalarda, 8 yıllık süreç içerisinde yalnızca su/çimento oranı yüksek olan betonlarda korozyona rastlamışlardır. Klor geçirimsizliği ile ilgili olarak yapmış oldukları çalışmalarda ise uçucu kül kullanımının klor geçirimsizliğini azalttığını gözlemlemişlerdir [39].

Sonuç olarak, uçucu küllerin karbonatlaşmaya ve geçirimsizliğe olumlu etki yaptığı böylece donatı korozyonunu olumlu etkilediği söylenebilir.

2.3.4.7 Karbonatlaşma

Portland çimentosu sonucu oluşan serbest kirecin (Ca(OH)_2) dış ortamdaki karbondioksit ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonat (CaCO_3) oluşturmaya karbonatlaşma denir [17]. İyi sıkıştırılmış, uygun şekilde kürlenmiş ve düşük su/çimento oranına sahip olan betonlar karbonatlaşmanın ilerlemesine direnecek kadar geçirimsiz olmaktadır [7].

Berry ve Malhotra yapmış oldukları araştırmalarda, katkılı çimentolar ile yapılmış olan betonların normal portland imentosu ile yapılmış betonlara göre daha çabuk daha çabuk karbonatlaşmaya maruz kaldıkları sonucuna varmışlardır [12].

Sonuç olarak, iyi kalitedeki uçucu küllü bir betonun, normal bir betonla kıyaslanabilecek kadar karbonatlaşmaya karşı koyabildiği söylenebilir [7]. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bunda etkili olduğu da unutulmamalıdır.

2.4 Uçucu Küllü Betonlarda Karışım Oranlama Metodu

Betonda uçucu kül kullanımının farklı amaçları vardır. Bu amaçlar şöyle sıralanabilir [12]:

- Çimento miktarını azaltıp beton maliyetini düşürmek
- Hidratasyon ısısını düşürmek
- İşlenebilirliği artırmak
- 90 gün ve sonrasında betonda istenilen mukavemeti sağlamak
- Betonun durabilitesine katkı sağlamak
- Atık kullanıp çevreye katkı sağlamak

Uçucu küller beton içerisinde optimum miktarda kullanıldıkları zaman beton özelliklerine olumlu olarak etki etmektedirler. Ancak bu olumlu etkinin sağlanması için uçucu küllerin karışım yüzdelerinin ve etkilerinin çok iyi hesaplanması gerekmektedir. Aynı zamanda uçucu küllerin sahip oldukları kimyasal ve mineralojik özelliklerin de iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla uçucu küllerin beton içindeki kullanımları bazı standartlarla sınırlandırılmaktadır. Uçucu küller, beton içerisinde başlıca iki şekilde kullanılmaktadırlar [12, 40];

- Portland imentosu yerine uçucu küllü imento kullanımı
- Uçucu külün beton içerisinde katkı maddesi olarak kullanımı

Çimento içerisinde uçucu kül kullanımı, diğer kullanıma göre daha kontrollüdür. Böylece uçucu kül ve çimento oranları önceden belirlenmekte ve karışım oranları sınırlandırılmaktadır. İlave olarak uçucu kül kullanılması ise daha geniş incelenmesi gereken bir olaydır. Uçucu kül özelliklerinin de bilinmesi ve sürekli kontrol altında tutulması gerekmektedir [12, 40].

Uçucu küllerin, beton içerisinde farklı görevleri vardır. Taze betonda su ihtiyacını azaltırken, sertleşmiş betonda puzolanik yapılarından dolayı bağlayıcı özellik gösterirler, mukavemeti artırır ve durabiliteye önemli katkılar sağlarlar. Bu özelliklerine referans olarak yalnız portland çimentosuyla üretilmiş betonlar alınmaktadır. Buna göre iki kabul yapılmaktadır [12];

- Uçucu küller beton mukavemetini erken yaşlarda azaltırlar.
- Eşit işlenebilirliği sağlamak için, uçucu küllerle üretilen betonların su ihtiyacı, yalnız portland çimentosuyla üretilen betonlara göre daha azdır.

Uçucu küllerin beton içerisinde kullanılabilmeleri için farklı karışım metodları mevcuttur. Bunlardan başlıca üç tanesi [12, 40];

- Basit ikame metodu (Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması)
- İlave metodu (Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması)
- Kısmi ikame metodu (Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine kullanılması)
 - 1) Modifiye edilmiş ikame metodu
 - 2) Rasyonel oranlama metodu

2.4.1 Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması (Basit ikame metodu)

Basit ikame metodunda, belli bir miktar çimento karışımdan çıkarılmakta ve yerine aynı miktarda uçucu kül konulmaktadır. Çıkarılan çimentonun yerine eklenen uçucu küller, başlangıçta az bağlayıcılık özelliği gösterir ve ince agrega gibi davranırlar. Bu sebeple karışımın işlenebilirliği artmaktadır. Bu metodla üretilen betonların erken yaşlardaki dayanımları düşüktür. Ancak ileriki yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımları yüksektir. Hatta bazen yalnız portland çimentosuyla üretilmiş kontrol betonlarının dayanımlarından daha yüksek değerler bile alırlar [12].

Basit ikame metodunun kullanılmasındaki başlıca amaç, kütle beton üretiminde hidratasyon ısısını düşürmek ve işlenebilirliği arttırmaktır. Ayrıca kullanılan uçucu külün yüksek veya düşük kireçli olması da kullanım sırasında farklılıklar gösterebilmektedir [12].

2.4.2 Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması (İlave metodu)

İlave metodunda, karışımdaki çimento miktarı değiştirilmeden karışıma uçucu kül eklenir. Uçucu külün eklenmesiyle karışımdaki bağlayıcı madde miktarı artar. Böylece betonun su ihtiyacı ve kohezyonu artar. Betonun kullanım amacına bağlı olarak karışımda diğer düzenlemeler yapılmalıdır. Bu yaklaşım, sülfata dayanıklılığı sağlamak için minimum çimento faktörü ile ince agrega yerine puzolan kullanımını arttırmak amacıyla ilk kez Price tarafından kullanılmıştır. Bu methoda betonun ileriki yaşlardaki mukavemeti artmaktadır [12].

2.4.3 Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine kullanılması (Kısmi ikame metodu)

Kısmi ikame metodunda, karışımdan çıkarılan çimento yerine farklı miktarda uçucu kül konulmaktadır. Bundan sonra ise ince agrega ve su miktarında değişiklik yapılarak ayarlanmaktadır. Bu çalışmadaki başlıca amaç uçucu kül kullanımı ile oluşan en önemli dezavantaj olan erken yaşlardaki mukavemet kaybını en aza indirmektir. Ancak bu oranlama yapılırken, uçucu küllerin maliyeti azaltma ve işlenebilirliği arttırma gibi avantajlarının da düşünülmesi gerekmektedir. Bütün etkenler göz önüne alınarak ve deneme karışımları yapılarak optimum performansa ait karışım oranları belirlenmektedir [12].

Bu metod genel olarak modifiye edilmiş ikame metodu olarak bilinir. Ancak son yapılan çalışmalarla rasyonel oranlama metodu adıyla ikinci bir oranlama metodu söylenmektedir.

2.4.3.1 Modifiye edilmiş ikame metodu

Lovewell ve Washa bu metodu ilk kez 1958 yılında kullanmışlardır. Ayrıca uçucu küllü betonların erken yaşlardaki dayanımlarının kontrol betonuyla karşılaştırılabileceğini söylemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, erken yaşlardaki (3. ve 28. günler arasında) basınç dayanımlarının uçucu küllü ve uçucu külsüz betonlarda eşit olması için, uçucu küllü betondaki toplam bağlayıcı maddenin kontrol

betonundaki çimento miktarından fazla olması gerektiğini söylemişlerdir. Ancak 1960'lı yıllarda yapılan çalışmalar göstermektedir ki; uçucu küllü betonlarda işlenebilirlik ve uçucu kül özellikleri de karışım oranlama metoduna göre göz önüne alınması gereken faktörlerdir. Bunun ortaya çıkmasında Abrams'ın su/çimento ile dayanım arasındaki ilişkinin belirlenmesinde kullanılan karışım oranlama metodları büyük rol oynamıştır [12].

2.4.3.2 Rasyonel oranlama metodu

Rasyonel oranlama metodu ilk kez Smith tarafından kullanılmıştır. Modifiye ikame metodundan farkı, uçucu kül için bir k faktörü tanımlanır ve kullanılır. Smith bu metodda, uçucu kül ağırlığının (f), karışımdan çıkarılan çimento ağırlığına ($k \cdot f$) eşit olabileceğini söylemiştir [12]. Bu çalışma ile ilgili bazı bilgiler ve ulaşılan sonuçlar şöyle sıralanabilir [41];

- Uçucu kül kullanılmayan betonlarda, dayanımı etkileyen iki ana faktör çimento tipi ve su/çimento oranıdır. Farklı sertleşme oranlarına sahip betonlarda su/çimento oranı ayarlanarak aynı basınç dayanımına ulaşmak mümkündür. Abrams'ın basınç dayanımı ve su/çimento arasındaki ilişkiyi inceleyen eğrisi yardımı ile farklı betonlarda aynı basınç dayanımını elde etmek için su/çimento oranları seçilebilmektedir.
- Abrams'ın basınç dayanımı su/çimento eğrisi yardımı ile uçucu küllü ve kontrol betonları arasında da ilişki kurularak aynı basınç dayanımlarına ulaşmak mümkündür.
- Uçucu kül kullanımında üç tane belirsizlik vardır. Esasen uçucu küllerin çimento içerisinde, katkı olarak ve ince agrega olarak kullanımındaki mantık aynıdır. Çimento içerisinde %25 oranında kül kullanmakla ($25/100=0,25$), katkı olarak %20 çimento yerine uçucu kül kullanmak ($20/80=0,25$) aynı oranlamayı göstermektedir ($0,25=0,25$). Uçucu külün kullanımı ile işlenebilirliğin azaldığı gözlenirse agrega/çimento oranının da azaldığı görülür. Bunun anlamı ise uçucu külün agrega miktarını azaltarak ince agrega yerine kullanılmasıdır. Görüldüğü gibi üç yaklaşımda da düşünce tarzı hatalıdır. Uçucu küllü betonlar yeni bir beton olarak ele alınmalı ve incelenmelidir.

- Rasyonel metod kullanılmadan önce uçucu küllerin basınç dayanımına etkisi incelenmelidir. Uçucu küllü ve kontrol betonlarının basınç dayanımı su/çimento oranı grafikleri incelenerek, uçucu küllü betonların kontrol betonu ile aynı basınç dayanımını elde etmesi için gerekli su/çimento oranı bulunur.
- k uçucu külün bağlayıcılık etkisi, f uçucu külün ağırlığı olmak üzere k*f çıkarılan çimentonun ağırlığı, w su miktarı, c çimento miktarı ise uçucu küllü betonların, kontrol betonuna eşit dayanıma sahip olabilmesi için etkin su/çimento oranı aşağıdaki eşitlikten (2.3) hesaplanabilir;

$$(w/c)_e = \frac{w}{c + k*f} = \frac{w}{c} \left[\frac{1}{1 + (k*f/c)} \right] \quad (2.3)$$

- k etkinlik faktörünün belirlenmesinde (2.3) denklemini kullanan Smith, farklı basınç dayanımları için etkin su/çimento oranlarını seçerek k etkinlik katsayılarını bulmuş ve bulduğu k katsayılarının ortalamasını alarak uçucu külün k etkinliğini belirlemiştir. Elde ettiği k etkinlik değerlerinin, 7., 28. ve 90. günler arasında çok fazla değişim göstermediğini söylemiştir.
- Smith, bağlayıcı etkinlik metodu kullanarak üretilen uçucu küllü betonların kontrol betonu ile eşit dayanımda olması halinde, işlenebilirliklerin her iki betonda da eşit olduğunu ancak uçucu küllerin betonun kohezyonunu arttırdığını söylemiştir.
- Smith, önermiş olduğu bu metodda uçucu kül ile üretilen betonlarda basınç dayanımının ve işlenebilirliğin sabit kalması gerektiğini söylemiştir. Yazara göre uçucu küllü betonların basınç dayanımları, uçucu kül, çimento ve suyun birbirlerine rölatif oranına bağlıdır.
- Bağlayıcı etkinlik metodu, puzolanların ve katkı maddelerinin beton içerisinde kullanımında da kullanışlı olmaktadır.
- Diğer karışım oranlama metodları, su ve agrega oranlarından bağımsız olup sadece çıkarılan çimento ve eklenen uçucu kül miktarlarından ibarettir.

- Uçucu küller, segregasyona sebebiyet verebilen düşük mukavemetli betonlarda kohezyonu sağlamak, maliyeti düşürmek ve ileriki yaşlarda daha yüksek dayanım elde etmek için kullanılmaktadırlar.

Ghosh 1975 senesinde, Abrams'ın "iyice sıkıştırılmış betonların mukavemetleri su/çimento oranı ile ters orantılıdır" fikrinden yola çıkarak, aynı su/çimento oranındaki betonun içerisine uçucu külü de ekleyerek uçucu küllü ve kontrol betonları arasında bir ilişki kurmuştur. Kontrol betonunun su/çimento oranı (R), sabitler (M ve N) olmak üzere uçucu küllü betonun su/çimento oranı (R') şöyledir;

$$R' = M + N * R \quad (2.4)$$

Ghosh, laboratuvarında yaptığı çalışmada M ve N için sonuçlar elde etmiş ve bunları grafiğe dökmüştür. Bu sonuçlarla karışım oranlamasının yapılabileceği söylenmiştir [12].

Munday ve arkadaşları, 28. gündeki amaç mukavemetinin uçucu küllü betonlar ile elde edilmesi için yaptıkları çalışmada, karışım oranlaması için bir prosedür önermişlerdir. Buna göre karışım oranlamasının yapılabilmesi için bazı verilerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu veriler şöyledir;

- Su/çimento oranının belirlenmesi
- Serbest su miktarının seçilmesi
- Uçucu kül/çimento oranının belirlenmesi
- Çimento ve uçucu kül miktarlarının belirlenmesi
- Toplam agrega miktarının belirlenmesi
- Önceden deneme karışımları yapılması

Altı farklı uçucu küllü yaptıkları araştırmalar sonucunda, uçucu küllü betonlarla kontrol betonunun 28. gündeki mukavemetine erişmişler, ileriki yaşlarda ise uçucu küllü betonların mukavemetlerinin kontrol betonundan daha yüksek değerler verdiğini gözlemlemişlerdir. Bütün uçucu küllü numunelerde, kontrol betonunun 28. gündeki mukavemetine erişmek için eklenen uçucu kül miktarının çıkarılan çimentodan daha fazla olduğunu ve bu miktarın uçucu külün cinsi ile değiştiğini gözlemlemişlerdir. Uçucu küllerin inceliği arttıkça çıkarılan çimento miktarının da artacağını söylemişlerdir [12].

2.5 k Etkinlik Faktörü ve Bu Konuda Yapılmış Çalışmalar

İlk olarak Smith tarafından öne sürülmüş olan k etkinlik faktörü, bugüne kadar birçok araştırmada incelenmiştir. Ancak bu konu hakkında kesin olarak bir fikir birliğine varılamamıştır. Smith'in yapmış olduğu bu araştırmanın konusu, k etkinlik faktörünün bağlı olduğu etkenleri belirlemek ve hesaplanması için bir yöntem geliştirmektir.

Munday ve arkadaşları Britanya'da yaptıkları çalışmada, k etkinlik faktörünün kullanımının pratikte zayıf yönleri olduğunu söylemişlerdir. Bunun nedenlerini de şöyle özetlemişlerdir [12];

- k etkinlik faktörü sabit değildir. Kullanılan çimentoya, kür koşullarına ve amaç dayanımını elde etmek için yapılan beton karışım oranlarına göre değişmektedir.
- İstenilen işlenebilirliği sağlamak için, çimento ve uçucu külün su ihtiyaçlarının farklı olması ve farklı uçucu küllerin su ihtiyaçlarının farklı olması nedeniyle, agrega içeriğinde ayarlama yapılması gerekmektedir. Bu da yöntemi kullanışsız yapmaktadır.
- Bu metod, her türlü kullanım için karışık ve kullanışsızdır.

Cannon 1968 yılında yaptığı çalışmalarda, Abrams'ın su/çimento oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi kullanarak 28. ve 90. günlerdeki uçucu küllü betonların basınç dayanımlarını kontrol betonun basınç dayanımıyla eşitlemeye çalışmıştır. Bu şekilde ürettiği betonların etkinlik faktörlerinin maliyet açısından uçucu kül ve çimento miktarlarına etkisini incelemiş ve bu veriler ışığında karışım oranlama grafikleri ve tabloları üretmiştir. Lovewell ve Washa, Cannon'un yaptığı araştırmaları değerlendirerek, uçucu küllü betonlardaki bağlayıcı madde miktarının kontrol betonlarındaki bağlayıcı madde miktarından fazla olması gerektiğini söylemişlerdir [12].

Harrison yaptığı çalışmada, uçucu kül ve çimento miktarlarının belirlenmesi için üç faktörün önemli olduğunu söylemiştir [29];

- Minimum ($C + k \cdot F$) miktarı
 $C = \text{Çimento miktarı (kg/m}^3\text{)}$
 $F = \text{Uçucu kül miktarı (kg/m}^3\text{)}$
 $k = \text{Avrupa şartnamesi EN 206'ya göre dizayn edilmiş etkinlik faktörü}$
- Maksimum $w / (C + k \cdot F)$ oranı
- İstenilen beton dayanımına ulaşmak için gerekli olan su/bağlayıcı oranı (R)

Tip I çimentosu ile yapılan çalışmada kullanılan uçucu kül için k değerinin 0,3 ile 0,5 aralığında bir değer olduğu belirtilmiştir. Uçucu kül için k değeri çimento içerisinde kullanıldığında 1 olmaktadır. Buna göre uçucu külün dayanıma gerçek katkısının eşitlikte yer alması gerekir. Su / etkin bağlayıcı oranı aşağıdaki denklemdeki gibidir [29];

$$R = w / (C + k \cdot F) \quad (2.5)$$

Tip I 42,5 çimento ve %30 uçucu kül kullanılarak üretilen betonlarda, k değerinin 0,2 ile 0,45 aralığında bir değer olduğu bulunmuştur. Uçucu kül kullanımı arttıkça k değeri düşmekte, uçucu kül kullanımı azaldıkça k değeri yükselmektedir [29].

Akman ve Yücel etkinlik faktörünü, uçucu külün bağlayıcılığının çimentonun bağlayıcılığına oranı olarak tanımlamışlar, belirlenmesinde ise Bolomey formülünü kullanmışlardır [42].

$$f_c = K_B \{ [C / (W + h)] - a \} \quad (2.6)$$

Burada; f_c betonun basınç dayanımı (N/mm^2), K_B Bolomey katsayısı (N/mm^2), C betondaki çimento dozajını (kg/m^3), W betondaki su miktarını (kg/m^3), h betondaki hava miktarını (dm^3/m^3) ve a ise yaşa ve kür koşullarına bağlı bir katsayıdır.

Yazarlar Bolomey formülünün kullanımı için ilk olarak yalnız portland çimentosuyla kontrol betonu üretmişlerdir. Elde edilen basınç dayanımı ile k ve K_B katsayıları bulunmuştur. Uçucu küllü beton üretiminde ise bu katsayıları kullanmışlardır. C çimento miktarı yerine bağlayıcı madde miktarını ifade etmek için $C' (k \cdot f)$ değeri kullanılır. Böylece uçucu kül üretiminde Bolomey formülü şöyle olmaktadır [42, 43];

$$f_c = K_B \{ [(C + k \cdot F) / (W + h)] - a \} \quad (2.7)$$

Burada; F (kg/m^3) betondaki uçucu kül miktarıdır.

Uçucu küllü beton üretildikten sonra bilinmeyen tek değer olarak k faktörü kalır. Değerler yerine konularak k faktörü hesaplanır. Bu araştırmanın eleştiriye açık tarafı uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen betonlarda aynı K_B Bolomey katsayısının kullanılmasıdır. Yazarlar, C sınıfı uçucu külleri kullanarak yaptıkları çalışmada, k etkinlik katsayısının siliko ve sülfö-kalsik uçucu küllerde 0,14 ile 0,57 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir [42].

Güler, Bolomey formülünü kullanarak F sınıfı Orhaneli uçucu küllüyle yaptığı çalışmada, k etkinlik faktörünün 0,17 ile 0,36 arasında değiştiğini gözlemlemiş, ancak k etkinlik faktörünün değişken olduğunu belirtmiştir [43].

Özcan, yapmış olduğu çalışmada %10, %20 ve %30 oranlarında çimentoyu çıkarıp yerine farklı miktarlarda C ve F sınıfı uçucu küller ekleyerek betonlar üretmiştir. Ürettiği betonlarda Bolomey formülünü kullanarak bulduğu k etkinlik faktörü F ve C sınıfı uçucu küller için sırasıyla 0,62 ve 0,79'dur. Ancak eklenen uçucu kül miktarının çıkarılan çimento miktarından daha az olduğu söylenmiştir. Bu çalışmada gözlemlenen başka bir özellik, C sınıfı uçucu küllerin bağlayıcılıklarının daha fazla olması ve erken yaşlardaki dayanımlarının daha iyi olması nedeniyle k etkinlik faktörlerinin de yüksek olmasıdır [29].

Babu ve Rao, k etkinlik faktörünün belirlenmesinde Smith'in de belirtmiş olduğu su/çimento oranının basınç dayanımı ile karşılaştırılmasından yararlanmışlardır. Bunun için yalnız çimento kullanılarak üretilmiş beton ile uçucu küllü beton arasındaki su/çimento farkını kullanmışlardır [44].

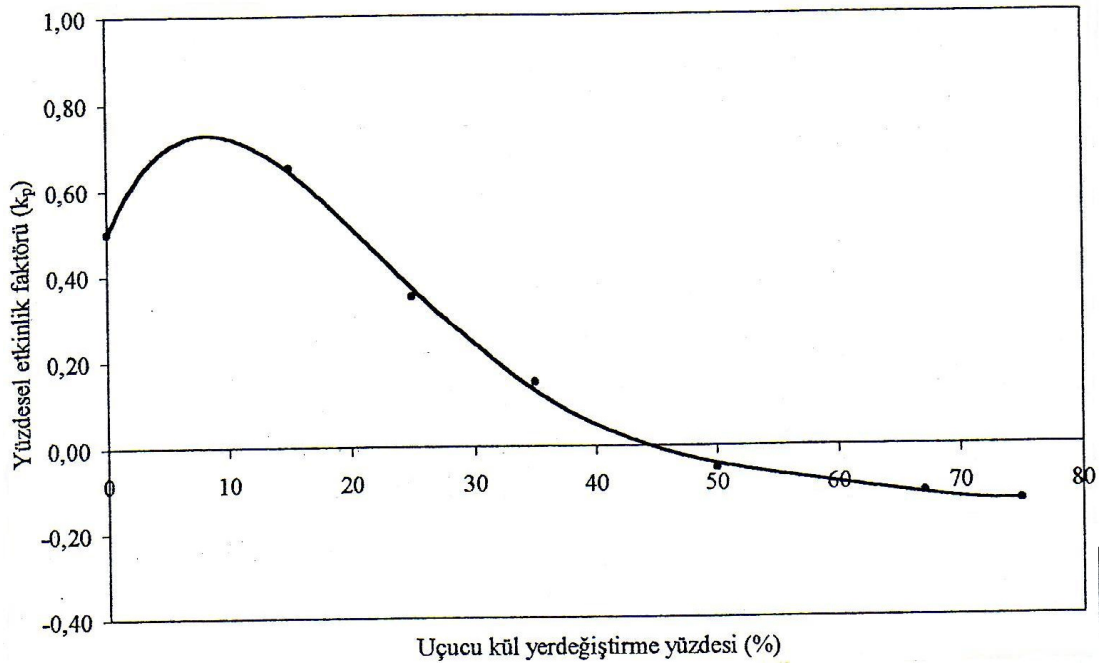
$$\Delta w = (w/c) - [w/(c' + k*f)] = [w/(c' + k*f)] - [w/(c' + f)] \quad (2.8)$$

Δw değerinin belirlenebilmesi için uçucu küllü ve uçucu külsüz betonların su/çimento ve basınç dayanımı değerlerinin arasındaki ilişkiyi gösteren grafiğin çizilmesi gerekmektedir. Uçucu küller için başlangıçta ortalama bir k faktörü bulunmaktadır. k faktörünün (2.8) denkleminde yerini konulması ile Δw_1 değeri elde edilmekte ve uçucu küllü betonun $\sigma - w/(c + k*f)$ (basınç dayanımı – su/bağlayıcı madde) grafiği Δw_1 farkı kadar yerdeğiştirmektedir. Yeni grafikte, farklı yüzdelere uçucu küle sahip betonların her bir uçucu kül yüzdesi için kontrol betonu ile arasındaki su/bağlayıcı madde oranı farkı, Δw_2 değerini oluşturmaktadır [44].

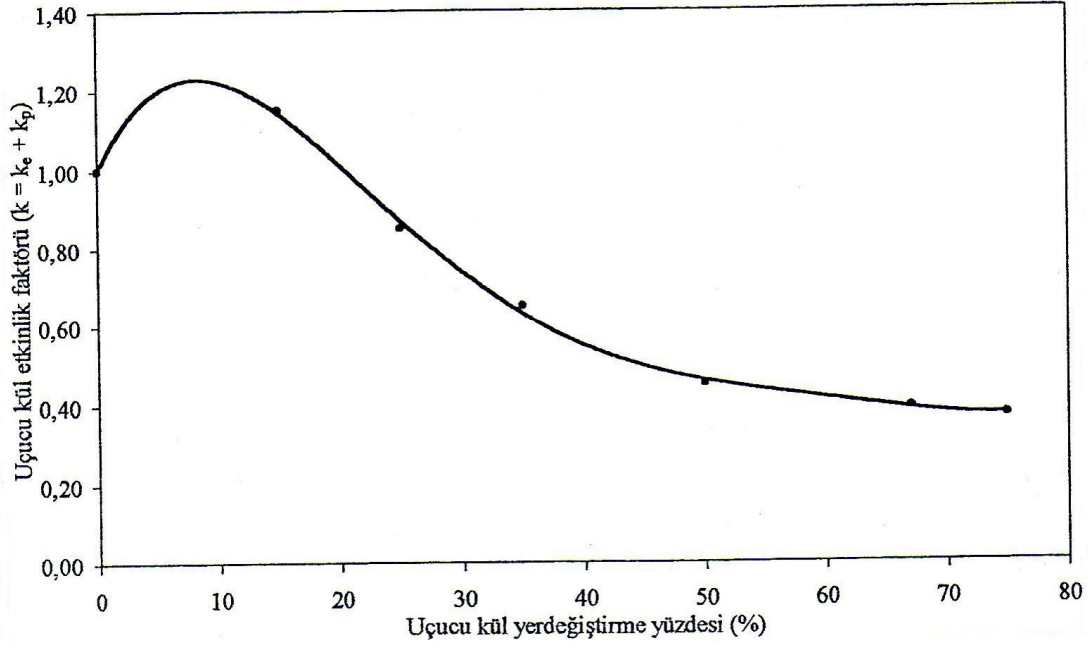
Yazarlar, farklı yüzdelere ve farklı uçucu küller kullanarak ürettikleri betonlarda k faktörünün 0,2 ile 0,8 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Bu değerlerden yola

çkararak ortalama bir değer almışlar ($=0,5$) ve bunun adına da genel etkinlik faktörü (k_e) demişlerdir. k_e değerinin (2.8) formülünde yerine konulması ile σ -E/w grafiği üzerinde ΔE_1 düzeltmesi yapılmaktadır. Yeni grafik üzerindeki her uçucu kül yüzdesi için ayrı ayrı ΔE_2 düzeltmesi yapılmaktadır. Bu düzeltme için (2.8) formülünde k_e faktörüne bir k_p faktörü eklenmektedir. Yazarlar bu k_p faktörünü, yüzdesel etkinlik faktörü olarak tanımlamışlardır. k_e ve k_p faktörlerinin toplamı, herbir uçucu kül yüzdesi için bir k etkinlik faktörü oluşturmaktadır ($k = k_e + k_p$) [44].

Yazarlar, C ve F sınıfı uçucu külleri %75, %67, %50, %35, %25 ve %15 oranlarında beton içerisinde kullanmışlar ve bu sonuçlar ışığında her bir uçucu kül yüzdesi için k_p değerleri bulmuşlardır. Çalışmaları sonucunda k_p değerinin, uçucu külün yerleştirmeye oranına göre değiştiğini gözlemlemişler ve bunu Şekil 1.4'te görülmengrafikle ifade etmişlerdir. Elde edilen k_p faktörünün diagramına k_e faktörü eklenerek Şekil 1.5'te görülen uçucu külün k etkinlik faktörü belirlenmektedir [44].



Şekil 1.4 : Uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi – k_p diagramı [44].



Şekil 1.5 : Uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi – etkinlik faktörü ($k=k_e+k_p$) diagramı [44].

Şekil 1.5'te görüldüğü gibi k etkinlik faktörü, uçucu külün yerleştirme oranına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Yapılmış olan diğer çalışmalarda olduğu gibi uçucu küller için tek bir k etkinlik faktörü değeri belirlemek uygun olmamaktadır. Babu ve Rau'nun çalışmalarından elde ettikleri sonuçlar şöyledir [44];

- k etkinlik faktörü için farklı yüzdelerde yerleştirme oranına göre tek bir değer alınmamaktadır. k_e faktörü içinse yapılan ön araştırmalar ve daha önceki araştırmacıların elde ettiği sonuçlar göz önüne alınarak 0,5 değeri alınmaktadır.
- Farklı yerleştirme oranları için farklı k_p değerleri bulunmalı ve bu değerler bütün yerleştirme oranları için aynı kabul edilen k_e değerine eklenerek uçucu külün k etkinlik faktörü belirlenmelidir.
- Maksimum k etkinlik değeri %10 ve %20 oranları arasında uçucu kül konulması ile elde edilmektedir. Bu oranlarda uçucu kül eklendiğinde 28 günlük basınç dayanımları fazla değişmemektedir.
- Önceki araştırmacıların belirttiği gibi uçucu kül eklenme oranı %40'a kadar, k etkinlik faktörü kullanılarak mukavemetin tahmin edilmesi tutucu değerlerle sonuçlanmaktadır.

- Farklı su/bağlayıcı madde oranlarında ve farklı uçucu kül yerleştirme yüzdelerinde, genel ve yüzdesel etkinlik faktörü kullanılarak betonun basınç dayanımındaki değişimi belirlemek mümkün olmaktadır.

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda farklı etkinlik faktörü değerleri vardır. Smith, 20 farklı uçucu kül ile yaptığı deneylerde 28 günlük basınç dayanımları için 0,231 değerini elde etmiş ve 0,25 değerini optimum etkinlik faktörü için teklif etmiştir. Alman standardı DIN 1045, etkinlik faktörünü 0,30 olarak önermiştir. Avrupa standardı prEN 206 kütlece uçucu kül/çimento oranının 0,33'ten küçük olması gerektiğini belirterek k'nın PÇ 32,5 çimentosu için 0.2, PÇ 42,5 çimentosu için 0.4 alınmasını önermiştir [40].

Araştırmacıların çalışmalarından anlaşılacağı üzere k etkinlik faktörünün belirlenmesinde ortak bir fikir birliğine varılamamıştır. Bunun başlıca nedeni ise k değerinin bağlı olduğu etkenlerdir. Uçucu külün cinsi ve kullanım miktarı, çimentonun cinsi ve kullanım miktarı, amaçlanan basınç dayanımı, kür şartları, agrega, betonun işlenebilirliği, su miktarı ve eklenen kimyasal katkıları k etkinlik faktörünün belirlenmesinde etken olmaktadır. Yapılmış olan bu tez çalışmasında Bolomey'in önermiş olduğu formül kullanılmıştır.

Genellikle betonda işlenebilirliği iyileştirmek ve hidrasyon ısısını düşürmek amacıyla kullanılan uçucu küllerin, betonun erken yaşlardaki mukavemetini düşürdüğü bilinmektedir. Uçucu küllerin beton mukavemetine etkisinin belirlenmesinde yardımcı olan k etkinlik faktörü, aynı sınıf uçucu küller için bile farklı değerler alabilmektedir. En uygun çözüm yolu, herbir uçucu kül sınıfı için ve herbir karışım oranı için ayrı bir k değeri elde etmek gibi görünmektedir. k etkinlik faktörünün daha detaylı incelenmesi uçucu küllü betonlarla istenilen amaç dayanımına ulaşılabilmesi için kolaylık sağlayacaktır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde üretimde kullanılan malzemeler, bu malzemelerin özellikleri ve yapılan taze ve sertleşmiş beton deneyleri anlatılmıştır.

3.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada Zonguldak-Çatalağzı Termik Santrali'nden temin edilen F tipi uçucu kül ve CEM I PÇ 42.5 cinsi çimento kullanılmıştır. Uçucu kül, beton karışımına belirli oranlarda çıkarılan çimentonun yerine gene belirli oranlarda eklenmiştir. Karışımlar eşit işlenebilirliğe sahip olacak şekilde dizayn edilmiştir. Elde edilen numuneler üzerinde, uçucu külün betonun mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca yapılan deneyler sonucunda, betonun basınç dayanımına uçucu külün etkisi hesaplanarak etkinlik faktörünün irdelenmesi amaçlanmıştır.

3.2 Üretilen Betonların Özellikleri

İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılan çalışmalarda toplam 21 seri beton üretilmiştir. Bu 21 seri kendi içinde 3 ana seriye ayrılmış, her seride bir adet külsüz şahit numune üretilmiştir. Şahit numuneler için çimento dozajları $260 \text{ Kg} / \text{m}^3$, $320 \text{ Kg} / \text{m}^3$ ve $400 \text{ Kg} / \text{m}^3$ ' tür. Küllü betonlarla dizayn edilen serilerde ise betonların 3 tanesinde %10, diğer 3 tanesinde ise %17 oranlarında çıkarılan çimento yerine 3 değişik oranda uçucu kül katılmış ve üretilen betonların isimlendirilmeleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Üretilen tüm betonlarda CEM I PÇ 42.5 cinsi çimento ve F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Tüm seriler, eşit işlenebilirlikte (TS EN 206-1'e göre S3 kıvamında ve 14-17 cm çökme miktarında) olacak şekilde dizayn edilmiştir. Uçucu küllü karışımlarda, çıkarılan çimentonun yerine aynı oranda uçucu kül konmadığından, toplam bağlayıcı miktarı sabit değildir. Karışımlarda düşük dozlu ($260 \text{ Kg} / \text{m}^3$ ve $320 \text{ Kg} / \text{m}^3$) serilerde çimento ve uçucu kül ağırlıkları toplamının %1' i kadar orta

akışkanlaştırıcı, yüksek dozlu (400 Kg / m³) seride ise çimento ve uçucu kül ağırlıkları toplamının %1,5' i kadar süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Çalışmada ayrıca agrega granülometrisi ve agreganın türü tüm serilerde aynı kalmıştır. Üretilen her seride 40 litre beton üretmek için gerekli malzeme miktarları hesaplanmış ve bu verilerle üretim yapılmıştır.

Çizelge 3.1 : Üretilen betonların isimlendirilmesi.

BETON KODU	ÇİMENTO (kg/m ³)	ÇIKAN (%)	UÇUCU KÜL (kg/m ³)	EKLENEN (%)
C260F0 (%0K0)	260	0	0	0
C234F39 (%10K1,5)	234	10	39	15
C234F52 (%10K2)	234	10	52	20
C234F65 (%10K2,5)	234	10	65	25
C216F44 (%17K1)	216	17	44	17
C216F66 (%17K1,5)	216	17	66	25,5
C216F88 (%17K2)	216	17	88	34
C320F0 (%0K0)	320	0	0	0
C288F32 (%10K1)	288	10	32	10
C288F48 (%10K1,5)	288	10	48	15
C288F64 (%10K2)	288	10	64	20
C266F54 (%17K1)	266	17	54	17
C266F81 (%17K1,5)	266	17	81	25,5
C266F108 (%17K2)	266	17	108	34
C400F0 (%0K0)	400	0	0	0
C360F40 (%10K1)	360	10	40	10
C360F60 (%10K1,5)	360	10	60	15
C360F80 (%10K2)	360	10	80	20
C332F68 (%17K1)	332	17	68	17
C332F102(%17K1,5)	332	17	102	25,5
C332F136 (%17K2)	332	17	136	34

(C234F39 (%10K1,5) ; 260 dozlu karışımdan % 10 oranında çimento çıkarılmış, yerine % 15 oranında uçucu kül eklenmiş demektir.)

3.3 Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

3.3.1 Çimento

Deneylerin tamamında, Akçansa Çimento fabrikasında üretilmiş olan PÇ 42.5 tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini gösteren deneyler de gene Akçansa Çimento fabrikasında yaptırılmış olup, sonuçlar Çizelge 3.2, Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'te verilmiştir. Kimyasal analiz TS EN 196-2, fiziksel denemeler TS EN 196-3 ve TS EN 196-6, dayanım denemeleri ise TS EN 196-1 standartlarına uygun yapılmıştır. Çimento TS EN 197-1 standardına uygundur.

Çizelge 3.2 : CEM I PÇ 42,5 çimentonun fiziksel özellikleri.

		Sonuç	Standart
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)		3,12	
Priz Süresi (Vicat)	Başlama (dakika)	132	> 60
	Bitiş (dakika)	185	
Hacim Genleşmesi (Le Chatelier) (mm)		1	< 10
İncelik	Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /gr)	3.760	
	45 µm elek kalıntısı (%)	5,3	
	90 µm elek kalıntısı (%)	0,2	

Çizelge 3.3 : CEM I PÇ 42,5 çimentonun kimyasal özellikleri.

	Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasal Bileşimin Yüzdesi	Standart
	Çözünen SiO ₂	20,63	
	Çözünmez Kalıntı	0,49	< 5
	Al ₂ O ₃	4,71	
	Fe ₂ O ₃	3,41	
	CaO	63,64	
	MgO	1,24	
	SO ₃	2,98	< 4
	Kızdırma Kaybı	1,25	< 5
	Cl	0,0357	< 0,1
	Na ₂ O	0,23	
	K ₂ O	0,91	
	Tayin Edilemeyen	0,96	
	Serbest CaO	1,10	
Mineralojik Birleşim	C ₃ S	52,73	
	C ₂ S	19,45	
	C ₃ A	6,72	
	C ₄ AF	10,38	
	LSF	0,94	

Çizelge 3.4 : CEM I PÇ 42,5 çimentonun mekanik özellikleri.

Gün	Basınç Dayanımı (MPa)	Standart (MPa)
2	29,1	> 20,0
7	44,0	-
28	56,7	> 42,5 < 62,5

3.3.2 Agregalar

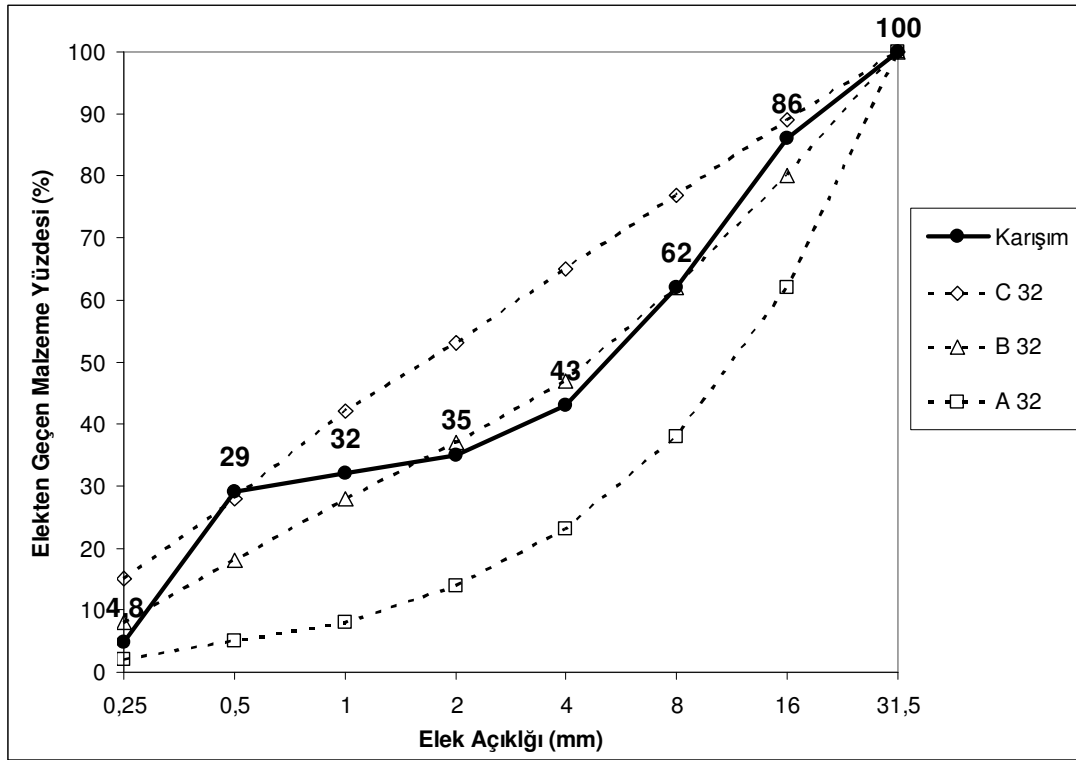
Çalışmada agrega olarak doğal kum, kırma kum, kırmataş I ve kırmataş II kullanılmıştır. Doğal kum Kemerburgaz-Akpınar Köyü'nden, diğer agregalar kırma kum, kırmataş 1 ve kırmataş 2 İstanbul-Cebeci Yöresi'nden temin edilmiştir. Agregaların birim ağırlıkları TS 3529'a göre, özgül ağırlıkları TS EN 1097-6'ya göre ölçülmüş ve Çizelge 3.5'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan agregaların, TS 3530 EN 933-1'e göre yapılmış elek analizinin sonuçları Çizelge 3.6'da görülmektedir. Agrega karışım granülometrisi B32 eğrisine yakın seçilmiştir ve Şekil 3.1'de görülmektedir.

Çizelge 3.5 : Agregaların birim ağırlık ve özgül ağırlık değerleri.

Malzeme	Birim ağırlık (kg/dm ³)	Özgül ağırlık (kg/dm ³)
Doğal kum	1,45	2,66
Kırma kum	1,56	2,69
Kırmataş 1	1,45	2,69
Kırmataş 2	1,39	2,71

Çizelge 3.6 : Agregaların elek analizi sonuçları.

Malzeme	Elek Açıklığı (mm)								İncelik Modülü
	Elekten Geçen Malzeme Yüzdesi (%)								
	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25	
Doğal Kum %25	100	100	100	100	99	99	98	11,6	0,92
Kırma Kum %19	100	100	100	79	47	31	21	10,2	3,12
Kırmataş 1 %29	100	100	61	11	4	3,4	0,5	0	5,20
Kırmataş 2 %27	100	49	0,3	0	0	0	0	0	6,51



Şekil 3.1 : TS 706 referans ve karışım granülometri eğrileri.

3.3.3 Uçucu külün özellikleri

Çalışmada kullanılan uçucu kül, Zonguldak-Çatalağzı termik santralının atık maddesi olan uçucu küldür. Uçucu kül, griye yakın bir renktedir ve ASTM C 618'e göre F sınıfı puzolan olarak kabul edilmektedir. Uçucu külün özgül ağırlığı, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda TS 639'a göre yapılan deneyde $1,84 \text{ kg/dm}^3$ olarak bulunmuştur. Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özelliklerini gösteren deneyler Akçansa Çimento fabrikasında yapılmıştır. Bu deneylere ait veriler, Çizelge 3.7, Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9'da görülmektedir.

Çizelge 3.7 : Çatalağzı uçucu külünün kimyasal bileşimi.

Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasal Bileşimin Yüzdesi
CaCO ₃ + MgCO ₃	2,55
H ₂ O	0,20
SiO ₂	58,58
Al ₂ O ₃	23,40
Fe ₂ O ₃	6,97
CaO	1,55
MgO	2,76
SO ₃	0,45
Na ₂ O	0,46
K ₂ O	4,11
Klorür (Cl)	0,0319
Kızdırma Kaybı	0,20
Serbest CaO	0,10

Çizelge 3.8 : Çatalağzı uçucu külünün fiziksel özellikleri.

Özgül Ağırlık (kg/dm ³)		1,84
Hacim Sabitliği (Le Chatelier) Toplam (mm)		1
İncelik	Özgül Yüzey (Blaine) cm ² /gr	2.713
	90 um elek üstünde kalan yüzde (%)	15,1
	45 um elek üstünde kalan yüzde (%)	41,4

Çizelge 3.9 : Çatalağzı uçucu külünün puzolanik aktivitesi.

Gün	Aktivite Endeksi (%)	TS EN 450
7	77	-
28	81	> 75

3.3.4 Orta akışkanlaştırıcı katkı maddesi

Çalışmada yoğunluğu 1,16 kg/dm³ olan, kahverengi sıvı görünümlü olan, pH değeri 5,0-8,0 arasında ve klorür miktarı %0 olan orta akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Orta akışkanlaştırıcı, düşük dozlu (260 ve 320) ve eşit işlenebilmeli şahit ve uçucu küllü betonlarda; şahit betonda çimento, uçucu küllü betonlarda

çimento+uçucu kül miktarının %1'i oranında kullanılmıştır. Çizelge 3.10'da orta akışkanlaştırıcı katkı maddesiyle ilgili standart verilmiştir.

Çizelge 3.10 : Orta akışkanlaştırıcı katkı maddesinin standardı.

	Standart	BV/MR Katkılı Beton
	TS EN 934-2	
Su azaltma (katkılı betonda şahit betona kıyasla en az)	%5	%16
Katkılı betonun basınç mukavemetinin kontrol karışımındakine oranı, % olarak min		
3 Günlük	110	154
7 Günlük	110	121
28 Günlük	110	126

3.3.5 Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi

Çalışmada ayrıca, yoğunluğu 1,20 kg/dm³ olan, kahverengi sıvı görünümlü, pH değeri 6,0-8,0 arasında ve klorür miktarı %0 olan süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı, yüksek dozlu (400) ve eşit işlenebilmeli şahit ve uçucu küllü betonlarda; şahit betonda çimento, uçucu küllü betonlarda çimento+uçucu kül miktarının %1,5'i oranında kullanılmıştır. Çizelge 3.11'de süper akışkanlaştırıcı katkı maddesiyle ilgili standartlar verilmiştir.

Çizelge 3.11 : Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin standardı.

	Standart		BV/MR Katkılı Beton
	TS EN 934-2	ASTM C-494	
Su azaltma	%12	%12	%19
Katkılı betonun basınç mukavemetinin kontrol karışımındakine oranı, % olarak min			
1 Günlük	140	140	162
3 Günlük	-	125	149
7 Günlük	-	115	143
28 Günlük	115	110	133

3.4 Beton Karışımları

260 kg/m³, 320 kg/m³ ve 400 kg/m³ olmak üzere 3 farklı çimento dozajı seçilmiştir. Bütün serilerde en büyük agrega boyutu, granülometrisi ve işlenebilirlik sabit tutulmuştur. Her dozaj için biri kontrol betonu olmak üzere yedi farklı su/çimento oranında beton üretimi yapılmıştır. Kontrol betonu dışındaki altı serinin üçünden %10, diğer üçünden %17 oranında çimento çıkarılmıştır. Çıkan çimentonun yerine; %10 için %10, %15 ve %20 oranında uçucu kül (sadece 260 kg/m³ dozajında %15, %20 ve %25 oranında uçucu kül eklenmiştir) %17 için ise %17, %25,5 ve %34 oranında uçucu kül eklenmiştir. Her serisi 40 dm³ üretilen 21 seri beton için 1 m³ 'e giren gerçek malzeme miktarları Çizelge 3.12'de verilmiştir.

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

Beton üretimleri, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda 45 dm³ kapasiteli düşey eksenli karıştırıcıyla yapılmıştır. Eşit işlenebilirliği sağlamak adına (TS EN 206-1 Çökme Sınıfı S3, 14-17 cm çökme), her seri için deneme betonları üretilmiş ve karışıma girecek su miktarları önceden bulunmuştur. Her seride toplam 40 dm³ beton üretilmiştir. Malzemeler (agregalar, çimento ve uçucu kül) ilk önce kuru olarak 2 dakika karıştırılmıştır. Ayrıca yüzeyden su kaybını engellemek için, malzemeler karıştırıcıya konmadan önce karıştırıcının iç

yüzeyi nemlendirilmiştir. Ardından koyulacak suyun $\frac{3}{4}$ ' ü eklenerek 2 dakika karıştırılmıştır. Son olarak suyun geri kalan $\frac{1}{4}$ 'lük kısmı süper veya orta akışkanlaştırıcı ile karıştırılarak beton karışımına ilave edilmiş ve karışım yeterli kıvama gelene kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Daha sonra numuneler önceden yağlanmış olan kalıplara yerleştirilmiştir. Numuneler kalıplara kısım kısım yerleştirilmiştir. Her bir kısım kalıba yerleştirildikten sonra 5'er saniye, toplamda 10 saniye sarsma tablasında vibrasyon uygulanarak betonun iyi bir şekilde yerleşmesi sağlanmıştır.

Toplam 6 adet 15x15x15 cm boyutlarındaki küp ve 6 adet taban çapı 10 cm yüksekliği 20 cm boyutlarındaki silindir numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmış ve 23 ± 2 °C su dolu kür havuzu içerisinde saklanmışlardır. 28. ve 90. günler sonunda numuneler su ortamından alınarak sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır.

Çizelge 3.12 : Üretilen betonların gerçek bileşimleri (1m³ beton için)

BETON KODU	Doğal Kum (kg)	Kırma Kum (kg)	Kırma taş 1 (kg)	Kırma taş 2 (kg)	Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	Katkı (kg)	Su (kg)	Çökme (cm)	Hava Boşluğu (%)	Birim Ağırlık (kg/dm ³)	Su/Çim+UK Oranı	Kompasite (m ³ /m ³)
C260F0	464	357	544	511	265	0	2,65	195	15,5	2,0	2,34	0,74	0,783
C234F39	454	349	533	499	241	40	2,81	195	16,0	2,1	2,31	0,69	0,782
C234F52	450	346	527	495	241	54	2,95	196	15,5	1,9	2,31	0,67	0,783
C234F65	442	340	518	486	242	67	3,09	197	14,0	2,2	2,30	0,64	0,778
C216F44	453	348	531	498	224	46	2,69	196	15,5	2,4	2,30	0,73	0,778
C216F66	450	346	528	495	221	68	2,89	196	14,0	1,7	2,31	0,68	0,785
C216F88	439	338	515	483	221	90	3,11	197	14,0	2,0	2,29	0,63	0,780
C320F0	448	344	525	492	331	0	3,31	198	16,5	2,0	2,34	0,60	0,779
C288F32	456	350	535	501	289	32	3,21	186	15,5	1,6	2,35	0,58	0,795
C288F48	445	342	521	489	293	49	3,42	192	15,0	1,6	2,34	0,56	0,789
C288F64	431	331	505	474	296	66	3,62	201	14,5	1,8	2,31	0,56	0,778
C266F54	442	340	518	486	273	55	3,29	196	14,5	1,9	2,31	0,60	0,782
C266F81	427	328	501	469	274	84	3,58	201	16,0	2,1	2,29	0,56	0,775
C266F108	416	320	488	458	274	111	3,85	203	16,0	2,0	2,27	0,53	0,774
C400F0	441	339	518	486	409	0	6,13	170	15,0	3,0	2,37	0,42	0,795
C360F40	447	344	525	492	361	40	6,02	160	17,0	2,5	2,38	0,40	0,810
C360F60	437	336	513	481	360	60	6,31	162	17,0	2,7	2,36	0,39	0,806
C360F80	427	328	501	470	362	81	6,64	170	17,0	2,2	2,35	0,38	0,802
C332F68	440	338	516	484	336	69	6,07	165	16,0	2,4	2,35	0,41	0,806
C332F102	428	329	502	471	335	103	6,58	164	17,0	2,4	2,34	0,37	0,807
C332F136	398	306	467	438	341	140	7,21	180	15,5	3,0	2,28	0,37	0,784

3.6 Taze Beton Deneyleri

Her seride istenilen işlenebilirliği sağlamak amacıyla su ihtiyacının tespit etmek için 10 dm³ 'lük deneme betonları üretilmiştir. Deneme betonlarında istenilen çökme değerine ulaşıncaya kadar deneyler devam etmiştir. Karışım için gerekli olan su miktarları bulunduktan sonra 40 dm³ 'lük asıl betonlar dökülmüştür. Her seride işlenebilirliğin belirlenebilmesi için çökme konisiyle ölçüm yapılmış, hava boşluğunun bulunması için hava ölçüm aletiyle ölçüm yapılmış ve 5,5 dm³ 'lük kapla taze betonun ağırlığı ölçülerek taze beton birim ağırlığı hesaplanmıştır. Üretilmiş olan karışımların birim ağırlıklarının belirlenmesi sonucu karışımdaki gerçek malzeme miktarları, hava ve kompasite değerleri bulunmuştur.

3.7 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri 15x15x15 cm boyutlarındaki küp numunelerde ve taban çapı 10 cm yüksekliği 20 cm boyutlarındaki silindir numunelerde yapılmıştır. Numunelerin hepsi 23±2 °C su içerisinde mekanik deney zamanları gelen kadar saklanmıştır.

Küp numunelere 28. ve 90. günlerde birim ağırlık ölçümü, +13 kN/sn sabit yükleme hızı altında basınç deneyleri ve ultrases hızı ölçüm deneyleri yapılmıştır. Silindir numunelere ise 28. günde +5 kN/sn sabit yükleme hızı altında basınç deneyi, elastisite modülü ölçüm deneyi ve ultrases hızı ölçüm deneyi yapılmıştır.

4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Taze Beton Deney Sonuçları

Taze beton deneylerinde, çökme deneyi ve birim ağırlık deneyi yapılmıştır. Ayrıca hava boşluğu değeri ölçülmüştür. Çökme deneyi, TS EN 12350-2'ye göre alt çapı 20 cm, üst çapı 10 cm ve yüksekliği 30 cm olan uçları kesik çökme konisiyle yapılmıştır. Koni 3 kademe doldurulmuş, her tabaka bir alt tabakaya geçmeyecek şekilde demir çucukla 25 kez şişlenmiştir. Koni tamamen doldurulduktan sonra üstü mala ile düzeltilmiş ve yukarı çekilerek doldurulan beton sarsılmadan koniden ayrılmıştır. Koninin üst kenarı ile yayılan betonun üst kenarı arasındaki fark alınarak çökme miktarı cm cinsinden bulunmuştur. Birim ağırlık deneyi TS EN 12350-6'ya göre, iç hacmi 5,5 dm³ olan birim ağırlık kabı ile yapılmıştır. Taze beton karışımının iyice yerleşmesi için şişleme ve vibrasyon uygulanmış, daha sonra da tartılmıştır. Üretilen serilere ait taze beton deney sonuçları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Taze beton deney sonuçları.

BETON KODU	Çökme (cm)	Hava Boşluğu (%)	Birim Ağırlık (kg/dm ³)
C260F0	15,5	2,0	2,338
C234F39	16,0	2,1	2,314
C234F52	15,5	1,9	2,311
C234F65	14,0	2,2	2,295
C216F44	15,5	2,4	2,299
C216F66	14,0	1,7	2,307
C216F88	14,0	2,0	2,287
C320F0	16,5	2,0	2,342
C288F32	15,5	1,6	2,352
C288F48	15,0	1,6	2,335
C288F64	14,5	1,8	2,306
C266F54	14,5	1,9	2,314
C266F81	16,0	2,1	2,287
C266F108	16,0	2,0	2,273
C400F0	15,0	3,0	2,369
C360F40	17,0	2,5	2,375
C360F60	17,0	2,7	2,356
C360F80	17,0	2,2	2,347
C332F68	16,0	2,4	2,352
C332F102	17,0	2,4	2,337
C332F136	15,5	3,0	2,277

4.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

4.2.1. Basınç dayanımı

23±2⁰ C su içerisinde kür havuzunda saklanan numunelerden 15x15x15 cm boyutlarındaki küp numunelere 28. ve 90. günler sonunda, önce ultrases daha sonra basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Taban çapı 10 cm yüksekliği 20 cm boyutlarındaki silindir numunelere ise 28. gün sonunda önce ultrases deneyi, daha sonra elastisite modülü ölçüm deneyi ve en sonunda da basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

Küp numuneler, kalıba temas eden yan yüzeyleri düz olduğundan bu doğrultuları kuvvet yönüne dik olacak şekilde pres aletine yerleştirilmiştir. Basınç dayanım değerleri σ_b (N/mm²); uygulanan basınç kuvveti P (N)'nin, basınç kuvvetinin

uygulandığı alan A (mm²)'ya bölünmesiyle bulunmuştur. 4.1 bağıntısında hesaplanışı görülmektedir.

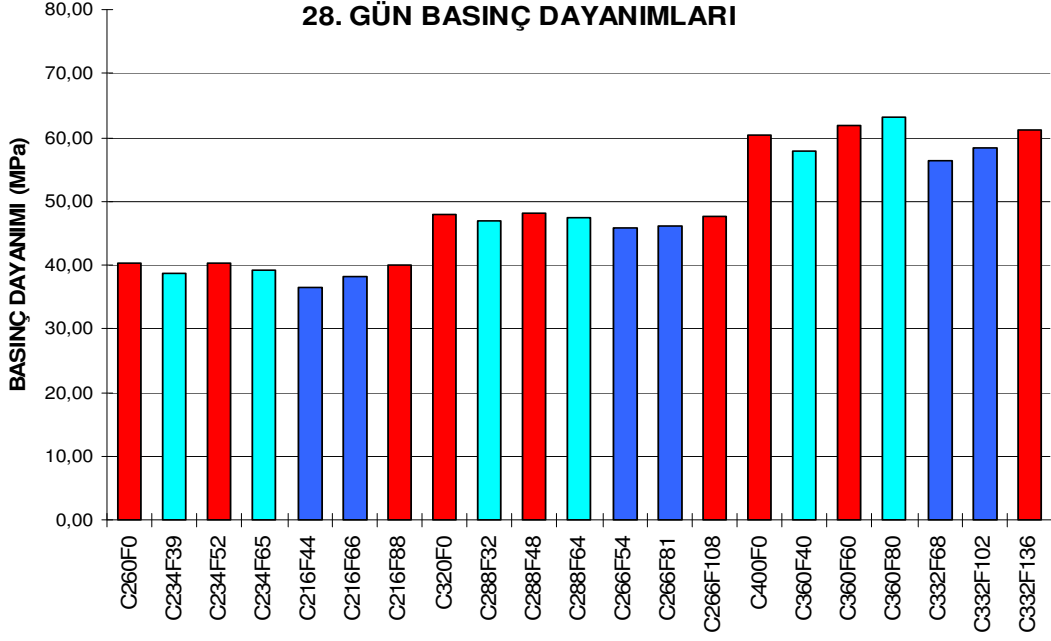
Silindir numuneler, basınç kuvveti uygulanacak yüzeylerine düzgün başlık yapıldıktan sonra bu doğrultuları kuvvet yönüne dik olacak şekilde pres aletine yerleştirilmiştir. Basınç dayanım değerleri gene aynı yönemle bulunmuştur.

Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımları Çizelge 4.2'de görülmektedir. Elde edilen basınç dayanımlarının grafik görünüşleri ise Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir.

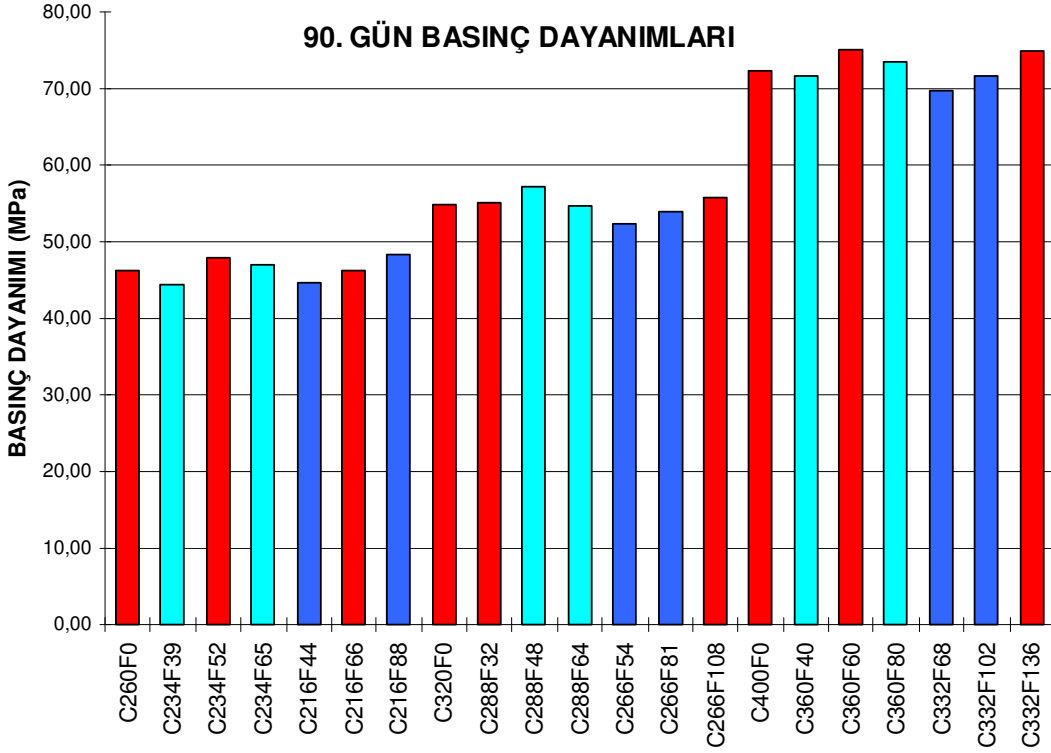
$$\sigma_b = P / A \quad (4.1)$$

Çizelge 4.2 : Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanım değerleri.

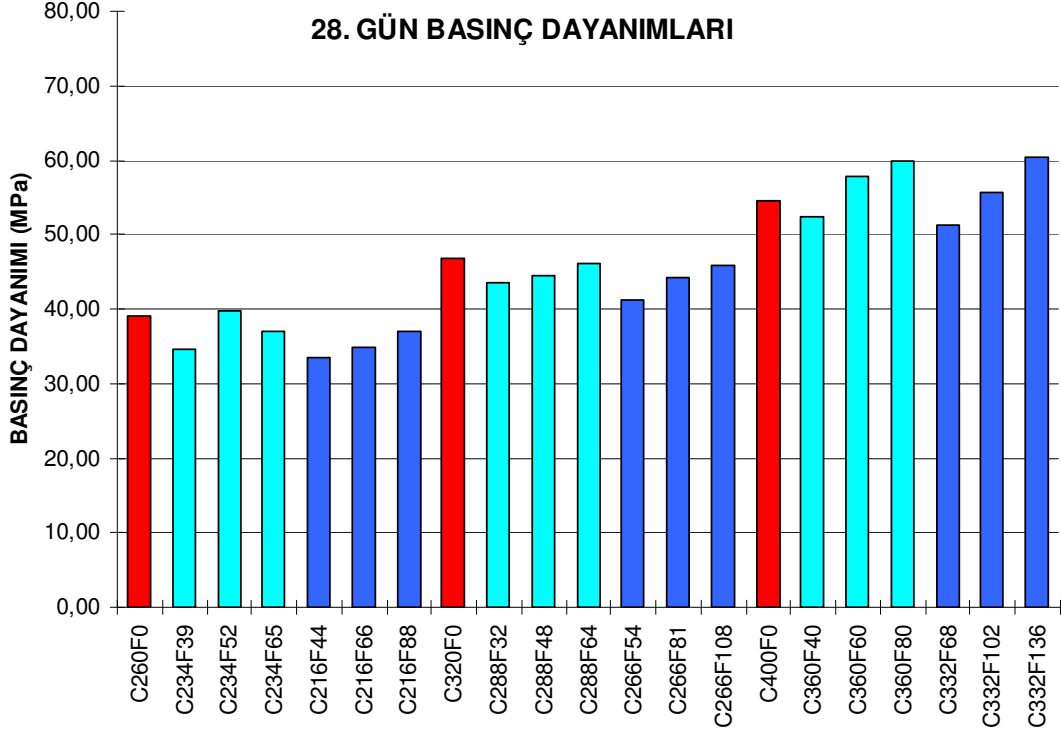
BETON KODU	BASINÇ DAYANIMLARI (MPa)		
	KÜP		SİLİNDİR
	28. GÜN	90. GÜN	28.GÜN
C260F0	40,20	46,20	39,14
C234F39	38,75	44,45	34,59
C234F52	40,25	47,87	39,67
C234F65	39,25	46,93	36,93
C216F44	36,49	44,55	33,53
C216F66	38,14	46,21	34,74
C216F88	40,06	48,39	36,85
C320F0	47,81	54,80	46,70
C288F32	46,81	55,02	43,41
C288F48	48,23	57,31	44,36
C288F64	47,36	54,76	46,17
C266F54	45,90	52,33	41,14
C266F81	46,23	53,95	44,30
C266F108	47,52	55,76	45,96
C400F0	60,49	72,30	54,50
C360F40	57,76	71,65	52,47
C360F60	61,87	75,06	57,80
C360F80	63,31	73,42	59,90
C332F68	56,27	69,79	51,19
C332F102	58,44	71,72	55,67
C332F136	61,12	74,94	60,41



Şekil 4.1 : Küp numunelerin 28. gündeki basınç dayanımları.



Şekil 4.2 : Küp numunelerin 90. gündeki basınç dayanımları.



Şekil 4.3 : Silindir numunelerin 28. gündeki basınç dayanımları.

4.2.2. Ultrases hızı

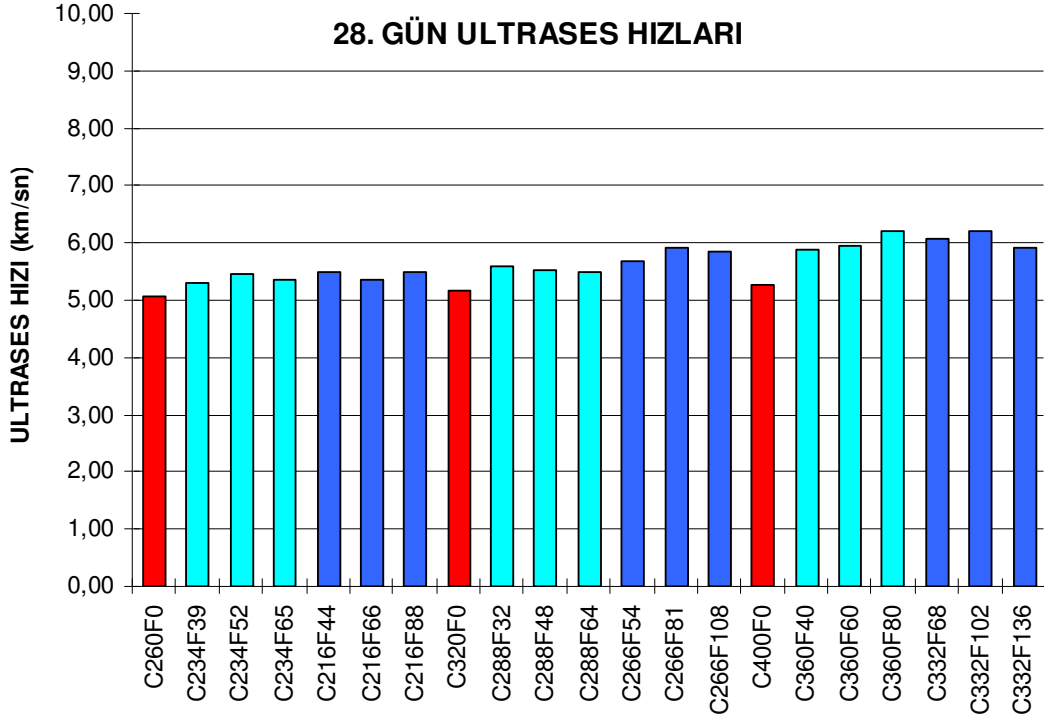
Ultrases hızı ölçüm deneyleri, numunenin basınç dayanımı deneyinden önce yapılmıştır. Küp numunelerde 28. ve 90. günlerde, silindir numunelerde ise 28. günde ölçülmüştür. Numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra kuruması beklenmiştir. Küp numunelerin kalıbın yan yüzüne gelen düz yüzeylerinde, silindir numunelerin de başlık yapıldıktan sonra oluşan düz yüzeylerinde ölçümler yapılmıştır. Ultrases hızı ölçümü yapılırken, numunelerin deneye tabi tutulan yüzeyleri gres yağı ile yağlanarak ses alıcı ve verici problarla numune arasındaki hava boşluğu giderilmiştir. Daha sonra sesin, numune üzerinde alıcı probdan verici proba ulaşması için gerekli süre ultrases aletinden μs (mikro saniye) cinsinden okunmuş, bu süre s'ye çevrilmiştir. Geçiş mesafesi ise numune üzerinde alıcı ve verici probların arası cm cinsinden ölçülüp km'ye çevrilmiş ve ultrases hızı V_u (km/s) bulunmuştur. 4.2 bağıntısında hesaplanışı görülmektedir. Deney sonuçlarından elde edilen ultrases hızı değerleri ise Çizelge 4.3'te görülmektedir. Deney sonuçlarının grafik görünüşleri ise Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.

$$V_u = X / T$$

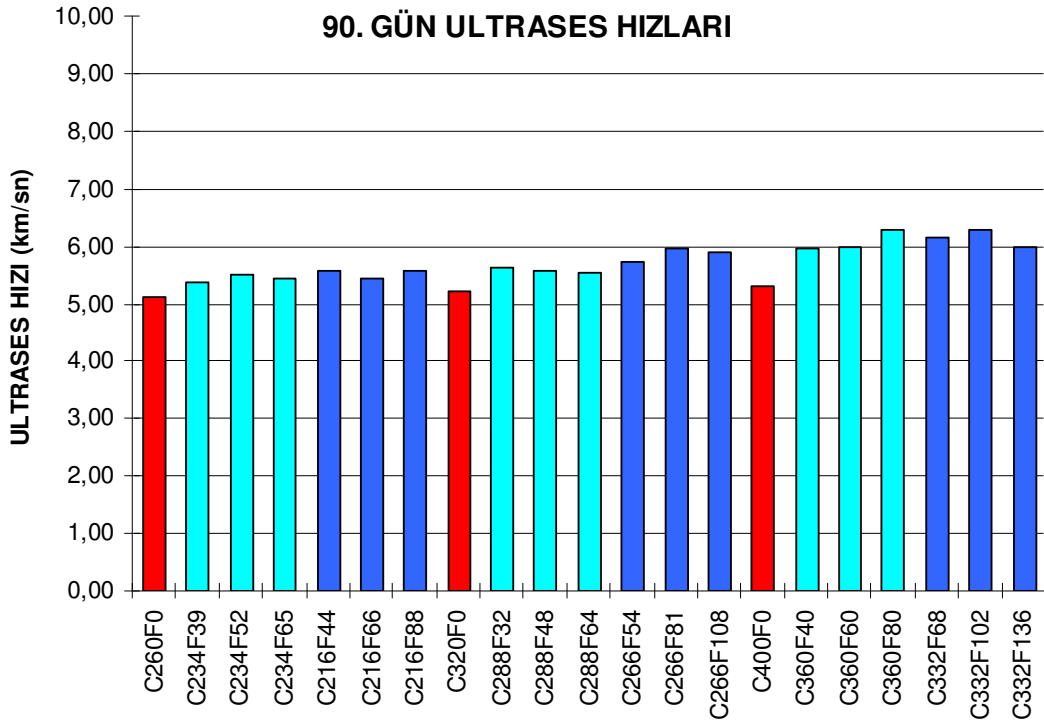
(4.2)

Çizelge 4.3 : Deney sonuçlarından elde edilen ultrases hızı değerleri.

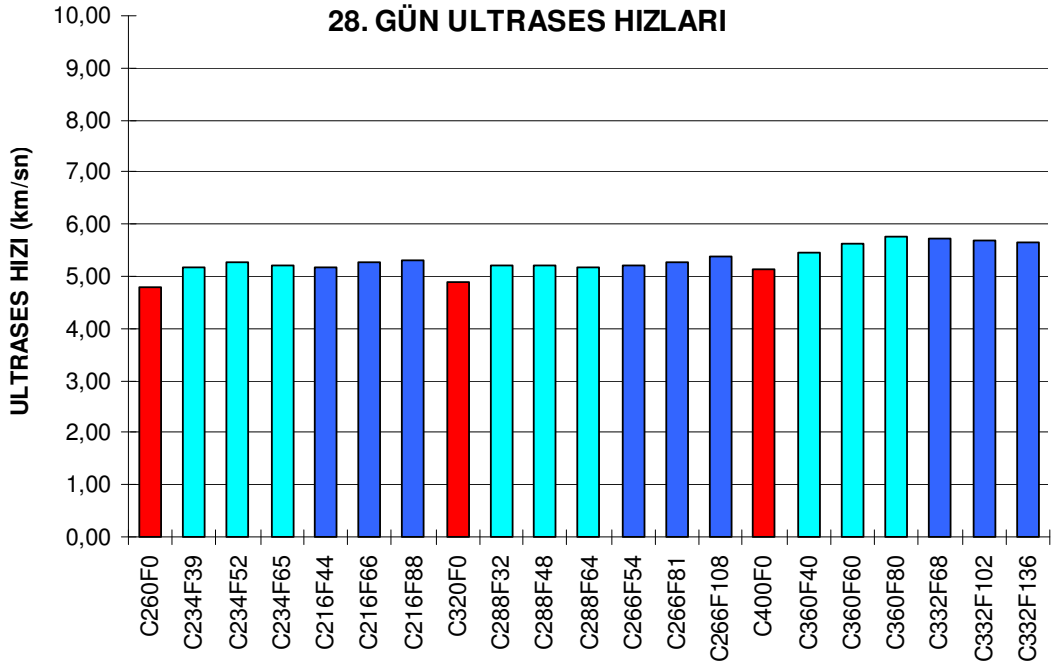
BETON KODU	ULTRASES HIZI (km/sn)		
	KÜP		SİLİNDİR
	28. GÜN	90. GÜN	28.GÜN
C260F0	5,08	5,13	4,80
C234F39	5,30	5,37	5,16
C234F52	5,44	5,50	5,28
C234F65	5,36	5,43	5,21
C216F44	5,49	5,55	5,16
C216F66	5,36	5,44	5,27
C216F88	5,50	5,57	5,32
C320F0	5,17	5,22	4,88
C288F32	5,57	5,62	5,19
C288F48	5,51	5,58	5,20
C288F64	5,49	5,55	5,17
C266F54	5,67	5,73	5,20
C266F81	5,92	5,96	5,27
C266F108	5,85	5,89	5,39
C400F0	5,26	5,31	5,12
C360F40	5,88	5,94	5,45
C360F60	5,94	6,00	5,63
C360F80	6,21	6,27	5,76
C332F68	6,07	6,13	5,71
C332F102	6,21	6,29	5,71
C332F136	5,92	5,98	5,65



Şekil 4.4 : Küp numunelerin 28. gündeki ultrases hızları.



Şekil 4.5 : Küp numunelerin 90. gündeki ultrases hızları.



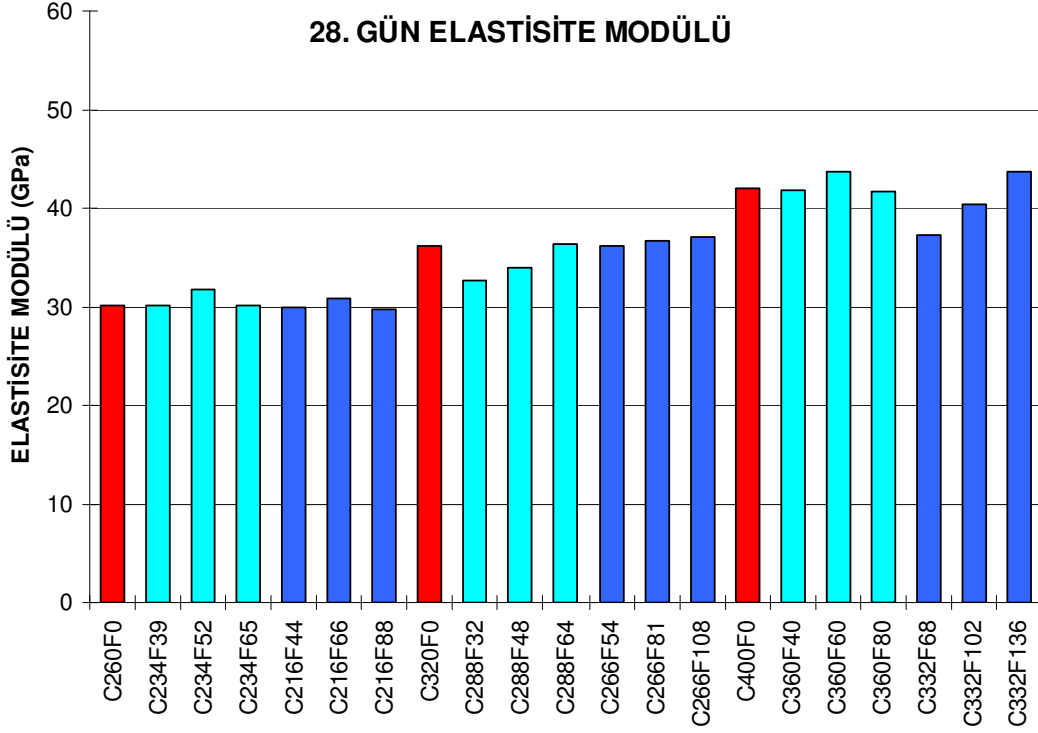
Şekil 4.6 : Silindir numunelerin 28. gündeki ultrases hızları.

4.2.3 Elastisite modülü hesabı

Taban çapı 100 mm yüksekliği 200 mm boyutlarındaki silindir numunelere düşey yer değiştirmeyi ölçmek için çerçeve takılmıştır. Silindir numuneler bu haliyle prese yerleştirilmiş ve sabit yükleme hızıyla yüklenmiştir. Daha sonra çerçeveden, belli yüklerde oluşan şekil değiştirmeler okunmuştur. Okunan şekil değiştirme değerleri ve gerilme değerleri (N/mm^2) kullanılarak gerilme-şekil değiştirme diyagramı çizilmiştir. Maksimum gerilmenin 1/3'ü bölgesinde gerilme-şekil değiştirme eğrisi lineer olarak kabul edilmiş ve elastisite modülleri E (N/mm^2) grafik üzerindeki eğim olarak okunmuştur. Çizelge 4.4'değerler görülmektedir. Bu değerlerin grafiği ise Şekil 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Deney sonuçlarından elde edilen elastisite modülü değerleri.

BETON KODU	ELASTİSİTE MODÜLÜ (MPa)
	SİLİNDİR
	28.GÜN
C260F0	30.119
C234F39	30.077
C234F52	31.667
C234F65	30.084
C216F44	30.000
C216F66	30.743
C216F88	29.639
C320F0	36.115
C288F32	32.634
C288F48	34.027
C288F64	36.397
C266F54	36.152
C266F81	36.761
C266F108	37.022
C400F0	42.000
C360F40	41.890
C360F60	43.644
C360F80	41.654
C332F68	37.306
C332F102	40.449
C332F136	43,632



Şekil 4.7 : Silindir numunelerin 28. gündeki elastisite modülleri.

4.2.4 Maliyet analizi

Uçucu küllü betonların başka bir özelliği de ekonomik olmalarıdır. Betonun önemli hammadresi olan çimentonun pahalı olması nedeniyle, çimento yerine konan uçucu kül betonun maliyetini de azaltır. Böylece büyük hacimli betonlarda uçucu kül kullanılarak, ekonomik olarak da avantaj sağlanmış olur.

1 Nisan 2009 tarihinde Bayındırlık Bakanlığı'nın fiyatlarıyla oluşturulan Çizelge 4.5'te kontrol betonu ve kontrol betonuna yakın basınç dayanımına sahip uçucu küllü betonların işçiliksiz malzeme fiyatları birim olarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada çimentonun bir tonu 100 birim kabul edilmiştir.

Fiyatlar şu mertebededir: Doğal kum 16 birim/ton, kırma kum, kırmataş I ve kırmataş II 10 birim/ton, CEM I PÇ 42.5 çimento 100 birim/ton, F tipi uçucu kül 50 birim/ton kabul edilmiştir, orta akışkanlaştırıcı katkı maddesi 0,37 birim/kg, süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi 0,65 birim/kg, su 2,4 birim/ton. Fiyatlara %18 KDV dahil değildir. Uçucu küllerin fiyatlarının uçucu küle ve nakliye fiyatlarına göre değişiklik gösterebileceği unutulmamalıdır.

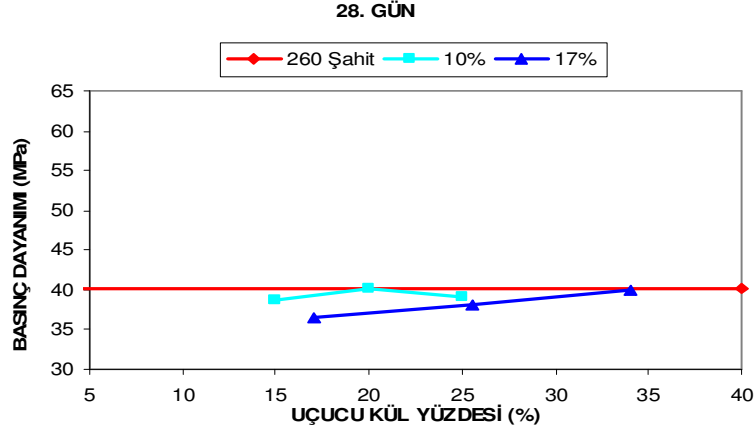
Çizelge 4.5 : Uçucu küllü betonların maliyetleri (1m³ için).

BETON KODU	MALİYET (Birim)	MALİYET+KDV (Birim)
C260F0	49,49	58,40
C234F52	48,91	57,36
C216F88	49,17	58,02
C320F0	55,58	65,58
C288F48	53,94	63,65
C266F108	54,18	63,93
C400F0	65,78	77,62
C360F60	63,91	75,41
C332F136	64,70	76,34

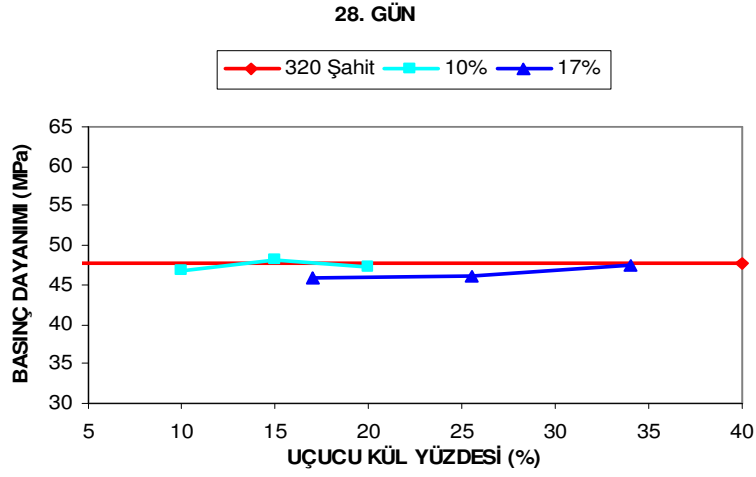
4.2.5 Etkinlik faktörünün (k) belirlenmesi

Uçucu küllü betonlarda k etkinlik faktörünün belirlenmesi için Bolomey ve Feret formülleri kullanılmıştır. Bolomey formülünde çimento ve uçucu kül miktarları ağırlık cinsinden hesaplanmakta, Feret formülünde ise çimento ve uçucu kül miktarları hacim cinsinden hesaplanmaktadır.

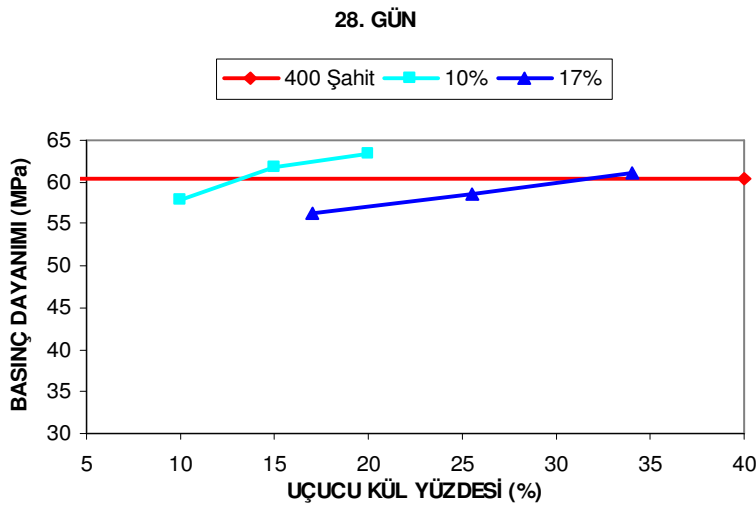
Etkinlik faktörü sadece şahit betonun basınç dayanımına yakın basınç dayanımındaki uçucu küllü serilerde hesaplanmıştır. Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da 28.gündeki serilerin basınç dayanımları, Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te 90.gündeki serilerin basınç dayanımları ve optimum basınç dayanımlı uçucu küllü numuneler görülmektedir. 28. gündeki numunelerde Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10'da %10'luk serilerin 2. numunelerinin, %17'lik serilerin ise 3. numunelerinin şahit betonun basınç dayanımına yakın değerler aldıkları görülmektedir. 90. gündeki numunelerde ise Şekil 4.11'de %10'luk ve %17'lik serilerde 2. numunelerin, Şekil 4.12'de %10'luk seride 1., %17'lik seride 3. numunenin, Şekil 4.13'te %10'luk seride 2., %17'lik seride ise 3. numunenin şahit betonun basınç dayanımına yakın değerler aldığı görülmektedir.



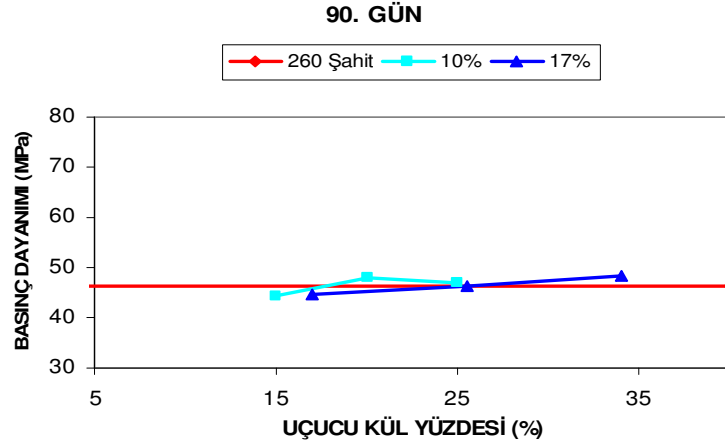
Şekil 4.8 : 260 dozlu serinin 28.gün basınç dayanımı-uçucu kül yüzdesi grafiği.



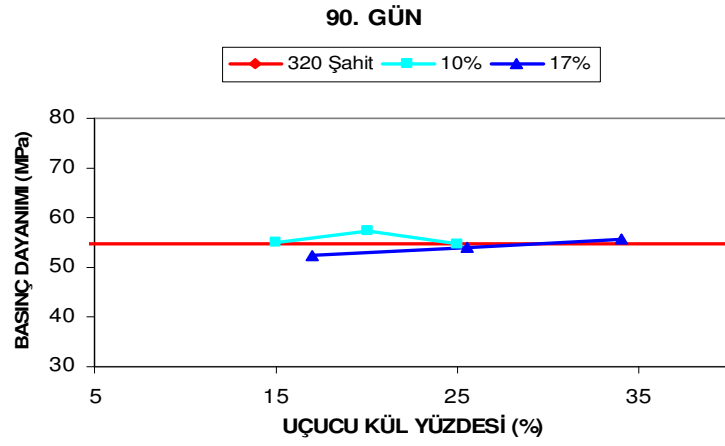
Şekil 4.9 : 320 dozlu serinin 28.gün basınç dayanımı-uçucu kül yüzdesi grafiği.



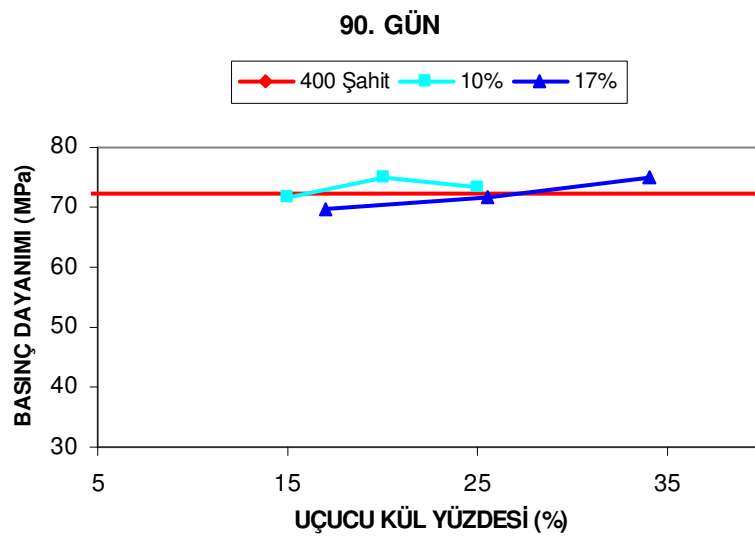
Şekil 4.10 : 400 dozlu serinin 28.gün basınç dayanımı-uçucu kül yüzdesi grafiği.



Şekil 4.11 : 260 dozlu serinin 90.gün basınç dayanımı-uçucu kül yüzdesi grafiği.



Şekil 4.12 : 320 dozlu serinin 90.gün basınç dayanımı-uçucu kül yüzdesi grafiği.



Şekil 4.13 : 400 dozlu serinin 90.gün basınç dayanımı-uçucu kül yüzdesi grafiği.

4.2.5.1 Bolomey formülü kullanılarak k etkinlik katsayısının hesabı

Bolomey formülü:

$$f_c = K_B \{ (C / (W+h)) - a \} \quad (4.3)$$

Buradan K_B çekilirse:

$$K_B = f_c / \{ (C / (W+h)) - a \} \quad (4.4)$$

İlk olarak 3 adet şahit numunede (4.4) formülü kullanılarak, her seri için kullanılacak Bolomey katsayıları hesaplanmıştır. Diğer bilinmeyen olan a katsayısı yaş ve kür şartları gözönünde bulundurularak 0,5 olarak alınmıştır.

Şahit numuneler için kullanılan Bolomey formülünde;

K_B : Şahit betonun ve ona ait serinin Bolomey katsayısı (N/mm^2)

f_c : Şahit betonun basınç dayanımı (N/mm^2)

C : Şahit betonun çimento miktarı (kg/m^3)

W : Şahit betonun su miktarı (kg/m^3)

h : Şahit betonun hava miktarı (dm^3/m^3)

a : Yaşa ve küre bağlı bir katsayı (0,5 alınmıştır.)

Daha sonra şahit betonun basınç dayanımına yakın basınç dayanımı olan yani optimum basınç dayanımlı uçucu küllü betonlarda k etkinlik katsayısı hesaplanmıştır.

Uçucu küllü betonlarda Bolomey formülü:

$$f_c' = K_B \{ [(C' + k*F) / (W' + h')] - a \} \quad (4.5)$$

Buradan k çekilirse:

$$k = \{ [(f_c' / K_B) + a] * (W' + h') - C' \} / F \quad (4.6)$$

Bu formülde;

f_c' : Uçucu küllü betonun basınç dayanımı (N/mm^2)

K_B : Şahit betonun Bolomey katsayısı (N/mm^2)

a : Yaşa ve küre bağlı bir katsayı (0,5 alınmıştır)

W' : Uçucu küllü betonun su miktarı (kg/m^3)

h' : Uçucu küllü betonun hava miktarı (dm^3/m^3)

C' : Uçucu küllü betonun çimento miktarı (kg/m^3)

F : Uçucu kül miktarı (kg/m^3)

k : Uçucu külün etkinlik katsayısıdır.

Hesaplanan değerler Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Optimum basınç dayanımlı uçucu küllü betonlarda etkinlik katsayıları (Bolomey).

Beton Kodu	28. Gün		90. Gün	
	K_B (N/mm ²)	k	K_B (N/mm ²)	k
C260F0	54,852	-	63,038	-
C234F52	54,852	0,450	63,038	0,553
C216F66	-	-	63,038	0,612
C216F88	54,852	0,513	-	-
C320F0	46,879	-	53,738	-
C288F32	-	-	53,738	0,595
C288F48	46,879	0,502	-	-
C266F108	46,879	0,575	53,738	0,623
C400F0	39,168	-	46,815	-
C360F60	39,168	0,542	46,815	0,616
C332F136	39,168	0,613	46,815	0,673

4.2.5.2 Feret formülü kullanılarak k etkinlik katsayısının hesabı

Feret formülü:

$$f_c = K_F [c / (c+w+h)]^2 \quad (4.7)$$

Buradan K_F çekilirse:

$$K_F = f_c / [c / (c+w+h)]^2 \quad (4.8)$$

İlk olarak 3 adet şahit numunede (4.8) formülü kullanılarak, her seri için kullanılacak Feret katsayıları hesaplanmıştır. Feret formülünün, Bolomey formülünden farkı a katsayısının bulunmamasıdır. Ayrıca çimento hacminin çimento+su+hava hacmine

oranının karesi alınarak Bolomey formülünden daha farklı değerler elde edilmektedir.

Şahit numuneler için kullanılan Feret formülünde;

K_F : Şahit betonun ve ona ait serinin Feret katsayısı (N/mm^2)

f_c : Şahit betonun basınç dayanımı (N/mm^2)

c : Şahit betonun çimento miktarı (mutlak hacim cinsinden) (dm^3/m^3)

w : Şahit betonun su miktarı (mutlak hacim cinsinden) (dm^3/m^3)

h : Şahit betonun hava miktarı (dm^3/m^3)'dır.

Daha sonra şahit betonun basınç dayanımına yakın basınç dayanımı olan yani optimum basınç dayanımlı uçucu küllü betonlarda k etkinlik katsayısı hesaplanmıştır.

Uçucu küllü betonlarda Feret formülü:

$$f_c' = K_F [(c' + k*f) / (c' + k*f + w' + h')]^2 \quad (4.9)$$

Buradan k çekilirse:

$$k = \{ [(f_c' / K_F)^{1/2} * (c' + w' + h')] - c' \} / [f - (f * (f_c' / K_F)^{1/2})] \} \quad (4.10)$$

Bu formülde;

f_c' : Uçucu küllü betonun basınç dayanımı (N/mm^2)

K_F : Şahit betonun Feret katsayısı (N/mm^2)

c' : Uçucu küllü betonun çimento miktarı (mutlak hacim cinsinden) (dm^3/m^3)

w' : Uçucu küllü betonun su miktarı (mutlak hacim cinsinden) (dm^3/m^3)

h' : Uçucu küllü betonun hava miktarı (dm^3/m^3)

f : Uçucu kül miktarı (mutlak hacim cinsinden) (dm^3/m^3)

k : Uçucu külün etkinlik katsayısıdır.

Hesaplanan değerler Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Optimum basınç dayanımlı uçucu küllü betonlarda etkinlik katsayıları
(Feret).

Beton Kodu	28. Gün		90. Gün	
	K_F (N/mm ²)	k	K_F (N/mm ²)	k
C260F0	501,112	-	575,905	-
C234F52	501,112	0,266	575,905	0,337
C216F66	-	-	575,905	0,361
C216F88	501,112	0,302	-	-
C320F0	445,570	-	510,768	-
C288F32	-	-	510,768	0,352
C288F48	445,570	0,299	-	-
C266F108	445,570	0,338	510,768	0,370
C400F0	386,010	-	461,374	-
C360F60	386,010	0,326	461,374	0,374
C332F136	386,010	0,363	461,374	0,401

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Üretilen kontrol betonlarındaki ve uçucu küllü betonlardaki eşit işlenebilirlik için gerekli olan su miktarları bulunmuştur. Karışıma giren su miktarları, su / toplam bağlayıcı madde oranı, çökme değerleri ve şahit betonun su miktarı 100 kabul edilerek bulunan yüzdeler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Kontrol betonuna kıyasla su ihtiyacı değişimi (%)

BETON KODU	Su (Kg)	Kontrol Betonuna Göre Su Değişimi (%)	Su / Toplam Bağlayıcı Madde Oranı	Çökme (cm)
C260F0	195	100,0	0,74	15,5
C234F39	195	100,0	0,69	16,0
C234F52	196	100,5	0,66	15,5
C234F65	197	101,0	0,64	14,0
C216F44	196	100,5	0,73	15,5
C216F66	196	100,5	0,68	14,0
C216F88	197	101,0	0,63	14,0
C320F0	198	100,0	0,60	16,5
C288F32	186	93,9	0,58	15,5
C288F48	192	97,0	0,56	15,0
C288F64	201	101,5	0,56	14,5
C266F54	196	99,0	0,60	14,5
C266F81	201	101,5	0,56	16,0
C266F108	203	102,5	0,53	16,0
C400F0	170	100,0	0,42	15,0
C360F40	160	94,1	0,40	17,0
C360F60	162	95,3	0,39	17,0
C360F80	170	100,0	0,38	17,0
C332F68	165	97,1	0,41	16,0
C332F102	164	96,5	0,37	17,0
C332F136	180	105,9	0,37	15,5

Çizelge 5.1'deki değerler incelendiğinde, eşit işlenebilirlik için (14-17 cm) gerekli olan uçucu küllü betonların karışım sularının düşük dozlu ve yüksek dozlu betonlarda farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Düşük dozlu betonlarda; uçucu küllü betonların, kontrol betonuna çok yakın karışım suyu miktarlarına sahip oldukları görülmektedir. Yüksek dozlu betonlarda ise; uçucu küllü betonların düşük oranlı ikame karışımlarında, kontrol betonundan düşük karışım suyu değerlerine sahip oldukları söylenebilir. İkame oranı arttıkça, uçucu küllü betonların karışım sularının kontrol betonunu yakaladığı ve geçtiği görülmektedir. Bu artış ve azalmalar, çimento dozajına göre belli bir yüzdeyle çıkarılan çimentonun yerine eşit veya daha fazla miktarda uçucu kül konulmasına yani uçucu kül miktarına, ayrıca F tipi uçucu küllerin incelik, tane büyüklüğü, tane şekli gibi bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır.

Su / toplam bağlayıcı madde oranlarına baktığımızda ise her seride uçucu küllü betonların değerleri kontrol betonundan düşük çıkmıştır. Bütün serilerdeli ortak özellik, ilave edilen uçucu kül miktarı arttığında su / toplma bağlayıcı madde oranının azalmasıdır.

5.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

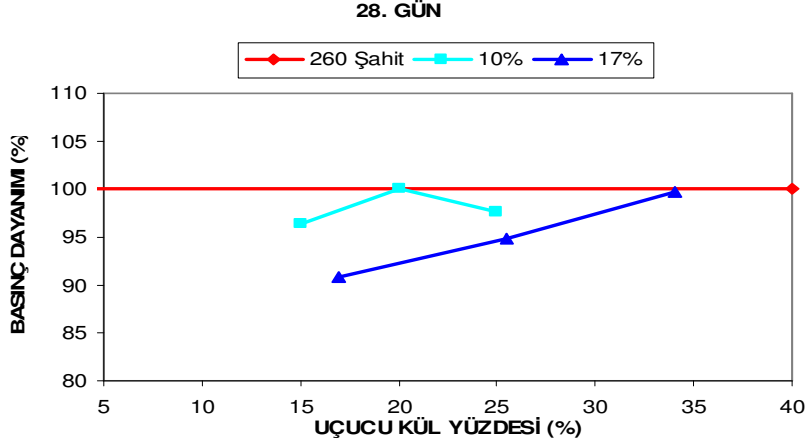
5.2.1 Basınç dayanımı sonuçlarının değerlendirilmesi

Çizelge 4.2'de verilmiş olan basınç dayanımı deney sonuçları, Çizelge 5.2'de görüldüğü gibi kontrol betonu dayanımına göre yüzde olarak kıyaslanmıştır. Tablodan da görüleceği gibi, erken yaşlarda uçucu küllü betonlar kontrol betonunun dayanımını yakalayamamıştır. Ama ileriki yaşlarda, uçucu küllü betonlar, kontrol betonlarının dayanımlarını yakalamış hatta geçmiştir.

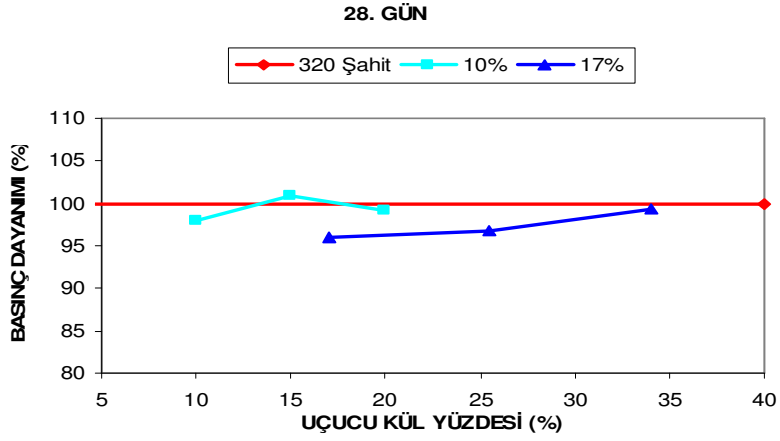
Uçucu kül ikame oranına göre erken yaşlarda da kontrol betonunun dayanımına ulaşan uçucu küllü betonlar da mevcuttur.

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

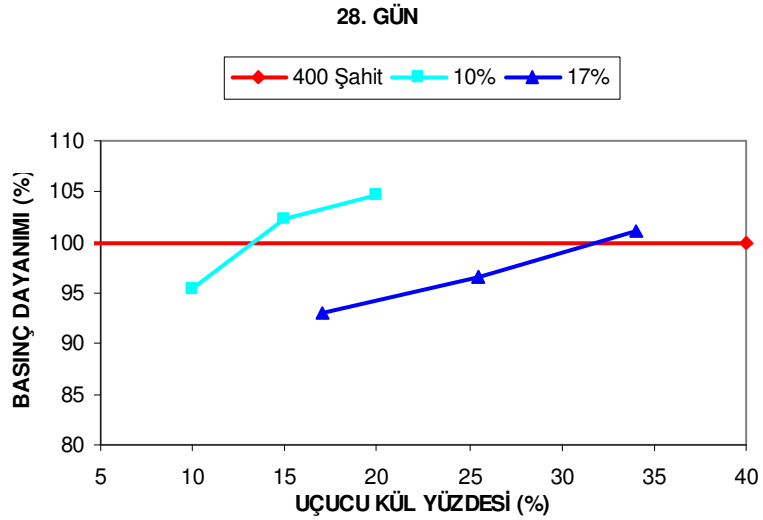
BETON KODU	BASINÇ DAYANIMLARI (%)		
	KÜP		SİLİNDİR
	28. GÜN	90. GÜN	28.GÜN
C260F0	100,0	114,9	100,0
C234F39	96,4	114,7	88,4
C234F52	100,1	118,9	101,4
C234F65	97,6	119,6	94,4
C216F44	90,8	122,1	85,7
C216F66	94,9	121,2	88,8
C216F88	99,7	120,8	94,1
C320F0	100,0	114,6	100,0
C288F32	97,9	117,5	93,0
C288F48	100,9	118,8	95,0
C288F64	99,1	115,6	98,9
C266F54	96,0	114,0	88,1
C266F81	96,7	116,7	94,9
C266F108	99,4	117,3	98,4
C400F0	100,0	119,5	100,0
C360F40	95,5	124,0	96,3
C360F60	102,3	121,3	106,1
C360F80	104,7	116,0	109,9
C332F68	93,0	124,0	93,9
C332F102	96,6	122,7	102,1
C332F136	101,0	122,6	110,8



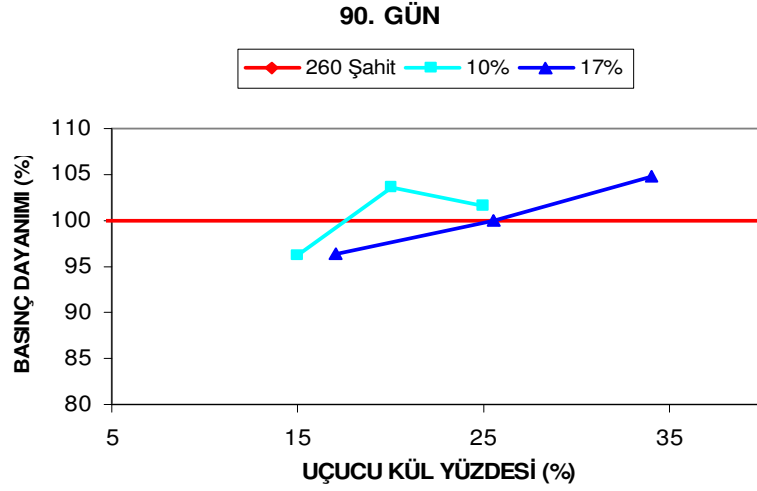
Şekil 5.1 : 260 dozlu serinin 28. gündeki basınç dayanımı değişimi.



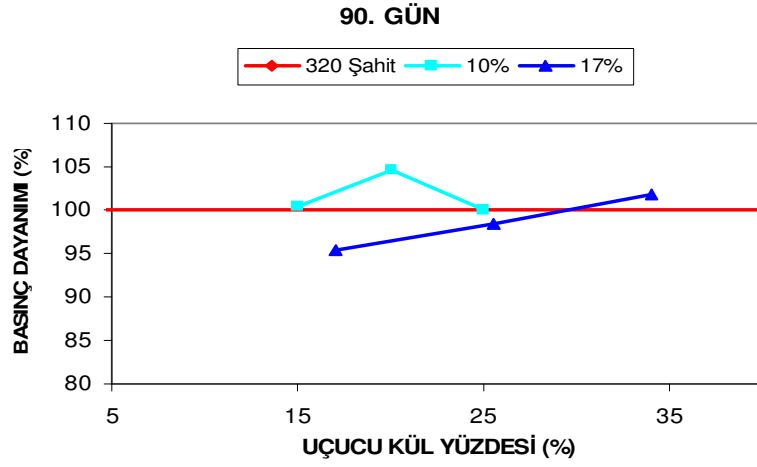
Şekil 5.2 : 320 dozlu serinin 28. gündeki basınç dayanımı değişimi.



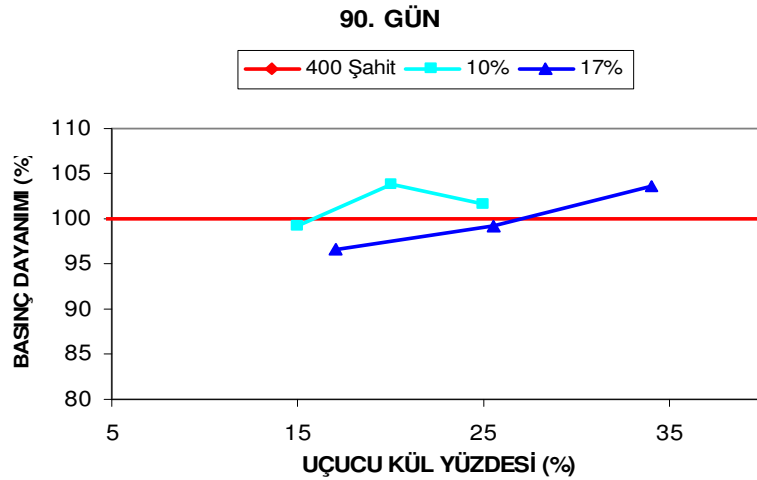
Şekil 5.3 : 400 dozlu serinin 28. gündeki basınç dayanımı değişimi.



Şekil 5.4 : 260 dozlu serinin 90. gündeki basınç dayanımı değişimi.



Şekil 5.5 : 320 dozlu serinin 90. gündeki basınç dayanımı değişimi.



Şekil 5.6 : 400 dozlu serinin 90. gündeki basınç dayanımı değişimi.

Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te görüldüğü gibi, uçucu küllü betonların 28. gündeki basınç dayanımları şahit betonun basınç dayanımından düşüktür. Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da görüldüğü gibi, uçucu küllü betonların 90. gündeki basınç dayanımları şahit betonun basınç dayanımından yüksektir. Ayrıca uçucu küllü betonların 28. günden 90. güne basınç dayanımı gelişim hızları, şahit betonunkinden daha yüksektir.

5.2.2 Ultrases hızı deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Çizelge 4.3'te verilmiş olan ultrases hızı deney sonuçları, Çizelge 5.3'te 28.gün kontrol betonlarına göre yüzde olarak kıyaslanmış şekilde verilmiştir.

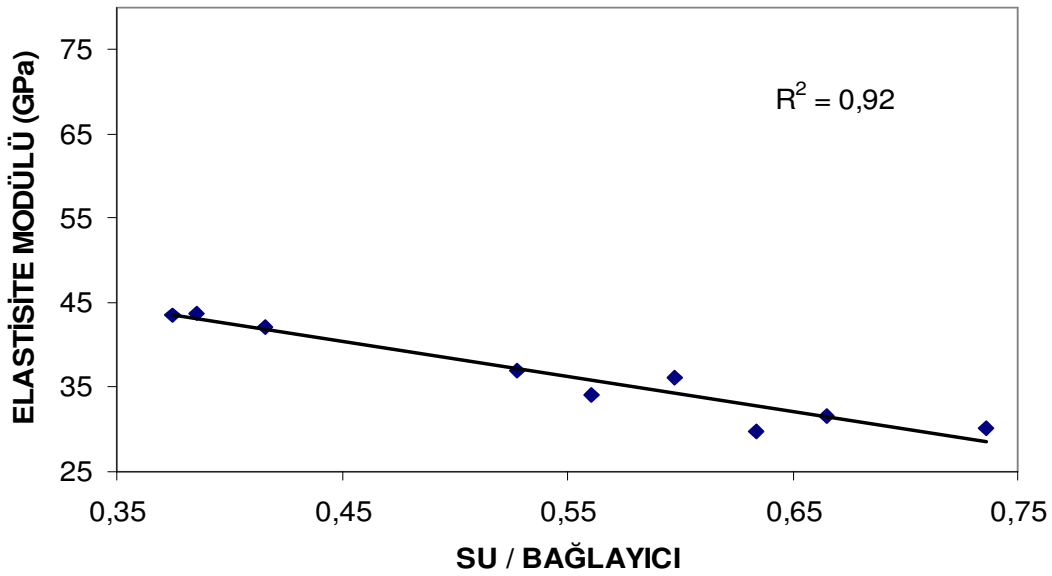
Çizelge 5.3 : Deney sonuçlarından elde edilen ultrases hızı değerlerinin 28 günlük kontrol betonlarına göre yüzdesel olarak karşılaştırılması.

BETON KODU	ULTRASES HIZI (%)		
	KÜP		SİLİNDİR
	28. GÜN	90. GÜN	28.GÜN
C260F0	100,0	101,0	100,0
C234F39	104,4	105,8	107,4
C234F52	107,2	108,3	110,0
C234F65	105,6	107,0	108,4
C216F44	108,2	109,3	107,5
C216F66	105,7	107,2	109,7
C216F88	108,4	109,7	110,7
C320F0	100,0	101,0	100,0
C288F32	107,7	108,7	106,4
C288F48	106,6	107,9	106,5
C288F64	106,2	107,4	106,0
C266F54	109,7	110,8	106,6
C266F81	114,5	115,3	108,1
C266F108	113,2	113,9	110,6
C400F0	100,0	101,0	100,0
C360F40	111,8	112,9	106,4
C360F60	112,8	113,9	109,9
C360F80	118,0	119,2	112,5
C332F68	115,4	116,5	111,5
C332F102	118,0	119,5	111,5
C332F136	112,5	113,6	110,4

Çizelge 5.3'te görüldüğü gibi, uçucu küllü numunelerin ultrases hızları 28. günde de 90. günde de şahit betonlardan fazla çıkmıştır. Bunun sebebi su/bağlayıcı miktarının azalması ve beton içindeki boşlukların daha iyi dolması olarak açıklanabilir.

5.2.3 Su/bağlayıcı sonuçlarının değerlendirilmesi

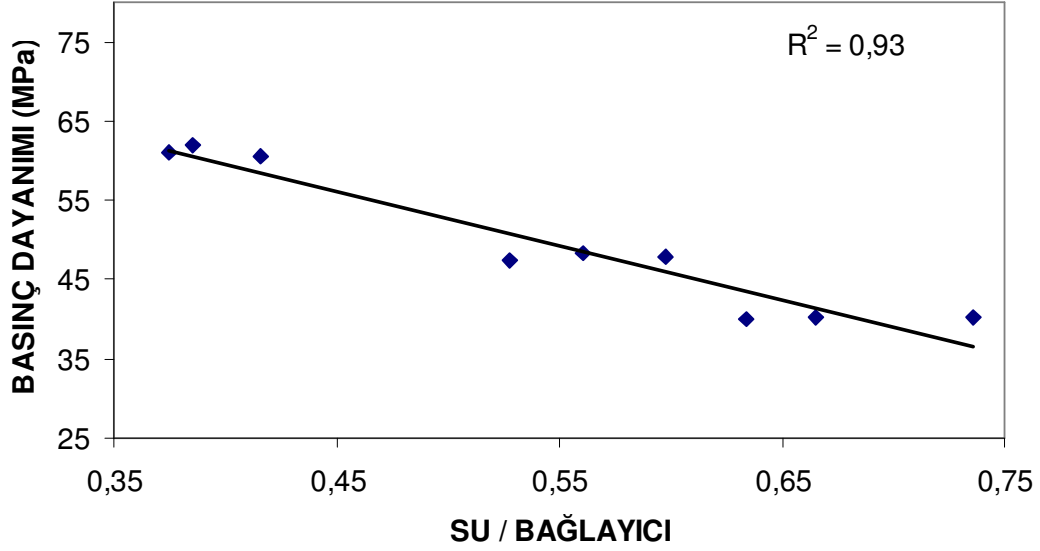
Şekil 5.7'de su/bağlayıcı oranının elastisite modülü üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Elastisite modülü artarken, su/bağlayıcı oranının azalması beklenir. Mikro yapısal düzeyde beton; agrega, çimento hamuru ve bunların arasındaki yüzeyden oluşan üç fazlı bir kompozit malzemedir. Bu yüzey betondaki en zayıf halkadır. Su/bağlayıcı oranı yükselirse, betonun içindeki kapiler boşluklar da yükselir. Böylece agrega ile çimento hamuru arasındaki yüzey daha boşluklu bir hal alır. Bu yüzeyde mikro çatlaklar daha çabuk oluşabilir ve sonuç olarak elastisite modülünün değeri düşer. Düşük su/bağlayıcı oranlarında agregayla çimento hamuru arasındaki yüzey daha güçlüdür. Böylece artan gerilme değerlerinde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi daha düz olmaktadır. Bu tür yüksek dayanımlı betonlarda, çimento hamurunda oluşan çatlaklar agregaya ulaşır. Bundan dolayı elastisite modülünde agreganın da önemli bir rol oynadığı unutulmamalıdır [15, 16]



Şekil 5.7 : Su/bağlayıcı oranının elastisite modülüne etkisi.

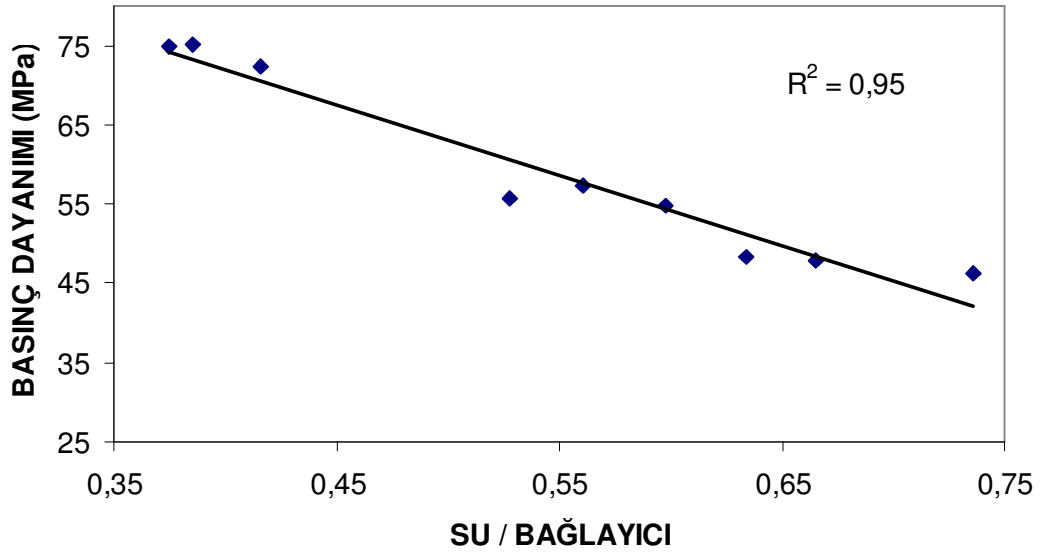
Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da görüleceği gibi su/bağlayıcı oranı, basınç dayanımını da etkilemektedir.

28. GÜN



Şekil 5.8: Su/bağlayıcı oranının 28. gün basınç dayanımına etkisi.

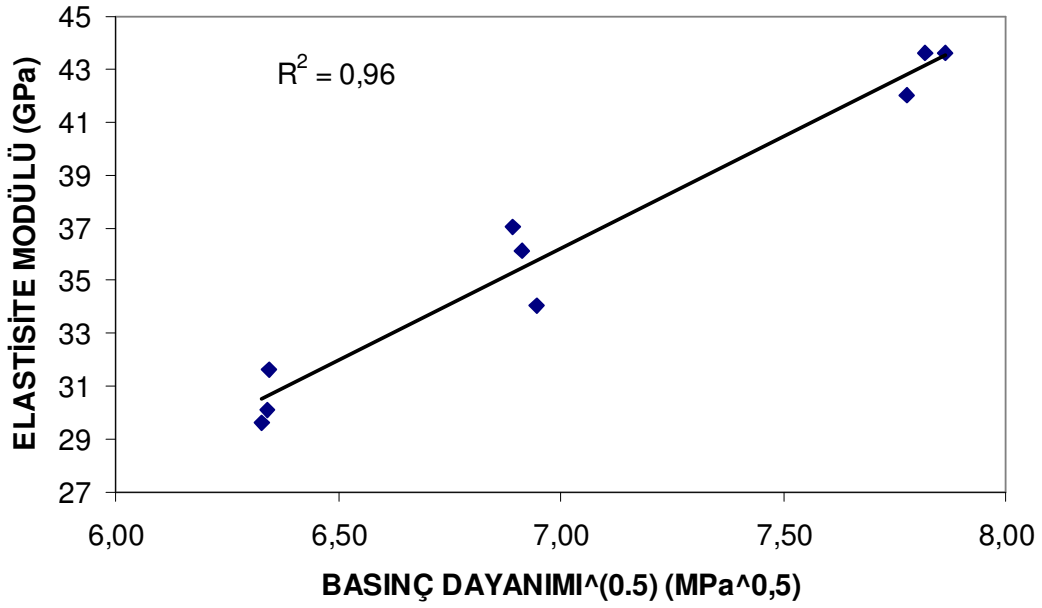
90. GÜN



Şekil 5.9 : Su/bağlayıcı oranının 90. gün basınç dayanımına etkisi.

5.2.4 Basınç dayanımı-elasticite modülü arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi

Şekil 5.10'da basınç dayanımının karekökü ile elasticite modülü arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi elasticite modülü, basınç dayanımı artınca artmaktadır. Betonun basınç dayanımı artarken, çimento hamuru matrisi ve aradaki yüzey daha yoğun ve daha sıkı olur. Ayrıca çimento hamurunun ve agregaların birbirine daha uyumlu elastic özellikleri sayesinde elasticite modülü yükselir [15].



Şekil 5.10 : Basınç dayanımı-elasticite modülü arasındaki ilişki.

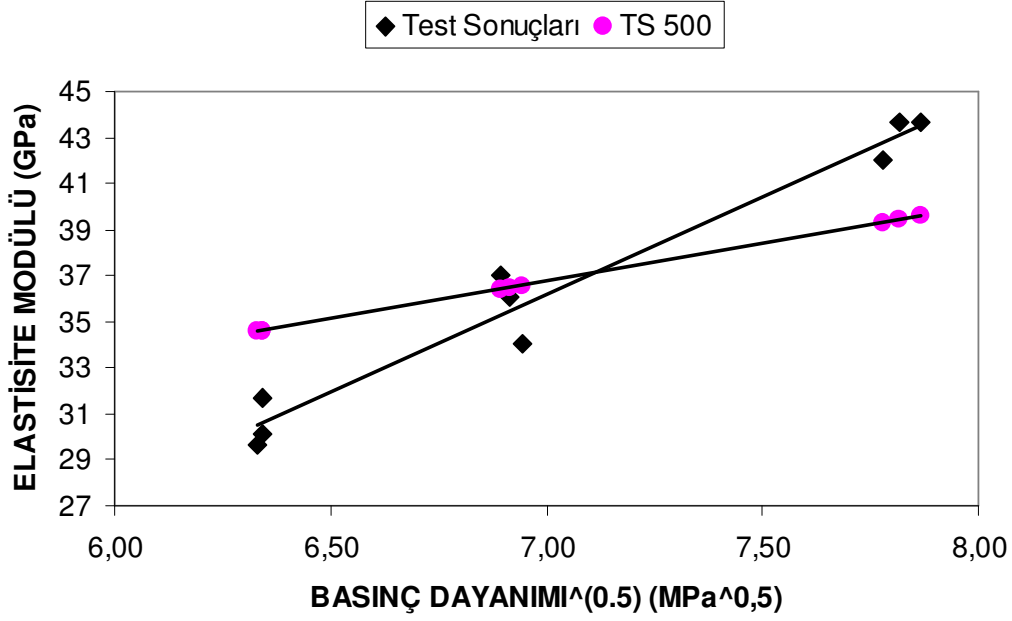
Şekil 5.11'de ise Şekil 5.10'daki eğrinin TS 500'ün önerdiği eğri ile karşılaştırması verilmiştir [15]. Deneylerden bulunan denklemde;

$$E = (8,47*(f_c)^{0,5}) - 23,06 \quad (5.1)$$

Burada; E elasticite modülünü (GPa), f_c ise betonun basınç mukavemetini (N/mm²) göstermektedir. TS 500'e göre;

$$E_{ckj} = ([3250*(f_{ckj})^{0,5}] + 14000) / 1000 \quad (5.2)$$

Burada; E_{ckj} betonun elasticite modülü (GPa), f_{ckj} ise betonun basınç mukavemetini (N/mm²) göstermektedir.

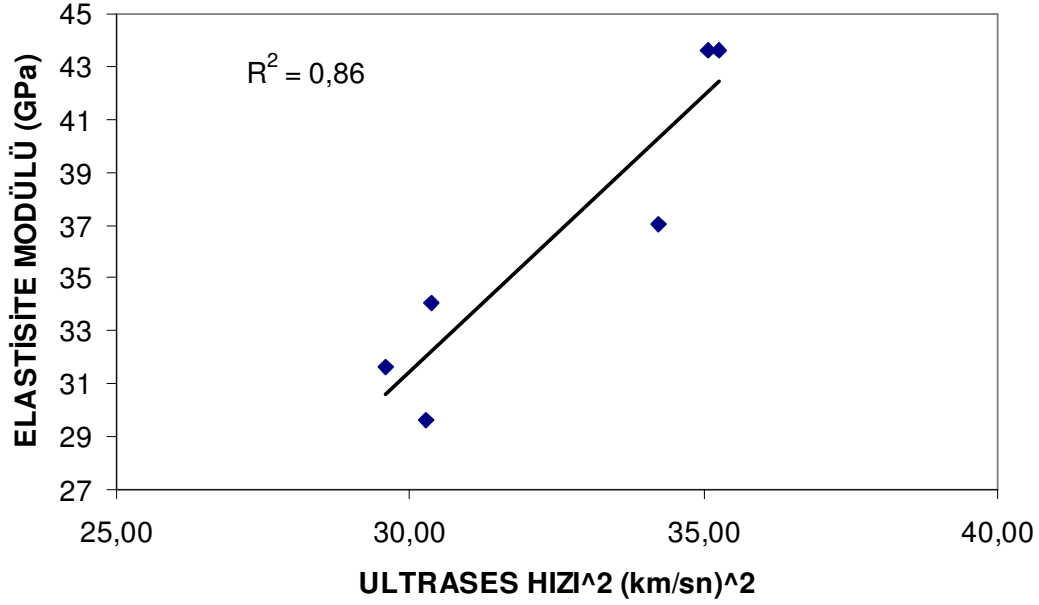


Şekil 5.11 : TS 500 ile deney sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 5.11'den görüleceği gibi; düşük dozlu (basınç dayanımı düşük) uçucu küllü betonların değerleri TS 500 değerlerinin altındadır. 320 dozlu uçucu küllü betonların değerleri TS 500 eğrisine yakın çıkmıştır. Yüksek dozlu uçucu küllü betonların değerleri ise TS 500'den yüksek çıkmıştır.

5.2.5 Ultrases hızı ile elastisite modülü arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi

Şekil 5.12'de görüldüğü gibi ultrases hızıyla elastisite modülü arasında da güçlü bir ilişki vardır. Şahit numunelerin ultrases hızları düşük olduğundan bu grafikte gösterilmemişlerdir. Sadece optimum basınç dayanımlı uçucu küllerin ultrases hızı- elastisite modülü ilişkileri incelenmiştir.



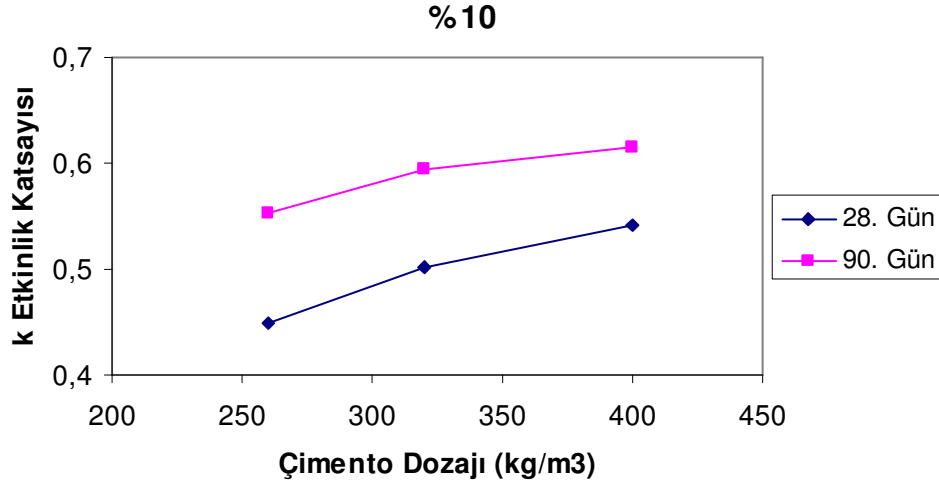
Şekil 5.12 : Uçucu küllü numunelerin ultrases hızı-elastisite modülü ilişkisi.

5.2.6 k Etkinlik faktörünün değerlendirilmesi

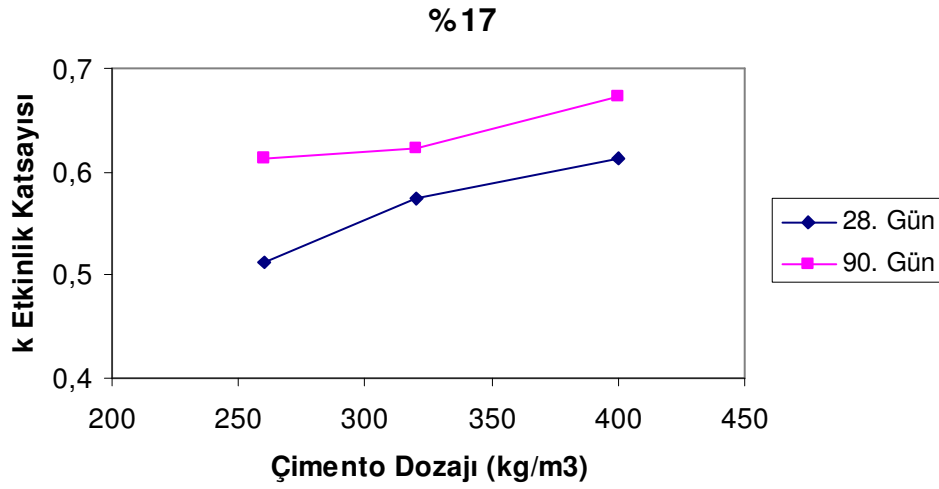
Bu tez çalışmasında yapılmış olan mekanik deneylerin asıl hedefi, bulunan basınç dayanımı değerlerini kullanarak k etkinlik faktörünün hesaplanmasıdır. Bu amaçla 4.2.5.1’de belirtilen Bolomey formülü ve 4.2.5.2’de belirtilen Feret formülü kullanılmıştır. İki formülle de etkinlik faktörünün incelenmesinin sebebi Bolomey formülünde ağırlıkça, Feret formülünde ise mutlak hacim cinsinden k etkinlik faktörünün hesaplanmasıdır. Çıkan sonuçlar kendi aralarında da karşılaştırılmıştır.

5.2.6.1 Bolomey formülüyle k etkinlik faktörü

Çizelge 4.6’da verilen k etkinlik faktörü değerleri Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’te çimento dozajına bağlı olarak verilmiştir.



Şekil 5.13 : k Etkinlik katsayısının çimento dozajıyla değişimi.

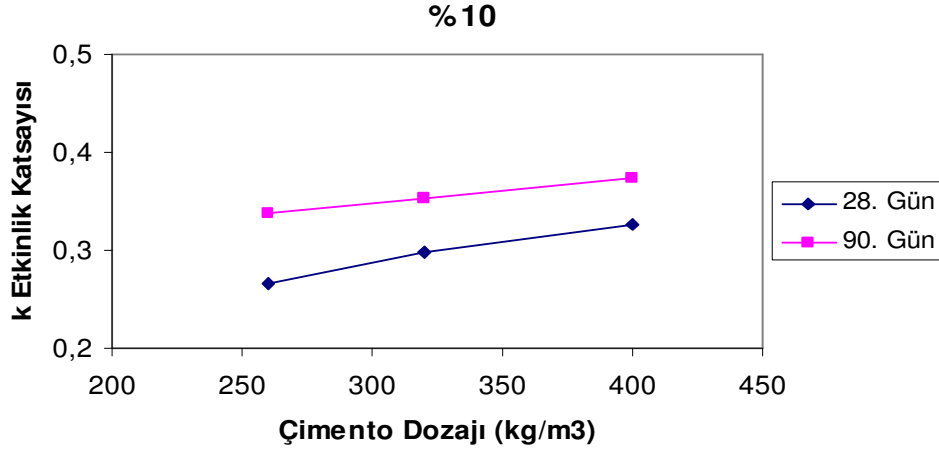


Şekil 5.14 : k Etkinlik katsayısının çimento dozajıyla değişimi.

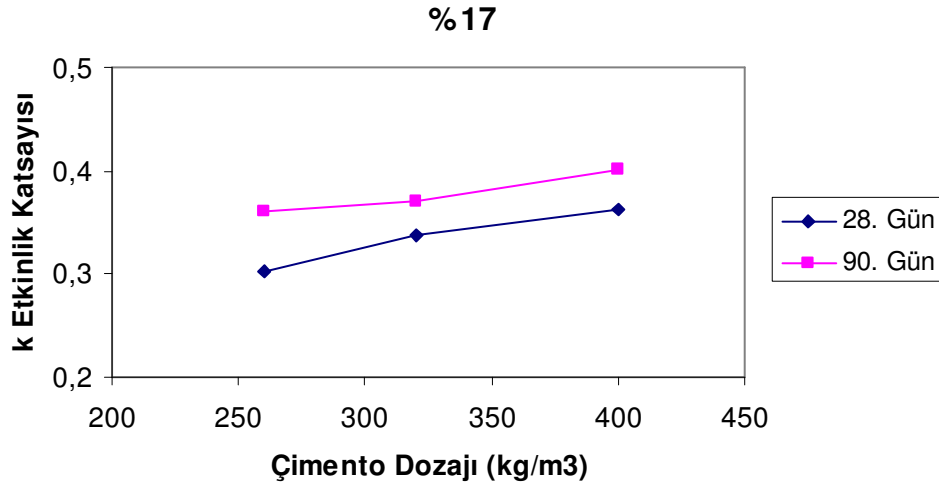
Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'ten görüleceği gibi, etkinlik katsayısı çimento dozajı arttıkça artmaktadır. Buna ilave olarak etkinlik katsayıları erken yaşlarda düşük, ileriki yaşlarda ise daha yüksektir. Bunun sebebi olarak ileriki yaşlarda puzolanik reaksiyonun gerçekleşmesi olarak gösterilebilir.

5.2.6.2 Feret formülüyle k etkinlik faktörü

Çizelge 4.7'de verilen k etkinlik faktörü değerleri Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da çimento dozajına bağlı olarak verilmiştir.



Şekil 5.15 : k Etkinlik katsayısının çimento dozajıyla değişimi.



Şekil 5.16 : k etkinlik katsayısının çimento dozajıyla değişimi.

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'dan görüleceği gibi, Feret formülüyle hesaplanan etkinlik katsayıları da Bolomey formülünde olduğu gibi çimento dozajı arttıkça artmaktadır. Gene aynı şekilde etkinlik katsayıları erken yaşlarda düşük, ileriki yaşlarda ise daha yüksektir. Bunun sebebi olarak ileriki yaşlarda puzolanik reaksiyonun gerçekleşmesi gösterilebilir.

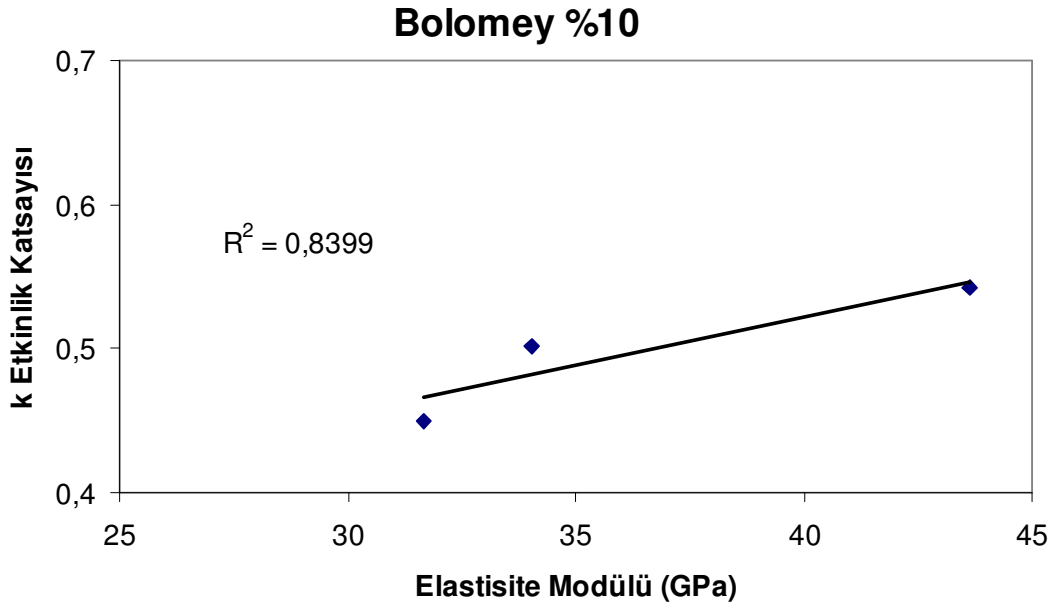
Feret formülüyle hesaplanan etkinlik katsayıları mutlak hacim cinsinden hesaplandığı için, Bolomey formülüyle hesaplanan katsayılardan daha düşük değerler vermişlerdir.

5.2.7 Etkinlik faktörü ile elastisite modülü arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi

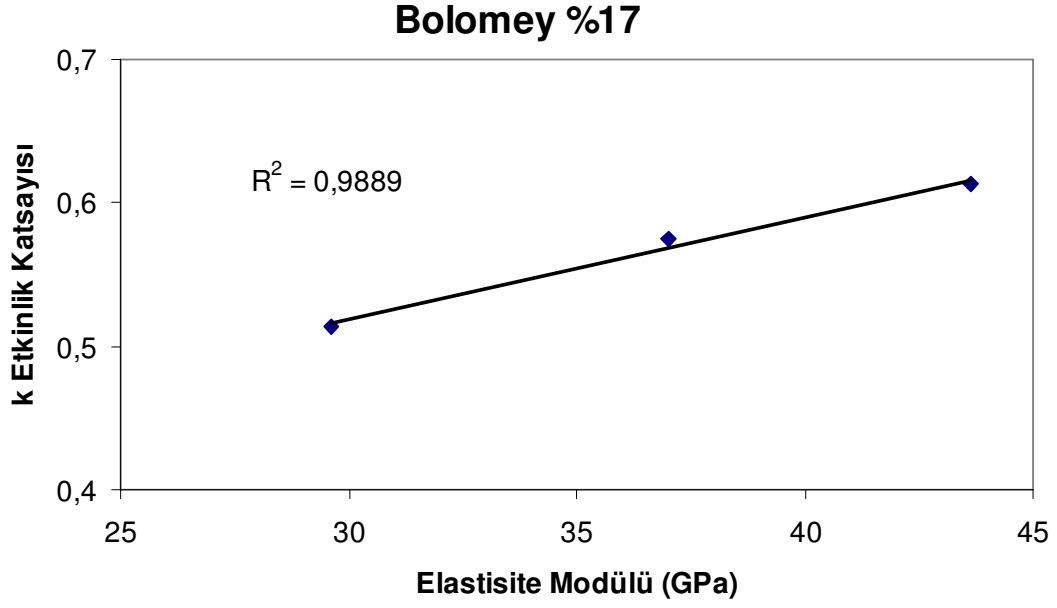
Bu çalışmada ayrıca etkinlik faktörü ile elastisite modülü arasındaki ilişki de incelenmiştir. Bu ilişki Bolomey ve Feret olmak üzere iki ayrı başlık altında incelenmiştir.

5.2.7.1 Bolomey formülüyle etkinlik katsayısı elastisite modülü ilişkisi

Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'den görüleceği gibi, Bolomey formülüyle hesaplanan 28. gündeki etkinlik katsayıları ile elastisite modülü arasında korelasyonu yüksek bir ilişki vardır. Elastisite modülü değeri arttıkça, k etkinlik katsayısı değeri de artmaktadır. Ayrıca ikame edilen kül miktarı arttıkça da korelasyon sayısının arttığı görülmektedir.



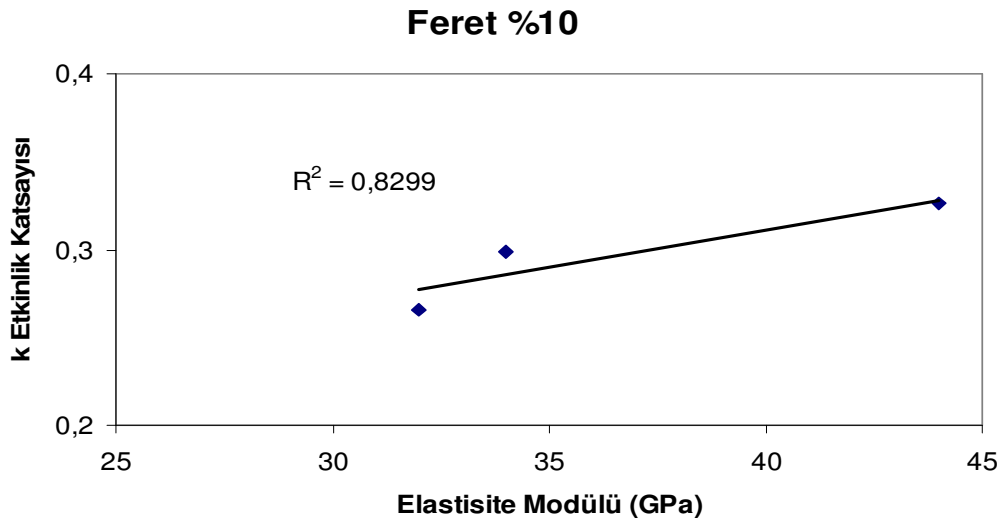
Şekil 5.17 : Bolomey etkinlik katsayısı-Elastisite modülü ilişkisi.



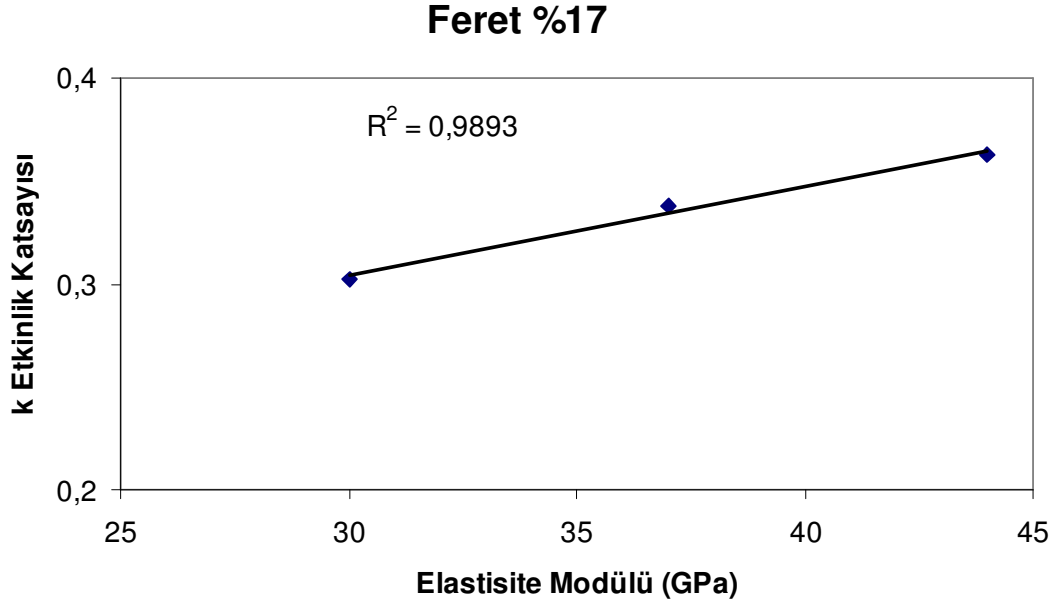
Şekil 5.18 : Bolomey etkinlik katsayısı-Elastisite modülü ilişkisi.

5.2.7.2 Feret formülüyle etkinlik katsayısı elastisite modülü ilişkisi

Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'den görüleceği gibi, Feret formülüyle hesaplanan 28. gündeki etkinlik katsayıları ile elastisite modülü arasında Bolomey formülünde olduğu gibi korelasyonu yüksek bir ilişki vardır. Elastisite modülü değeri arttıkça, k etkinlik katsayısı değeri de artmaktadır. Ayrıca ikame edilen kül miktarı arttıkça da korelasyon sayısının arttığı görülmektedir.



Şekil 5.19 : Feret etkinlik katsayısı-Elastisite modülü ilişkisi.



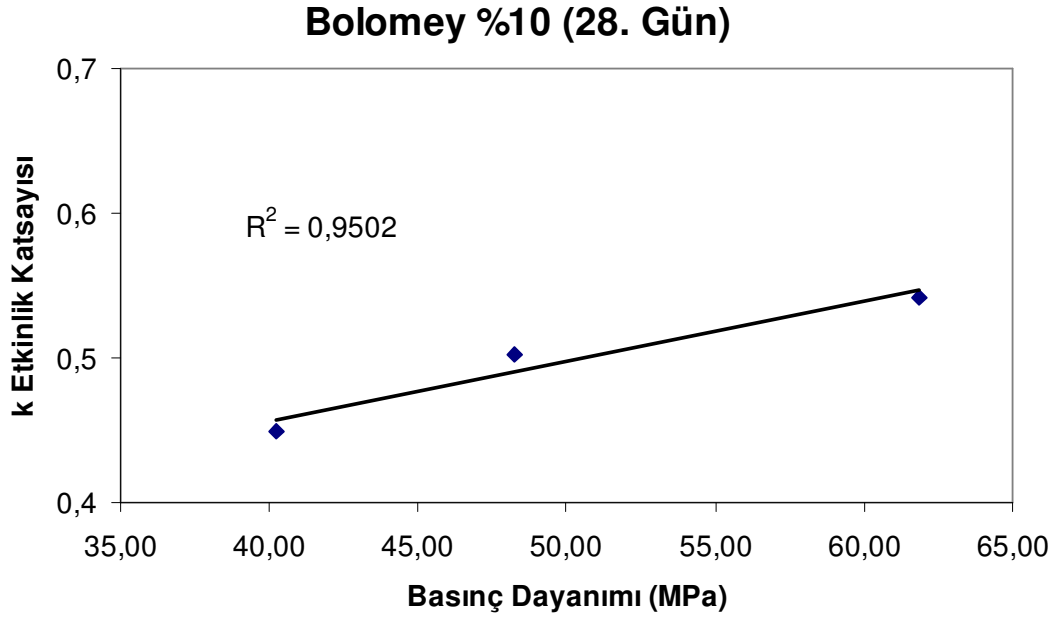
Şekil 5.20 : Feret etkinlik katsayısı-Elastisite modülü ilişkisi.

5.2.8 Etkinlik faktörü ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi

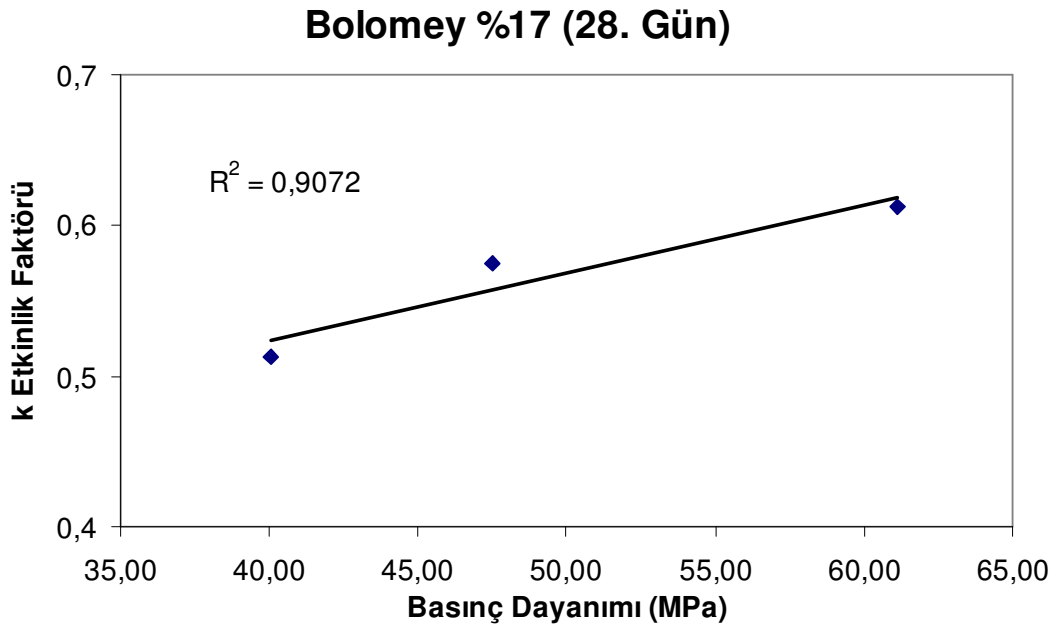
Etkinlik faktörü ile basınç dayanımı arasındaki ilişki de aynı elastisite modülünde olduğu gibi irdelenmiştir. Bu ilişki Bolomey (28. ve 90. günde) ve Feret (28. ve 90. günde) olmak üzere iki ayrı başlık altında incelenmiştir.

5.2.8.1 Bolomey formülüyle etkinlik katsayısı basınç dayanımı ilişkisi

Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'den görüleceği gibi, Bolomey formülüyle hesaplanan 28. gündeki etkinlik katsayıları ile 28. gündeki basınç dayanımları arasında korelasyonu yüksek bir ilişki vardır. Elastisite modülünde olduğu gibi basınç dayanımında da, k etkinlik katsayısı değeri basınç dayanımı arttıkça artmaktadır.

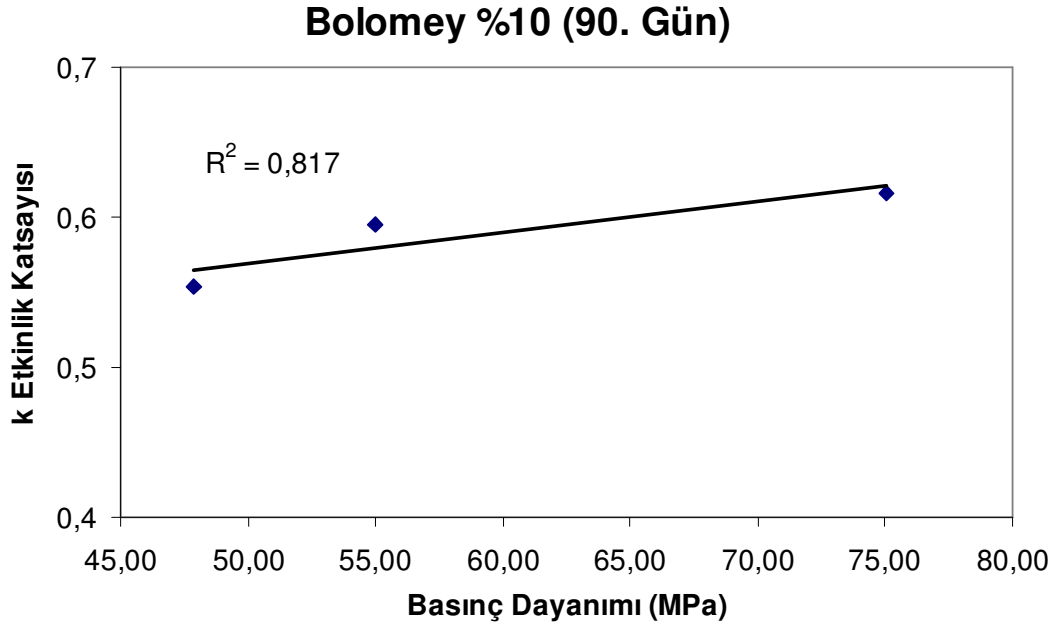


Şekil 5.21 : Bolomey etkinlik katsayısı-Basınç dayanımı (28. gün) ilişkisi.

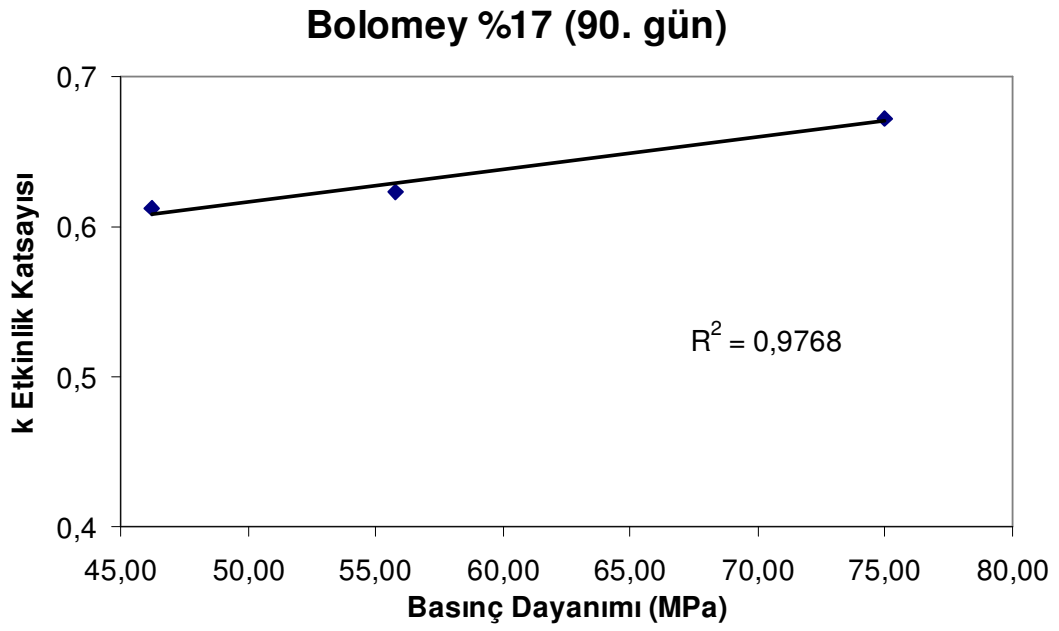


Şekil 5.22 : Bolomey etkinlik katsayısı-Basınç dayanımı (28. gün) ilişkisi.

Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'ten görüleceği gibi, Bolomey formülüyle hesaplanan 90. gündeki etkinlik katsayıları ile 90. gündeki basınç dayanımları arasında korelasyonu yüksek bir ilişki vardır. Elastisite modülünde olduğu gibi basınç dayanımında da, k etkinlik katsayısı değeri basınç dayanımı arttıkça artmaktadır.



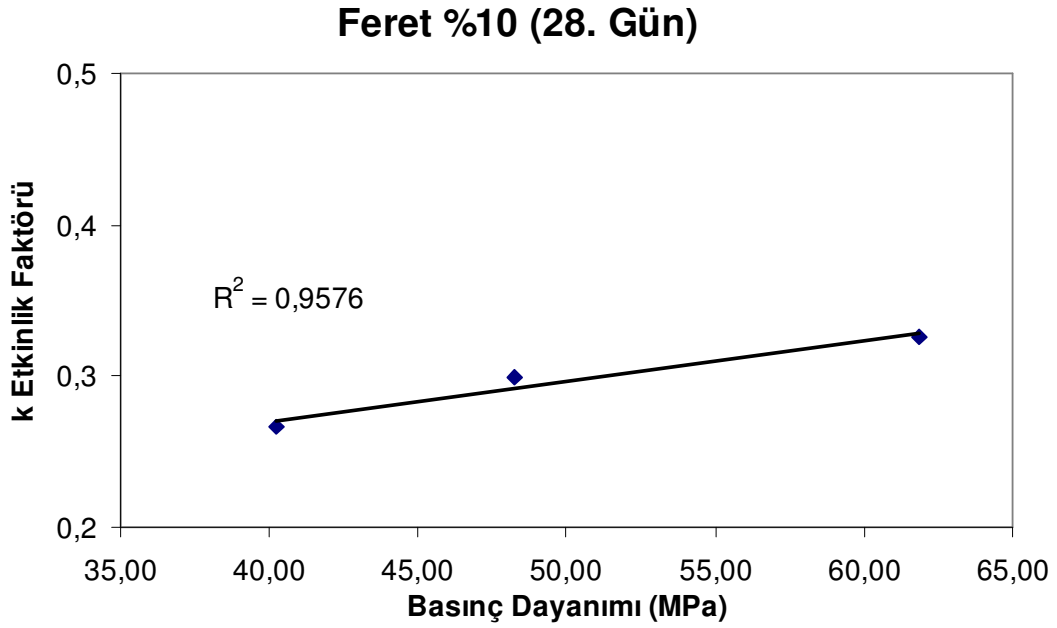
Şekil 5.23 : Bolomey etkinlik katsayısı-Basınç dayanımı (90. gün) ilişkisi.



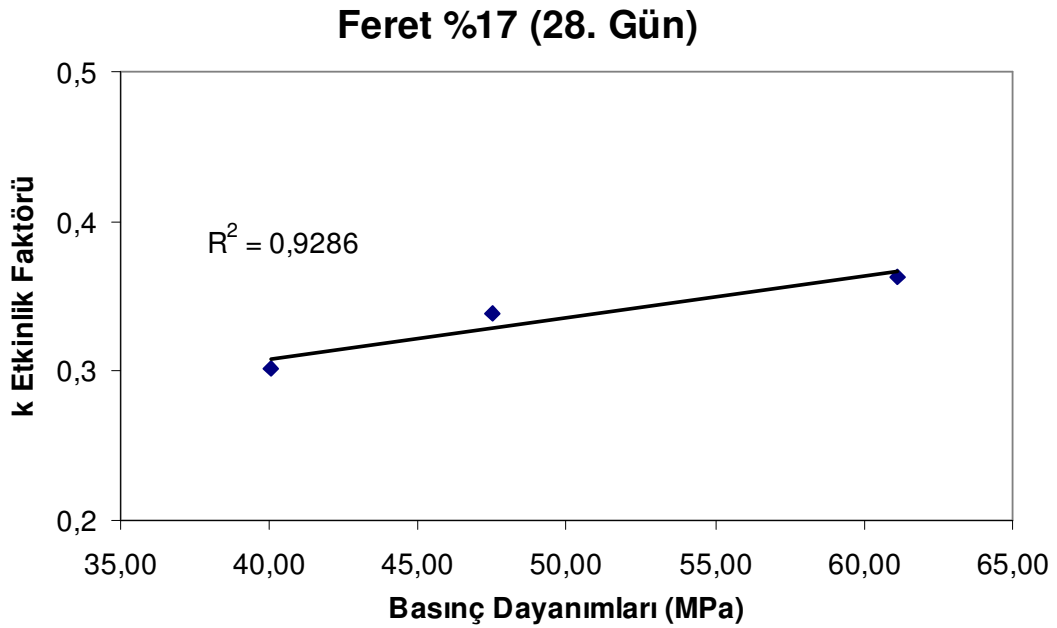
Şekil 5.24 : Bolomey etkinlik katsayısı-Basınç dayanımı (90. gün) ilişkisi.

5.2.8.2 Feret formülüyle etkinlik katsayısı basınç dayanımı ilişkisi

Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'dan görüleceği gibi, Feret formülüyle hesaplanan 28. gündeki etkinlik katsayıları ile 28. gündeki basınç dayanımları arasında korelasyonu yüksek bir ilişki vardır. Elastisite modülünde olduğu gibi basınç dayanımında da, k etkinlik katsayısı değeri basınç dayanımı arttıkça artmaktadır.

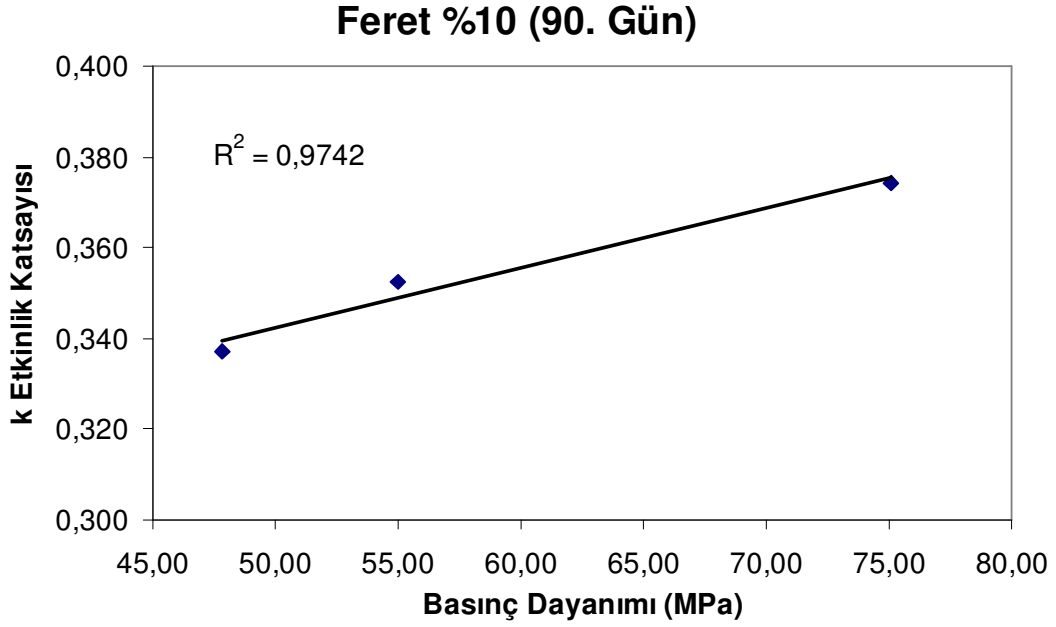


Şekil 5.25 : Feret etkinlik katsayısı-Basınç dayanımı (28. gün) ilişkisi.

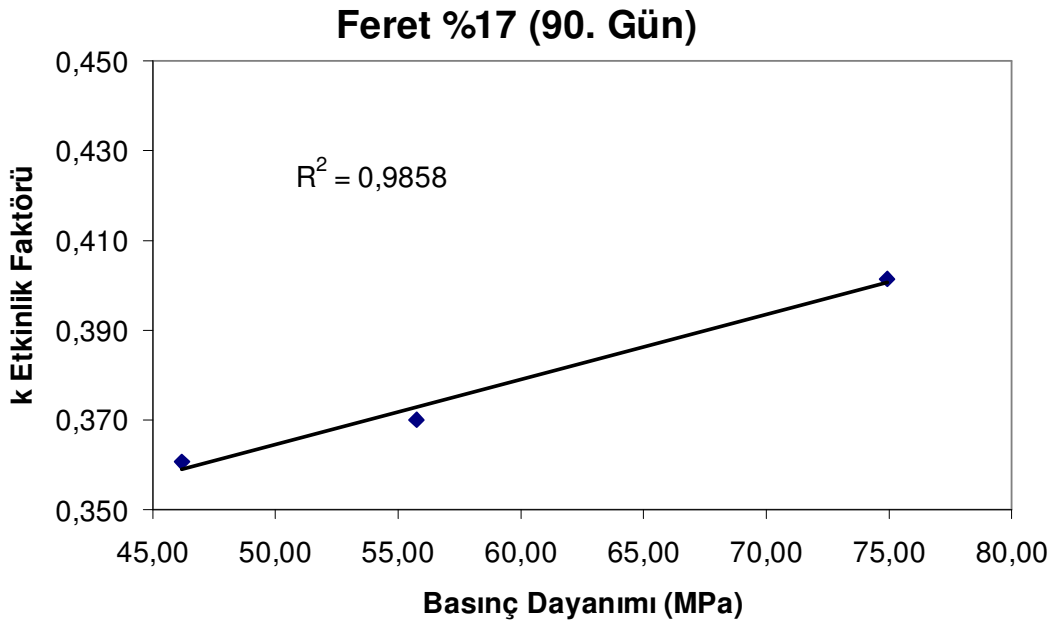


Şekil 5.26 : Feret etkinlik katsayısı-Basınç dayanımı (28. gün) ilişkisi.

Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'den görüleceği gibi, Feret formülüyle hesaplanan 90. gündeki etkinlik katsayıları ile 90. gündeki basınç dayanımları arasında korelasyonu yüksek bir ilişki vardır. Elastisite modülünde olduğu gibi basınç dayanımında da, k etkinlik katsayısı değeri basınç dayanımı arttıkça artmaktadır.



Şekil 5.27 : Feret etkinlik katsayısı-Basınç dayanımı (90. gün) ilişkisi.



Şekil 5.28 : Feret etkinlik katsayısı-Basınç dayanımı (90. gün) ilişkisi.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çatalağzı termik santralinden elde edilen F tipi uçucu külle üretilen betonların mekanik özellikleri incelenmiş ve elde edilen basınç dayanımı sonuçlarından yola çıkılarak k etkinlik faktörü katsayıları hesaplanmıştır. Etkinlik faktörü katsayılarının bulunmasında iki farklı yol izlenmiştir. Birincisinde, çıkarılan çimento ve eklenen uçucu kül ağırlık olarak hesaplanmış, ikincisinde ise bunlar hacim olarak hesaplanmıştır. Bulunmuş olan k etkinlik faktörü değerlerinin, uçucu kül yüzdesine, zamana ve kür şartlarına bağlı olarak almış olduğu değerler irdelenmiştir. Yapılan bu çalışmanın neticesinde ulaşılan sonuçlar ve öneriler aşağıda sıralanmıştır:

1- Taze Beton Deney Sonuçları

Taze beton deneyleri sonucunda, değişik oranlarda F tipi uçucu kül ilave edilmesiyle yani, toplam bağlayıcı oranının artmasıyla, eşit işlenebilirlik için gerekli olan su miktarında artış olmuş, ancak su/toplam bağlayıcı oranlarında, uçucu küllü betonlarda kontrol betonlarına göre azalma olmuştur. Uçucu kül miktarının artmasıyla su/bağlayıcı oranı azalmıştır. Çalışmada kullanılan F tipi uçucu kül, işlenebilirliği iyileştirmiş ve betonda su ihtiyacını azaltmıştır.

2- Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

a- Basınç dayanımı deney sonuçları

Basınç dayanımı deney sonuçlarına göre, F tipi uçucu kül eklenen betonların genel olarak erken yaşlarda (28. günde) kontrol betonuna çok yakın değerler aldığı görülmüştür. İlerki yaşlarda (90. günde) ise uçucu küllü betonların basınç dayanımlarının büyük bir kısmı kontrol betonundan yüksek değerler almıştır. 28. günde kontrol betonuyla aynı basınç dayanımını yakalayan seriler; 260 dozajlı betonlarda çimento ağırlığının %10'u kadar çimento eksiltip yerine 2 katı ağırlıkta uçucu külün ikame edildiği ve çimento ağırlığının %17'si kadar çimento eksiltip

yerine 2 katı ağırlıkta uçucu külün ikame edildiği seri, 320 dozajlı betonlarda çimento ağırlığının %10'u kadar çimento eksiltilip yerine 1,5 katı ağırlıkta uçucu külün ikame edildiği ve çimento ağırlığının %17'si kadar çimento eksiltilip yerine 2 katı ağırlıkta uçucu külün ikame edildiği seri, 400 dozajlı betonlarda çimento ağırlığının %10'u kadar çimento eksiltilip yerine 1,5 katı ağırlıkta uçucu külün ikame edildiği ve çimento ağırlığının %17'si kadar çimento eksiltilip yerine 2 katı ağırlıkta uçucu külün ikame edildiği seri olmuştur. 90. günde ise kontrol betonlarıyla aynı basınç dayanımını yakalayan uçucu küllü betonların 28. gündeki uçucu küllü betonlardan farkı, 260 dozajlı betonlarda çimento ağırlığının %17'si kadar çimento eksiltilip yerine 1,5 katı ağırlıkta uçucu külün ikame edildiği seri, 320 dozajlı betonlarda çimento ağırlığının %10'u kadar çimento eksiltilip yerine aynı ağırlıkta uçucu külün ikame edildiği seri olmuştur. Diğer seriler aynı ikame oranlarında kalmıştır.

b- Ultrases hızı deney sonuçları

F tipi uçucu küllü betonların ultrases hızları hem 28. günde hem de 90. günde kontrol betonuna göre artmıştır. Buna ilave olarak, uçucu küllü betonların ilerki yaşlardaki (90. gün) ultrases hızları, erken yaşlardaki (28. gün) ultrases hızlarından daha yüksek değerler vermiştir. Ayrıca, çucu küllü betonların kompasite değerleri de kontrol betonlarından yüksek çıkmıştır.

c- Elastisite modülü deney sonuçları

F tipi uçucu kül ikamesi, betonlarda elastisite modülünü değiştirmemiştir. Uçucu kül ikame edilen betonların elastisite modülü değerleri kontrol betonuna yakın değerler vermiştir.

d- Etkinlik faktörü sonuçları

Bolomey formülüne göre (ağırlıkça) 260, 320 ve 400 doz çimentolar için hesaplanan k etkinlik faktörü değerleri, 28. günde 0,450-0,613 arasında bulunmuştur. Bu değerler 90. günlük betonlar için artarak 0,553-0,673 arasında çıkmıştır. Feret formülüne göre (hacimce) hesaplanan k etkinlik faktörü değerleri 28. günde 0,266-0,363 ve 90. günde ise 0,337-0,401 arasında çıkmıştır. Bolomey ve Feret formülleri kullanılarak hesaplanan etkinlik katsayıları, çimento dozajının artmasıyla

artmaktadır. Beton yaşının ilerlemesiyle (28.gün-90.gün) de etkinlik katsayılarının artışı devam etmiştir. Çıkarılan çimento miktarına karşılık eklenen uçucu kül miktarı arttıkça, etkinlik katsayılarında artış meydana gelmiştir. Elastisite modülü ve basınç dayanımları arttıkça da etkinlik katsayıları artmıştır.

Yapılmış olan bu çalışma sonucunda, F tipi uçucu kül sınıfına giren Çatalağzı uçucu külünün betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve etkinliği belirlenmiştir. Bu konuda ayrıca farklı tipte ve incelikte (öğütülmüş ve öğütülmemiş) uçucu küller ve değişik dozajlarda çimento kullanılarak betonlar üretilmeli ve bu konuyla ilgili çalışmalar da yapılmalıdır. Yapılacak olan çalışmalar sonucunda hesaplanan k etkinlik faktörü değerleri bu çalışmada hesaplanan değerlerle karşılaştırılmalıdır. Ayrıca varılan yargıları desteklemek için bu çalışmadaki ve yapılacak çalışmalardaki uçucu küllü betonların durabilite özellikleri de çok iyi araştırılarak kullanımlarına karar verilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kocataşkın, F.**, 1991. Betonun dünü, bugünü, yarını, *2.Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, pp. 23-25.
- [2] **Anuk, O.**, 2004. CEM I 42.5 çimentolu düşük dozajlı betonlarda F tipi uçucu külün etkinliği, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü.
- [3] **Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A.**, 2003. Uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı*, Ankara.
- [4] **Özturan, T.**, 1991. Yüksek mukavemetli beton üretiminde mineral katkı maddelerin etkinliği, *2. Ulusal Beton Kongresi*, Ankara, Türkiye, pp. 280-291.
- [5] **ASTM C 618**, 1978. Specification for fly ash & raw or calcined natural pozzolan for use a mineral admixture in portland cement concrete.
- [6] **TS EN 450**, 1998. Uçucu kül, betonda kullanılan tarifler, özellikler ve kalite kontrolü, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [7] **Öner, A.**, 2005. Uçucu kül ve öğütölmüş yüksek fırın cürufu içeren betonların mekanik ve durabilite özellikleri açısından optimum bileşiminin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Kocaeli Üniversitesi.
- [8] **Sivasundaram, V., Carette, G. G. and Malhotra, V. M.**, 1989. Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of low-calcium fly ash, *Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete Volume 1*, Trondheim, Norway, pp. 45-73.
- [9] **Özturan, T.**, 1993. Uluslararası IV. CANMET-ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cürü ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, pp. 57-78.
- [10] **Olek, J. and Diamond, S.**, 1989. Proportioning of Constant Paste Composition Fly Ash Concrete Mixes, *ACI Materials Journal*, 85, pp. 241-247.
- [11] **Schiessl, P. and Härdtl, 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 Pozzolans in Concrete*, Trondheim, Norway, pp. 277-294.
- [12] **Berry, E. E. and Malhotra, V. M.**, 1986. Fly Ash in Concrete, Ottawa, pp. 223-229.
- [13] **Tuygun, C. S.**, 2002. Çayırhan Uçucu Külünün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Faktörünün İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü.

- [14] **Barrow, R. S., Hadchiti, K. M., Carrasquillo, P.M. and Carrasquillo, R. L.,** 1989. Temperatur Rise and Durability of Concrete Containing Fly Ash, *Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete Volume 1*, Trondheim, Norway, pp. 331-347.
- [15] **Yildirim, H. and Sengül, O.,** 2007. Modulus of Elasticity of Low and Normal Quality Concretes, İ.T.Ü., İstanbul, Türkiye.
- [16] **Atahan, H. N., Taşdemir M. A. ve Oktar O. N.,** 2003. Yüksek dayanımlı betonlarda çimento hamurunun boşluk yapısının beton özelliklerine etkisi, İ.T.Ü., İstanbul, Türkiye.
- [17] **Postacıoğlu, B.,** 1986. Bağlayıcı Maddeler Cilt-1, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
- [18] **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.
- [19] **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.
- [20] **Tokyay, M.,** 1993. Betonda Uçucu Kül Kullanımı, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, s.29-36.
- [21] **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 Pozzolans in Concrete*, Trondheim, Norway, pp.1-15.
- [22] **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği,** 2003. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Ankara, Türkiye.
- [23] **TS EN 197-1,** 2002. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [24] **Postacıoğlu, B.,** 1987. Bağlayıcı Maddeler Cilt-2, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
- [25] **Akman, M. S.,** 1987. Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, Türkiye.
- [26] **Langley, W. S., Carrette, G. G. and Malhotra, V. M.,** 1992. Strength Development and Temperature Rise in Large Concrete Blocks Containing High Volumes of Low-Calcium (ASTM Class F) Fly Ash, *ACI Materials Journal*, **89**, pp. 362-368.
- [27] **Haque, M. N., Day, R. L. and Langan, B. W.,** 1988. Realistic Strength of Air-Entrained Concretes with and without Fly Ash, *ACI Materials Journal*, **85**, pp. 241-247.
- [28] **Mehta, P. K. and Gjorv, O. E.,** 1982. Properties of Portland Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica Fume, *Cement and Concrete Research*, **12**, pp. 587-595.

- [29] **Özcan, M.**, 1997. Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Beton Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Katsayılarının Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü.
- [30] **ACI Committee**, 1987. Use of Fly Ash in Concrete, *ACI Materials Journal*, **84**, pp. 381-409.
- [31] **Atış, C. D.**, 2000. Heat Evolution and Drying Shrinkage of Concrete Containing High Volume Fly Ash, *Proceedings of Second International Symposium in Cement and Concrete Technology in the 2000's*, İstanbul, Turkey, September 6-10, pp.359-369.
- [32] **Brooks, J. J. and Farrugia, R.**, 1989. Early-Age Load Deformations of PFA Concrete, *Supplementary Papers of Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete*, Trondheim, Norway, pp.237-251.
- [33] **Akman, M. S. ve Erdiñç, M.**, 1997. Uçucu Küllü Betonlarda Klor Geçirimsizliği, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Eskişehir, Türkiye, s. 1-19.
- [34] **Mangat, P. S. and Khatib, J. M.**, 1995. Influence of Fly Ash, Silica Fume and Slag on Sulfate Resistance of Concrete, *ACI Materials Journal*, **92**, pp. 542-552.
- [35] **Tikalsky, P. J. and Carrasquillo, R. L.**, 1992. Influence of Fly Ash on the Sulfate Resistance of Concrete, *ACI Materials Journal*, **89**, pp. 69-75.
- [36] **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 Pozzolans in Concrete*, Trondheim, Norway, pp.459-485.
- [37] **Kobayashi, S., Hozumi, Y., Nakano, T. and Yanagida, T.**, 1989. Study on the Effect of the Quality of Fly Ash for Controlling Alkali – Aggregate Reactions, *Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete Volume 1*, Trondheim, Norway, pp.417-430.
- [38] **Onabolu, O. A.**, 1989. Some Properties of Crude Oil-Soaked Concrete – I. Exposure at Ambient Temperature, *ACI Materials Journal*, **86**, pp. 150-158.
- [39] **Malhotra, V. M., Zang, M. H. and Leaman, G. H.**, 2000. Long-Term Performance of Steel Reinforcing Bars in Portland Cement Concrete Incorporating Moderate and High Volumes of ASTM Class F Fly Ash, *ACI Materials Journal*, **97**, pp. 409-417.
- [40] **Pekmezci, B. Y. ve Uyan, M.**, 2001. Uçucu Küllerde Etkinlik Faktörü Kavramı, *Hazır Beton*, Mayıs-Haziran 2001, s. 65-68.
- [41] **Smith, I. A.**, 1967. The Design of Fly Ash Concretes, *Proc Inst Civil Engineers*, London, England, pp. 769-790.
- [42] **Akman, S. M. and Yücel, K. T.**, 1995. Efficiency Factors of Turkish C Class Fly Ashes, *Türkiye Hazır Beton Birliği XI. Beton Kongresi*, İstanbul, Türkiye.

- [43] **Güler, H.**, 1994. Uçucu Küllü Betonlarda Bağlayıcı Dozajı ve Bileşiminin Geçirimsizliğe Etkisi, *Lisans Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
- [44] **Babu, K. G. and Rao, G. S. N.**, 1993. Efficiency of Fly Ash in Concrete, *Cement and Concrete Composites*, **15**, pp. 223-229.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: SADIK KEREM KARATEKE

Doğum Yeri ve Tarihi: İSTANBUL 25.11.1982

Lisans Üniversite: İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ İNŞAAT FAKÜLTESİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ (2002-2007)

Lise: İSTANBUL LİSESİ (1999-2002)

Ortaokul: İSTANBUL LİSESİ (1994-1999)