

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

C TİPİ UÇUCU KÜLLERİN ETKİNLİĞİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Emrah GÜRBÜZ**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

HAZİRAN 2009

C TİPİ UÇUCU KÜLLERİN ETKİNLİĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Emrah GÜRBÜZ
(501071030)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 05 Haziran 2009

Tez Danışmanı : Yard. Doç. Dr. Hasan YILDIRIM (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR (İTÜ)
Prof. Dr. Fevziye AKÖZ (YTÜ)

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, C tipi uçucu küllerin etkinlik faktörleri araştırılmıştır.

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübelerine başvurduğum hocam Yard. Doç. Dr. Hasan Yıldırım'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu çalışmada çimento temini konusundaki yardımlarından ötürü Akçansa Çimento A.Ş.'ne, akışkanlaştırıcı temini konusundaki yardımlarından ötürü İnka Kimya San. Tic. Ltd. Şti.'ne ve üretim ve test aşamalarındaki yardımlarından ötürü İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Malzeme Laboratuvarı personeline teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2009

Emrah Gürbüz

İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Beton Katkı Maddeleri	3
2.2 Puzolanlar	4
2.1.1 Puzolanların tanımı, kısa tarihi ve sınıflandırılması.....	4
2.1.2 Puzolanik reaksiyon	7
2.3 Uçucu Küller.....	8
2.3.1 Uçucu küller hakkında genel bilgiler	8
2.3.2 Uçucu küllerin sınıflandırılması.....	10
2.3.3 Uçucu küllerin fiziksel özellikleri.....	11
2.3.4 Uçucu küllerin kimyasal ve minerolojik özellikleri.....	12
2.3.5 Uçucu küllerin taze beton özelliklerine etkisi.....	14
2.3.5.1 Uçucu küllerin taze betonun işlenebilirliği üzerindeki etkisi	14
2.3.5.2 Uçucu küllerin taze betonun priz süresi üzerindeki etkisi	17
2.3.5.3 Uçucu küllerin taze betonun hidrasyon ısı ve sıcaklık yükselmesi	
üzerindeki etkisi	18
2.3.5.4 Uçucu küllerin taze betonda hava sürüklenmesi üzerindeki etkisi	20
2.3.6 Uçucu küllerin sertleşmiş beton özelliklerine etkisi	21
2.3.6.1 Uçucu küllerin betonun dayanımı üzerindeki etkisi	21
2.3.6.2 Uçucu küllerin betonun elastisite modülü üzerindeki etkisi	26
2.3.6.3 Uçucu küllerin betonun sünme ve rötresi üzerindeki etkisi	26
2.3.7 Uçucu küllerin betonun dayanıklılığı üzerindeki etkisi.....	27
2.3.7.1 Uçucu küllerin betonun sülfat etkisine olan dayanıklılığı üzerindeki	
etkisi	28
2.3.7.2 Uçucu küllerin alkali-agrega reaksiyonu üzerindeki etkisi	29
2.3.7.3 Uçucu küllerin donma-çözülme üzerindeki etkisi	29
2.3.7.4 Uçucu küllerin betonun geçirimsizliği üzerindeki etkisi	30
2.3.7.5 Uçucu küllerin betonda karbonatlaşma üzerindeki etkisi	30
2.3.7.6 Uçucu küllerin donatı korozyonu üzerindeki etkisi	31
2.3.8 Uçucu küllü betonlarda karışım oranlama metotları	32
2.3.8.1 Çimento yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması (Basit ikame	
metodu)	33

2.3.8.2 Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması	34
2.3.8.3 Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine konulması (Kısmi ikame metodu)	34
Modifiye edilmiş ikame metodu	34
Rasyonel oranlama metodu	35
2.3.9 Uçucu küllerin etkinliği ve k etkinlik faktörü ile ilgili yapılmış olan çalışmalar	35
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	45
3.1 Üretilen Betonların Özellikleri	45
3.2 Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	47
3.2.1 Agrega özellikleri.....	47
3.2.1.1 Doğal kum	47
3.2.1.2 Kırma kum	47
3.2.1.3 Kırmataş 1	47
3.2.1.4 Kırmataş 2	47
3.2.1.5 Karışım	48
3.2.2 Çimento özellikleri.....	49
3.2.3 Uçucu kül özellikleri	50
3.2.4 Karışım suyu özellikleri	51
3.2.5 Akışkanlaştırıcı özellikleri	52
3.3. Beton Üretimi ve Saklanması	53
3.4. Taze Beton Deneyleri.....	53
3.4.1 Birim ağırlık deneyi	53
3.4.2 Çökme deneyi	54
3.4.3 Hava ölçme deneyi.....	54
3.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri	54
3.5.1 Basınç dayanımı deneyi	55
3.5.2 Elastisite modülü deneyi	55
3.5.3 Ultrases hızı deneyi.....	55
4. DENEY SONUÇLARI	57
4.1 Taze Beton Deneyleri Sonuçları	57
4.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri Sonuçları	59
3.4.1 Basınç dayanımı deneyi sonuçları	59
3.4.1 Elastisite modülü deneyi sonuçları	61
3.4.1 Ultrases hızı deneyi sonuçları.....	62
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	63
5.1 Taze Beton Deney Sonuçlarının İncelenmesi.....	63
5.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının İncelenmesi	64
5.2.1 Basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişkinin incelenmesi.....	64
5.2.2 Basınç dayanımı ve elastisite modülü ile su/çimento ve su/bağlayıcı oranları arasındaki ilişkinin incelenmesi	64
5.2.3 Basınç dayanımı ve elastisite modülü ile ultrases hızı arasındaki ilişkinin incelenmesi.....	68
5.2.4 Etkinlik faktörünün hesaplanması ve hesaplanan k etkinlik faktörü değerlerinin incelenmesi	70
5.2.5 Uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların basınç dayanımları arasındaki ilişkinin incelenmesi	80
5.2.6 Uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların elastisite modülleri arasındaki ilişkinin incelenmesi	82

5.2.7 Uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların ultrases hızları arasındaki ilişkinin incelenmesi.....	85
6. SONUÇLAR.....	89
KAYNAKLAR.....	93
ÖZGEÇMİŞ.....	97

KISALTMALAR

ACI	: American Concrete Institute
ASTM	: American Society For Testing and Materials
CANMET	: The Canada Center for Mineral and Energy Technology
CEN	: The European Standart Organization
TS	: Türk Standartları
UK	: Uçucu Kül

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	: Puzolanların sınıflandırılması ve türleri.....	6
Çizelge 2.2	: TS639'a göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri.....	13
Çizelge 2.3	: Türkiye'deki bazı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları	14
Çizelge 2.4	: Yüksek kireç içeren uçucu küllerin dayanım kazanımına etkisi	23
Çizelge 2.5	: Çimento dozajı ve uçucu kül miktarına göre k etkinlik değerleri	41
Çizelge 2.6	: Tsimas'ın uçucu küller için tespit etmiş olduğu etkinlik faktörleri....	42
Çizelge 3.1	: Üretilen beton serilerinin kodlanması	46
Çizelge 3.2	: Kullanılan agregaların özgül ve birim ağırlıkları	48
Çizelge 3.3	: Agregaelek analizleri ve karışım granülometrisi	48
Çizelge 3.4	: Çimentonun fiziksel özellikleri	49
Çizelge 3.5	: Çimentonun basınç dayanımı sonuçları	50
Çizelge 3.6	: Çimentonun kimyasal bileşimi	50
Çizelge 3.7	: Uçucu külün özellikleri	51
Çizelge 3.8	: Uçucu külün puzolanik aktivitesi	51
Çizelge 3.9	: Beton karışımlarında kullanılan akışkanlaştırıcıların türleri ve oranları	52
Çizelge 3.10	: Akışkanlaştırıcı özellikleri	53
Çizelge 4.1	: Taze beton deney sonuçları	57
Çizelge 4.2	: Gerçek beton bileşimleri	58
Çizelge 4.3	: Numunelerin su/çimento, su/bağlayıcı oranları ve kompasite miktarları	59
Çizelge 4.4	: Üretilen numunelerin basınç dayanımı değerleri.....	60
Çizelge 4.5	: Üretilen numunelerin elastisite modülü değerleri.....	61
Çizelge 4.6	: Üretilen numunelerin ultrases hızı değerleri	62
Çizelge 5.1	: Uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların taze beton deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	63
Çizelge 5.2	: 28 günlük uçucu külsüz betonlar için bulunan Bolomey katsayıları..	70
Çizelge 5.3	: 90 günlük uçucu külsüz betonlar için bulunan Bolomey katsayıları..	70
Çizelge 5.4	: Uçucu küllü betonların k etkinlik faktörleri	74
Çizelge 5.5	: Çimento dozajına göre bağıl k etkinlik faktörleri.....	79
Çizelge 5.6	: Eksiltelen çimento oranına göre bağıl k etkinlik faktörleri	80

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Uçucu külün betonun dayanım kazanımı üzerindeki etkisi	22
Şekil 2.2 : Uçucu kül kompozisyonunun basınç dayanımı üzerindeki etkisi	24
Şekil 2.3 : 28 günlük numunelerin Bolomey formülüne göre k etkinlik faktörleri..	39
Şekil 2.4 : 180 günlük numunelerin Bolomey formülüne göre k etkinlik faktörleri	40
Şekil 3.1 : Karışım granülometri eğrisi	49
Şekil 5.1 : Deney numunelerinin basınç dayanımları ile elastisite modülleri arasındaki ilişki.....	64
Şekil 5.2 : 28 günlük küp numunelerin basınç dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişki.....	65
Şekil 5.3 : 90 günlük küp numunelerin basınç dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişki.....	65
Şekil 5.4 : 28 günlük küp numunelerin basınç dayanımı ile su/bağlayıcı oranı arasındaki ilişki.....	66
Şekil 5.5 : 90 günlük küp numunelerin basınç dayanımı ile su/bağlayıcı oranı arasındaki ilişki.....	66
Şekil 5.6 : Deney numunelerinin elastisite modülleri ile su/çimento oranları arasındaki ilişki.....	67
Şekil 5.7 : Deney numunelerinin elastisite modülleri ile su/bağlayıcı oranları arasındaki ilişki.....	67
Şekil 5.8 : Silindir numunelerde basınç dayanımı ile ultrases hızı arasındaki ilişki	68
Şekil 5.9 : 28 günlük küp numunelerde basınç dayanımı ile ultrases hızı arasındaki ilişki	68
Şekil 5.10 : 90 günlük küp numunelerde basınç dayanımı ile ultrases hızı arasındaki ilişki	69
Şekil 5.11 : Silindir numunelerde elastisite modülü ile ultrases hızı arasındaki ilişki	69
Şekil 5.12 : 28 günlük 260 çimento dozajlı numunelerde eklenen uçucu kül yüzdesine göre basınç dayanımının değişimi.....	71
Şekil 5.13 : 28 günlük 320 çimento dozajlı numunelerde eklenen uçucu kül yüzdesine göre basınç dayanımının değişimi.....	72
Şekil 5.14 : 28 günlük 400 çimento dozajlı numunelerde eklenen uçucu kül yüzdesine göre basınç dayanımının değişimi.....	72
Şekil 5.15 : 90 günlük 260 çimento dozajlı numunelerde eklenen uçucu kül yüzdesine göre basınç dayanımının değişimi.....	73
Şekil 5.16 : 90 günlük 320 çimento dozajlı numunelerde eklenen uçucu kül yüzdesine göre basınç dayanımının değişimi.....	73
Şekil 5.17 : 90 günlük 400 çimento dozajlı numunelerde eklenen uçucu kül yüzdesine göre basınç dayanımının değişimi.....	74
Şekil 5.18 : 28 Günlük numunelerde k etkinlik faktörünün çimento eksiltme yüzdesine ve çimento dozajına göre değişimi.....	75
Şekil 5.19 : 90 Günlük numunelerde k etkinlik faktörünün çimento eksiltme yüzdesine ve çimento dozajına göre değişimi.....	75

Şekil 5.20 : %10 çimento eksiltilmiş numunelerde k etkinliğinin zamana ve çimento dozajına göre değişimi.....	76
Şekil 5.21 : %17 çimento eksiltilmiş numunelerde k etkinliğinin zamana ve çimento dozajına göre değişimi.....	77
Şekil 5.22 : Etkinlik katsayısı ile elastisite modülü arasındaki ilişki.....	78
Şekil 5.23 : 28 günlük numunelerin k etkinlik değerlerinin w/c ve w/b oranlarına göre değişimi.....	78
Şekil 5.24 : 90 günlük numunelerin k etkinlik değerlerinin w/c ve w/b oranlarına göre değişimi.....	79
Şekil 5.25 : 28 günlük küp numunelerde uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	81
Şekil 5.26 : 90 günlük küp numunelerde uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	81
Şekil 5.27 : Uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların elastisite modüllerinin karşılaştırılması	83
Şekil 5.28 : Uçucu külsüz betonlar ile uçucu küllü betonlarla aynı basınç dayanımı değerlerine ulaşan uçucu küllü betonların elastisite modüllerinin karşılaştırılması	84
Şekil 5.29 : Silindir numunelerde uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların ultrases hızlarının karşılaştırılması.....	85
Şekil 5.30 : 28 günlük küp numunelerde uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların ultrases hızlarının karşılaştırılması	85
Şekil 5.31 : 90 günlük küp numunelerde uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların ultrases hızlarının karşılaştırılması	86
Şekil 5.32 : 28 günlük uçucu külsüz betonlarla, uçucu küllü betonlar ile aynı basınç dayanımı değerlerine ulaşan uçucu küllü betonların ultrases hızlarının karşılaştırılması	86
Şekil 5.33 : 90 günlük uçucu külsüz betonlarla, uçucu küllü betonlar ile aynı basınç dayanımı değerlerine ulaşan uçucu küllü betonların ultrases hızlarının karşılaştırılması	87

SEMBOL LİSTESİ

C°	: Santigrat Derecesi
µm	: Mikrometre
σ	: Basınç Dayanımı
k	: Etkinlik Faktörü
φ	: Uçucu Kül / Çimento Oranı
K_B	: Bolomey katsayısı
K_F	: Feret katsayısı
C	: Çimento miktarı
W	: Beton Karışımındaki Su Miktarı
P	: Beton Karışımında Kullanılan Uçucu Kül Miktarı
B	: Beton Karışımında Bulunan Toplam Bağlayıcı Miktarı

C TİPİ UÇUCU KÜLLERİN ETKİNLİĞİ

ÖZET

Uçucu kül, kömürle çalışan termik santrallerin bir yan ürünü olup, betonda bir kısım bağlayıcı olarak veya filler dolgu olarak kullanılan puzolanik etkili bir mineral katkı türüdür. Elde edildikleri kaynağa göre, uçucu küller portland çimentosuna göre daha ince bir tane yapısına sahip olabilirler. Betonun taze ve sertleşmiş özelliklerini iyileştirme potansiyelleri ve ekonomik avantajları ile uçucu kül, beton endüstrisi için oldukça yararlı bir katkı maddesidir. Ancak, betonda kullanılan uçucu külün özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, C tipi uçucu küllerin etkinliği araştırılmıştır. Yüksek kireçli uçucu küller olarak da bilinen C tipi uçucu küller, içerdikleri yüksek kireç oranı sebebiyle bir miktar bağlayıcılık özelliği göstererek, erken yaşlarda bile sadece portland çimentosunun bağlayıcı olarak kullanıldığı betonlara benzer mekanik özellikler gösterebilirler.

Uçucu külün etkinliğinin saptanabilmesi için uçucu küllü ve uçucu külsüz beton serileri üretilmiştir. Üretimde C tipi uçucu kül ve CEM I 42.5 çimentosu kullanılmıştır. 18 seri uçucu küllü beton ve 3 seri kontrol betonu üretilmiştir. Her seride 6 adet 15x15x15 cm boyutlarında küp numune ile 3 adet 20 cm uzunluğa ve 10 cm çapa sahip silindir numune üretilmiştir. 3 çimento dozajı (260, 320, 400 kg/m³), 2 çimento eksiltme oranı (%10, %17) ve 3 uçucu kül ekleme oranı (eksiltelen çimento oranına göre değişmiştir) kullanılmıştır. Taze beton deneyleri olarak çökme, birim ağırlık ve hava içeriğini belirleme deneyleri gerçekleştirilmiş, numuneler, sertleşmiş beton deney gününe kadar 23 C° suda kür edilmiştir. Basınç dayanımı, elastisite modülü ve ultrases hızı deneyleri, 28 ve 90 günde numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Su/çimento oranları ve basınç dayanımı değerleri kullanılarak Bolomey formülü yardımıyla C tipi uçucu küllerin etkinliği hesaplanmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda uçucu külün betonun işlenebilirliğine bir miktar olumlu etkide bulunduğu ve su ihtiyacını azalttığı görülmüştür. Elastisite modülü deneyleri sonucunda uçucu küllerin betonun elastisite modülü üzerinde çok önemli bir etki yapmadıkları görülmüştür. Ultrases hızı deneylerinin sonucunda uçucu külün betonun ultrases hızını arttırdığı görülmüştür. 320 kg/m³ çimento dozajına sahip olan betonlarda, eksiltelen çimento miktarı kadar uçucu kül eklenen numunelerin, kontrol betonuyla aynı basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. 260 ve 400 kg/m³ çimento dozajına sahip olan betonlarda ise %10 ve %17 çimento azaltılmış, %15 ve %25,5 uçucu kül eklenmiş numunelerin kontrol betonuyla aynı basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Deney sonuçlarına göre çimento dozajı arttıkça uçucu külün etkinliği yükselmektedir. Uçucu kül etkinliğini çimento eksiltme oranı da etkilemiştir. %17 çimento eksiltelen numunelerde, %10 çimento eksiltilenlere nazaran daha yüksek k etkinlik değerleri tespit edilmiştir. Düşük çimento

dozajlarında uçucu külün etkinliği 0,39 ve 0,43 arasında değişirken, yüksek çimento dozajlarında bu değer 0,58 civarına kadar yükselmiştir.

EFFICIENCY OF C TYPE FLY ASHES

SUMMARY

Fly ashes, which are obtained from thermal power plants, are pozzolanic mineral admixtures that can be used as partial replacement binder or filler. Depending on their sources, fly ash particles may be finer than portland cement particles. With their economical advantages and potential for improving fresh and hardened concrete performance, they have some benefits for using in concrete industry. It is very important to determine fly ash properties for assessing their suitability to use them in concrete mixtures.

In this study, the objective was to find the efficiency factors of Turkish C type fly ashes. C type fly ashes also known as high calcium fly ashes, have some cementitious properties that even in early ages, concrete with fly ash admixtures can show mechanical properties like the concretes consisting of only portland cement.

In order to find the efficiency factor of fly ash, series of concrete samples with and without fly ash are produced. In these samples, C type fly ashes and CEM I 42.5 cement were used. 18 series of concretes containing fly ash and 3 series of control mixtures were produced. In each series, 6 cube specimens (15x15x15 cm) and 3 cylinder specimens (20 cm length and 10 cm radius) were produced. Three different cement dosages were used (260, 320, 400 kg/m³), two different ratios (10% and 17%) of cement reduced from the control concretes and three different ratios (depending on cement reduction ratio) of fly ash were added into the mixtures. Slump, fresh density and the air content of fresh concrete were obtained. After casting the specimens were cured in 23 C° water until testing. At the ages of 28 and 90 days, compressive strength, elasticity modulus and ultrasound velocity tests were carried out. From the compressive strength results and water/cement ratios, the k efficiency factors of C type fly ashes were obtained using Bolomey formula.

The test results show that C type fly ashes improves workability of concrete slightly and reduces the water requirement of the concrete. The results show that elasticity modulus of fly ash concretes were similar to the control concretes. The ultrasound velocity measurements show that fly ash increases ultrasound velocity of the concrete at noticeable rates. The compressive strength of fly ash concretes at 320 kg/m³ cement dosage that the mass of added fly ash is equal to the mass of reduced cement, had same strength values compared to the control for these fly ashes. For 260 and 400 kg/m³ cement dosages, the fly ash specimens that 10% and 17% cement reduced, 15% and 25,5% fly ash added, had same strength values compared to the control concretes for these fly ashes. According to test results, the k efficiency factor increases as the cement dosage in the concrete increases. The cement reduction ratio is also important in the efficiency of fly ashes. 17% cement reduced specimens had higher values of k efficiency compared to 10% cement reduced specimens. At low

cement dosage changes, k values vary from 0.39 to 0.43. At higher cement dosages, it reaches the value of 0.58.

1.GİRİŞ

Günümüzde bir yapının sağlam ve dayanıklı olması tek başına yeterli değildir. Yapının aynı zamanda estetik ve ekonomik olması da beklenildiği için betonda işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık gibi özellikler iyileştirilmeye çalışılırken ekonomik olarak üretilmesi de önemli bir faktördür.

Betonda en çok kullanılan malzeme olan portland çimentosunda bulunan belli başlı elemanlar; kireç, silis, alümin ve demiroksit'tir. Portland çimentosunda en çok bulunan eleman ise kireçtir. Bağlayıcı maddelerin en önemli elemanı olan kireç, CaCO_3 ün 900 C°'nin üstünde pişirilmesi ile elde edilen amorf bir görünüşe sahip beyaz bir cisimdir. Silis, alümin ve demir oksitle birleşme özelliği vardır [1]. Kirecin bağlayıcılık özelliği uzun zaman öncesinden beri bilinmektedir. Mısır, Yunan ve Roma kalıntılarında kireç harçlarına rastlanmıştır. Roma kalıntılarında rastlanan, suda sertleşebilen kireç-puzolan karışımları yakın çağlarda harç ve beton karışımları olarak devam etmişlerdir. Kimyasal analiz metotlarının geliştiği yeni çağlarda ise su kireci, tabii çimento, portland çimentosu gibi yüksek kaliteli bağlayıcı maddeler hızla gelişmiş ve betonun hidrasyonu, hidrasyon ısı, priz süresi, sünme ve rötresi gibi özellikleri üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Son yıllarda bu gelişmeleri betonda katkı maddelerinin kullanılması ve uçucu kül, silis dumanı, pirinç kabuğu külü gibi atıkların kullanılması gibi yenilikler izlemiştir [2].

Düşük kalorili linyit kömürlerinin yakıldığı termik santrallerde toz haldeki kömür yandıktan sonra ortaya uçucu kül denilen atık bir ürün ortaya çıkar. Uçucu küller termik santrallerin bacalarından atmosfere karışmadan önce elektrofiltreler sayesinde toplanırlar [3]. Türkiye'de bir yılda yaklaşık 45 milyon ton kömür yakılmakta ve ortalama 15 milyon ton uçucu kül üretilmektedir [4]. Ancak ortaya çıkan bu uçucu külün kullanımı oldukça sınırlıdır.

Uçucu küller değerlendirilmedikleri zaman, atık bir malzeme olacaklarından çevre kirliliğine yol açabilmektedirler. Uçucu külün beton endüstrisinde kullanılmasıyla, hem çimento kullanımının bir miktar azalması, hem de atık bir yan ürün olan uçucu külün değerlendirilmesiyle çevre kirliliğinin azalması sağlanmış olacaktır. Ayrıca,

başta da belirttiğimiz gibi betonun ekonomik olarak üretilmesi açısından zaten atık bir endüstri ürünü olan uçucu külün kullanılması hem üretilen betonun maliyetini düşürür hemde ülke ekonomisine katkı sağlanmış olur. Uçucu kül, puzolanik özelliği sayesinde betonun dayanımı ve dayanıklılığı açısından çeşitli yararlar sağladığı gibi hidrasyon ısını düşürdüğü için büyük kütle beton inşaatlarında kullanılması önemli bir fayda sağlamaktadır.

Uçucu küllerin kullanılmaya başlaması ile birlikte bir çok akademik araştırma yapılmış ve uçucu külün taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkisi anlaşılmaya çalışılmıştır. Uçucu külün çimentonun yerine kullanılması durumunda ne kadar etkin olduğu bir başka deyişle ne kadar miktarda çimentonun yerine kullanılarak hedeflenen beton özelliklerinin elde edilebileceğinin tespit edilmesi elbette uçucu kül kullanımındaki en önemli sorudur. Bu sorunun cevabını bulabilmek için yapılan sayısız çalışma kesin bir sonuca ulaşmasa da uçucu külün etkinliği konusunda az çok fikir edinmemiz mümkün olabilmektedir. Bu da ilerleyen zamanlarda uçucu kül kullanımını olumlu yönde etkileyebilecek bir durumdur.

Bu çalışmada; C tipi uçucu küllerin etkinliği araştırılacaktır. C tipi uçucu küller yüksek kireçli küller oldukları için puzolanik özellikleri yanında bir miktar bağlayıcılık özelliğine de sahiptirler. Çalışmada kullanılan çimento Akçansa firmasından, C tipi uçucu kül ise Çayırhan Termik Santrali'nden elde edilmiştir. Uçucu kül etkinliğinin; çimento dozajına ve çimento ile yer değiştiren uçucu kül oranına göre değişimini belirleyebilmek için; toplam 18 seri uçucu küllü beton üretilirken, bunlara referans olması amacıyla toplam 3 seri kontrol betonu üretilmiş, üretilen toplam beton serisi 21 olmuştur. Uçucu kül etkinliğinin saptanabilmesi için Bolomey formülünden yararlanılmıştır.

2.GENEL BİLGİLER

2.1. Beton Katkı Maddeleri

Beton katkı maddeleri “Betona; üretim sırasında su, agrega ve çimento dışında, küçük miktarlarda, betonun niteliklerinde istenilen yönde değişiklik sağlamak için katılan kimyasal maddeler” olarak tanımlanabilir [5]. İşlenebilirlik, dayanıklılık ve dayanım gibi taze ve sertleşmiş beton özelliklerini iyileştirmek için kullanılırlar. Ayrıca betonun daha ekonomik olarak üretilmesini de sağlayabilirler.

Beton katkı maddeleri beton içerisine karışım öncesi veya karışım sırasında çok düşük miktarlarda ilave edilen organik veya inorganik maddelerdir. Mineral ve kimyasal olarak iki gruba ayrılırlar [1]. Bu maddeler organik ya da inorganik esaslı olup beton bileşimine ağırlıkça toplam bağlayıcının %5'ini aşmayacak oranlarda katılan maddelerdir [6]. Ancak uçucu kül, silis dumanı gibi mineral katkıları, katkı olarak değil betonun bileşeni olarak görüldüğü için bu sınırlamaya dâhil değildirler. Hatta ACI' nın yapmış olduğu bir çalışmada mineral katkıları sözcüğü ‘bağlayıcı maddeler’ deyiimiyle değiştirilmiştir [7]. Mineral çimento katkıları, beton yapımında kullanılan çimentonun, suyun, agreganın ve fiber donatının dışında beton karışımının içerisine karılma işleminden hemen önce ve karılma işlemi esnasında katılan ince taneli mineral katı parçacıklardır. Volkanik kül, volkanik tüf, diatomlu toprak, pişirilmiş kil, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı beton yapımında kullanılan başlıca çimento katkıları olup, bunlar puzolanik özelliklidir [8]. Kimyasal katkıları betonun akışkanlığının artırılması, erken ve yüksek dayanıma ulaşması, geçirimsizliğin ve donatı dayanımının sağlanması yanında priz sürelerini değiştirmek gibi amaçlarla kullanılmaktadır [5]. Akışkanlaştırıcılar, taze betonda çimento taneleri-su ara yüzeyinde varolan fiziksel-kimyasal kuvvetlerin etkisinin değişimine yol açarlar. Bunun nedeni, çimento tanelerini kaplayan yüzey-aktif maddelerin, çimento tanelerinin negatif elektrikle yüklenmesini ve birbirlerini iterek taze beton içinde kolayca yayılmalarını sağlamalarıdır. Çimento taneleri arasındaki bu negatif elektrik yükü çimento tanelerinin bir su tabakası ile kaplanmasını sağlar ve böylece

bu oluşum beton karışımında imento tanelerinin homojen dağıymasına neden olur. Böylelikle, kullanılan malzeme miktarlarını ve oranlarını değiştirmeden, taze betonun işlenebilme özelliğini arttıırlar. Bu katkının kullanımındaki diğer bir amaç, beton karışımındaki su/imento oranını azaltarak daha yüksek dayanımlı beton elde etmektir. Taze beton karışımı için hedeflenen kıvamın daha az miktarda suyla elde edilmesi, betonun su/imento oranının daha düşük olmasına ve böylece boşlukları daha az, dayanımı ve dayanıklılığı daha yüksek beton elde edilmesine yol açmaktadır. Akışkanlaştırıcı kullanımı, beton karışımında kullanılacak su/imento oranını sabit tutarak, su ve imento miktarını azaltıp, ekonomik yararlar da sağlamaktadır. Karışımda katkı maddesinin yol açtığı su azalmasına paralel olarak imento miktarında da azaltma yapılabilir. Böylece daha az miktarda imento ile hedeflenen dayanım elde edilebilmektedir. Beton retiminde en pahalı malzeme olan çimentonun daha az miktarda kullanılmasıyla daha ekonomik beton retilenmektedir [9].

Günümüzde beton sektöründe birçok değişik katkı maddesi kullanılmaktadır. Kullanılan bu beton katkıları beton sektöründe oldukça yararlı işlevler görmektedir. Bu yüzde beton katkıları sektör için oldukça büyük bir öneme sahiptir.

Beton retiminde sık kullanılan katkılar; akışkanlaştırıcılar, su tutucular (terlemeyi nleyenler), hava sürükleyenler, priz hızlandırıcılar, priz geciktiriciler, suya dayanıklılık sağlayanlar, çok işlevli katkılar ve puzolanlar olarak özetlenebilir [7].

2.2 Puzolanlar

2.2.1 Puzolanların tanımı, kısa tarihi ve sınıflandırılması

Beton yapımında kullanılan mineral katkı maddelerinin hemen hemen hepsi, puzolanik özelliklidir [8]. Puzolanlar, gerek imento yapımı sırasında klinkerle birlikte ğtlerek, gerekse şantiyede çimentoya yapının özelliğine göre değişik oranlarda katılarak beton yapımında kullanılmaktadır. Puzolanların kullanılması ekonomi dışında imento ve betona pek çok iyi özellikler kazandırmaktadır. Diğer bir deyimle puzolanlı çimentolara, hataları düzeltilmiş portland çimentoları denilebilir [10]. Puzolan malzeme içindeki camlaşmış aktif silis kireçle karıştırıldığında, nemli ortamda bağlayıcılık özelliği kazanır ve suda erimeyen kalsiyum silikat tuzuna dönüşür. Çimentonun hidrasyon ürünü olan ve suda eriyen

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile de birleşerek suda erimeyen silikat tuzu oluşturur. Bu özelliği nedeni ile puzolanlar çimentonun suya karşı dayanıklılığını olumlu yönde etkiler. Çimentonun bir kısmı yerine puzolan ilave edilmesi betonun plastikliğini artırır, su kuma ve çözülme olaylarını önler, hidrasyon ısısını ve betonun geçirgenliğini azaltır [11].

Puzolanlar elde edilmişlerine göre doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Doğal puzolanlar, binlerce yıldan bu yana söndürülmüş kireçle birleştirilerek, su altında da sertleşebilen suya dayanıklı harç ve bir tür beton yapımında kullanılmışlardır. Portland çimentosunun icadından sonra da hem doğal puzolanlar hem de yapay puzolanlar, portland çimentolu beton yapımında mineral katkı maddesi olarak kullanılmışlardır. Gerek betonun birçok teknik özelliğini olumlu yönde değiştirmeleri, gerekse portland çimentosundan daha ekonomik olmaları ve beton karışımının içerisinde çimento ağırlığının %50'sine varan miktarlarda kullanılmaları nedeniyle puzolanik katkı maddelerinin beton endüstrisinde çok önemli bir yeri bulunmaktadır [8].

Girit'te, Rodos'ta ve birçok yerde üç dört bin yıl önce yapılmış olan su yapıları ve mozaik işleri de bugün hala dayanıklılığını korumaktadır. Bu yapılarda da puzolan ve söndürülmüş kireçten oluşan bağlayıcılar kullanılmıştır. Ancak puzolan tanımına giren malzemelere "puzolan" isminin verilmesi ve o tür malzemelerin harç ve beton yapımında yaygın olarak kullanımı M.Ö. 300 yılı civarında Romalılar tarafından başlatılmıştır. Puzolanik malzemelerin bağlayıcılık potansiyelinin Romalılar tarafından keşfedilmesi ve bu tür malzemelerin pozzolana (puzolan) olarak anılmaya başlanması, Romalı ünlü mimar Marcus Vitruvius Pollio'nun M.Ö. 30 – M.Ö. 20 yılları arasında tamamladığı "De Architectura Libri Decem - Mimarlık Üzerine On Kitap" isimli eserinin ikinci kitabında bahsedilmektedir. Vitruvius'a göre, Romalılar, pişirilmiş kilin veya öğütülmüş tuğla veya kiremidin de puzolanik özellik gösterdiğinin bilincinde olmuşlardır. Romalılar volkanik külü, volkanik küllü toprağı, veya pişirilmiş kili, söndürülmüş kireçle ve suyla birleştirerek, su altında da sertleşebilen bağlayıcı hamur elde etmişlerdir. Bu tür bağlayıcıların içerisine taş parçaları gömerek, bugünkü betona benzer betonlar yapmışlardır. Osmanlılar zamanında yaygın olarak kullanılan "Horasan harcı" da kilden yapılan ve pişirilen tuğla, kiremit, çömlek gibi malzemelerin öğütülmüş durumdayken söndürülmüş kireçle birleştirilmesi sonucunda elde edilmiştir [8].

Portland çimentosu ilk olarak 1824 yılında üretildiğine göre, yukarıda anlatılan ve puzolan içeren harçlardaki ve betonlardaki puzolanik malzeme, bu malzemenin “portland çimentolu betonda mineral katkı maddesi olarak kullanılması” tanımına girmemektedir. Dolayısı ile ince taneli durumdaki puzolanik malzemenin beton yapımında katkı maddesi olarak kullanımı 1900’lü yıllarda başlamıştır [8].

Portland çimentosunun kullanılabilirliği arttıktan sonra puzolan-kireç karışımları uzun süren priz süreleri ve sertleşme karakterleri sebebiyle bağlayıcı olarak tercih edilmemeye başladı. Bununla birlikte ekonomik sebepler ve bazı üstünlükleri nedeniyle çimento-puzolan karışımları hala kullanılmaktadır. Betonun temel bileşimlerinden olmayan bu maddeler, portland çimentosuna benzer minerolojik, kimyasal ve fiziksel özellikler göstermesine rağmen, büyük çoğunluğunun kendi başlarına bağlayıcılık özelliği bulunmamaktadır. Bu nedenle bunlar ikincil bağlayıcı madde olarak da adlandırılmaktadır. Etketif bir dolgu malzemesi işlemleri gören bu maddeler, puzolanik özellikleri nedeniyle hidrasyon ürünlerinin oluşumunda etkinlik göstererek bağlayıcı hamur yapısını değiştirirler [12].

Doğal ve yapay puzolanlar çizelge 2.1’de gösterilmiştir [10-12].

Çizelge 2.1: Puzolanların sınıflandırılması ve türleri.

Puzolanlar	
Doğal Puzolanlar	Yapay Puzolanlar
Volkanik Küller	Uçucu Kül
Volkanik Tüfler	Silis Dumanı
Killer ve Tortul Şistler	Yüksek Fırın Cürufu
Ponza Taşı	Pirinç Kabuğu Külü
Diatome toprağı	Buğday Sapı Külü
Opalin Silika	Demirli Olmayan Cüruf
Sünger Taşları	

Doğal puzolan olarak bilinen maddeler; volkanik küller, killi sist, diatome toprağı, ponza taşı v.b.’dir. Bunlar dünyanın belirli bölgelerinde bulunmaktadırlar. Puzolanın kimyasal yapısı ve aktivitesi bulunduğu bölgeye göre değişiklik gösterir. Özgül ağırlıkları 2000 ile 2200 kg/m³ arasındadır. Doğal puzolanlar kalsinasyon işlemine tabi tutulabilir. Böylece kalsinasyon sonucu varsa yapıdaki karbonatlar bozunarak

oksitli bileşenlere dönüşür [11]. Doğal puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık özelliğine sahip olmasalar da çok ince öğütüldüklerinde normal sıcaklıklarda sulu ortamlarda kireçle birleşerek bağlayıcılık özelliği kazanabilen silis ve alümin oksitlerince zengin tüf çeşidi malzemelerdir. İnce öğütülme yetenekleri sayesinde çimento hamurundaki mikro boşluklara kolayca girmekte ve çimento hamurunun iskelet yapısını değiştirerek dayanıklılığını artırmaktadırlar. Buna ilaveten doğal puzolanlar, ince taneli olmaları sayesinde çimento harcı ve beton üzerinde kayganlaştırıcı bir etki de ortaya koymaktadırlar. Bu etki taze betonun kıvamını ve dolayısıyla işlenebilirliğini iyileştirmektedir. Ancak doğal puzolanlar, çimentonun toplam özgül yüzeyini artırdıkları için su ihtiyacını da artırabilmektedirler [10].

Yapay puzolanlar, kalsinasyon işlemi ile elde edilen puzolanlardır. Bunlar çoğunlukla endüstri artığı maddelerdir. Metal silis ve silis alaşımlarının üretiminden silis dumanı, termal elektrik güç santrallerinden uçucu kül, demir çelik endüstrisindeki font üretiminden cüruf, tarım artıklarından pirinç kapçığı kulu, buğday sapı külü gibi malzemelerdir [11].

2.2.2 Puzolanik reaksiyon

Portland çimentosu su ile hidratasyona girdiğinde ortaya betonda bağlayıcılık özelliği sağlayan CSH ve serbest kireç CH ortaya çıkar. Puzolan içeren betonlarda temel puzolanik reaksiyon; portland çimentosunun hidratasyonu sonucu ortaya serbest kireç (CH) ile puzolanda bulunan silika (S) arasında sulu ortamda şu şekilde oluşmaktadır:



2.1 denkleminde gösterilen puzolanik reaksiyon sonucu portland çimentosunun silikatlı bileşenleriyle aynı hidrate ürünler ortaya çıkmaktadır. Ancak bu reaksiyonun hem serbest kireç oluşumunu beklemesi, hemde oldukça yavaş seyreden bir reaksiyon olması sonucu puzolanik etki ile mukavemet kazanmada oldukça yavaş olmaktadır. Kür sıcaklığının artması, alkali ve sülfatlı bazı kimyasal katkı maddelerinin varlığı ise reaksiyonu hızlandırabilmektedir. 2.1 denklemindeki temel puzolanik reaksiyonun yanında serbest kireç ile puzolandaki alümin ve demir oksitin reaksiyonları sonucu hidratasyon ürünleride oluşmaktadır. Böylece portland çimentosu hidratasyon reaksiyonu ile puzolanik reaksiyon arasında hem açığa çıkan ürünlerin kompozisyonu hemde reaksiyonların hızı açısından farklılıklar

bulunmaktadır. Puzolan ve portland çimentosu karışımı hidratasyona girince, puzolanik reaksiyonun etkisiyle beton hamurunda bulunan serbest kireç miktarı giderek azalır. Sadece portland çimentosunun bulunduğu beton hamurunda portland çimentosu ile puzolanın bir arada bulunduğu beton hamuruna göre daha çok serbest kireç bulunur. Bu sayede puzolanın bulunduğu beton hamurunda daha çok kalsiyum silikat hidrate elemanları bulunduğu için bağlayıcı miktarı artmakta, buda mukavemete olumlu bir şekilde yansımaktadır. Ayrıca serbest kirecin azalması ve betonun hamur yapısının iyileşmesiyle, betonun geçirimsizliği ve zararlı dış etkilere dayanıklılık artmaktadır [12].

2.3 Uçucu Küller

2.3.1 Uçucu küller hakkında genel bilgiler

Uçucu külün tarifi TS639' a göre; toz halinde veya öğütülmüş taşkömürü veya linyit kömürünün, yüksek sıcaklıklarda yanması sonucunda oluşan ve baca gazları ile sürüklenen, silis ve alümino - silisli toz halinde bir yanma kalıntısıdır [13]. Uçucu kül; pülverize edilmiş antrasit, linyit veya bitümlü kömürün yakıldığı fırınların baca gazlarındaki toz benzeri taneciklerin elektrostatik veya mekanik çöktürülmesi ile elde edilir [14]. Uçucu kül üretimini; santral tipi, işletim biçimi, yakılan kömürün cinsi, yanma biçimi gibi çeşitli faktörler etkilemekle birlikte, genel olarak elektrik enerjisi üreten termik santrallerde kullanılan taşkömürünün %10-15'ini, linyit kömürünün ise %20-50'si kül olarak ortaya çıkmaktadır. Yanma sonucu ortaya çıkan külün %75-85'i baca gazları ile kazandan çıkmaktadır [4]. Santrallerde yanma esnasında kazan alev sıcaklığı 1600 C°'yi aşabilmektedir. Bu sıcaklık kömürün içinde bulunan pek çok anorganik bileşenin erimesi için yeterlidir. Birçok kaynakta kömür içinde yaklaşık 50 mineralin olduğu belirtilmesine karşın bunların bir çoğu, uçucu külde az miktarda ya da eser miktarda bulunurlar. Kömür içinde bulunan ana mineraller beş grupta toplanabilir. Bunlar; alüminyum silikatlar, karbonatlar, sülfidler, kloritler ve silika mineralleridir. Uçucu kül özellikleri esasen kullanılan kömür çeşidine, kömürün öğütülmesine, yakma işlemine ve elektrostatik tutucu içindeki ayırma işlemine bağlıdır. Gazlarla birlikte çok büyük miktarda külün dışarı çıkması durumunda termik santralin çevresi kısa sürede küllerle kaplanacağından, bacadan dışarıya çıkacak küller bir takım elektrostatik veya elektromekanik yöntemler vasıtasıyla tutulmakta ve kül toplayıcı silolara kanalize edilmektedir. Daha sonra da

silolardan konveyör bantlarla veya başka yöntemlerle termik santrallerin uzağındaki bir depo alanına atık olarak depolanmaktadır [15].

Uçucu küller puzolanik özellikleri nedeni ile puzolan olarak kullanılabilen malzemelerdir [4]. Uçucu külün miktarı ile kıyaslandığında öğütülmüş yüksek fırın cürufu, silis dumanı, metakaolin ve pirinç kabuğu külü gibi bağlayıcı malzemelerin varlığı limitlidir [16]. Bu yüzden en yaygın olarak kullanılan puzolan türü uçucu küldür [17].

Uçucu kül terimi elektrik enerjisi endüstrisinde 1930'lu yıllarda ortaya çıktı. 1930'larda kömür ile çalışan elektrik santrallerinden çok miktarda uçucu kül elde etmek mümkün hale geldi. Uçucu külün portland çimentosu üretiminde kullanılması da gene bu tarihlerde başladı. 1937 yılında, R.E. Davis ve arkadaşları California Üniversitesinde uçucu küllü betonla ilgili araştırma sonuçlarını yayımladı. Bu çalışma, ilk şartnamelerin, test metotlarının ve uçucu kül kullanımının temelini oluşturdu [16]. Çeşitli ülkelerde uçucu külün önemli miktarlarda kullanılmaya başlanması baraj inşaatları sırasında ve betonda hidratasyon ısısını düşürmek amacı ile oldu. Örneğin ilk kullanım A.B.D.'de 1940'lı yıllarda önce Hoover daha sonra Hungry Horse barajlarındadır [18]. 1970'lerdeki benzin krizi elektrik santrallerinde daha fazla kömür kullanımına sebep oldu. Böylece uçucu küllerin üretimi arttı ve uçucu küllerle ilgili araştırmalar yoğunlaştı. Beton endüstrisinde şu anda kullanımı mümkün olan büyük miktardaki uçucu külün ekonomik olarak kullanılması bu sayede gerçekleşti [16].

Türkiye'de; 1960'lı yıllarda Gökçekaya ve Porsuk barajları inşaatlarında hidratasyon ısısını düşürmek amacıyla uçucu kül kullanılmasına karar verildi ve Türk Standartları Enstitüsü uçucu kül (TS639) ve uçucu küllü çimento (TS640) standartlarını hazırlayarak yayınladı. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün baraj uygulamaları dışında Karayolları Genel Müdürlüğü bazı köprü ve yol inşaatlarında deneme amacı ile uçucu kül kullandı. Uçucu küllü çimento hemen hiç üretilmedi. Katkılı çimentolarda ise kısıtlı miktarda kül kullanıldı. Geçen süre içinde ülkede uçucu kül kullanımı bu tür uygulamalarla sınırlı kaldı. Kullanılan uçucu kül miktarları yılda elde edilen toplam miktarın %1'ine bile ulaşamadı. Ancak son yıllarda özellikle hazır beton endüstrisinin gelişmesi ve Avrupa'dan uyarlanan yeni çimento ve beton standartları, çimento ve beton endüstrilerinde uçucu küle olan ilgiliyi arttırmış bulunmaktadır [18].

Günümüzde dünyadaki uçucu kül üretimi yıllık yaklaşık 450 milyon tondur ancak bunun sadece % 6'sı çimento ve beton endüstrisinde kullanılmaktadır. Türkiye'deki uçucu kül üretimi ise yıllık yaklaşık 15 milyon tondur ancak endüstride kullanımını düşüktür. Bunun iki sebebi vardır:

- 1-Uçucu kül özellikleri hakkındaki yetersiz bilgi.
- 2-Uçucu kül özelliklerinin her zaman üniform olmaması [17].

2.3.2 Uçucu küllerin sınıflandırılması

TS639'a göre uçucu küller yalnızca bir sınıftır [13]. TS EN 197-1'e göre ise uçucu küller V (silissi uçucu küller) ve W (kalkersi uçucu küller) tipi olarak ikiye ayrılırlar [19]:

1-V tipi uçucu küller: Silissi uçucu kül çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel partiküllerden ibaret ince bir toz olup, esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)'den oluşur. Geri kalan kısmı ise demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşikler ihtiva eder. Reaktif CaO oranı kütlece % 10,0'dan az olmalıdır. Reaktif SiO_2 muhtevası kütlece % 25,0'den az olmamalıdır.

2-W tipi uçucu küller: Kalkersi uçucu kül, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup, esas olarak reaktif kalsiyum oksit (CaO), reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)'den oluşur. Geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşikler ihtiva eder. Reaktif kalsiyum oksit oranı kütlece %10,0'dan az olmamalıdır. % 10,0 - % 15,0 arasında reaktif kalsiyum oksit ihtiva eden kalkersi uçucu külün, reaktif silisyum dioksit muhtevası kütlece % 25,0'den az olmamalıdır.

Uçucu küller, içerdiği analitik CaO miktarı bakımından ise düşük kireçli ve yüksek kireçli olarak ikiye ayrılırlar [3]:

- 1-Düşük kireçli uçucu küller: CaO miktarı % 10'dan az olan uçucu küllerdir.
- 2-Yüksek kireçli uçucu küller: CaO miktarı % 10'dan fazla olan uçucu küllerdir.

ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C tipi olarak sınıflara ayrılırlar [20]:

1-F tipi uçucu küller: Bitümlü kömürlerden elde edilip $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%70$ şartını sağlayan uçucu küllerdir. SO_3 miktarı %5'ten, kızdırma kaybı da %6'dan azdır. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli uçucu kül olarak ta adlandırılırlar.

2-C tipi uçucu küller: Genelde linyitler veya yarı bitümlü kömürlerden elde edilip $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%50$ şartını sağlayan uçucu küllerdir. SO_3 miktarı %5'ten, kızdırma kaybı da %6'dan azdır. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi %10 un üstünde olduğu için yüksek kireçli uçucu kül olarak ta adlandırılırlar.

Türkiye'de aktif olarak çalışan 11 adet termik santral vardır ancak bunlardan sadece 1 tanesinden, Çatalağzı Termik Santralinden F tipi uçucu kül elde edilmektedir, diğer tüm santrallere ait küller ise C tipidir [17].

Uçucu küller ile ilgili bir başka sınıflandırma ise içerdiği SO_3 miktarına göre olmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre uçucu küller üç gruba ayrılmaktadır [3]:

1-Esas yapısı siliko aluminatlardan meydana gelen, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (S+A+F) toplamı %70'in üzerinde olan ve genellikle taşkömüründen elde edilen siliko alüminalı uçucu küller.

2-Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı % 50 ile % 70 arasında olan ve kireç ile silika miktarı yüksek olan siliko kalsik uçucu küller.

3-Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı % 50'in üzerinde olan ve diğerlerine göre daha fazla SO_3 ve CaO ihtiva eden sülfür kalsik uçucu küller.

2.3.3 Uçucu küllerin fiziksel özellikleri

Uçucu kül, çimentodan daha koyu gri renkte, çok ufak taneli, elle dokunulduğunda yumuşak bir malzemedir [15]. Rengin koyuluğu açıklığı elde edildiği kömüre ve yanış özelliğine bağlıdır. Linyit kömüründen elde edilen uçucu küller daha esmerdir. Ayrıca iyi yanmış bir uçucu kül, iyi yanmamış uçucu külden daha açık renktedir. Yanmanın tam olmadığı durumda oluşan uçucu küle siyah renk veren içindeki yanmamış karbondur. Uçucu külün İnceliği öncelikle kazana verilen kömürün öğütülme derecesine bağlıdır. İnceliğe etki eden ikinci faktör; küllerin mümkün olabildiğince bacadan kaçmasına mani olunarak tutulmasıdır. Bacadan kaçan kısım azaldıkça incelik artar. Boyutları genellikle 0,5 ile 200 mikron arasında değişen, camsı ve çoğunlukla küresel karakterdeki parçacıklardır [4]. Uçucu külün yoğunluğu; inceliğine ve mineralojik yapısına bağlıdır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin mutlak yoğunluğu $2,2 - 2,7 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır [3]. Uçucu kül mikroskopla bakıldığında çeşitli şekil ve büyüklükte, çeşitli biçimlerde, genellikle yuvarlak, şeffaf, bazen açık renkli, bir kısmı siyah, çok az esmer kırmızı renkte taneciklerden meydana gelen bir yapı gösterir. Uçucu kül partikülleri

çoğunlukla küresel şekilli çok küçük tane boyutuna sahiptirler. Partikül çapları 20–80 µm arasında değişmektedir [15]. Spesifik yüzeyleri 1800-5000 cm²/gr arasında değişmekle birlikte, ortalama 2800-3800 cm²/gr dolayındadır [4]. Uçucu külün yüksek spesifik yüzeyi malzemenin kalsiyum hidroksit ile tepkime vermeye hazır olduğu anlamına gelir. Bir termik santralden elde edilen uçucu küllerin tane boyu dağılımları zaman içinde kömür kaynağında, kömür öğütme yönteminde, termik santralin çalışma prensiplerinde büyük değişiklikler olmadığı sürece, sabit kabul edilebilir [15].

Uçucu kül inceliği puzolanik aktiviteyi önemli ölçüde etkiler. İnceliğini arttırmak için uçucu kül elenebilir, hava kullanılarak iri ve ince taneler ayrılabilir veya öğütme yapılabilir. Puzolanik reaksiyon uçucu kül tanesinin yüzeyinde başlar. İncelik arttırılırsa puzolanik aktivite de artar, ayrıca betonda en zayıf halka olan agregacımento hamuru ara yüzeyinin özelliklerinin iyileştirilmesi için de uçucu kül inceliği önemlidir [17].

2.3.4 Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik özellikleri

Mineralojik ve kimyasal özellikler açısından uçucu küller, içi boşluklu ve boşluksuz, camsal kürecikler süngerimsi mineral parçacıklar ve yanmamış taneciklerden oluşurlar. Kimyasal yapılarında temel element olarak; Si, Al, Ca ve S bulunur [4]. Bu elementler yanma biçimine bağlı olarak SiO₂, Al₂O₃, demiroksitler (Fe₂O₃, FeO, Fe₃O₄), kireç (CaO) ve SO₃ oluştururlar [15]. Uçucu küllerdeki temel oksitlerden SiO₂, %25-60, Al₂O₃, %10-30, Fe₂O₃, %1-15 ve CaO, %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Bu farklı aralıklardaki değerler uçucu külün tipini karakterize etmektedir [18]. Uçucu küllerin matrisi esas olarak alümina silikatlardan ve bunlarla birlikte bulunabilen Fe, Mg, Na, K, Ca, Ti ve nadir toprak elementlerinden oluştuğu gibi, uçucu olan veya uçucu oksitleri oluşturan As, Cd, Ga, Mo, Pb, Se ve Zn gibi elementler matrise girme eğilimi göstermeyerek, tane boyutu ile ters orantılı olarak uçucu küllerin yüzeylerinde toplanırlar [4].

Uçucu küllerin içerisinde bulunabilen karbon miktarı kömür tipine ve yakma işlemine göre değişiklikler göstermektedir [4]. Kızdırma kaybı, esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozunması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya CO₂ kaybını da içine almaktadır. Kızdırma kaybı, %1 ile %10 arasında değişmektedir [18].

Uçucu küllerin puzolanik özellikleri, kimyasal bileşiminden daha çok mineralojik yapıları ile ilişkilidir. Uçucu küllerde kullanılan kömür tipine bağlı olarak bazılarında önemli miktarda CaO bulunabilmektedir. Yüksek kireçli uçucu küller, hem puzolanik özellik gösterirler hem de sahip oldukları serbest kireç, trikalsiyum aluminat, amorf silis ve alumina vb. sebebiyle kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip olabilirler. Düşük kireçli uçucu küllerin ana aktif bileşeni, silis ve aluminadan oluşan amorf ya da camsı fazdır. Bu tip uçucu küller, rutubetli ortamda sönmüş kireç Ca(OH)_2 ile reaksiyona girdikleri için puzolanik özelliğe sahiptirler. Bu tür küller sadece puzolanik özellik gösterebilmektedir. Düşük CaO içeren küllerin betonun sülfata karşı dayanıklılığını artıran etkili bir katkı maddesi olduğu bilinmektedir [3-4,15].

Gerek çimento fabrikasında klinkere, gerekse şantiyede çimento içerisine katılacak uçucu külün mutlaka puzolanik özelliğinin tespit edilmesine ihtiyaç vardır. İstenen düzeyde puzolanik aktivitesi olmayan uçucu kül bu iki amaç için kullanılamaz. Gerekli puzolanik aktiviteye ek olarak, uçucu külün kimyasal özelliklerinin ($\text{SiO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, SO_3 kızdırma kaybı, nem, alkaliler) ve fiziksel özelliklerinin (incelik basınç dayanımı, büzülme, su alma kapasitesi, çimento alkalinitesi ile şişme) de bilinmesi gerekmektedir. Uçucu külün EN 196-2'ye göre tayin edilen, fakat kızdırma süresi bir saat olarak tutulan kızdırma kaybı, kütlece % 5,0'i geçmemelidir. Kızdırma kaybı kütlece % 5,0 den % 7,0'ye kadar olan uçucu küller de özellikle donma direnci gibi belirli gerekleri sağlaması ve kullanım yerindeki beton ve harç için uygun standartlara ve yönetmeliklere uygun olması halinde kabul edilebilir [19].

Uçucu küllerin TS639' a göre olan kimyasal özelliklere göre sınırlandırması çizelge 2.2'de verilmiştir [13].

Çizelge 2.2: TS639'a göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri.

$\text{SiO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ % en az	70.0
MgO, % en çok	5.0
SO_2 , % en çok	5.0
Rutubet, % en çok	3.0
Kızdırma kaybı, % en çok	10.0

Türkiye'deki bazı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları ve ASTM C 618 standardına göre karşılaştırılmaları ise çizelge 2.3'de verilmiştir [3,18,20].

Çizelge 2.3: Türkiye'deki bazı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları.

Bileşim (%)	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan	ASTM C 618 Sınırları	
					F	C
SiO ₂	27.4	56.8	58.59	49.13	-	-
Al ₂ O ₃	12.8	24.1	21.89	15.04	-	-
Fe ₂ O ₃	5.5	6.8	9.31	8.25	-	-
S+A+F	45.7	87.7	89.79	72.42	>70	>50
CaO	47.0	1.4	4.43	13.2	-	-
MgO	2.5	2.4	1.41	4.76	-	-
Na ₂ O	(N+K)	(N+K) 3.0	0.24	2.2	-	-
K ₂ O	-	-	1.81	1.76	-	-
SO ₃	6.2	2.9	0.41	3.84	<5	<5
K.K.	2.4	0.6	1.39	0.72	<6	<6

2.3.5 Uçucu küllerin taze beton özelliklerine etkisi

Taze beton; birbirinden farklı yoğunluktaki, tane büyüklüğündeki ve kimyasal kompozisyondaki maddelerin oluşturduğu konsantre bir süspansiyondur. Sahip olduğu sistem, statik değildir. Çimento ve su karıştığı anda yeni tanecikler meydana gelmekte, orijinal tanecikler bozulmakta, kimyasal reaksiyonlar meydana gelmekte ve bu esnada ısı açığa çıkarak sıcaklık artmaktadır. Uçucu küller bu olaylar meydana gelirken etkinlik göstermektedirler. Düşük kireçli uçucu küller genellikle ince agrega davranışı gösterirken, yüksek kireçli uçucu küller erken bağlayıcılık reaksiyonlarında rol oynamaktadır [21].

2.3.5.1 Uçucu küllerin taze betonun işlenebilirliği üzerine etkisi

Betondan beklenen niteliklerin en önemlileri işlenebilir olması, istenilen dayanımın sağlanması ve ortam şartlarına dayanıklı olması olarak gösterebiliriz [1].

İşlenebilirlik bir taze beton özelliği iken, diğer iki özellik, sertleşmiş beton özelliğidir. İşlenebilirliğin bu öneminden dolayı, uçucu küllü betonlarda uçucu külün işlenebilirliğe ve yine önemli bir özellik olan su ihtiyacına olan etkisi dikkatli bir şekilde irdelenmelidir.

Genellikle bütün uçucu küller, çimento hamuru içerisinde ek olarak kullanıldıkları zaman su ihtiyacını arttırırken, çimento ile yer değiştirilerek kullanıldıklarında su ihtiyacını azaltabilmektedirler [22]. Düşük kalsiyumlu uçucu küllerin özellikle küresel tanecik özellikleri nedeniyle su ihtiyacını azalttığı gözlenmiştir. Davis ve arkadaşları, uçucu küllerin diğer puzolanlar gibi su ihtiyacını arttırmadığını belirtmişlerdir. Uçucu küllerin bu avantajı, uçucu külsüz betonlardaki aynı işlenebilirlik oranını daha az su kullanarak uçucu küller ile yakalanarak kullanılabilir. Owens'a göre uçucu külün işlenebilirliğe olan etkisi, uçucu küldeki kaba tanelerin (45 µm den büyük) payıdır. Yaptığı çalışmalarda ince taneleri yüzde 50'den fazla olan uçucu küllerin su ihtiyacını azalttığını tespit etmiş ancak kaba taneleri yüzde 50'den fazla olan uçucu küllerin, su ihtiyacına olumlu bir etkisi olmadığını bulgulamıştır [21].

Welsh ve Burton'a göre, su miktarı sabit tutulduğunda uçucu küller betonun akışkanlaştırıcılığını arttırmaktadır. Pasko ve Larson, 63 mm slump değeri sabit kalacak şekilde yapmış oldukları çalışmada, yüzde 20 çimento yerine yüzde 30 oranında uçucu kül konulan karışımda su ihtiyacında yüzde 7,2 oranında azalma tespit etmişlerdir. Compton ve Malcniste yaptıkları çalışmada yüzde 30 çimento- uçucu kül değişimi sonucunda su ihtiyacında yüzde 7'lik bir azalma tespit etmişlerdir [21].

Brown yaptığı çalışmada 4 farklı su/çimento oranı ile ürettiği betonlarda, uçucu külün işlenebilirliğe olan etkisini araştırmıştır. Numunelere, çıkardığı çimento miktarı kadar uçucu kül miktarı ekledikten sonra uçucu küllü betonlarda hem slump miktarının hemde ve-be işlenebilirlik miktarının arttığını gözlemlemiştir. Bu miktarlardaki değişimler, hem kullanılan uçucu külün oranına hemde su miktarına bağlı değişmektedir. Brown yapmış oldu bir başka çalışmada uçucu kül ile agrega yer değiştirdiğinde öncelikle yüzde 8'e varan işlenebilirlik artışı gözlenirken daha sonra yer değiştirme oranı arttıkça işlenebilirlik düşmeye başlamıştır [21].

Subaşı ve arkadaşlarının uçucu külün işlenebilirliğe ve priz alma süresi üzerine etkisi ile ilgili yapmış oldukları çalışmada, yüzde 5, 10, 20 ve 30 uçucu kül ikamesi yapılarak hazırlanan beton karışımlarından yararlanmışlardır. Beton işlenebilirliği Slump ve ve-be deneyleri ile belirlenmiştir. Hazırlanan her bir karışım için penetrasyon direnci yöntemiyle beton priz süresi tayini deneyi ile betonun 0,5 MPa, 1MPa ve 3 MPa'lık direnç gösterdiği süreler hesaplanmıştır. Ayrıca hazırlanan karışımlardan elde edilen betonların 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Beton üretiminde, beton bileşen miktarları, dozaj ve çökme değeri sabit seçilmiştir. Bütün beton numunelerde uçucu kül miktarı arttıkça Slump değerlerinin arttığını ve buna paralel olarakta Ve-Be sürelerin azaldığını tespit etmişlerdir. Basınç dayanım değerlerinin uçucu kül ikame miktarı artışına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Ayrıca karışımlarda kullanılan uçucu kül ikame miktarına bağlı olarak beton sertleşme sürelerinin de değiştiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, uçucu külün işlenebilirliği arttırdığını belirtmişlerdir [23].

CANMET'in yapmış olduğu çalışmada ise, ince külün, iri küle nazaran işlenebilirliğe etkisi daha olumlu olmaktadır. Yüksek karbonlu ve kaba taneli uçucu küllerin ise su ihtiyacını arttırdığı söylenebilir [21].

Uyan ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, uçucu kül taneleri irileştikçe ve ikame oranı arttıkça taze betonun su ihtiyacının arttığı görülmüştür. Su ihtiyacının artış miktarının %8 oranlarına kadar artış gösterdiği saptanmıştır. %10 gibi düşük ikame oranlarında taze betonun su ihtiyacına incelik faktörünün etkisi görülmemiştir. İkame oranı arttıkça uçucu külün incelik faktörünün etkisi daha bariz olarak ortaya çıkmıştır [24].

Terleme beton karışımındaki suyun kütlede ayrılarak yüzeye çıkması sonucu oluşan bir durum olup, genellikle segregasyon sonucu oluşarak, artması halinde erken rötreye sebep olur. Segregasyon üretilen betonun yeterli kohezyona sahip olmamasından kaynaklanan bir durumdur. İnceliği yüksek olan mineral katkıları taze betonda terlemeyi önlemekte veya azaltmaktadırlar. Uçucu küllerin inceliğinin fazla olması nedeniyle, beton karışımlarının kohezyonunun arttıracağı ve segregasyonu azaltacağı, bu nedenle de erken rötreyi engelleyeceği genel bir kanıdır [16].

Copeland yaptığı çalışmada terleme eğilimindeki agregalardan üretilen karışımlarda uçucu kül kullanıldığında, terlemenin azaldığını tespit etmiştir. Johnson, Cape

Down'da (Güney Afrika) yaşanan ince taneli kum eksikliği nedeniyle ortaya çıkan terleme problemlerinde uçucu kül kullanarak çözüme gidilebileceğini öne sürmüştür. CANMET'in yapmış olduğu çalışmada ise uçucu küllü numuneler, kontrol betonuna göre daha az terleme yapmışlardır [21].

Uçucu küllerin genel olarak işlenebilirlik, su ihtiyacı ve terleme konusunda iyileştirme sağladıkları kesinlik kazanmasada, özellikle ince yapıları olanlarının taze betonun bu özelliklerini iyileştirdikleri söylenebilir.

2.3.5.2 Uçucu küllerin taze betonun priz süresi üzerine etkisi

Hidratasyon olayının gelişmesi ve belirli bir aşamaya ulaşması sonunda bağlayıcı madde hamurunun plastiklik özelliğinde önemli bir azalma veya viskozitesinde önemli bir artış meydana gelir ki buna prizin başlaması denilmektedir. Olayın gelişmesi sonunda hamurun tamamen plastikliğini kaybetmesi ile çimento hamuru katılmış veya prizini yapmış olur. Bir çimento tanesi, su ile temas geçtikten belirli bir süre sonra mikroskopla incelendiği vakit, tanenin köşeli ve pürüzlü halinin kayb olduğu ve yarı saydam bir jel tabakası ile çevrildiği gözükür. Zaman içerisinde bu jel tabakasının kalınlığı artar. Priz yapmış çimentodaki elemanların toplam yüzey alanı, sertleşmiş beton özellikleri açısından önemli bir yere sahiptir. Bağlayıcı maddeler burada 2 önemli özelliğe sahiptir. Birincisi; bağlayıcı maddelerde bulunan elemanların su karşısında eriyebilmesi, ikincisi de; hidratasyon sonunda meydana gelen karmaşık hidrate bileşimlerinin pratik bakımdan suda erimemesidir [1].

Mineral katkı maddeleri, genelde taze betonun priz sürelerini geciktirici etki yapar. Bu durum, özellikle kış şartlarında dikkat edilmesi gereken bu durumdur. Ancak yüksek kireç içeren uçucu küller (C tipi) ve silis dumanı ile yapılan çalışmalarda, bileşime bağlı olarak priz süresinin etkilenmediği hatta hızlandığı görülmüştür [12].

Dodson; betonun uçucu küllerden bağımsız olarak priz süresine 2 faktörün etki ettiğini belirterek bunların; çimento faktörü ve su/çimento faktörü olduğunu belirtmiştir. Buna göre çimento faktörü arttıkça priz süresi düşerken, su/çimento oranı yükseldikçe, priz süresi de artmaktadır [21].

Betonda uçucu kül kullanılması durumunda, uçucu külün çimentodan açığa çıkan Ca(OH)_2 'ye ihtiyaç duymasından ötürü priz süresinde bir gecikme beklenebilir. Uçucu külün priz süresiyle ilgili etkisi birkaç sebepten dolayı gerçekleşebilir [21]:

1-Uçucu külün kendi başına bağlayıcılık özelliği olabilir (yüksek kireçli uçucu küller).

2-Uçucu küllerde portland çimentosuyla reaksiyona girebilecek sülfat bulunabilir.

3-Uçucu külün varlığı nedeniyle uçucu kül-çimento hamuru bileşiminde daha az su bulunabilir.

4-Uçucu kül, su azaltıcı katkıların etkinliklerini azaltarak sertleşme özelliklerini kötü yönde etkileyebilir.

5-Uçucu kül tanecikleri çimentonun hidrasyon ürünlerinin kristalize olmalarına sebep olabilir.

CANMET'in yapmış olduğu bir çalışmada; özellikle düşük kalsiyumlu uçucu küllerin, priz olayının hem başlangıcını, hem de sonunu geciktirdiklerini gözlenmiştir. Bu çalışmada, %1,4-13 arasında CaO içeren uçucu küller kullanılmıştır [21].

Lane ve Best yapmış oldukları çalışmada, uçucu küllerin priz süresini geciktirdiğini tespit etmişlerdir. Bu gecikmenin, karışım oranlama metodunun, uçucu külün inceliğinin ve uçucu külün kimyasal kompozisyonunun etkilerinden dolayı olabileceği ancak daha ziyade hamurun su içeriği ve ortam sıcaklığının bu gecikmede daha fazla etkili olduğunu belirtmişlerdir. Davis ve arkadaşları ise, uçucu küllü betonlarda priz süresinin geciktiğini ancak bu gecikmenin belirlenen limitleri aşmadığını ortaya koymuşlardır [21].

Mailaganam ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada; yüzde 30 uçucu kül içeren numunelerde priz süresinin 1 ila 1.75 saat arasında geciktiğini tespit etmişlerdir [22].

Sonuç olarak, uçucu küllerin priz süresini arttırdıklarını söylemek mümkündür. Bilindiği gibi uçucu küller reaksiyona girebilmek için çimentonun hidrasyon ürünlerinin oluşmasını beklemektedir. Buda priz süresinin gecikmesindeki en önemli faktörlerden biridir. Bu durumda; kendi başına bağlayıcılık özelliği daha fazla olan C tipi uçucu küllerin, F tipi uçucu küllere nazaran priz süresinde daha az bir gecikme etkisi meydana getirdiklerini de söyleyebiliriz.

2.3.5.3 Uçucu küllerin taze betonun hidrasyon ısı ve sıcaklık yükselmesi üzerindeki etkisi

Çimentoyu teşkil eden maddelerin su ile yaptıkları kimyasal reaksiyon sonucunda ortaya ısı enerjisi çıkmakta, buda beton kütesinin sıcaklığını arttırmaktadır.

Hidrasyon olayını katılaşıma ve katılaşımayı da sertleşme izleyerek, bağlayıcı maddeler mukavemet kazanmış olur. Hidrasyonun ekzotermik bir davranışa sahip olduğu bilinmektedir. Bunun neticesinde özellikle barajlar gibi büyük kütle betonlarında, iç kısımlarda sıcaklık yükselir ve hava ile temasta olan dış kısım soğur ve büzülür. Bu şekilde dış kısımdaki betonun büzülmesi önlenirken, çekme gerilmeleri oluşur ve beton çatlar. Termik rötre çatlakları derin ve geniş olmaktadır. Kütle betonlarının çokça bulunduğu baraj inşaatlarında geçirimsizliğin çok olması nedeniyle, çatlaklı yapıdaki beton kullanılmaz. Hidrasyon ısısının yol açtığı bu olumsuz etkiyi ortadan kaldırmak için alınacak önlemlerden biri betondaki çimento miktarını azaltmaktır [1].

Çimento yerine uçucu külün ikame edilmesi sonucu bu zararlı hidrasyon ısı düşürebilmektedir. Özellikle büyük kütleli betonlarda büyük ısı artışı olacağı için uçucu küllerin bu özelliği büyük önem kazanmaktadır. Uçucu küllerin en geniş çaplı kullanımı da ilk kez bir baraj inşaatı esnasında olmuştur [21].

Elfert yapmış olduğu çalışmada, uçucu küllü betonların büyük kütle betonlarında hidrasyon ısısını düşürdüğünü tespit etmiştir [21].

Bamfort, çimentonun uçucu kül ile ikame edildiği, büyük kütleli betonlar üzerinde yaptığı çalışmada, yüzde 30 oranında uçucu kül ile çimentonun yer değiştirdiği betonda sıcaklığın 69 derece civarlarına kadar yükselip daha sonra azaldığını buna karşı kontrol betonunda sıcaklığın 75 dereceye kadar yükseldiğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak uçucu külün hidrasyon ısısını ve doğal olarak betondaki sıcaklığı azalttığı ortaya çıkmıştır [21].

Yüksek kireçli uçucu küllerin hidrasyon ısısında fazla bir değişim yaratmayacağı; genellikle düşük kireçli uçucu küllerin hidrasyon ısısını düşüreceğini söylemek çok yanlış değildir. Çünkü ısının açığa çıkması betonun sertleşmesinin hızı ile paralel seyretmektedir. Yüksek kireçli uçucu küllerde bu hız daha yüksek olacağı için; doğal olarak ortaya çıkan ısı miktarı da yüksek olacaktır. Crow ve Dunstan'ın yapmış olduğu çalışmada, yüzde 25 oranında uçucu kül ile çimentonun yer değiştirdiği numunelerden, düşük kireç içerenler açığa çıkan toplam ısı miktarını düşürmekle beraber, yüksek kireç içerenlerde hidrasyon ısısında önemli bir değişiklik gözlenmemiştir [21].

Uçucu küllerin kullanılmasıyla, hidrasyon ısısında düşme beklenmekle birlikte özellikle düşük kireçli F tipi uçucu küllerin bu konuda daha yararlı olduğunu söyleyebiliriz.

2.3.5.4 Uçucu küllerin taze betonda hava sürüklenmesi üzerindeki etkisi

Bütün çimento hamurlarında; hava sürükleyici katkı kullanılsa bile, karışım esnasında bir miktar hava karışıma girmektedir. Karışıma giren hava miktarı genellikle düşük su içeren karışımlarda daha fazla olmaktadır. Karışım içinde bulunan hava taze betonun akışkanlaştırıcılığını arttırmaktadır [22].

Hava sürükleyici katkıları kullanılarak, beton içerisinde hacmin %4 ile %6'sı oranında küçük kapalı baloncuklar şeklinde dağılık hava boşlukları oluşturulması, hem malzemeyi daha elastiki yaparak buz basınçlarına dayanımlarını arttırmakta, hem boşluklar kılcal kanalları kestikleri için kılcal su emmeyi azaltmakta, hem de suyun kolay boşalmasına ve hidrostatik basınçların azalmasına imkân verecek boşluklar sağlanmaktadır. Bu yüzden soğuk iklim şartlarına maruz kalacak betonlarda hava sürükleyici katkıların kullanılması yararlı olmaktadır [16].

Meininger yapmış olduğu çalışmada, uçucu küllü betonların, uçucu kül içermeyen betonlara göre hedeflenen hava miktarı için daha fazla hava sürükleyici ihtiyacı olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca uçucu kül kullanılan betonlarda hava miktarının kontrolünün sağlanmasının oldukça güç olduğunu belirtmiştir [22].

Gebler ve Klieger, uçucu küllerin hava sürüklenmesine olan etkileri üzerine yaptıkları çalışmalar neticesinde şu sonuçlara ulaşmışlardır [21]:

1-C tipi uçucu küller, F tipi uçucu küllere nazaran daha az hava sürükleyici katkıya ihtiyaç duymaktadır. Uçucu küllü betonlar genel olarak; sadece portland çimentosu kullanılan betonlara göre; daha az hava sürükleyiciye ihtiyaç duymaktadır.

2- C tipi uçucu küllü betonların kaybettiği hava miktarı, F tipi uçucu küllü betonlara göre daha azdır.

3-Uçucu küllerin, hava sürükleyici katkı ihtiyacını arttırmaları sonucunda; hava kaybı daha fazla olmaktadır.

4-F tipi uçucu küllerin kullanıldığı betonlarda karışımın tamamlanmasından 90 dakika sonrasında yüzde 59'a varan hava kaybı gözlenmiştir.

5-Uçucu külden bulunan alkali miktarı arttıkça, hava sürükleyici katkı maddesine olan ihtiyaç artmaktadır.

Sonuç olarak, uçucu küllerin betonda hava sürükleyici katkı ihtiyacını arttırdığını söylemek mümkündür.

2.3.6 Uçucu küllerin sertleşmiş beton özelliklerine etkisi

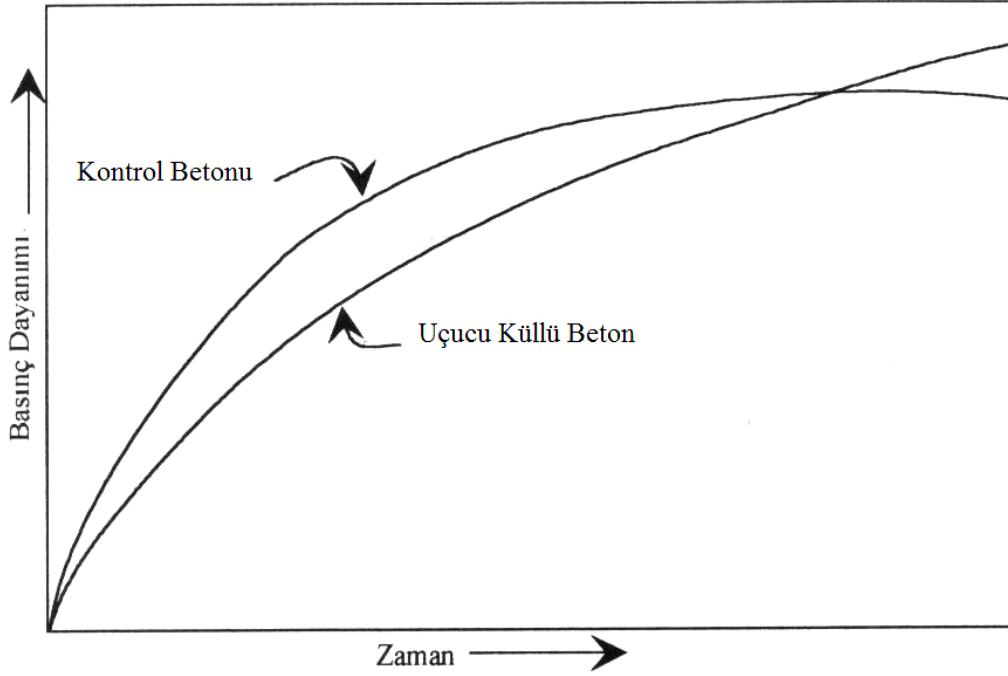
Uçucu küllerin kullanılmasındaki amaçlardan biride sertleşmiş beton özelliklerini iyileştirilmesidir. Uçucu küllerin bu özelliklere olan etkisi; puzolanik özelliğinden dolayı uzun vadede daha net anlaşılabilir. Bu bölümde; uçucu küllerin sertleşmiş beton özelliklerinden dayanım, elastisite, sünme ve rötre üzerine olan etkilerini ele alacağız.

2.3.6.1 Uçucu küllerin betonun dayanımı üzerindeki etkisi

Sertleşmiş betondan dayanımlı, dayanıklı ve ekonomik olması beklenir [25]. Uçucu küllerin atık bir ürün olmasından ötürü ekonomik faydasının bulunduğunu daha önce belirtmiştik. Uçucu küllerin betonun dayanımını üzerindeki etkisi için ise bir çok çalışma yapılmıştır.

Betonun dayanımını etkileyen ana faktörler; kullanılan çimento miktarı ve su/çimento oranıdır. Bu faktörler, betonun işlenebilirliği, istenilen dayanım ve dayanıklılığı ve ekonomiklik bakımından optimum şekilde ayarlanırlar. Bu yüzden uçucu külün işlenebilirliğe olan etkisi, doğal olarak dayanım ve dayanıklılık üzerinde de etki göstermektedir. Uçucu külün betonun su ihtiyacını arttırmaması özellikle betonun dayanım kazanmasında; uçucu külün sorun çıkarmasını engellemiş olmaktadır [21].

Uçucu külün betonun dayanım kazanımına olan etkisi genel olarak erken yaşlarda daha düşükken, daha sonraki yaşlarda bu etki giderek artmaktadır. Uçucu küllerin genel olarak; erken yaşlarda kontrol betonlarından düşük dayanımlar verdikleri ve zaman içerisinde kontrol betonlarının dayanımını yakalayıp geçtikleri bilinmektedir. Bunun en önemli sebebi de puzolanik özelliklerinden dolayı bağlayıcılık özelliği gösterebilmek için betonda hidrasyon reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan serbest kireç oluşumunu bekleyerek puzolanik reaksiyona zaman ilerledikçe başlamalarıdır. Uçucu külün dayanım kazanma üzerine olan bu etkisinin kontrol betonuna göre karşılaştırılması şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Uçucu külün betonun dayanım kazanımı üzerindeki etkisi.

Uçucu külün betonun dayanım kazanımı üzerindeki etkisi ile ilgili bir çok faktör bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri; uçucu külün türü, kimyasal kompozisyonu, tane çapı, reaktifliği, sıcaklık ve kür koşullarıdır.

F tipi uçucu küller ilk yaşlarda düşük mukavemetler verirken, C tipi uçucu küllerde kireç oranı daha yüksek olduğu için ilk yaşlarda mukavemet kazanma hızı daha fazladır. Hatta bazı çalışmalarda, C tipi uçucu küllü betonların, kontrol betonlarıyla hemen hemen aynı hızda mukavemet kazandıkları gözlenmiştir [12]. Yuan ve Cook yapmış oldukları çalışmada, betonun dayanım kazanımını yüksek kireçli uçucu küllü betonlar ($\text{CaO}=\%30,3$) ve hiç uçucu kül içermeyen betonlar üzerinde incelemiştir. Su/çimento oranını 0,45 olarak sabit tuttıkları, %20, %30 ve %50 oranında uçucu külün çimento ile yer değiştirildiği bu çalışma sonucunda, uçucu küllü betonların 28 güne kadar kontrol betonuyla hemen hemen aynı dayanıma sahip oldukları, 28 günden sonra ise kontrol betonuna göre daha fazla dayanım kazandıklarını tespit etmişlerdir [21].

Raba ve Smith'in kireç oranı %20 olan uçucu küller üzerinde yaptıkları çalışmanın sonuçları ise çizelge 2.4'de gösterilmiştir. Bu çalışmada uçucu kül, karışımda ince agrega olarak kullanılmıştır [21].

Çizelge 2.4: Yüksek kireç içeren uçucu küllerin; dayanım kazanımına etkisi.

Çimento (kg/m ³)	Uçucu Kül (kg/m ³)	28 günden 56 güne kadar olan dayanım artışı (%)
91	50	15.2
91	59	16.0
91	68	13.6
91	77	10.5
136	50	10.2
136	59	11.8
136	68	11.1
136	77	10.3
182	50	8.2
182	59	12.4
182	68	12.0
182	77	6.2

Düşük kireçli küller olarak bilinen F tipi uçucu küllerin kullanıldığı betonlarda ise dayanım kazanımının düşük hızlarda olduğu bilinmektedir [21].

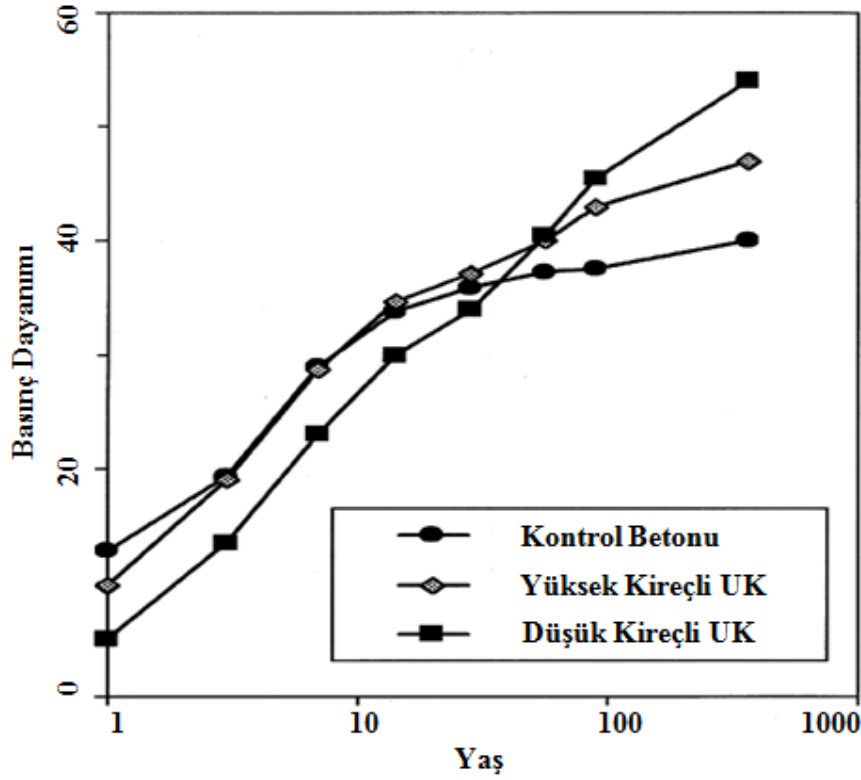
Thomas ve arkadaşları, uçucu küllerin kompozisyonlarının uçucu külün kullanımı üzerinde yapmış oldukları etkiler ile ilgili yaptıkları çalışmada, üç farklı kireç oranına sahip uçucu kül kullanmışlardır. Bunlar;

1-F tipi (düşük kireçli uçucu kül, CaO yüzdesi 8'den az).

2-CI tipi (orta kireçli uçucu kül, CaO yüzdesi 8 ila 20 arasında).

3-CH tipi (yüksek kireçli uçucu kül, CaO yüzdesi 20'den fazla).

Kullanmış oldukları üç farklı uçucu kül ile ürettikleri betonların basınç dayanımı değerlerini ve kontrol betonlarının basınç dayanımı değerlerini değerlendirerek; uçucu küllerin kimyasal kompozisyonlarına göre zaman içerisinde kontrol betonuna nazaran sağlamış oldukları basınç dayanımı değerlerinin birbirleri ile karşılaştırılması şekil 2.2'de gösterilmiştir [26].



Şekil 2.2: Uçucu kül kompozisyonunun basınç dayanımı üzerindeki etkisi.

Şekil 2.2 incelendiğinde; yüksek kireçli uçucu külün 4-5 günlük bir zaman zarfı içerisinde kontrol betonunun dayanımını yakaladığı ve 90 günden sonra kontrol betonunun dayanımını geçtiği görülmektedir. Düşük kireçli uçucu kül ise erken yaşlarda hem kontrol betonundan hemde yüksek kireçli uçucu külü betondan daha az dayanım değerleri yakalamış ancak 90 günden sonra her ikisinin de üstünde dayanım değerleri yakalamıştır. Düşük kireçli uçucu küllerin dayanım kazanma hızı kontrol betonuna ve yüksek kireçli uçucu küllü betona nazaran erken yaşlarda biraz daha düşük olurken, ilerleyen yaşlarda dayanım kazanma hızı her ikisinin de oldukça üstünde gerçekleşmiştir.

Uçucu küllerin tane çapları da dayanım üzerinde etkilidir. Uçucu küllerin işlenebilirliğe olan etkisini anlatırken, tane çapı 45 µm den fazla olan küllerin su ihtiyacını arttırdığını söylemiştik. Bu sebepten ötürü kaba taneli uçucu küllerin beton dayanımına olumsuz bir etki bırakabileceğini söyleyebiliriz.

Taşdemir ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada beton karışımındaki uçucu küllerini kullanmadan önce öğütmişlerdir. Uçucu kül tanelerinin inceliği ve yoğunluğu bir miktar değişmiştir. Yapılan basınç deneyler sonucunda öğütülmüş uçucu kül

içeren betonların %30 yer değiştirme yüzdesine kadar kontrol betonlarının basınç dayanımlarından daha yüksek basınç dayanımları sağladıkları görülmüştür [17].

Crow ve Dunstan yaptıkları çalışma sonucunda, ince taneli uçucu küllerin, çimento ile daha kolay reaksiyona girdiğini tespit etmişler ve uçucu külün inceliğinin özellikle F tipi uçucu küllerde daha önemli bir faktör olduğunu belirtmişlerdir. Weshe ve Vom Berg ise yaptıkları çalışma sonucunda uçucu kül inceliğinin dayanım üzerinde çok fazla etkili olmadığını tespit etmişlerdir. Joshi'nin yaptığı çalışmada ise ince taneli uçucu küllerin, kaba taneli olanlara nazaran dayanım kazanımına daha olumlu etki yaptığı ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak uçucu küllerin tane çapının dayanım üzerindeki etkisinin diğer faktörlere nazaran daha az olduğunu söyleyebiliriz [21].

Sadece portland çimentosundan üretilen betonlarda 30 derecenin üzerindeki sıcaklıklarda kür edilen numunelerde dayanımın düştüğü görülmektedir. Oysaki yapılan çalışmalar uçucu küllerde bu durumun tam tersi gerçekleştiği görülmüştür. Uçucu küllerde kür esnasındaki ısı arttıkça, dayanımda pozitif bir katkının gerçekleştiği görülmüştür. Buda büyük kütleli betonlarda uçucu küllere ekstra bir avantaj sağlamaktadır [21].

Kobayashi, Japonya'daki bir tünel inşaatı sırasında betonun 100-160 derece sıcaklıklarındaki kaya kütesinin altında kalacağı için, yaşanabilecek dayanım kaybını telafi etmek için betonun %25'i kadar uçucu kül kullanıldığını belirtmiştir [21].

Bamforth yapmış olduğu çalışmada, yüksek sıcaklıklarda kür edilen uçucu külsüz ve uçucu küllü numunelerin dayanımlarını inceleyerek uçucu küllü betonların, uçucu külsüz betonlara (sadece portland çimentosu bulunan) nazaran dayanım bakımında çok daha yüksek değerler verdiğini tespit etmiştir [21].

Ravina ise yaptığı çalışma neticesinde şu sonuçlara ulaşmıştır [21]:

1-Sıcaklık artışı uçucu küllü betonlarda sadece portland çimentosunun bulunduğu betonlara göre reaksiyon hızında daha fazla bir artışa sebep olmaktadır.

2-Sıcaklık artışının uçucu küllü betonlardaki reaksiyon hızına etkisi o kadar büyüktür ki, uçucu külün puzolanik özelliği ve tane çapından kaynaklanan negatif etkilerin bile üstünden gelebilmektedir.

3-Dışsal ısının etkisiyle başlayan reaksiyon, dışsal neden ortadan kalksa bile aynı hızda devam etmektedir.

Sonuç olarak, uçucu küllerin yüksek sıcaklıktaki kür koşullarında dayanıma oldukça olumlu bir etki bıraktığını söyleyebiliriz.

2.3.6.2 Uçucu küllerin betonun elastisite modülü üzerindeki etkisi

Uçucu küllerin, betonun elastisitesi üzerine olan etkisinin çok fazla olmadığı yapılan çalışmalar neticesinde ortaya konulmuştur. Uçucu küllerin betonun basınç dayanımına olan etkisi göz önüne alındığında, basınç dayanımının da elastisiteye azda olsa etkisi olduğunu düşünürsek; uçucu küllerin basınç dayanımını etkileyen özellikleri bir miktarda olsa elastisite üzerinde etkili olabildiği tespit edilmiş, özellikle erken yaşlarda uçucu küllerin elastisiteyi düşürdükleri, yüksek yaşlarda ise arttırdıkları bulunmuştur [21].

Abdun-Nur yapmış olduğu çalışmada, uçucu küllerin elastisite modülünü erken yaşlarda düşürdüğünü ancak yüksek yaşlarda arttırdığını tespit etmiş, genel olarak elastisite modülünü yükselttiğini belirtmiştir [21].

Lane ve Best yapmış olduğu çalışmada, uçucu külün basınç dayanımını etkileyen özelliklerinin elastisite modülü üzerinde de azda olsa etkisinin bulunduğunu belirtmiş, elastisite modülünün de aynen basınç dayanımında olduğu gibi erken yaşlarda düşük, ileri yaşlarda ise yüksek olduğunu tespit etmiştir [21].

Crow ve Dunstan'ın yapmış olduğu çalışmada, uçucu küllü betonların ve kontrol betonlarının hemen hemen aynı elastisite özelliklerine sahip oldukları tespit edilmiştir. Elastisite modülü, basınç dayanımına paralel olarak zaman içerisinde artmıştır [21].

2.3.6.3 Uçucu küllerin betonun sünme ve rötresine olan etkisi

Sünme, sabit gerilme altında malzemenin zamanla deformasyona uğrama halidir. Rötre ise, taze veya prizini almamış betonun, su kaybederek veya ortam ile sıcaklık farklarından dolayı büzülerek, büzülmesi ve kılcal çatlaklar meydana getirmesidir. Yapılan çalışmalarda uçucu küllerin sünme ve rötre üzerinde önemli etkilerinin bulunmadığı ortaya çıkmıştır.

Lohtia ve arkadaşlarının uçucu küllerin betonun sünmesi ve rötresi üzerine olan etkileri ile ilgili yapmış oldukları çalışmada, sünmenin, uçucu küllü ve uçucu külsüz

kontrol betonlarında hemen hemen aynı olduğunu belirtmişlerdir. %15'e kadar oranlarda uçucu külün bulunduğu betonlarda sünme kontrol betonuna göre biraz daha fazla olmakla beraber, %15'ten fazla oranlarda fazla bir fark tespit edilememiştir [21].

Ghosh ve Timusk'un yapmış olduğu çalışmada ise, uçucu küllü beton numunelerde kontrol betonlarına nazaran, sünme daha az olmaktadır. Yuan ve Cook ise yapmış oldukları çalışmada, çimento ile %30 ila %50 oranında yer değiştiren yüksek kireçli uçucu küllerin; çimento ile %20 yer değiştiren uçucu küllü numuneler ve kontrol betonlarına nazaran, daha yüksek sünme yaptıklarını tespit etmişlerdir. Gilford ve Ward ise, uçucu küllerin sünmeyi azalttığını belirterek, bunun sebebi olarak uçucu külün elastisite modülünü yükseltmesini ve sünmeyi sağlayan çimento hamurunu azaltmasını göstermişlerdir [21].

Uçucu külün rötreye olan etkisi üzerine yapılan çalışmalarda ise, uçucu küllerin rötreyi çok fazla etkilemedikleri saptanmıştır [21].

Davis yapmış olduğu çalışmada, uçucu küllü betonlarda kontrol betonlarına nazaran rötrenin daha az olduğu tespit edilmiştir. Ghosh ve Timusk'un yapmış olduğu çalışmada da uçucu küllü betonların; kontrol betonlarına göre rötresi daha azdır. Yuan ve Cook ise yüksek kireçli uçucu küllerle yapmış oldukları çalışmada, uçucu küllerin, çimento ile yer değiştirmesi sonucunda rötrenin çok fazla değişmediğini tespit etmişlerdir. Munday ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada da uçucu küllerin rötreye üzerinde önemli bir etkilerinin bulunmadığı belirtilmiştir [21].

2.3.7 Uçucu küllerin betonun dayanıklılığına etkisi

Betonun dayanıklılığı (durabilite) da betonun kalitesine bağlı olup, performansta bileşen malzemeler, karışım oranları, üretim yöntemi, betonun bakım ve kuru gibi süreçler ile çevre koşulları etkilidir. Amaca uygun malzeme seçilmeli, su da dahil bütün bileşenler standartlara uygun olmalı, karışım iyi tasarlanmalı ve taze betonun yeterli biçimde yerine yerleştirilmesi sağlanmalı, özellikle ilk sertleşme sürecinde yüksek sıcaklık farklarından kaçınılmalı, beton iyi korunmalı ve gerekli kür aksatılmadan yapılmalıdır [25]. Uçucu küllerin betonun işlenebilirliğine ve dayanımına olan etkisi dışında dayanıklılığına olan etkisinin de önemli bir kriter olduğunu daha öncede belirtmiştik. Bu bölümde uçucu küllerin betonun dayanıklılığına olan etkisini inceleyeceğiz.

2.3.7.1 Uçucu küllerin betonun sülfat saldırısına olan dayanıklılığı üzerindeki etkisi

Sudaki, zemindeki ve deniz suyundaki sülfat iyonları beton yapılarda bozulmaya yol açabilir. Sülfat saldırısının zararlı etkisi, sülfat iyonlarının sertleşmiş betondaki alüminli (C_3A) ve kalsiyumlu ($Ca(OH)_2$) bileşenlerle kimyasal reaksiyona girerek, hacmi çok artan etrenjit ve alçı oluşturmaktan kaynaklanmaktadır. Reaksiyon ürünleri, sertleşmiş betonda genleşme yaratarak agrega-çimento hamuru aderansının olumsuz yönde etkilenmesine, çatlak oluşumuna ve geçirimsizliğin artmasına yol açar. İleri derecedeki etkilenmelerde ise betonun tamamen dağılması söz konusudur. Sülfat saldırısı gibi dış kaynaklı iyon girişi sebebiyle oluşan kimyasal reaksiyonlarda çimentonun kimyasal bileşiminin kontrolü kadar, betonun geçirimsizliği de önem kazanmaktadır [27].

Reaksiyonun gelişimini, sülfatlı ortamın şiddeti, betonun geçirimsizliği, betonda kullanılan çimentonun kimyasal yapısı ve suyun varlığı etkilemektedir. Sülfat dayanıklılığını arttırmak için sülfata dayanıklı çimento ile birlikte uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi puzolanik katkıları kullanılabilir. Puzolanlar $Ca(OH)_2$ bağlayarak sülfatlarla reaksiyonu önlerler ve sadece Portland çimentosu kullanımı ile kıyaslandığında bağlayıcı içindeki $Ca(OH)_2$ ve C_3A oranının azaltılmasını sağlar [27].

Dikeou'nun yapmış olduğu çalışmada, uçucu küllü betonların kontrol betonlarına göre sülfat etkisine dayanıklılık bakımından daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Kalousek ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, betonun sülfat etkisi altındaki uzun süreli servis performansı araştırılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde şu sonuçlara ulaşılmıştır [21]:

1-Bazı puzolanlar betonun sülfat etkisine dayanıklılığını oldukça yükseltmiş, özellikle uçucu küller kullanılan puzolanlar arasında en yüksek dayanıklılığı göstermiştir.

2-Uzun süre sülfat etkisine maruz kalacak betonların mutlaka yüksek kaliteli puzolan katkısı ve sülfat etkisine dayanıklı çimento ile üretilmesi gerekmektedir.

Dunstan'ın yapmış olduğu çalışmada da, uçucu küllerin betonda sülfat etkisine dayanıklılığı azalttığı tespit edilmiştir [21].

Yukarda anlatılan çalışmalarda genellikle bitümlü uçucu küller kullanılmıştır. Linyitten elde edilen uçucu küllerle ilgili olarak Mathew, sülfat etkisi üzerinde yapmış olduğu çalışma sonunda, bu tür uçucu küllerin sülfat etkisine dayanıklı olmadıklarını söylemiştir [21].

2.3.7.2 Uçucu küllerin alkali – agrega reaksiyonu üzerindeki etkisi

Bileşiminde belirli mineraller bulunan agregalar, betonda oluşan alkali hidroksitlerle reaksiyona girer. Reaksiyonun neden olduğu beton genleşmesi, belirli sınırları aştığı zaman beton içerisinde potansiyel bir tehlike oluşturur. Alkali-agrega reaksiyonunun en sık görülme şekli alkali-silika reaksiyonu şeklindedir [28].

Alkali-agrega reaksiyonlarının betonda hasara yol açtığı anlaşıldıktan sonra Stanton, bu reaksiyonların puzolanlar yardımıyla azaltılabileceğini öngörmüştür. Papper ve Mather'in yapmış oldukları çalışmada, uçucu küllerin betondaki alkali-agrega reaksiyonunu büyük ölçüde azalttıkları tespit edilmiştir. Oberholster ve Westra'nın düşük kalsiyumlu uçucu küller kullanarak yapmış oldukları çalışma sonucunda uçucu küllerin alkali-silika reaksiyonunu azalttıkları görülmüştür [21].

2.3.7.3 Uçucu küllerin donma-çözülme üzerindeki etkisi

Bilindiği gibi beton boşluklu bir malzemedir. Bu boşluklarda ya betonun üretilmesi sırasında kullanılan karma suyu veya betonun geçirimsizliği nedeniyle dışarıdan içeriye girmiş su bulunmaktadır. Su donduğunda hacminde %9 oranında bir artış meydana gelir. Bu yüzden, donma olayı cisimlerde belirgin bir ölçüde genleşme meydana getirmektedir. Donma-çözülme olayının birkaç sefer tekrarlanması sonucu oluşan boşluklar biraz daha genişleyebilir ve bunun sonucunda betonun yüzeyinde önemli derecelerde çatlaklar ve hatta döküntüler meydana gelebilir. Bu nedenle beton donma olayının etkisi altında kalmaya ve bunun sonucu olarak da hasar görmeye elverişli bir malzemedir. Betonun donmaya dayanıklı olması üzerinde yörenin iklim şartlarının büyük etkisi vardır. En elverişsiz koşullar geceleri donma olayının meydana gelmesi, gündüzleri de sıcaklığın sıfırın üstüne çıkması durumudur. Böyle bir durumda donma ve çözülme olayları yıl içerisinde birçok defa tekrarlanacak ve birkaç yıl sonra beton parçalanacaktır [29].

Yuan ve Cook; yüksek kalsiyumlu küllerin donma-çözülme olayın üzerindeki etkisi üzerine yapmış oldukları çalışmada, %20 uçucu kül içeren numunelerin, kontrol betonuna göre donma-çözülme etkisine daha dayanıklı olduklarını tespit etmişlerdir.

Buna karşın %50 uçucu kül içeren numuneler testin ilerleyen aşamalarında donma-çözülme olayında aşırı derece etkilenmişlerdir [21].

Virtanen yapmış olduğu çalışmada ise, betonun basınç dayanımı ve hava miktarı sabit tutulduğunda uçucu küllerin donma-çözülme olayına karşı önemli bir etkilerinin olmadığını tespit etmiştir. CANMET'in yapmış olduğu çalışmada da, uçucu küllü betonlarla kontrol betonları hemen hemen aynı donma-çözülme dayanıklılığı göstermiştir. Larson yapmış olduğu çalışmada, donma-çözülme olayında asıl belirleyici kriterin hava sürüklenmesi olduğunu, uçucu küllerin bu olayda çok fazla etkin rol oynamadıklarını belirtmiştir [21].

2.3.7.4 Uçucu küllerin betonun geçirimsizliği üzerindeki etkisi

Betonun dışarıdan gelebilecek olan zararlı etkilere karşı korunmasında geçirimsizlik önemli bir paya sahiptir. Betona dışarıdan sülfat, asit, deniz suyu gibi faktörler etki edebilir. Özellikle hizmet ömrü boyunca deniz suyu içerisinde bulunacak beton kütlelerinde geçirimsizliğe önem vermek gerekmektedir.

Uçucu küllerin beton geçirimsizliğine olan etkisi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Davis'in bu konuda yaptığı çalışmada, geçirimsizlik üzerinde hidrate olmuş elemanların aktif rol oynadığı anlaşılmıştır. Buna göre uçucu küller erken yaşlarda geçirimsizliği olumsuz etkilerken, ileriki yaşlarda kontrol betonuna göre daha iyi sonuçlar vermişlerdir. Kanitakis'te yaptığı çalışmalarda buna benzer sonuçlara ulaşmış ve uçucu küllü betonlarda erken yaşlarda geçirimsizliğin fazla, ileri yaşlarda ise az olduğunu ortaya koymuştur [21].

Erdoğan, uçucu küllerin beton özelliklerine etkileri üzerine yaptığı çalışmasında, uçucu kül katkılı betonların geçirimsizliğinin katkısız betonlarınkinden daha az olduğunu ifade etmiştir [29].

2.3.7.5 Uçucu küllerin karbonatlaşma üzerindeki etkisi

Karbonatlaşmanın oluşabilmesi için ortamda bazı bileşenlerin bulunması şarttır. Bunlar; çimentonun betondaki hidratasyonu sonucu oluşan ve fazla miktarda bulunan kalsiyum hidroksit, atmosferde serbest durumdaki karbondioksit ve bu iki maddenin reaksiyona girebilmesi için gerekli olan nemdir. Bu üç parametre olduğu sürece beton sürekli olarak karbonatlaşacaktır. Karbonatlaşma beton yüzeyinden başlayarak iç kesimlere doğru hızı azalarak ilerler [30].

Karbonatlaşmanın iç kesimleri ilerlemesi neticesinde üç tehlikeli durum meydana gelebilir [21]:

1-Betonun geçirimsizliği artabilir.

2-Rötre çatlakları oluşabilir.

3-Çelik donatının korozyona olan dayanıklılığı azalabilir.

Gebauer yaptığı araştırmada, karbonatlaşma derinliğinin, basınç dayanımı ve çimento miktarı düştükçe, su/çimento oranı ve uçucu kül miktarı arttıkça arttığını tespit etmiştir. Ho ve Lewis yaptıkları çalışmada, özellikle düşük basınç dayanımlı numunelerde (30MPa'dan az) uçucu küllerin karbonatlaşma derinliğini arttırdıklarını tespit etmişlerdir. Genel olarak yüksek kalitedeki uçucu küllerin, kontrol betonlarına yakın derecede karbonatlaşmaya dayanıklı olduklarını söyleyebiliriz [21].

2.3.7.6 Uçucu küllerin donatı korozyonu üzerindeki etkisi

Korozyon bir malzemenin yüzeyinin dıştan kimyasal etkiler veya elektrokimyasal yolla değişime uğraması olayıdır. Çelik malzemesinde bu değişim sonucu oluşan ürüne pas denir. Günümüzde korozyon, yapı elemanlarının servis ömürlerini etkileyen en önemli etken olmaktadır. Korozyon, donatılarda ve betonda birbirini takip eden kimyasal reaksiyonlar olarak ortaya çıkmaktadır. Betonarmede donatıyı paslanmaya karşı koruyan, betonun pH=13 civarında bulunan yüksek alkali düzeyidir. Bu yüksek alkali seviyesi düşmeye başladığı zaman beton artık içindeki donatıyı korozyona karşı koruyamaz hale gelir ve donatılar paslanmaya başlar. Paslanan donatının hacmi genişler ve betonarmede donatılara paralel çatlaklara sebep olur. Beton bir kere çatladıktan sonra, tamamen atmosferik etkilere maruz kalır ve yapı elemanı büyük bir hızla ömrünü doldurur [31].

Gilliand, yapmış olduğu çalışmada, uçucu küllerin donatı korozyonu üzerinde önemli bir etkisinin bulunmadığını tespit etmiştir. Larson'un yaptığı çalışmada ise, uçucu külün beton içindeki varlığının donatının korozyona olan dayanıklılığını arttırdığını tespit etmiştir [21].

Donatı korozyonunu asıl etkileyen faktörlerin betonun geçirimsizliği ve kimyasal etkiler olduğunu düşünürsek, uçucu küllerin bu faktörler üzerindeki etkisinin bir neticesi olarak donatı korozyonunu incelemek daha doğru olabilir.

2.3.8 Uçucu küllü betonlarda karışım oranlama metotları

Betonda uçucu küllerin kullanılmasında 2 ana etken söz konusudur [32]:

1-Beton maliyetini düşürmek

2-Betonun taze ve sertleşmiş özelliklerini iyileştirmek.

Uçucu kül bir atık ürünü olduğu için elbette çimentoya göre daha düşük maliyetli bir malzemedir. Bu durumda betonda uçucu kül kullanımı ile çimento maliyetleri dolayısı ile de betonun maliyetinde bir düşüş yaşanması beklenmektedir. Ancak uçucu küllerin betonda kullanılmasında tek faktör beton maliyetinin düşürülmesi değildir. Uçucu kül betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerinde çok olumlu etkilerde bulunduğundan, betonun özelliklerini iyileştirmek bakımından da, uçucu kül kullanılması bir çok fayda sağlamaktadır. Uçucu küller, hidrasyon ısısını düşürüp işlenebilirliği arttırdıkları gibi, uzun vadede (90 gün ve sonrası) betonda istenilen mukavemetin sağlanmasında yardımcı olmaktadır.

Uçucu külün betonda kullanımı 2 şekilde gerçekleşmektedir [21]:

1-Portland çimentosu yerine uçucu küllü çimentonun kullanılması.

2-Uçucu külün beton karışım içerisinde ilave bir bileşen olarak kullanılması.

Birinci metot daha basit bir metottur ve kontrolü kolaydır. İkinci metot ise daha komplike bir metot olmakla beraber, daha esnek bir metottur. Uçucu külün özelliklerinden daha etraflıca yararlanmayı sağlar. Ancak bu metot uygulanırken uçucu külün özellikleri iyi bilinmelidir [21].

Uçucu küller betonda birden fazla fayda sağlar. Taze betonda genellikle ince agrega gibi işlev görür ve belli bir dereceye kadar su ihtiyacını azaltır. Sertleşmiş betonda puzolanik özelliğinden dolayı, bir bağlayıcı elemanı gibi işlev görerek mukavemet ve dayanıklılık sağlar [21].

Uçucu küllerle ilgili 2 genel görüş öne sürülmüştür [21] :

1-Uçucu kül, betonda erken dayanımı genellikle düşürmektedir.

2-Eşit işlenebilirlik için, uçucu kül içeren beton, sadece portland çimentosunun kullanıldığı betona göre daha az suya ihtiyaç duyar.

1980'li yıllardan itibaren Türkiye'de katkılı çimentoların çimento üretimindeki payı, %90'ların üstüne çıkmıştır. Uçucu küllerde çimento üretiminde bir katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Uçucu kül, çimentonun ana hammaddeleri olan kil ve

kalkere hammadde olarak karıştırılarak klinker üretiminde de kullanılmaktadır. Uçucu kül çimentoda katkı olarak kullanıldığında enerji tasarrufu sağlanmakta ve daha ucuz çimento elde edilmektedir. Yine uçucu külün, ikame malzemesi olarak çimentoda kullanılması durumunda da ekonomi sağlanmaktadır. Türkiye'deki uçucu küller ile ilgili olarak yapılan deneysel bir çalışmada, Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Orhaneli, Soma ve Tunçbilek uçucu küllerine ait özgül yüzey değerleri, çimento standartlarında aranan en az 2800 cm²/gr değerinden büyük veya yaklaşık eşit olarak bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlar, uçucu küllerin öğütme işlemi yapılmadan doğrudan çimento üretiminde veya üretim sonrası ikame metodu ile çimentonun bir bölümü yerine kullanılabileceğini göstermektedir [3].

Uçucu küllerin betonda kullanıldığı dönemden beri, genelde bir referans betonu ile karşılaştırılma gereksinimi duyulmuştur. Bu karşılaştırma hem taze, hem de sertleşmiş beton özellikleri bakımından yapılmıştır. Daha sonraları ise, uçucu külün betonda kullanılması açısından 3 farklı karışım oranlama metodu geliştirilmiştir [21]:

- 1- Çimento yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması (basit ikame metodu).
 - 2- Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması (ilave metodu).
 - 3- Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine konulması (kısmi ikame metodu).
- I- Modifiye edilmiş ikame metodu.
II- Rasyonel oranlama metodu.

2.3.8.1 Çimento yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması (Basit ikame metodu)

Basit ikame metodu; çıkarılan bir miktar portland çimentosu yerine, direkt olarak uçucu külün ikame edilmesini kabul eder. Bir miktar çimentonun çıkarılıp yerine uçucu külün kullanıldığı betonların erken dayanımları düşük olurken, zaman içerisinde sadece çimento kullanılan betonunun dayanımı yakalamakta ve uzun vadede bu dayanımın bile üzerinde bir dayanım sağlamaktadır. Yapılan çalışmalarda, belli yüzde hacimce veya ağırlıkça çimento yerine kullanılmış bulunan uçucu küllü betonların 3 aylık süre zarfında düşük basınç dayanımı değerleri verirken, 6 ay sonunda yüksek dayanımlara eriştikleri görülmüştür. Büyük kütleli beton inşaatlarında erken dayanımların düşük olması, uçucu külün hidrasyon ısını düşürme avantajı yanında kabul edilebilir bir dezavantaj olduğu düşünülebilir [21].

Uçucu küller, kullanıldıkları betonun erken yaşlarında sanki ince agregası gibi davranmakla beraber, bağlayıcılık özellikleri oldukça düşük gözükmektedir. İlerleyen yaşlarda ise bağlayıcılık özelliğinde büyük artış görülmekte, bu da doğal olarak betonun dayanımına olumlu etki olarak yansımaktadır. Bu sebepten ötürü uçucu külün içerdiği kireç oranı önem kazanmaktadır [21].

2.3.8.2 Uçucu külün ince agregası olarak kullanılması

İlave metodu; kullanılan çimento miktarında bir azaltmaya gitmeksizin, uçucu külün karışıma ilave edilmesini kabul eder. Bu yöntem sayesinde özellikle uzun vadede betonun bağlayıcılık özelliği artmaktadır. Ayrıca betonun su ihtiyacı ve kohezyonu da artmaktadır.

Yapılan çalışmalarda, betona uçucu külün eklenmesiyle betonun tüm yaşlarında ek bir mukavemet kazandığı tespit edilmiştir. Mukavemet artışı 7 günlük dayanımlarda düşük olmakla beraber, 3 ay ve sonrasında 6,9 Mpa'ya kadar varan ek mukavemet artışı gözlenmiştir [21].

2.3.8.3 Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agregası yerine konulması (Kısmi ikame metodu)

Kısmi ikame metodu; uçucu küllü beton için kullanılan üçüncü metottur. Bu metodda, çıkarılan çimento miktarından farklı bir miktarda uçucu kül karışıma eklenmekte ve bu işlemi gerçekleştirmek için ince agregası ve su miktarında oynama yapılmaktadır. Bu metod sayesinde uçucu kül kullanımının yol açtığı erken yaşta dayanım kaybı probleminin çözülmesi amaçlanmaktadır. Bu metod iki farklı uygulama şekline sahiptir; metodun orijinali olarak modifiye edilmiş ikame metodu ve bu metodun geliştirilmesi ile ortaya çıkan rasyonel ikame metodu [21].

Modifiye edilmiş ikame metodu

Modifiye edilmiş ikame metodu; 1958 yılında Lovewell ve Washa'nın uçucu küllerle ilgili olarak yapmış oldukları bir çalışmaya dayanır. Uçucu küllerin çimento ile birlikte beton içerisindeki modifikasyonu sonucunda, erken yaşta da betonun dayanımının, kontrol betonu ile mukayese edilecek ölçüde olduğunu ortaya koymuşlardır. Buldukları sonucun ana teması; kontrol betonunun 3 ila 28 gün arasındaki basınç dayanımına, uçucu kül kullanılarak elde edilen betonun

ulaşabilmesi için, kullanılan uçucu kül ve çimento toplamının kontrol betonunda kullanılan çimento miktarından fazla olması gerektiğidir [21].

Sonuç olarak, bu metot ile çimento yerine kullandığımız uçucu külü, çıkardığımız çimento miktarı kadar değil de, çıkardığımızdan daha yüksek bir miktarda kullanırsak, betonun erken yaşlarda düşük basınç dayanımına sahip olması sorununu çözme imkânını elde edebiliriz.

Rasyonel oranlama metodu

Rasyonel oranlama metodu; ilk kez 1967 yılında Smith tarafından denenmiştir. Modifiye edilmiş ikame metodundan farklı olarak Smith; ‘uçucu kül bağlayıcılık etkinliği faktörü’ (k) kavramını ortaya atmıştır. Buna göre, etkinlik faktörü uçucu kül içeren betonlar üzerinde yapılacak testler yardımıyla tespit edilebilir ve her uçucu kül için farklı k değerleri bulunabilir [21]. Uçucu kül etkinliği ile ilgili ayrıntılı bilgi bir sonraki bölümde verilecektir.

Sonuç olarak, uçucu külün betonda kullanımını iki ana başlıkta toplayabiliriz. Betondaki çimento miktarını hiç değiştirmeden ince agrega olarak betona uçucu kül eklenebilir veya betondaki çimento miktarı azaltılarak uçucu kül kullanılabilir ki buda ya azaltılan miktarda uçucu kül kullanılmasıyla yada azaltılan miktardan fazla uçucu kül kullanılmasıyla yani bir başka deyişle toplam bağlayıcı miktarı artırılarak kullanılmasıyla gerçekleşir.

2.3.9 Uçucu küllerin etkinliği ve k etkinlik faktörü ile ilgili yapılmış çalışmalar

Rasyonel oranlama metodu ile ortaya çıkan k etkinlik faktörü, uçucu küllerin etkinliğini anlamamız açısından önem kazanmaktadır. Etkinlik faktörü ile ilgili bir çok teori ve formül ortaya atılmıştır. Tüm bu teori ve formüllerin amacı, kullanılan uçucu kül miktarı ile sağlanan dayanımın ne kadar miktarda çimento kullanımına eşit olduğudur. Uçucu külün etkinliği doğru bir şekilde tespit edilirse, betondaki kullanımı kolaylaşacak ve istediğimiz sertleşmiş beton özellikleri, uçucu külün kullanımının optimizasyonu ile sağlanabilecektir. Bu yüzden bu konuda bir çok çalışma yapılmış ve k etkinlik faktörü ve bu değer nasıl tespit edileceği ile ilgili olarak ortak bir kanaate henüz ulaşılmamıştır.

Etkinlik faktörünü basit bir şekilde açıklayacak olursak; k uçucu kül etkinlik katsayısı, F de ağırlıkça uçucu kül miktarı olmak üzere, F kadar uçucu kül toplam

çimentonun içerisinde çıkarılan bir k.F değeri kadar çimento miktarına eşit olmaktadır. Bu durumda k değeri portland çimentosu için 1 değerini almaktadır.

Uçucu kül etkinlik faktörünün ilk kez Smith tarafından ortaya atıldığından daha önce bahsetmiştik. Buna göre uçucu kül etkinliğinin betonun dayanımı ile toplam bağlayıcı/su oranına bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Bunu formülize edersek; $W/(C+kF)$ bağıntısı ortaya çıkar. Ancak daha sonrasında Munday bu yaklaşımın pratikte bir takım sorunlara yol açabileceğinden söz etmiştir. Munday'a göre, k değeri her uçucu kül için farklılık göstererek kullanılan çimento ve kür koşullarına göre değişmektedir. İkinci sorun; su ihtiyacının her çimento ve uçucu kül çeşidine göre farklılık göstererek her seferinde istenilen işlenebilirliği sağlamak için agrega ve su miktarında ayarlama yapılmasına ihtiyaç duyulmasıdır. Bu da inşaat esnasında hiçte pratik olmayan bir durumdur. Munday son olarak bu metodun çok komplike olduğunu ve bir çok uygulamada pratik olmayacağını savunmuştur [21].

Uçucu kül etkinliği ile ilgili daha sonraları Abrams, Cannon, Lovewell ve Washa, Rosner bir takım çalışma ve geliştirmeler yapmış, 1975 yılında Ghosh bu yapılan çalışmalardan yararlanarak, su/çimento oranındaki çimentonun içerisine uçucu küllü de ekleyerek uçucu küllü ve kontrol betonlarının arasında şu şekilde bir ilişki kurmuştur [21]:

$$R' = M + NR \quad (2.2)$$

Burada; R, Uçucu külsüz betonun su / çimento oranı, R', Uçucu küllü betondaki su / toplam bağlayıcı (uçucu kül + çimento) oranı, M ve N ise sabitlerdir.

Sonuç olarak, değişik oranlarda kullanılan uçucu kül miktarları için farklı M ve N değerleri bulunarak çeşitli tablo ve grafikler oluşturulmuştur.

1983 yılında Munday ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada uçucu küllü betonların 28 gün (gerekirse daha öncesi) amaç dayanımının tespit edilebilmesi için bir karışım oranlaması prosedürü geliştirmişlerdir. Bu metot karışımı oranlamasının yapılması için altı temel veriye ihtiyaç duymaktadır [21]:

- 1-Su / çimento oranının belirlenmesi.
- 2-Serbest su miktarının seçilmesi.
- 3-Uçucu kül / çimento oranının belirlenmesi.
- 4-Çimento ve uçucu kül miktarının belirlenmesi.

5-Toplam agrega miktarının belirlenmesi.

6-Deneme karışımları yapılarak sınaama yapılması.

Prensipde yukarda anlatılan metotlar ile uçucu küllü betonların kontrol betonlarının dayanımlarını istenilen yaşta yakalaması ve hatta geçmesi mümkün gözükmektedir.

Ancak pratikte bazı faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir:

1-Her karışımdan önce prosedür gereği deneme üretimleri yapılarak beton bileşenleri iyi bir şekilde tespit edilmelidir. Ayrıca her uçucu kül farklı karakteristiğe sahip olduğu için deneme üretimlerine yardımcı olarak uçucu kül hakkında iyi bilgi edinmek gerekmektedir.

2-Önerilen karışım metotlarının önerdiği ekonomik avantajların belirlenebilmesi için bir ihtiyat payı bırakmak gerekmektedir.

3-Uçucu küllü betonların ısıya ve neme olan duyarlılıkları normal betonlardan farklı olduğu için deneme betonlarından elde edilen sonuçlar, inşaatta kullanılırken bu faktörlerde göz önünde bulundurulmalıdır.

CEN TC 140SC1 adındaki bir çalışma grubu, yayınladığı raporunda k etkinlik faktörünün tespit edilebilmesi için çeşitli metotlar önermiştir. Bu raporda k etkinlik faktörünün hesabındaki temel nokta, kontrol betonu ve uçucu kül eklenen betonların basınç dayanımının su/çimento oranıyla ilişkisidir. Bu metodu diğer metotlardan ayıran en önemli nokta, çimento miktarının sabit olması ve onun üzerine belirli oranlarda uçucu kül eklenmesidir. Bununla ilgili formülasyon şu şekildedir:

$$\frac{W}{C} = \frac{W'}{C+kf} = \frac{W'}{C\left(1+\frac{kf}{C}\right)} \quad (2.3)$$

2.3 denklemini basitleştirirsek şu şekli alır:

$$W_o = W_\varphi / (1 + k\varphi) \quad (2.4)$$

2.4 denkleminde k değerini çekersek;

$$k = [(W_\varphi/W_o) - 1] * (1/ \varphi) \quad (2.5)$$

Formülünü elde ederiz. Burada; k, Etkinlik faktörünü, φ , Uçucu kül / çimento oranını, W_o , Kontrol betonunun su / çimento oranını, W_φ , Uçucu küllü betonun su / çimento oranını göstermektedir.

CEN TC 140SC1 çalışma grubu k etkinlik faktörünü etkileyen bir çok faktör olduğunu belirtmiştir. Bunlar; eklenen uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri, uçucu külün eklenme miktarı, çimento tipi, su/çimento oranı, kür koşulları, uçucu kül/çimento oranı, sıcaklık gibi faktörlerdir. Etkinlik faktörünü bulmak için üç çeşit grafiksel metot önermişlerdir. Bu metotların hepsinde su/çimento oranı-dayanım arasındaki ilişkiden k etkinlik faktörü hesaplanmaktadır. Yaptıkları çalışma sonucunda k etkinlik faktörünün, su/çimento oranı yükseldikçe azaldığını tespit etmişlerdir [33].

Ganesh Babu ve Rao, uçucu külün etkinlik faktörü ile ilgili yapmış oldukları çalışmada, su/çimento oranı ile dayanım arasındaki ilişki, betonun yaşı ve uçucu külün çimento ile yer değiştirme yüzdesi faktörlerini göz önünde bulundurarak k etkinlik faktörü ile ilgili bir takım sonuçlara ulaşmışlardır. Buna göre; uçucu külün bağlayıcılık etkinliğini temsil eden k etkinlik faktörü ikiye ayrılır. Bunlar; genel etkinlik faktörü k_e ve yaşa ve çimento ile yer değiştirme oranına göre değişen k_p etkinlik faktörleri olarak belirtilmiştir [34].

Uçucu küllerde k etkinlik faktörünün tespit edilebilmesi için Bolomey ve Feret dayanım formüllerinden de yararlanmak mümkündür [35].

Bolomey formülü;

$$f_c = K_B \left(\frac{C}{W + h} - \alpha \right) \quad (2.6)$$

Burada; K_B , Bolomey katsayısını, f_c , Betonun basınç dayanımını (N/mm^2), C , Betondaki çimento miktarını (kg/m^3), W , Betondaki su miktarını (kg/m^3), h , Betondaki hava miktarını (dm^3/m^3) α , Yaş ve küre bağlı bir katsayıyı göstermektedir.

Feret Formülü;

$$f_c = K_F \left(\frac{C}{c + w + h} \right)^2 \quad (2.7)$$

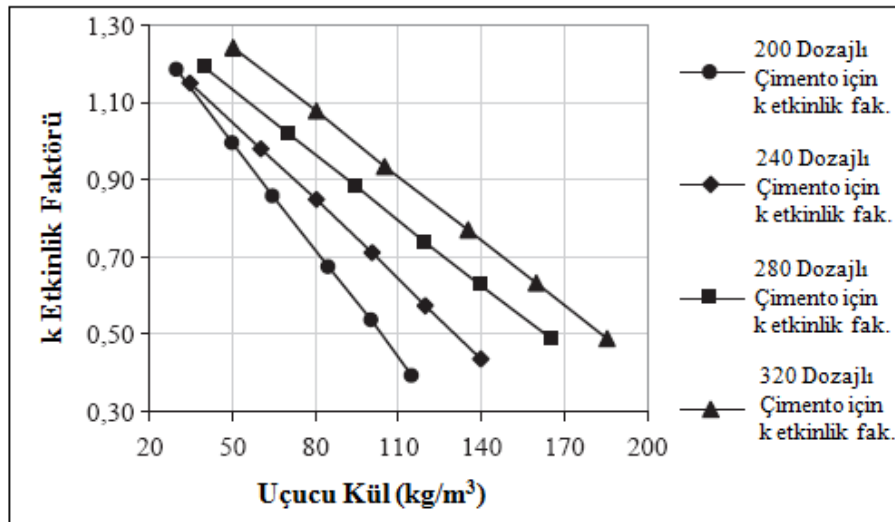
Burada; K_F , Feret katsayısını, f_c , Betonun basınç dayanımını (N/mm^2), C , Betondaki çimento miktarını (kg/m^3), c , Betondaki çimento hacmini (m^3/m^3), w , Betondaki su hacmini (m^3/m^3), h , Betondaki hava miktarını (dm^3/m^3) göstermektedir.

Bolomey formülünde birbirleri ile aynı dayanım değerlerini yakalamış bulunan uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların çimento/(hava+su) oranları, uçucu

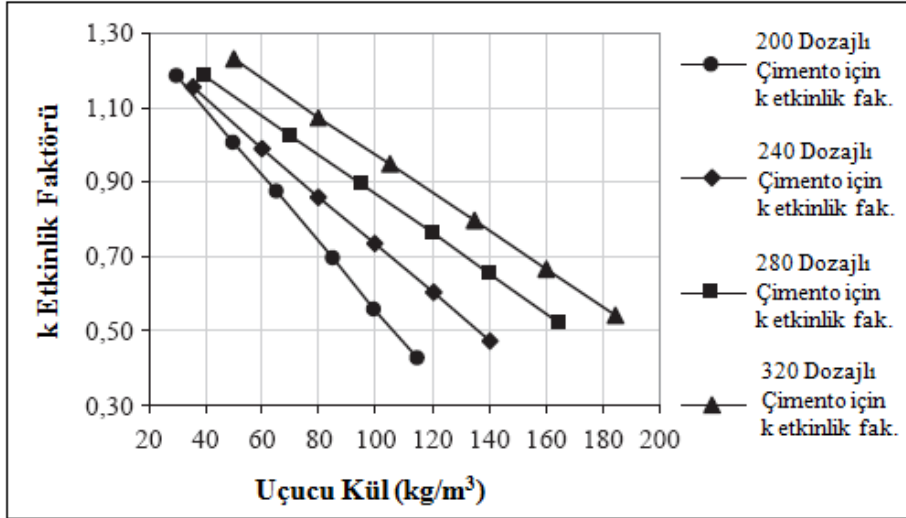
külün etkinliğini belirleyecek olan en önemli faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Feret formülünün Bolomey formülünden en önemli farkı, çimento/ (çimento+hava+su) kullanmasının yanı sıra α katsayısını etkinlik faktörü hesabında dikkate almamasıdır.

Özcan yapmış olduğu çalışmada, %10, %20 ve %30 oranlarında çimentoyu çıkarıp yerine farklı miktarlarda C ve F sınıfı uçucu küller ekleyerek beton üretmiştir. Ürettiği betonlarda Bolomey formülünü kullanarak bulduğu k etkinlik faktörü, C ve F sınıfı uçucu küller için sırasıyla; 0,79 ve 0,62'dir. Ancak eklenen uçucu kül miktarının çıkarılan çimento miktarından daha az olduğu dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada gözlenen bir özellikte C sınıfı uçucu küllerin bağlayıcılıklarının daha fazla olması ve erken yaş dayanımlarının daha iyi olması nedeniyle k etkinlik faktörlerinin daha yüksek olmasıdır [16].

A.Öner ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, k etkinlik faktörünü araştırırken Bolomey ve Feret formüllerinden yararlanmışlardır. Kontrol betonu olarak 250, 300, 350 ve 400 kg/m³ çimento dozlu numunelerden yararlanmışlardır. Her karışımdan %20 çimento çıkarıldıktan sonra, sırasıyla %15 , %25 , %33 , %42 , %50 , %58 uçucu kül eklenerek, 28 ve 180 günlük basınç dayanımı testlerine maruz tutulmuşlardır. Yaptıkları çalışma sonunda %40 uçucu kül eklenen numunelerin optimum uçucu kül etkinliği verdiğini saptamışlardır. Buldukları k etkinlik değerlerinin çimento dozajına ve uçucu kül miktarına göre değişimleri, 28 ve 180 gün için Bolomey formülüne göre şekil 2.3 ve 2.4'de gösterilmiştir [35].



Şekil 2.3: 28 günlük numunelerin Bolomey formülüne göre k etkinlik faktörleri.



Şekil 2.4: 180 günlük numunelerin Bolomey formülüne göre k etkinlik faktörleri.

Şekil 2.3 ve 2.4 incelendiğinde; uçucu kül miktarı artarken k etkinlik değeri azalmıştır. Buna karşın çimento miktarı artarken uçucu kül etkinliğinin de arttığı görülmektedir. Uçucu kül miktarı ile k etkinlik faktörünün arasındaki ilişkiyi gösteren eğilim çizgilerinin tüm çimento dozajlarında birbirine paralel oldukları görülmektedir.

Uçucu küllerin etkinliği ile ilgili yapılan kimi çalışmalarda, su/toplam bağlayıcı oranı (w/b) ve uçucu külün çimento ile yer değiştirme yüzdesinin k etkinlik faktörü üzerinde oldukça belirleyici olduğu ortaya çıkmıştır. G. Ch. Long ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada uçucu külün etkinliğini iki parametre üzerinden hesaplamışlardır. Bunlar; su/toplam bağlayıcı oranı ile uçucu külün çimento ile yer değiştirme yüzdesidir. Belirtilen bu 2 parametrenin uçucu küllerin etkinliği açısından en önemli 2 parametre olduğunu söylemişlerdir [36].

Akman ve arkadaşları, uçucu küllerin etkinliği ile yapmış oldukları çalışmada, Bolomey formülünden yararlanmışlardır. 250, 300, 350 ve 400 çimento dozajlı kontrol numunelerin deney sonuçlarından yararlanarak, Bolomey formülündeki K_B katsayısını 33,8 olarak hesapladıktan sonra, bu 4 dozajdan %30 ve %60 çimento-uçucu kül değişimi yaparak k etkinlik faktörlerini hesaplamışlardır. Etkinlik faktörü hesabında Bolomey formülündeki çimento miktarı C yerine uçucu küllü betonlarda toplam bağlayıcı miktarını temsil eden 'C+k*UK' bağıntısı kullanılmıştır. Buradan k değeri çekilerek etkinlik değerleri bulunmuştur. 250 çimento dozajına sahip

numuneler için etkinlik değeri hesaplanmamıştır. Bulunan sonuçlar çizelge 2.5'te verilmektedir [37].

Çizelge 2.5: Çimento dozajı ve uçucu kül miktarına göre k etkinlik faktörleri.

C (kg/m ³)	UK (kg/m ³)	E (kg/m ³)	fc (MPa)	k
400	120	325	28.2	0.257
350	105	285	29.1	0.336
300	90	249	29.0	0.330
250	75	203	24.0	-
400	240	400	21.2	0.200
350	210	350	21.9	0.237
300	180	300	21.3	0.217
250	150	250	20.3	-

Çizelge 2.5'deki değerler incelendiğinde; uçucu külün etkinliğinin 350 çimento dozajına kadar arttığı ancak 400 çimento dozajında azaldığı görülmektedir. Etkinlik değeri 0,2 ile 0,34 arasında değişmiştir. Bu çalışmada su/çimento oranının sabit tutulduğu görülmektedir. Bu sebepten ötürü basınç dayanımı yükseldikçe Bolomey katsayıları artmıştır.

Papadakis ve Tsimas bağlayıcı katkı maddeleri ve puzolanların etkinliği üzerinde yaptıkları çalışmada, basınç dayanımı ve klor geçirirliği testlerinden yararlanarak bir takım sonuçlara ulaşmışlardır. Testlerde iki çeşit volkanik tüf, üç çeşit uçucu kül ve kalsiyum oranı kullanılan diğer uçucu küllerden düşük olan bir çeşit uçucu kül kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmalarda uçucu kül, agrega ile yer değiştirdiğinde kontrol betonlarından daha yüksek dayanım değerleri vermiştir. Aktif silika miktarı çimentodan fazla olan uçucu küllerin kullanıldığı numunelerde erken yaşlarda kontrol betonlarının altında dayanım değerleri elde edilirken, zaman içerisinde aradaki fark kapanmış ve 90 gün sonrasında kontrol betonlarından daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Yapmış oldukları testler ve bunların değerlendirilmesi sonucunda k etkinlik faktörünü hesaplayabilmek için aşağıdaki formülden yararlanmışlardır [38]:

$$f_c = K \left(\frac{1}{\frac{W}{C}} - \alpha \right) \quad (2.8)$$

Burada; W, Beton karışımındaki su miktarını (kg/m^3), C, Beton karışımındaki çimento miktarını (kg/m^3), K, Çimento türüne göre değişen bir parametreyi (MPa), α , Zamana ve kür koşullarına göre değişen bir parametreyi göstermektedir.

Papadikas ve Tsimas yaptıkları çalışmada, K değerini portland çimentosu için 38,8 Mpa olarak tespit etmişlerdir. Kontrol betonunun dayanım değerlerinden α değerlerini; 2, 7, 28 ve 90 gün için; 1,06, 0,72, 0,5 ve 0,23 olarak hesaplamışlardır.

2.8 formülünü incelendiğinde; Bolomey formülüne çok benzediği görülmektedir. Aradaki en önemli fark; betondaki hava miktarının etkinlik faktörü hesabında dikkate alınmamasıdır. Uçucu küllü betonlar için 2.8 formülü, k değerini de içererek şu şekli almaktadır:

$$f_c = K \left(\frac{1}{\frac{W}{(C + kP)}} - \alpha \right) \quad (2.9)$$

Burada; W, Beton karışımındaki su miktarını (kg/m^3), C, Beton karışımındaki çimento miktarını (kg/m^3), K, Çimento türüne göre değişen bir parametreyi (MPa), α , Zamana ve kür koşullarına göre değişen bir parametreyi, k, Etkinlik faktörünü, P, Beton karışımında kullanılan uçucu kül miktarını (kg/m^3) göstermektedir.

Tsimas ve arkadaşlarının 2.8 ve 2.9 formüllerinden yararlanarak buldukları k değerleri, doğal puzolanlar için (volkanik tüf) düşük olmakla beraber (0,2-0,4), uçucu küllerde erken yaşlarda 1'e yaklaşmakta ve ileri yaşlarda 1'i geçmektedir. Bulmuş oldukları k etkinlik faktörleri çizelge 2.6'da gösterilmiştir [39].

Çizelge 2.6: Tsimas'ın uçucu küller için tespit etmiş olduğu etkinlik faktörleri.

Betonun Yaşı	k
2 Gün	0,8
7 Gün	1,0
28 Gün	1,1
90 Gün	1,2

TS EN 206 ya göre; k değerinin hesabında su/çimento oranı yerine su/(çimento+k*UK) oranının kullanılması önerilmektedir. Ayrıca k'nın gerçek değerinin, kullanılacak özel mineral katkıya bağlı olduğu belirtilmiştir. TSEN450'ye uygun uçucu kül için uçucu kül/çimento oranının 0,33'ten büyük olmaması gerekmektedir. Bu oranın büyük olması durumunda su/(çimento+k.UK) oranı geçerli olmamaktadır. Standart, EN 197-1'e uygun CEM I tip çimento içeren betonlar için kullanımına izin verilen k değerlerini; CEM I 32,5 için 0,2, CEM I 42,5 ve daha yüksek sınıf için 0,4 olarak belirlemiştir [40].

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda araştırmacılar, k etkinlik değeri ile ilgili birbirinden farklı formüller kullanarak çeşitli sonuçlara ulaşmışlardır. Etkinlik faktörü üzerinde ortak bir kanaate ulaşılmadığı için bu konuda yapılan çalışmalarda farklı metotların kullanıldığını görmekteyiz. Ancak şimdiye kadar anlattığımız çalışmalarda uçucu külün etkinliğinin tespit edilmesinde çoğunlukla Bolomey formülünün tercih edildiği görülmektedir. Kimi çalışmalarda ise, Bolomey formülünde su/çimento oranı yerine su/(çimento+k*UK) oranı kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında Bolomey formülünden yararlanarak k faktörü hesabı yapılacaktır. Bolomey formülündeki su/çimento oranı yerine su/(çimento+k*UK) oranı kullanılarak k etkinlik faktörü değerleri tespit edilecektir.

3.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada; deneysel çalışmalarda kullanılacak olan tüm malzemelerin özgül ağırlıkları ve birim ağırlıkları hesaplanmış ve betonda kullanılacak olan malzemelerin granülometri eğrisi tespit edilerek malzemelerin karışım oranları bulunmuştur. İkinci aşamaya geçmeden önce uçucu küllü ve uçucu külsüz deneme betonları üretilerek betonun su ihtiyaçları hakkında fikir sahibi olunmuştur. Deneme betonlarından elde edilen sonuçlar ışığında; birbirine yakın çökme değerlerinin elde edilebilmesi için tüm üretimlerde su/çimento oranı farklı olarak belirlenmiştir. İkinci aşamada; önceden belirlenen karışım oranları, su/çimento oranları, deney safhasından önce planlanmış olan uçucu kül ve çimento miktarları kullanılarak deney numuneleri üretilmiştir. Üretilen beton kalıplara yerleştirilmeden önce taze beton deneyleri yapılmıştır. Deney numuneleri üretimden 24 saat sonra kalıplardan alınarak kür havuzuna yerleştirilmiştir. Üçüncü aşamada; 28 ve 90 günü tamamlayan numuneler belli bir süre öncesinde kür havuzundan çıkarılıp iyice kuruduktan sonra sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır.

3.1 Üretilen Betonların Özellikleri

Numunelerin üretimi; İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi laboratuvarında gerçekleşmiştir. 3 değişik çimento dozajı (260, 320, 400 kg/m³), 2 değişik çimento eksiltme oranı (%10, %17) ve 3 değişik uçucu kül eklenme oranı (çıkarılan çimentonun belirli katları olmak üzere 3 farklı değer) kullanılarak 18 seri uçucu küllü beton üretilmiştir. Bu betonlara referans teşkil etmesi amacıyla; 260, 320 ve 400 kg/m³ olmak üzere 3 seri uçucu külsüz beton üretilmiştir. Üretilen toplam beton serisi sayısı 21 olmuştur. 260 kg/m³ çimento dozajına sahip kontrol betonundan %10 çimento eksilterek %15, %20 ve %25 oranlarında uçucu kül eklenirken, geriye kalan kontrol betonlarında %10 ve %17 oranında çimento eksiltirilerek %10, %15, %17, %20, %25,5 ve %34 oranlarında uçucu kül eklenmiştir. 260 dozajlı %10 çimento eksiltilmiş beton serisinde istenilen basınç dayanımı sağlanamayacağı düşünülerek, çıkarılan çimento miktarı kadar uçucu kül

eklenmesine gidilmemiştir. Karışımlardaki çimento/su oranları serilere göre değişiklikler göstermiştir. Bu sayede birbirine yakın çökme değerleri (S3 kıvamı) ve birbirinden farklı mukavemet değerlerinin elde edilmesi hedeflenmiştir. Karışımda kullanılan agregaların oranları önceden tespit edilen yüzdelerle göre belirlenmiş ve üretim safhasında bu yüzdelerle sabit kalınarak karışım hazırlanmıştır. Üretilen betonların kodlanması çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1: Üretilen beton serilerinin kodlanması.

Beton Kodu	Çimento Dozajı (kg/m ³)	Uçucu Kül Miktarı (kg/m ³)	Eksiltelen Çimento Oranı	Eklene Uçucu Kül Oranı
C260%0UK0	260	0	%0	%0
C260%10UKII	234	39	%10	%15
C260%10UKIV	234	52		%20
C260%10UKV	234	65		%25
C260%17UKIII	216	44	%17	%17
C260%17UKVI	216	66		%25,5
C260%17UKVII	216	88		%34
C320%0UK0	320	0	%0	%0
C320%10UKI	288	32	%10	%10
C320%10UKII	288	48		%15
C320%10UKIV	288	64		%20
C320%17UKIII	266	54	%17	%17
C320%17UKVI	266	81		%25,5
C320%17UKVII	266	108		%34
C400%0UK0	400	0	%0	%0
C400%10UKI	360	40	%10	%10
C400%10UKII	360	60		%15
C400%10UKIV	360	80		%20
C400%17UKIII	332	68	%17	%17
C400%17UKVI	332	102		%25,5
C400%17UKVII	332	136		%34

Çizelge 3.1’deki kodlamalarda; birinci rakam; uçucu küllü betona referans olan kontrol betonunun çimento dozajını, ikinci rakam; kontrol betonundan eksiltelen

çimento yüzdesini, üçüncü rakam; eklenen uçucu kül miktarını göstermektedir. Eklenen uçucu kül miktarının kodlanması ise şu şekildedir; I, kontrol betonunun çimento dozajının %10'u, II, kontrol betonunun çimento dozajının %15'i, III, kontrol betonunun çimento dozajının %17'si, IV, kontrol betonun çimento dozajının %20'si, V, kontrol betonunun çimento dozajının %25'i, VI, kontrol betonun çimento dozajının %25,5'i, VII, kontrol betonunun çimento dozajının %34'ü.

3.2 Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

3.2.1 Agrega özellikleri

Beton karışımında kullanılan agrega türleri; doğal kum, kırma kum, kırmataş 1 ve kırmataş 2'dir. Kullanılan doğal kum Akpınar Köyü, kırmataş agregaları Cebeci yöresine aittir.

3.2.1.1 Doğal kum

Doğal kum; kullanılmadan önce kapalı ortamda kurumması beklenmiştir. Hava kurusu halde özgül ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar çizelge 3.2'de verilmiştir. Granülometri sonuçlarının elde edilebilmesi için elek analizini tabii tutulmuştur. Elek analizi sonuçları çizelge 3.3'de gösterilmiştir.

3.2.1.2 Kırma kum

Kırma kum; kullanılmadan önce kapalı ortamda kurumması beklenmiştir. Hava kurusu halde özgül ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar çizelge 3.2'de verilmiştir. Granülometri sonuçlarının elde edilebilmesi için elek analizini tabii tutulmuştur. Elek analizi sonuçları çizelge 3.3'de gösterilmiştir.

3.2.1.3 Kırmataş 1

Kırmataş 1; kullanılmadan önce kapalı ortamda kurumması beklenmiştir. Hava kurusu halde özgül ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar çizelge 3.2'de verilmiştir. Granülometri sonuçlarının elde edilebilmesi için elek analizini tabii tutulmuştur. Elek analizi sonuçları çizelge 3.3'de gösterilmiştir.

3.2.1.4 Kırmataş 2

Kırmataş 2; kullanılmadan önce kapalı ortamda kurumması beklenmiştir. Hava kurusu halde özgül ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar çizelge 3.2'de verilmiştir.

Granülometri sonuçlarının elde edilebilmesi için elek analizini tabii tutulmuştur. Elek analizi sonuçları çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2: Kullanılan agregaların özgül ve birim ağırlıkları.

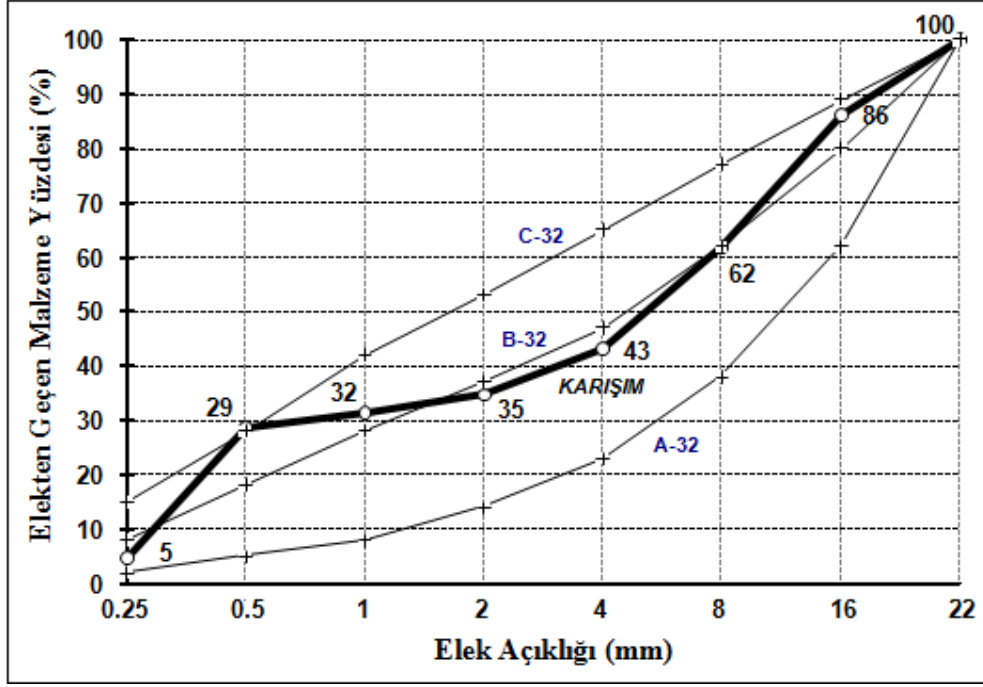
Agrega Cinsi	Özgül Ağırlık (kg/m ³)	Birim Ağırlık (kg/m ³)
Doğal Kum	2660	1410
Kırma Kum	2690	1510
Kırma taş 1	2690	1390
Kırma taş 2	2710	1400

3.2.1.5 Karışım

Beton karışımlarında %25 doğal kum, %19 kırmataş kumu, % 29 kırmataş 1 ve % 27 kırmataş 2 kullanılmıştır. Karışımın incelik modülü 4,09’dur. Karışımın granülometri eğrisi, A32, B32 ve C32 eğrileri ile birlikte Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Karışımın granülometrisi, A32, B32 ve C32 eğrilerinin granülometrisi ile beraber çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3: Agrega elek analizleri ve karışım granülometrisi.

Malz./El.Çapı	0,25	0,5	1	2	4	8	16	22
Doğal Kum	11,6	98	99	99	100	100	100	100
Kırma Kum	10,2	21	31	47	79	100	100	100
Kırmataş 1	0	0,5	3,4	4	11	61	100	100
Kırmataş 2	0	0	0	0	0	0,3	49	100
A32	2	5	8	14	23	38	62	100
B32	8	18	28	37	47	62	80	100
C32	15	28	42	53	65	77	89	100
Karışım	5	29	32	35	43	62	86	100



Şekil 3.1: Karışım granülometri eğrisi.

3.2.2 Çimento özellikleri

Beton numunelerde CEM I 42.5 türü çimento kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel özellikleri çizelge 3.4’de, mekanik özellikleri çizelge 3.5’de, kimyasal özellikleri ise çizelge 3.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 Çimentonun fiziksel özellikleri.

Çimento Cinsi	CEM I 42.5
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3.12
Priz Süresi Başlangıcı (dak.)	132
Priz Süresi Sonu (dak.)	185
La Chatelier (mm)	1,0
Blaine (cm ² /gr)	3760
45 mm Elek Üzeri (%)	5,3
90 mm Elek Üzeri (%)	0,2

Çizelge 3.5: Çimentonun basınç dayanımı sonuçları.

Gün	Basınç Dayanımı (N/mm ²)
2	29,1
7	44,0
28	56,7

Çizelge 3.6: Çimentonun kimyasal bileşimi.

SiO ₂ (%)	20,63
Al ₂ O ₃ (%)	4,71
Fe ₂ O ₃ (%)	3,41
CaO (%)	63,64
MgO (%)	1,24
SO ₃ (%)	2,98
Na ₂ O / K ₂ O (%)	0,23 – 0,91
Kızdırma Kaybı (%)	1,25
S.CaO (%)	1,10
Çözünmez Kalıntı (%)	0,49
Cl ⁻ (%)	0,0357
LSF	0,94
Mineralojik Bileşim	
C ₃ S	52,73
C ₃ A	6,72
C ₂ S	19,45
C ₄ AF	10,38

3.2.3 Uçucu külün özellikleri

Beton numunelerde Çayırhan Termik Santralinden elde edilen, C tipi uçucu külü kullanılmıştır. Uçucu külün özellikleri çizelge 3.7’de, puzolanik aktivitesi ise çizelge 3.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7: Uçucu külün özellikleri.

Uçucu Külün Cinsi	Çayırhan
CaCO ₃ + MgCO ₃	1,25
H ₂ O	0,20
SiO ₂	46,38
Al ₂ O ₃	13,90
Fe ₂ O ₃	8,26
CaO	15,11
MgO	6,68
SO ₃	4,26
Na ₂ O	2,13
K ₂ O	2,78
Klorür (Cl)	0,0638
Kızdırma Kaybı	0,22
S. CaO	0,15
Çözünmeyen Kalıntı	-
TOPLAM	99,78
Özgül Yüzey (cm ² /gr)	2100
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2,34
İncelik (0,045 mm)	42,3
İncelik (0,090 mm)	24,8
İncelik (0,200 mm)	7,0

Çizelge 3.8: Uçucu külün puzolanik aktivitesi.

Gün	Aktivite Endeksi (%)	TS EN 450
28	83	> 75

3.2.4 Karışım suyu

Beton numunelerin üretiminde ve kür'ünde pH değeri 7 (nötr) olan şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2.5 Akışkanlaştırıcı özellikleri

Beton üretiminde 2 çeşit katkı kullanılmıştır. Normal akışkanlaştırıcı (Orta akışkanlaştırıcı) ve süper akışkanlaştırıcılar olan bu katkılar karma suyuna katılarak kullanılmıştır. Normal akışkanlaştırıcı; karışımdaki toplam çimento ve uçucu kül miktarının ağırlıkça yüzde 1'i kadar, süper akışkanlaştırıcı ise yüzde 1.5'i kadar kullanılmıştır. Beton karışımlarında kullanılan akışkanlaştırıcıların türleri ve oranları çizelge 3.9'da gösterilmiştir. Normal ve süper akışkanlaştırıcıların özellikleri çizelge 3.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.9: Karışımlarda kullanılan akışkanlaştırıcıların türleri ve oranları.

Beton Kodu	Uçucu Kül (kg/m ³)	Çimento miktarı (kg/m ³)	Kimyasal Katkı	
			Türü	Oran (%)
C260%0UK0	0	260	normal	1,0
C260%10UKII	39	234	normal	1,0
C260%10UKIV	52	234	normal	1,0
C260%10UKV	65	234	normal	1,0
C260%17UKIII	44	216	normal	1,0
C260%17UKVI	66	216	normal	1,0
C260%17UKVII	88	216	normal	1,0
C320%0UK0	0	320	normal	1,0
C320%10UKI	32	288	normal	1,0
C320%10UKII	48	288	normal	1,0
C320%10UKIV	64	288	normal	1,0
C320%17UKIII	54	266	normal	1,0
C320%17UKVI	81	266	normal	1,0
C320%17UKVII	108	266	normal	1,0
C400%0UK0	0	400	süper	1,5
C400%10UKI	40	360	süper	1,5
C400%10UKII	60	360	süper	1,5
C400%10UKIV	80	360	süper	1,5
C400%17UKIII	68	332	süper	1,5
C400%17UKVI	102	332	süper	1,5
C400%17UKVII	136	332	süper	1,5

Çizelge 3.10: Akışkanlaştırıcı özellikleri.

Türü	Normal	Süper
Yoğunluk (gr/m ³)	1.160	1.200
pH	6	7
K.Madde (%)	31	40
Renk	Kahverengi	Kahverengi
Esası	Sodyum lignosülfanat	Naftalen

3.3 Beton Üretimi ve Saklanması

Hedef olarak; her beton serisinde kullanılacak olan beton kalıplara yetecek şekilde (3 adet silindir (10/20), 6 adet küp (15/15/15)) 30 litre beton üretimi belirlenmiştir. Önceden belirlenen agrega oranlarına göre agrega ağırlıkları hesaplanarak betonyere konulmuş; ardından serinin barındırdığı çimento ve uçucu kül (kontrol betonları hariç) ağırlıkları da hesaplanarak betonyere konularak karıştırma işlemi başlatılmıştır. Karışım iyice karıştıktan sonra; kullanılacak su miktarının önce yarısı, ardından kullanılacak akışkanlaştırıcı ile karıştırıldıktan sonra kalan yarısı karışıma yavaşça ilave edilmiştir. Taze beton deneyleri tamamlanıp, değerler kaydedildikten sonra; karışım 6 adet küp ve 3 adet silindir kalıplara doldurulup, vibrasyon ile kalıplara yerleşmeleri sağlanmıştır. Numuneler 24 saat sonra kalıplarından sökülerek, 23 derece sıcaklıktaki kür havuzuna yerleştirilmişlerdir.

3.4 Taze Beton Deneyleri

Taze beton deneyleri; betonun karışma işlemi tamamlanıp, kalıplara dökülmeye hazır hale gelmesinden sonra gerçekleştirilmiştir. Beton karışımına; çökme deneyi, birim ağırlık deneyi ve hava ölçme deneyi uygulanmıştır.

3.4.1 Birim ağırlık deneyi

Hazırlanan betonlarda kullanılan gerçek malzeme miktarlarını hesaplanabilmesi için 5,7 lt'lik birim ağırlık kabı ile betonda birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Birim ağırlık kabına hazırlanan beton yerleştirilmiş ve tartım sonucunda çıkan ağırlıktan kabın darası (5,6 kg) düşülerek, kabın hacmine bölünmüş ve birim ağırlıklar bulunmuştur.

3.4.2 Çökme deneyi

Çökme deneyinde Abrams çökme konisi kullanılarak beton karışımın çökme değerleri hesaplanmıştır. Bu sayede betonun işlenebilirliğinin ölçülmesi amaçlanmıştır. Kullanılan koninin alt çapı 20 cm, üst çapı 10 cm ve yüksekliği 30 cm'dir. Altta bulunan geniş kabın üzerine yerleştirilen koni; beton yerleşene kadar sabit tutulmuştur. Koninin içerisine; her seferinde 3 te 1 lik bölümü dolduracak şekilde beton karışımı yerleştirilmiş, her yerleştirme esnasında karışım demir çubuk yardımıyla 25 kere şişlenmiştir. Şişleme işlemi esnasında; demir çubuk; bir önce yerleştirilmiş bulunan 1/3'lük karışımın olduğu bölgeye kadar batırılmıştır. Bu şekilde her seferinde yerleştirilen karışım bölümü şişlenmiştir. Mala yardımı ile üst kısım düzeltildikten sonra koni yavaş ve dik bir şekilde kaldırılmıştır. Daha sonra gene koni ve demir çubuk yardımıyla; çökme değerleri hesaplanmıştır. Koni ölçüm esnasında ters çevrilerek üzerine demir çubuk konulmuş, çöken karışımın orta noktası ile demir çubuğun alt çizgisi arasındaki mesafe kaydedilmiştir.

3.4.3 Hava ölçme deneyi

Deney düzeneği teşkil edildikten sonra hava cihazına 1 bar basınç oluşturacak şekilde hava verildiğinde alet üzerinde bulunan hava göstergesinden okunan hava değerleri kaydedilmiştir.

3.5 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Numunelerin 28 ve 90 gün deneylerinden önce bir takım hazırlıklar yapılmıştır. Her deney gününden 4 gün önce deney günü testleri yapılacak numuneler kür havuzundan çıkarılarak kurumaya bırakılmış, silindir numunelere ise başlık yapılmıştır. Basınç makinasında silindire uygulanan kuvvetin düz bir zemine yayılması gerektiğinden silindirin kalıbın üst kısmına denk gelen yüzeylerine 3-4 mm kalınlığında başlık yapılarak üst yüzeyde düz bir zemin elde edilmiştir. 28 gün deneylerinde her seri için 3 silindir ve 3 küp numune üzerinde testler uygulanmıştır. Silindir numunelere elastisite, basınç ve ultrases, küp numunelere ise basınç ve ultrases testleri uygulanmıştır. 90 gün deneylerinde ise her seri için 3 küp numune üzerinde basınç ve ultrases testleri uygulanmıştır.

3.5.1 Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı deneylerinde; küpler için 13 kN/s yükleme hızı, silindirler için 5 kN/s yükleme hızı kullanılmıştır. Numuneler eksenel kuvvetin uygulanma noktasının, numunenin preslere karşılık gelen yüzeylerinin tam ortasına gelecek şekilde olmasına dikkat edilerek, basınç makinesine yerleştirildikten sonra, numune maksimum basınç dayanımı verene kadar yukarıda verilen yükleme hızlarıyla basınç yüklemesine tabi tutularak kırılmıştır. Elde edilen maksimum basınç kuvvetleri (P) kaydedilmiştir.

3.5.2 Elastisite modülü deneyi

Elastisite modülü deneyi silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir silindir özel bir çerçeve yardımıyla boy değişimlerini ölçmemizi sağlayacak bir düzene kurularak basınç makinasında 1kN/sn hızla yüklemeye tabi tutulmuşlardır. Her 10 kN'a karşılık gelen boy değişimi kaydedilerek yükleme tahmin edilen basınç dayanımının 3'te 1'lik değerine kadar devam ettirilmiştir.

3.5.3 Ultrases hızı deneyi

Tüm numunelere uygulanan ultrases deneyleri; basınç ve elastisite deneylerinden önce gerçekleştirilmiştir. Küp numunelerin karşılıklı 2 yüzeyinin tam orta bölgesine, silindir numunelerde de silindirin alt ve üst (başlıklı) tabanlarının tam orta bölgesine karşılıklı olarak yerleştirilen alıcı ve verici problar yardımıyla sesin numune içinde geçiş süresi(t) mikro saniye cinsinden ölçülerek kaydedilmiştir.

4.DENEY SONUÇLARI

4.1 Taze Beton Deneyleri Sonuçları

Taze beton deneyleri sonucunda elde edilen çökme, birim ağırlık ve hava miktarı değerleri çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1: Taze beton deney sonuçları.

Beton Kodu	Birim Ağırlık (kg/dm ³)	Çökme (cm)	Hava Boşluğu (%)
C260%0UK0	2,380	15,5	2,0
C260%10UKII	2,374	14,5	2,0
C260%10UKIV	2,383	15,5	2,1
C260%10UKV	2,377	14,5	2,4
C260%17UKIII	2,382	14	2,2
C260%17UKVI	2,362	15	1,9
C260%17UKVII	2,356	15	2,0
C320%0UK0	2,416	15,5	2,3
C320%10UKI	2,400	15,5	1,8
C320%10UKII	2,393	16,5	2,2
C320%10UKIV	2,366	15	1,8
C320%17UKIII	2,363	14,5	1,9
C320%17UKVI	2,362	17	2,1
C320%17UKVII	2,403	17	2,0
C400%0UK0	2,420	15	3,0
C400%10UKI	2,395	16	2,5
C400%10UKII	2,391	15	2,3
C400%10UKIV	2,379	15,5	2,2
C400%17UKIII	2,375	16	2,4
C400%17UKVI	2,379	14	2,4
C400%17UKVII	2,358	17	3,0

Bu veriler ışığında üretilen beton numunelerinin gerçek bileşimleri bulunmuştur. Karışımlara giren gerçek malzeme miktarları çizelge 4.2’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.2: Gerçek beton bileşimleri (kg/m³).

Beton Kodu	Çim.	Uç. Kül	Doğ. Kum	Kır. Kum	Kır. Taş 1	Kır. Taş 2	Su	Katkı
C260%0UK0	266	0,0	461	354	541	507	199	2,66
C260%10UKII	238	39,7	462	355	542	508	188	2,78
C260%10UKIV	239	53,2	459	353	538	505	187	2,92
C260%10UKV	238	66,1	458	352	537	504	180	3,04
C260%17UKIII	221	45,0	464	357	544	511	188	2,66
C260%17UKVI	220	67,2	460	353	539	506	188	2,87
C260%17UKVII	218	88,9	461	354	540	507	177	3,07
C320%0UK0	331	0,0	441	339	517	485	205	3,31
C320%10UKI	296	32,9	451	346	529	496	194	3,29
C320%10UKII	296	49,3	443	341	520	488	192	3,45
C320%10UKIV	291	64,7	449	345	527	495	182	3,56
C320%17UKIII	269	54,6	454	349	533	500	185	3,24
C320%17UKVI	270	82,3	444	341	521	488	187	3,52
C320%17UKVII	276	112,2	431	331	505	474	193	3,88
C400%0UK0	406	0,0	441	339	517	485	172	6,08
C400%10UKI	363	40,3	444	341	521	489	168	6,05
C400%10UKII	365	60,8	435	334	510	479	175	6,38
C400%10UKIV	362	80,5	436	335	511	480	166	6,64
C400%17UKIII	332	68,0	448	345	526	493	161	6,00
C400%17UKVI	337	103,5	428	329	502	471	174	6,60
C400%17UKVII	333	136,3	424	326	498	467	161	7,04

Çizelge 4.2’deki verilerden yararlanarak numunelerin su/çimento, su/bağlayıcı oranlarıyla birlikte kompozite miktarları da hesaplanarak, çizelge 4.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3: Numunelerin su/çimento, su/bağlayıcı oranları ve kompasite miktarları.

Beton Kodu	Su/Çimento	Su/Bağlayıcı	Kompasite (m ³ /m ³)
C260%0UK0	0,75	0,75	0,778
C260%10UKII	0,79	0,68	0,788
C260%10UKIV	0,78	0,64	0,789
C260%10UKV	0,76	0,59	0,793
C260%17UKIII	0,85	0,71	0,788
C260%17UKVI	0,86	0,66	0,790
C260%17UKVII	0,81	0,58	0,801
C320%0UK0	0,62	0,62	0,769
C320%10UKI	0,66	0,59	0,787
C320%10UKII	0,65	0,56	0,783
C320%10UKIV	0,63	0,51	0,797
C320%17UKIII	0,69	0,57	0,793
C320%17UKVI	0,69	0,53	0,789
C320%17UKVII	0,70	0,50	0,784
C400%0UK0	0,43	0,43	0,793
C400%10UKI	0,46	0,42	0,802
C400%10UKII	0,48	0,41	0,797
C400%10UKIV	0,46	0,38	0,806
C400%17UKIII	0,48	0,40	0,810
C400%17UKVI	0,52	0,40	0,796
C400%17UKVII	0,48	0,34	0,803

4.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri Sonuçları

4.2.1 Basınç dayanımı deneyi sonuçları

Üretilen betonların 28. ve 90. gün deneyleri sonucunda belirlenen maksimum basınç kuvvetleri (P), kuvvetin uygulandığı alanla (A) birlikte, $\sigma = P/A$ (4.1) formülünde yerine konularak, basınç dayanımları (σ) hesaplanmıştır. 4.1 formülünde; P (KN) cinsinden basınç kuvvetini, σ (N/mm²) cinsinden basınç dayanımını, A (cm²) cinsinden kuvvetin uygulandığı her 2 eşit yüzeyin her birinin alanını göstermektedir.

Alanların hesaplanmasında küpler için 15x15 cmlık üst ve alt yüzeyler, silindir içinse 10 cm çapa sahip alt ve üst yüzeyler dikkate alınmıştır. Numuneler için hesaplanan basınç dayanımı değerleri çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4: Üretilen numunelerin basınç dayanımı değerleri (N/mm²).

Beton Kodu	Küp Basınç		Silindir Basınç	Küp Basınç (Bağıl)	
	28 Gün	90 Gün	28 Gün	28 Gün	90 Gün
C260%0UK0	40,2	46,2	39,1	%100	%100
C260%10UKII	40,5	47,0	40,7	%101	%102
C260%10UKIV	41,3	49,5	41,1	%103	%107
C260%10UKV	42,5	50,1	43,2	%106	%108
C260%17UKIII	38,7	45,2	31,7	%96	%98
C260%17UKVI	39,8	46,4	37,3	%99	%100
C260%17UKVII	41,2	48,7	42,0	%103	%105
C320%0UK0	47,8	54,8	46,7	%100	%100
C320%10UKI	48,6	55,9	47,9	%102	%102
C320%10UKII	50,8	57,5	48,6	%106	%105
C320%10UKIV	50,5	56,9	51,6	%106	%104
C320%17UKIII	48,2	55,5	47,7	%101	%101
C320%17UKVI	50,5	57,4	49,3	%106	%105
C320%17UKVII	51,2	59,8	49,8	%107	%109
C400%0UK0	60,5	72,3	56,9	%100	%100
C400%10UKI	57,9	68,9	53,5	%96	%95
C400%10UKII	60,8	72,8	57,6	%100	%101
C400%10UKIV	63,2	73,8	61,6	%105	%102
C400%17UKIII	58,8	68,6	57,8	%97	%95
C400%17UKVI	60,1	72,0	58,8	%99	%100
C400%17UKVII	62,9	73,1	61,0	%104	%101

4.2.2 Elastisite modülü deneyi sonuçları

Silindir numuneler üzerinde yapılan elastisite modülü deneylerinde; 10 kN aralıklarla ölçülen deformasyon değerleri yardımıyla gerilme–deformasyon diyagramı çizilmiş, maksimum gerilmenin 1/3’ü bölgesinde σ - ε eğrisi lineer kabul edilerek, elastisite modülleri hesaplanmıştır. Üretilen betonların 28 gün deneyleri sonucunda hesaplanan elastisite değerleri çizelge 4.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5: Üretilen numunelerin elastisite modülü değerleri (N/mm²).

Beton Kodu	Elastisite Modülü
C260 %0UK0	35968
C260 %10UKII	37740
C260 %10UKIV	35839
C260 %10UKV	37660
C260 %17UKIII	33030
C260 %17UKVI	32974
C260 %17UKVII	36006
C320 %0UK0	37820
C320 %10UKI	37054
C320 %10UKII	35356
C320 %10UKIV	36890
C320 %17UKIII	40737
C320 %17UKVI	35726
C320 %17UKVII	39120
C400 %0UK0	42644
C400 %10UKI	42592
C400 %10UKII	42010
C400 %10UKIV	41058
C400 %17UKIII	40491
C400 %17UKVI	42498
C400 %17UKVII	43618

4.2.3 Ultrases hızı deneyi sonuçları

Silindir numunelerde l değerleri (silindirin uzunluğu) ölçüldükten sonra, $V=l/t$ (4.2) formülünde; tüm küp ve silindir numuneler için l ve t değerleri yerine konulmuştur. Buradan küp ve silindir numuneler için ultrases hızları hesaplanmıştır. 4.2 formülünde; V (km/sn) cinsinden ultrases hızını, t (sn) cinsinden ultrases geçiş süresini, l (km) cinsinden numunenin uzunluğunu göstermektedir. Hesaplanan ultrases hızı değerleri çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6: Üretilen numunelerin ultrases hızı değerleri (km/s).

Beton Kodu	Ultrases Küp		Ultrases Silindir
	28 Gün	90 Gün	28 Gün
C260%0UK0	5,08	5,13	4,80
C260%10UKII	5,43	5,46	5,13
C260%10UKIV	5,49	5,53	5,19
C260%10UKV	5,51	5,54	5,20
C260%17UKIII	5,60	5,65	5,11
C260%17UKVI	5,24	5,29	5,03
C260%17UKVII	5,26	5,32	5,12
C320%0UK0	5,17	5,22	4,88
C320%10UKI	5,26	5,29	5,02
C320%10UKII	5,30	5,34	5,12
C320%10UKIV	5,38	5,42	5,16
C320%17UKIII	5,84	5,89	5,80
C320%17UKVI	5,89	5,95	5,85
C320%17UKVII	4,89	4,98	5,25
C400%0UK0	5,26	5,31	5,12
C400%10UKI	5,63	5,67	5,93
C400%10UKII	5,79	5,85	5,97
C400%10UKIV	5,92	5,98	5,61
C400%17UKIII	5,87	5,94	5,48
C400%17UKVI	5,82	5,89	5,70
C400%17UKVII	5,75	5,85	5,72

5.DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Taze Beton DeneY Sonuçlarının İncelenmesi

Kontrol betonu ile kontrol betonundan eksiltelen çimento miktarı kadar uçucu kül eklenen betonların taze beton deneyleri sonuçları çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1: Uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların taze beton deney sonuçlarının karşılaştırılması.

Çimento Miktarı (kg)	Uçucu Kül Miktarı (kg)	Su Miktarı (kg)	Toplam Bağlayıcı (kg)	Çökme (cm)	Su/Çim. Oranı	Su/Bağ. Oranı
266	0	199	266	15,5	0,75	0,75
221	45	188	266	14	0,85	0,71
331	0	205	331	15,5	0,62	0,62
296	33	194	329	15,5	0,66	0,59
269	55	185	324	14,5	0,69	0,57
406	0	172	406	15	0,43	0,43
363	40	168	403	16	0,46	0,42
332	68	161	400	16	0,48	0,40

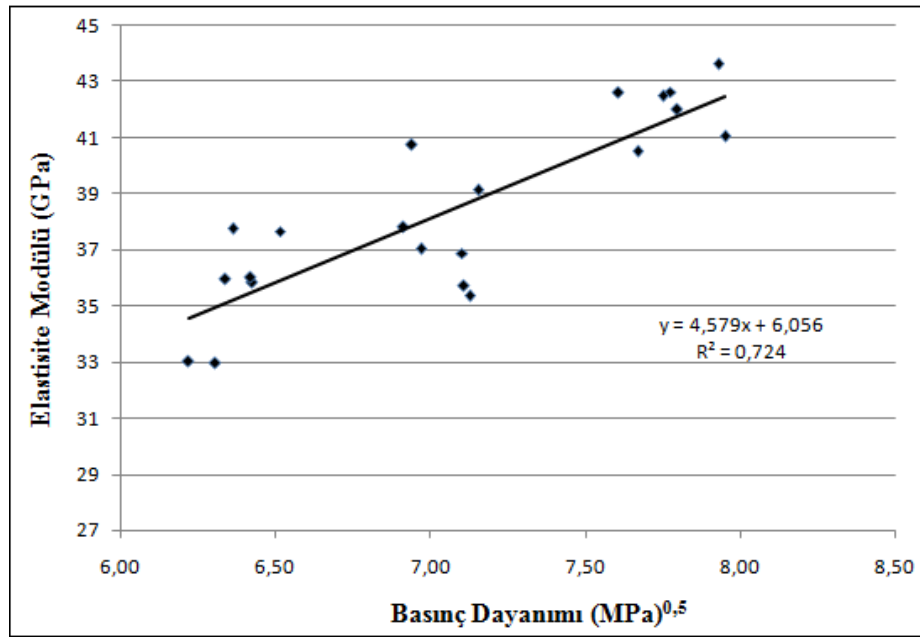
Tablodaki değerler incelendiğinde; uçucu kül varlığının betonun su ihtiyacını azalttığı görülmektedir. Kullanılan uçucu külün çimentodan daha kaba taneli olduğu elek analizi sonuçlarından görülmüştür. Uçucu kül öğütülmediğinden, doğal halde olduğundan ve blaine özgül yüzeyi çimentodan düşük olduğundan dolayı yapısının küresele yakın olduğu söylenebilir. Uçucu külün su ihtiyacı üzerindeki olumlu etkisini bu faktörlere bağlayabiliriz. Literatürde de uçucu küllerin betonun su ihtiyacını olumlu bir şekilde etkilediği söylenmektedir. Compton ve Malcniste yaptıkları çalışmada yüzde 30 çimento-uçucu kül değişimi sonucunda su ihtiyacında

yüzde 7'lik bir azalma tespit etmişlerdir. Pasko ve Larson, yapmış oldukları çalışmada, uçucu küllerin betonun su ihtiyacını azalttığını tespit etmişlerdir [21].

5.2 Sertleşmiş Beton Deneysel Sonuçlarının İncelenmesi

5.2.1 Basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişkinin incelenmesi

Deneysel numunelerinin küp basınç dayanımlarının karekökü ile elastisite modülleri arasındaki ilişki şekil 5.1'de gösterilmektedir.

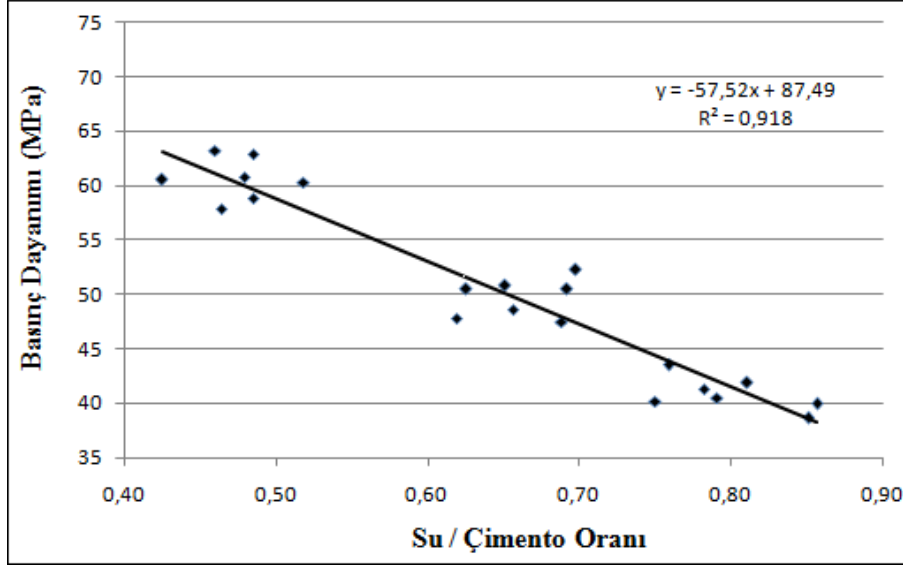


Şekil 5.1: Deneysel numunelerinin basınç dayanımları ile elastisite modülleri arasındaki ilişki.

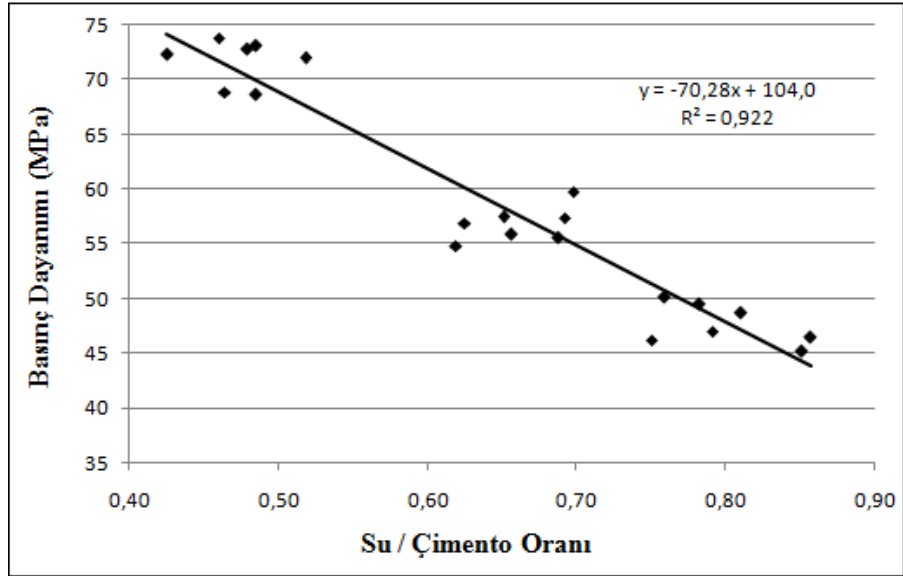
Şekil 5.1 incelendiğinde; numunelerde basınç dayanımı arttıkça, elastisite modülünün de arttığı görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur. Literatürde su/çimento oranları sabit tutulmadığı zaman basınç dayanımı arttıkça elastisite modülünün de arttığı görülmektedir.

5.2.2 Basınç dayanımı ve elastisite modülü ile su/çimento ve su/bağlayıcı oranları arasındaki ilişkinin incelenmesi

28 ve 90 günlük küp numunelerin basınç dayanımları ile su/çimento oranları arasındaki ilişki şekil 5.2 ve 5.3'de gösterilmiştir.

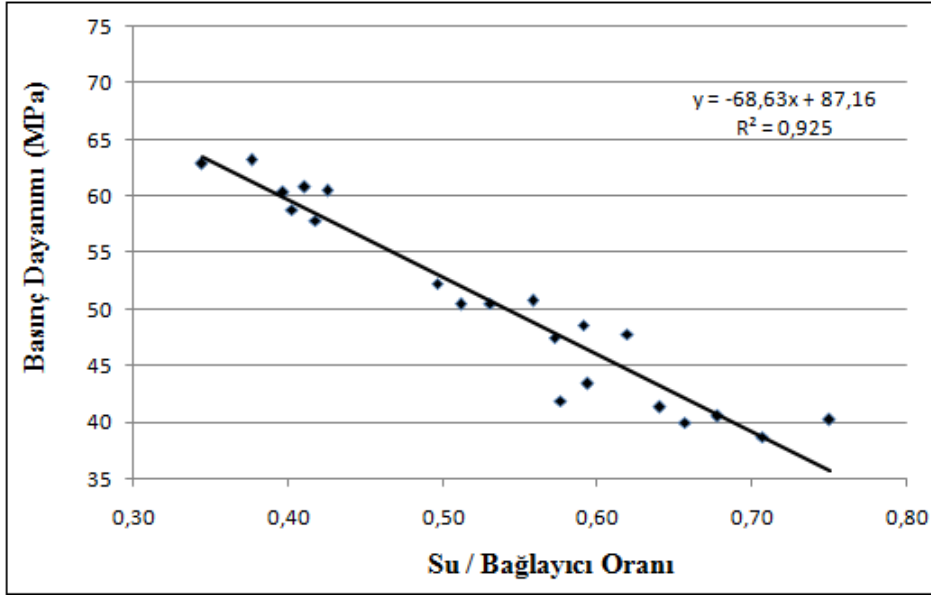


Şekil 5.2: 28 günlük küp numunelerin basınç dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişki.

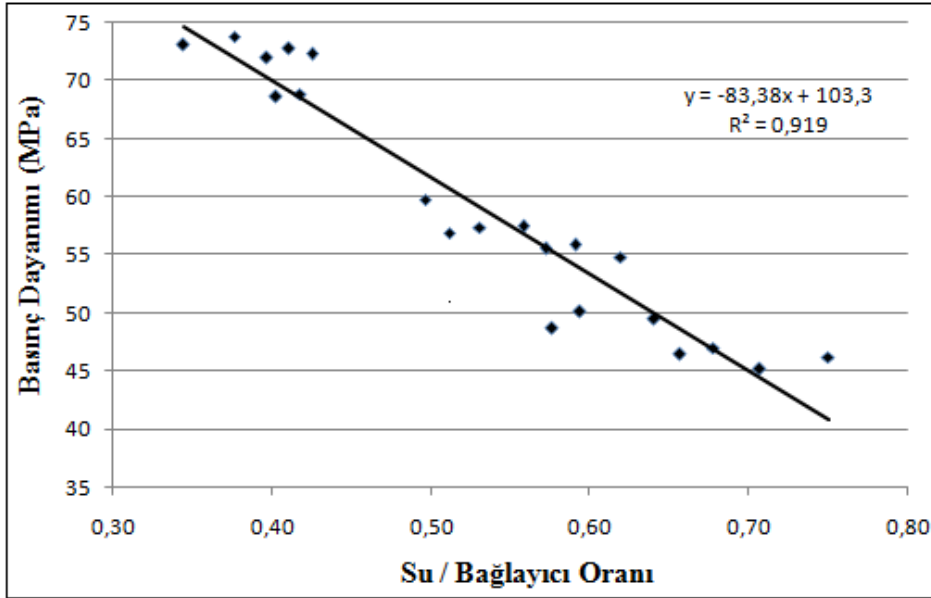


Şekil 5.3: 90 günlük küp numunelerin basınç dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişki.

Şekil 5.2 ve 5.3 incelendiğinde; numunelerde su/çimento oranı azaldıkça basınç dayanımı artmıştır. Su/çimento oranının betonun dayanımını etkileyen en önemli faktör olduğu açıkça görülmektedir. Bu durumda betonda su ihtiyacının azaltılması, beton dayanımını olumlu yönde etkileyen bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. 28 ve 90 günlük küp numunelerin basınç dayanımları ile su/bağlayıcı oranları arasındaki ilişki şekil 5.4 ve 5.5’de gösterilmiştir.



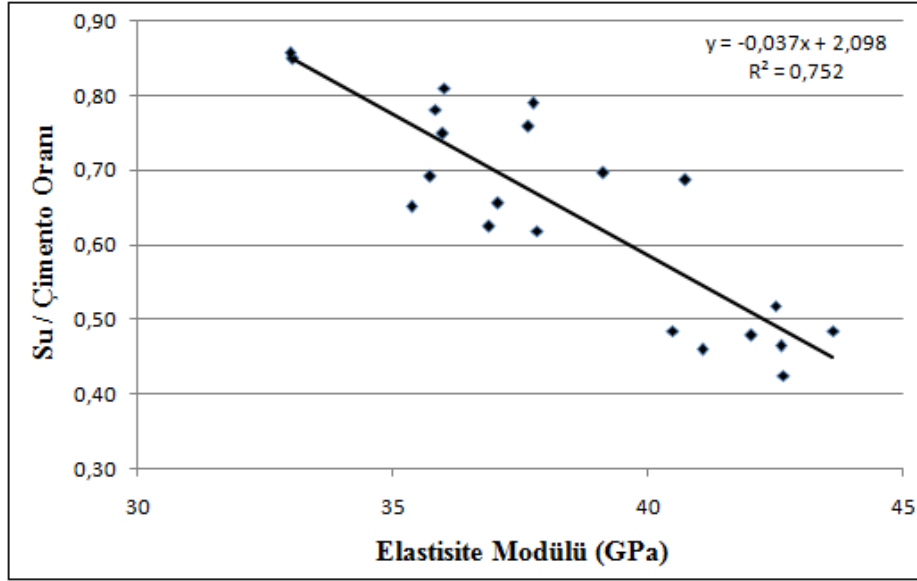
Şekil 5.4: 28 günlük küp numunelerin basınç dayanımı ile su/bağlayıcı oranı arasındaki ilişki.



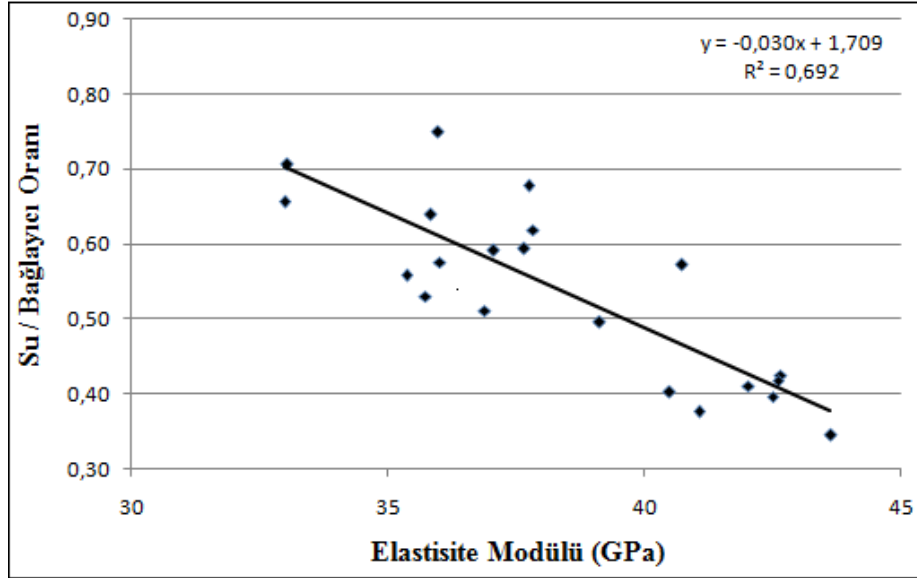
Şekil 5.5: 90 günlük küp numunelerin basınç dayanımı ile su/bağlayıcı oranı arasındaki ilişki.

Uçucu küllü betonlarda su/çimento oranının yanı sıra, su/bağlayıcı oranı da önemli bir faktördür. Uçucu küllü betonda toplam bağlayıcı, çimento ve uçucu külden oluşmaktadır. Şekil 5.4 ve Şekil 5.5 incelendiğinde; su/bağlayıcı oranı azaldıkça basınç dayanımının arttığı görülmektedir. Buda uçucu külün bir miktar bağlayıcılık özelliği göstererek, basınç dayanımını arttırdığını göstermektedir. Ancak su/çimento oranının basınç dayanımına olana etkisiyle su/bağlayıcı oranının basınç dayanımına

olan etkisi karşılaştırıldığında, su/bağlayıcı oranının basınç dayanımına olan etkisinin su/çimento oranı kadar fazla olmadığı anlaşılmaktadır. Bunun sebebi olarak uçucu külün bağlayıcılık özelliğinin çimento kadar yüksek olmamasını gösterebiliriz. Şekil 5.6 ve 5.7’ de deney numunelerinin elastisite modülleri ile su/çimento ve su/bağlayıcı oranları arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 5.6: Deney numunelerinin elastisite modülleri ile su/çimento oranları arasındaki ilişki.

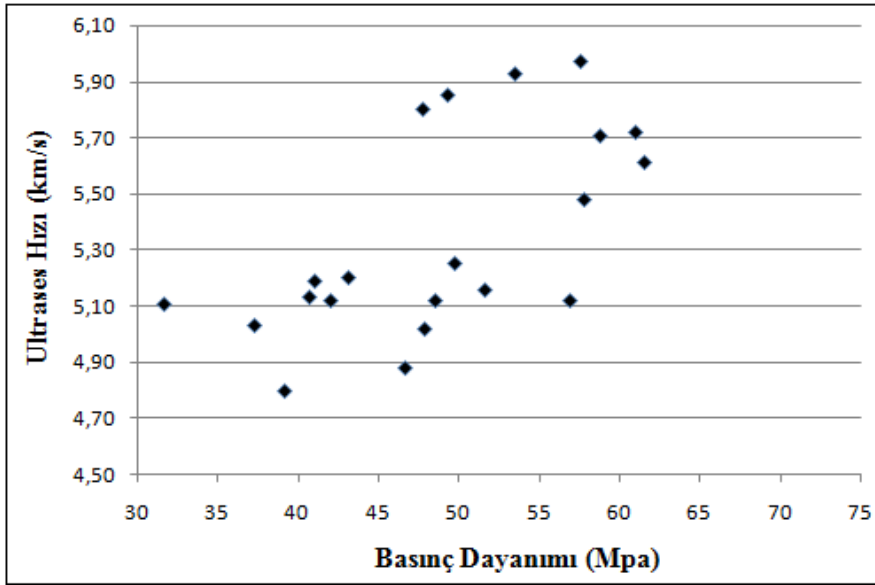


Şekil 5.7: Deney numunelerinin elastisite modülleri ile su/bağlayıcı oranları arasındaki ilişki.

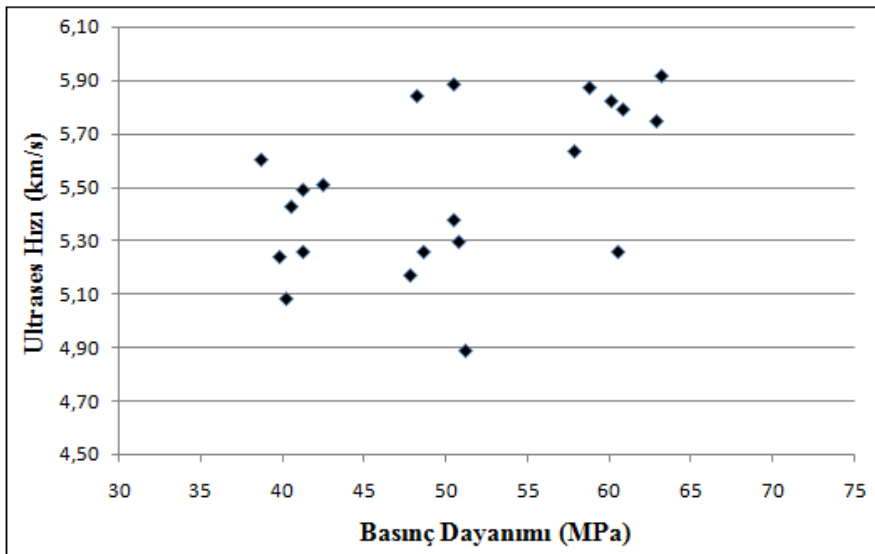
Şekil 5.6 ve 5.7 incelendiğinde; su/çimento ve su/bağlayıcı oranları azaldıkça elastisite modülün arttığı görülmektedir. Basınç dayanımı ve elastisite modülü arasındaki ilişki incelendiğinde bu beklenen bir durumdur.

5.2.3 Basınç dayanımı ve elastisite modülü ile ultrases hızı arasındaki ilişkinin incelenmesi

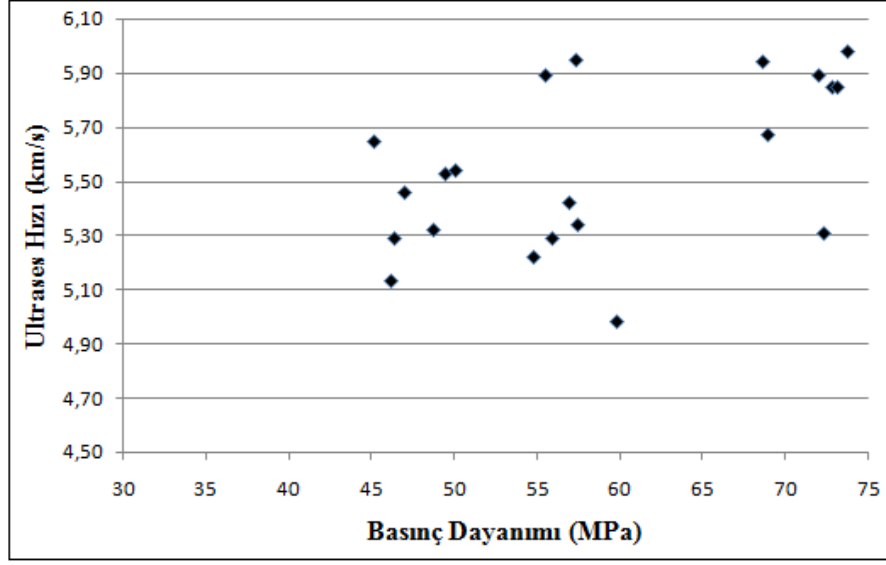
28 ve 90 günlük küp numuneler ile silindir numunelerin basınç dayanımlarıyla ultrases hızları arasındaki ilişki şekil 5.8, 5.9 ve 5.10'da gösterilmektedir.



Şekil 5.8: Silindir numunelerde basınç dayanımı ile ultrases hızı arasındaki ilişki.

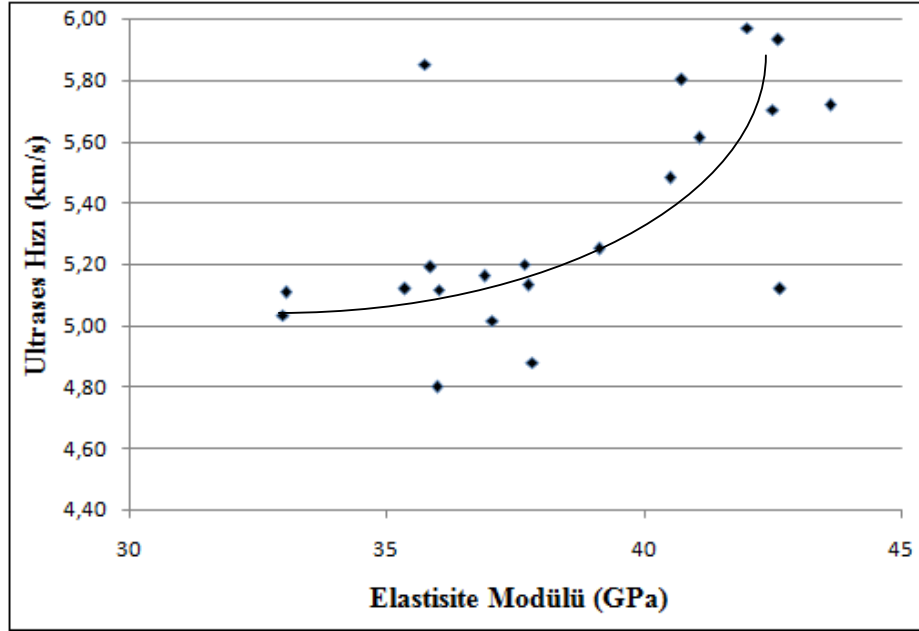


Şekil 5.9: 28 günlük küp numunelerde basınç dayanımı ile ultrases hızı arasındaki ilişki.



Şekil 5.10: 90 günlük küp numunelerde basınç dayanımı ile ultrases hızı arasındaki ilişki.

Şekil 5.8, 5.9 ve 5.10 incelendiğinde; basınç dayanımı arttıkça ultrases hızının da arttığı görülmektedir. Sesin katı ortamdaki hızı, hava ortamındaki hızından yüksek olduğu için yüksek mukavemetli cisimlerde boşluk yapısının daha düzgün olduğu düşünülürse ultrases hızının da yüksek olması beklenen bir durumdur. Şekil 5.11’de elastisite modülü ile ultrases hızı arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 5.11: Silindir numunelerde elastisite modülü ile ultrases hızı arasındaki ilişki.

Şekil 5.11 incelendiğinde; elastisite modülü arttıkça, ultrases hızı da yükselmiştir. Elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiye göz attığımızda bu beklenen bir durumdur.

5.2.4 Etkinlik faktörünün hesaplanması ve hesaplanan k etkinlik faktörü değerlerinin incelenmesi

Uçucu küllerin etkinliğinin tespit edilebilmesi için k etkinlik faktörü değerleri Bolomey formülünün yardımıyla bulunacaktır.

$$f_c = K_B \left(\frac{C}{W + h} - 0,5 \right) \quad (5.1)$$

Burada; f_c , basınç dayanımını, K_B , Bolomey katsayısını, C, çimento dozajını, W, su miktarını, h ise hava miktarını göstermektedir. 5.1 formülünden yararlanılarak uçucu külsüz betonlar için K_B katsayıları hesaplanmıştır. Her dozaj için ayrı K_B katsayısı bulunmuştur. Bulunan K_B katsayıları 28 ve 90 günlük numuneler için çizelge 5.2 ve 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.2: 28 günlük uçucu külsüz betonlar için bulunan Bolomey katsayıları.

Çimento Dozajı	Su Miktarı	Hava Miktarı	f_c	K_B
260	199	20	40,2	56,5
320	205	18	47,8	50,2
400	172	30	60,5	40,2

Çizelge 5.3: 90 günlük uçucu külsüz betonlar için bulunan Bolomey katsayıları.

Çimento Dozajı	Su Miktarı	Hava Miktarı	f_c	K_B
260	199	20	46,2	64,9
320	205	18	54,8	57,5
400	172	30	72,3	48,1

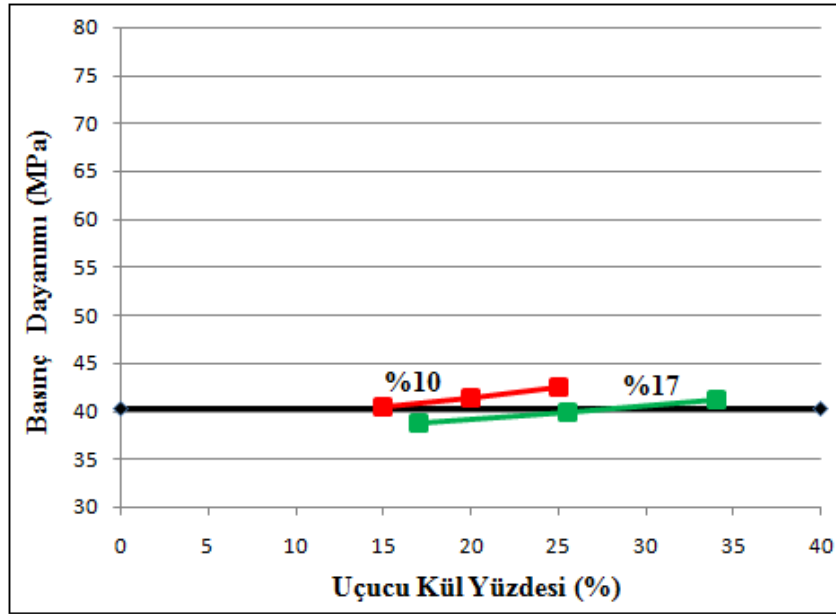
Bulunmuş olan Bolomey katsayılarının çimento dozajı arttıkça azalmasının sebebi, üretilen numunelerin su/çimento oranının sabit tutulmamasıdır. Su/çimento oranı sabit tutulmuş olsaydı, basınç dayanımı yükseldikçe Bolomey katsayısı artardı.

Uçucu küllü betonlarda Bolomey formülünde C yerine, toplam bağlayıcı oranını temsil eden (C + k.UK) ifadesi kullanılacaktır. Bu ifade yardımı ile k değeri hesaplanacaktır. Bolomey formülü bu şekilde uçucu küllü betonlar için 5.2 formülündeki şekli almaktadır.

$$f_c = K_B \left(\frac{C + k.UK}{W + h} - 0,5 \right) \quad (5.2)$$

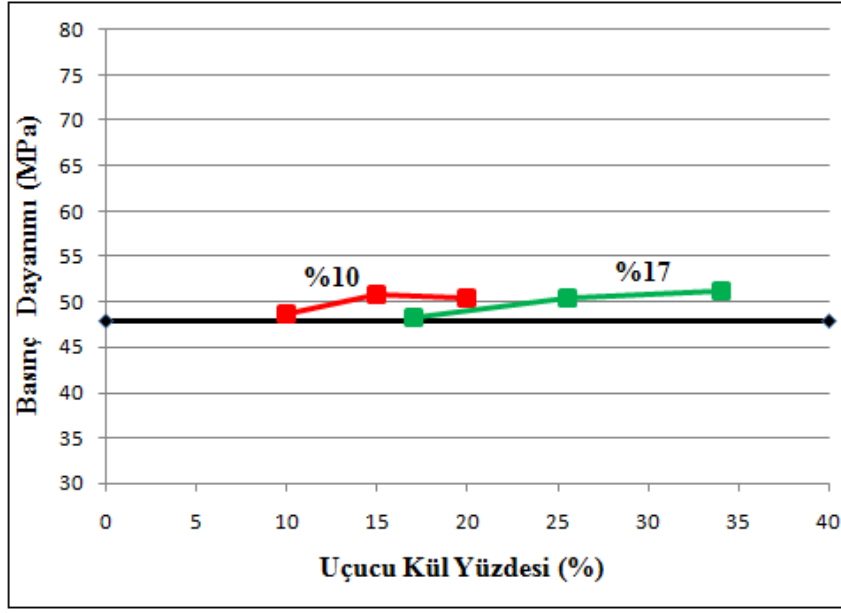
Burada; f_c , basınç dayanımını, K_B , Bolomey katsayısını, C, çimento dozajını, W, su miktarını, h, hava miktarını, k, etkinlik faktörünü, UK ise uçucu kül miktarını göstermektedir.

Etkinlik faktörünü hesaplayabilmek için kontrol betonlarının basınç dayanımlarına ulaşan, uçucu kül karışımlarını bulmak gerekmektedir. Şekil 5.12, 5.13 ve 5.14'de 28 günlük numunelerde 260, 320 ve 400 kg/m³ çimento dozajına sahip kontrol betonlarının basınç dayanımı değerlerine ulaşan uçucu küllü beton karışımları gösterilmektedir.



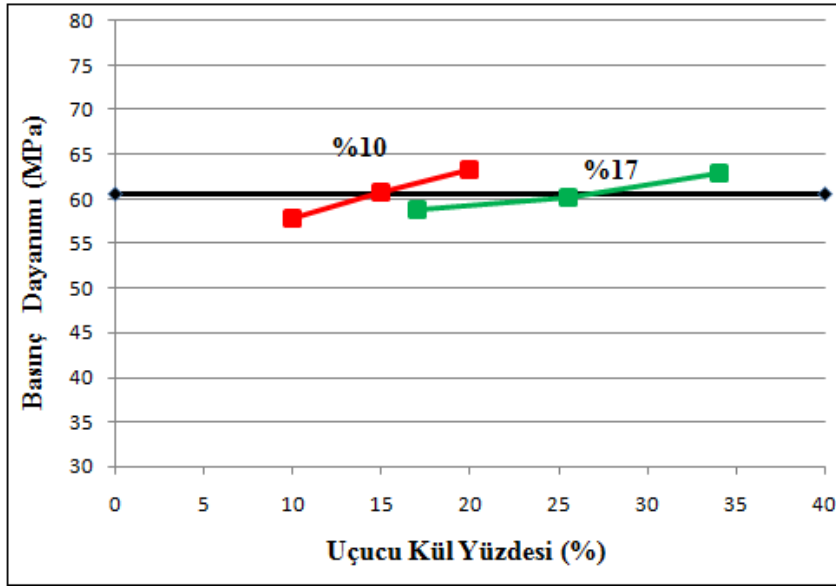
Şekil 5.12: 28 günlük 260 çimento dozajlı numunelerde eklenen uçucu kül yüzdesine göre basınç dayanımının değişimi.

Şekil 5.12 incelendiğinde; 260 kg/m³ çimento dozajına sahip numunelerde kontrol betonunun basınç dayanımına ulaşan uçucu küllü betonlar; %10 çimento çıkartılmış olanlar için 1.karışım, %17 çimento çıkarılmış olanlar için 2.karışım.



Şekil 5.13: 28 günlük 320 çimento dozajlı numunelerde eklenen uçucu kül yüzdesine göre basınç dayanımının değişimi.

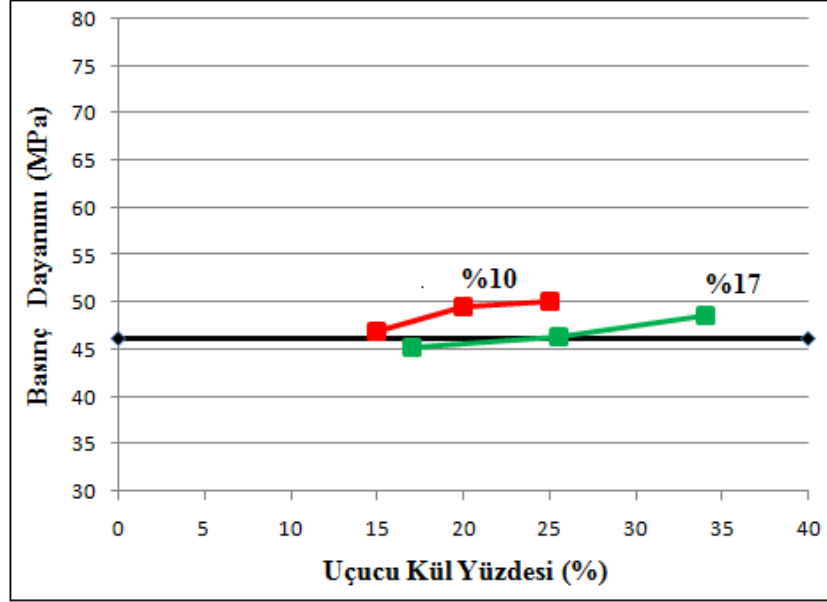
Şekil 5.13 incelendiğinde; 320 kg/m³ çimento dozajına sahip numunelerde kontrol betonunun basınç dayanımına ulaşan uçucu küllü betonlar; %10 çimento çıkartılmış olanlar için 1.karışım, %17 çimento çıkartılmış olanlar için 1.karışımıdır.



Şekil 5.14: 28 günlük 400 çimento dozajlı numunelerde eklenen uçucu kül yüzdesine göre basınç dayanımının değişimi.

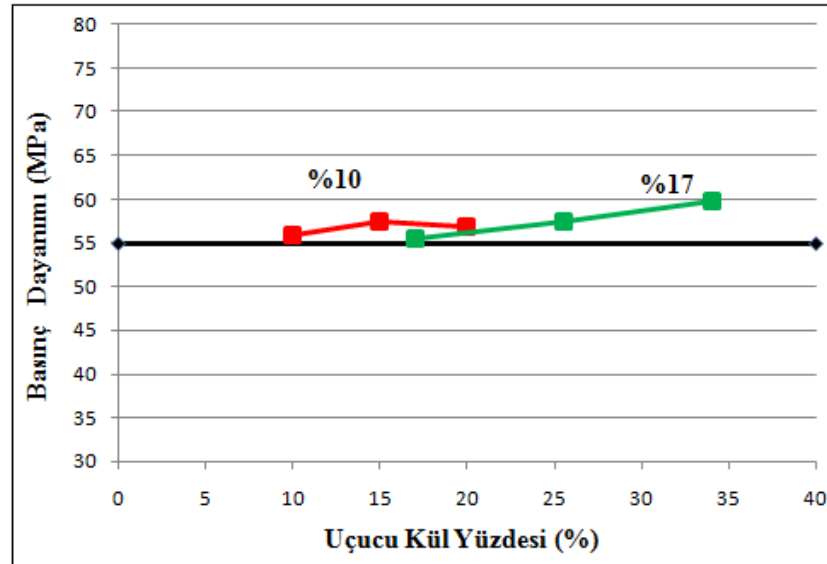
Şekil 5.14 incelendiğinde; 400 kg/m³ çimento dozajına sahip numunelerde kontrol betonunun basınç dayanımına ulaşan uçucu küllü betonlar; %10 çimento çıkartılmış olanlar için 2.karışım, %17 çimento çıkartılmış olanlar için 2.karışımıdır.

Şekil 5.15, 5.16 ve 5.17’de 90 günlük numunelerde 260, 320 ve 400 kg/m³ çimento dozajına sahip kontrol betonlarının basınç dayanımı değerlerine ulaşan uçucu küllü beton karışımları gösterilmektedir.



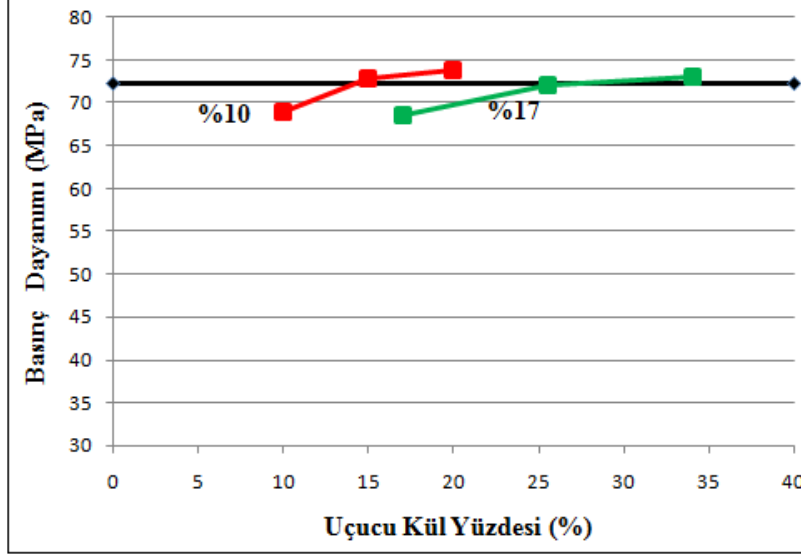
Şekil 5.15: 90 günlük 260 çimento dozajlı numunelerde eklenen uçucu kül yüzdesine göre basınç dayanımının değişimi.

Şekil 5.15 incelendiğinde; 260 kg/m³ çimento dozajına sahip numunelerde kontrol betonunun basınç dayanımına ulaşan uçucu küllü betonlar; %10 çimento çıkartılmış olanlar için 1.karışım, %17 çimento çıkarılmış olanlar için 2.karışımdır.



Şekil 5.16: 90 günlük 320 çimento dozajlı numunelerde eklenen uçucu kül yüzdesine göre basınç dayanımının değişimi.

Şekil 5.16 incelendiğinde; 320 kg/m³ çimento dozajına sahip numunelerde kontrol betonunun basınç dayanımına ulaşan uçucu küllü betonlar; %10 çimento çıkarılmış olanlar için 1.karışım, %17 çimento çıkarılmış olanlar için 1.karışımır.



Şekil 5.17: 90 günlük 400 çimento dozajlı numunelerde eklenen uçucu kül yüzdesine göre basınç dayanımının değişimi.

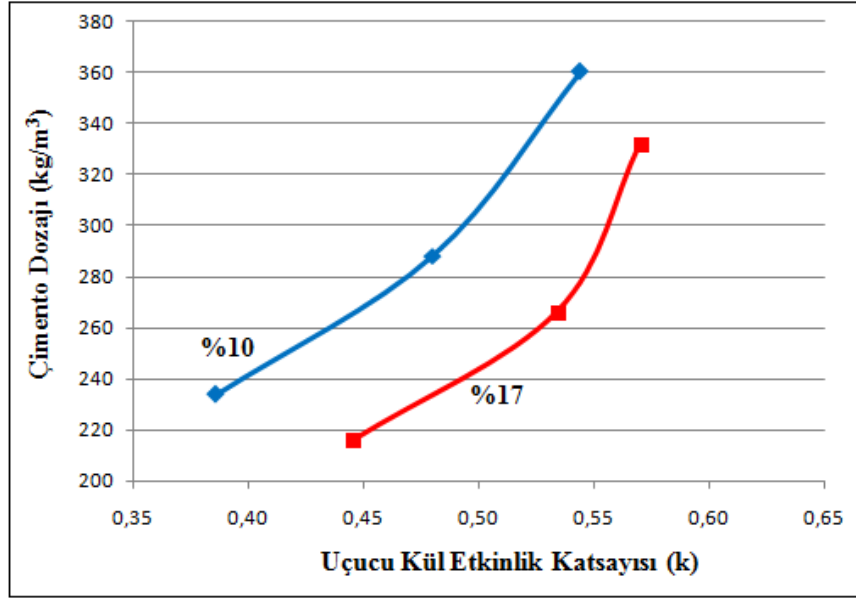
Şekil 5.17 incelendiğinde; 400 kg/m³ çimento dozajına sahip numunelerde kontrol betonunun basınç dayanımına ulaşan uçucu küllü betonlar; %10 çimento çıkarılmış olanlar için 2.karışım, %17 çimento çıkarılmış olanlar için 2.karışımır.

Bu veriler ışığında her dozaj için ayrı K_B değeri kullanılarak, kontrol betonunun basınç dayanımına ulaşan uçucu küllü betonlar için k etkinlik faktörleri hesaplanmıştır. Bulunan k etkinlik değerleri çizelge 5.4'te gösterilmiştir.

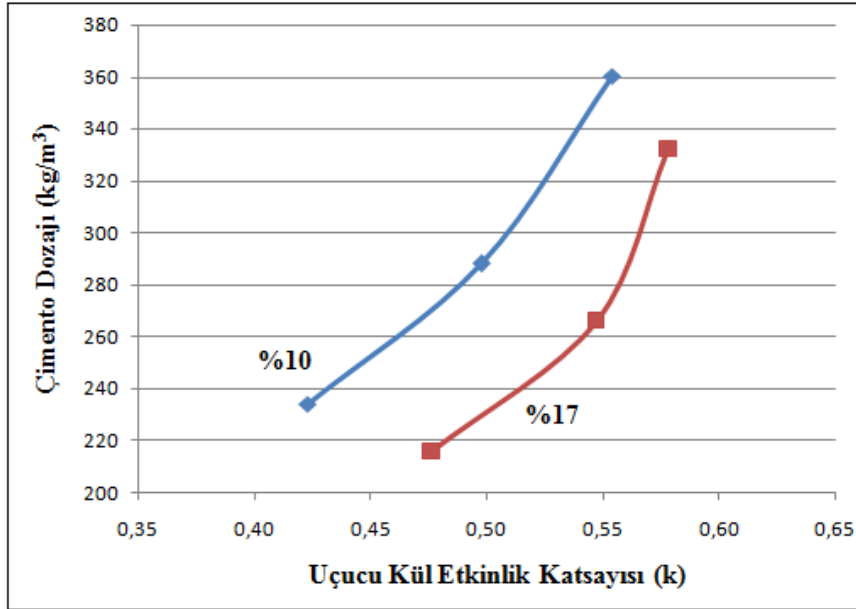
Çizelge 5.4: Uçucu küllü betonların k etkinlik faktörleri.

Kontrol Betonunun Çimento dozajı	28 Günlük Etkinlik Değerleri		90 Günlük Etkinlik Değerleri	
	%10 Çimento Çıkarılmış	%17 Çimento Çıkarılmış	%10 Çimento Çıkarılmış	%17 Çimento Çıkarılmış
260	0,386	0,445	0,423	0,476
320	0,480	0,534	0,498	0,547
400	0,544	0,570	0,554	0,578

28 ve 90 günlük numunelerde %10 ve %17 oranında çimento çıkarılmış betonların k etkinlik değerleri arasındaki ilişki şekil 5.18 ve 5.19'da gösterilmektedir.



Şekil 5.18: 28 Günlük Numunelerde k etkinlik faktörünün çimento çıkarımı yüzdesine ve çimento dozajına göre değişimi.

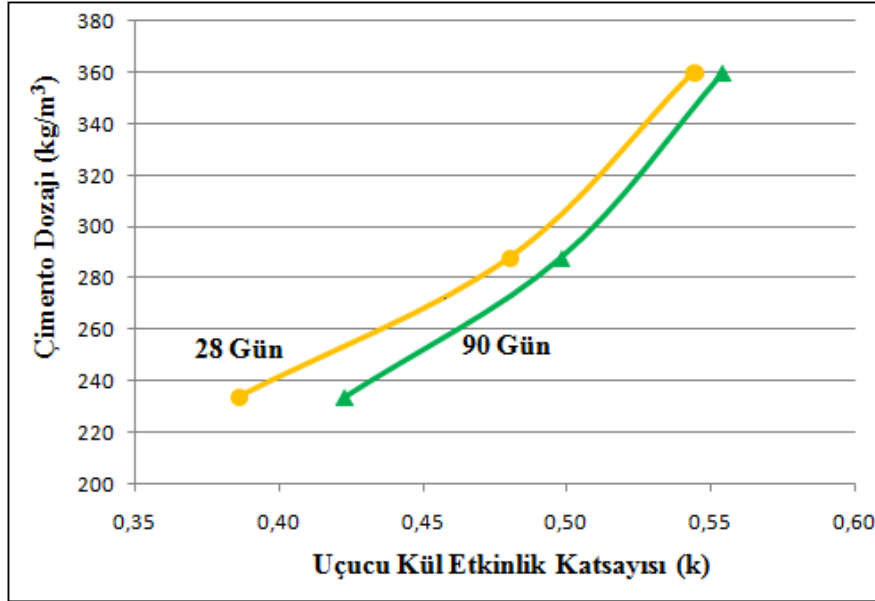


Şekil 5.19: 90 Günlük Numunelerde k etkinlik faktörünün çimento çıkarımı yüzdesine ve çimento dozajına göre değişimi.

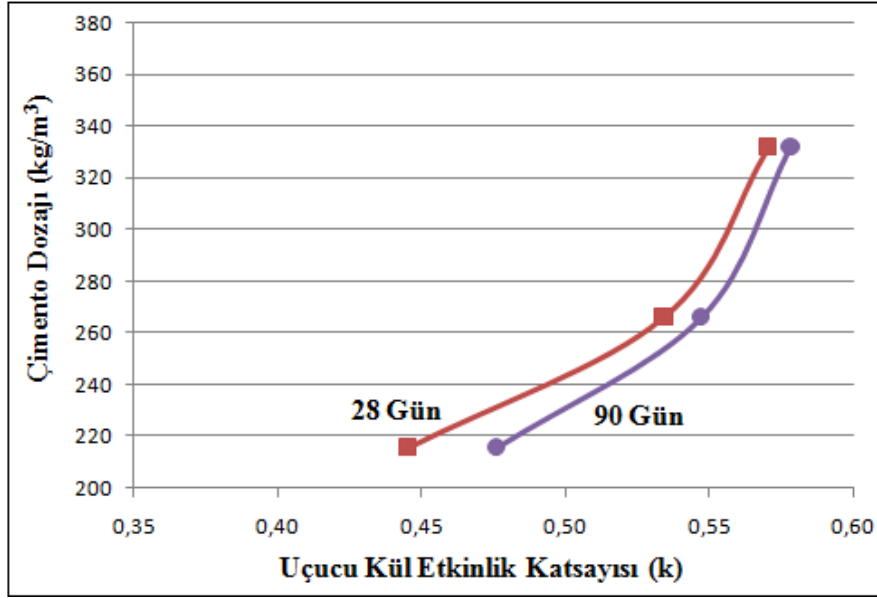
Şekil 5.18 ve 5.19 incelendiğinde; uçucu kül etkinliğinin çimento dozajı arttıkça, yükseldiği görülmektedir. Bunun sebebi olarak çimento dozajı yükseldikçe uçucu külün reaksiyona girebileceği serbest kireç miktarının da artmasını gösterebiliriz. Bu sebepten ötürü uçucu külün puzolanik reaksiyona girme hızı yükselmektedir. Bu da k etkinlik değerinin artmasına sebep olmaktadır. A.Öner ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada k etkinlik faktörü çimento dozajı yükseldikçe artmıştır [35].

Akman ve Yücelin yapmış olduğu çalışmada, özellikle 350 kg/m^3 çimento içeriğinden sonra k etkinlik değerindeki artışın dikkate değer olduğu sonucuna varmışlardır [16]. Yıldırım ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada çimento dozajı arttıkça uçucu kül etkinliği de artmıştır [40]. Deney sonuçlarından ayrıca çıkarılan çimento miktarı ve eklenen uçucu kül miktarı arttıkça k etkinlik değerinin daha yüksek çıktığı görülmektedir. Literatürde uçucu külün eklenme yüzdesinin belli bir optimum seviyeye kadar yükseldiğinde maksimum etkinliği verdiği özellikle %30'dan fazla eklenme yüzdelerinde etkinliğin azaldığı görülmektedir. Çünkü uçucu külün reaksiyona girdiği serbest kireç miktarı sınırlıdır ve belli bir yüzdeden sonra uçucu külün etkinliği azalır. Deney verilerinden anlaşılacağı üzere, %17 çimento çıkarılmış numuneler, %10 çimento çıkarılmış numunelere göre daha yüksek etkinlik vermektedir. Karşılaştırılan etkinlik değerlerinin uçucu kül eklenme yüzdesine bakacak olursak; %10 ve %17 çıkarılmış numunelerde eklenen uçucu kül miktarları, 260 dozajlı numuneler için çıkarılan çimento miktarının 1,5 katı oranında, 320 dozajlı numuneler için çıkarılan çimento miktarı ile aynı oranda, 400 dozajlı numuneler için ise çıkarılan çimento miktarının 1,5 katı oranındadır.

%10 ve %17 oranında çimento çıkarılmış numunelerde k etkinliğinin zamana ve çimento dozajına göre değişimi Şekil 5.20 ve 5.21'de gösterilmiştir.



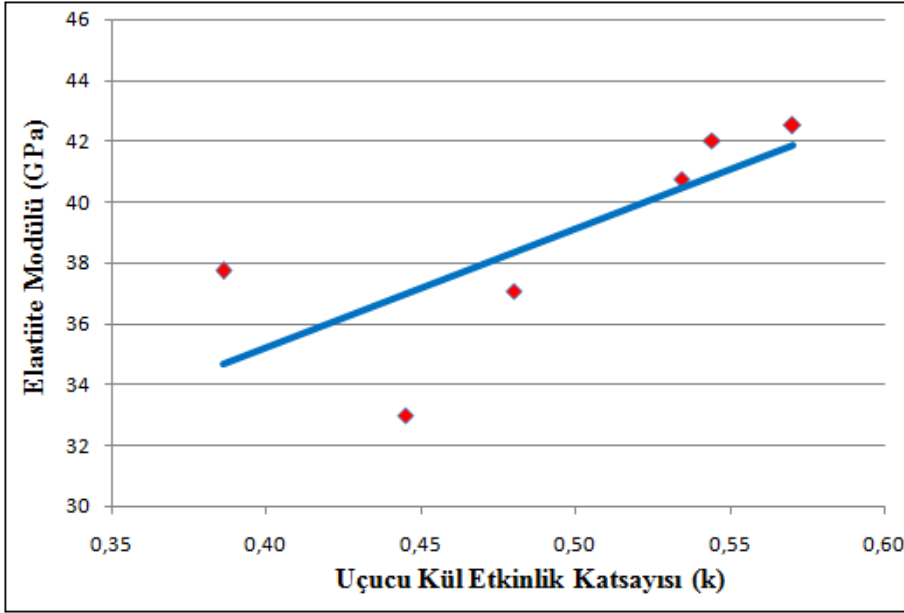
Şekil 5.20: %10 çimento çıkarılmış numunelerde k etkinliğinin zamana ve çimento dozajına göre değişimi.



Şekil 5.21: %17 çimento çıkarılmış numunelerde k etkinliğinin zamana ve çimento dozajına göre değişimi.

Şekil 5.20 ve 5.21 incelendiğinde; uçucu kül etkinliğinin zaman içerisinde arttığı görülmektedir. Literatür incelendiğinde hemen hemen bütün çalışmalarda uçucu kül etkinliğinin zaman içerisinde arttığı tespit edilmiştir. Uçucu küller puzolanik özellik gösterdiği için puzolanik reaksiyonunun ortamda serbest kireç oluşumunu beklemesi ve yavaş gelişen bir reaksiyon olması, uçucu küllerin etkinliğinin zaman içerisinde artmasını sağlamaktadır. Özellikle düşük kireçli uçucu küllerde erken yaşlarda k etkinlik faktörünün yüksek değerlerde olması zordur. Deney numunelerinde yüksek kireçli C tipi uçucu küllerin kullanılması sebebiyle istenilen k etkinlik değerleri erken yaşlarda da beklenen sınırlar içerisinde çıkmıştır. Özcan'ın Bolomey formülünü kullanarak bulmuş olduğu k etkinlik faktörleri C tipi uçucu küller için 0,79, F sınıfı uçucu küller içinse 0,62 olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmadan C tipi uçucu küllerin bağlayıcılık özelliklerinin daha fazla olduğu ve erken yaşlarda da dayanımlarının yüksek olması nedeniyle k etkinlik faktörlerinin daha yüksek çıktığı anlaşılmaktadır [16]. Akman ve Yücel' in yapmış oldukları çalışmada ise C tipi uçucu küller için k etkinlik değeri 0,14 ile 0,57 arasında bulunmuştur [33]. TS EN 206'ya göre ise bu değerlerin 0,4 olarak alınması gerektiği belirtilmektedir [41]. Bu çalışmada ise uçucu küllerin etkinliğinin 0,39 ile 0,58 arasında değiştiği tespit edilmiştir.

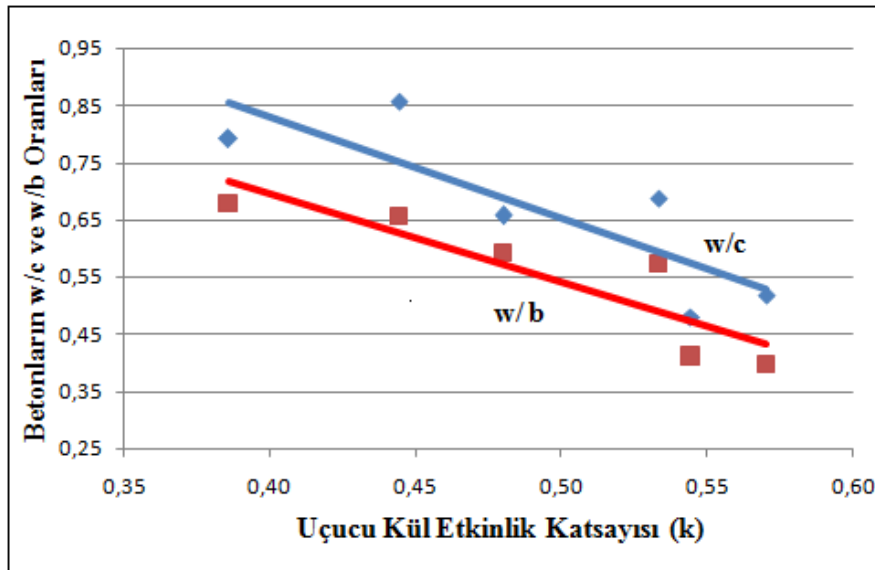
Şekil 5.22'de etkinlik katsayısı ile elastisite modülü arasındaki ilişki gösterilmiştir.



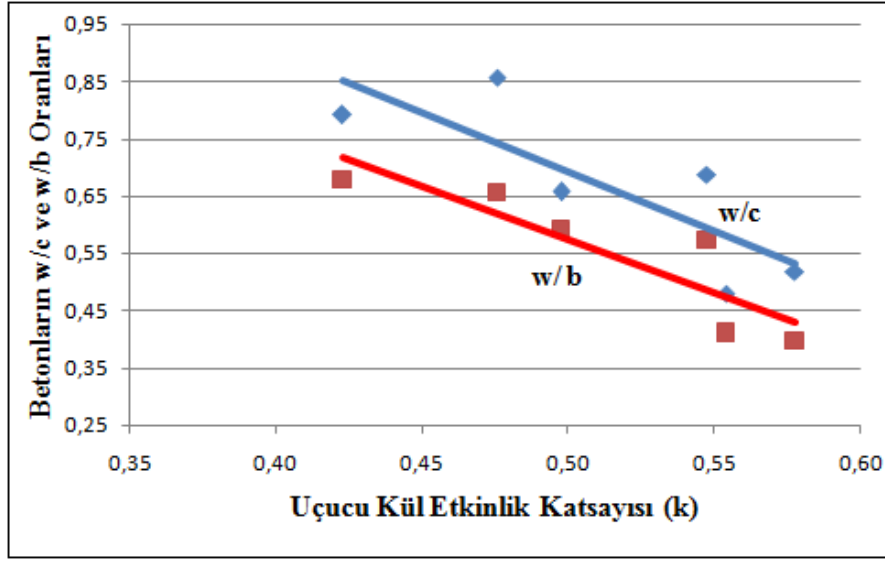
Şekil 5.22: Etkinlik katsayısı ile elastisite modülü arasındaki ilişki.

Deney numunelerinde basınç dayanımı arttıkça, elastisite modülü değerleri de yükselmiştir. Şekil 5.22 incelendiğinde; elastisite modülü arttıkça etkinlik katsayısının da yükseldiği görülmektedir. Basınç dayanımı arttıkça etkinlik katsayısı da yükseldiği için bu beklenen bir durumdur.

Şekil 5.23 ve 5.24’de uçucu kül etkinlik faktörünün; su/çimento ve su/bağlayıcı oranına göre değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.23: 28 günlük numunelerin k etkinlik değerlerinin w/c ve w/b oranına göre değişimi.



Şekil 5.24: 90 günlük numunelerin k etkinlik değerlerinin w/c ve w/b oranına göre değişimi.

Şekil 5.23 ve 5.24 incelendiğinde; su/çimento ve su/bağlayıcı oranı azaldıkça uçucu kül etkinliğinin arttığı görülmektedir. Çimento dozajı arttıkça, su/çimento ve su/bağlayıcı oranları azaldığı için bu beklenen bir durumdur. CEN TC 140SC1 çalışma grubu yaptığı çalışma sonucunda k etkinlik faktörünün su/çimento oranı yükseldikçe azaldığını tespit etmiştir [33].

Çizelge 5.5'te çimento dozajına ve zamana göre bağlı k etkinlik faktörleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.5: Çimento dozajına göre bağlı k etkinlik faktörleri.

Karşılaştırılan Çimento Dozajları	28 Günlük k Etkinlik Faktörleri		90 Günlük k Etkinlik Faktörleri	
	%10 Çimento Eksiltilmiş	%17 Çimento Eksiltilmiş	%10 Çimento Eksiltilmiş	%17 Çimento Eksiltilmiş
260	%100	%100	%100	%100
320	%124	%120	%118	%115
400	%141	%128	%131	%121

Çizelge 5.5'teki değerler incelendiğinde; özellikle 260 dozaj ile 320 dozajdaki numuneler arasında k etkinlik faktörünün artışı 320 ve 400 dozajdaki numunelere

göre daha fazla olmaktadır. 28 günlük numunelerin k etkinlik faktörünün çimento dozajına göre artışı, 90 günlük numunelere göre daha yüksektir. Bu durumda çimento dozajının uçucu kül etkinliğine olan etkisinin erken yaşlarda daha fazla olduğu sonucunu çıkarabiliriz.

Çizelge 5.6'da %10 ve %17 çimento çıkarılmış karışımların k etkinlik faktörleri karşılaştırılarak k etkinlik faktörünün çıkarılan çimento yüzdesine göre artış yüzdesi gösterilmiştir.

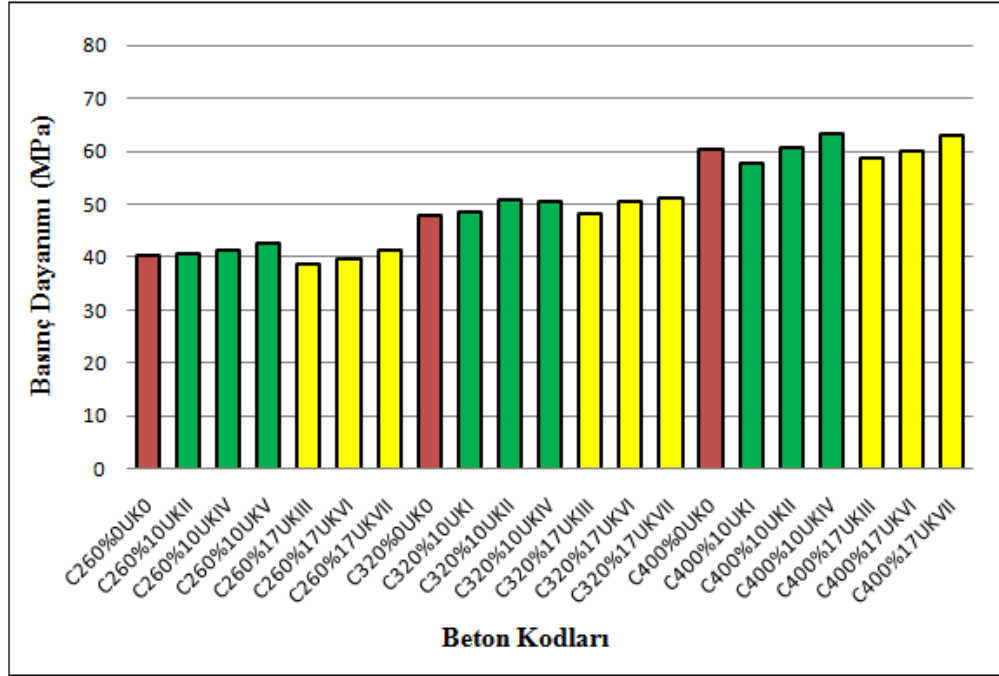
Çizelge 5.6: Eksiltilen çimento oranına göre bağlı k etkinlik faktörleri.

Kontrol Betonunun Çimento Dozajı	Eksiltelen Çimento Oranı	28 Günde k faktörünün artış yüzdesi	90 Günde k faktörünün artış yüzdesi
260	%10	%100	%100
	%17	%115	%113
320	%10	%100	%100
	%17	%111	%110
400	%10	%100	%100
	%17	%105	%104

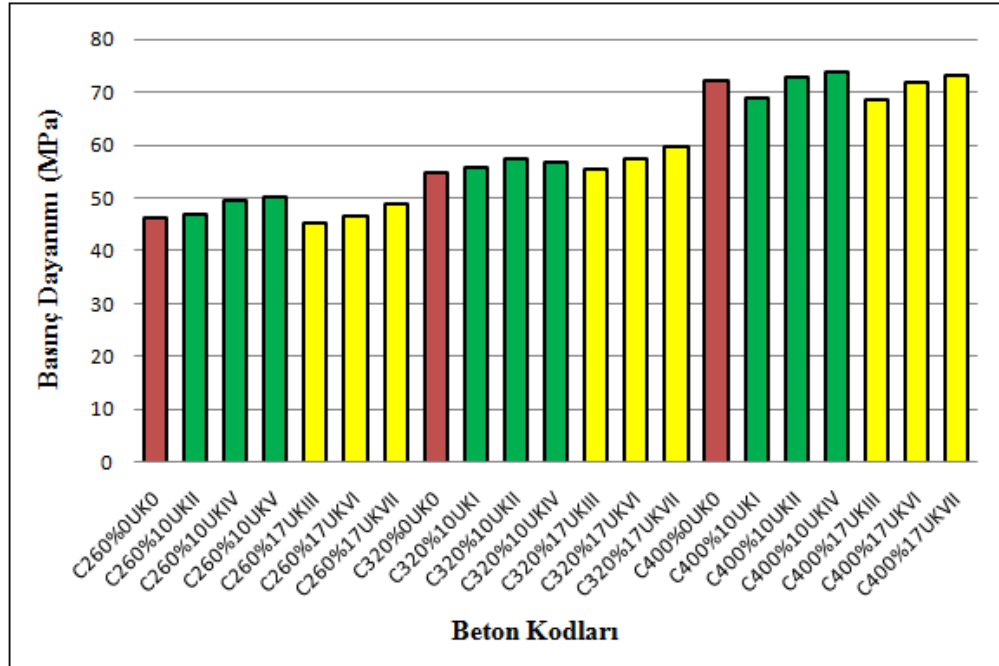
Çizelge 5.6'daki değerler incelendiğinde; çimento dozajı yükseldikçe, eksiltelen çimento oranının k etkinlik faktörüne olan etkisinin azaldığı görülmektedir. 260 ve 320 çimento dozajlı numunelerde ise %10 çimento eksiltelen numuneler ile %17 çimento eksiltelen numunelerin k etkinlik faktörleri arasında belirgin bir fark bulunmaktadır. 400 çimento dozajlı numunelerde ise %10 çimento eksiltelen numuneler ile %17 çimento eksiltelen numunelerin k etkinlik faktörleri arasında fazla bir fark yoktur. 90 günlük numunelerde, 28 günlük numunelere nazaran aradaki fark daha da azalmıştır. Bu durumda eksiltelen çimento miktarının uçucu kül etkinliğine olan etkisinin erken yaşlarda daha fazla olduğu sonucunu çıkartabiliriz.

5.2.5 Uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların basınç dayanımları arasındaki ilişkinin incelenmesi

28 ve 90 günlük küp numunelerde uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların basınç dayanımları arasındaki ilişki şekil 5.25 ve 5.26'da gösterilmiştir.



Şekil 5.25: 28 günlük küp numunelerde uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması.



Şekil 5.26: 90 günlük küp numunelerde uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Şekil 5.25 ve 5.26 incelendiğinde; çıkarılan çimento miktarı aynı olan uçucu küllü numunelerde genelde uçucu kül miktarı arttıkça basınç dayanımı da yükselmiştir. Uçucu küllü betonlarda eklenen uçucu kül miktarı arttıkça kontrol betonunun basınç

dayanımı değerlerini yakalamış ve geçmişlerdir. C tipi uçucu küllerin erken yaşlarda da kontrol betonlarına göre oldukça iyi değerlerde basıncı dayanımı değerleri sağladıkları görülmektedir. Elde edilen bu sonucun çıkarılan imento miktarının özellikle %10 ila %17 arasında olduğu zaman geçerli olacağı ancak %20 ve üzeri için farklı değerler bulunabileceği unutulmamalıdır. Sonuç olarak uçucu küllü betonlar mekanik özellikler bakımından kontrol betonlarına benzer özellikler sergilemişlerdir. Bunun en önemli sebeplerinden birisi kullanılan uçucu külde %15 oranında CaO (kireç) bulunmasını gösterebiliriz. Ayrıca uçucu külün içerisinde yeterli miktarda S+A+F'nın bulunması da kontrol betonuna yakın mekanik özellikler göstermesinin bir başka nedeni olarak sayılabilir. C tipi uçucu küllerin sağladıkları bu mekanik özelliklerin iyi olması durabilite özelliklerinde de aynı performansı gösterecekleri anlamına gelmez. Bu yüzden C tipi uçucu küllerin durabilite özellikleri de iyi incelenmeli ve betondaki kullanımına buna göre karar vermek gerekmektedir.

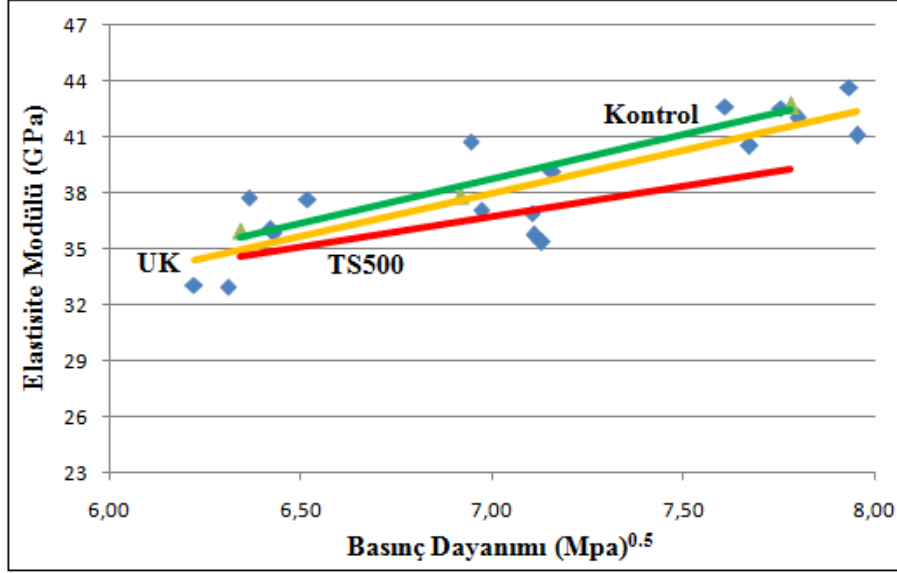
Uyan ve arkadaşlarının C tipi uçucu küllerin mekanik özellikleri üzerine yapmış oldukları bir çalışmada, uçucu kül ikamesinin basıncı dayanımı üzerindeki olumsuz etkisinin 28.günde %10 ikame oranında ortadan kaybolduğunu ve %20 ikame oranında ise bu olumsuzluğun oldukça azaldığını tespit etmişlerdir. Yaptıkları çalışmanın sonucunda, BS 14- BS 25 arası beton sınıflarında basıncı dayanımının, uçucu kül kullanımının %10 ila %20 mertebesinde uçucu kül ikamesi ile gerçekleştiğinde olumsuz etkilenmeyeceğini ve ekonomik olarak yararlı olacağını söylemişlerdir [42].

5.2.6 Uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların elastisite modülleri arasındaki ilişkinin incelenmesi

TS500; betonun basıncı dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişkiyi 5.3 ampirik formülü ile vermektedir [43].

$$E = 3250\sqrt{f_c} + 14000 \quad (5.3)$$

Referans teşkil etmesi açısından TS500 eğilim çizgisi ile uçucu külsüz ve uçucu küllü betonların basıncı dayanımların karekökü ile elastisite modülleri arasındaki ilişki Şekil 5.27'de gösterilmiştir.

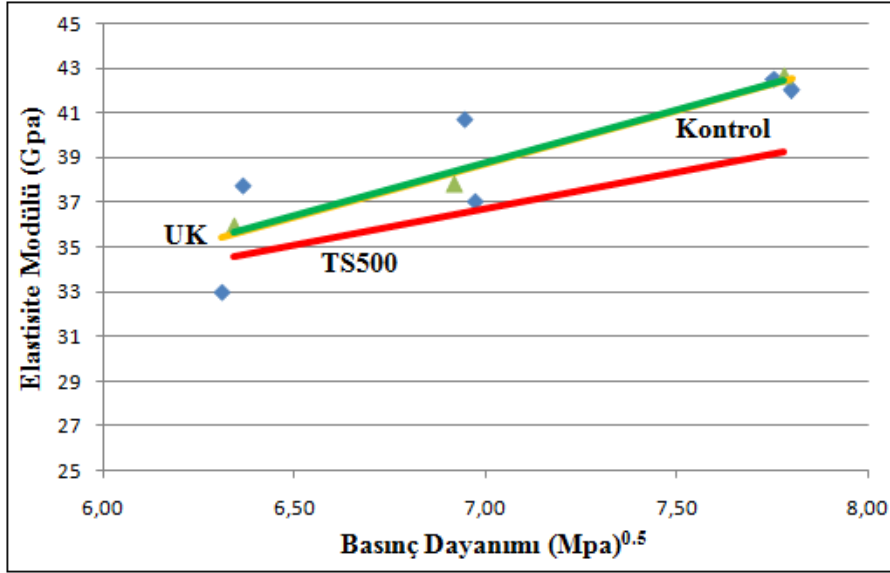


Şekil 5.27: Uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların elastisite modüllerinin karşılaştırılması.

Şekil 5.27 incelendiğinde; uçucu küllü betonlarla uçucu külsüz betonların elastisite modüllerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu durumda uçucu küllerin betonun elastisite modülüne olan etkisinin çok fazla olduğu söylenemez. Literatürde de uçucu küllerin elastisite modülüne etkisinin çok fazla olmadığı belirtilmektedir. Deney sonuçlarında uçucu küllü betonların elastisite modülü değerlerinin kontrol betonlarına paralel olduğu ancak bir miktar aşağısında çıktığı görülmektedir. Literatürde uçucu küllerin elastisite modülünü erken yaşlarda bir miktar azalttığı ancak ilerleyen yaşlarda yükselttiği belirtilmektedir. Abdun-Nur yapmış olduğu çalışmada, uçucu küllerin elastisite modülünü erken yaşlarda düşürdüğünü ancak yüksek yaşlarda arttırdığını tespit etmiş, genel olarak elastisite modülünü yükselttiğini belirtmiştir. Lane ve Best yapmış olduğu çalışmada, uçucu külün basınç dayanımını etkileyen özelliklerinin elastisite modülü üzerinde de azda olsa etkisinin bulunduğunu belirtmiş; elastisite modülünün de aynen basınç dayanımında olduğu gibi erken yaşlarda düşük, ileri yaşlarda ise yüksek olduğunu tespit etmiştir [21]. Hem uçucu küllü hemde uçucu külsüz betonların elastisite modülü değerleri TS500'e göre daha yüksek çıkmıştır. Uçucu küllü betonlar için basınç dayanımı ile elastisite modülü arasında 5.4 ampirik formülü bulunmuştur.

$$E = 4576,5\sqrt{f_c} + 5971 \quad (5.4)$$

Şekil 5.28’de uçucu külsüz betonlarla, uçucu külsüz betonlar ile aynı basınç dayanımı değerlerine ulaşan uçucu küllü betonların elastisite modülleri arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 5.28: Uçucu külsüz betonlarla, uçucu külsüz betonlar ile aynı basınç dayanımı değerlerine ulaşan uçucu küllü betonların elastisite modüllerinin karşılaştırılması.

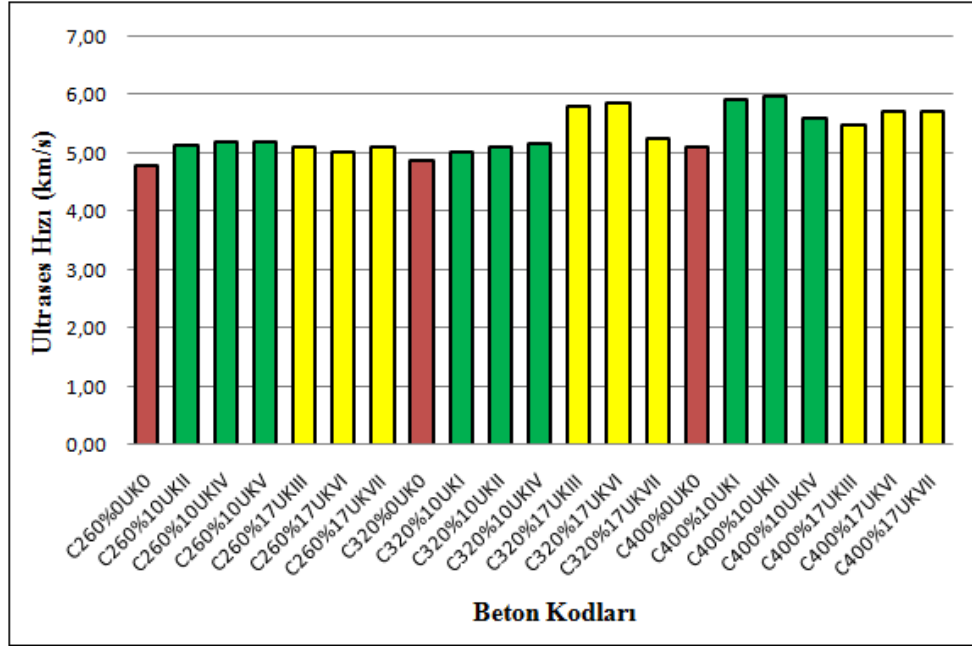
Şekil 5.28 incelendiğinde; uçucu külsüz betonlar ile aynı basınç dayanımı değerlerine ulaşan uçucu küllü beton karışımlarının elastisite modüllerinin, kontrol betonlarının elastisite modüllerine oldukça yakın değerlerde olduğu ve eğilim çizgilerinin çakıştığı görülmektedir. Yıldırım ve Şengül yapmış oldukları çalışmada, uçucu küllerin betonun elastisite modülü üzerinde çok az bir etkisinin bulunduğunu tespit etmişlerdir [44]. Hem kontrol betonlarının, hemde kontrol betonlarının dayanımı değerlerine ulaşan uçucu küllü betonların, basınç dayanımı arttıkça TS500’ün eğilim çizgisinden uzaklaştıkları görülmüştür. Kontrol betonları ve kontrol betonlarının basınç dayanımı değerlerine ulaşan uçucu küllü betonlar için 5.5 ve 5.6 ampirik formülleri bulunmuştur:

$$E = 4720,2\sqrt{f_c} + 5719,2 \quad (5.5)$$

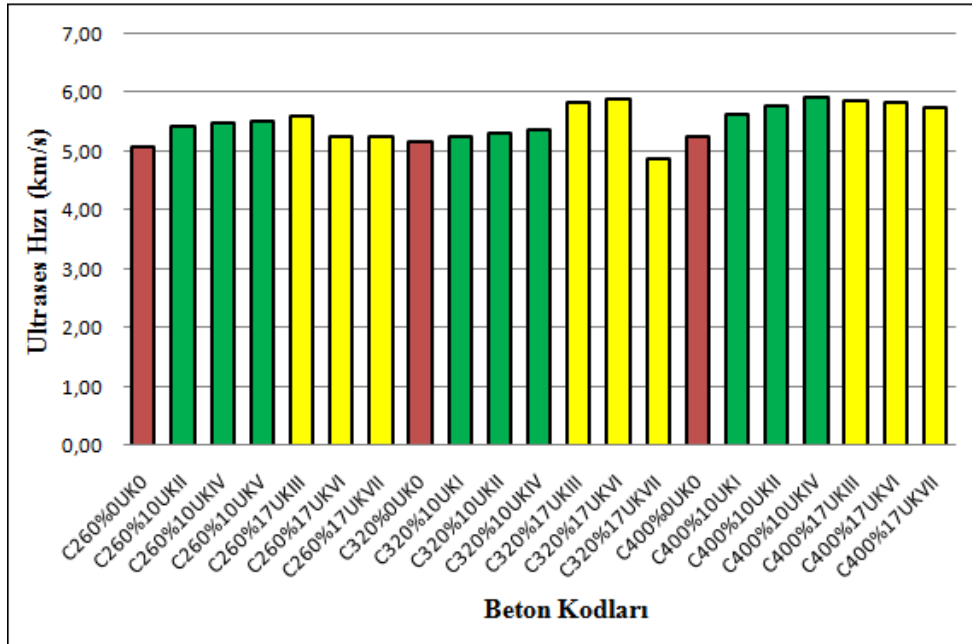
$$E = 4784,2\sqrt{f_c} + 5237,3 \quad (5.6)$$

5.2.7 Uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların ultrases hızları arasındaki ilişkinin incelenmesi

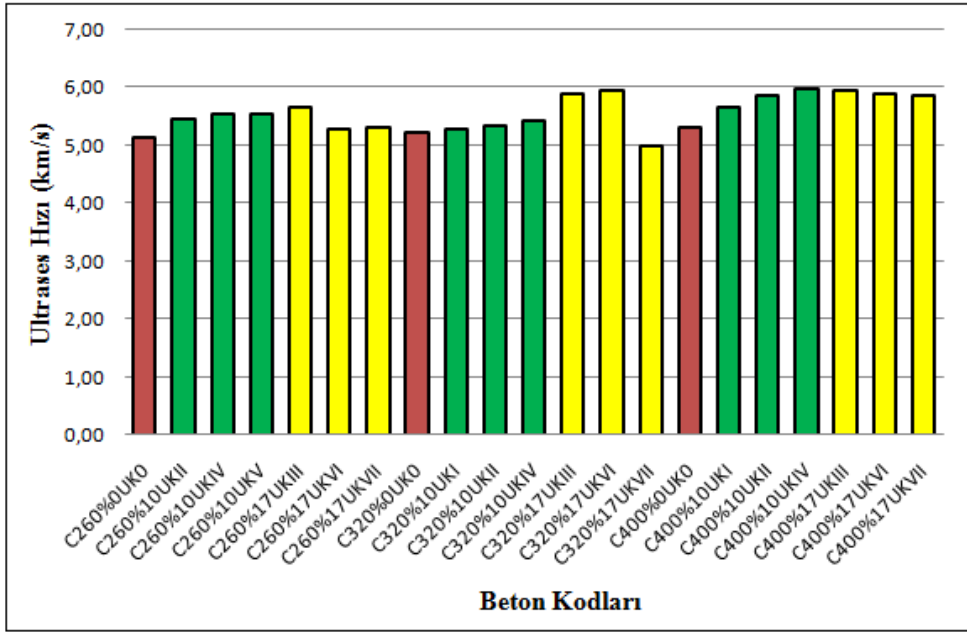
Uçucu küllü betonlarla, uçucu külsüz betonların ultrases hızları arasındaki ilişki şekil 5.29, 5.30 ve 5.31’de gösterilmektedir.



Şekil 5.29: Silindir numunelerde uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların ultrases hızlarının karşılaştırılması.



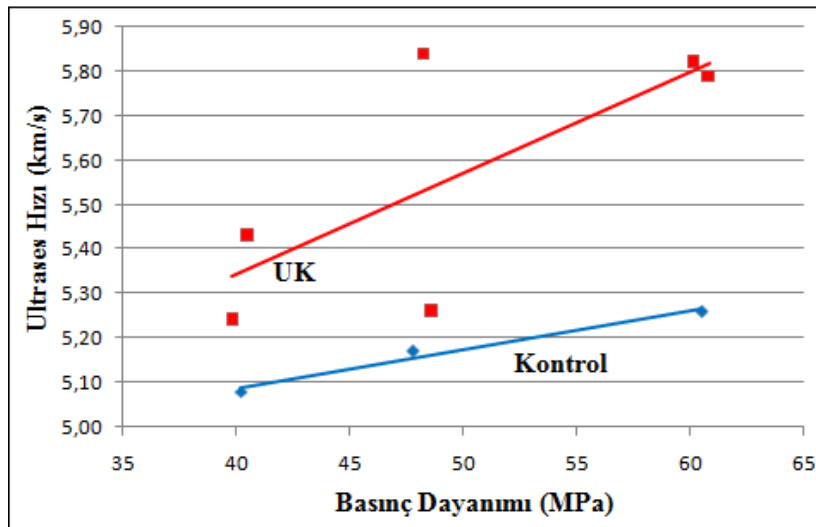
Şekil 5.30: 28 günlük küp numunelerde uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların ultrases hızlarının karşılaştırılması.



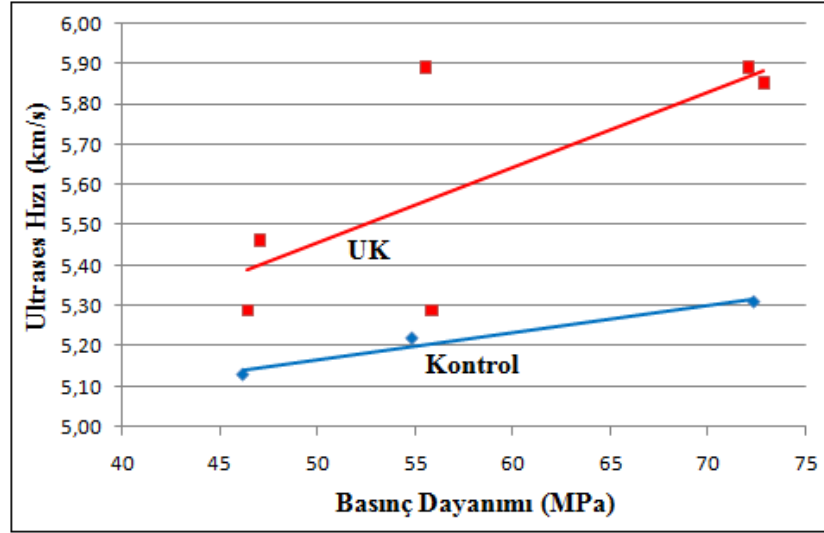
Şekil 5.31: 90 günlük küp numunelerde uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların ultrases hızlarının karşılaştırılması.

Şekil 5.29, 5.30 ve 5.31 incelendiğinde; uçucu küllü numunelerde ultrases hızları uçucu külsüz numunelere nazaran daha yüksek çıkmıştır. Buda uçucu küllerin betonun boşluk yapısına olumlu yönde etki yaptığını göstermektedir.

Şekil 5.32 ve 5.33'de 28 ve 90 günlük uçucu külsüz betonlarla, uçucu külsüz betonlar ile aynı basınç dayanımı değerlerine ulaşan uçucu küllü betonların ultrases hızları arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 5.32: 28 günlük Uçucu külsüz betonlarla, uçucu külsüz betonlar ile aynı basınç dayanımı değerlerine ulaşan uçucu küllü betonların ultrases hızlarının karşılaştırılması.



Şekil 5.33: 90 günlük Uçucu külsüz betonlarla, uçucu külsüz betonlar ile aynı basınç dayanımı değerlerine ulaşan uçucu küllü betonların ultrases hızlarının karşılaştırılması.

Şekil 5.32 ve 5.33 incelendiğinde; uçucu külsüz betonlar ile aynı basınç dayanımı değerlerine ulaşan uçucu külsüz betonların ultrases hızı değerlerinin, basınç dayanımı arttıkça kontrol betonlarına göre daha yüksek bir artış değeri gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi olarak çimento dozajı arttıkça, uçucu kül etkinliğinin de artması sonucunda uçucu külün cismin boşluk yapısına yaptığı olumlu etkinin de artmasını gösterebiliriz. Literatürde de uçucu küllerin cismin boşluk yapısına olumlu etki yaptığı söylenmektedir. Uçucu küller incelik bakımından portland çimentosuna oldukça yakın malzeme özelliklerine sahip oldukları için, uçucu küllü betonlarda toplam bağlayıcı miktarı ve dolayısı ile toplam ince malzeme miktarı artmakta, böylece betonun içerisinde bulunan boşlukların doldurulması kolaylaşmaktadır. Bunun yanı sıra uçucu küllerin tane yapısı, çimento ile birlikte betonun içerisindeki boşlukların doldurulmasında önemli bir rol oynamaktadır.

6.SONUÇLAR

Çayırhan termik santralinden elde edilen C tipi uçucu küllü üretilen betonlarla ilgili deneylerden elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1-Taze Beton Deney Sonuçları

Uçucu küllü betonun işlenebilirliğine olumlu etkiler yaptığı ve su ihtiyacını azalttığı görülmüştür. Böylece çimento oranı artmamasına karşın uçucu küllü varlığı sayesinde betonda daha iyi işlenebilirlik elde etmek mümkün olmaktadır. Uçucu küllü bu olumlu etkisi bütün çimento dozajlarında kendini göstermiştir.

2-Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

a-Basınç dayanımı deney sonuçları

Uçucu küllü betonlar ve kontrol betonları üzerinde uygulanan basınç dayanımı testleri sonucunda, C tipi uçucu küllü betonların erken yaşlarda da kontrol betonuyla aynı basınç dayanım değerlerine ulaşabildikleri görülmüştür. 260 dozajlı betonlarda kontrol betonuyla aynı basınç dayanımına ulaşılması, %10 çimento eksiltilmiş seriler için %15 uçucu küllü eklenmesiyle, %17 çimento eksiltilen seriler için %25,5 uçucu küllü eklenmesiyle gerçekleşmiştir. 320 dozajlı betonlarda ise çıkartılan çimento miktarı kadar uçucu kül eklenmesi, kontrol betonuyla aynı basınç dayanımın yakalanması için yeterli olmuştur. 400 dozajlı betonlarda ise 260 dozajlı betonlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Kontrol betonuyla aynı basınç dayanımının yakalanması, %10 çimento eksiltilmiş seriler için %15 uçucu küllü eklenmesiyle, %17 çimento eksiltilen seriler için %25,5 uçucu küllü eklenmesiyle gerçekleşmiştir. Bu durumda 260 ve 400 dozajlı betonlar için kontrol betonuyla aynı basınç dayanımına ulaşılmasının; çıkartılan çimento miktarınının 1.5 katı kadar uçucu kül eklenmesiyle sağlandığı görülmüştür. Sonuç olarak uçucu küllü betonlar mekanik özellikler bakımından kontrol betonuna benzer özellikler sergilemişlerdir. C tipi

uçucu kül kullanarak erken yaşlarda da istenilen basınç dayanımlarına ulaşılabildiği anlaşılmaktadır.

b-Ultrases hızı deney sonuçları

Uçucu küllü betonların ultrases hızı değerleri ile sadece portland çimentosunun bağlayıcı olarak kullanıldığı betonların ultrases hızı değerleri karşılaştırıldığında, uçucu küllü betonların ultrases hızlarının çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Buradan yola çıkarak; uçucu küllerin betonun boşluk yapısına olumlu etki yaptığı sonucuna ulaşabiliriz. Uçucu külün betonun boşluk yapısına olan bu olumlu etkisinin bütün çimento dozajlarında aynı oranda etkili olduğu görülmüştür.

c-Elastisite modülü deney sonuçları

Elastisite modülü deney sonuçlarına göre; uçucu külün betonun elastisite modülü üzerinde çok fazla bir etkisinin bulunmadığı görülmektedir. Uçucu küllü beton numunelerinin elastisite modülü değerleri kontrol betonunun elastisite modülü değerlerine paralellik göstermiştir. Uçucu küllerin elastisite modülü değerleri kontrol betonlarında olduğu gibi basınç dayanımı arttıkça, yükselme eğilimi göstermiştir. Bu yükselme oranı da, kontrol betonlarına paralel bir şekilde seyretmiştir. Kontrol betonlarıyla aynı basınç dayanımı değerlerini sağlayan uçucu küllü beton karışımlarının elastisite modülü değerleri yüksek dozajda hemen hemen kontrol betonuyla aynı çıkmıştır. Sonuç olarak uçucu küllerin betonun elastisite modülü üzerinde önemli bir etkisinin bulunmadığını ancak erken yaşlarda elastisite modülünü bir miktar düşürdüklerini söylemek mümkündür.

d- Etkinlik faktörü sonuçları

Bu çalışmanın ana amacı olan C tipi uçucu küllerin değişik çimento dozajlarındaki etkinlik faktörlerinin tespit edilmesinde; su/çimento oranı ve basınç dayanımı değerleri üzerinde durulmuştur. Etkinlik faktörü kontrol betonlarıyla aynı basınç dayanımı değerlerini veren uçucu küllü betonlar için hesaplanmıştır. Buna göre; uçucu küllerin etkinliği çimento dozajı arttıkça, yükselmektedir. 260 dozaj ve 320 dozajlı betonlar arasında etkinlik faktörünün farkı 320 ile 400 dozajlı olanlarla karşılaştırıldığında daha fazla olmuştur. Elde edilen k etkinlik faktörü sonuçlarından bir diğeri ise, uçucu kül etkinliğinin %17 çimento eksiltelen numunelerde , %10 eksiltelen numunelere göre daha fazla olmasıdır. Uçucu kül etkinliğinin zamana göre

değişimi ise, puzolanik özelliğinden dolayı betonun ilerleyen yaşlarında etkinliğin yükselmesi şeklinde meydana gelmektedir. 28 ve 90 günlük k etkinlik değerleri incelendiğinde, uçucu kül etkinliğinin zaman içerisinde arttığı ve bu artış oranının %10 çimento eksiltilmiş numunelerde daha yüksek olduğu görülmüştür. Su/çimento ve su/bağlayıcı oranı azaldıkça; uçucu kül etkinliği artmıştır. Basınç dayanımı ve elastisite modülü arttıkça etkinlik katsayısı da artmıştır. Sonuç olarak C tipi uçucu küllerin etkinliği; düşük dozajlarda 0,39 ile 0,43 arasında değişirken, yüksek dozajlarda etkinlik faktörü 0,58 civarına kadar yükselmiştir. Buna dayanarak yüksek dozajlı betonlarda uçucu kül kullanımının daha faydalı olduğu anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak, uçucu küllerin betonda çimento yerine kullanılmasıyla, betonun mekanik özelliklerinin olumsuz yönde etkilenmediği anlaşılmaktadır. Ancak betonda uçucu kül kullanılacaksa, bu uçucu külün betonun dürabilite dayanımına zarar vermediği de kanıtlanarak, kullanılabilirliğine karar verilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Postacıoğlu B.**, (1975), Yapı Malzemesi, İ.T.Ü. Merkez Kütüphanesi, İstanbul.
- [2] **Kocataşkın, F.**, (1991), Betonun Dünü, Bugünü, Yarını, 2. *Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, s.23-41.
- [3] **Aruntaş, H.Y.**, (2006), Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [4] **Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan, H.**, (2005), Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları , *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, İzmir.
- [5] **Topçu, İ.B., Demir, A., Boğa, A.R.**, (2004), Akışanlaştırıcı ve Süperakışkanlaştırıcı Katkı Kullanımının Taze Beton Özelliklerine Etkisi, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı:434, s.38-40.
- [6] **Erdoğdu, Ş., Kurbetçi, Ş.**, (2003), Betonun Performansına Sağladıkları Etkinlik Açısından Kimyasal ve Mineral Katkı Maddeleri, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı:426, s.115-120.
- [7] **Akman, M.S.**, (1996), Kimyasal Katkıların Betona Uygulanması, İ.T.Ü., İstanbul.
- [8] **Erdoğan, S.T., Erdoğan, T.Y.**, (2007), Puzolanik Mineral Katkıları ve Geçmişleri, 2. *Yapılarda Kimyasal Katkıları Sempozyumu ve Sergisi*, Ankara, s.263-275.
- [9] **İnan, G., Köseoğlu, O.E., Ramyar, K.**, (2004), Süperakışkanlaştırıcı Katkının Betonun Su İhtiyacına ve Basınç Dayanımına Etkisi, *Beton 2004 Kongresi*, İstanbul.
- [10] **Yetgin, Ş., Çavdar, A.**, (2005), Doğal Puzolan Katkı Oranının Çimentonun Dayanım, İşlenebilirlik, Katılma ve Hacim Genleşmesi Özelliklerine Etkisi, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt:17, Sayı:4, s.687-692.
- [11] **Biricik, H.**, (1999), Su Geçirimsizliğinin Puzolan Malzeme ile Azaltılması, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [12] **Özturan, T.**, (1991), Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- [13] **TS 639**, (1975), Uçucu Küller - Çimentoda Kullanılan, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [14] **TS EN 450**, (2008), Uçucu kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

- [15] **Atakay, O.**, (2006), Uçucu Küllerin Katkılı Çimento Katkılı Çimento Üretiminde Kullanılması – Tane İnceliği ve Katkı Miktarının Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [16] **Öner, A.**, (2005), Uçucu Kül ve Öğütülmüş Yüksek Fırın Curufu İçeren Betonların Mekanik ve Durabilite Özellikleri Açısından Optimum Bileşiminin Belirlenmesi, *Doktora Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [17] **Şengül, Ö., Taşdemir, M.A., Sönmez, R.**, (2005), Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Klor Geçirimsizliği, *İ.M.O. Bülten*, Sayı:77.
- [18] **Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğinobalı, A.**, (2003), Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Ankara.
- [19] **TS EN 197-1**, (2002), Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [20] **ASTM C 618 – 08a**, (2008), Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- [21] **Berry, E.E., Malhotra, V.M.**, (1986), Fly Ash in Concrete, Energy, Mines and Resources Canada: CANMET, Ottawa.
- [22] **Helmuth, R.**, (1987), Fly Ash in Cement and Concrete, Portland Cement Association, Skokie, IL.
- [23] **Subaşı, S., Kap, T., Beycioğlu, A.**, (2008), Uçucu Kül Katkı Miktarının Beton İşlenebilirliği ve Sertleşme Sürelerine Olan Etkisi, *Uluslararası Hazır Beton Kongresi Bildirileri*, İstanbul, s.438-448.
- [24] **Uyan, M., Öztekin, E., Gökçe, A.**, (1996), İnceliğe Bağlı Olarak Uçucu Küllü Betonların Su İhtiyacındaki Değişim, *İ.M.O. İstanbul Şubesi 4. Uluslararası Beton Kongresi ‘Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar’*, İstanbul, s.209-221.
- [25] **Taşdemir, M.A.**, (2002), Betonun Dayanım ve Dürabiliteye Göre Tasarımı ve Üretimi, *İ.M.O. İstanbul Şubesi, Sürekli Eğitim Seminerleri*, İstanbul.
- [26] **Thomas, M.D.A., Shehata, M.H., Shashiprakash, S.G.**, (1999), The Use of Fly Ash in Concrete: Classification by Composition, *Journal of Cement, Concrete and Aggregates (CCA)*, Volume 21, Issue 2, s.105-110.
- [27] **Yazıcı, H.**, (2006), Yüksek Fırın Curufu Katkılı Harçların Sülfat Dayanırlılığının İncelenmesi, *D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt:8, Sayı:1, s.51-58.
- [28] **Arslan, M., Çullu, M.**, (2006), Ankara Yöresindeki Bazı Agregat Ocaklarının Alkali Silika Reaktivitesi Açısından İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt:21, Sayı:4, s.614-620.

- [29] **Ünal, O., Uygunoğlu, T.**, (2004), Uçucu Küllü Betonların Donma-Çözülme Etkisinde Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, *İ.M.O. 17. Teknik Kongre*, İstanbul.
- [30] **Gönen, T., Yazıcıoğlu, S.**, (2005), Betonda Hızlandırılmış Karbonatlaşma Deneyi ve Aparatı, *Politeknik Dergisi*, Cilt:8, Sayı:2, s.233-237.
- [31] **Çil, İ.**, (2006), Betonarme Donatısında Elektriksel Yöntemlerle Korozyon Ölçümü, *D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt:8, Sayı:1, s.59-63.
- [32] **Taşdemir, M.A.**, (2002), Uçucu Kül Nedir ?, *ACE 2002 Sempozyumu*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [33] **Anuk, O.**, (2004), CEM I 42.5 Çimentolu Düşük Dozajlı Betonlarda F Tipi Uçucu Külün Etkinliği, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [34] **Babu, K.G., Rao, G.S.N.**, (1995), Efficiency of Fly Ash in Concrete, *Cement and Concrete Research, Volume 26, Issue 3, March 1996*, s.465-474.
- [35] **Öner, A., Akyüz, S., Yıldız, R.**, (2004), An Experimental Study on Strength Development of Concrete Containing Fly Ash and Optimum Usage of Fly Ash in Concrete, *Cement and Concrete Research Volume 35, Issue 6, June 2005*, s.1165-1171.
- [36] **Long, G.C., Xie, Y.C., Jiang, Z.W.**, (2005), Efficiency of fly ash in cementitious materials, *Advances in Cement Research, Volume 17, Issue 3, July 2005*, s.113-119.
- [37] **Akman, M.S., Öztekin, E., Erdinç, M.**, (1996), Düşük Çimento Dozajlı ve Uçucu Kül Katkılı Hazır Betonlarda Dayanım ve Dayanıklılık, İ.T.Ü., İstanbul.
- [38] **Papadakis, V.G., Antiohos, S., Tsimas, S.**, (2001), Supplementary Cementing Materials in Concrete Part I: Efficiency and Design, *Cement and Concrete Research. Volume 32, Issue 10, October 2002*, s.1525-1532.
- [39] **Papadakis, V.G., Antiohos, S., Tsimas, S.**, (2001), Supplementary Cementing Materials in Concrete Part II: A Fundamental Estimation of the Efficiency Factor, *Cement and Concrete Research. Volume 32, Issue 10, October 2002*, s.1533-1538.
- [40] **Yıldırım, H., Öner, A., Akyüz, S.**, (2004), Strength Development of Concrete Containing Fly Ash and Its Optimum Use in Concrete, *Eighth Canmet/ACI, International Conference On Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Las Vegas, A.B.D.
- [41] **TS EN 206-1**, (2002), Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

- [42] **Uyan, M., Öztekin, E., Gökçe, A., Çiçekli, O.C.**, (1996), Uçucu Küllü Betonların Mekanik Özellikleri Üzerine Bir Deneysel Çalışma, *İ.M.O. İstanbul Şubesi 4. Ulusual Beton Kongresi 'Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar'*, İstanbul, s.223-232.
- [43] **TS 500**, (2000), Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [44] **Yıldırım, H., Şengül, Ö.**, (2008), Modulus of Elasticity of Substandard And Normal Concretes, *İ.T.Ü.*, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Emrah Gürbüz

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 28.11.1982

Adres: Arıköy Sitesi, Maçka Cad., No: 69, Uskumruköy/Sarıyer, İstanbul

Lisans Üniversite: Yıldız Teknik Üniversitesi