

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**F VE C TİPİ UÇUCU KÜLLERİN ÇİMENTO İLE
İKAME EDİLMESİYLE ÜRETİLEN BETONLARIN
MEKANİK VE DAYANIKLILIK ÖZELİKLERİNİN
KARŞILAŞTIRILARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Veysel AKYÜNCÜ

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMESİ
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mansur SÜMER
Ortak Danışman : Yrd. Doç. Dr. Hasan YILDIRIM

Şubat 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**F VE C TİPİ UÇUCU KÜLLERİN ÇİMENTO İLE
İKAME EDİLMESİYLE ÜRETİLEN BETONLARIN
MEKANİK VE DAYANIKLILIK ÖZELİKLERİNİN
KARŞILAŞTIRILARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Y. Müh. Veysel AKYÜNCÜ

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMESİ

Bu tez 27/02/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
İker Bekir TOPÇU
Jüri Başkanı



Prof. Dr.
Keremettin YILMAZ
Üye



Doç. Dr.
Mehmet SARIBIYIK
Üye



Yrd. Doç. Dr.
Mansur SÜMER
Üye



Yrd. Doç. Dr.
Nihat KABAY
Üye

ÖNSÖZ

Doktora öğreniminin son aşaması olan bu çalışmanın hazırlanmasında her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen, değerli düşünceleri ile beni doğruya yönlendiren danışmanlarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mansur SÜMER ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Hasan YILDIRIM'a gönülden teşekkürlerimi arz ederim.

İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirdiğim deneysel çalışmaların başlangıcından sonuçlandırılmasına kadar desteğini hissettiğim, birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarının değerli personeline teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca çalışmalarında bana yol gösteren, bilgi ve birikimini esirgmeden katkılarda bulunan Sayın Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ ve Sayın Doç. Dr. Mehmet SARIBIYIK'a şükranlarımı sunarım.

Doktora çalışmamın başından sonuna kadar beni gönülden destekleyen değerli eşime ve öğrenimim boyunca büyük fedakarlıklarda bulunan aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xviii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
UÇUCU KÜLLERİN BETONDA KULLANIMI	4
2.1. Puzolanların Tanımı ve Sınıflandırılması	4
2.1.1. Doğal puzolanlar	5
2.1.2. Yapay puzolanlar	5
2.2. Puzolanik aktivitenin değerlendirilmesi.....	7
2.3. Puzolanik Reaksiyon.....	8
2.4. Uçucu Küller	11
2.4.1. Uçucu küllerin özellikleri	13
2.4.1.1. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri.....	14
2.4.1.2. Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik özellikleri	16

2.4.2. Uçucu küllerin çimentoda kullanımı.....	19
2.4.3. Uçucu küllerin taze beton özelliklerine etkisi	22
2.4.3.1. Uçucu küllerin taze betonun hidrasyon ısı ve sıcaklık yükselmesi üzerindeki etkisi	22
2.4.3.2. Uçucu küllerin taze betonda hava sürüklenmesi üzerindeki etkisi.....	23
2.4.3.3. Uçucu küllerin işlenebilme, su ihtiyacı ve terleme üzerindeki etkisi.....	24
2.4.3.4. Uçucu küllerin priz süresine etkisi.....	25
2.4.4. Uçucu küllerin sertleşmiş beton özelliklerine etkileri.....	26
2.4.4.1. Uçucu küllerin dayanım kazanımı, basınç ve eğilme dayanımları üzerindeki etkisi	26
2.4.4.2. Uçucu küllerin elastisite modülü üzerindeki etkisi.....	28
2.4.4.3. Uçucu küllerin sünme ve rötre üzerindeki etkisi	29
2.4.5. Uçucu küllerin dayanıklılık özelliklerine etkisi.....	30
2.4.5.1. Uçucu küllerin geçirimsizlik üzerindeki etkisi	30
2.4.5.2. Uçucu küllerin zararlı kimyasallara dayanıklılık üzerindeki etkisi.....	31
2.4.5.3. Uçucu küllerin alkali-agrega reaksiyonu üzerindeki etkisi .	33
2.4.5.4. Uçucu küllerin donma-çözülme dayanıklılığı üzerindeki etkisi.....	34
2.4.5.5. Uçucu küllerin deniz ortamına dayanıklılığının etkisi	34
2.4.5.6. Uçucu küllerin donatı korozyonuna etkisi.....	35
2.4.5.7. Uçucu küllerin karbonatlaşma üzerindeki etkisi.....	36
2.4.5.8. Uçucu küllerin sülfata maruz betonlardaki etkisi	36
2.5. Uçucu Küllü Betonlarda Karışım Oranlama Yöntemleri.....	37
2.5.1. Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması (basit ikame yöntemi)	39
2.5.2. Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması (İlave yöntemi).....	39
2.5.3. Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine kullanılması (Kısmi ikame yöntemi)	39
2.5.3.1. Modifiye edilmiş ikame yöntemi	40
2.5.3.2. Rasyonel oranlama yöntemi.....	40

2.6. Uçucu Küllerde k Etkinlik Faktörü ve Bu Konuda Yapılmış Çalışmalar.. 43

BÖLÜM 3.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	49
3.1. Çalışmanın Amacı	49
3.2. Üretilen Betonların Özellikleri	49
3.3. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	51
3.3.1. Çimento	51
3.3.2. Agregalar	53
3.3.3. Uçucu küllerin özellikleri	54
3.3.4. Orta akışkanlaştırıcı katkı maddesi özellikleri	57
3.3.5. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi özellikleri	57
3.4. Beton Karışımları.....	58
3.5. Beton Üretimi	58
3.6. Taze Beton Deneyleri	62
3.6.1. Birim ağırlık deneyi	62
3.6.2. Çökme deneyi	62
3.6.3. Hava ölçme deneyi.....	63
3.7. Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	63
3.7.1. Basınç dayanımı deneyi.....	63
3.7.2. Eğilme dayanımı deneyi.....	63
3.7.3. Elastisite modülü deneyi	64
3.7.4. Ultrases geçiş hızı deneyi	64
3.8. Dayanıklılık Deneyleri.....	65
3.8.1. Kılcal su emme deneyi	65
3.8.2. Hızlı klorür geçirimsizliği deneyi	65
3.8.3. Donma-çözülme deneyi.....	66
3.8.4. Sülfat etkisi deneyi.....	67

BÖLÜM 4.

DENEY SONUÇLARI	68
4.1. Taze Beton Deney Sonuçları.....	68

4.2. Sertleşmiş Beton DeneY Sonuçları	70
4.2.1. Basınç dayanımı.....	70
4.2.2. Ultrases geçiş hızı	71
4.2.3. Elastisite modülü hesabı.....	74
4.2.4. Etkinlik faktörünün (k) belirlenmesi.....	75
4.2.4.1. Bolomey formülü kullanılarak k etkinlik katsayısının hesaplanması	77
4.2.5. Kılcal su emme deneyi	79
4.2.6. Hızlı klorür geçirimliliği deneyi	80
4.2.7. Donma-çözülme deneyi.....	81
4.2.8. Sülfat etkisi	83
4.2.8.1. Ağırlık değişimi	83
4.2.8.2. Boy değişimi.....	86
4.2.8.3. Eğilme deneyi	90

BÖLÜM 5.

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	91
5.1. Taze Beton DeneY Sonuçlarının Değerlendirilmesi	91
5.2. Sertleşmiş Beton DeneY Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	93
5.2.1. Mekanik özelliklere ait deneyler.....	93
5.2.1.1. Basınç dayanımı sonuçlarının değerlendirilmesi.....	93
5.2.1.2. Ultrases geçiş hızı sonuçlarının değerlendirilmesi	96
5.2.1.3. Elastisite modülü sonuçları ve TS 500 arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi	101
5.2.1.4. k Etkinlik faktörü sonuçlarının değerlendirilmesi	105
5.2.2. Dayanıklılığa ait deneY sonuçlarının değerlendirilmesi.....	109
5.2.2.1. Kılcal su emme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi ..	109
5.2.2.2. Hızlı klorür geçirimliliği deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi	111
5.2.2.3. Donma-çözülme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi...	112
5.2.2.4. Sülfat etkisi deneY sonuçlarının değerlendirilmesi	115
5.2.2.5. Ağırlık değişimi sonuçlarının değerlendirilmesi	115

5.2.2.6. Boy değişimi sonuçlarının değerlendirilmesi	118
5.2.2.7. Eğilme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi	121

BÖLÜM 6.

SONUÇ ve ÖNERİLER.....	124
KAYNAKLAR.....	130
ÖZGEÇMİŞ.....	137

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü
Al ₂ O ₃	: Aluminyum oksit
ASTM	: Amerikan malzeme test kuruluşu
B	: Beton karışımında bulunan toplam bağlayıcı miktarı
BV/MR	: Su azaltıcı orta akışkanlaştırıcı kimyasal sıvı beton katkısı
C	: Çimento miktarı
CaCO ₃	: Kalsiyum karbonat
CaO	: Kalsiyum oksit
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum hidroksit
CaSO ₄	: Kalsiyum sülfat
CEM	: Avrupada çimento türlerine verilen genel ad
C-S-H	: Kalsiyum silika hidrate
C ₃ A	: Tri kalsiyum alüminat
C ₃ S	: Tri kalsiyum silikat
ÇK	: Çözünmeyen kalıntı
Dmaks	: En büyük tane çapı
DIN	: Alman Standardı
E	: Elastisite modülü
Fe ₂ O ₃	: Demir oksit
k	: Etkinlik faktörü
K _B	: Bolomey katsayısı
KK	: Kızdırma kaybı
MgO	: Magnezyum oksit
Mg(OH) ₂	: Brüsit
MgSO ₄	: Magnezyum sülfat
MnO	: Mangan oksit
NaCl	: Sodyum klorür

NaOH	: Sodyum hidroksit
NaSO ₄	: Sodyum sülfat
Na ₂ O	: Sodyum oksit
PZÇ	: Puzolanik çimento
S	: Kükürt
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SiO ₂	: Silisyum oksit
TÇ	: Traslı çimento
TS	: Türk standardı
UK	: Uçucu kül
V	: Ultrases geçiş hızı
W	: Beton karışımındaki su miktarı
σ	: Basınç Dayanımı
Δ	: Birim ağırlık

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Puzolanların sınıflandırılması.....	6
Şekil 2.2.	Portland çimentolu beton karışımı ile portland çimentosu ve puzolanlı beton karışımının hidrasyonda serbest bıraktığı kirecin zamanla değişimi.....	10
Şekil 2.3.	Çimentonun uçucu kül içeriğine bağlı olarak hidrasyon ısısındaki azalış.....	21
Şekil 2.4.	ACI 318-08'e göre çevresel etki sınıfları.....	32
Şekil 2.5.	Beton yapı elemanlarının maruz kaldıkları çevresel etkiler.....	33
Şekil 2.6.	Uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi – etkinlik faktörü diyagramı.....	47
Şekil 3.1.	TS 706 referans ve karışım karışım agregasının granülometri eğrileri.....	54
Şekil 3.2.	Eğilme deneyi.....	64
Şekil 3.3.	Klor geçirimliliği düzeneği.....	66
Şekil 4.1.	260 dozajlı C tipi uçucu kül ikameli betonların sülfat etkisi altında ağırlık değişimi–zaman grafiği.....	83
Şekil 4.2.	320 dozajlı C tipi uçucu kül ikameli betonların sülfat etkisi altında ağırlık değişimi – zaman grafiği.....	84
Şekil 4.3.	400 dozajlı C tipi uçucu kül ikameli betonların sülfat etkisi altında ağırlık değişimi – zaman grafiği.....	84
Şekil 4.4.	260 dozajlı F tipi uçucu kül ikameli betonların sülfat etkisi altında ağırlık değişimi – zaman grafiği.....	85
Şekil 4.5.	320 dozajlı F tipi uçucu kül ikameli betonların sülfat etkisi altında ağırlık değişimi – zaman grafiği.....	85
Şekil 4.6.	400 dozajlı F tipi uçucu kül ikameli betonların sülfat etkisi altında ağırlık değişimi – zaman grafiği.....	86

Şekil 4.7.	260 dozajlı C tipi uçucu kül ikameli betonların sülfat etkisi altında boy değişimi – zaman grafiği.....	87
Şekil 4.8.	320 dozajlı C tipi uçucu kül ikameli betonların sülfat etkisi altında boy değişimi – zaman grafiği.....	87
Şekil 4.9.	400 dozajlı C tipi uçucu kül ikameli betonların sülfat etkisi altında boy değişimi – zaman grafiği.....	88
Şekil 4.10.	260 dozajlı F tipi uçucu kül ikameli betonların sülfat etkisi altında boy değişimi – zaman grafiği.....	88
Şekil 4.11.	320 dozajlı F tipi uçucu kül ikameli betonların sülfat etkisi altında boy değişimi – zaman grafiği.....	89
Şekil 4.12.	400 dozajlı F tipi uçucu kül ikameli betonların sülfat etkisi altında boy değişimi – zaman grafiği.....	89
Şekil 5.1.	28 günlük küp numunelerde C tipi uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	94
Şekil 5.2.	28 günlük küp numunelerde F tipi uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	94
Şekil 5.3.	90 günlük küp numunelerde C tipi uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	95
Şekil 5.4.	90 günlük küp numunelerde F tipi uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	95
Şekil 5.5.	28 günlük F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol küp betonların ultrases geçiş hızı değerleri.....	96
Şekil 5.6.	90 günlük F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol küp betonların ultrases geçiş hızı değerleri.....	97
Şekil 5.7.	28 günlük F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol silindir betonların ultrases geçiş hızı değerleri.....	97
Şekil 5.8.	28 günlük C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol küp betonların ultrases geçiş hızı değerleri.....	98
Şekil 5.9.	90 günlük C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol küp betonların ultrases geçiş hızı değerleri.....	98
Şekil 5.10.	28 günlük C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol silindir betonların ultrases geçiş hızı değerleri.....	99

Şekil 5.11.	28 günlük silindir numunelerde F tipi uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların elastisite modülü karşılaştırılması.....	102
Şekil 5.12.	28 günlük silindir numunelerde C tipi uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların elastisite modülü karşılaştırılması.....	103
Şekil 5.13.	TS 500 ile F tipi uçucu kül ikameli betonların elastisite modülü deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	104
Şekil 5.14.	TS 500 ile C tipi uçucu kül ikameli betonların elastisite modülü deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	104
Şekil 5.15.	C ve F tipi uçucu kül ikameli betonların elastisite modülü deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	105
Şekil 5.16.	% 10 çimento çıkarılmış F tipi uçucu kül ikameli 28 ve 90 günlük numunelerde etkinlik faktörünün çimento dozajına göre değişimi.....	106
Şekil 5.17.	% 17 çimento çıkarılmış F tipi uçucu kül ikameli 28 ve 90 günlük numunelerde etkinlik faktörünün çimento dozajına göre değişimi.....	107
Şekil 5.18.	% 10 çimento çıkarılmış C tipi uçucu kül ikameli 28 ve 90 günlük numunelerde etkinlik faktörünün çimento dozajına göre değişimi.....	107
Şekil 5.19.	% 17 çimento çıkarılmış C tipi uçucu kül ikameli 28 ve 90 günlük numunelerde etkinlik faktörünün çimento dozajına göre değişimi.....	108
Şekil 5.20.	% 10 ve % 17 çimento çıkarılmış C ve F tipi uçucu kül ikameli 28 günlük numunelerde etkinlik faktörünün çimento dozajına göre değişimi.....	108
Şekil 5.21.	% 10 ve % 17 çimento çıkarılmış C ve F tipi uçucu kül ikameli 90 günlük numunelerde etkinlik faktörünün çimento dozajına göre değişimi.....	109
Şekil 5.22.	Kılcallık katsayısının değişimi grafiği.....	110
Şekil 5.23.	Hızlı klor geçirimsizliği sonuçları.....	111
Şekil 5.24.	Donma-çözülme karşılaştırma numunelerinin eğilme dayanımları	114
Şekil 5.25.	Donma-çözülme çevrim numunelerinin eğilme dayanımları.....	114

Şekil 5.26. Sülfat etkisi altında 260 dozajlı F ve C tipi ağırlık değişimi – zaman grafiği.....	117
Şekil 5.27. Sülfat etkisi altında 320 dozajlı F ve C tipi ağırlık değişimi – zaman grafiği.....	117
Şekil 5.28. Sülfat etkisi altında 400 dozajlı F ve C tipi ağırlık değişimi – zaman grafiği.....	118
Şekil 5.29. Sülfat etkisi altında 260 dozajlı F ve C tipi boy değişimi – zaman grafiği.....	120
Şekil 5.30. Sülfat etkisi altında 320 dozajlı F ve C tipi boy değişimi – zaman grafiği.....	120
Şekil 5.31. Sülfat etkisi altında 400 dozajlı F ve C tipi boy değişimi – zaman grafiği.....	121
Şekil 5.32. Sülfat etkisi altında kalmış ve standart havuzda bekleyen numunelerin eğilme dayanımı değerleri.....	122
Şekil 5.33. Standart havuzda bekleyen numunelerin eğilme dayanımı değerleri.....	122
Şekil 5.34. MgSO ₄ etkisi altında kalmış betonların eğilme dayanımı değerleri	123

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Bazı doğal puzolanlardaki oksitlerin % miktarları.....	5
Tablo 2.2.	Bazı yapay puzolanlardaki oksitlerin % miktarları.....	5
Tablo 2.3.	Kömürlerin yanması ile oluşan anorganik dönüşümler.....	12
Tablo 2.4.	Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları.....	16
Tablo 2.5.	Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri standart değerleri.....	17
Tablo 2.6.	Türkiye’deki bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri.....	19
Tablo 2.7.	Uçucu küllerin mineralojik bileşimleri.....	19
Tablo 2.8.	Uçucu küllü çimento üretimi ile ilgili sınır değerler.....	20
Tablo 3.1.	F tipi uçucu kül ikameli betonların kodlanması.....	50
Tablo 3.2.	C tipi uçucu kül ikameli betonların kodlanması.....	51
Tablo 3.3.	CEM I 42.5 çimentonun fiziksel özellikleri.....	52
Tablo 3.4.	CEM I 42.5 çimentonun kimyasal özellikleri.....	52
Tablo 3.5.	CEM I 42.5 çimentonun mekanik özellikleri.....	53
Tablo 3.6.	Agregaların birim ağırlık ve özgül ağırlık değerleri.....	53
Tablo 3.7.	Agregaların elek analizi sonuçları.....	54
Tablo 3.8.	Çatalağzı uçucu külünün kimyasal bileşimi.....	55
Tablo 3.9.	Çatalağzı uçucu külünün fiziksel özellikleri.....	55
Tablo 3.10.	Çatalağzı uçucu külünün puzolanik aktivitesi.....	55
Tablo 3.11.	Çayırhan uçucu külünün kimyasal bileşimi.....	56
Tablo 3.12.	Çayırhan uçucu külünün fiziksel özellikleri.....	56
Tablo 3.13.	Çayırhan uçucu külünün puzolanik aktivitesi.....	56
Tablo 3.14.	Orta akışkanlaştırıcı katkı maddesinin özellikleri.....	57
Tablo 3.15.	Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin özellikleri.....	58
Tablo 3.16.	F tipi uçucu kül ile üretilen betonların gerçek bileşimleri (1 m ³ betona giren malzemeler).....	60

Tablo 3.17.	C tipi uçucu kül ile üretilen betonların gerçek bileşimleri (1 m ³ betona giren malzemeler).....	61
Tablo 4.1.	F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların taze beton deney sonuçları.....	68
Tablo 4.2.	C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların taze beton deney sonuçları.....	69
Tablo 4.3.	F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların basınç dayanım değerleri.....	70
Tablo 4.4.	C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların basınç dayanım değerleri.....	71
Tablo 4.5.	F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların ultrases geçiş hızı değerleri.....	72
Tablo 4.6.	C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların ultrases hızı değerleri.....	73
Tablo 4.7.	C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların elastisite modülü değerleri.....	74
Tablo 4.8.	C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların elastisite modülü değerleri.....	75
Tablo 4.9.	C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol küp betonların en yakın basınç dayanım veren altı çizilmiş değerleri.....	76
Tablo 4.10.	F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol küp betonların en yakın basınç dayanım veren altı çizilmiş değerleri.....	77
Tablo 4.11.	28 ve 90 günlük uçucu külsüz betonlar için bulunan Bolomey etkinlik katsayıları.....	79
Tablo 4.12.	F ve C tipi uçucu kül ikameli betonlar için bulunan 28 ve 90 günlük k etkinlik faktörü değerleri.....	79
Tablo 4.13.	F ve C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların kılcallık katsayısı	79
Tablo 4.14.	Klor geçirimliliği değerlerine göre sınıflandırma.....	80
Tablo 4.15.	Klor geçirimliliği deney sonuçları.....	80

Tablo 4.16.	F ve C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların donma- çözülme çevrim numuneleri ve standart kürde saklanan karşılaştırma numunelerinin çevrimden önceki değerleri.....	81
Tablo 4.17.	F ve C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların donma- çözülme çevrimine maruz kalan ve standart kürde saklanan karşılaştırma numunelerinin eğilme dayanımı değerleri.....	82
Tablo 4.18.	Eğilme dayanımı değerleri.....	90
Tablo 5.1.	F tipi uçucu kül ikameli betonların kontrol betonuna göre su ihtiyacı değişimi (%)......	91
Tablo 5.2.	C tipi uçucu kül ikameli betonların kontrol betonuna göre su ihtiyacı değişimi (%)......	92
Tablo 5.3.	28 günlük C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol numunelerin küp/silindir oranlarının ultrases geçiş hızı değerleri.....	100
Tablo 5.4.	28 günlük F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol numunelerin küp/silindir oranlarının ultrases geçiş hızı değerleri.....	101
Tablo 5.5.	F ve C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların donma- çözülme çevrimine maruz kalan ve standart kürde saklanan karşılaştırma numunelerinin eğilme dayanımlarındaki azalma (%) değerleri.....	113

ÖZET

Anahtar kelimeler: Uçucu Kül, Mekanik Özellikler, Etkinlik, Dayanım, Dayanıklılık.

Termik santrallerde elektrik üretiminde kömürün yakılmasıyla açığa çıkan uçucu küllerin olumsuz etkilerini azaltmanın önemli bir yolu da beton üretiminde mineral katkı maddesi olarak kullanılmasıdır. Uçucu küller tek başlarına kullanıldıklarında bağlayıcılık özelliği göstermezler. Beton karışımına çimento ile birlikte eklendiklerinde betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerine olumlu etki ederler. Bu çalışmayla F ve C tipi uçucu küllerin çimentoya ikame edilmesiyle üretilen betonların mekanik özellikleri, etkinlikleri ve dayanıklılığa etkileri karşılaştırılarak incelenmiştir. Toplamda 39 farklı karışım hazırlanmıştır. Üretimlerde Çatalağzı Termik Santrali uçucu külü (F tipi), Çayırhan Termik Santrali uçucu külü (C tipi) ile CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. 260, 320, 400 kg/m³'lük kontrol betonları üretilmiş her kontrol betonu için altı seri (F ve C tipi) uçucu kül ikameli beton üretilmiştir. Bu altı serinin üçünden % 10, diğer üçünden %17 oranında çıkarılan çimentonun yerine 260 kg/m³ karışım için çıkarılan miktarın (1.5), (2), (2.5) katı 320 ve 400 kg/m³'lük karışımlar için ise (1), (1.5), (2) katı oranında olmak üzere hem F tipi hem de C tipi uçucu kül ikameli betonlar üretilmiştir. Eşit işlenebilme yöntemine göre (15.5±1.5 cm. çökme) üretilen uçucu kül ikameli betonların mekanik özellikleri incelenmiş ve k etkinlik faktörleri Bolomey formülleri kullanılarak bulunmuştur. Her seride altı adet 15/15/15 cm boyutlarında küp, altı adet 10/20 boyutlarında 10 cm taban çapında 20 cm. yüksekliğinde silindir numune, altı adet 7/7/28 cm boyutlarında üç pimli, üç pimsiz prizma numune olmak üzere üretim yapılmıştır. Üretilen betonlar 23±2 °C sıcaklığındaki su dolu kür havuzu içerisinde saklanmıştır. Her seri için ön beton dökülerek karışım su miktarları bulunmuştur.

Taze beton deneyleri olarak; çökme, birim ağırlık ve hava içeriği deneyleri, sertleşmiş beton deneyleri olarak; basınç, eğilme, ultrases geçiş hızı, elastisite modülü deneyleri, dayanıklılık deneyleri olarak; kılcal su emme, donma-çözülme, sülfat etkisi, hızlandırılmış klor geçirimsizliği deneyleri yapılmıştır.

Etkinlik faktörü, kontrol betonlarıyla aynı basınç dayanımı değerlerini veren uçucu küllü betonlar için hesaplanmıştır. Buna göre; F ve C tipi uçucu küllü üretilen betonlarda uçucu küllerin etkinliği, çimento dozajı arttıkça yükselmektedir. Hem 28 günde hem de 90 günde uçucu küllü betonların ultrases hızları kontrol betonlara göre yüksek çıkmıştır. Magnezyum sülfat etkisine maruz betonlardan, kontrol betonlarında bozulmalar meydana gelmiş uçucu kül ikameli betonlarda ise kontrol betonlarına göre daha az bozulma meydana gelmiştir. Bu da uçucu küllerin betondaki boşlukları iyi doldurduğunu ayrıca dayanıklılık özellikleri açısından da incelendiğinde olumlu katkılar yaptığını göstermiştir.

A COMPARATIVE INVESTIGATION ON THE MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF CONCRETE INCORPORATING CLASS C AND F TYPE FLY ASH

SUMMARY

Key Words: Fly Ash, Mechanical Properties, Efficiency, Strength, Durability.

Fly ash is the waste product of the thermal power plants, where coal is burned for generating electricity. Using fly ash in concrete production is one of the important ways of reducing its negative effects. When fly ash is used alone, it doesn't show binder property. However, if it is added to concrete mixture with cement, it improves the mechanical and durability properties of concrete.

In this study, F and C type fly ashes efficiencies and their effects on the mechanical properties and durability of concrete are compared. For this study, 39 different mixtures were produced. Çatalağzı Thermal Plant fly ash (F type), Çayırhan Thermal Plant fly ash (C Type) and CEM I 42,5 R type cement were used as binder. Three reference concrete mixtures were produced with 260, 320, 400 kg/m³ cement dosage and six fly ash (F and C type) including mixtures were produced for each reference mixture. Cement dosages were reduced with 10% ratio in half of mixtures and 17% ratio in other half of mixtures. Fly ash was added instead of reduced cement. Added fly ash / reduced cement ratios by mass were (1.5), (2), (2.5) for 260 kg/m³ cement dosage and (1), (1.5), (2) for 320 and 400 kg/m³ cement dosages. Mechanical properties of concretes, which were produced according to same workability method, were examined and their efficiency factor were determined with Bolomey formulas. Six cube specimens with 15/15/15 cm dimensions, six cylinder specimens with 10 cm diameter and 20 cm height and six prismatic specimens (pins were placed to two sides of there of these specimens) with 7/7/28 cm dimensions are produced for each mixtures. After demolding, concrete specimens were cured in water tank at 23±2 °C. Water contents of all mixtures are determined by casting trial mixtures. On fresh concrete, slump, bulk density and air content tests and on hardened concrete compression strength, bending strength, ultrasound pulse velocity, modulus of elasticity, capillary water absorption, freeze-thaw, sulphate effect, rapid chloride permeability tests were done.

Tests results showed that using F and C type fly ash contributed workability . On the other hand, pozzolanic reaction need to wait the formation of free lime and the reactions of F and C type fly ash including mixtures are slower than reference mixtures. So, increasing of strength in these mixtures are more at further ages.

Efficiency factor are calculated for fly ash including mixtures, which has same compressive strength with reference mixture. The results show that efficiency of fly ashes increases with increasing of cement dosage. Ultrasound pulse velocities of fly ash including concretes were greater than reference concretes at 28 and 90 days. This shows that, fly ash fills the pores well in the concrete. When exposed to magnesium sulphate, control specimens showed higher deteriorations when compared with concretes with fly ash. This also confirmed that fly ash improved the durability properties.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artması ve ekonomik gelişmeler nedeniyle enerji tüketimi geçmiş yıllara oranla hızla artış göstermiştir. Enerji gereksiniminin bir kısmını karşılamak amacıyla harekete geçilmiş, termik santraller kurulması bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Kömürle çalışan termik santrallerde atık ürün olarak uçucu küller açığa çıkmaktadır. Uçucu küller, çevreyi olumsuz etkiledikleri için mekanik ve elektrostatik yöntemlerle toplanarak depolanırlar. Çevreye olumsuz etkisinin önlenmesi için bu atık maddelerin kullanımlarının yaygınlaştırılması gerekmektedir. Böylece hem sınırlı olan doğal kaynakların kullanımı azalmakta hem de doğada oluşabilecek zararlar en aza indirilmektedir.

Uçucu küller özellikle inşaat sektörü alanında kullanılırlar. Beton üretiminde çoğunlukla çimentonun yanında ikincil bağlayıcı madde olarak katılırlar. Özellikle portland çimentosunun ağırlık yüzdesi oranında bir kısmı yerine veya çimentoya önceden karıştırılarak katkılı çimento olarak kullanılırlar. Taze betonun işlenebilme, su gereksinimi, terleme, ayrışma, hava sürüklenme, hidrasyon ısı ve plastik rötre gibi özelliklerine olumlu katkıda bulunurlar. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan serbest kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel meydana getirir, çimento hamurundaki boşlukları doldurarak kompaziteyi artırır ve betona dayanım kazandırır. Sertleşmiş betonda ise dayanıklılığa ve mekanik özelliklere etkileri vardır. Basınç dayanımları, dayanım kazanma hızları, elastisite modülü, sünme ve rötre mineral katkı maddelerinin kullanımından etkilenirler. Bunların yanında geçirimsizlik, asit ve sülfata dayanıklılık, alkali-agrega reaksiyonu, donma-çözülme tekrarlarına dayanıklılık ve donatı korozyonu da mineral katkı maddelerinin kullanımından etkilenirler. Uçucu küllerin bu özelliklere etkisi genellikle uçucu külün cinsine, kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine, kullanım miktarına, kullanım yöntemine, fiziksel, kimyasal ve puzolanik özelliklerine bağlıdır [1, 2].

Betonda dayanıklılık, bir yapının çevresel etkilere karşı servis ömrü boyunca sahip olduğu dayanımdır. Bundan dolayı bir yapı için sağlam ve güvenilir kelimesi kullanılırken projelendirmenin yanında imalat yapılırken doğru malzeme seçimi, malzemenin iyi kullanımıyla ve yapının etki altında kalabileceği çevresel faktörler önceden belirlenerek alınacak önlemlerle ileride en az bakım gerektirecek şekilde kaliteli imal edilmesi istenmektedir. Doğru bir şekilde yapılmış olan üretim yapının dayanıklılığına olumlu anlamda katkı sağlar, istenildiği gibi servis ömrü uzun, sağlam ve güvenilir bir yapı oluşturulmuş olur.

Beton günümüzde kullanılan en yaygın yapı malzemesidir ve özellikle yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonlar önem kazanmış durumdadır. Bununla beraber bu betonların dayanıklılığı da yapının servis ömrü bakımından günümüzde aranan bir özellik durumuna gelmiştir. Bu tez çalışmasının içeriğinde de betonun dayanıklılığını etkileyen özelliklerden betonun geçirimsizliği ve mekanik özellikleri, iki farklı uçucu külün ayrı ayrı çimentoya ikame edilmesinin karşılaştırılması olarak etkileri incelenmiştir. Uçucu külün çimentonun yerine kullanılması durumunda, ne kadar miktarda çimentonun yerine kullanılacağı hedeflenen beton özelliklerinin elde edilip edilemeyeceğinin tespit edilmesi elbette uçucu kül kullanımındaki en önemli konudur.

Yapılan tez çalışmasında Çatalağzı Termik Santrali'nden temin edilmiş F tipi ve Çayırhan Termik Santrali'nden temin edilmiş C tipi uçucu kül ile Akçansa çimentodan temin edilmiş CEM I 42.5 R çimentosu kullanılmıştır. Farklı karışım oranlarında toplam 39 karışım hazırlanmıştır. Söz konusu karışımlardan 3 tanesi 260, 320 ve 400 kg/m³ çimento dozajlarında kontrol betonlarıdır. Her gruptan % 10 ve % 17 oranında ağırlıkça çimento çıkarılmış, yerine çıkarılan çimentonun ağırlıkça 1, 1.5 ve 2 katında uçucu kül eklenerek değişik karışımlar hazırlanmıştır. Bütün karışımlarda işlenebilirlik sabit tutulmuştur. Beton katkısı olarak 260 ve 320 dozajlı karışımlarda orta, 400 dozajlı karışımlarda ise süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler, 28 ve 90 gün boyunca standart kür havuzunda bekletilmiştir. Daha sonra bu numunelerde basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı ve elastisite modülü belirlenmiştir. Uçucu külün tipi ve kullanım miktarı, çimentonun cinsi ve kullanım miktarı, hedeflenen basınç dayanımı, kür koşulları, agrega, betonun işlenebilirliği, su

miktarı ve eklenen kimyasal katkıların etkinlik faktörünün belirlenmesinde en önemli parametrelerdir. Elde edilen bu verilerle, uçucu küllerin betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve Bolomey formülü kullanılarak etkinlik katsayıları belirlenmiştir. F ve C tipi uçucu kül ikameli betonlarla kontrol betonların aynı basınç dayanımını veren serileri seçilerek dayanıklılık deneylerine geçilmiştir; kılcal su emme, donma-çözülme, hızlandırılmış klor geçirimsizliği, sülfat etkisi altında ağırlık ve boy değişimi deneyleri yapılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen verilerle F ve C tipi uçucu kül ikameli betonların mekanik özellikleri ve dayanıklılıkları karşılaştırılmış, iki farklı uçucu kül kullanımının betona etkisi karşılaştırılarak incelenmiştir.

BÖLÜM 2. UÇUCU KÜLLERİN BETONDA KULLANIMI

2.1. Puzolanların Tanımı ve Sınıflandırılması

Yalnız kullanıldıklarında bağlayıcılıkları olmayan ancak kireç veya çimento ile karıştırıldıktan sonra su ile yaptığı reaksiyon sonucunda bağlayıcı madde özelliği kazanan maddelere puzolan denir. Puzolanların içinde kolloidal halde silis ve alümin yer almaktadır. Puzolanların hidrasyon sonucu ortaya çıkan kireçle reaksiyona girmesiyle, bağlayıcılık özeliği göstermektedir [3].

Gelişen beton teknolojisiyle puzolanlar, betonun bazı fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerine katkı sağlamak ve ekonomik yarar vermek amacıyla kullanılan mineral katkı maddesi olarak yerini almıştır. Puzolanik özelliklere sahip birçok yapay ve doğal malzeme geçmiş zamanlardan zamanımıza kadar beton üretiminde çeşitli amaçlarla kullanılmıştır. Söz konusu mineral katkı maddeleri portland çimentosuna benzer özelliklerine rağmen yalnız başlarına bağlayıcılık özellikleri olmadığı için ikincil bağlayıcı maddeler olarak tanımlanmaktadır. Dolgu malzemesi özelliğinde olan bu maddeler, puzolanik aktiviteleriyle hidrasyon ürünlerinin oluşumunda etkinlik gösterir ve bağlayıcı hamurun yapısını değiştirirler. Böylece betonun çeşitli özelliklerinde iyileşme görülür. Puzolanik aktivitesi yüksek olan mineral katkı maddeleri boşlukları azaltır ve daha yoğun bir bağlayıcı hamurun oluşmasını sağlar. Böylece agrega ile bağlayıcı hamur yüzeyi arasındaki aderans artar. Mineral katkı maddelerinin, betonda akışkanlaştırıcı katkı maddeleriyle birlikte kullanılması yüksek basınç dayanımlarına ulaşmayı kolaylaştırır [1].

ASTM C 618’de puzolanlar kendi başına bağlayıcı özelliği olmayan fakat öğütüldüklerinde nemli ortamlarda kireç ile birleşerek bağlayıcı özellik gösteren silisli ya da silisli-alüminli yapay ya da doğal inorganik maddeler olarak tanımlanmıştır [4].

Puzolan kullanımı, çimento ve beton endüstrisinde ekonomik, teknik ve çevreyle ilgili yararlar sağlamaktadır. Bu nedenle, puzolanların inşaat sektöründe kullanımı her geçen gün artmaktadır [5].Puzolanlar kökenine göre yapay ve doğal olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

2.1.1. Doğal puzolanlar

Doğada bulunan volkanik tüfler, volkanik küller, volkanik camlar, ısı işlem görmüş killer ve şeyller, diatomlu topraklar doğal puzolanlara örnek olarak verilebilir [6]. Bazı doğal puzolanların kimyasal bileşimi Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Bazı doğal puzolanlardaki oksitlerin % miktarları [6]

Doğal Puzolan	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Alkali (%)
Volkanik Cam	65.1	14.5	5.5	3.0	1.1	6.5
Volkanik Tüf	52.1	18.3	5.8	4.9	1.2	6.6
Diatomlu Toprak	86.0	2.3	1.8	-	0.6	0.4
Pişirilmiş Kil	42.2	16.1	7.0	21.8	1.9	1.3

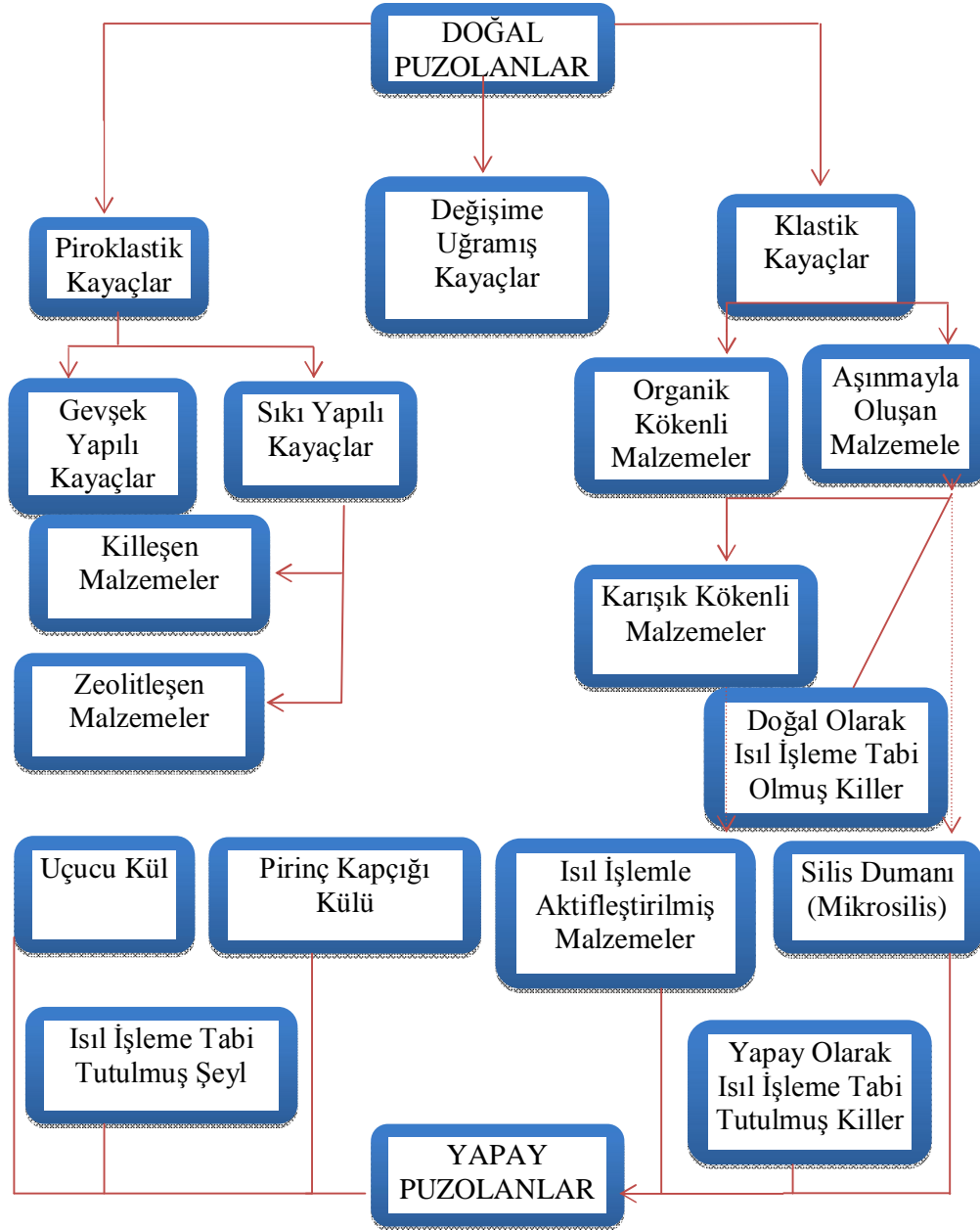
2.1.2. Yapay puzolanlar

Yapay puzolanlar endüstriyel yan ürünlerdir. Uçucu küller, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu yapay puzolanlara örnek olarak verilebilir. Bazı yapay puzolanların kimyasal bileşimi Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Bazı yapay puzolanlardaki oksitlerin % miktarları [6]

Yapay Puzolan	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Alkali (%)
Uçucu Kül	51.5	23.9	6.1	10.5	2.4	3.1
Yüksek Fırın Cürufu	40.2	11.0	0.8	34.5	9.4	3.6
Silis Dumanı	93.7	0.3	0.6	0.3	0.3	0.6

Massazza'nın yapmış olduğu ve puzolanların kökenini temel alan sınıflandırma Şekil 2.1'de verilmiştir [7].



Şekil 2.1. Puzolanların sınıflandırılması [8]

2.2. Puzolanik Aktivitenin Değerlendirilmesi

Bir puzolanın kullanımını ve değerlendirmesini yapmak için, onun puzolanik aktivitesini belirlemek esastır. Söz konusu problem, önerilen birçok yöntem karşın çözülmüş sayılmaz; çünkü bütün puzolan tiplerine uygulanabilir olmasının yanı sıra, maddenin kullanım karakteristikleriyle hız ve hassasiyet açısından kabul edilebilir olan bir test yöntemi yoktur [9]. Puzolanik aktivitenin belirlenmesi açısından kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerden yararlanabilir [10].

Daha çok kullanılan kimyasal yöntemler, hidratlı kireç veya portland çimentosuyla karıştırılan puzolanın sabitleştirdiği kireç miktarını belirlemeye dayanır. Test sonuçları; maddenin yapı ve inceliğine, kireç/puzolan oranına ve sıcaklığa bağlıdır. Bir diğer yöntemde, puzolan-kalsiyum hidroksit süspansiyonu bir saat kaynatılarak ve bu işlem başında ve sonunda görülen serbest kireç miktarları karşılaştırılarak, maddenin puzolanik aktivitesi hızlı bir biçimde değerlendirilir. Uçucu küllerin puzolanik kalitesi, puzolan-kalsiyum karbonat karışımından ve aynı karışımın 1000 °C'de bir saat kalsine edilmiş halinden arta kalan çözünmeyen HCl miktarlarını karşılaştırılarak değerlendirilebilir. Fiziksel yöntemlerde de puzolanların aktiviteleri, değerlendirilebilir. Bunlardan kalorimetrik ve kimyasal bir yöntem, puzolanların nitrik-hidroflorik asit karışımı içinde çözünmesi sırasında ve bir saatlik aşınma sonunda kalan çözünmeyen kalıntının çözünmesi ile açığa çıkan ısıyla puzolanı değerlendirir. Puzolan aktivitesini değerlendirme yöntemlerinin üçüncü grubu, puzolan-kireç ve puzolan-çimento harçlarının mekanik dayanımını ölçmeyle sağlanabilir. Kireç daha sabit bir karakteristiğe sahip olduğundan, puzolan-kireç harcı daha iyi değerlendirme ve testin standartlaşmasını sağlar. Öte yandan, puzolan-çimento harcı, klinker-puzolan bileşiminin doğrudan değerlendirilmesine neden olur [10].

Doğal puzolanlar genellikle katkıli portland çimentosu üretiminde kullanılmaktadırlar. Yapay puzolanlardan yüksek fırın cürufu ve uçucu küller beton üretiminde iki türlü kullanılabilirler. Birinci yöntemde puzolan, belirli oranda uçucu kül veya yüksek fırın cürufu içeren katkıli portland çimentosu kullanımıyla betona katılır. İkinci yöntemde ise uçucu kül veya ince öğütülmüş cüruf, betona karıştırma sırasında veya çimentoya ilave ya da ikame olarak katılır [2].

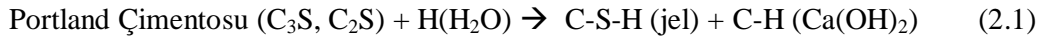
2.3. Puzolanik Reaksiyon

Çimento ve beton karışımı içerisinde çok ince taneli olarak yer alan puzolanlar bağlayıcılık özelliklerini çimentonun hidrasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girip yeni C-S-H jelleri oluşturarak kazanırlar.

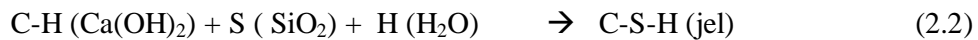
Puzolan içeren betonlarda puzolanik reaksiyon, puzolandaki silika (S) ile portland çimentosu (C₂S+C₃S) hidrasyonu sonucu açığa çıkan serbest kireç (C-H) arasında aşağıda (2.1) ve (2.2)'de gösterildiği gibi meydana gelmektedir.

(Çimento kimyasında CaO=C, SiO₂=S, Ca(OH)₂=CH, Al₂O₃=A, Fe₂O₃=F, H₂O=H harfleri ile gösterilir.)

1) Portland çimentosu hidrasyonu



2) Puzolanik reaksiyon

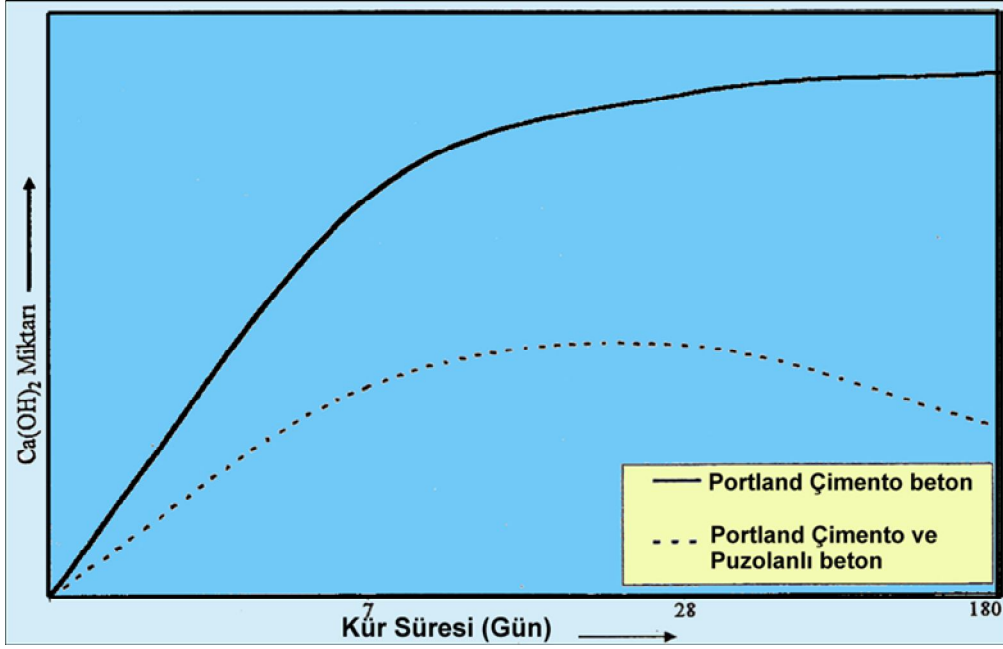


(2.1) denkleminde sonra olan (2.2) denklemindeki puzolanik reaksiyon sonucu portland çimentosunun silikatlı bileşenleri ile aynı hidrate ürünler açığa çıkmaktadır. Fakat bu reaksiyon hem serbest kireç oluşumuna ihtiyaç duyması hem de yavaş bir reaksiyon olması nedeniyle puzolanik etkiyle dayanıklılık kazanma da yavaş olmaktadır. Alkali ve sülfatlı bazı kimyasal katkı maddelerinin varlığı ve kür

sıcaklığının artması, reaksiyonu hızlandırmaktadır. (2.2) denkleminde, serbest kireç ile puzolandaki alümin ve demir oksitin reaksiyonları sonucunda hidrasyon ürünleri de oluşmaktadır. Bununla birlikte portland çimentosu hidrasyonu ile puzolanik reaksiyon arasında hem açığa çıkan ürünler açısından hem de reaksiyonların hızları açısından farklılıklar ortaya çıkmaktadır [2].

Portland çimentosu ve puzolan karışımı hidrasyona girince bağlayıcı hamurundaki serbest kireç miktarı da gittikçe azalmaktadır. Bağlayıcı ürünlerin bu reaksiyon sonucunda artması dayanım artışına neden olurken, karışımdaki serbest kirecin azalması ise dayanıklılığı iyileştirmektedir. Puzolanik reaksiyonun, portland çimentosu hidrasyonundan daha sonra ve daha yavaş gelişmesi de puzolanlı betonların dayanımlarını daha geç yaşlarda kazanmalarına neden olmaktadır. Bu tür betonlarda erken yaşlardaki dayanımlar genellikle daha düşük olmasına rağmen ileriki yaşlarda puzolanik aktiviteyle beraber sadece portland çimento ile üretilmiş betonu yakalamakta veya geçmektedir [2].

Zamana bağlı olarak, puzolan ve portland çimentosu karışımı ile yalnız portland çimentosunun kullanıldığı beton karışımlarında serbest kireç miktarının değişimi Şekil 2.2’de gösterilmiştir [11].



Şekil 2.2. Portland çimentolu beton karışımı ile portland çimentosu ve puzolanlı beton karışımının hidrasyonda serbest bıraktığı kirecin zamanla değişimi [11]

Birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalar, kimyasal özelliklerden çok çimento hamurunun boşluk boyutlarını da içeren puzolanik reaksiyonun fiziksel özelliklerinin, mekanik özelliklerinin ve dayanıklılığının artması için önemli olduğunu çalışmalarıyla göstermişlerdir [2].

Portland çimentosu ve puzolan hidrasyona girince puzolanik reaksiyon sonucu bağlayıcı hamurdaki serbest kireç miktarı giderek azalmaktadır. Çünkü zamanla daha çok bağlayıcı ürün oluşmaktadır. Yeni ürünlerin oluşması da dayanım artışına neden olurken aynı zamanda serbest kirecin azalması ve hamur boşluk yapısının iyileştirilmesi dayanımda önemli yararlar sağlamaktadır. Puzolanik reaksiyonun, portland çimentosu hidrasyonundan daha yavaş gelişmesi, puzolanlı betonların dayanım kazanma hızlarını da etkilemektedir. Bu tip betonlarda erken yaşlardaki dayanımlar kontrol betonuna göre düşük olmakta fakat ileriki yaşlarda puzolanik aktivitenin yüksekliğine göre kontrol betonunu yakalamakta veya geçmektedirler [2].

2.4. Uçucu Küller

Kömürle çalışan termik santrallerden yan ürün olarak uçucu küller ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte günümüzde gerek miktarları gerekse kullanım olanakları bakımından önemli yer tutan atık ürünlerin başında gelmektedirler. Kömürün içinde bulunan bazı inorganik maddeler yanma sırasında oluşan yüksek sıcaklıklarla ayrışmakta ve bacadan atılırken soğuyarak küresel tanecikler oluşturmaktadır. Uçucu kül adı verilen bu tanecikler elektrofiltrelerle ve siklonlarla yakalanmaktadır. Bununla birlikte doğrudan atmosfere karışmaları engellenmektedir. Böylece çevre ve hava kirliliği de mümkün olduğunca önlenmiş olmaktadır [12, 13].

Uçucu küller TS EN 450'ye göre, pulverize kömürün yakılmasından elde edilen, puzolanik özelliklere sahip, önemli bir kısmı SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan, reaktif SiO_2 içeriği kütlece en az % 25 olan, küresel ve camsı taneciklerin ince tozudur. Ayrıca TS EN 450'ye göre uçucu küller, pulverize edilmiş antrasit, linyit veya bitümlü kömürün yakıldığı fırınların baca gazlarındaki toz benzeri taneciklerin elektrostatik veya mekanik çöktürülmesi ile elde edilir [14].

Yanma sırasında termik santrallerde yer alan kazanların alev sıcaklığı $1600\text{ }^\circ\text{C}$ 'yi aşabilmektedir. Söz konusu sıcaklık kömürün içinde bulunan pek çok anorganik bileşenin erimesi için yeterlidir. Kaynaklarda kömür içinde yaklaşık 50 mineralin olduğu belirtilmesine rağmen bunların birçoğu, uçucu külde az miktarda bulunurlar (Tablo 2.3). Kömür içinde bulunan ana mineraller beş grupta toplanabilir. Bunlar; alüminyum silikatlar, karbonatlar, sülfidler, kloritler ve silika mineralleridir [15].

Tablo 2.3. Kömürlerin yanması ile oluşan anorganik dönüşümler [15]

Kömür İçindeki Mineraller	Uçucu Küldeki Dönüşüm Ürünleri
Fillosilikatlar	Amorf Madde, Mullit ($Al_6Si_2O_{13}$), Kuvars
Kuvars	Amorf Madde, Kuvars (SiO_2)
Pirit (FeS_2), Siderit ($FeCO_3$)	Hematit (Fe_2O_3), Manyetit (Fe_3O_4)
Demiroksitler	
Kalsit ($CaCO_3$)	Kireç (CaO)
Dolomit Ca Mg (CO_3) ₂	Kireç, Periklaz (MgO)
Jips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)	Anhidrit ($CaSO_4$)
Ankerit Ca (Mg Fe Mn) (CO_3) ₂	Kalsiyum Ferrit ($CaFe_2O_4$), Periklaz

Kazan alevindeki yüksek sıcaklık koşulları altındaki tanecikler üzerinde bir dizi karmaşık fizikokimyasal değişiklikler oluşur. Tanecikler yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisi ile çok çabuk olarak küresel formlara dönüşebilmektedir (erimede yüzey serbestleşme enerjisini mümkün olduğu kadar azaltmak için). Oldukça küçük tanecikler atık gazlar (CO_2 , CO , H_2O , SO_2) ile birlikte bacadan çıkış esnasında çok kısa sürede düşük sıcaklık rejiminin etkisi altına girerek amorf katı durumda soğurlar. Soğutma şiddeti büyük ölçüde tanecik boyutu ile ilgilidir. Büyük tanecikler yavaş soğuma sonucu kristaller oluştururken, küçük tanecikler ise hızlı soğuma sonucu camı formda gelişirler [15].

Terim olarak uçucu kül 1930'lu yıllarda elektrik enerjisi endüstrisinin gelişmesi ile yayılmaya başlamıştır. 1937 yılında R. E. Davis, California Üniversitesi'nde uçucu külün betonda kullanımı ile ilgili yapılan ilk deneysel sonuçları elde etmiştir. Söz konusu çalışma ilk standartların, deney yöntemlerinin ve uçucu külün kullanımının temelini oluşturmuştur. İnşaat sektöründe uçucu küllerin ilk olarak kullanımı ise 1948 yılında Hungry Horse Barajının inşaatı ile başlamıştır [16].

Ülkemizde ise bu çalışmaların başlangıcı 1960'lı yıllara dayanmaktadır. Çimento endüstrisinin uçucu küllerle tanışması ise 1970'lerde olmuştur. Bazı çimento fabrikalarında deneme amaçlı uçucu küllü beton üretimi yapılmıştır [17].

Dünyada ortaya çıkan uçucu kül miktarı yıllık 600 milyon ton, Türkiye’de ise bu rakam yaklaşık olarak yılda ortalama 13 milyon tondur [18].

Günümüzde uçucu küller beton sektörü başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe ise katkılı çimento ve beton üretiminde, portland çimentosu üretiminde hammadde olarak, beton ve asfalt yol yapımında, bazı geoteknik uygulamalarda, hafif agrega üretiminde, tuğla, kiremit ve seramik üretiminde, dolgu malzemesi olarak kullanımı örnekler olarak gösterilebilir [9, 13].

2.4.1. Uçucu küllerin özellikleri

Kömürün özellikleri ve yakılma yöntemine göre uçucu küllerin özellikleri farklılıklar gösterebilir. Genellikle silisli ve alüminli bir bileşimleri olduğundan puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılabilirler. Tane biçimi olarak ince ve küresel taneleri nedeniyle betonda işlenebilmeyi artırır ayrıca hidrasyon ısını düşürürler. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturarak çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betonun dayanıklılığını artırır. Linyit kömürünün yakılmasıyla elde edilen uçucu külde ise kireç oranı genellikle yüksektir. Bu tür uçucu küllerin aynı zamanda bağlayıcılık özellikleri de vardır. Antrasit kömüründen veya iyi yakılmayan kömürden elde edilen uçucu küllerde ise karbon miktarı yüksek olur. Karbon miktarının yüksek olması da çimento ve betonda su ihtiyacını artırır, puzolanik özelliği ve kaliteyi olumsuz etkiler. Çoğunlukla çimentodan daha ince taneli oldukları için uçucu küller ilave öğütme gerektirmeden kullanılabilir [18].

Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip olduğu ve çok ince taneli olarak elde edildiği için uçucu kül de aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi puzolanik özellik göstermektedir. O nedenle, hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde, hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanımı mümkündür. Genellikle, beton katkı maddesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılabilir. Beton karışımının içerisinde yer alan uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının %15-% 50'si civarında değişebilmektedir. Bazı araştırmacılara göre önümüzdeki yıllarda çevreye bırakılan uçucu kül

miktarının artması beklenmekte olduğundan bu malzemelerin beton üretiminde değerlendirilmesi önem arz etmektedir [19].

2.4.1.1. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri

Çimentodan daha koyu gri renkte olan uçucu kül, çok ufak taneli, el ile temas edildiğinde yumuşak bir malzemedir. Taramalı elektron mikroskopuyla incelendiğinde farklı şekil, büyüklük, incelik ve biçimlerde, genellikle küresel taneciklerden meydana gelen bir yapı gösterir [20].

Koyuluğu veya rengin açıklığı elde edildiği kömüre ve yanma özelliğine bağlıdır. Linyit kömüründen elde edilen uçucu küller daha esmerdir. Ayrıca iyi yanmış bir uçucu kül, iyi yanmamış uçucu külden daha açık renktedir. İkinci durumda uçucu küle siyah rengi veren içindeki yanmamış karbondur [21].

Tanecik şekli ve büyüklük dağılımı olarak uçucu küller, kömürün orjini ve üniform olması, kömürün pulverizasyon durumu ve yanma koşulları (sıcaklık ve oksijen seviyesi), yanmanın üniformluğu ve toz toplama sistemi tipi gibi proseslere bağlı faktörler etkili olmaktadır. Uçucu küllerin tanecik şekli ve büyüklük dağılımında uçucu külleri etkileyen faktörle, kömürün orjini ve üniform olması, kömürün pulverizasyon durumu ve yanma koşulları (sıcaklık ve oksijen seviyesi), yanmanın üniformluğu ve toz toplama sistemi tipi gibi proseslere bağlı faktörler etkili olmaktadır. Uçucu külde, farklı büyüklüklerde hem camsı küresel hem de düzensiz şekilli tanecikler bulunmaktadır. Bu taneciklerin şekil ve büyüklük açısından farklılıkları, uçucu külün düşük veya yüksek kireçli olmasından kaynaklanmaktadır. Düşük kireçli küllerde, çoğunlukla camsı faza karşılık gelen içi boşluksuz tam küresel tanecikler bulunmaktadır ve bu küller şekil dağılımı açısından genellikle homojen ve mikro yapıya sahiptirler. Yüksek kireçli küllerde ise, mikro yapı içinde hem küresel hem de köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunmasıyla heterojen şekil dağılımı mevcuttur. Bunun yanında küresel taneciklerin yüzeyleri de düşük kireçli küller kadar düzgün değildir [18].

Uçucu küllerin inceliklerinin tayini yöntemleri konusunda araştırmacılar arasında anlaşmazlıklar mevcuttur. İnceliğin özgül yüzey cinsinden ölçülmesi portland çimentosu için anlamlı bir yöntem olmakla birlikte uçucu küller için aynı güvenilirlikte kullanılamayacağı iddia edilmektedir. Hava geçirgenlik testlerinde, uçucu küle ait küresel taneciklerin çimentonun düzensiz şekildeki taneciklerine göre daha iyi paklendiği ve bu nedenle uçucu külün hava akışına karşı olan direncinin daha yüksek olduğu bilinmektedir. Diğer yandan, kül içerisindeki gözenekli karbon tanecikleri yanıtıcı yüksek hava akışı gösterecek şekilde havanın geçmesine izin verir. Bu nedenlerden dolayı uçucu külün özgül yüzey alanı kolaylıkla belirlenemez [4, 20].

Uçucu küllerin şekli, inceliği, boyut dağılımları, özgül ağırlığı ve bileşimi; beton karışım oranlarını, taze beton özelliklerini, sertleşmiş betonun dayanımını ve dayanıklılığını etkilemektedir. Bu etki artan yüzey alanı ile küresel taneciklerin kayganlaştırıcı nitelik taşıması ve dolgu maddesi özelliklerine sahip olması, şekilsiz ve pürüzlü yüzeye sahip olanların ise su ihtiyacını arttırması şeklinde olmaktadır. Uçucu külün taneciklerinin çok ince olması ve genelde küresel olmaları puzolanik aktiviteye de olumlu yönde etki etmektedir. Özellikle pürüzsüz yüzeyle ince küresel tanecikler büyük yüzey alanına sahip olduklarından kireç-silikat reaksiyonlarına daha hızlı girmektedirler. Buna bağlı olarak yüksek kireçli külün aktivitesinde kristalize aktif fazlar (anhidrit, kireç) ve az camsı faz rol oynamaktayken, düşük kireçlide ise taneciklerin şekli, büyüklük dağılımı ve camsı fazın çokluğu belirleyicidir [18].

Öte yandan pratik oluşu nedeniyle sıkça kullanılan bir başka yöntem 45 µm eleğin üstünde kalan miktarın belirlenmesidir. Bunların dışında lazerli tane dağılım analizi, hidrometre analizi, azot adsorpsiyonu, X-ışınları sedimantasyonu gibi yöntemler de uçucu küllerin inceliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır [20, 22].

Tanımlayıcı olmamakla beraber uçucu küllerin rengi ise üretilmiş oldukları santraldeki kömür cinsinin değişimini, kızdırma kaybını ve yanma koşullarındaki değişikliği gözlememize yardımcı olarak, uçucu kül özelliğinde değişim olup olmadığını anlamamızı sağlar [1].

Uçucu küllerin özgül ağırlığı 1.97 ile 3.02 arasında değişmektedir. Beton teknolojisinde kullanılan uçucu küllerin özgül ağırlıkları ise 2.2 ile 2.8 arasındadır. Özgül ağırlığı etkileyen faktörler, uçucu küldeki demirli bileşen ve karbon miktarıdır. Demirli bileşen miktarı fazla olan uçucu küllerin özgül ağırlıkları daha yüksektir. Karbon miktarı fazla olan uçucu küllerin ise özgül ağırlıkları daha düşüktür [1, 11].

2.4.1.2. Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik özellikleri

Kimyasal bileşim olarak uçucu küller, kullanılan kömürün yapısı, jeolojik orjini ve kömür hazırlama, yanma, toz kaplama ve desülfürizasyon gibi proses koşullarına bağlıdır. Ana elementler olarak uçucu küllerin kimyasal yapılarında Al, Si, Ca, Fe ve S bulunur. Uçucu küllerin kimyasal yapısında bulunan başlıca bileşenler Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO ve SO_3 olup MgO, Na_2O , K_2O , TiO_2 ve benzeri oksitler bulunabilir. Bunların miktarları uçucu külün silisli veya kireçli yapıda olmasına göre farklılıklar göstermektedir. Buna göre SiO_2 % 25-60, Al_2O_3 % 10-30, Fe_2O_3 % 1-15 ve CaO % 1-40 oranlarında bulunmaktadır. Diğer oksitlerden MgO en fazla % 5, alkali oksitler (Na_2O+K_2O) % 5'in altında bulunmaktadır. SO_3 ise genellikle % 2-2.5 arasında bir değerinde bulunmakla birlikte, kömürün yapısı ve proses koşullarına göre % 10'a kadar yükselebilmektedir. Ancak TS EN 450-2 standardı SO_3 değerini en fazla % 3 olarak sınırlandırmaktadır. Kızdırma kaybı esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozulması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya CO_2 kaybını da içine almaktadır. TS EN 450-2 standardında kızdırma kaybı % 5 olarak sınırlandırılmıştır. Uçucu küllerin tipik kimyasal kompozisyonları Tablo 2.4'de verilmiştir [18, 23].

Tablo 2.4. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları

Bileşen	F Sınıfı Kül (%) (CaO < % 10)	C Sınıfı Kül (%) (CaO > % 10)
SiO_2	43.6-64.4	23.1-50.5
Al_2O_3	19.6-30.1	13.3-21.3
Fe_2O_3	3.8-23.9	3.7-22.5
CaO	0.7-6.7	11.5-29
MgO	0.9-1.7	1.5-7.5
Na_2O	0-2.8	0.4-1.9
KK	0.4-7.2	0.3-1.9

Uçucu küllerde reaktif silis ve reaktif kireç, çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan ve dayanımın gelişmesinde önemli rol oynayan C-S-H jeli oluşturan silisyum ve kalsiyum oksitleri temsil etmektedir. Özellikle reaktif silis, külün aktif bileşeni olup puzolanik reaksiyonlara girmek üzere alkali ortamda çözülen silistir. Bu bileşik, amorf veya camsı faz halde bulunurken; mullit ve kuvars gibi diğer silisli bileşenler inert olup kristalize halde bulunurlar. Reaktif silis miktarının, uçucu külün tipinden bağımsız olarak en az % 25 olması gerekmektedir. Reaktif kireç ise düşük kireçli küllerde % 10'un altında, yüksek kireçli küllerde ise % 10-15 arasında değişmektedir [18, 24].

Uçucu küllerin sınıflandırılmalarında, kimyasal bileşen yüzdesi dikkate alındığında ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır. Bu standartlardaki kimyasal sınırlar Tablo 2.5'de verilmiştir [14, 25].

Tablo 2.5. Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri standart değerleri

Bileşenler (%)	TS EN 450	TS 639	ASTM C 618	
			F	C
$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$		> 70	> 70	> 50
SO_3	< 3	< 5	< 5	< 5
Nemlilik		< 3	< 3	< 3
KK	< 5	< 10	< 6	< 6
MgO		< 5		
Alkaliler		< 1.5	< 1.5	< 1.5
Cl^-	< 0.10			
Serbest CaO	< 1			
Reaktif SiO_2	> 25			

ASTM C 618 standardına göre, uçucu küller C ve F sınıflarına ayrılırlar. F sınıfı uçucu küller, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi % 70'den fazla olan uçucu küllerdir. CaO yüzdesi % 10'un altında olduğu için düşük kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küllerin bağlayıcılık özellikleri yoktur, puzolanik özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu küller, linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi % 50'den fazla olan küllerdir. CaO yüzdesi % 10'dan büyük olduğu için yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küllerin puzolanik özelliklerinin yanında bağlayıcılık özellikleri de söz konusu olmaktadır [25].

TS EN 197-1'e göre sınıflandırmada ise, uçucu küller silisli (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'ten oluşan, geri kalanı Fe_2O_3 ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının % 10'dan az, reaktif silis miktarının % 25'ten fazla olması gerekmektedir. W sınıfı uçucu küller ise, hidrolik veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup, esas olarak reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'ten oluşan, geri kalanı Fe_2O_3 ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde reaktif CaO oranının % 10'dan fazla, reaktif silis miktarının da % 25'ten fazla olması gerekmektedir. Ayrıca her iki türde de kızdırma kaybının % 5'ten küçük olması gerekmektedir [24].

Uçucu küllerin mineralojik bileşimleri, kömürde bulunan minerallere (kil, kuvars, pirit, alçıtaşı, karbonatlar) ve proses koşullarına bağlıdır. Uçucu külün mineralojik yapısı, külün tipine göre değişen dağılımdadır. Camsı (kristalsiz) ve kristal yapılu bileşenlerden oluşmaktadır. Mineralojik bileşim (cam fazın durumu, kristal yapıları) puzolanik özellikleri de etkilemektedir. Özellikle camsı fazın durumunun uçucu külün reaktivitesinde etkinliği büyüktür. Düşük kireçli uçucu küldeki camsı fazın yapısı, SiO_2 açısından zengin ve yüksek oranda polimerize silisli veya alüminyum da içeren alüminosilikat bileşimindedir. Silisli veya alüminosilikat camsı fazı, düşük kireçli reaktif bileşen olup su ve kalsiyum hidroksitle reaksiyona girdiğinden küle puzolanik özellik kazandırmaktadır. Yüksek kireçli külde ise, aktif bileşen içinde silisyum da içeren kalsiyum alüminat camsı fazının yanı sıra aktif kristalize faz da vardır. Burada saf silika camı Ca ve Al iyonları ile modifiye olmuştur. Yüksek kireçli külün camsı ve kristalize fazları, külün puzolanik özelliğinin yanında kısmen bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlamaktadır [18].

Tablo 2.6' da Türkiye'deki bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri ve ASTM C 618 standardıyla karşılaştırılmaları verilmiştir [18]. Tablo 2.7'de uçucu küllerin mineralojik bileşimleri verilmiştir [22].

Tablo 2.6. Türkiye’deki bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri [18]

Bileşim (%)	Orhaneli	Çatalağzı	Çayırhan	Yatağan	Tunçbilek	ASTM C 618	
						F	C
SiO ₂	48.53	58.75	50.98	51.50	57.43		
Al ₂ O ₃	24.61	25.24	13.11	23.08	16.07		
Fe ₂ O ₃	7.59	5.76	9.74	6.07	13.41		
S+A+F	80.73	89.75	73.83	80.65	86.92	> % 70	> % 50
CaO	9.48	1.46	11.82	10.53	2.22		
MgO	2.28	2.22	3.91	2.42	5.62		
SO ₃	2.48	0.08	3.94	1.32	0.92	< %5	< %5
K ₂ O	2.51	4.05	1.91	2.54	1.58		
Na ₂ O	0.35	0.60	2.71	0.77	0.37		
KK	1.69	1.12	0.86	1.06	1.92	< %6	< %6
Cl ⁻	0.005	0.015	0.014	0.003	0.002		

Tablo 2.7. Uçucu küllerin mineralojik bileşimleri [22]

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

2.4.2. Uçucu küllerin çimentoda kullanımı

Uçucu küller üzerinde yapılan araştırmalar ve bunların çeşitli alanlarda kullanımına yönelik çalışmalar yaklaşık 75 yıl öncesine dayanır [26]. Ancak bunların çimento sanayinde kullanımını enerji maliyeti, çevresel koruma ve kalite optimizasyonu kriterlerinin öne çıktığı 70’li yıllardan sonra önem kazanmıştır.

Uçucu küller çimentoya katılarak uçucu küllü çimento üretiminde kullanılabileceği gibi betona ince agrega olarak da katılabilir. Çimento üretiminde etkin bir şekilde

kullanılabilmesi için uçucu küllerin çok ince olması, Al_2O_3 ve SiO_2 açısından zengin olması, alkali içeriğinin düşük olması ve yanmamış karbon içeriğinin % 3'den az olması gerekir [20, 27]. Uçucu küllerin çimentoda kullanımına ilişkin değişik standartlar mevcuttur. Farklı standartlardaki sınırlamalar Tablo 2.8'de verilmiştir.

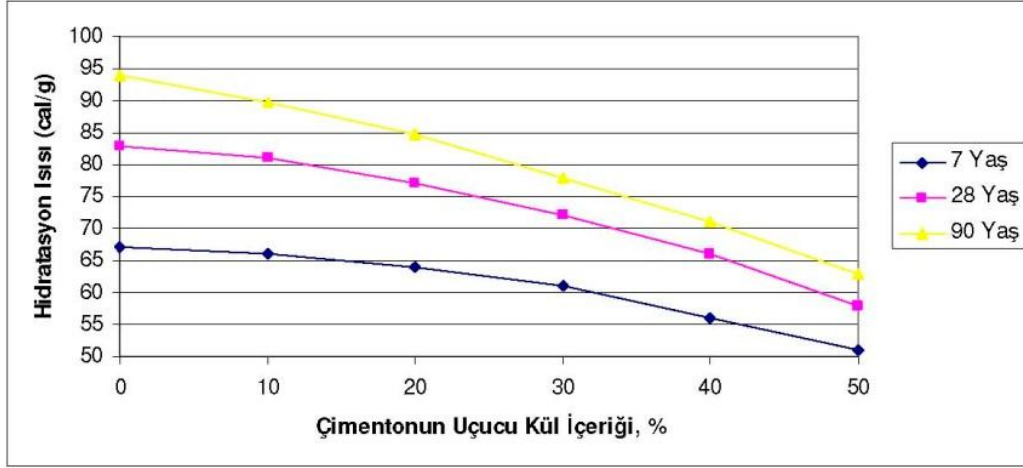
Tablo 2.8. Uçucu küllü çimento üretimi ile ilgili sınır değerler [6].

	TS 639	ASTM C 618	
		F Sınıfı	C Sınıfı
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	70	70	50
SO_3 , maks. %	5	5	5
Nemlilik, maks. %	3	3	3
KK, maks. %	10	6	6
MgO, maks. %	5	-	-
Alkaliler, maks. %	1.5	1.5	1.5

Uçucu külün çimentoda bir bileşen olarak kullanılması ekonomik ve çevresel kazanımlar yanında, uygulama yerine de bağlı olarak, çeşitli teknik özelliklerin iyileşmesinde yarar sağlar. Uçucu küllerin içerdiği küresel tanecikler yağlama etkisi yaptığından belirli bir işlenebilirlik değeri için su gereksinimi azalır. Hidratasyon sonucu ortaya çıkan $Ca(OH)_2$, küldeki SiO_2 ve Al_2O_3 bileşikleriyle ile puzolanik tepkimeye girerek fazladan (C-A-H ve C-S-H) oluşturur; alkali ve klor ortamlarına karşı dayanıklılığı artırır. Portland çimentosunun hidratasyonu esnasında ortaya çıkan ısı, beton sıcaklığının artmasına yol açar. Uçucu kül katılması hidratasyon ısısını azaltmakta, bu sayede sıcaklık artışı düşmektedir. Uçucu küller büyük yapılarda termik çatlamları azaltmaktadır. Özellikle baraj inşaatı gibi kütle beton kullanımı gerektiren durumlarda uçucu küllü çimentolar tercih edilmektedir. Çimentonun kül içeriği arttıkça hidratasyon ısısındaki azalışı gösteren örnek bir grafik Şekil 2.3'de verilmiştir [9, 20].

Uçucu kül kullanımında temel sıkıntı erken yaş basınç dayanımının düşüklüğü olup, erken yaş dayanımının önemli olduğu uygulamalarda kullanımından kaçınılmalıdır. Uçucu küller çoğu zaman termik santraldan elde edildiği şekli ile kullanıma hazır

değildir. En azından bir boyut sınıflandırmasına tabi tutulur ve belli incelikteki kısım katkı olarak kullanılır. Belirli incelikteki küllerin yaklaşık % 30'a varan miktarlarda çimentoya katılması kabul edilebilir bir durumdur [28]. Katkı oranının artırılması ve uçucu küllü çimentoların teknik özelliklerinin daha da iyileştirilmesi konularında yapılmış çeşitli çalışmalar vardır.



Şekil 2.3. Çimentonun uçucu kül içeriğine bağlı olarak hidrasyon ısısındaki azalış [9, 20]

Antiohos and Tsimas, yaptıkları bir çalışmada sınıflandırılmış uçucu külün iri kısmında amorf silika ve alümina içeriğinin ince kısma oranla daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Pozolanik tepkimelere giren ana bileşenlerin amorf silika ve alumina olduğundan hareketle bu iri fraksiyonu (+45 mikron) sınıflandırılmış ince kısım boyutuna öğütmüşler ve çimentoya katmışlardır. Bu yolla dayanım değerlerinin erken yaşlar da dahil olmak üzere iyileştiğini göstermişlerdir [19, 29]. Bu sonuçlar Kiattikomol et al.'ın bulguları ile örtüşmemektedir. Bu araştırmacılar 5 farklı kül üzerinde yaptıkları çalışmada sınıflandırılmış ince kısım ve aynı incelik değerlerine sonradan öğütülmüş iri kısmın dayanım değerleri arasında belirgin bir fark olmadığını saptamışlar ve bu nedenle uçucu küllü çimento harçlarının dayanımında etkili olan esas parametrenin kimyasal kompozisyon değil incelik olduğunu ileri sürmüşlerdir [20, 30].

Çimento sektöründeki teknolojik gelişmelerin hemen hemen tamamı enerjinin etkin kullanımına yönelik olmuştur. Ön ısıtıcı, ön kalsinasyonlu fırın sistemlerinin yanı

sıra en önemli gelişmeler öğütme sistemlerinde olmuştur. Bilindiği gibi, çimento üretiminde kullanılan toplam elektrik enerjisinin % 40'ından fazlası öğütme işlemlerinde harcanmaktadır. Bu nedenle, yeni öğütücüler ve separatörler tasarlanmış ve kullanılmaya başlanmıştır. Öte yandan tüm dünyada çimentoda daha fazla mineral katkı kullanılması yönünde artan bir eğilim bulunmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, uçucu küllerin çimentoda kullanılması,

- Klinkerizasyon enerjisinde tasarruf,
- Öğütme enerjisinde tasarruf,
- Kurutma enerjisinde tasarruf,
- Çevre dostu çabalarının ve faaliyetlerinin bir diğer göstergesi olması,
- Ürün çeşitliliği sağlaması,
- Elde edilecek malzemenin üstün özellikleri bakımından yararlı olacaktır [20, 22].

2.4.3. Uçucu küllerin taze beton özelliklerine etkisi

2.4.3.1. Uçucu küllerin taze betonun hidrasyon ısı ve sıcaklık yükselmesi üzerindeki etkisi

Priz alma ve sertleşme olayları sırasında bağlayıcı maddelerden ısı açığa çıkar. Açığa çıkan bu ısı hidrasyon ısısıdır. Hidrasyon ısısı, bu maddelerin su ile yapmış oldukları reaksiyon sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu ısı artışı özellikle kütle betonlarında ortaya çıkar. Hidrasyon ısısına karşı alınacak önlemler; uygun çimento seçimi, yavaş beton dökümü, çimento miktarını azaltma ile betondaki agrega ve suyu soğutma olarak sayılabilir [3, 31]. Uçucu kül katkılı betonlarda daha az portland çimentosu yer aldığından hidrasyon ısısında belirli bir azalma sağlanabilir.

Crow and Dunstan yaptıkları çalışmada, düşük kireçli uçucu kül içeren betonun kontrol betonuna göre daha az ısı çıkardığını ama yüksek kireçli uçucu kül içeren betonun kontrol betonuna yakın ısı meydana getirdiğini belirtmişlerdir [1, 32].

Compton and Mclannis, % 30 ikame oranında uçucu kül kullanılarak yaptıkları çalışmada, uçucu küllü betonlarda sıcaklığın kontrol betonuna göre daha düşük olduğunu göstermiştir [1, 33].

Barrow, Hadchiti and Carrasquillo F ve C tipi uçucu küller kullanarak ürettikleri betonlarla yapılan deneylerde, F sınıfı uçucu küllerin hidrasyon ısısını düşürdüğünü ve sıcaklık artışını yavaşlattığını saptamışlardır. C sınıfı uçucu küllerin ise sadece sıcaklık artışını yavaşlattığını gözlemlemişlerdir [34].

Langley, Carette and Malhotra, F sınıfı uçucu küller kullanarak yapmış oldukları deneylerde hidrasyon ısısının düştüğünü ve sıcaklık artışının yavaşladığını gözlemlemişlerdir [35].

Hidrasyon ısısını düşürmek amacıyla yapılmış olan tüm bu çalışmalar; çimentonun azaltılarak puzolanların kısmi kullanımı büyük kütleli betonlarda hem ekonomik açıdan hem de işlev olarak büyük yararlar sağlayacağını göstermektedirler.

2.4.3.2. Uçucu küllerin taze betonda hava sürüklenmesi üzerindeki etkisi

Mineral katkı maddelerinin kullanımı, betonda hava sürüklenmesini zorlaştırmaktadır. Belirli bir hava miktarına ulaşmak için gereken katkı miktarı daha fazla olmaktadır. Mineral katkıların içerdikleri karbon miktarları ve yüksek özgül yüzeyleri bunda etkilidir [1].

Haque, Day and Langan, basit ikame yöntemiyle ürettikleri C sınıfı uçucu küllü betonlarda hava sürükleyici katkı kullanmışlar ve uçucu kül kullanımının hava sürükleyici katkı ihtiyacını artırdığını gözlemlemişlerdir [36].

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

olursa bunun hava sürükleyici katkı ihtiyacını da arttıracığını fakat uçucu küldeki toplam alkali miktarındaki artışın hava sürükleyici katkı ihtiyacını azaltacağını söylemişlerdir. Uçucu külün özgül ağırlığındaki artışın betondaki hava miktarını da arttırdığı ayrıca yüksek oranda kireç içeren uçucu küllerin betonda daha az hava kaybına neden olduğu kanısına varmışlardır. Bunlara ilave olarak, uçucu külün kimyasal bileşimindeki SO_3 miktarındaki artışın betondaki hava miktarını da arttıracığını söylemişlerdir [37].

2.4.3.3. Uçucu küllerin işlenebilme, su ihtiyacı ve terleme üzerindeki etkisi

Betonları üretirken amaç kalıbına dökülmüş halde kompasitenin büyük bir değer alması ve dayanımın da yüksek olmasıdır. Taze betonun kalıbına yerleştirme sırasında kohezyonunu ve homojenliğini kaybetmemesi, kalıplarda kolayca yayılıp mümkün olduğu kadar az boşluk bırakarak bunları doldurma özelliklerinin hepsine birden işlenebilme özelliği denilmektedir [38]. Tez çalışmasında yapılan üretimlerde işlenebilirlik sabit tutulmuş olup, karışım hesapları yapılmadan önce aynı işlenebilirliği sağlamak için çok sayıda deneme üretimi yapılmıştır. Bu yüzden beton içerisindeki suyun azaltılması ve bağlayıcı miktarının artması, işlenebilirliğin sabit tutulması açısından önemlidir. F ve C tipi uçucu küllerin de işlenebilirliğe katkısı bu açıdan olumlu yönde olmaktadır.

Sivasundaram, Crette and Malhotra, F sınıfı uçucu külleri basit ikame yöntemi ile yüksek dozajlı betonlarda kullanarak yaptıkları deneyler sonrasında ulaştıkları sonuçlarda, uçucu küllerin işlenebilirliği arttırdığı ve su ihtiyacını azalttığı kanısına varmışlardır [39].

Olek and Diamond, C ve F sınıfı uçucu küllerle basit ikame yöntemiyle ürettikleri betonlarda her iki tip uçucu külün de işlenebilirliği arttırdığını gözlemlemişler, C tipi uçucu küllerin ise F tipi uçucu küllere göre işlenebilirliği daha fazla arttırdığını söylemişlerdir [40].

Schiessl and Hardtl yapmış oldukları çalışmalarda, uçucu küllü betonlarda uçucu küllerin inceliğinin artması ile taze betonun işlenebilirliğinin de arttığını söylemişlerdir [41].

Welsh and Burton bazı Avustralya küllerinin basit ikame yöntemi ile su miktarı sabit tutularak yapılan betonlarda kullanılması ile karışımda çökme kaybının gözlendiğini belirtmişlerdir [42].

Terleme genellikle ayrışma sonucu oluşan, artması halinde erken rötreye neden olan bir olaydır. Ayrışma olayı, üretilen betonun yeterli kohezyona sahip olmamasından kaynaklanmaktadır. Uçucu küllerin ise inceliklerinin fazla oluşu nedeniyle, beton karışımının kohezyonunu artıracakĐı ve ayrışmayı azaltacakĐı, bu nedenle de erken rötreyi engelleyeceği düşünülmektedir [1, 43].

Copeland, yaptĐı çalışmalarda terlemeye eğilimli kaba karışımlarda uçucu kül kullanımının terlemede azalmaya neden olduğunu gözlemlemiştir [44].

Sivasundaram, Carette and Malhotra yaptıkları çalışmalarda, yüksek miktarda uçucu kül kullanarak ürettikleri betonlarda hiç terlemeye rastlamadıklarını belirtmişlerdir [39].

Reshi, bir kaç Hindistan uçucu külü ile yaptĐı deneylerde incelenen tüm küllerin betonun su ihtiyacını arttırdığını gözlemlemiştir [45].

Yukarıdaki çalışmalardan, uçucu küllerin betonda terlemeyi ve işlenebilirliği iyileştirdiği söylenebilir. Ancak bu konudaki en önemli etkenlerin uçucu küllerin fiziksel özellikleri, inceliği, kimyasal ve minerolojik bileşimi olduğu unutulmamalıdır.

2.4.3.4. Uçucu küllerin priz süresine etkisi

Priz süresinin kısalması ya da uzamasını etkileyen birçok faktör vardır. Betonda kullanılan çimentonun tipi, içeriği, inceliği, katkı kullanımının etkisi, uçucu külün

miktarı, uçucu külün inceliği ve kimyasal bileşimi bu faktörlere örnek olarak gösterilebilir. Genellikle uçucu kül kullanılan betonlarda priz sürelerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun esas nedeni, uçucu küllerin bağlayıcı özellik kazanabilmeleri ve kimyasal reaksiyona girebilmeleri için çimento prizi sonrasında ortaya çıkan serbest kireci kullanmalarıdır. Ayrıca serbest kireci kullanma sırasındaki reaksiyon hızının da yavaş olmasıdır.

Sivasundaram et al., yüksek uçucu kül kullanımı ile priz süresinin arttığını söylemişlerdir [37].

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

Lane and Best, uçucu küllerin prizi geciktirdiğini söylemiş ve bunda uçucu kül karışım oranlarının, inceliğinin ve kimyasal bileşiminin etkili olduğunu belirtmişlerdir. Fakat, kullanılan çimentonun inceliğinin, hamurun su miktarının ve ortam sıcaklığının etkilerinin daha fazla olduğunu söylemişlerdir [46].

Okada et al., yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanımıyla priz süresinin arttığını söylemişlerdir [47].

Yukarıda bahsedilen çalışmalardan, F ve C tipi uçucu kül katkılı betonların priz sürelerinin sadece portland çimento ile üretilen betonlara göre daha uzun olduğu görülmekte, bu etkinin genellikle priz süresini geciktirici nitelikte olduğu da söylenebilmektedir.

2.4.4. Uçucu küllerin sertleşmiş beton özelliklerine etkileri

2.4.4.1. Uçucu küllerin dayanım kazanımı, basınç ve eğilme dayanımları üzerindeki etkisi

F ve C tipi uçucu küllü betonlarda dayanım kazanımları, uçucu küllerin kimyasal ve

fiziksel özellikleri, tanecik şekli, uçucu kül reaktivitesi, sıcaklık ve diğer kür koşulları ve kullanım oranları gibi faktörlere bağlıdır [1].

Yapılan çalışmalarda genel kanı, C sınıfı uçucu küllerin, F sınıfı uçucu küllere oranla erken yaşlardaki reaksiyon hızlarının daha yüksek olduğu yönündedir. Bunun nedeni olarak da C sınıfı uçucu küllerin daha yüksek miktarda CaO (kireç) içermeleri gösterilmiştir [2].

Mehta and Gjorv yaptıkları çalışmada, % 30 oranında F tipi uçucu kül içeren çimentolarla ürettiği betonlarda 7. ve 28. günlerdeki dayanımların düşük, 90. gündeki dayanımların ise kontrol betonuna eriştiğini gözlemlemiştir [48].

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 [10].

Yuan and Cook yapmış oldukları çalışmada; betonun dayanım kazanımını; yüksek kireçli uçucu küllü betonlar (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 [49].

Tuygun, kısmi ikame yöntemi ile yaptığı çalışmada % 10, % 30 ve % 50 oranlarında uçucu kül kullanarak betonlar üretmiş, uçucu küllü betonların erken yaşlardaki dayanımlarının bütün yerleştirme yüzdelerinde düşük olduğunu gözlemlemiştir. 28. ve 90. günlerdeki basınç dayanımlarının ise % 10 uçucu kül içeren numunelerin kontrol betonuna yakın ve üzerinde değerler verdiğini söylemiştir. % 30 ve % 50 uçucu küllü numunelerin ise ileriki yaşlardaki dayanımlarının ise kontrol betonuna göre düşük olduğunu saptamıştır [11].

Şengül vd., yapmış oldukları çalışmada beton karışımındaki uçucu külleri kullanmadan önce öğütmüşlerdir. 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 [50].

Dayanım gelişimini uçucu külün tane boyutu açısından ele alırsak incelik ve bağlayıcılık aktivitesi olarak iki yönde etkilediğini görürüz. İncelik açısından, büyük taneler betonun su ihtiyacını artırdıklarından dayanım gelişimini de olumsuz yönde etkilerler. Bağlayıcılık aktivitesi hamurdaki katı fazın yüzeyinde meydana geldiğinden, dayanım gelişimini etkilemektedir. Bu nedenle yüzey alanı bağlayıcılık aktivitesinde önemli rol oynar [1].

Crow and Dunstan çok farklı özellikler içeren uçucu küllerin inceliğini araştırmışlar, inceliği fazla olan uçucu küllerin çimentoyla daha iyi reaksiyona girdiğini ve daha iyi dayanım kazandığını söylemişlerdir [51].

Dayanım gelişimini puzolanik aktivite açısından değerlendirdiğimizde, puzolanik reaksiyonun hem çimento hidrasyonu ile oluşan serbest kireç oluşumunu beklemesi hem de yavaş bir reaksiyon olması sebebiyle puzolanik etkiyle dayanım kazanma da yavaş olmaktadır. Genelde bu tür betonlarda erken yaşlardaki dayanımlar düşük, ancak puzolanik aktivitenin yüksekliğine göre ilerki yaşlardaki dayanımlar kontrol betonunu yakalamakta veya geçmektedir [2].

Sıcaklık ve kür koşulları da dayanımları etkilemektedir. Uçucu küllü betonların sıcaklık artışıyla birlikte dayanımlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kür koşulları da dayanım artışında önemli bir etkiye sahiptir [42].

2.4.4.2. Uçucu küllerin elastisite modülü üzerindeki etkisi

Uçucu kül kullanılan betonlarda, elastisite modülünün basınç dayanımına benzer özellikler gösterdiği kabul edilmektedir. Yani uçucu küllü betonlarda elastisite

modülü erken yaşlarda kontrol betonuna oranla düşük, ileriki yaşlarda ise daha yüksek olduğu söylenmektedir [43].

Berry et al., yapmış oldukları çalışmada, uçucu kül özelliklerinin az da olsa elastisite modülünü etkilediğini söylemişlerdir. Elastisite modülünün, kontrol betonuyla karşılaştırıldığında düşük dayanımlarda düşük, yüksek dayanımlarda ise yüksek değerlerde olduğunu saptamışlardır [16].

Galoeta et al., % 18 ve % 25 oranlarında F tipi uçucu kül içeren betonlarla yaptıkları çalışmalarda, elastisite modüllerinin aynı mukavemetteki kontrol betonu ile aynı olduğunu söylemişlerdir [52].

Joaquin et al., yüksek oranda F tipi uçucu kül kullandıkları betonlarda, elastisite modülünün erken yaşlarda düşük değerler verdiğini gözlemlemişlerdir [44].

Yapılan çalışmalar sonucunda, uçucu külün elastisite modülü üzerindeki etkisi, basınç dayanımı üzerindeki etkisi kadar belirgin değildir. Elastisite modülünü, uçucu kül kullanmanın etkisinden çok, agrega ve çimento özelliğinin belirlediği bilinmektedir [42].

2.4.4.3. Uçucu küllerin sünme ve rötre üzerindeki etkisi

Uçucu küller, kullanıldıkları betonun dayanımına ve dayanım kazanma hızına etki ettiğinden dolayı, betonda sünme ve rötreye de etki etmektedir. Sünme ve rötre dayanımla ters orantılıdır. Yani dayanım azaldığında artar. Erken yaşlarda yüksek, ileriki yaşlarda ise düşüktür. Betondaki sünme ve rötreye etki eden faktörleri, ortamın sıcaklığını ve nem koşulları, betonun dayanımı, elastisite modülü, agrega miktarı, yükleme anındaki beton yaşı ve yükleme anındaki sünme gerilmesinin dayanıma oranı olarak sayılabilir [1,43].

Atiş'in F tipi yüksek miktarda uçucu kül içeren betonlarda yaptığı çalışmalar, uçucu kül kullanımının rötreyi azalttığını göstermektedir [45].

Brooks and Farrugia, % 30 ve % 70 ikame oranlarında ürettikleri uçucu küllü betonda sünmenin, uçucu kül miktarının artışı ile arttığını belirtmişlerdir [46].

Gifford and Ward yaptıkları çalışmalarda uçucu küllerin sünmeyi azalttığını, bunun nedeninin ise uçucu küllerin elastisite modülünü artırması ve toplam agrega miktarını arttırırken sünme için uygun hamur hacmini azaltması olduğunu söylemişlerdir [53].

Sonuç olarak, uçucu küllü betonlarda rötre davranışıyla sünme davranışı birbirine benzemekte ve betona olumlu yönde katkı sağlamaktadır.

2.4.5. Uçucu küllerin dayanıklılık özelliklerine etkisi

2.4.5.1. Uçucu küllerin geçirimsizlik üzerindeki etkisi

Boşluk oranı düşük, dolu bir beton mekanik yönden avantajlı olmasının yanında aynı zamanda geçirimsizdir. Mineral katkı maddelerinin en önemli işlevleri betonda boşluk yapısını iyileştirmeleri ve geçirimsizliği azaltmalarıdır. Geçirimsizlik; çimento dozajı, su/çimento oranı, agrega granülometrisi, çimento cinsi ve uçucu kül kullanımından etkilenmektedir [31].

Kanitakis düşük kireçli uçucu küllerle yaptığı çalışmada, erken yaşlarda uçucu küllü betonların düşük dozajlı betonlar gibi davrandığını ve bu yüzden geçirimsizliğin kaçınılmaz olduğunu söylemişlerdir [54].

Akman ve Erdinç, F tipi uçucu kül kullanarak yaptıkları çalışmada, yüksek oranda uçucu kül ilavesi ile klor geçirimsizliğinin büyük oranda azaldığını saptamışlardır. Uçucu külün klor geçirimsizliğini azaltan etkisinin ileriki yaşlarda daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca uçucu kül miktarı düşük olan betonlarda (< % 20) geçirimsizlikte beklenen yararın elde edilemediğini söylemişlerdir [55].

Sonuç olarak, uçucu küller C-H ile birleşerek oluşturdukları C-S-H jelleriyle geçirimsizliği de azaltmış olurlar.

2.4.5.2. Uçucu küllerin zararlı kimyasallara dayanıklılık üzerindeki etkisi

Betondaki zararlı kimyasal etki ikiye ayrılır. Bunlar; betonun bulunduğu ortamın oluşturduğu zararlı etki ve beton içindeki bileşenlerin reaksiyonu sonucu ortaya çıkan zararlı etki olarak söylenebilir [1].


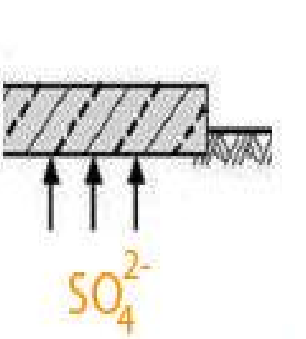
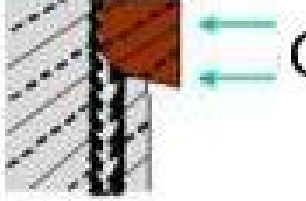

Portland çimentosunun reaksiyon sonucu açığa çıkardığı $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bir bazdır ve asitlerden zarar görür. Asitler, serbest kireç ile reaksiyona girer ve suda çözünen tuzlar oluştururlar. Bu tuzların betondan yıkanmasıyla geçirimsizlik artmakta ve zararlı kimyasalların beton içerisine girişi hızlanmaktadır [31].

Mangat and Khatib, basit ikame yöntemiyle % 22 ve % 32 oranlarında ürettikleri F tipi uçucu küllü betonlarda sülfata karşı direncin arttığını gözlemlemişlerdir. % 55 nemli ve $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığındaki kür koşullarında saklanan betonlarda sülfata karşı dayanıklılığın arttığını gözlemlemişlerdir [56].

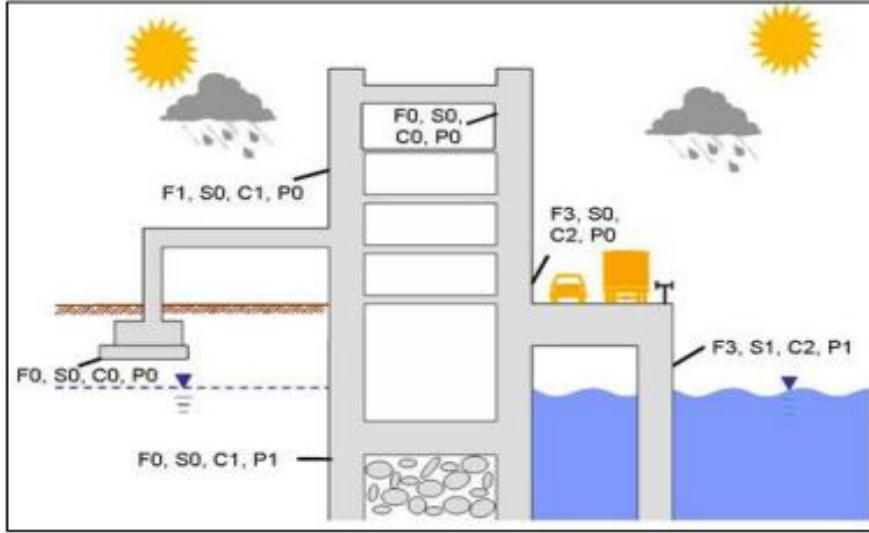
Tikalsky and Carrasquillo yaptıkları çalışmalarda, yirmi farklı uçucu külü basit ikame yöntemiyle beton içerisinde kullanmışlar ve yüksek kireçli uçucu külün sülfata karşı dayanıklılığı azalttığını gözlemlerken düşük kireçli uçucu külün sülfata karşı dayanıklılığı arttırdığını belirlemişlerdir [57].

Fidjestol, uçucu küllerle ürettiği betonlarda organik asitlere karşı dayanıklılığı incelemiş ve uçucu küllerin betondaki asitlere karşı dayanıklılığı arttırdığını belirlemiştir [58].

Sonuç olarak; uçucu küller serbest kireci kullanıp geçirimsizliği arttırdıkları için zararlı kimyasallara dayanıklılığı da arttırırlar. ACI 318-08'de bu faktörler dört ana başlığa indirgenerek bir grafiksel gösterimle özetlenmektedir (Şekil 2.4). Ayrıca beton yapı elemanlarının maruz kaldığı çevresel etki kaynakları da (Şekil 2.5)'de örneklendirilmektedir.

<p>F</p>	 <p>Donma Çözülme Etkisi</p>	<p>F0 (Uygulanamaz) – Donma -çözülme etkisine maruz kalmayan beton.</p> <p>F1 (Orta derece) – Donma-çözülme etkisinde beton (Ara sıra neme ve/veya buz çözücü kimyasallara maruz kalan beton)</p> <p>F2 (Şiddetli) – Donma-çözülme etkisinde beton (Sürekli neme maruz kalan beton)</p> <p>F3 (Çok şiddetli) – Donma-çözülme etkisinde beton (Sürekli neme ve buz çözücü kimyasallara maruz kalan beton)</p>
<p>S</p>	 <p>Sülfat Etkisi</p>	<p>S0 (Uygulanamaz) – Toprak: $SO_4 < 0.10 \%$ – Su: $SO_4 < 150 \text{ ppm}$</p> <p>S1 (Orta derece) – Toprak: $0.10\% \leq SO_4 < 0.20 \%$ – Su: $150 \text{ ppm} \leq SO_4 < 1500 \text{ ppm}$ (ve deniz suyu)</p> <p>S2 (Şiddetli) – Toprak: $0.20 \% \leq SO_4 < 2.0 \%$ – Su: $1500 \text{ ppm} \leq SO_4 < 10,000 \text{ ppm}$</p> <p>S3 (Çok şiddetli) – Toprak: $SO_4 > 2.0 \%$ – Su: $SO_4 > 10,000 \text{ ppm}$</p>
<p>C</p>	 <p>Korozyon</p>	<p>C0 (Uygulanamaz) – Kullanım süresince nemden korunan veya kuru kalacak beton.</p> <p>C1 (Orta derece) – Kullanım süresince neme maruz kalıp dıştan gelen klorür etkisine maruz kalmayan beton.</p> <p>C2 (Şiddetli) – Kullanım süresince neme ve dıştan gelen klorür etkisine maruz kalan beton.</p>
<p>P</p>	 <p>Permeabilite</p>	<p>P0-(Uygulanamaz) – Geçirimliliği (permeabilite) bulunmayan beton.</p> <p>P1–Su etkisine karşı düşük geçirimliliğe sahip beton.</p>

Şekil 2.4. ACI 318-08'e göre çevresel etki sınıfları [20]



Şekil 2.5. Beton yapı elemanlarının maruz kaldıkları çevresel etkiler [20]

2.4.5.3. Uçucu küllerin alkali-agrega reaksiyonu üzerindeki etkisi

Çimento hammaddesinde bazı alkali oksitler bulunur. Bu alkali oksitler, agrega içinde aktif silis dumanı bulunması durumunda ise silikat jeline dönüşürler. Sodyum, potasyum ve kalsiyum silikatı olan bu jel şişme ve genişleme yapar. Bu da betonun hacim sabitliğini bozar ve ağ şeklinde sık çatlaklar meydana getirerek alkali-agrega reaksiyonuna neden olur. Bu olayın gerçekleşmesi için, çimento alkali oksit içermeli ve agregalar içerisinde aktif silis bulunmalıdır [31].

Kabayasaki et al., F tipi uçucu külleri % 10, % 20 ve % 30 oranlarında kullanarak basit ikame yöntemiyle ürettikleri betonlarda, uçucu kül oranı arttıkça alkali-agrega reaksiyonunun kontrol altına alındığını söylemişlerdir [59].

Sonuç olarak; uçucu küller alkali-agrega reaksiyonunda dolayı betonda oluşan genişleme ve çatlakları azaltmaktadırlar. Çimento hamurundaki alkali konsantrasyonu uçucu kül tarafından azaltılmakta ve böylece zararlı reaksiyon riski azaltılır [1].

2.4.5.4. Uçucu küllerin donma-çözülme dayanıklılığı üzerindeki etkisi

Donma çözülme dayanıklılığı betondaki fiziksel etkenler arasında en önemli etkenlerdendir. Beton, içerisinde önemli miktarda boşluk içeren bir maddedir. Bu boşluklarda ise ya betonun üretilmesi sırasında kullanılan su ya da betonun geçirimsizliği nedeniyle içeriye sızan su bulunmaktadır. Beton içerisindeki suyun donması sonucu oluşan genleşme, betonda çekme gerilmeleri oluşturur. Bu gelişmeler sonucunda çatlaklar oluşur veya oluşmuş çatlaklar büyür. Bunu engellemenin en iyi yolu betondaki hava boşluğunun azaltılması ve kompasitesi yüksek dolu bir beton elde edilmesidir. Bunun dışında diğer etkenler olarak, agregaların sağlamlığı, hidrasyon derecesi, çimento hamuru dayanımı ve nem koşulları sayılabilir [42].

Virtanen yaptığı çalışmalarda, uçucu külün yüksek oranda kullanımının donma çözülme direncini azalttığını gözlemlemiştir. Hava sürükleyici katkı kullanılarak yaptığı çalışmalarda ise hava miktarı sabit tutularak katkı miktarı artırılırsa, uçucu küllerin olumsuz etkilerinin ortadan kalkacağını söylemiştir [60].

Sonuç olarak, donma çözülme olayı fiziksel bir etkidir. Islanarak doygun duruma gelen ve donma çözülme çevrimlerine maruz kalan bütün betonlar kısa sürede hasar görmektedirler. F ve C tipi uçucu küllerin beton içerisindeki boşlukları daha iyi doldurarak donma çözülme dayanıklılığını artırdığı söylenebilir.

2.4.5.5. Uçucu küllerin deniz ortamına dayanıklılığının etkisi

Beton yapı temellerinin sahil alanlarda tuzlu yeraltı suyu seviyesinin altında yapılması, kılcal su emme ve buharlaşma nedeniyle toprak altındaki betonda kristalleşmeye neden olur. Böylece çimento hamurunda kimyasal hasar meydana gelir ve donatı korozyona uğrayabilir. Geçirimsiz bir beton, bunların durdurulması veya zararsız bir düzeye indirilmesi için çok önemlidir. Bu açıdan geçirimsizlik deniz suundaki betonun dayanıklılığını etkileyen en önemli faktördür [1].

Onabolu, F sınıfı uçucu külleri % 30 oranında kullanarak basit ikame yöntemine göre ürettiği betonları deniz ortamında saklamış ve kontrol betonuna göre basınç dayanımlarının ve geçirimsizliğin arttığını gözlemlemiştir. Böylece yazar uçucu kül kullanımının deniz ortamına dayanıklılığı arttırdığını belirtmiştir [61].

Sonuç olarak, deniz suyunun betona verdiği zarara karşı alınması gereken önlemlerin başında doğru çimento kullanımı gelir. F ve C tipi uçucu küller puzolanik özellikleri sayesinde, hidrasyon sırasında açığa çıkan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek boşluk yapısını azaltır ve dayanıklılığa önemli katkı sağlar.

2.4.5.6. Uçucu küllerin donatı korozyonuna 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 $\text{pH}=13$ 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 [62].

Malhotra et al., F sınıfı uçucu külleri kullanarak farklı su/çimento oranlarıyla ürettikleri betonlarda yaptıkları çalışmalarda, 8 yıllık süreç içerisinde yalnızca su/çimento oranı yüksek olan betonlarda korozyona rastlamışlardır. Klor geçirimsizliği ile ilgili olarak yapmış oldukları çalışmalarda ise uçucu kül kullanımının klor geçirimsizliğini azalttığını gözlemlemişlerdir [53].

Sonuç olarak, yapılan çalışmalardan da görüldüğü gibi uçucu küllerin geçirimsizliği azalttığı, dolayısı ile donatı korozyonuna olumlu etki ettiği söylenebilir.

2.4.5.7. Uçucu küllerin karbonatlaşma üzerindeki etkisi

Portland çimentosu sonucu oluşan serbest kirecin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dış ortamdaki CO_2 ile reaksiyona girerek CaCO_3 oluşturmasına karbonatlaşma denir [3]. İyi sıkıştırılmış, uygun şekilde kürlenmiş ve düşük su/çimento oranına sahip olan betonlar karbonatlaşmanın ilerlemesine direnecek kadar geçirimsiz olmaktadır [23].

Berry and Malhotra yapmış oldukları araştırmalarda, katkılı çimentolar ile yapılmış olan betonların normal portland çimentosu ile yapılmış betonlara göre daha çabuk daha çabuk karbonatlaşmaya maruz kaldıkları sonucuna varmışlardır [16].

Sonuç olarak, iyi kalitedeki uçucu küllü bir betonun, normal bir betona göre karbonatlaşmaya karşı koyabildiği söylenebilir [23]. Karbonatlaşmanın daha az olabilmesi için geçirimsiz bir beton üretilmesi uçucu küllerinde geçirimsizliğe olumlu katkı yaptığı söylenebilir.

2.4.5.8. Uçucu küllerin sülfata maruz betonlardaki etkisi

Sülfat, çimentonun bazı bileşenleri ile reaksiyona girerek betonun zamanla bozulmasına neden olan bir iyondur. Bu saldırı sülfat iyonlarının, sertleşmiş betondaki alüminli ve kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girmesi, etrenjit ve alçı taşı oluşturması ile gerçekleşir. Reaksiyon ürünleri betonda genişleme meydana getirerek çatlaklara ve dağılmalara yol açar, agrega-çimento aderansının etkilenmesiyle betonun dayanımı düşer. Sülfat saldırısına uğramış betonun karakteristik görünümü, özellikle köşe ve kenarlardan başlayarak tüm kütleyle yayılan beyaz lekeler, çatlaklar ve dökülmelerdir. Betonun kolayca ufalanabildiği ve yumuşadığı görülür [63].

Özellikle deniz yapılarında, deniz suyundaki sülfatlar ıslanma-kuruma bölgesinde buharlaşma nedeniyle betonun sülfat yoğunluğunun artmasına yol açabilirler. Sülfat etkisine yol açan bir diğer kaynak çimentodur. Çimentonun C_3A bileşeninin ani prizini önlemek için üretim aşamasında çimentoya az miktarda alçı taşı katılır.

Zamana bağılı genleşmenin ve beton dayanımının etkilenmesini önlemek için genelde katılan alçıtaşının oluşturacağı SO_3 miktarı çimento ağırlığının % 3'ü ile sınırlanmıştır.

Sülfat iyonları başta çimentonun ana bileşenlerinden olan C_3S ve C_2S 'in hidratasyon ürünü olan ve çimentoya bazik özellik kazandıran $Ca(OH)_2$ ile birleşerek kalsiyum sülfatı ($CaSO_4$), C_3A ile birleştirerek Candlot tuzunu ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$) oluşturur [63, 64]. Candlot tuzunun 32 molekül su içermesi nedeniyle hacim artışı meydana getirmesi betonda çatlak oluşturur. Şiddetli bir sülfat hasarına uğramış betonun geçmişi yüksek oranda C_3A içeren portland çimentosu ve ortamdaki yoğun SO_3 ile ilişkilidir. Betonda sülfat oluşumunu azaltmak için C_3A bileşen oranı % 5'in altında olan sülfata dayanıklı çimentolar geliştirilmiştir [65]. Sülfata dayanıklı çimentolar dışında puzolan katkılı çimentolar genellikle betonun sülfat etkisine karşı dayanıklılığını artırmaktadır. Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında katkılı çimento hamurunun kimyasal saldırılara karşı olan dayanıklılığı, düşük geçirimsizlik ve düşük klinker içeriği ve ileri yaşlarda gelişen puzolanik reaksiyonla ilişkilidir [66, 67].

2.5. Uçucu Küllü Betonlarda Karışım Oranlama Yöntemleri

Uçucu külün betonda kullanımının farklı amaçları vardır. Bu amaçlar şöyle sıralanabilir:

1. Çimento miktarını azaltıp beton maliyetini düşürmek,
2. Hidratasyon ısısını düşürmek,
3. İşlenebilirliği artırmak,
4. 90 gün ve sonrasında betonda istenilen dayanımı sağlamak,
5. Betonun dayanıklılığına katkı sağlamak,
6. Atık kullanıp çevreye katkı sağlamak [16].

Beton içerisinde en iyi olan miktarda kullanıldıkları zaman uçucu küller beton özelliklerine olumlu olarak etki etmektedirler. Fakat bu olumlu etkinin sağlanması için uçucu küllerin karışım yüzdelerinin ve etkilerinin çok iyi hesaplanması

gerekmektedir. Bununla birlikte uçucu küllerin sahip oldukları kimyasal ve mineralojik özelliklerin de iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla uçucu küllerin beton içindeki kullanımları bazı standartlarla sınırlandırılmaktadır. Uçucu küller, beton içerisinde başlıca iki şekilde kullanılmaktadırlar [16, 68];

- Portland çimentosu yerine uçucu küllü çimento kullanımı
- Uçucu külün beton içerisinde katkı maddesi olarak kullanımı

Uçucu külün çimento içerisinde kullanımı, diğer kullanıma göre daha kontrollüdür. Böylece uçucu kül ve çimento oranları önceden belirlenmekte ve karışım oranları sınırlandırılmaktadır. İlave olarak uçucu kül kullanılması ise daha geniş incelenmesi gereken bir olaydır. Uçucu kül özelliklerinin de bilinmesi ve sürekli kontrol altında tutulması gerekmektedir [16, 68].

Uçucu küllerin, beton içerisinde farklı görevleri vardır. Taze betonda su ihtiyacını azaltırken, sertleşmiş betonda puzolanik yapılarından dolayı bağlayıcı özellik gösterirler, dayanımı artırır ve dayanıklılığa önemli katkılar sağlarlar. Bu özelliklerine referans olarak yalnız portland çimentosuyla üretilmiş betonlar alınmaktadır. Buna göre iki kabul yapılmaktadır [16];

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

Uçucu küllerin beton içerisinde kullanılabilmesi için farklı karışım yöntemleri mevcuttur. Bunlardan başlıca üç tanesi [16, 68];

- Basit ikame yöntemi (Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması)
- İlave yöntemi (Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması)
- Kısmi ikame yöntemi (Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine kullanılması)

1) Modifiye edilmiş ikame yöntemi

2) Rasyonel oranlama yöntemi

2.5.1. Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması (basit ikame yöntemi)

Basit ikame yönteminde, belli bir miktar çimento karışımından çıkarılmakta ve yerine aynı miktarda uçucu kül konulmaktadır. Çıkarılan çimentonun yerine eklenen uçucu küller, başlangıçta az bağlayıcılık özelliği gösterir ve ince agrega gibi davranırlar. Bu nedenle karışımın işlenebilirliği artmaktadır. Bu yöntemle üretilen betonların erken yaşlardaki dayanımları düşüktür. Ancak ileriki yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımları yüksektir. Hatta bazen yalnız portland çimentosuyla üretilmiş kontrol betonlarının dayanımlarından daha yüksek değerler bile alırlar [16].

Basit ikame yönteminin kullanılmasındaki başlıca amaç, kütle beton üretiminde hidrasyon ısısını düşürmek ve işlenebilirliği arttırmaktır. Ayrıca kullanılan uçucu külün yüksek veya düşük kireçli olması da kullanım sırasında farklılıklar gösterebilmektedir [16].

2.5.2. Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması (İlave yöntemi)

İlave yönteminde, karışımındaki çimento miktarı değiştirilmeden karışıma uçucu kül eklenir. Uçucu külün eklenmesiyle karışımındaki bağlayıcı madde miktarı artar. Böylece betonun su ihtiyacı ve kohezyonu artar. Betonun kullanım amacına bağlı olarak karışımda diğer düzenlemeler yapılmalıdır. Bu yaklaşım, sülfata dayanıklılığı sağlamak için en az çimento faktörü ile ince agrega yerine puzolan kullanımını arttırmak amacıyla ilk kez Price tarafından kullanılmıştır. Bu yöntemde betonun ileriki yaşlardaki dayanımı artmaktadır [16].

2.5.3. Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine kullanılması (Kısmi ikame yöntemi)

Kısmi ikame yönteminde, karışımından çıkarılan çimento yerine farklı miktarda uçucu

kül konulmaktadır. Bundan sonra ise ince agrega ve su miktarında değişiklik yapılarak ayarlanmaktadır. Bu çalışmadaki başlıca amaç uçucu kül kullanımı ile oluşan en önemli dezavantaj olan erken yaşlardaki dayanım kaybını en aza indirmektir. Ancak bu oranlama yapılırken, uçucu küllerin maliyeti azaltma ve işlenebilirliği arttırma gibi avantajlarının da düşünülmesi gerekmektedir. Bütün etkenler göz önüne alınarak ve deneme karışımları yapılarak optimum performansa ait karışım oranları belirlenmektedir [16].

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

2.5.3.1. Modifiye edilmiş ikame yöntemi

Lovewell and Washa bu yöntemi ilk kez 1958 yılında kullanmışlardır. Ayrıca uçucu küllü betonların erken yaşlardaki dayanımlarının kontrol betonuyla karşılaştırılabileceğini söylemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, erken yaşlardaki (3. ve 28. günler arasında) basınç dayanımlarının uçucu küllü ve uçucu külsüz betonlarda eşit olması için, uçucu küllü betondaki toplam bağlayıcı maddenin kontrol betonundaki çimento miktarından fazla olması gerektiğini söylemişlerdir. Ancak 1960'lı yıllarda yapılan çalışmalar göstermektedir ki; uçucu küllü betonlarda işlenebilirlik ve uçucu kül özellikleri de karışım oranlama yöntemine göre göz önüne alınması gereken faktörlerdir. Bunun ortaya çıkmasında Abrams'ın su/çimento ile dayanım arasındaki ilişkinin belirlenmesinde kullanılan karışım oranlama yöntemleri büyük rol oynamıştır [16].

2.5.3.2. Rasyonel oranlama yöntemi

Rasyonel oranlama yöntemi ilk kez Smith tarafından kullanılmıştır. Modifiye ikame yönteminden farkı, uçucu kül için bir k faktörü tanımlanır ve kullanılır. Smith bu yöntemde, uçucu kül ağırlığının (f), karışımdan çıkarılan çimento ağırlığına (k*f) eşit olabileceğini söylemiştir [16]. Bu çalışma ile ilgili bazı bilgiler ve ulaşılan sonuçlar şöyle sıralanabilir [69];

- Uçucu kül kullanılmayan betonlarda, dayanımı etkileyen iki ana faktör çimento tipi ve su/çimento oranıdır. Farklı sertleşme oranlarına sahip betonlarda su/çimento oranı ayarlanarak aynı basınç dayanımına ulaşmak mümkündür. Abrams'ın basınç dayanımı ve su/çimento arasındaki ilişkiyi inceleyen eğrisi yardımı ile farklı betonlarda aynı basınç dayanımını elde etmek için su/çimento oranları seçilebilmektedir.
- Abrams'ın basınç dayanımı su/çimento eğrisi yardımı ile uçucu küllü ve kontrol betonları arasında da ilişki kurularak aynı basınç dayanımlarına ulaşmak mümkündür.
- Uçucu kül kullanımında üç tane belirsizlik vardır. Esasen uçucu küllerin çimento içerisinde, katkı olarak ve ince agrega olarak kullanımındaki mantık aynıdır. Çimento içerisinde % 25 oranında kül kullanmakla ($25/100=0.25$), katkı olarak % 20 çimento yerine uçucu kül kullanmak ($20/80=0.25$) aynı oranlamayı göstermektedir. Uçucu külün kullanımı ile işlenebilirliğin azaldığı gözlenirse agrega/çimento oranının da azaldığı görülür. Bunun anlamı ise uçucu külün agrega miktarını azaltarak ince agrega yerine kullanılmasıdır. Görüldüğü gibi üç yaklaşımda da düşünce tarzı hatalıdır. Uçucu küllü betonlar yeni bir beton olarak ele alınmalı ve incelenmelidir.
- Rasyonel yöntem kullanılmadan önce uçucu küllerin basınç dayanımına etkisi incelenmelidir. Uçucu küllü ve kontrol betonlarının basınç dayanımı su/çimento oranı grafikleri incelenerek, uçucu küllü betonların kontrol betonu ile aynı basınç dayanımını elde etmesi için gerekli su/çimento oranı bulunur.
- k uçucu külün bağlayıcılık etkisi, f uçucu külün ağırlığı olmak üzere $k*f$ çıkarılan çimentonun ağırlığı, w su miktarı, c çimento miktarı ise uçucu küllü betonların, kontrol betonuna eşit dayanıma sahip olabilmesi için etkin su/çimento oranı aşağıdaki eşitlikten (2.3) hesaplanabilir;

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

- k etkinlik faktörünün belirlenmesinde (2.3) denklemini kullanan Smith, farklı

basınç dayanımları için etkin su/çimento oranlarını seçerek k etkinlik katsayılarını bulmuş ve bulduğu k katsayılarının ortalamasını alarak uçucu külün k etkinliğini belirlemiştir. Elde ettiği k etkinlik değerlerinin, 7., 28. ve 90. günler arasında çok fazla değişim göstermediğini söylemiştir.

- Smith, bağlayıcı etkinlik yöntemi kullanarak üretilen uçucu küllü betonların kontrol betonu ile eşit dayanımda olması halinde, işlenebilirliklerin her iki betonda da eşit olduğunu ancak uçucu küllerin betonun kohezyonunu arttırdığını söylemiştir.
- Smith, önermiş olduğu bu yöntemde uçucu kül ile üretilen betonlarda basınç dayanımının ve işlenebilirliğin sabit kalması gerektiğini söylemiştir. Yazara göre uçucu küllü betonların basınç dayanımları, uçucu kül, çimento ve suyun birbirlerine rölatif oranına bağlıdır.
- Bağlayıcı etkinlik yöntemi, puzolanların ve katkı maddelerinin beton içerisinde kullanımında da kullanışlı olmaktadır.
- Diğer karışım oranlama yöntemleri, su ve agrega oranlarından bağımsız olup sadece çıkarılan çimento ve eklenen uçucu kül miktarlarından ibarettir.
- Uçucu küller, ayrışmaya neden olan düşük dayanımlı betonlarda kohezyonu sağlamak, maliyeti düşürmek ve ileriki yaşlarda daha yüksek dayanım elde etmek için kullanılmaktadırlar.

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

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

Ghosh, laboratuvarında yaptığı çalışmada M ve N için sonuçlar elde etmiş ve bunları grafiğe dökmüştür. Bu sonuçlarla karışım oranlamasının yapılabileceği söylenmiştir [16].

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

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

Altı farklı uçucu küllü yaptıkları araştırmalar sonucunda, uçucu küllü betonlarla kontrol betonunun 28. gündeki dayanımına erişmişler, ileriki yaşlarda ise uçucu küllü betonların dayanımlarının kontrol betonundan daha yüksek değerler verdiğini gözlemlemişlerdir. Bütün uçucu küllü numunelerde, kontrol betonunun 28. gündeki dayanımına erişmek için eklenen uçucu kül miktarının çıkarılan çimentodan daha fazla olduğunu ve bu miktarın uçucu külün cinsi ile değiştiğini gözlemlemişlerdir. Uçucu küllerin inceliği arttıkça çıkarılan çimento miktarının da artacağını söylemişlerdir [16].

2.6. Uçucu Küllerde k Etkinlik Faktörü ve Bu Konuda Yapılmış Çalışmalar

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

Munday et al., k etkinlik faktörünün kullanımının pratikte zayıf yönleri olduğunu söylemişlerdir. Bunun nedenlerini de şöyle özetlemişlerdir [16]; k etkinlik faktörü sabit değildir. Kullanılan çimentoya, kür koşullarına ve amaç dayanımını elde etmek için yapılan beton karışım oranlarına göre değişmektedir. İstenilen işlenebilirliği

sağlamak için, çimento ve uçucu külün su ihtiyaçlarının farklı olması ve farklı uçucu küllerin su ihtiyaçlarının farklı olması nedeniyle, agrega içeriğinde ayarlama yapılması gerekmektedir. Bu da yöntemi kullanışsız yapmaktadır. Bu yöntem, her türlü kullanım için karışık ve kullanışsızdır.

Cannon 1968 yılında yaptığı çalışmalarda, Abrams'ın su/çimento oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi kullanarak 28. ve 90. günlerdeki uçucu küllü betonların basınç dayanımlarını kontrol betonun basınç dayanımıyla eşitlemeye çalışmıştır. Bu şekilde ürettiği betonların etkinlik faktörlerinin maliyet açısından uçucu kül ve çimento miktarlarına etkisini incelemiş ve bu veriler ışığında karışım oranlama grafikleri ve tabloları üretmiştir. Lovewell and Washa, Cannon'un yaptığı araştırmaları değerlendirerek, uçucu küllü betonlardaki bağlayıcı madde miktarının kontrol betonlarındaki bağlayıcı madde miktarından fazla olması gerektiğini söylemişlerdir [16].

Harrison yaptığı çalışmada, uçucu kül ve çimento miktarlarının belirlenmesi için üç faktörün önemli olduğunu söylemiştir [70];

En küçük, $(C + k \cdot F)$ miktarı

$C =$ Çimento miktarı (kg/m^3)

$F =$ Uçucu kül miktarı (kg/m^3)

$k =$ Avrupa şartnamesi EN 206'ya göre tasarlanmış etkinlik faktörü

En büyük, $w / (C + k \cdot F)$ oranı

İstenilen beton dayanımı için gerekli olan su/bağlayıcı oranı (R) Tip I çimentosu ile yapılan çalışmada kullanılan uçucu kül için k değerinin 0.3 ile 0.5 aralığında bir değer olduğu belirtilmiştir. Uçucu kül için k değeri çimento içerisinde kullanıldığında 1 olmaktadır. Uçucu külün dayanıma gerçek katkısının eşitlikte yer alması gerekir. Su/etkin bağlayıcı oranı aşağıdaki denklemdeki gibidir [29];

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

Tip I 42.5 çimento ve % 30 uçucu kül kullanılarak üretilen betonlarda, k değerinin 0.2 ile 0.45 aralığında bir değer olduğu bulunmuştur. Uçucu kül kullanımı arttıkça k değeri düşmekte, uçucu kül kullanımı azaldıkça k değeri yükselmektedir [29].

Akman ve Yücel etkinlik faktörünü, uçucu külün bağlayıcılığının çimentonun bağlayıcılığına oranı olarak tanımlamışlar, belirlenmesinde ise Bolomey formülünü kullanmışlardır [61].

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

Burada; f_c betonun basınç dayanımı (MPa), K_B Bolomey katsayısı (MPa), C betondaki çimento dozajını (kg/m^3), W betondaki su miktarını (kg/m^3), h betondaki hava miktarını (dm^3/m^3) ve a ise yaşa ve kür koşullarına bağlı bir katsayıdır. Yazarlar Bolomey formülünün kullanımı için ilk olarak yalnız portland çimentosuyla kontrol betonu üretmişlerdir. Elde edilen basınç dayanımı ile k ve K_B katsayıları bulunmuştur. Uçucu küllü beton üretiminde ise bu katsayıları kullanmışlardır. C çimento miktarı yerine bağlayıcı madde miktarını ifade etmek için $C'(k \cdot f)$ değeri kullanılır. Böylece uçucu kül üretiminde Bolomey formülü şöyle olmaktadır [70,71];

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

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

Uçucu küllü beton üretildikten sonra bilinmeyen tek değer olarak k faktörü kalır. Değerler yerine konularak k faktörü hesaplanır. Bu araştırmanın eleştiriye açık tarafı uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen betonlarda aynı K_B Bolomey katsayısının kullanılmasıdır. Yazarlar, C sınıfı uçucu külleri kullanarak yaptıkları çalışmada, k etkinlik katsayısının siliko ve sülfo-kalsik uçucu küllerde 0.14 ile 0.57 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir [72].

Güler, Bolomey formülünü kullanarak F sınıfı Orhaneli uçucu külüyle yaptığı çalışmada, k etkinlik faktörünün 0.17 ile 0.36 arasında değiştiğini gözlemlemiş, ancak k etkinlik faktörünün değişken olduğunu belirtmiştir [71].

Özcan, yapmış olduğu çalışmada % 10, % 20 ve % 30 oranlarında çimentoyu çıkarıp yerine farklı miktarlarda C ve F sınıfı uçucu küller ekleyerek betonlar üretmiştir. Ürettiği betonlarda Bolomey formülünü kullanarak bulduğu k etkinlik faktörü F ve C sınıfı uçucu küller için sırasıyla 0.62 ve 0.79'dur. Ancak eklenen uçucu kül miktarının çıkarılan çimento miktarından daha az olduğu söylenmiştir. Bu çalışmada gözlemlenen başka bir özellik, C sınıfı uçucu küllerin bağlayıcılıklarının daha fazla olması ve erken yaşlardaki dayanımlarının daha iyi olması nedeniyle k etkinlik faktörlerinin de yüksek olmasıdır [70].

Babu and Rao, k etkinlik faktörünün belirlenmesinde Smith'in de belirtmiş olduğu su/çimento oranının basınç dayanımı ile karşılaştırılmasından yararlanmıştır. Bunun için yalnız çimento kullanılarak üretilmiş beton ile uçucu küllü beton arasındaki su/çimento farkını kullanmışlardır [73].

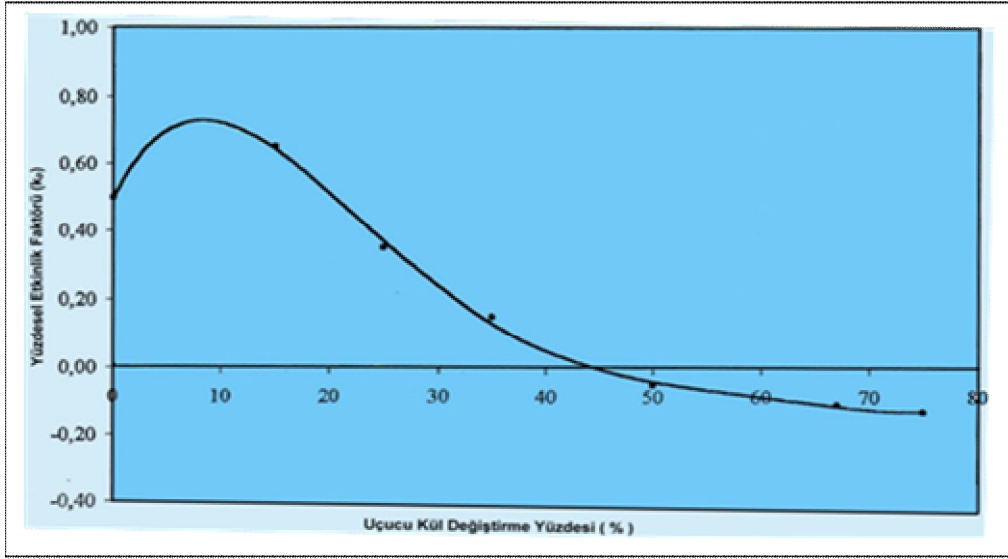
$$\Delta w = (w/c) - [w/(c' + k*f)] = [w/(c' + k*f)] - [w/(c' + f)] \quad (2.8)$$

Δw değerinin belirlenebilmesi için uçucu küllü ve uçucu külsüz betonların su/çimento ve basınç dayanımı değerlerinin arasındaki ilişkiyi gösteren grafiğin çizilmesi gerekmektedir. Uçucu küller için başlangıçta ortalama bir k faktörü bulunmaktadır. k faktörünün (2.8) denkleminde yerini konulması ile Δw_1 değeri elde edilmekte ve uçucu küllü betonun $\sigma - w/(c + k*f)$ (basınç dayanımı – su/bağlayıcı madde) grafiği Δw_1 farkı kadar yerdeğiştirmektedir. Yeni grafikte, farklı yüzdelere uçucu küle sahip betonların her bir uçucu kül yüzdesi için kontrol betonu ile arasındaki su/bağlayıcı madde oranı farkı, Δw_2 değerini oluşturmaktadır [73].

Yazarlar, farklı yüzdelere ve farklı uçucu küller kullanarak ürettikleri betonlarda k faktörünün 0.2 ile 0.8 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Bu değerlerden yola çıkarak ortalama bir değer almışlar (=0.5) ve bunun adına da genel etkinlik faktörü (k_e) demişlerdir. k_e değerinin (2.8) formülünde yerini konulması ile $\sigma - E/w$ grafiği üzerinde ΔE_1 düzeltmesi yapılmaktadır. Yeni grafik üzerindeki her uçucu kül yüzdesi için ayrı ayrı ΔE_2 düzeltmesi yapılmaktadır. Bu düzeltme için (2.8) formülünde k_e faktörüne bir k_p faktörü eklenmektedir. Yazarlar bu k_p faktörünü, yüzdesel etkinlik faktörü olarak tanımlamışlardır. k_e ve k_p faktörlerinin toplamı, her bir uçucu kül

yüzdesi için bir k etkinlik faktörü oluşturmaktadır ($k = k_e + k_p$) [73].

Yazarlar, C ve F sınıfı uçucu külleri % 75, % 67, % 50, % 35, % 25 ve % 15 oranlarında beton içerisinde kullanmışlar ve bu sonuçlar ışığında her bir uçucu kül yüzdesi için k_p değerleri bulmuşlardır. Çalışmaları sonucunda k_p değerinin, uçucu külün yerleştirme oranına göre değiştiğini gözlemlemişler ve bunu Şekil 2.6'da görülen grafikte ifade etmişlerdir. Elde edilen k_p faktörünün diagramına k_e faktörü eklenerek Şekil 2.7'de görülen uçucu külün k etkinlik faktörü belirlenmektedir [73].



Şekil 2.6. Uçucu kül yer değiştirme yüzdesi – etkinlik faktörü diyagramı [73].

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi k etkinlik faktörü, uçucu külün yerleştirme oranına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Yapılmış olan diğer çalışmalarda olduğu gibi uçucu küller için tek bir k etkinlik faktörü değeri belirlemek uygun olmamaktadır. Babu and Rau'nun çalışmalarından elde ettikleri sonuçlar şöyledir [73];

- k etkinlik faktörü için farklı yüzdelerde yerleştirme oranına göre tek bir değer alınamamaktadır. k_e faktörü içinse yapılan ön araştırmalar ve daha önceki araştırmacıların elde ettiği sonuçlar göz önüne alınarak 0.5 değeri alınmaktadır.

- Farklı yerleştirme oranları için farklı k_p değerleri bulunmalı ve bu değerler bütün yerleştirme oranları için aynı kabul edilen k_e değerine eklenerek uçucu külün k etkinlik faktörü belirlenmelidir.
- En büyük k etkinlik değeri % 10 ve % 20 oranları arasında uçucu kül konulması ile elde edilmektedir. Bu oranlarda uçucu kül eklendiğinde 28 günlük basınç dayanımları fazla değişmemektedir.
- Önceki araştırmacıların belirttiği gibi uçucu kül eklenme oranı % 40'a kadar, k etkinlik faktörü kullanılarak dayanımın tahmin edilmesi tutucu değerlerle sonuçlanmaktadır.
- Farklı su/bağlayıcı madde oranlarında ve farklı uçucu kül yerleştirme yüzdelerinde, genel ve yüzdesel etkinlik faktörü kullanılarak betonun basınç dayanımındaki değişimi belirlemek mümkün olmaktadır.

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda farklı etkinlik faktörü değerleri vardır. Smith, 20 farklı uçucu kül ile yaptığı deneylerde 28 günlük basınç dayanımları için 0.231 değerini elde etmiş ve 0.25 değerini optimum etkinlik faktörü için teklif etmiştir. Alman standardı DIN 1045, etkinlik faktörünü 0.30 olarak önermiştir. Avrupa standardı prEN 206 kütlece uçucu kül/çimento oranının 0.33'ten küçük olması gerektiğini belirterek k 'nın CEM I 32.5 çimentosu için 0.2, CEM I 42.5 çimentosu için 0.4 alınmasını önermiştir [68].

Yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde k etkinlik faktörünün belirlenmesi hususunda farklı kabuller yapılmış net bir sonuca varılamamıştır. En önemli nedeni ise k değerinin bağlı olduğu etkenlerdir. Uçucu külün tipi ve kullanım miktarı, çimentonun cinsi ve kullanım miktarı, hedeflenen basınç dayanımı, kür koşulları, agrega, betonun işlenebilirliği, su miktarı ve eklenen kimyasal katkıları k etkinlik faktörünün belirlenmesinde en önemli parametrelerdir.

Tez çalışmasında üç farklı dozaj ve üç farklı uçucu kül eklenme oranına sahip 39 farklı beton serisi üretilmiş, araştırmanın geniş kapsamlı olması hedeflenmiştir. Aynı dayanıma sahip F ve C tipi uçucu kül ikameli ve ikamesiz betonların dayanıklılık hususunda nasıl bir performans gösterdiği mekanik ve dayanıklılık deneyleri yapılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Çalışmanın Amacı

Farklı çimento dozajlarında, farklı çimento çıkarım oranlarına ve uçucu kül eklenme oranlarına göre F ve C tipi uçucu küllerin çimentoya ikame edilmesinin mekanik özelliklerinin değişimi, uçucu kül etkinlik faktörlerinin karşılaştırılması kontrol numunelerle aynı basınç dayanımını veren seriler için dayanıklılığının araştırılması ve karşılaştırmalar yapılması amaçlanmıştır. Bu çalışmada Zonguldak-Çatalağzı Termik Santrali'nden temin edilen F tipi uçucu kül, Çayırhan Termik Santrali'nden temin edilen C tipi uçucu kül ve CEM I 42.5 R çimentosu kullanılmıştır. Uçucu kül, beton karışımına belirli oranlarda çıkarılan çimentonun yerine belirli oranlarda eklenmiştir. Karışımlar eşit işlenebilirliğe sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

3.2. Üretilen Betonların Özellikleri

Numunelerin üretimi İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılmış olup yapılan çalışmalarda toplam 39 seri beton üretilmiştir. Bu 39 seri kendi içinde 3 ana seriye ayrılmış, her seride bir adet külsüz kontrol numune üretilmiştir. Kontrol numuneleri için çimento dozajları 260, 320 ve 400 kg/m³'tür. F ve C tipi uçucu kül ikameli betonlarla tasarlanan serilerde ise betonların 3 tanesinde % 10, diğer 3 tanesinde ise % 17 oranlarında çıkarılan çimento yerine 3 değişik oranda uçucu kül katılmış ve üretilen betonların isimlendirilmeleri Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de verilmiştir.

Üretilen tüm betonlarda CEM I 42.5 R çimentosu ve F ya da C tipi uçucu kül kullanılmıştır. Tüm seriler, eşit işlenebilirlikte (TS EN 206-1'e göre S3 kıvamında ve 14-17 cm çökme miktarında) olacak şekilde tasarlanmıştır. Uçucu küllü karışımlarda,

çıkarılan çimentonun yerine aynı oranda uçucu kül koyulmadığından, toplam bağlayıcı miktarı sabit değildir. Karışımlarda düşük dozajlı (260 ve 320 kg/m³) serilerde çimento ve uçucu kül ağırlıkları toplamının % 1'i kadar orta akışkanlaştırıcı, yüksek dozajlı (400 kg/m³) seride ise çimento ve uçucu kül ağırlıkları toplamının % 1.5'i kadar süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Deneysel çalışma için gerekli agrega granülometrisi ve agreganın türü tüm serilerde aynı tutulmuştur. Tüm serilerde gerekli malzeme miktarları hesaplanmış ve bu verilerle üretim yapılmıştır.

Tablo 3.1. F tipi uçucu kül ikameli betonların kodlanması

BETON KODU	ÇİMENTO (kg/m ³)	EKSİLTİLEN (%)	UÇUCU KÜL (kg/m ³)	EKLENEN (%)
C260 (%0K0)	260	0	0	0
C234F39 (%10K1,5)	234	10	39	15
C234F52 (%10K2)	234	10	52	20
C234F65 (%10K2,5)	234	10	65	25
C216F44 (%17K1)	216	17	44	17
C216F66 (%17K1,5)	216	17	66	25.5
C216F88 (%17K2)	216	17	88	34
C320 (%0K0)	320	0	0	0
C288F32 (%10K1)	288	10	32	10
C288F48 (%10K1,5)	288	10	48	15
C288F64 (%10K2)	288	10	64	20
C266F54 (%17K1)	266	17	54	17
C266F81 (%17K1,5)	266	17	81	25.5
C266F108 (%17K2)	266	17	108	34
C400 (%0K0)	400	0	0	0
C360F40 (%10K1)	360	10	40	10
C360F60 (%10K1,5)	360	10	60	15
C360F80 (%10K2)	360	10	80	20
C332F68 (%17K1)	332	17	68	17
C332F102(%17K1,5)	332	17	102	25.5
C332F136 (%17K2)	332	17	136	34

(C234F52 (%10K2)); 260 dozajlı karışımdan % 10 oranında çimento çıkarılmış, yerine % 20 oranında F tipi uçucu kül eklenmiş demektir.

Tablo 3.2. C tipi uçucu kül ikameli betonların kodlanması

BETON KODU	ÇİMENTO (kg/m ³)	EKSİLTİLEN (%)	UÇUCU KÜL (kg/m ³)	EKLENEN (%)
C260 (%0K0)	260	0	0	0
C234C39 (%10K1,5)	234	10	39	15
C234C52 (%10K2)	234	10	52	20
C234C65 (%10K2,5)	234	10	65	25
C216C44 (%17K1)	216	17	44	17
C216C66 (%17K1,5)	216	17	66	25.5
C21688 (%17K2)	216	17	88	34
C320 (%0K0)	320	0	0	0
C288C32 (%10K1)	288	10	32	10
C288C48 (%10K1,5)	288	10	48	15
C288C64 (%10K2)	288	10	64	20
C266C54 (%17K1)	266	17	54	17
C266C81 (%17K1,5)	266	17	81	25.5
C266C108 (%17K2)	266	17	108	34
C400 (%0K0)	400	0	0	0
C360C40 (%10K1)	360	10	40	10
C360C60 (%10K1,5)	360	10	60	15
C360C80 (%10K2)	360	10	80	20
C332C68 (%17K1)	332	17	68	17
C332C102(%17K1,5)	332	17	102	25.5
C332C136 (%17K2)	332	17	136	34

(C234C52 (%10K2)); 260 dozajlı karışımdan % 10 oranında çimento çıkarılmış, yerine % 20 oranında C tipi uçucu kül eklenmiş demektir.

3.3. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

3.3.1. Çimento

Üretimi yapılan beton serilerinin tamamında, Akçansa Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini gösteren deneyler Akçansa Çimento Fabrikasında yaptırılmış olup, sonuçlar Tablo 3.3, Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'te verilmiştir. Kimyasal analiz TS EN 196-2, fiziksel denemeler TS EN 196-3 ve TS EN 196-6, dayanım denemeleri ise TS EN 196-1 standartlarına uygun yapılmıştır. Çimento TS EN 197-1 standardına uygundur.

Tablo 3.3. CEM I 42.5 çimentonun fiziksel özellikleri

		Sonuç	Standart
Özgül Ağırlık		3.12	
Priz Süresi (Vicat)	Başlama (dakika)	132	> 60
	Bitiş (dakika)	185	
Hacim Genleşmesi (Le Chatelier) (mm)		1	< 10
İncelik	Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /gr)	3.760	
	45 µm elek kalıntısı (%)	5.3	
	90 µm elek kalıntısı (%)	0.2	

Tablo 3.4. CEM I 42.5 çimentonun kimyasal özellikleri

		Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasal Bileşimin Yüzdesi	Standart
		Çözünen SiO ₂	20.63	
		ÇK	0.49	< 5
		Al ₂ O ₃	4.71	
		Fe ₂ O ₃	3.41	
		CaO	63.64	
		MgO	1.24	
		SO ₃	2.98	< 4
		KK	1.25	< 5
		Cl ⁻	0.0357	< 0.1
		Na ₂ O	0.23	
		K ₂ O	0.91	
		Tayin Edilemeyen	0.96	
		Serbest CaO	1.10	
Mineralojik Birleşim		C ₃ S	52.73	
		C ₂ S	19.45	
		C ₃ A	6.72	
		C ₄ AF	10.38	
		LSF	0.94	

Tablo 3.5. CEM I 42.5 çimentonun mekanik özellikleri

Gün	Basınç Dayanımı (MPa)	Standart (MPa)
2	29.1	> 20.0
7	44.0	-
28	56.7	> 42.5 < 62.5

3.3.2. Agregalar

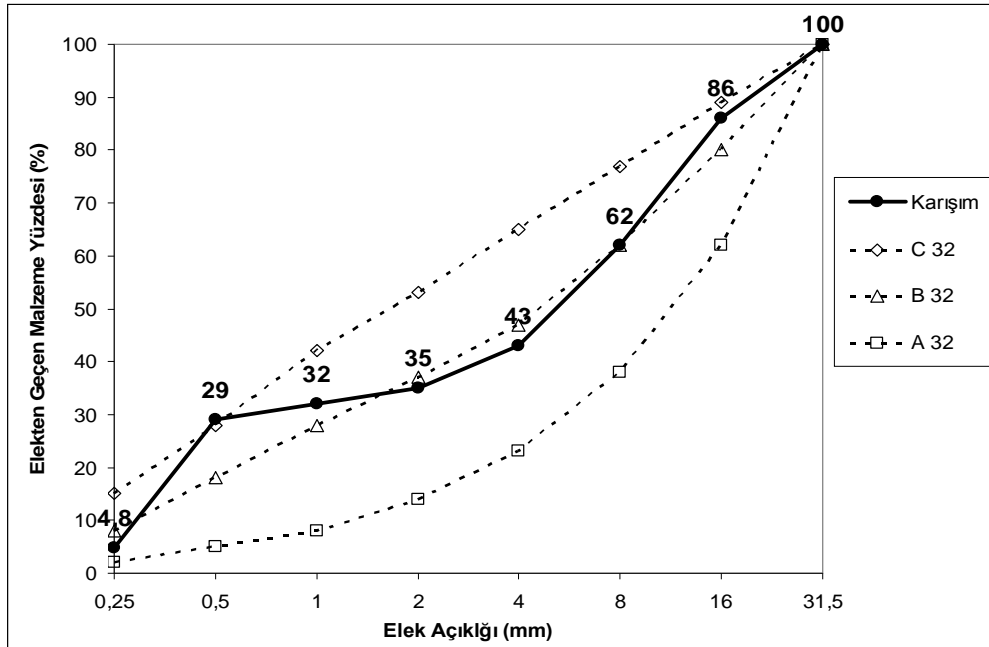
Çalışmada agrega olarak doğal kum, kırma kum, kırmataş I ve kırmataş II kullanılmıştır. Doğal kum Kemerburgaz-Akpınar Köyü'nden, diğer agregalar ise İstanbul-Cebeci yöresi'nden temin edilmiştir. Agregaların birim ağırlıkları TS 3529'a, özgül ağırlıkları ise TS EN 1097-6'ya uygun olarak belirlenmiş, sonuçlar Tablo 3.6'da gösterilmiştir. Deneylerde kullanılan agregaların, TS 3530 EN 933-1'e göre yapılmış elek analizi sonuçları Tablo 3.7'de görülmektedir. Karışım agregasının granülometrisi B32 eğrisine yakın olacak şekilde seçilmiş, granülometri eğrisi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.6. Agregaların birim ağırlık ve özgül ağırlık değerleri

Malzeme	Birim ağırlık (kg/dm ³)	Özgül ağırlık
Doğal kum	1.45	2.66
Kırma kum	1.56	2.69
Kırmataş I	1.45	2.69
Kırmataş II	1.39	2.71

Tablo 3.7. Agregaların elek analizi sonuçları

Agrega Cinsi	Elek Açıklığı (mm)								İncelik Modülü
	Elekten Geçen Malzeme Yüzdesi (%)								
	31.5	16	8	4	2	1	0.5	0.25	
Doğal Kum (% 25)	100	100	100	100	99	99	98	11.6	0.92
Kırma Kum (% 19)	100	100	100	79	47	31	21	10.2	3.12
Kırmataş I (% 29)	100	100	61	11	4	3.4	0.5	0	5.20
Kırmataş II (% 27)	100	49	0.3	0	0	0	0	0	6.51



Şekil 3.1. TS 706 referans ve karışım agregasının granülometri eğrileri

3.3.3. Uçucu küllerin özellikleri

Çalışmada kullanılan uçucu küller, Çayırhan Termik Santralinden elde edilen C tipi uçucu kül ve Çatalağzı Termik Santralinden elde edilen F tipi uçucu küllerdir.

Kullanılan Uçucu küller ASTM C 618'e göre incelendiğinde Çayırhan Termik Santrali C sınıfı puzolan ve Çatalağzı Termik Santrali F sınıfı puzolan olarak kabul edilmektedir. Uçucu küllerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini gösteren deneyler Akçansa Çimento fabrikasında yapılmıştır. Bu deneylere ait veriler, Tablo 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 ve 3.13'de görülmektedir.

Tablo 3.8. Çatalağzı uçucu külünün kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasal Bileşimin Yüzdesi
CaCO ₃ + MgCO ₃	2.55
H ₂ O	0.20
SiO ₂	58.58
Al ₂ O ₃	23.40
Fe ₂ O ₃	6.97
CaO	1.55
MgO	2.76
SO ₃	0.45
Na ₂ O	0.46
K ₂ O	4.11
Klorür (Cl)	0.0319
KK	0.20
Serbest CaO	0.10

Tablo 3.9. Çatalağzı uçucu külünün fiziksel özellikleri

Özgül Ağırlık		1.84
Hacim Sabitliği (Le Chatelier) Toplam (mm)		1
İncelik	Özgül Yüzey (Blaine) cm ² /gr	2.165
	90 um elek üstünde kalan yüzde (%)	15.1
	45 um elek üstünde kalan yüzde (%)	41.4

Tablo 3.10. Çatalağzı uçucu külünün puzolanik aktivitesi

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

Tablo 3.11. Çayırhan uçucu külünün kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasal Bileşimin Yüzdesi
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
KK	0.22
Serbest CaO	0.15
ÇK	-

Tablo 3.12. Çayırhan uçucu külünün fiziksel özellikleri

Özgül Ağırlık		2.34
Hacim Sabitliği (Le Chatelier) Toplam (mm)		1
İncelik	Özgül Yüzey (Blaine) cm ² /gr	2.100
	90 um elek üstünde kalan yüzde (%)	24.8
	45 um elek üstünde kalan yüzde (%)	42.3

Tablo 3.13. Çayırhan uçucu külünün puzolanik aktivitesi

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

3.3.4. Orta akışkanlaştırıcı katkı maddesi özellikleri

Çalışmada yoğunluğu 1,16 kg/dm³ olan, kahverengi sıvı görünümlü olan, pH değeri 5,0-8,0 arasında olan orta akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Orta akışkanlaştırıcı, düşük dozajlı (260 ve 320) ve eşit işlenebilmeli kontrol ve uçucu küllü betonlarda; kontrol betonda çimento, uçucu küllü betonlarda çimento+uçucu kül miktarının % 1'i oranında kullanılmıştır. Tablo 3.14'te orta akışkanlaştırıcı katkı maddesiyle ilgili özellikler verilmiştir.

Tablo 3.14. Orta akışkanlaştırıcı katkı maddesinin özellikleri

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

3.3.5. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi özellikleri

Çalışmada ayrıca, yoğunluğu 1.20 kg/dm³ olan, kahverengi sıvı görünümlü, pH değeri 6.0-8.0 arasında olan süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı, yüksek dozajlı (400) ve eşit işlenebilmeli kontrol ve uçucu küllü betonlarda; kontrol betonda çimento, uçucu küllü betonlarda çimento+uçucu kül miktarının % 1.5'i oranında kullanılmıştır. Tablo 3.15'te süper akışkanlaştırıcı katkı maddesiyle ilgili özellikler verilmiştir.

Tablo 3.15. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin özellikleri

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

3.4. Beton Karışımları

260 kg/m³, 320 kg/m³ ve 400 kg/m³ olmak üzere 3 farklı çimento dozajı seçilmiştir. Bütün serilerde en büyük agrega boyutu, granülometrisi ve işlenebilirlik sabit tutulmuştur. Her dozaj için biri kontrol betonu olmak üzere yedi farklı su/çimento oranında beton üretimi yapılmıştır. Kontrol betonu dışındaki altı serinin üçünden % 10, diğer üçünden % 17 oranında çimento çıkarılmıştır. Çıkan çimentonun yerine; % 10 için % 10, % 15 ve % 20 oranında uçucu kül (sadece 260 kg/m³ dozajında % 15, % 20 ve % 25 oranında uçucu kül eklenmiştir) % 17 için ise % 17, % 25.5 ve % 34 oranında uçucu kül eklenmiştir. Her serisi 40 dm³ üretilen 21 seri beton için 1 m³'e giren gerçek malzeme miktarları Tablo 3.16 ve Tablo 3.17'de verilmiştir.

3.5. Beton Üretimi

Söz konusu beton üretimleri İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Her beton serisi için gerekli beton hesaplanmış, üretimler 45 dm³ kapasiteli düşey eksenli karıştırıcıda yapılmıştır. Eşit işlenebilirliği sağlamak amacı ile her seri için deneme betonları üretilmiş ve karışıma girecek su miktarları önceden bulunmuştur. Agregalar, çimento ve uçucu kül ilk önce kuru olarak iki dakika karıştırılmıştır. Beton üretimi süresince su kaybını engellemek

için, malzemeler mikserle konmadan önce karıştırıcının iç yüzeyi nemlendirilmiştir. Ardından koyulacak suyun dörtte üçü eklenerek iki dakika karıştırılmıştır. Son olarak suyun geri kalan dörtte bir'lik kısmı süper veya orta akışkanlaştırıcı ile karıştırılarak beton karışımına ilave edilmiş ve karışım yeterli kıvama gelene kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Daha sonra numuneler önceden yağlanmış olan kalıplara yerleştirilmiştir. Numuneler kalıplara kısım kısım yerleştirilmiştir. Her bir kısım kalıba yerleştirildikten sonra beşer saniye, toplamda on saniye sarsma tablasında vibrasyon uygulanarak betonun iyi bir şekilde yerleşmesi sağlanmıştır.

Toplam altı adet 15 cm boyutlu küp, altı adet 10/20 cm boyutlu silindir ve altı adet 7/7/28 cm boyutlu prizma numune 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmış ve 23 ± 2 0C su dolu kür havuzu içerisinde saklanmıştır. 28. ve 90. günler sonunda numuneler kür havuzundan alınarak sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır.

Tablo 3.16. F tipi uçucu kül ile üretilen betonların gerçek bileşimleri (1m³ betona giren malzemeler)

BETON KODU	Doğal Kum (kg)	Kırma Kum (kg)	Kırmataş I (kg)	Kırmataş II (kg)	Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	Katkı (kg)	Su (kg)	Çökme (cm)	Hava Boşluğu (%)	Birim Ağırlık(kg/dm ³)	Su/Çim+UK	Kompasite (m ³ /m ³)
C260	464	357	544	511	265	0	2.65	195	15.5	2	2.34	0.74	0.783
C234F39	454	349	533	499	241	40	2.81	195	16	2.1	2.31	0.69	0.782
C234F52	450	346	527	495	241	54	2.95	196	15.5	1.9	2.31	0.67	0.783
C234F65	442	340	518	486	242	67	3.09	197	14	2.2	2.3	0.64	0.778
C216F44	453	348	531	498	224	46	2.69	196	15.5	2.4	2.3	0.73	0.778
C216F66	450	346	528	495	221	68	2.89	196	14	1.7	2.31	0.68	0.785
C216F88	439	338	515	483	221	90	3.11	197	14	2	2.29	0.63	0.780
C320	448	344	525	492	331	0	3.31	198	16.5	2	2.34	0.60	0.779
C288F32	456	350	535	501	289	32	3.21	186	15.5	1.6	2.35	0.58	0.795
C288F48	445	342	521	489	293	49	3.42	192	15	1.6	2.34	0.56	0.789
C288F64	431	331	505	474	296	66	3.62	201	14.5	1.8	2.31	0.56	0.778
C266F54	442	340	518	486	273	55	3.29	196	14.5	1.9	2.31	0.60	0.782
C266F81	427	328	501	469	274	84	3.58	201	16	2.1	2.29	0.56	0.775
C266F108	416	320	488	458	274	111	3.85	203	16	2	2.27	0.53	0.774
C400	441	339	518	486	409	0	6.13	170	15	3	2.37	0.42	0.795
C360F40	447	344	525	492	361	40	6.02	160	17	2.5	2.38	0.40	0.810
C360F60	437	336	513	481	360	60	6.31	162	17	2.7	2.36	0.39	0.806
C360F80	427	328	501	470	362	81	6.64	170	17	2.2	2.35	0.38	0.802
C332F68	440	338	516	484	336	69	6.07	165	16	2.4	2.35	0.41	0.806
C332F102	428	329	502	471	335	103	6.58	164	17	2.4	2.34	0.37	0.807
C332F136	398	306	467	438	341	140	7.21	180	15.5	3	2.28	0.37	0.784

Tablo 3.17. C tipi uçucu kül ile üretilen betonların gerçek bileşimleri (1m³ betona giren malzemeler)

BETON KODU	Doğal Kum (kg)	Kırma Kum (kg)	Kırmataş I (kg)	Kırmataş II (kg)	Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	Katkı (kg)	Su (kg)	Çökme (cm)	Hava Boşluğu (%)	Birim Ağırlık(kg/dm ³)	Su/Çim+UK	Kompozite (m ³ /m ³)
C260	464	357	544	511	265	0	2.65	195	15.5	2	2.34	0.74	0.783
C234UKC39	462	355	542	508	238	40	2.78	188	14.5	2	2.34	0.68	0.788
C234UKC52	459	353	538	505	239	54	2.92	187	15.5	2.1	2.34	0.64	0.789
C234UKC65	458	352	537	504	238	67	3.04	180	14.5	2.4	2.33	0.59	0.793
C216UKC44	464	357	544	511	221	45	2.66	188	14	2.2	2.34	0.71	0.788
C216UKC66	460	353	539	506	220	68	2.87	188	15	1.9	2.35	0.66	0.790
C216UKC88	461	354	540	507	218	89	3.07	177	15	2	2.29	0.58	0.801
C320	448	344	525	492	331	0	3.31	198	16.5	2	2.34	0.60	0.779
C288UKC32	451	346	529	496	296	33	3.29	188	15.5	1.8	2.34	0.59	0.787
C288UKC48	443	341	520	488	296	49	3.45	192	16.5	2.2	2.33	0.56	0.783
C288UKC64	449	345	527	495	291	65	3.56	182	15	1.8	2.36	0.51	0.797
C266UKC54	454	349	533	500	269	55	3.24	183	14.5	1.9	2.35	0.57	0.793
C266UKC81	444	341	521	488	270	83	3.52	187	17	2.1	2.34	0.53	0.789
C266UKC108	431	331	505	474	276	112	3.88	193	17	2	2.33	0.50	0.784
C400	441	339	518	486	409	0	6.13	170	15	3	2.37	0.42	0.795
C360UKC40	444	341	521	489	363	40	6.05	168	16	2.5	2.37	0.42	0.802
C360UKC60	435	334	510	479	365	60	6.38	174	15	2.3	2.36	0.41	0.797
C360UKC80	436	335	511	480	362	81	6.64	166	15.5	2.2	2.38	0.38	0.806
C332UKC68	448	345	526	493	332	68	6.00	161	16	2.4	2.38	0.40	0.810
C332UKC102	428	329	502	471	337	103	6.60	174	14	2.4	2.35	0.40	0.796
C332UKC136	424	326	498	467	333	137	7.04	161	17	3	2.35	0.34	0.803

Her seride istenilen işlenebilirliği sağlamak ve su ihtiyacını belirlemek için 10 dm³'lük deneme betonları üretilmiştir. Deneme betonlarında istenilen çökme değerine ulaşıncaya kadar deneyler devam etmiştir. Karışım için gerekli olan su miktarları bulunduktan sonra 40 dm³'lük asıl betonlar dökülmüştür. Her seride işlenebilirliğin belirlenebilmesi için çökme konisiyle ölçüm yapılmış, hava boşluğunun bulunması için hava ölçüm aletiyle ölçüm yapılmış ve 5.5 dm³'lük kapla taze betonun ağırlığı ölçülerek taze beton birim ağırlığı hesaplanmıştır. Üretilmiş olan karışımların birim ağırlıklarının belirlenmesi sonucu karışımdaki gerçek malzeme miktarları, hava ve kompasite değerleri bulunmuştur.

3.6. Taze Beton Deneyleri

3.6.1. Birim ağırlık deneyi

Hazırlanan betonlarda kullanılan gerçek malzeme miktarlarını hesaplanabilmesi için 5.7 lt hacmindeki birim ağırlık kabı ile betonda birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Hazırlanan beton birim ağırlık kabına yerleştirilmiş ve tartım sonucunda çıkan ağırlıktan kabın darası düşülerek, kabın hacmine bölünmüş ve birim ağırlıklar hesaplanmıştır.

3.6.2. Çökme deneyi

Çökme deneyinde Abrams çökme konisi kullanılarak beton karışımının 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.

3.6.3. 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.

3.7. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri 15 cm boyutlu küp numunelerde, 10/20 cm boyutlu silindir numunelerde ve 7/7/28 cm boyutlu prizma numunelerde yapılmıştır. Numunelerin hepsi deney gününe kadar 23 ± 2 °C suda saklanmıştır.

Küp ve silindir numunelerde 28. ve 90. günlerde öncelikle birim ağırlık belirlenmiş, ardından ultrases ve basınç deneyi yapılmıştır. Silindir numunelerde ayrıca elastisite modülü belirlenmiştir.

3.7.1. Basınç dayanımı deneyi

Küp ve silindir numunelerde 28. ve 90. günlerde TS EN 12390-3'a uygun olarak basınç deneyi yapılmış, kırma yükü belirlenmiştir. Basınç dayanımı, kırma yükünün basınç yükünün uygulandığı kesit alanına oranlanması ile hesaplanmıştır.

3.7.2. Eğilme dayanımı deneyi

Eğilme deneyi Şekil 3.2'de gösterildiği gibi 7/7/28 cm boyutundaki prizma numunelerde TS EN 196-1'e uygun olarak yapılmış, eğilmede çekme dayanımı (f_e , MPa) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$f_e = 1.5(P \cdot L)/b^3$$

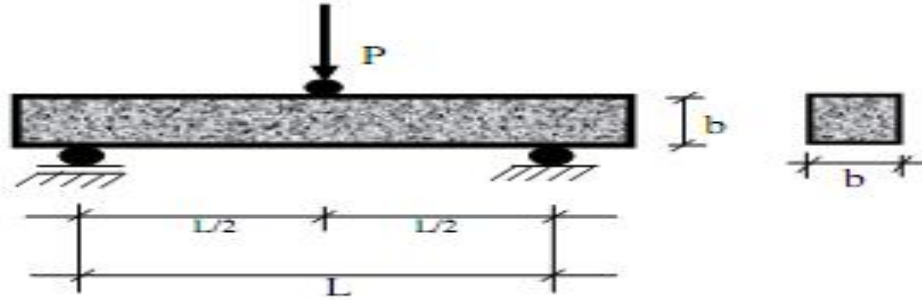
Burada;

b = Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (mm)

P = Prizmanın açıklık ortasına uygulanmış olan kırılma kuvveti (N)

L = Destek prizmaların eksenleri arasındaki uzaklık (mm)

f_e = Eğilmede çekme dayanımı (MPa)



Şekil 3.2. Eğilme deneyi

3.7.3. Elastisite modülü deneyi

Elastisite modülünün belirlenmesi amacı ile silindir numunelerde yapılan basınç deneyinde ölçülen ve kaydedilen boy değişimi, yük değerlerinden gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) ilişkisi çizilmiş, bu ilişkide basınç dayanımının 3'te 1'lik değerine kadar olan bölge lineer kabul edilmiş, her bir seri için elastisite modülü (E , MPa) lineer bölgenin eğiminden belirlenmiştir.

3.7.4. Ultrases geçiş hızı deneyi

Ses geçiş süresi (t , μs), frekansı 55 kHz olan BS 1881 Part 1'e uygun PUNDIT tipi ultrases aleti ile doğrudan ölçüm yöntemi ile ölçülmüştür. Her numunede problar yer değiştirilerek ölçüm iki kez tekrarlanmış, ses geçiş hızları (V , mm/ μs), numunenin ölçüm yapılan boyunun ses geçiş süresine oranlanması ile hesaplanmıştır.

3.8. Dayanıklılık Deneyleri

3.8.1. Kılcal su emme deneyi

Kılcallık katsayısı, 10/20 cm boyutlu silindir numunelerde 90. günde belirlenmiştir. Deney gününe kadar kür havuzunda bekletilen numunelerde etüv kurusu hale getirildikten sonra kuru ağırlıklar belirlenmiş, başlangıç anından itibaren 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64 ve 81. dakikalarda numuneler tartılarak kılcallık yoluyla emilen su miktarları belirlenmiştir. Kılcallık katsayısı aşağıdaki bağıntıdan elde edilmiştir.

$$q = \sqrt{k \cdot t}$$

$$m = (q \cdot \sqrt{t})$$

Bu denklemde;

k :Kılcallık katsayısı (cm²/dak)

q : Birim alanda emilen su miktarı (Q/A) g/cm²

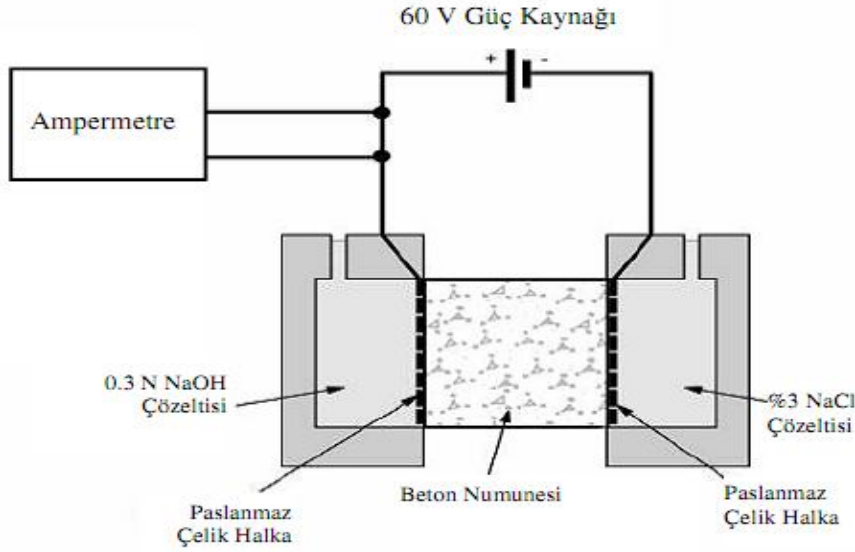
t : süre (dak)

m: doğrunun eğimi olarak gösterilmektedir.

3.8.2 Hızlı klorür geçirimliliği deneyi

ASTM 1202-97 standardına göre yapılan hızlı klorür geçirimliliği deneyi için, 100 mm çapında, 200 mm yüksekliğindeki silindir numuneler kullanılmıştır. Kür süresi olan 90 gün dolduğunda, numunelerin üst ve alt kısımlarından 20'şer mm kesildikten sonra 3 eşit parçaya kesilerek kalınlıkları 50 mm çapları 100 mm olan üç adet silindir elde edilmiştir. Kesim işleminin ardından numunelerin etrafı elektrik akımının geçmesini önlemek amacıyla sikaflex-PRO 3 WF Poliüretan mastik ile kaplanmıştır. Daha sonra vakum haznesine konulan numuneler 3 saat süre ile 1 mm Hg'den daha düşük basıncın altında bekletildikten sonra haznenin içerisine mevcut basınç değişmeden saf su doldurulmuş ve 1 saat süre ile bu şekilde vakum işlemine devam edilmiştir. Vakumlama işleminin ardından numuneler 18±2 saat süre ile saf suda bekletilmiştir. Deney için hücrelere yerleştirilen numunelerin etraflarına, çözeltilerin sızmasının engellenmesi için çabuk kuruyan silikon sürülmüştür. Silikonun kurumasının ardından hücrelerin birine % 3'lük NaCl çözeltisi, diğerine 0.3N NaOH çözeltisi doldurulmuş ve 60 voltluk gerilim uygulanmıştır. Düzeneğe akım verilmesi

ile birlikte ilk ölçüm yapılmış ve 6 saat süre ile her 30 dakikada bir devreden geçen akım ölçülmüştür. Ölçülen amper değerleri Coulomb'a dönüştürülerek sonuçlar elde edilmiştir .



Şekil 3.3. Klor geçirimliliği düzeneği

3.8.3. Donma-çözülme deneyi

F ve C Tipi uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz kontrol betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması sonucu yaklaşık aynı basınç dayanımını veren serilerde, donma-çözülme deneyi 7/7/28 cm boyutlu 3'er adet prizma numunede yapılmıştır. Bu numunelerde donma-çözülme çevrimine başlamadan ve çevrim sona erdikten sonra ağırlık ve ultrases geçiş süresi okumaları yapılmış, çevrim sona erdikten sonra eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Donma-çözülme deneyinde, bir çevrimde numuneler gece -20°C 'de dondurulmuş, 30 dakika havada, 2 saat 20°C sıcaklıktaki suda çözülmüş, her bir serideki numuneye toplam 70 çevrim uygulanmıştır. Donma-çözülme etkisinde kalan numunelerde meydana gelen dayanım kaybı aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$\text{Donma-Çöz. Dayanım Kaybı (\%)} = \left(\frac{\sigma_{d\check{c}k} - \sigma_{d\check{c}\check{c}}}{\sigma_{d\check{c}k}} \right) * 100$$

Burada $\sigma_{d\check{c}k}$, $\sigma_{d\check{c}\check{c}}$ sırasıyla donma-çözülme karşılaştırma ve çevrim numunelerinin eğilme dayanımlarıdır.

3.8.4. Sülfat etkisi deneyi

Farklı bileşimlerdeki F ve C Tipi uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz kontrol betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması sonucu yaklaşık aynı basınç dayanımını veren seriler için deney numunelerinin sülfat dirençlerini belirlemek amacıyla 7/7/28 cm'lik prizma numuneler, sülfat etkisi deneyleri için % 15 MgSO₄ çözeltisi içerisinde 1 yıl boyunca bekletilmiştir. Zamanla deney numunelerinin bünyesinde bulunan kirecin çözünmesi nedeniyle çözeltilerin pH değerleri yükselmiştir. Bu yüzden çözeltiler 30 günde bir yenilenmiştir. Her seri için 3 adet numuneye boy değişimlerinin ölçülmesi için 2 adet pim yerleştirilmiş, bu numuneler MgSO₄ çözeltisine maruz bırakılmış, ayrıca karşılaştırma yapmak amacıyla 3 adet numune de 23±2 °C sıcaklıkta kirece doymun su içerisinde bekletilerek 1 yıl boyunca standart küre tabi tutulmuştur. Deney numuneleri üretim tarihinden itibaren 90. günde sülfat etkisine maruz bırakılmıştır. Numunelerin sülfat etkisine maruz bırakılmadan önce ağırlıkları ölçülmüş ve ayda bir MgSO₄ çözeltisi içerisinde çıkarılarak ağırlık değişimleri ve pimler arası boy değişimleri takip edilmiştir. Numuneler 1 yıl boyunca MgSO₄ çözeltisi içerisinde bekletildikten sonra, ağırlık, boy değişimi ve eğilme dayanımı değişimleri belirlenmiş, bu değerler normal su içerisinde bekletilen numunelerden elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda farklı bileşimlerde üretilen deney numunelerinin sülfatlı ortamlara maruz bırakıldıklarında nasıl bir performans gösterdiği belirlenmiştir.

BÖLÜM 4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Her seride taze betonda çökme ve birim ağırlık belirlenmiş, hava boşluğu ölçülmüş, taze beton deney sonuçları Tablo 4.1 ve 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların taze beton deney sonuçları

Beton Tipi	Çimento (kg/m ³)	Çıkarılan (%)	Uçucu Kül (kg/m ³)	Eklenen (%)	Su (kg)	Hava Boşluğu (%)	Çökme (cm)
C260 (%0K0)	260	0	0	0	199	2.0	15.5
C234F39 (%10K1.5)	234	10	39	15	195	2.1	16.0
C234F52 (%10K2)	234	10	52	20	196	1.9	15.5
C234F65 (%10K2.5)	234	10	65	25	197	2.2	14.0
C216F44 (%17K1)	216	17	44	17	196	2.4	15.5
C216F66 (%17K1.5)	216	17	66	25.5	196	1.7	14.0
C216F88 (%17K2)	216	17	88	34	197	2.0	14.0
C320 (%0K0)	320	0	0	0	205	2.3	15.5
C288F32 (%10K1)	288	10	32	10	186	1.6	15.5
C288F48 (%10K1.5)	288	10	48	15	192	1.6	15.0
C288F64 (%10K2)	288	10	64	20	201	1.8	14.5
C266F54 (%17K1)	266	17	54	17	196	1.9	14.5
C266F81 (%17K1.5)	266	17	81	25.5	201	2.1	16.0
C266F108 (%17K2)	266	17	108	34	203	2.0	16.0
C400 (%0K0)	400	0	0	0	172	3.0	15.0
C360F40 (%10K1)	360	10	40	10	160	2.5	17.0
C360F60 (%10K1.5)	360	10	60	15	162	2.7	17.0
C360F80 (%10K2)	360	10	80	20	170	2.2	17.0
C332F68 (%17K1)	332	17	68	17	165	2.4	16.0
C332F102(%17K1.5)	332	17	102	25.5	164	2.4	17.0
C332F136 (%17K2)	332	17	136	34	180	3.0	15.5

Tablo 4.2. C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların taze beton deney sonuçları

Beton Tipi	Çimento ₃ (kg/m ³)	Çıkarılan (%)	Uçucu Kül ₃ (kg/m ³)	Eklenen (%)	Su (kg)	Hava Boşluğu (%)	Çökme (cm)
C260 (%0K0)	260	0	0	0	199	2.0	15.5
C234C39 (%10K1.5)	234	10	39	15	188	2.0	14.5
C234C52 (%10K2)	234	10	52	20	187	2.1	15.5
C234C65 (%10K2.5)	234	10	65	25	180	2.4	14.5
C216C44 (%17K1)	216	17	44	17	188	2.2	14.0
C216C66 (%17K1.5)	216	17	66	25.5	188	1.9	15.0
C216C88 (%17K2)	216	17	88	34	177	2.0	15.0
C320 (%0K0)	320	0	0	0	205	2.3	15.5
C288C32 (%10K1)	288	10	32	10	194	1.8	15.5
C288C48 (%10K1.5)	288	10	48	15	192	2.2	16.5
C288C64 (%10K2)	288	10	64	20	182	1.8	15.0
C266C54 (%17K1)	266	17	54	17	185	1.9	14.5
C266C81 (%17K1.5)	266	17	81	25.5	187	2.1	17.0
C266C108 (%17K2)	266	17	108	34	193	2.0	17.0
C400 (%0K0)	400	0	0	0	172	3.0	15.0
C360C40 (%10K1)	360	10	40	10	168	2.5	16.0
C360C60 (%10K1.5)	360	10	60	15	175	2.3	15.0
C360C80 (%10K2)	360	10	80	20	166	2.2	15.5
C332C68 (%17K1)	332	17	68	17	161	2.4	16.0
C332C102(%17K1.5)	332	17	102	25.5	174	2.4	14.0
C332C136 (%17K2)	332	17	136	34	161	3.0	17.0

4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

4.2.1. Basınç dayanımı

Basınç deneyi 15 cm boyutlu küp ve 10/20 cm boyutlu silindir numunelerde 28. ve 90. günlerde yapılmış, sonuçlar Tablo 4.3 ve 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.3. F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların basınç dayanımı değerleri

Beton Kodu	Basınç Dayanımları (MPa)		
	Küp		Silindir
	28. Gün	90. Gün	28.Gün
<u>C260</u>	40.20	46.20	39.10
C234F39	38.75	44.45	34.59
C234F52	40.25	47.87	39.67
C234F65	39.25	46.93	36.93
C216F44	36.49	44.55	33.53
C216F66	38.14	46.21	34.74
C216F88	40.06	48.39	36.85
<u>C320</u>	47.81	54.80	46.70
C288F32	46.81	55.02	43.41
C288F48	47.93	57.31	44.36
C288F64	46.69	54.76	46.17
C266F54	45.90	52.33	41.14
C266F81	46.23	53.95	44.30
C266F108	47.52	55.76	45.96
<u>C400</u>	60.49	72.30	54.50
C360F40	57.76	71.65	52.47
C360F60	61.10	75.06	57.80
C360F80	63.31	73.42	59.90
C332F68	55.27	69.79	51.19
C332F102	58.44	71.72	55.67
C332F136	61.12	74.94	60.41

Tablo 4.4. C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların basınç dayanımı değerleri

Beton Kodu	Basınç Dayanımları (MPa)		
	Küp		Silindir
	28. Gün		28. Gün
<u>C260</u>	40.20	46.20	39.10
C234UKC39	40.50	47.00	40.70
C234UKC52	41.30	49.50	41.12
C234UKC65	42.50	50.10	43.20
C216UKC44	38.71	45.20	31.70
C216UKC66	39.82	46.40	37.35
C216UKC88	41.21	48.70	42.00
<u>C320</u>	47.81	54.80	46.70
C288UKC32	48.60	55.90	47.90
C288UKC48	50.81	57.50	48.61
C288UKC64	50.50	56.90	51.60
C266UKC54	48.20	55.50	47.70
C266UKC81	50.50	57.40	49.30
C266UKC108	51.20	59.81	49.88
<u>C400</u>	60.49	72.30	54.50
C360UKC40	57.90	68.90	53.50
C360UKC60	60.80	72.80	57.63
C360UKC80	63.20	73.80	61.60
C332UKC68	58.80	68.60	57.80
C332UKC102	60.10	72.00	58.81
C332UKC136	62.90	73.10	61.00

4.2.2. Ultrases geçiş hızı

Ultrases geçiş hızı 15 cm boyutlu küp ve 10/20 cm boyutlu silindir numunelerin 28. ve 90. günlerinde hesaplanmış, sonuçlar Tablo 4.5 ve 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.5. F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların ultrases geçiş hızı değerleri

Beton Kodu	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)		
	Küp		Silindir
	28. Gün	90. Gün	28.Gün
C260	5.08	5.13	4.79
C234F39	5.30	5.37	4.95
C234F52	5.44	5.50	5.13
C234F65	5.36	5.43	5.01
C216F44	5.49	5.55	5.08
C216F66	5.36	5.44	5.06
C216F88	5.50	5.57	5.19
C320	5.17	5.22	4.92
C288F32	5.57	5.62	5.30
C288F48	5.51	5.58	5.25
C288F64	5.49	5.55	5.23
C266F54	5.67	5.73	5.40
C266F81	5.92	5.96	5.64
C266F108	5.85	5.89	5.57
C400	5.26	5.31	5.06
C360F40	5.88	5.94	5.71
C360F60	5.94	6.00	5.77
C360F80	6.21	6.27	6.09
C332F68	6.07	6.13	5.89
C332F102	6.21	6.29	6.09
C332F136	5.92	5.98	5.80

Tablo 4.6. C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların ultrases geçiş hızı değerleri

Beton Kodu	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)		
	Küp		Silindir
	28. Gün	90. Gün	28.Gün
<u>C260</u>	5.08	5.13	4.79
C234UKC39	5.43	5.46	5.12
C234UKC52	5.49	5.53	5.18
C234UKC65	5.51	5.54	5.20
C216UKC44	5.60	5.65	5.23
C216UKC66	5.24	5.29	5.94
C216UKC88	5.26	5.32	4.96
<u>C320</u>	5.17	5.22	4.92
C288UKC32	5.26	5.29	5.01
C288UKC48	5.30	5.34	5.10
C288UKC64	5.38	5.42	5.17
C266UKC54	5.86	5.89	5.58
C266UKC81	5.89	5.95	5.66
C266UKC108	5.34	4.98	5.13
<u>C400</u>	5.26	5.31	5.06
C360UKC40	5.72	5.67	5.50
C360UKC60	5.84	5.85	5.67
C360UKC80	5.92	5.98	5.80
C332UKC68	5.87	5.94	5.70
C332UKC102	5.82	5.89	5.71
C332UKC136	5.75	5.85	5.64

4.2.3. Elastisite modülü hesabı

Elastisite modülü hesabı 10/20 cm boyutlu silindir numunelerde 28. günde yapılmış, sonuçlar Tablo 4.7 ve 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.7. C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların elastisite modülü değerleri

Beton Kodu	Elastisite Modülü (MPa)
	Silindir
	28.Gün
<u>C260</u>	35970
C234F39	34890
C234F52	35650
C234F65	34950
C216F44	32790
C216F66	33060
C216F88	34960
<u>C320</u>	37820
C288F32	36850
C288F48	38120
C288F64	37955
C266F54	37310
C266F81	37845
C266F108	38115
<u>C400</u>	42645
C360F40	41890
C360F60	43645
C360F80	42655
C332F68	36220
C332F102	40450
C332F136	43630

Tablo 4.8. C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların elastisite modülü değerleri

Beton Kodu	Elastisite Modülü (MPa)
	Silindir
	28.Gün
C260	35970
C234UKC39	36310
C234UKC52	36915
C234UKC65	37660
C216UKC44	33030
C216UKC66	34010
C216UKC88	36010
C320	37820
C288UKC32	37255
C288UKC48	37920
C288UKC64	36890
C266UKC54	38110
C266UKC81	39700
C266UKC108	40620
C400	42645
C360UKC40	42590
C360UKC60	42010
C360UKC80	42890
C332UKC68	40490
C332UKC102	42500
C332UKC136	43620

4.2.4. Etkinlik faktörünün (k) belirlenmesi

Uçucu küllü betonlarda k etkinlik faktörünün belirlenmesi için Bolomey formülleri kullanılmıştır. Etkinlik faktörü sadece 28 ve 90 günlük kontrol betonların basınç dayanımına alttan ve üstten en yakın basınç dayanımındaki F ve C tipi uçucu küllü serilerde hesaplanmıştır, Tablo 4.9 ve 4.10'da kontrol betonunun basınç dayanımına yakın değerler alan seriler altı çizilerek gösterilmiştir.

Tablo 4.9. C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol küp betonların en yakın basınç dayanımı veren altı çizilmiş değerleri

SIRA NO	BETON KODU	BASINÇ DAYANIMLARI (MPa)	
		KÜP	
		28. GÜN	90. GÜN
1	<u>C260</u>	<u>40.2</u>	<u>46.2</u>
2	C234UKC39	40.5	47.00
3	C234UKC52	41.30	49.50
4	C234UKC65	42.5	50.10
5	C216UKC44	38.70	45.20
6	<u>C216UKC66</u>	<u>39.80</u>	<u>46.40</u>
7	C216UKC88	41.20	48.70
8	<u>C320</u>	<u>47.81</u>	<u>54.8</u>
9	<u>C288UKC32</u>	<u>48.60</u>	<u>55.9</u>
10	C288UKC48	50.80	57.50
11	C288UKC64	50.50	56.90
12	<u>C266UKC54</u>	<u>48.20</u>	<u>55.5</u>
13	C266UKC81	50.50	57.40
14	C266UKC108	51.20	59.80
15	<u>C400</u>	<u>60.5</u>	<u>72.3</u>
16	C360UKC40	57.9	68.9
17	<u>C360UKC60</u>	<u>60.8</u>	<u>72.8</u>
18	C360UKC80	63.2	73.8
19	C332UKC68	58.8	68.6
20	<u>C332UKC102</u>	<u>60.10</u>	<u>72.00</u>
21	C332UKC136	62.90	73.10

Tablo 4.10. F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol küp betonların en yakın basınç dayanımı veren altı çizilmiş değerleri

SIRA NO	BETON KODU	BASINÇ DAYANIMLARI (MPa)	
		KÜP	
		28. GÜN	90. GÜN
1	C260	40.20	46.20
2	C234F39	38.75	44.45
3	C234F52	40.25	47.87
4	C234F65	39.25	46.93
5	C216F44	36.49	44.55
6	C216F66	38.14	46.21
7	C216F88	40.06	48.39
8	C320	47.81	54.8
9	C288F32	46.81	55.02
10	C288F48	48.23	57.31
11	C288F64	46.69	54.76
12	C266F54	45.90	52.33
13	C266F81	46.23	53.95
14	C266F108	47.52	55.76
15	C400	60.50	72.30
16	C360F40	57.76	71.65
17	C360F60	61.10	75.06
18	C360F80	63.31	73.42
19	C332F68	55.27	69.79
20	C332F102	58.44	71.72
21	C332F136	61.12	74.94

4.2.4.1. Bolomey formülü kullanılarak k etkinlik katsayısının hesaplanması

Bolomey formülü:

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

Buradan K_B çekilirse:

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

İlk olarak 3 adet kontrol numunede (4.4) formülü kullanılarak, her seri için kullanılacak Bolomey katsayıları hesaplanmıştır. Diğer bilinmeyen olan a katsayısı yaş ve kür şartları göz önünde bulundurularak 0.5 olarak alınmıştır.

Kontrol numuneleri için kullanılan Bolomey formülünde;

K_B : Kontrol betonun ve ona ait serinin Bolomey katsayısı (MPa)

f_c : Kontrol betonun basınç dayanımı (MPa)

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

W : Kontrol betonun su miktarı (kg/m^3)

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

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

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

Uçucu küllü betonlarda Bolomey formülü:

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

Buradan k çekilirse:

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

Bu formülde;

f_c' : Uçucu küllü betonun basınç dayanımı (MPa)

K_B : Kontrol betonun Bolomey katsayısı (MPa)

a : Yaşa ve küre bağlı bir katsayı (0.5 alınmıştır)

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

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

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

F : Uçucu kül miktarı (kg/m^3)

k : Uçucu külün etkinlik katsayısıdır.

Bolomey katsayıları Tablo 4.11'de, k etkinlik katsayıları ise Tablo 4.12'de verilmiştir.

Tablo 4.11. 28 ve 90 günlük uçucu külsüz betonlar için bulunan Bolomey katsayıları

Çimento Dozajı (kg/m ³)	Bolomey Katsayıları K_B	
	28 Günlük	90 Günlük
260	54.876	63.067
320	46.884	53.738
400	39.159	46.796

Tablo 4.12. F ve C tipi uçucu kül ikameli betonlar için bulunan 28 ve 90 günlük k etkinlik faktörü değerleri

Kontrol Betonunun Çimento dozajı	28 Günlük Etkinlik Değerleri				90 Günlük Etkinlik Değerleri			
	%10 Çimento Çıkarılmış C TİPİ	%10 Çimento Çıkarılmış F TİPİ	%17 Çimento Çıkarılmış C TİPİ	%17 Çimento Çıkarılmış F TİPİ	%10 Çimento Çıkarılmış C TİPİ	%10 Çimento Çıkarılmış F TİPİ	%17 Çimento Çıkarılmış C TİPİ	%17 Çimento Çıkarılmış F TİPİ
	260	0.488	0.449	0.516	0.512	0.525	0.552	0.548
320	0.530	0.470	0.605	0.575	0.552	0.587	0.622	0.623
400	0.621	0.543	0.659	0.658	0.631	0.619	0.667	0.719

4.2.5. Kılcal su emme deneyi

Kılcallık katsayısı 10/20 cm boyutlu silindir numunelerde 28. günde yapılmış, sonuçlar Tablo 4.13'de verilmiştir.

Tablo 4.13. F ve C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların kılcallık katsayısı

Beton Kodu	Kılcallık katsayısı 10^{-6} (cm ² /dak)
C260	176.6
C320	147.4
C400	27.5
C234UKC39	125.1
C216UKC66	44.6
C288UKC32	100.6
C266UKC54	32.4
C360UKC60	20.7
C332UKC102	15.5
C234F52	113.5
C216F88	90.1
C288F48	100.5
C266F108	22.2
C360F60	29.1
C332F136	14.1

4.2.6. Hızlı klorür geçirimsizliği deneyi

Hızlı klor geçirimsizliği deneyi ASTM C 1202'ye uygun olarak yapılmıştır. ASTM C 1202'de ayrıca geçen elektriksel yük miktarına bağlı olarak klor iyonu geçirimsizliği yönünden yüksek, orta, düşük, çok düşük ve ihmal edilebilir şeklinde bir değerlendirme yapılabilmektedir (Tablo 4.14). Hızlı klor geçirimsizliği deneyi 10/20 cm boyutlu silindir numuneler üzerinde 90. günde yapılmış, sonuçlar Tablo 4.15'de verilmiştir.

Tablo 4.14. Klor geçirimsizliği değerlerine göre sınıflandırma [74]

Geçen Elektriksel Yük Miktarı (Coulomb)	Klor İyonu Geçirimsizliği Yönünden Değerlendirme
≥ 4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok düşük
≤ 100	İhmal edilebilir

Tablo 4.15. Klor geçirimsizliği deney sonuçları

Beton Kodu	Klor Geçirimsizliği (Coulomb)			
	1 no'lu Numune	2 no'lu Numune	3 no'lu Numune	Ortalama
<u>C260</u>	3273	3110	3332	3238
<u>C320</u>	2868	2567	2956	2797
<u>C400</u>	815	708	825	783
C234UKC39	1273	1423	1380	1359
C216UKC66	966	1048	920	978
C288UKC32	1122	1025	1176	1108
C266UKC54	876	821	894	864
C360UKC60	299	261	307	289
C332UKC102	187	161	201	183
C234F52	1071	996	1092	1053
C216F88	693	714	667	691
C288F48	1178	1089	1231	1166
C266F108	717	676	726	706
C360F60	206	174	214	198
C332F136	156	131	166	151

4.2.7. Donma-çözülme deneyi

F ve C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonlarına ait donma-çözülme çevrim numuneleri ve standart kürede saklanan karşılaştırma numunelerinin çevrimden önceki ve çevrimden sonraki birim hacim ağırlıkları, ultrases geçiş hızı değerleri ve eğilme dayanımı sonuçları Tablo 4.16. ve 4.17’de verilmiştir.

Tablo 4.16. F ve C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların donma-çözülme çevrim numuneleri ve standart kürede saklanan karşılaştırma numunelerinin çevrimden önceki değerleri

Beton Kodu	Karşılaştırma numunelerinin birim hacim ağırlığı (kg/lt)	Çevrim numunelerinin birim hacim ağırlığı (kg/lt)	Karşılaştırma numunelerinin ultrases geçiş hızı (km/s)	Çevrim numunelerinin ultrases geçiş hızı (km/s)
<u>C260</u>	2.491	2.469	4.67	4.67
<u>C320</u>	2.476	2.445	4.85	4.84
<u>C400</u>	2.461	2.433	5.19	5.17
C234UKC39	2.454	2.403	5.01	5.01
C216UKC66	2.441	2.426	5.11	5.13
C288UKC32	2.423	2.40	5.04	5.03
C266UKC54	2.402	2.382	5.17	5.16
C360UKC60	2.395	2.365	5.23	5.22
C332UKC102	2.381	2.343	5.29	5.27
C234F52	2.431	2.401	5.00	5.01
C216F88	2.416	2.383	5.13	5.11
C288F48	2.40	2.361	5.70	5.70
C266F108	2.397	2.335	5.21	5.20
C360F60	2.362	2.324	5.18	5.15
C332F136	2.338	2.298	5.28	5.26

Tablo 4.17. F ve C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların donma-çözülme çevrimine maruz kalan ve standart küre saklanan karşılaştırma numunelerinin eğilme dayanımı değerleri

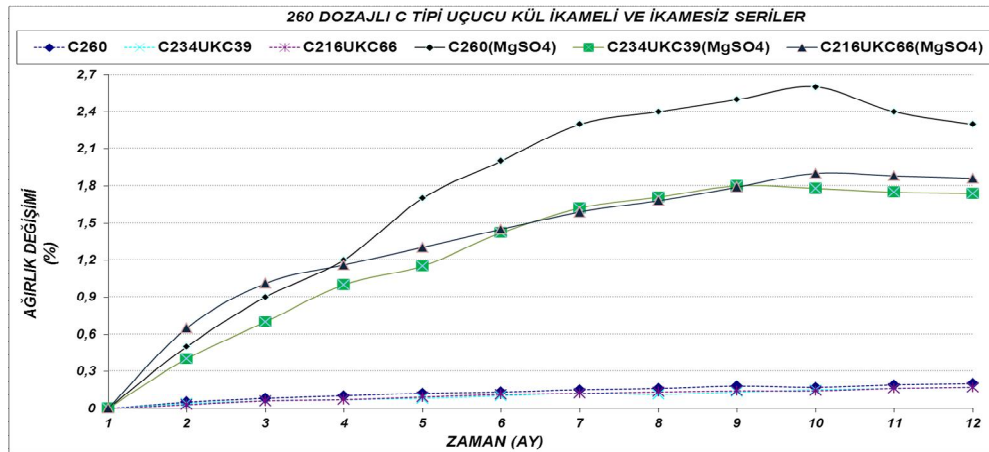
Beton Kodu	Karşılaştırma Numuneleri Birim Hacim Ağırlığı (kg/lt)	Çevrim Numuneleri Birim Hacim Ağırlığı (kg/lt)	Karşılaştırma Numuneleri Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Çevrim Numuneleri Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Karşılaştırma Numuneleri (MPa)	Çevrim Numuneleri (MPa)	Prizma Eğilme Dayanımlarındaki Azalma (%)
<u>C260</u>	2.493	2.471	4.69	4.02	8.38	5.88	29.83
<u>C320</u>	2.478	2.449	4.86	4.34	8.74	6.89	21.17
<u>C400</u>	2.464	2.434	5.21	4.96	12.43	11.19	9.98
C234UKC39	2.456	2.405	5.03	4.52	9.16	6.63	27.62
C216UKC66	2.442	2.427	5.16	4.55	8.69	6.25	28.08
C288UKC32	2.427	2.405	5.08	4.42	8.48	6.83	19.46
C266UKC54	2.405	2.383	5.20	4.7	8.41	6.72	20.10
C360UKC60	2.398	2.369	5.26	4.86	9.39	8.64	7.99
C332UKC102	2.383	2.347	5.32	4.92	7.76	7.24	6.70
C234F52	2.434	2.405	5.04	4.42	8.77	6.39	27.14
C216F88	2.420	2.383	5.18	4.46	7.54	5.58	25.99
C288F48	2.405	2.362	5.11	4.48	9.63	7.85	18.48
C266F108	2.398	2.340	5.22	4.51	9.59	7.73	19.40
C360F60	2.362	2.325	5.23	4.82	9.17	8.52	7.09
C332F136	2.340	2.303	5.34	4.88	9.11	8.62	5.38

4.2.8. Sülfat Etkisi

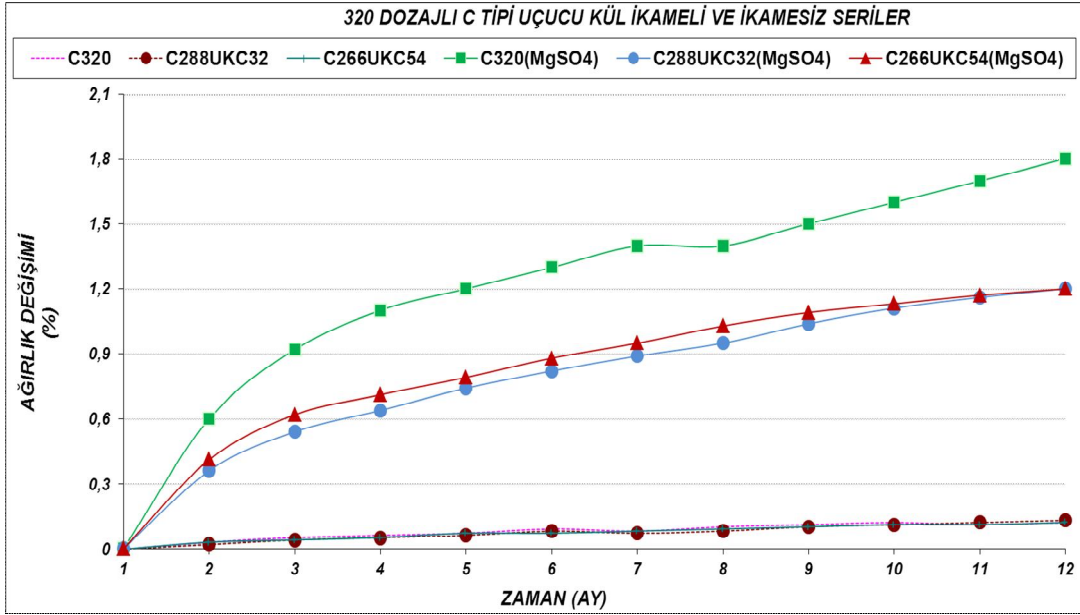
F ve C Tipi uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz kontrol betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması sonucu yaklaşık aynı basınç dayanımını veren seriler için dayanıklılık çalışmasına geçilmiş olup bu serilerden 7/7/28 cm 3'er adet pimli numuneler üretilerek tüm numunelerin ağırlıkları, pimler arası mesafeler ve ultrases geçiş hızı okumaları gerçekleştirilmiş olup 2 hafta bir bu okumalar tekrar edilerek meydana gelen değişimler bir yıl boyunca takip edildikten sonra eğilme dayanımı testine tabi tutulmuşlardır.

4.2.8.1. Ağırlık Değişimi

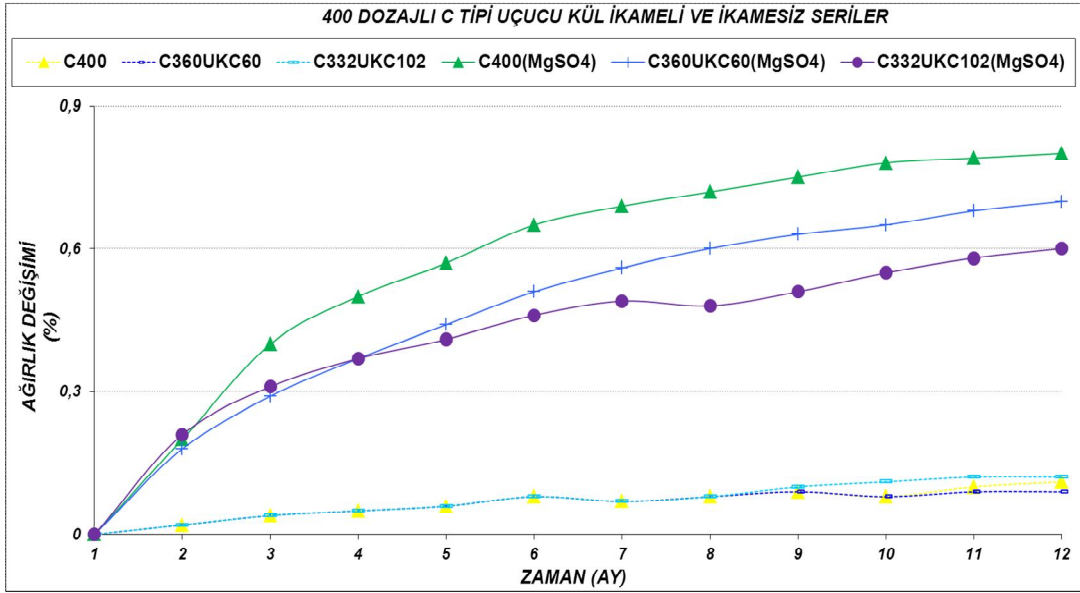
Magnezyum sülfat çözeltisi, ortamında bırakılan 7/7/28 cm prizma 3'er adet pimli numuneler aylık periyotlar halinde 0,1 gram hassasiyetli terazi ile ağırlıkları ölçülerek, deneylere başlamadan önce tespit edilen kuru ağırlıkları üzerinden ağırlık değişimleri % cinsinden hesaplanmıştır. Ağırlık ölçümleri yapılmadan önce numuneler havuzlardan çıkartılarak kuru hale getirilmişlerdir. Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, ve 4.6.'de F ve C tipi uçucu kül ikameli betonlar ve kontrol betonların sülfat etkisi altında ağırlık değişimi – zaman grafiği verilmiştir.



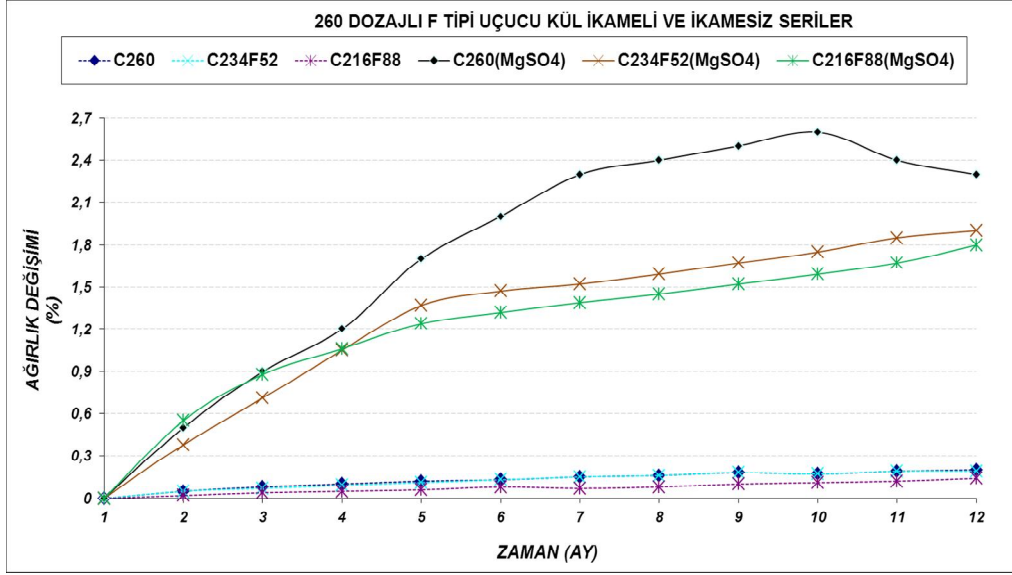
Şekil 4.1. 260 dozajlı C tipi uçucu kül ikameli betonların sülfat etkisi altında ağırlık değişimi – zaman grafiği



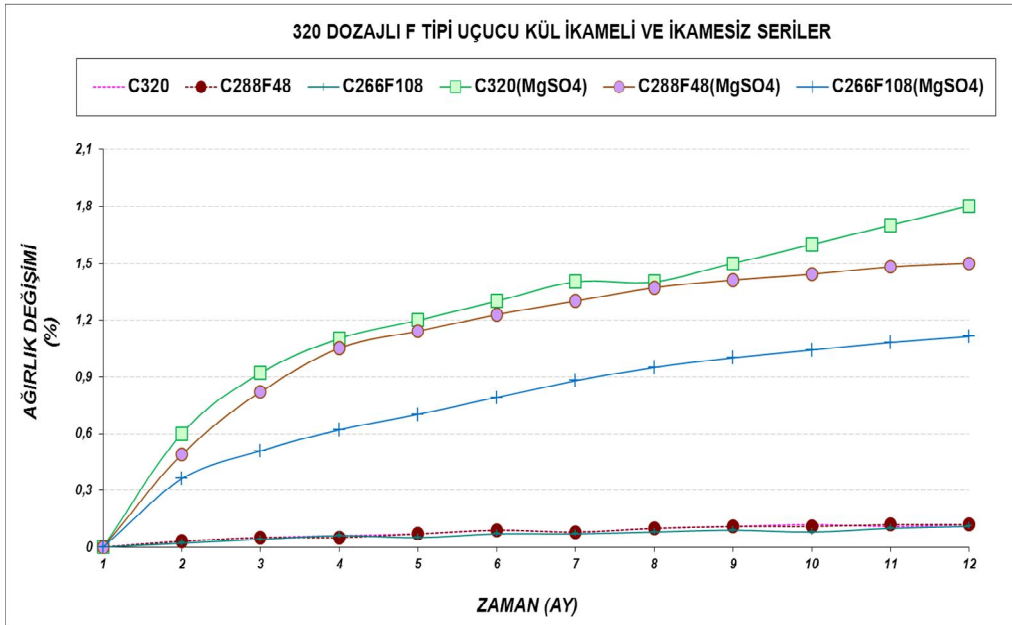
Şekil 4.2. 320 dozajlı C tipi uçucu kül ikamelı betonların sülfat etkisi altında ağırlık değışimi – zaman grafiği



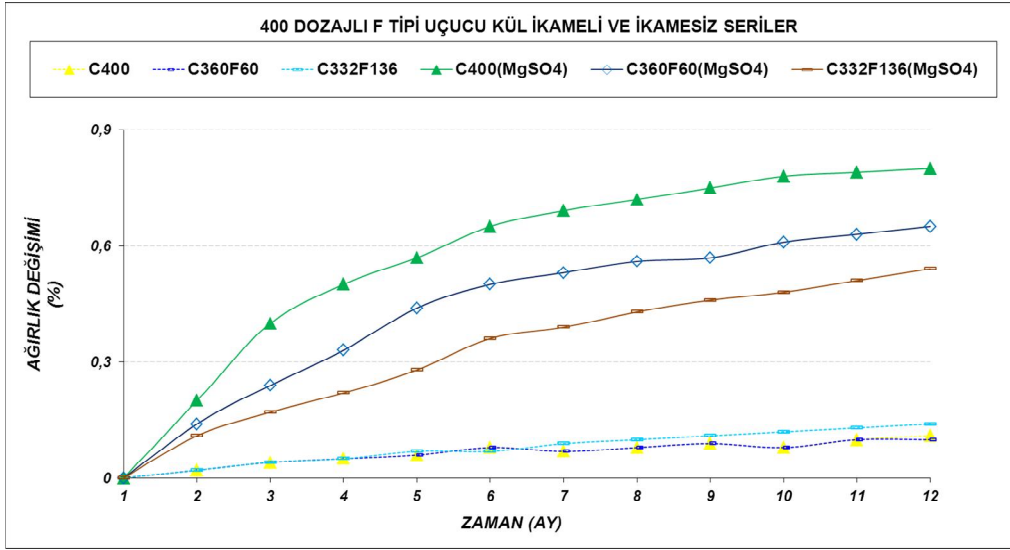
Şekil 4.3. 400 dozajlı C tipi uçucu kül ikamelı betonların sülfat etkisi altında ağırlık değışimi – zaman grafiği



Şekil 4.4. 260 dozajlı F tipi uçucu kül ikamelı betonların sülfat etkisi altında ağırlık değışimi – zaman grafiği



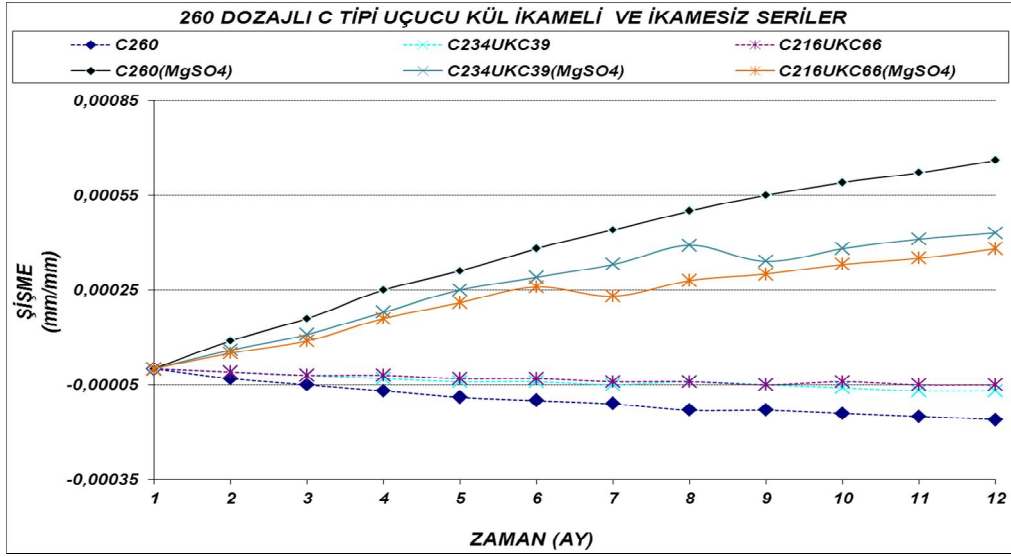
Şekil 4.5. 320 dozajlı F tipi uçucu kül ikamelı betonların sülfat etkisi altında ağırlık değışimi – zaman grafiği



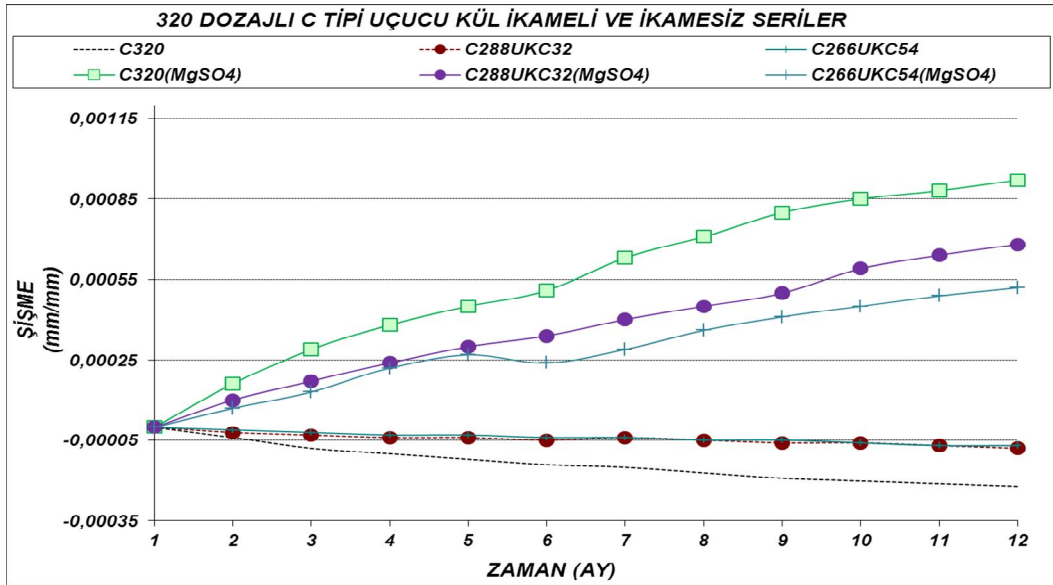
Şekil 4.6. 400 dozajlı F tipi uçucu kül ikamelı betonların sülfat etkisi altında ağırlık değişimi – zaman grafiği

4.2.8.2. Boy Değişimi

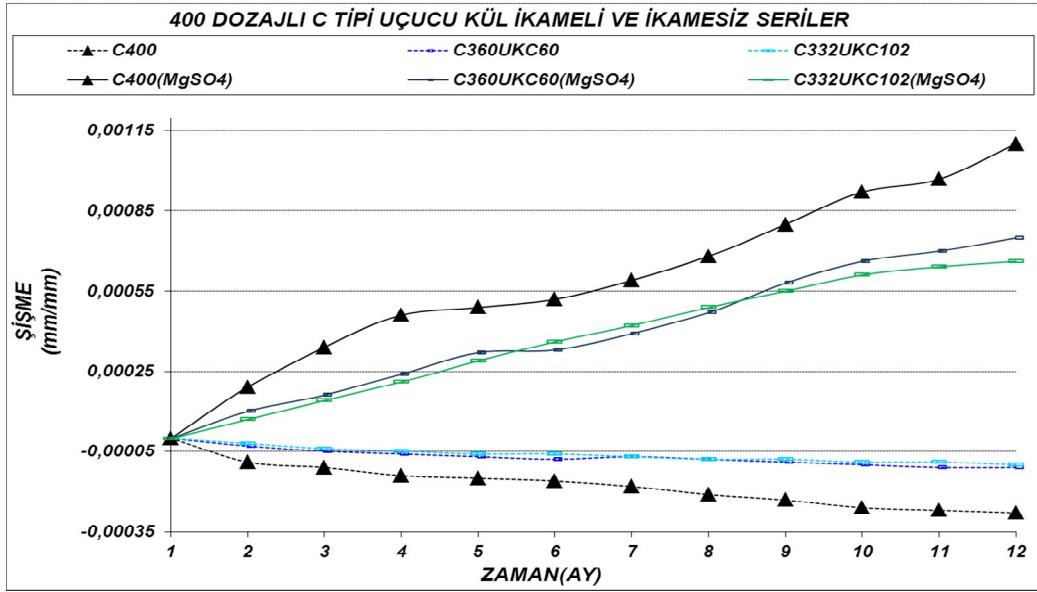
Magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde tutulan numunelerde boy değişim ölçümleri yapılmadan önce numuneler havuzlardan çıkartılarak kuru hale getirilmiş, numunelere ait boy değişimi-zaman ilişkisi Şekil 4.8-4.13'te gösterilmiştir.



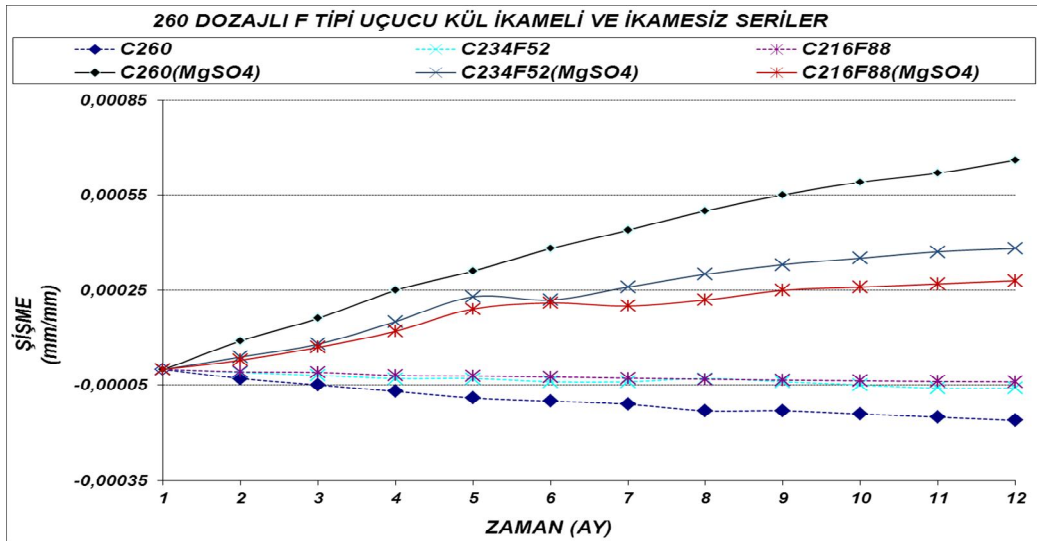
Şekil 4.7. 260 dozajlı C tipi uçucu kül ikamelı betonların sülfat etkisi altında boy değişimi – zaman grafiği



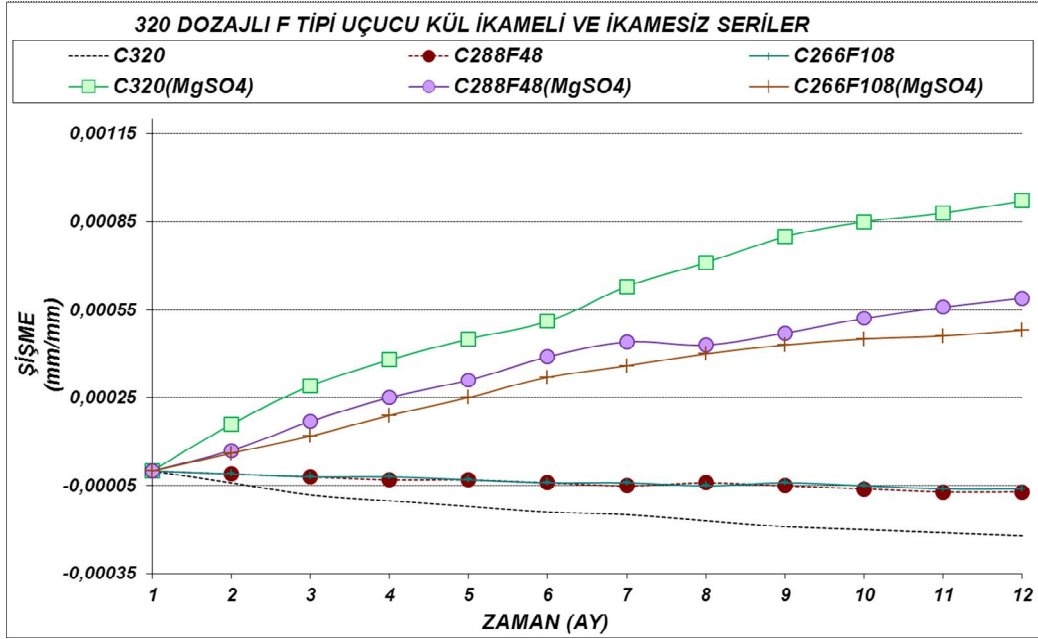
Şekil 4.8. 320 dozajlı C tipi uçucu kül ikamelı betonların sülfat etkisi altında boy değişimi – zaman grafiği



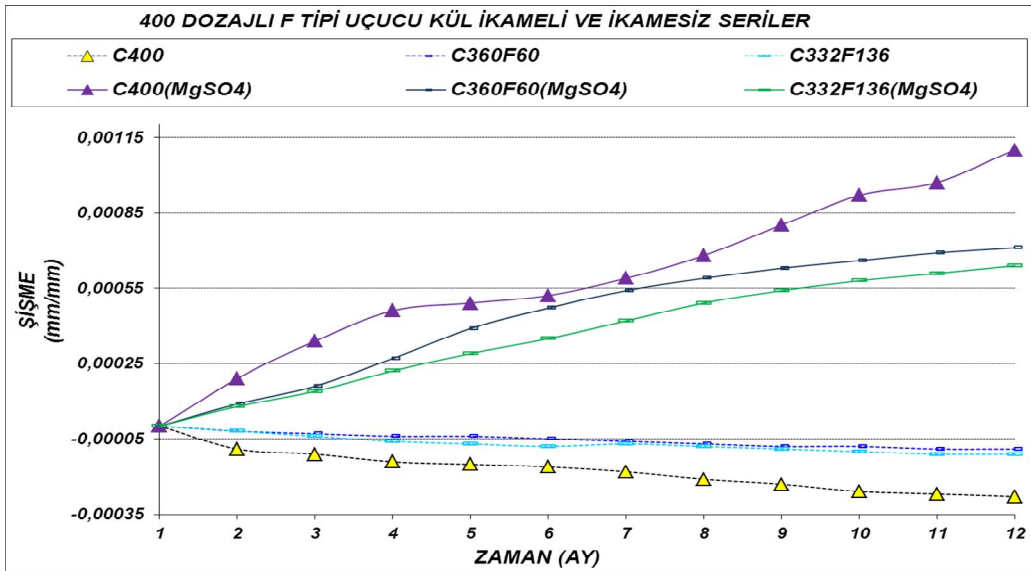
Şekil 4.9. 400 dozajlı C tipi uçucu kül ikamelı betonların sülfat etkisi altında boy değişimi – zaman grafiği



Şekil 4.10. 260 dozajlı F tipi uçucu kül ikamelı betonların sülfat etkisi altında boy değişimi – zaman grafiği



Şekil 4.11. 320 dozajlı F tipi uçucu kül ikamelı betonların sülfat etkisi altında boy değışimi – zaman grafiği



Şekil 4.12. 400 dozajlı F tipi uçucu kül ikamelı betonların sülfat etkisi altında boy değışimi – zaman grafiği

4.2.8.3. Eğilme deneyi

Eğilme deneyi 7/7/28 boyutlu prizma numunelerde 90. günlerde yapılmış, sonuçlar Tablo 4.3 ve 4.4’te verilmiştir.

Tablo 4.18. Eğilme dayanımı değerleri

Beton Kodu	Suda bekleyen 360 günlük numunenin eğilme dayanımı (MPa)	%15 lik MgSO ₄ çözeltisinde bekleyen 360 günlük numunenin eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımındaki Düşüş (%)
C260	8.46	6.1	28
C234UKC39	9.31	7.9	15
C216UKC66	8.88	7.7	13
C234F52	8.85	7.7	13
C216F88	7.75	6.9	11
C320	8.86	6.9	22
C288UKC32	9.23	8.1	12
C266UKC54	9.18	8.2	11
C288F48	9.92	8.9	10
C266F108	9.51	8.7	9
C400	10.64	8.7	18
C360UKC60	9.62	8.7	10
C332UKC102	8.14	7.5	8
C360F60	9.58	8.9	7
C332F136	9.52	9	5

BÖLÜM 5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kontrol betonlarında ve F ve C tipi uçucu kül ikameli betonlarda eşit işlenebilirlik için gerekli olan su miktarları bulunmuş, bütün serilerin su miktarı, su/toplam bağlayıcı madde oranı, çökme değerleri ve kontrol betonunun su miktarı 100 kabul edilerek bulunan karışım/kontrol betonu su oranı Tablo 5.1 ve 5.2'de verilmiştir. Çimentoya F ve C tipi uçucu kül ilave edilmesiyle toplam bağlayıcı miktarı artmış, bu nedenle su/toplam bağlayıcı oranı uçucu kül ikameli betonlarda daha düşük olmuştur. Sonuç olarak uçucu kül miktarının artmasıyla su/bağlayıcı oranı azalmış, işlenebilirlik iyileşmiş ve su ihtiyacı azalmıştır. Uçucu küllü betonların kompozite değerleri kontrol betonlarına göre daha yüksek değerler almış, uçucu kül kullanımının betonda boşlukları azalttığı görülmüştür.

Tablo 5.1. F tipi uçucu kül ikameli betonların kontrol betonuna göre su ihtiyacı değişimi (%)

BETON KODU	Su (Kg)	Karışım / Kontrol Betonu Su Oranı (%)	Su / Toplam Bağlayıcı Madde Oranı	Çökme (cm)
C260	195	100.0	0.75	15.5
C234F39	195	100.0	0.71	16.0
C234F52	196	100.5	0.69	15.5
C234F65	197	101.0	0.66	14.0
C216F44	196	100.5	0.75	15.5
C216F66	196	100.5	0.70	14.0
C216F88	197	101.0	0.63	14.0
C320	198	100.0	0.62	16.5
C288F32	186	93.9	0.58	15.5
C288F48	192	97.0	0.57	15.0
C288F64	201	101.5	0.57	14.5
C266F54	196	99.0	0.61	14.5
C266F81	201	101.5	0.58	16.0
C266F108	203	102.5	0.54	16.0
C400	170	100.0	0.42	15.0
C360F40	160	94.1	0.40	17.0
C360F60	162	95.3	0.39	17.0
C360F80	170	100.0	0.39	17.0
C332F68	165	97.1	0.40	16.0
C332F102	164	96.5	0.38	17.0

Tablo 5.2. C tipi uçucu kül ikameli betonların kontrol betonuna göre su ihtiyacı değişimi (%)

BETON KODU	Su (Kg)	Kontrol Betonuna Göre Su Değişimi (%)	Su / Toplam Bağlayıcı Madde Oran	Çökme (cm)
C260	195	100.0	0.75	15.5
C234UKC39	188	96.41	0.69	14.5
C234UKC52	187	95.89	0.65	15.5
C234UKC65	180	92.30	0.60	14.5
C216UKC44	188	96.41	0.72	14.0
C216UKC66	188	96.41	0.67	15.0
C216UKC88	177	90.76	0.58	15.0
C320	198	100.0	0.62	16.5
C288UKC32	188	94.94	0.59	15.5
C288UKC48	192	96.97	0.57	16.5
C288UKC64	182	91.91	0.51	15.0
C266UKC54	183	92.42	0.57	14.5
C266UKC81	187	94.44	0.54	17.0
C266UKC108	193	97.47	0.52	17.0
C400	170	100.0	0.42	15.0
C360UKC40	168	98.82	0.42	16.0
C360UKC60	174	102.3	0.41	15.0
C360UKC80	166	97.64	0.38	15.5
C332UKC68	161	96.98	0.4	16.0
C332UKC102	174	102.3	0.4	14.0
C332UKC136	161	94.70	0.34	17.0

Tablo 5.1'deki F tipi uçucu kül ikameli betonların kontrol betonuna kıyasla su ihtiyacı değişimi değerleri incelendiğinde, eşit işlenebilirlik için (14-17 cm) gerekli olan F tipi uçucu küllü betonların karışım sularının düşük ve yüksek dozajlı betonlarda farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Düşük dozajlı betonlarda; uçucu küllü betonların, kontrol betonuna çok yakın karışım suyu miktarlarına sahip oldukları görülmektedir. Yüksek dozajlı betonlarda ise; uçucu küllü betonların düşük oranlı ikame karışımlarında, kontrol betonundan düşük karışım suyu değerlerine sahip oldukları söylenebilir. İkame oranı arttıkça, uçucu küllü betonların karışım sularının kontrol betonunu yakaladığı ve geçtiği görülmektedir. Bu artış ve azalmalar, çimento dozajına göre belli bir yüzdeyle çıkarılan çimentonun yerine eşit

veya daha fazla miktarda uçucu kül konulmasına yani uçucu kül miktarına, ayrıca uçucu küllerin incelik, tane büyüklüğü, tane şekli gibi bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır.

F ve C tipi uçucu küllerin özgül yüzey alanlarının birbirine çok yakın olmasına rağmen genellikle aynı karışım oranlarında C tipi uçucu kül ikameli karışımların su ihtiyacının F tipi uçucu kül ikameli betonlara göre daha az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni F tipi uçucu külün özgül ağırlığının C tipi uçucu küle göre düşük olmasıdır. Karışımlardaki uçucu kül miktarı ağırlıkça hesaplandığından aynı ağırlıktaki F tipi uçucu külün hacmi C tipine göre daha fazladır. Daha fazla hacimdeki uçucu kül su ihtiyacını artırır. Su/toplam bağlayıcı madde oranlarına baktığımızda ise her seride uçucu küllü betonların değerleri kontrol betonundan düşük çıkmıştır. Bütün serilerdeki ortak özellik, ilave edilen uçucu kül miktarı arttığında su/toplam bağlayıcı madde oranının azalmasıdır.

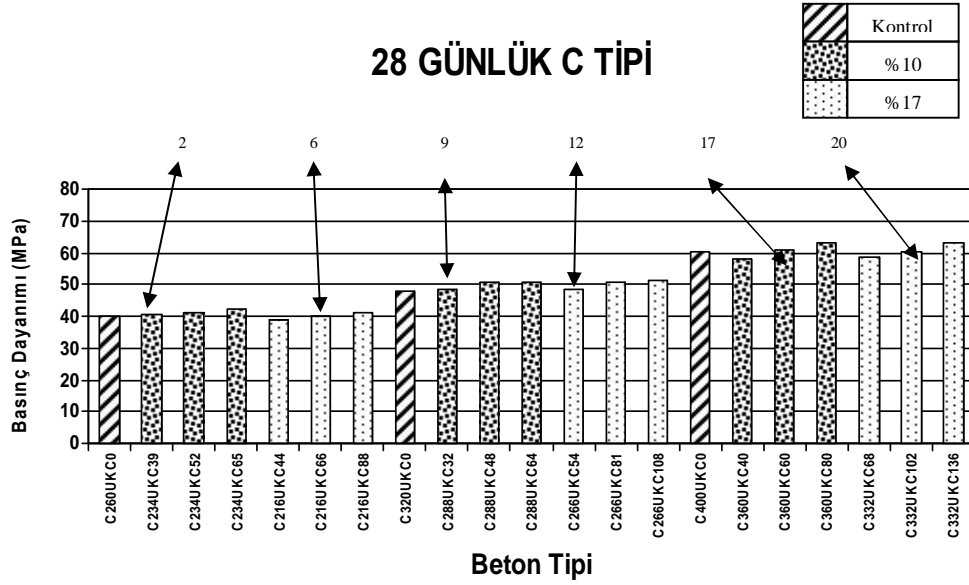
5.2.Sertleşmiş Beton Denej Sonuçlarının Değerlendirilmesi

5.2.1. Mekanik özelliklere ait deneyler

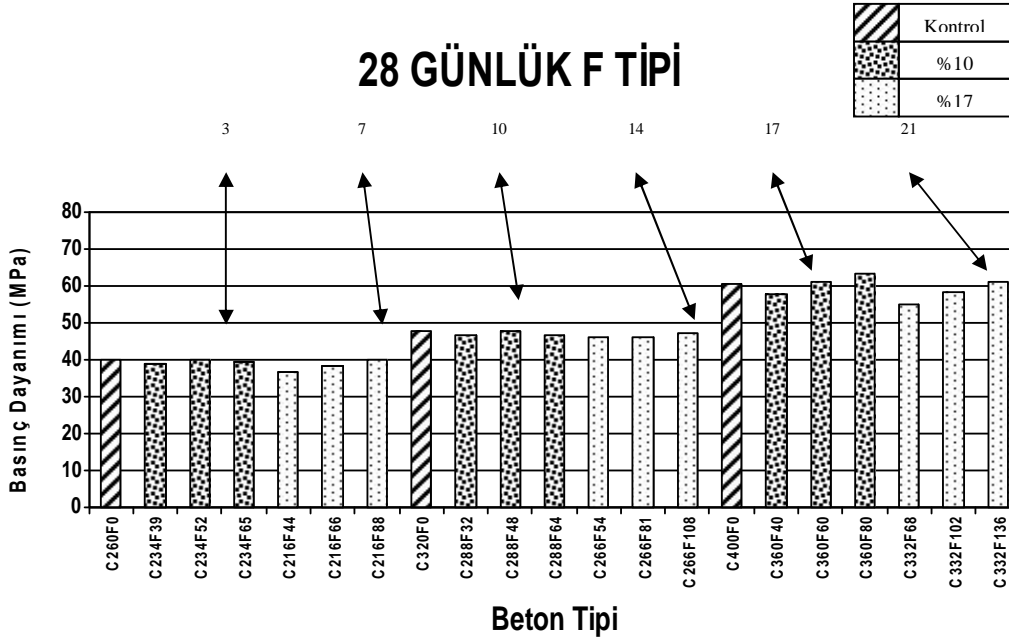
5.2.1.1. Basınç dayanımı sonuçlarının değerlendirilmesi

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilmiş olan basınç dayanımı deney sonuçlarından, 28 günlük F tipi ve C tipi uçucu kül ikameli serilerin beton basınç dayanımları kendi içlerinde karşılaştırıldığında 28 günlük C tipi uçucu kül ikameli olanlar kontrollere yakın veya üzerinde değerler verirken 28 günlük F tipi uçucu kül ikameli betonlar C tipi uçucu kül ikameli olanlarla karşılaştırıldığında daha düşük basınç dayanımı sonuçları vermiştir. Şekil 5.3, ve 5.4’te ise 90 günlük beton basınç dayanımlarına bakıldığında hem F tipi uçucu kül ikameli hem de C tipi uçucu kül ikameli serilerin kontrol numuneleri yakalayıp geçtiği görülmüştür. Özellikle F tipi uçucu kül ikameli betonların 90 günlük basınç dayanımı performanslarının 28 günlük performanslarına oranla daha iyi sonuçlar verdiği Şekil 5.3, ve 5.4’te görülmektedir. Ayrıca uçucu küllü betonların 28. günden 90. güne basınç dayanımı gelişim hızları kontrol

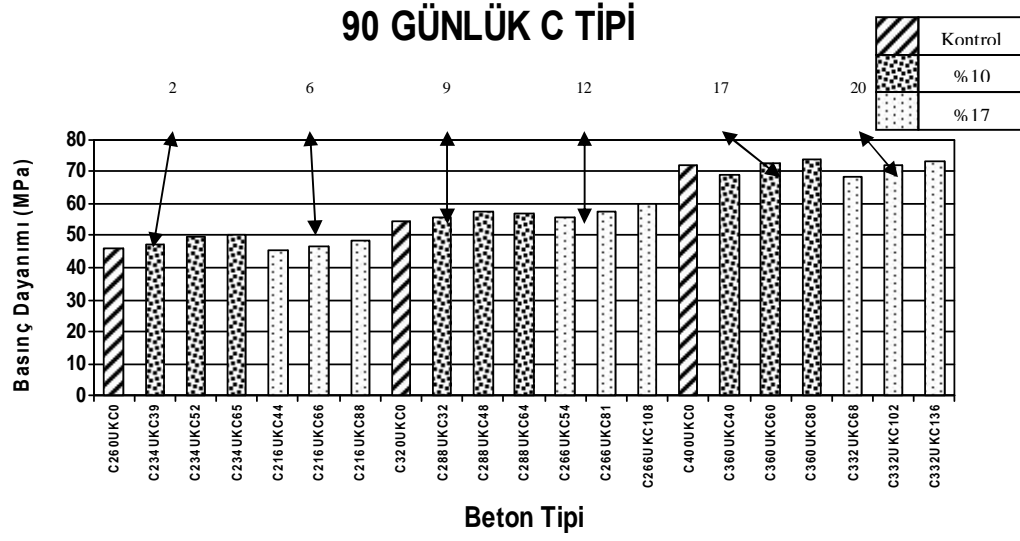
betonunkinden daha yüksektir. Kontrol betonlarına en yakın basınç dayanımını veren seriler ok işaretleri ile gösterilerek numaralandırılmıştır.



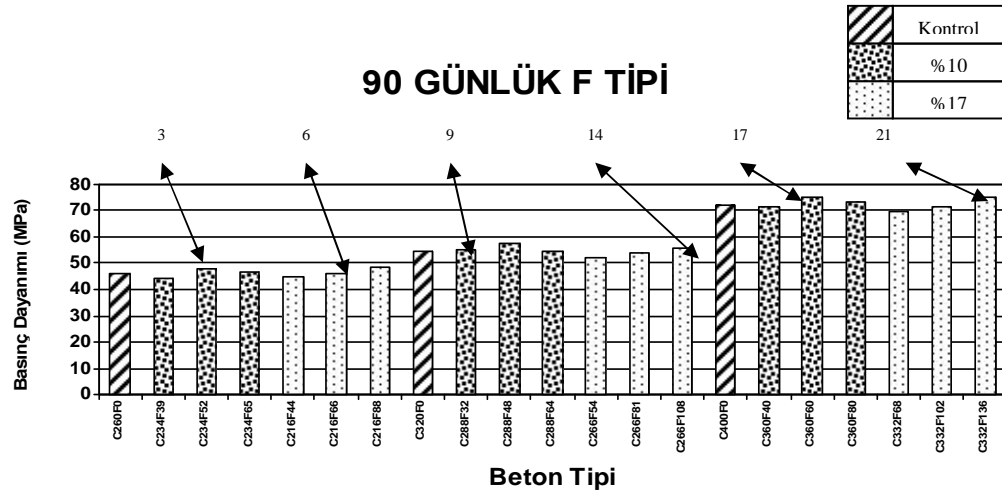
Şekil 5.1. 28 günlük küp numunelerde C tipi uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 5.2. 28 günlük küp numunelerde F tipi uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 5.3 90 günlük küp numunelerde C tipi uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması

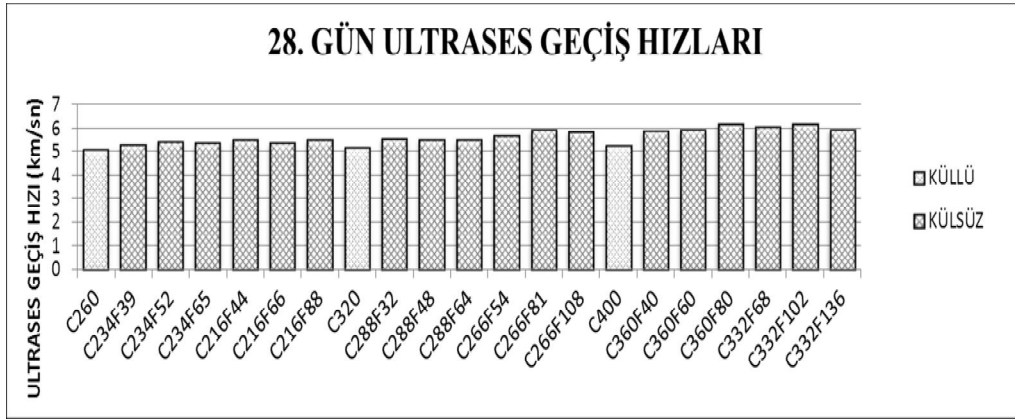


Şekil 5.4 90 günlük küp numunelerde F tipi uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması

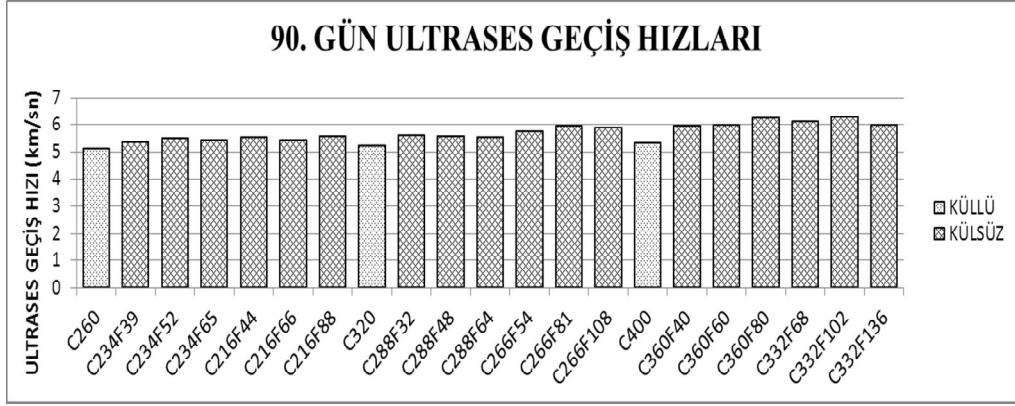
5.2.1.2. Ultrases geçiş hızı sonuçlarının değerlendirilmesi

Beton serilere ait ultrases geçiş hızı deney sonuçları Şekil 5.5-5.10'da verilmiş, hem 28. günde hem de 90. günde, uçucu küllü betonların ultrases geçiş hızları kontrol betonlara göre daha yüksek değerler almıştır. Bu da uçucu küllerin betondaki boşlukları iyi doldurduğunun bir göstergesidir. Bu durum su/bağlayıcı miktarının azalması ve beton içindeki boşlukların daha iyi dolması ile de açıklanabilir.

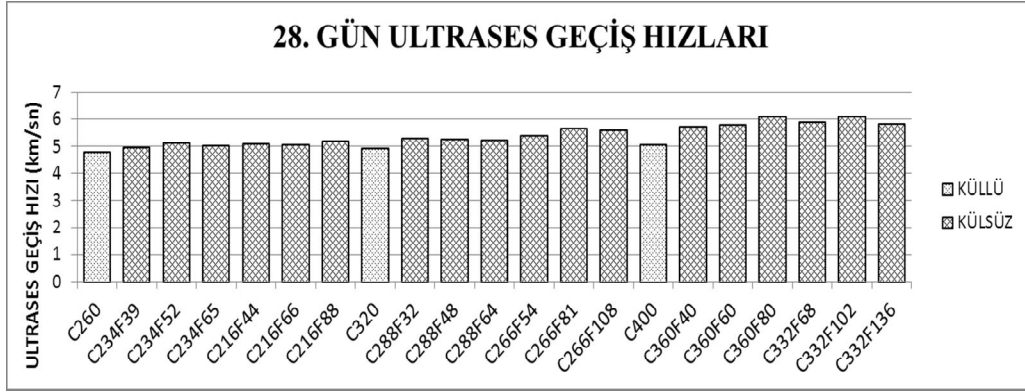
260, 320, 400 dozajlı seriler kendi içlerinde karşılaştırıldıklarında dozaj artışı ile birlikte; basınç dayanımı arttıkça ultrases geçiş hızının da arttığı görölmektedir. Sesin katı ortamdaki hızı, hava ortamındaki hızından yüksek olduğu için yüksek dayanımlı betonlarda boşluk yapısının daha düzgün olduğu düşünülürse ultrases geçiş hızının da yüksek olması beklenen bir durumdur.



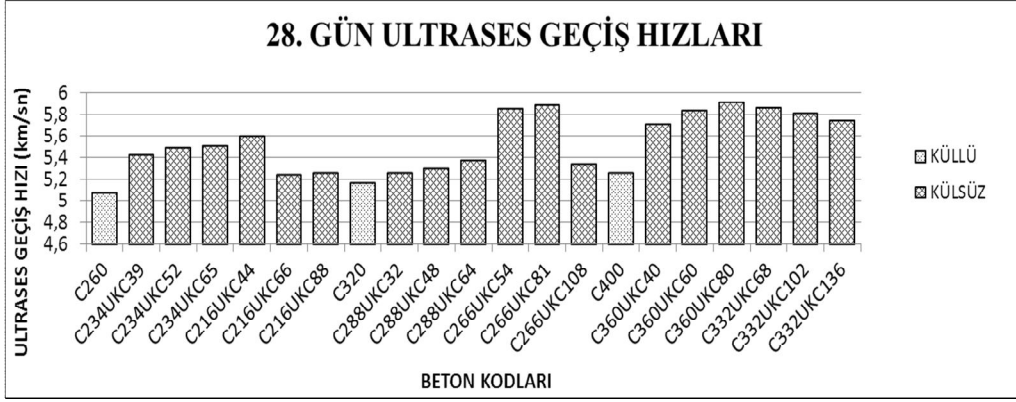
Şekil 5.5. 28 günlük F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol küp betonların ultrases geçiş hızı değerleri



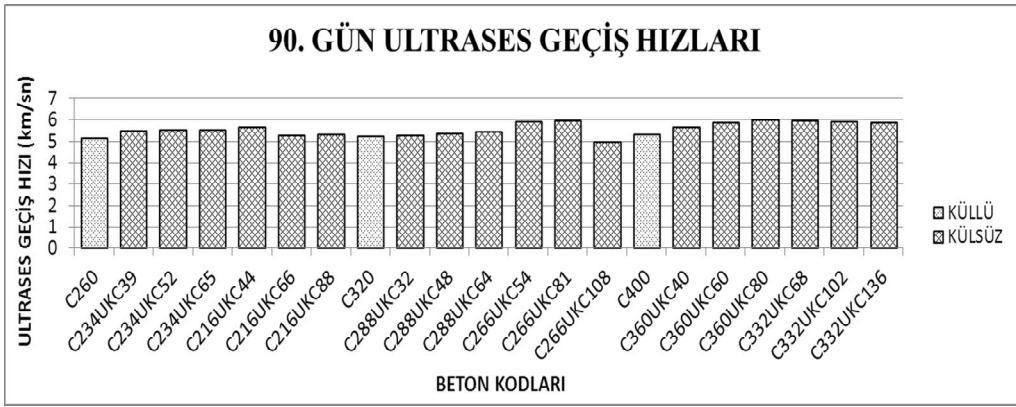
Şekil 5.6. 90 günlük F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol küp betonların ultrases geçiş hızı değerleri



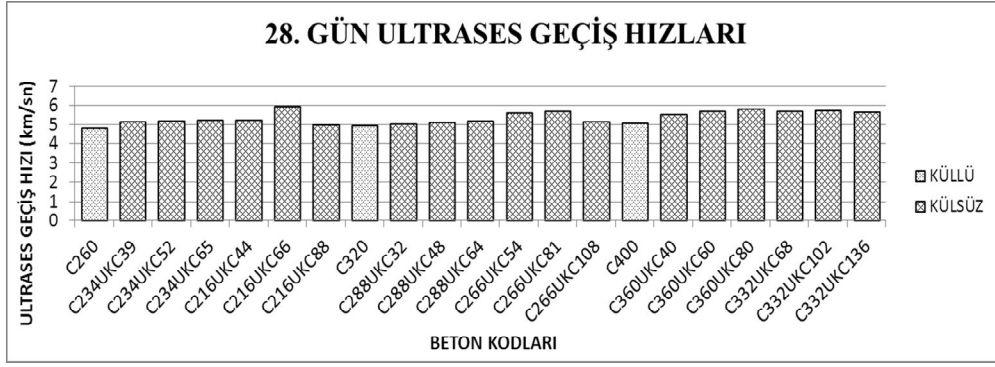
Şekil 5.7. 28 günlük F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol silindir betonların ultrases geçiş hızı değerleri



Şekil 5.8. 28 günlük C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol küp betonların ultrases geçiş hızı değerleri



Şekil 5.9. 90 günlük C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol küp betonların ultrases geçiş hızı değerleri



Şekil 5.10. 28 günlük C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol silindir betonların ultrases geçiş hızı değerleri

Ultrases deneyinde ölçüm boyu küp numuneler için 15 cm, silindir numuneler için 20 cm'dir. Ölçüm boyu arttıkça kusur oranı artacağından aynı karışımın farklı iki boyuttaki numunesi üzerinde yapılan ultrases geçiş hızı deneylerinin sonuçları farklı olabilmektedir. Yapılan çalışmada küp numunelerde belirlenen ultrases geçiş hızlarının silindir numunelerde belirlenen ultrases geçiş hızlarına oranı 1.02-1.06 arasında çıkmıştır (Tablo 5.3-5.4).

Tablo 5.3. 28 günlük C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol numunelerin küp/silindir oranlarının ultrases geçiş hızı değerleri

KARIŞIM NO	C TİPİ UÇUCU KÜLLÜ BETONLAR			
	Beton Tipi	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)		
		Küp	Silindir	Küp/ Silindir
		28 Günlük	28 Günlük	28 Günlük
1	C260	5.08	4.79	1.06
2	C234UKC39	5.43	5.12	1.06
3	C234UKC52	5.49	5.18	1.06
4	C234UKC65	5.51	5.20	1.06
5	C216UKC44	5.6	5.23	1.07
6	C216UKC66	5.24	5.94	1.06
7	C216UKC88	5.26	4.96	1.06
8	C320	5.17	4.92	1.05
9	C288UKC32	5.26	5.01	1.05
10	C288UKC48	5.3	5.10	1.04
11	C288UKC64	5.38	5.17	1.04
12	C266UKC54	5.86	5.58	1.05
13	C266UKC81	5.89	5.66	1.04
14	C266UKC108	5.34	5.13	1.04
15	C400	5.26	5.11	1.03
16	C360UKC40	5.72	5.50	1.04
17	C360UKC60	5.84	5.67	1.03
18	C360UKC80	5.92	5.80	1.02
19	C332UKC68	5.87	5.70	1.03
20	C332UKC102	5.82	5.71	1.02
21	C332UKC136	5.75	5.64	1.02

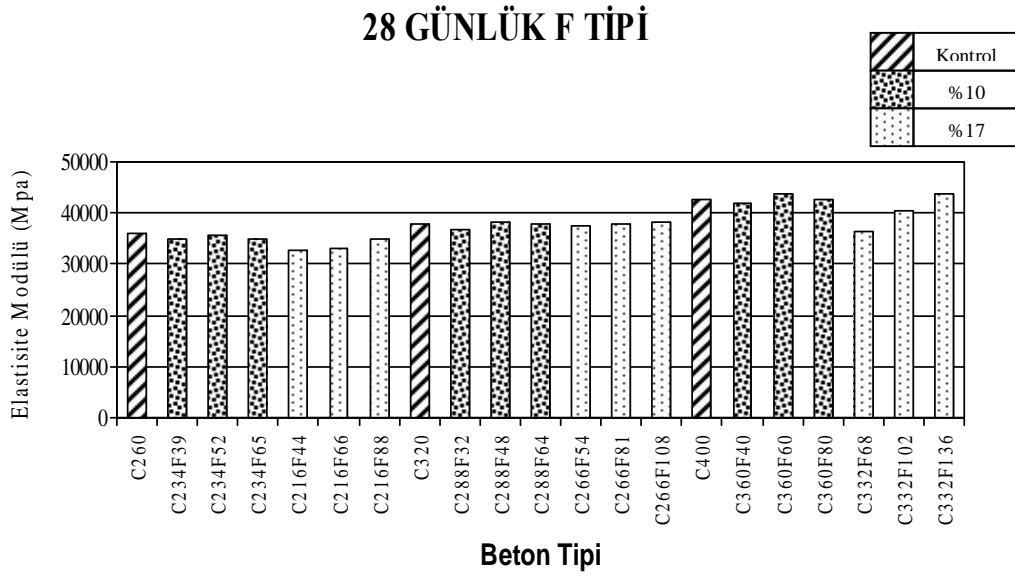
Tablo 5.4. 28 günlük F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol numunelerin küp/silindir oranlarının ultrases geçiş hızı değerleri

KARIŞIM NO	F TİPİ UÇUCU KÜLLÜ BETONLAR			
	Beton Tipi	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)		
		Küp	Silindir	Küp/Silindir
		28 Günlük	28 Günlük	28 Günlük
1	C260	5.08	4.79	1.06
2	C234F39	5.3	4.95	1.07
3	C234F52	5.44	5.13	1.06
4	C234F65	5.36	5.01	1.07
5	C216F44	5.49	5.08	1.08
6	C216F66	5.36	5.06	1.06
7	C216F88	5.5	5.19	1.06
8	C320	5.17	4.92	1.05
9	C288F32	5.57	5.30	1.05
10	C288F48	5.51	5.25	1.05
11	C288F64	5.49	5.23	1.05
12	C266F54	5.67	5.40	1.05
13	C266F81	5.92	5.64	1.05
14	C266F108	5.85	5.57	1.05
15	C400	5.26	5.06	1.04
16	C360F40	5.88	5.71	1.03
17	C360F60	5.94	5.77	1.03
18	C360F80	6.21	6.09	1.02
19	C332F68	6.07	5.89	1.03
20	C332F102	6.21	6.09	1.02
21	C332F136	5.92	5.80	1.02

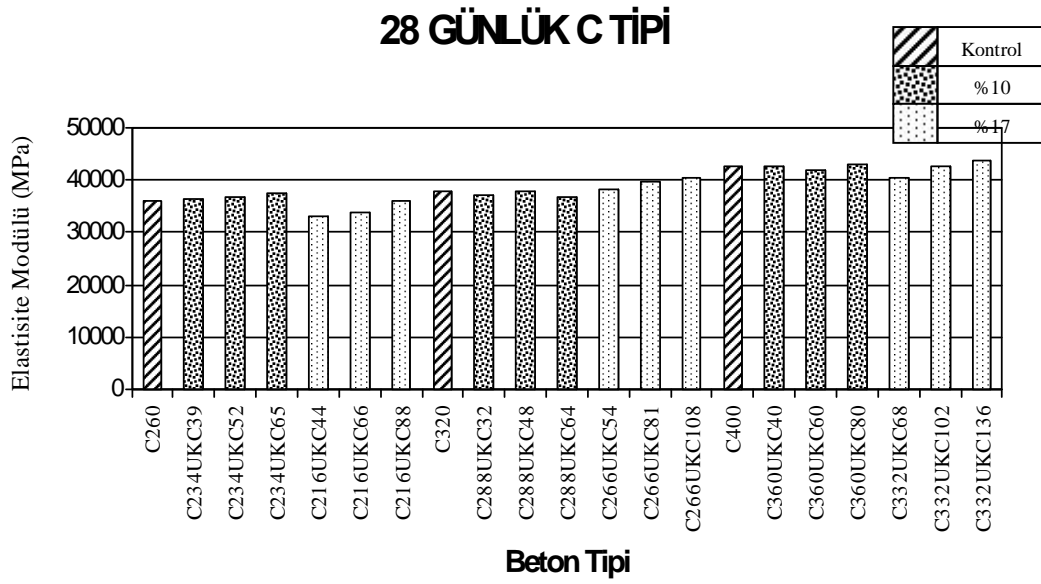
5.2.1.3. Elastisite modülü sonuçları ve TS 500 ile arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi

Sekil 5.11 ve Şekil 5.12 incelendiğinde; bağlayıcı miktarı arttıkça, betonların elastisite modülünün de arttığı görülmektedir. Ancak bağlayıcı miktarı birbirine yakın karışımlarda elastisite modüllerinde fazla bir fark gözlenmemiştir.

Betonun elastisite modülü ve basınç dayanımı birbiriyle orantılıdır. Betonun basınç dayanımı artarken, çimento hamuru matrisi ve aradaki yüzey daha yoğun ve daha sıkı bağlanmış yapıda olur.



Şekil 5.11. 28 günlük silindir numunelerde F Tipi uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların elastisite modülü karşılaştırılması

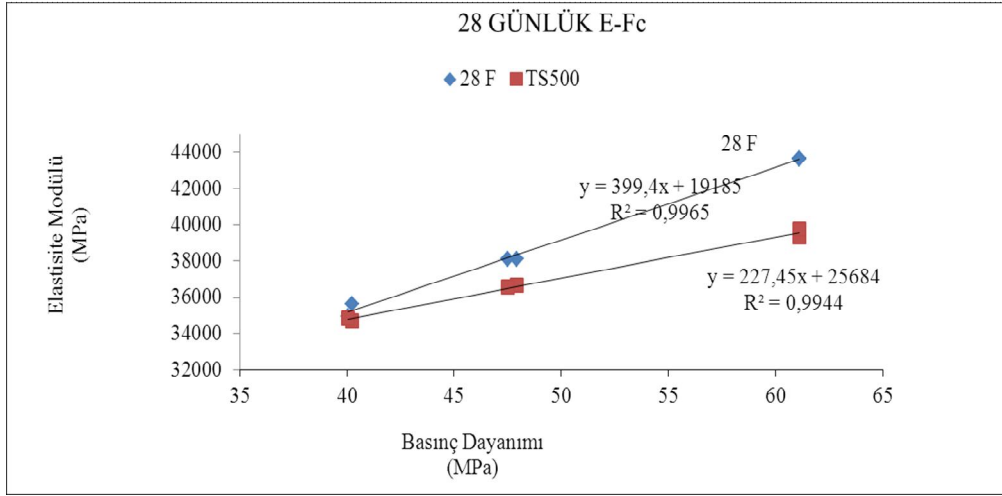


Şekil 5.12. 28 günlük silindir numunelerde C tipi uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz betonların elastisite modülünün karşılaştırılması

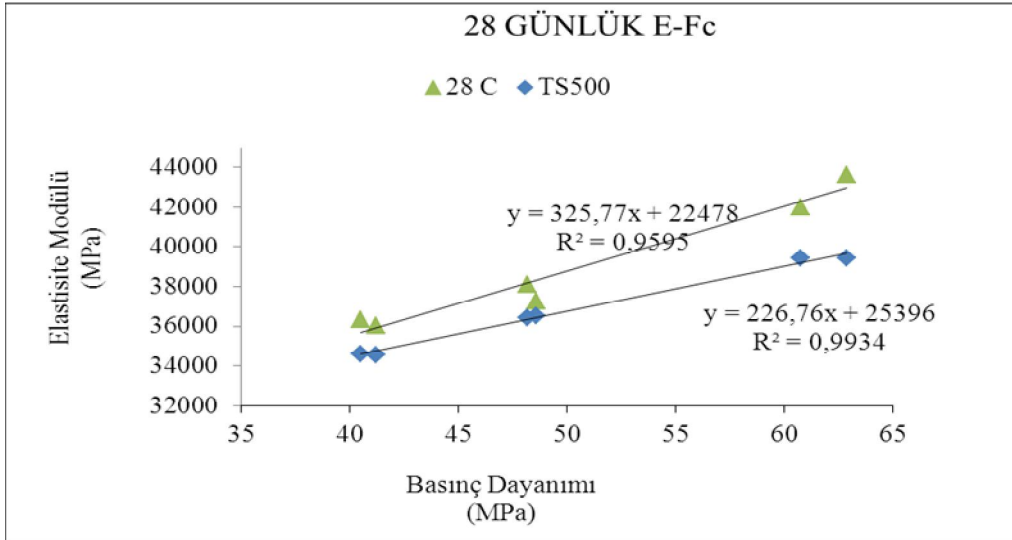
Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’de eğrinin TS 500’ün önerdiği eğri ile karşılaştırması verilmiştir. TS 500’e göre;

$$E_{cj} = ([3250 \cdot (f_{ckj})^{0.5}] + 14000) \quad (5.1)$$

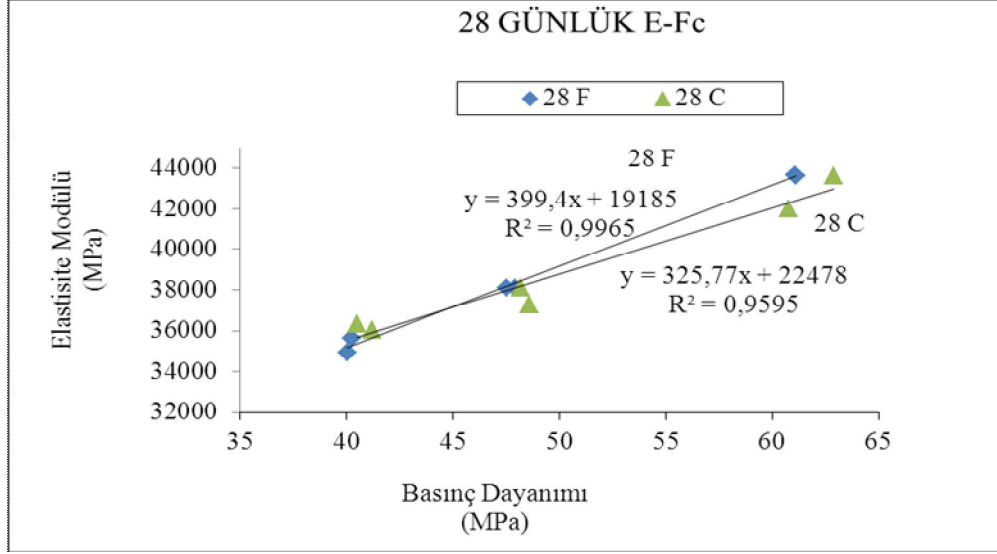
Burada; E_{cj} betonun elastisite modülünü (MPa), f_{ckj} ise betonun basınç dayanımını (MPa) göstermektedir.



Şekil 5.13. TS 500 ile F tipi uçucu kül ikameli betonların elastisite modülü deney sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5.14. TS 500 ile C tipi uçucu kül ikameli betonların elastisite modülü deney sonuçlarının karşılaştırılması



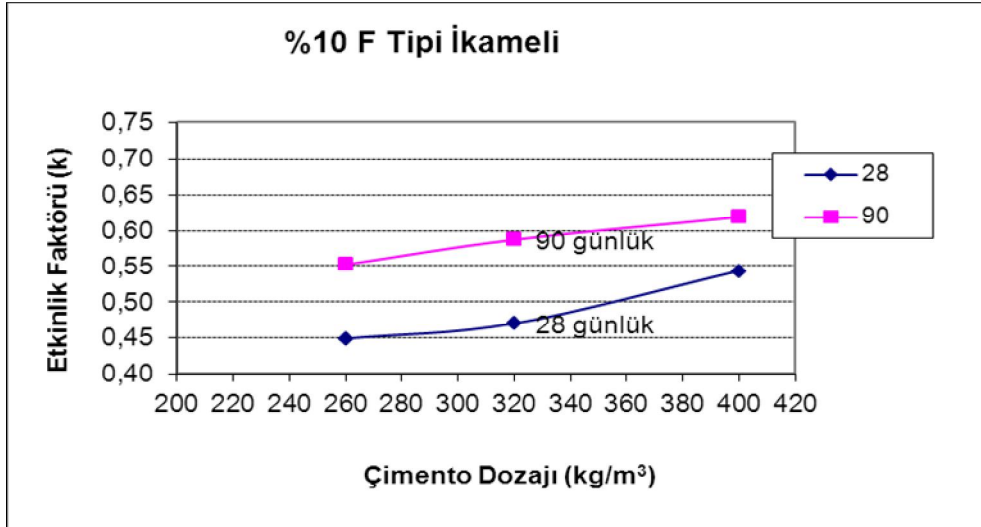
Şekil 5.15. C ve F tipi uçucu kül ikameli betonların elastisite modülü deney sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14' te görüldüğü gibi F ve C tipi uçucu kül ikameli betonların elastisite modülü ve basınç dayanımı arasında TS 500'deki gibi lineere yakın bir ilişki vardır. 260 dozajlı C Tipi uçucu küllü betonların elastisite modüllerinin TS 500'e göre basınç dayanımından hesaplanan elastisite modülü değerlerine yakın olduğu, F Tipi uçucu küllü betonların elastisite modüllerinin ise biraz daha yüksek olduğu görülmektedir. 320 ve 400 dozajlı, uçucu kül ikameli betonların elastisite modülü değerleri TS 500'e göre daha yüksek değerler vermiştir.

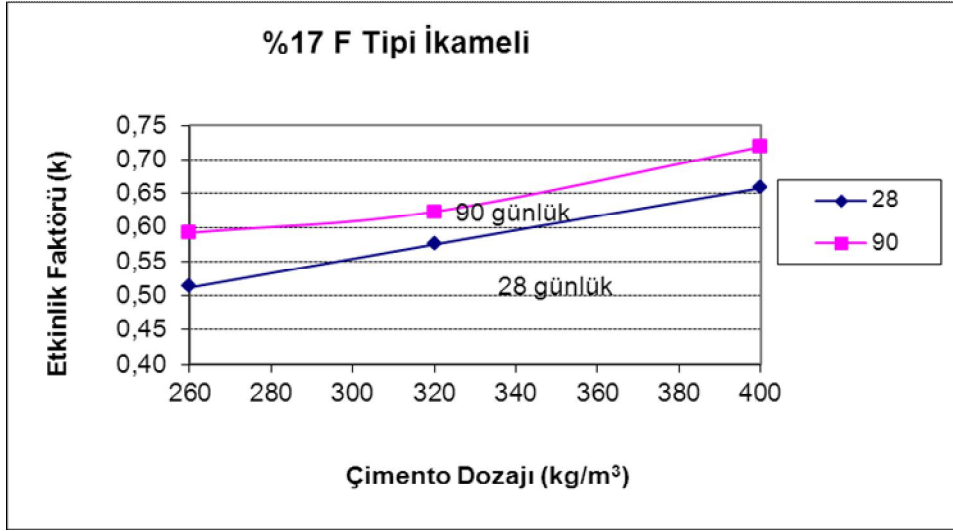
5.2.1.4. k Etkinlik faktörü sonuçlarının değerlendirilmesi

Etkinlik faktörü, kontrol betonlarıyla aynı basınç dayanımı değerlerini veren uçucu küllü betonlar için hesaplanmıştır. Buna göre; F ve C tipi uçucu küllü üretilen betonlarda uçucu küllerin etkinliği çimento dozajı arttıkça, yükselmektedir. Bunun sebebi ise karışımda çimento miktarı arttığı zaman ortamda hidrotasyon ürünü (serbest kireç) Ca(OH)_2 artacak böylece Ca(OH)_2 ile reaksiyona giren uçucu kül miktarı artacaktır. Böylece dayanımda önemli rolü olan C-S-H (Kalsiyum Silika Hidrate) daha fazla oluşacaktır. Bunun sonucunda uçucu külün reaksiyona gireceği Ca(OH)_2 miktarında artacağından uçucu kül daha etkin kullanılmış olacaktır.

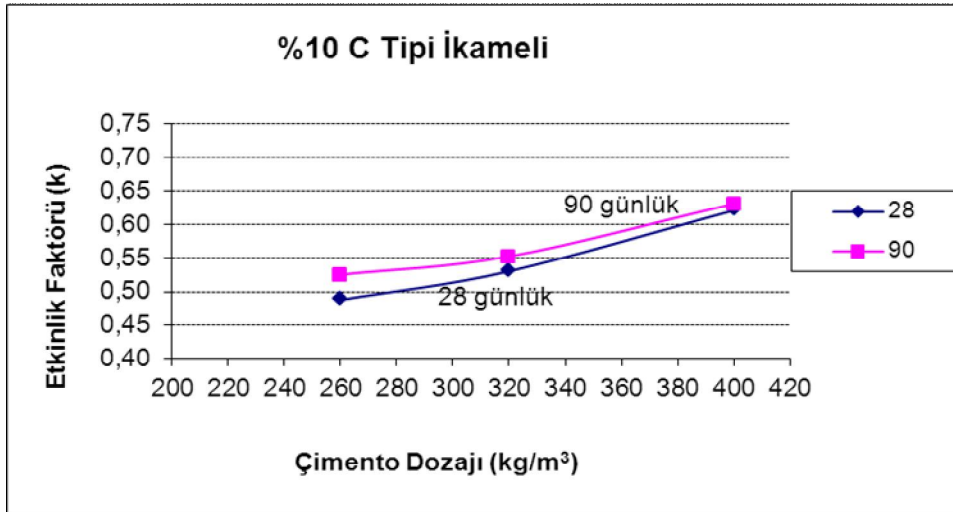
Şekil 5.16-5.19 incelendiğinde F ve C tipi uçucu küllerin çimentoya ikame edilmesiyle üretilen betonların yaşının ilerlemesiyle (28 günden 90 güne) etkinlik faktöründe artış meydana gelmiştir. Şekil 5.20-5.21’de ise F ve C tipi uçucu kül ikameli betonların 28 günlük etkinlik faktörlerinin karşılaştırılması verilmiş olup, %10 çimento çıkarım oranlılarda F tipi uçucu kül ikamelilerin C tipine göre daha düşük olduğu, %17 çimento çıkarım oranlıların etkinlik faktörlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. 90 günlük etkinlik faktörü karşılaştırıldığında ise %17 çimento çıkarım oranlı F tipi uçucu kül ikameli betonların C tipi uçucu kül ikamelileri geçtiği görülmüştür. F tipi uçucu külün puzolanik özelliğinden dolayı serbest kirecin oluşumuyla birlikte 90 günlük etkinlik faktörü daha yüksek çıkmıştır. C tipi uçucu külün bağlayıcılık özelliğinin daha fazla olması ve erken yaş dayanımının daha iyi olması nedeniyle 28 günlük etkinlik performansı daha iyi sonuç vermiştir.



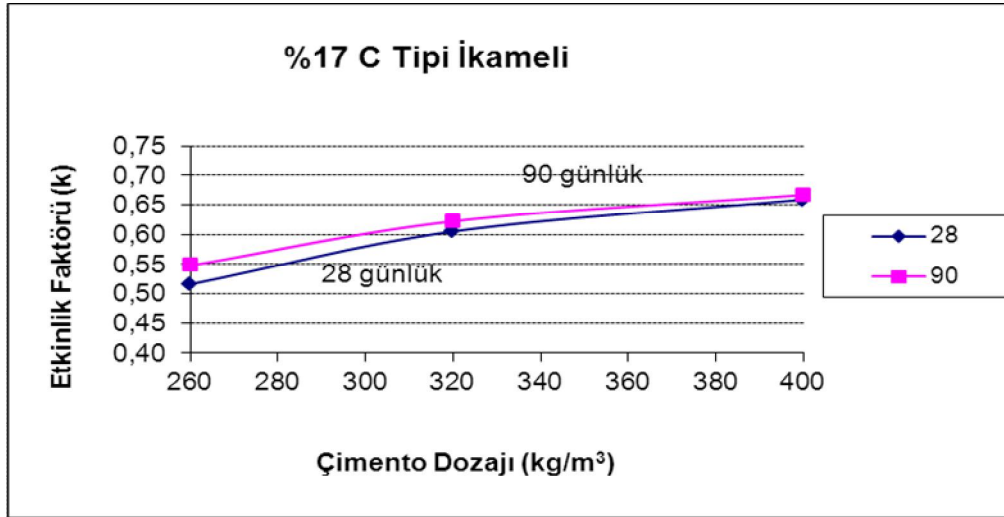
Şekil 5.16. % 10 çimento çıkarılmış F tipi uçucu kül ikameli 28 ve 90 günlük numunelerde etkinlik faktörünün çimento dozajına göre değişimi



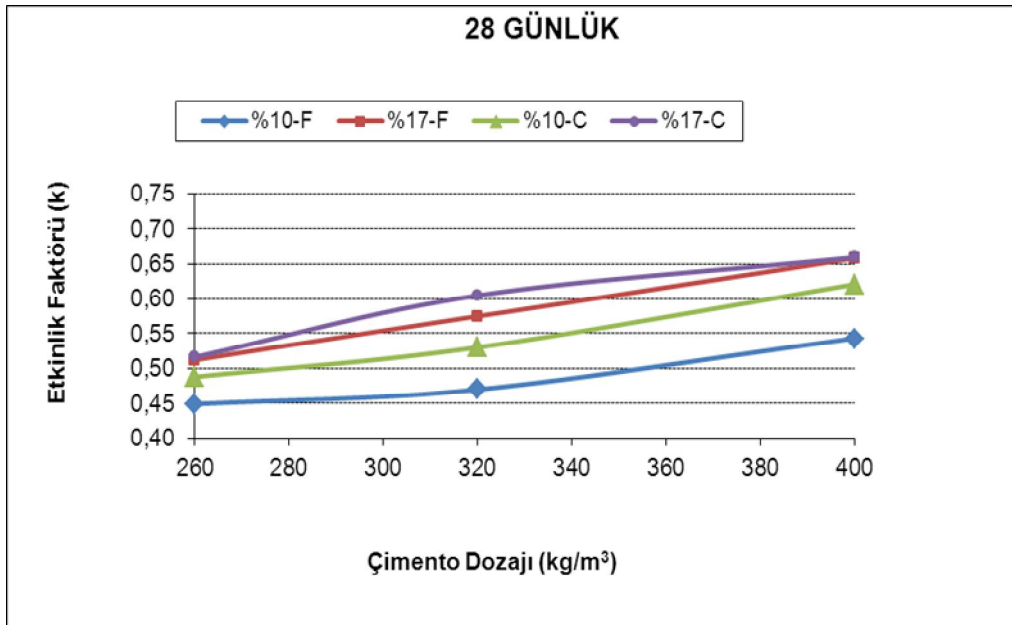
Şekil 5.17. % 17 Çimento çıkarılmış F tipi uçucu kül ikameli 28 ve 90 günlük numunelerde etkinlik faktörünün çimento dozajına göre değişimi



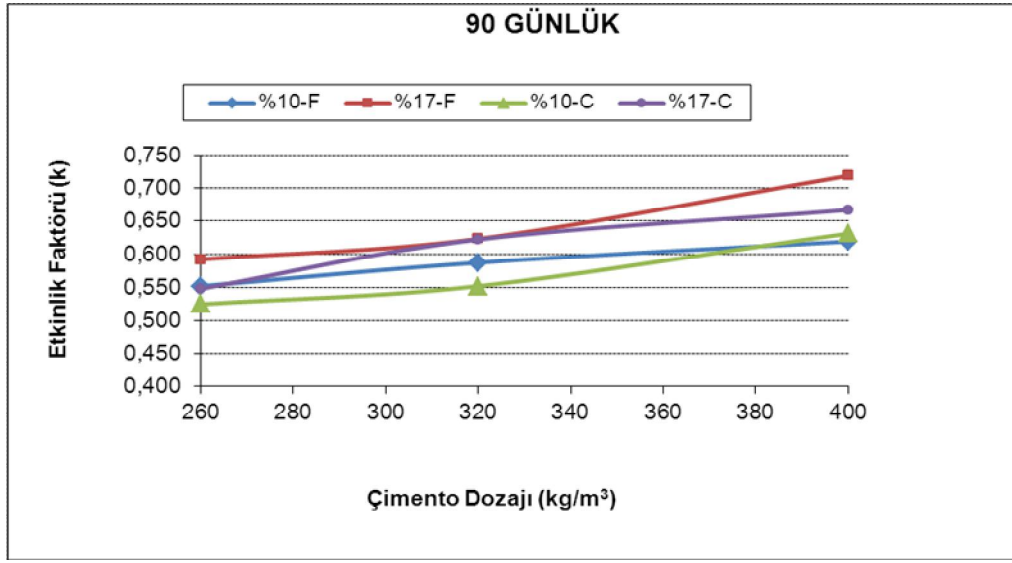
Şekil 5.18. % 10 çimento çıkarılmış C tipi uçucu kül ikameli 28 ve 90 günlük numunelerde etkinlik faktörünün çimento dozajına göre değişimi



Şekil 5.19. % 17 çimento çıkarılmış C tipi uçucu kül ikameli 28 ve 90 günlük numunelerde etkinlik faktörünün çimento dozajına göre değişimi



Şekil 5.20. % 10 ve % 17 çimento çıkarılmış C ve F tipi uçucu kül ikameli 28 günlük numunelerde etkinlik faktörünün çimento dozajına göre değişimi



Şekil 5.21. % 10 ve % 17 çimento çıkarılmış C ve F tipi uçucu kül ikameli 90 günlük numunelerde etkinlik faktörünün çimento dozajına göre değişimi

5.2.2. Dayanıklılığa ait deney sonuçlarının değerlendirilmesi

5.2.2.1. Kılcal su emme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

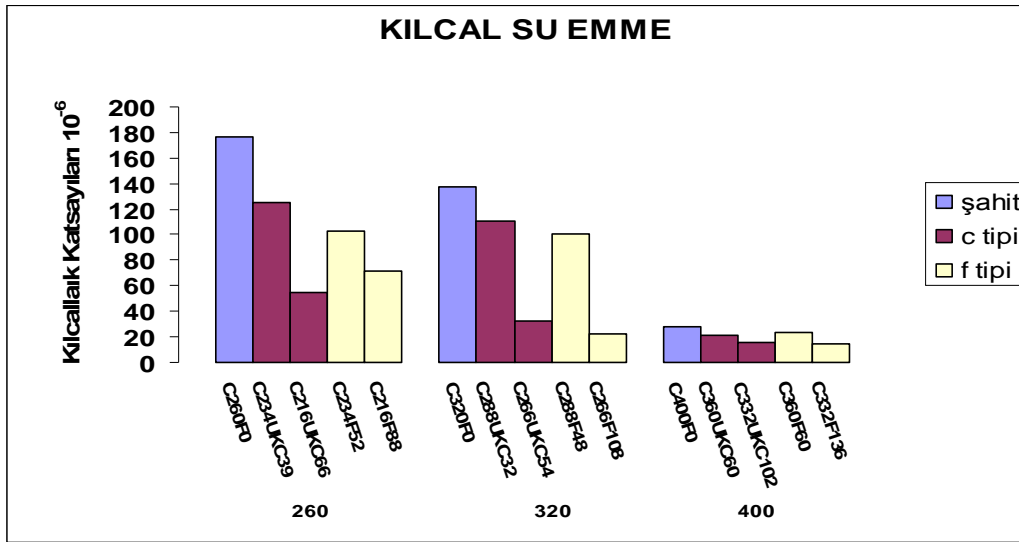
Şekil 5.22 incelendiğinde 260, 320, 400 dozajlı betonlarda dozaj arttıkça kılcallık katsayısının düştüğü, % 10 ve % 17 çimento çıkarım oranlı seriler karşılaştırıldığında ise % 17 çimento çıkarım oranlı serilerin kılcallık katsayısının daha düşük olduğu görülmektedir. Burada özgül ağırlık farkından kaynaklanan aynı ağırlıkta F tipi uçucu külün C tipi uçucu külden daha fazla hacimde olması ve bu sayede daha fazla boşluk doldurması kılcallık bakımından F tipi uçucu kül ikameli betonların daha iyi sonuçlar vermesine neden olmuştur. Kontrol betonlarındaki boşluk oranı uçucu kül ikameli betonlardan daha büyük olduğundan kılcallık katsayısı da büyük olmuştur.

% 10 ve % 17 çimento çıkarım oranlı seriler karşılaştırıldığında, % 17 çimento çıkarım oranlı seriler daha düşük kılcallık katsayısı sonucu vermiştir. Bunun sebebi ise karışımda çimento miktarı arttığı zaman ortamda hidrasyon ürünü Ca(OH)_2

(serbest kireç) artacak, böylece $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona giren uçucu kül miktarı da artacaktır.

F tipi uçucu külün C tipi uçucu küle göre boşlukları daha iyi doldurmasından dolayı kılcallık bakımından F tipi uçucu kül ikameli betonların daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

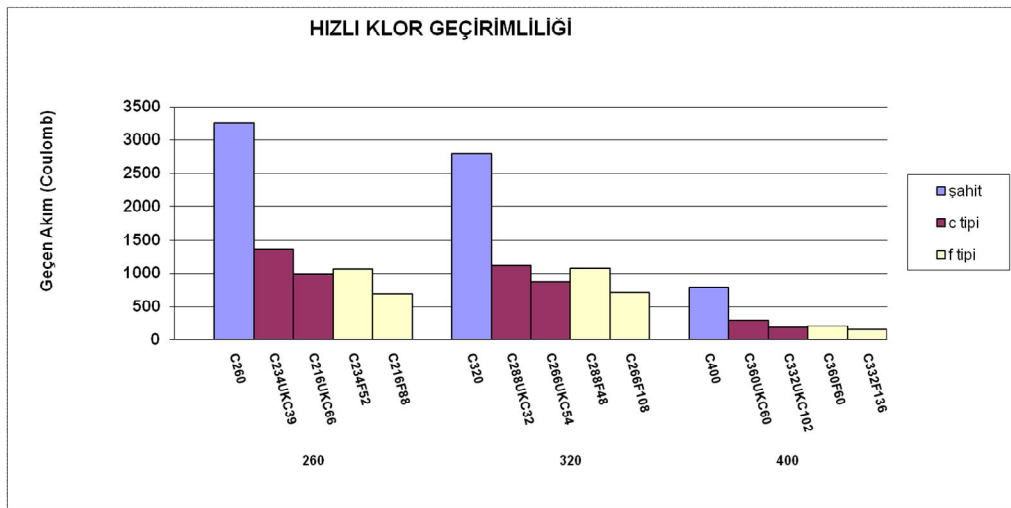
Bir uçucu külün bağladığı $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarı, uçucu külün miktarına ek olarak aktif fazlarının içerisindeki SiO_2 , Al_2O_3 miktarı ile de ilişkilidir. F Tipi uçucu kül kimyasal bileşim analizine bakıldığında içerisinde yer alan SiO_2 , Al_2O_3 miktarının C Tipi uçucu küle oranla daha fazla olması kılcallık bakımından F tipi uçucu küllü betonların en düşük sonucu vermesine sebep olmuştur.



Şekil 5.22. Kılcallık katsayısının değişimi grafiği

5.2.2.2. Hızlı klorür geçirirliliği deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Aynı basınç dayanımına sahip beton karışımlarının hızlandırılmış klor geçirirliliği deney sonuçları karşılaştırıldığında birbirlerinden farklı sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 5.23 incelendiğinde bağlayıcı olarak sadece portland çimentosu kullanılarak üretilen kontrol betonlarının hızlandırılmış klor geçirirliliği F ve C tipi uçucu kül ikameli betonlara göre oldukça yüksektir. Kontrol numunelerinde dozaj 260'tan 400 kg/m³'e arttıkça klor geçirirliliğinde bir düşüş meydana gelmiştir. 260, 320, 400 dozajlı karışımların tümünde % 17 çimento çıkarımlı F ve C tipi uçucu kül ikameli betonlar % 10 çimento çıkarımlı F ve C tipi uçucu kül ikameli betonlara göre daha düşük klor geçirirliliği sonucunu vermiştir. Bunun sebebi şu şekilde açıklanabilir. Karışımda çimento miktarı arttığı zaman ortamda hidrasyon ürünü Ca(OH)₂ artacak böylece Ca(OH)₂ ile reaksiyona giren uçucu kül miktarı da artacaktır. Böylece dayanımda önemli rolü olan C-S-H (Kalsiyum Silika Hidrate) daha fazla oluşacaktır. Bunun sonucunda uçucu külün reaksiyona gireceği Ca(OH)₂ miktarı da artacağından uçucu kül daha etkin kullanılmış olacaktır. Hidrasyon sonucu ortaya çıkan Ca(OH)₂, her iki tip uçucu küldeki SiO₂ ve Al₂O₃ bileşikleri oranlarına göre puzolanik tepkimeye girerek fazladan hidrolik bileşikler (C-A-H ve C-S-H) oluşturmuş; bu nedenle klor geçirirliliği dayanımlarını artırmıştır.



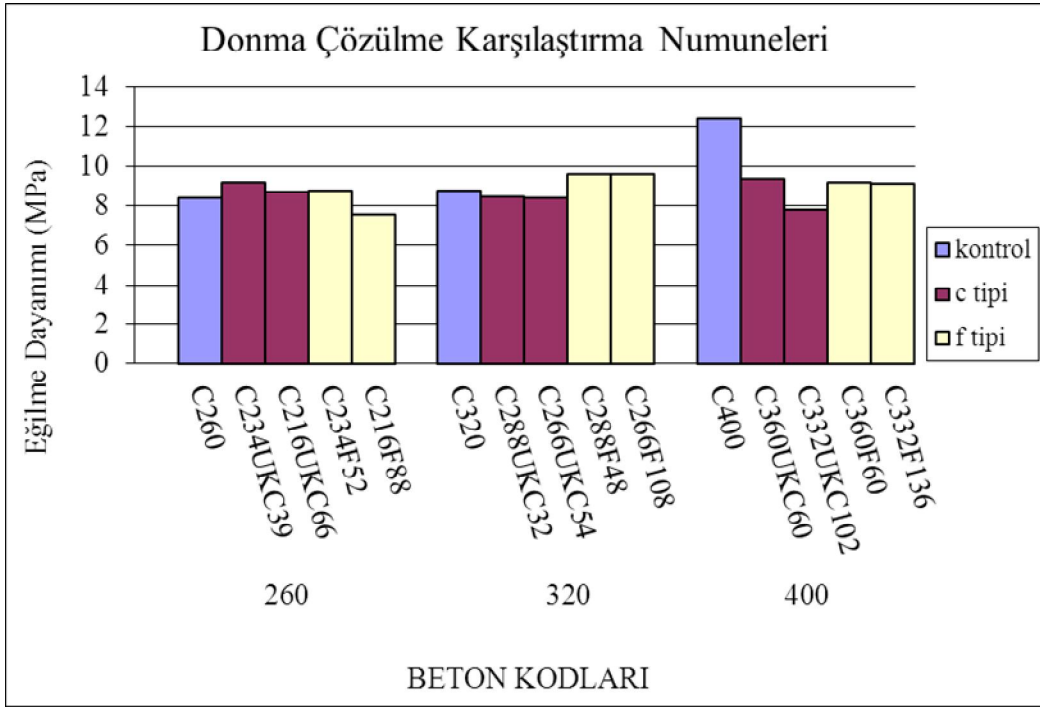
Şekil 5.23 Hızlı klor geçirirliliği sonuçları

5.2.2.3. Donma-çözülme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

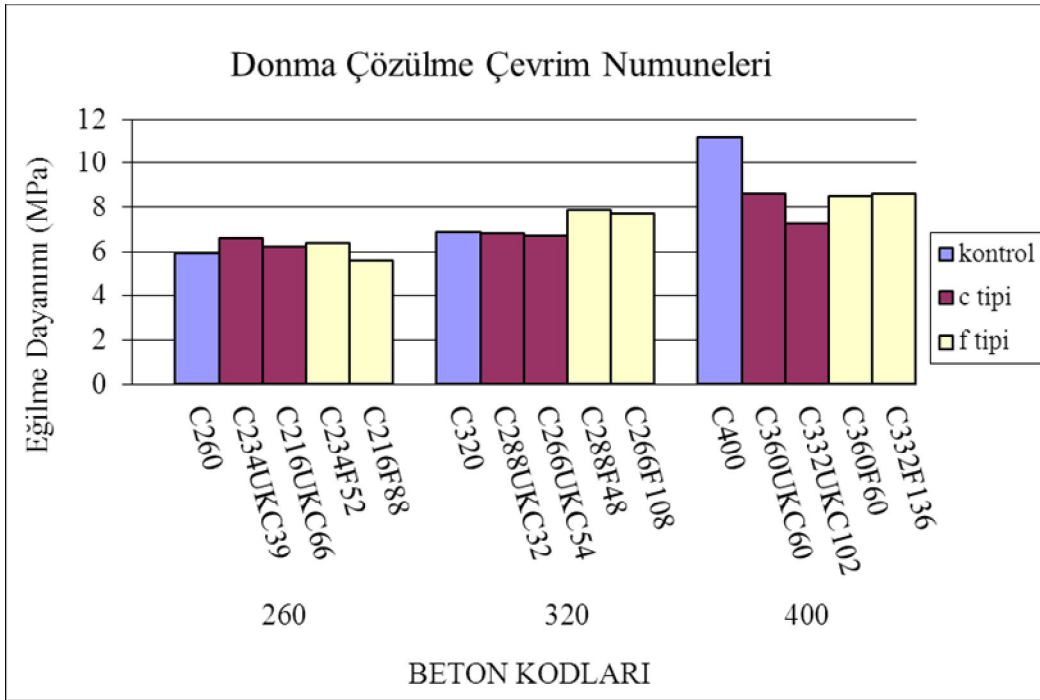
Donma çözülme karşılaştırma ve donma çözülme çevrim numunelerinin eğilme dayanımları Şekil 5.24-5.25'te gösterilmiştir. Tablo 5.5 incelendiğinde donma çözülme karşılaştırma ve donma çözülme çevrim numunelerinin eğilme dayanımlarındaki azalma değerleri gösterilmiştir. Bu tablodan kontrol numunelerinin çevrim sonrasındaki eğilme dayanımı kaybının uçucu kül ikameli betonlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca 260 dozajlı serilerde dayanım kaybı en yüksek olurken 400 dozajlı kontrol ve uçucu küllü betonlarda eğilme dayanımı kaybı daha az olmuştur. 260 dozajlı betonlarda boşluk oranının daha yüksek olmasından dolayı, eğilme dayanımı kaybı en yüksek bu betonlarda gerçekleşmiştir. Burada F tipi uçucu külün C tipi uçucu külden daha fazla hacimde olması ve daha fazla boşluk doldurmasından dolayı eğilme dayanımı bakımından F tipi uçucu kül ikameli betonların daha iyi sonuçlar vermesini sağlamıştır.

Tablo 5.5. F ve C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol betonların donma-çözülme çevrimine maruz kalan ve standart kürede saklanan karşılaştırma numunelerinin eğilme dayanımlarındaki azalma (%) değerleri.

Beton Kodu	Don Etkisi Görmemiş Kontrol Numuneler (MPa)	Don Etkisine Maruz Kalmış Numuneler (MPa)	Eğilme Dayanımlarındaki Azalma (%)
<u>C260</u>	8.38	5.88	29.83
<u>C320</u>	8.74	6.89	21.17
<u>C400</u>	12.43	11.19	9.98
C234UKC39	9.16	6.63	27.62
C216UKC66	8.69	6.25	28.08
C288UKC32	8.48	6.83	19.46
C266UKC54	8.41	6.72	20.10
C360UKC60	9.39	8.64	7.99
C332UKC102	7.76	7.24	6.70
C234F52	8.77	6.39	27.14
C216F88	7.54	5.58	25.99
C288F48	9.63	7.85	18.48
C266F108	9.59	7.73	19.40
C360F60	9.17	8.52	7.09
C332F136	9.11	8.62	5.38



Şekil 5.24. Donma-çözülme karşılaştırma numunelerinin eğilme dayanımları



Şekil 5.25. Donma-çözülme çevrim numunelerinin eğilme dayanımları

5.2.2.4. Sülfat etkisi deney sonuçlarının değerlendirilmesi

F ve C Tipi uçucu küllü betonlar ile uçucu külsüz kontrol betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması sonucu yaklaşık aynı basınç dayanımını veren seriler için dayanıklılık çalışmasına geçilmiş, bu serilerden 7/7/28 cm boyutlu üçer adet pimli numune üretilerek tüm numunelerin ağırlıkları, pimler arası mesafe ve ultrases okumaları gerçekleştirilmiştir. İki haftada bir bu okumalar tekrar edilerek meydana gelen değişimler takip edilmiş ve eğilme deneyleri yapılmıştır.

5.2.2.5. Ağırlık değişimi sonuçlarının değerlendirilmesi

Magnezyum sülfat çözeltisi ortamında bırakılan 7/7/28 cm boyutlu üçer adet pimli numunenin ağırlıkları aylık periyotlar halinde 0.1 gram hassasiyetli terazi ile tartılmıştır. Deneylere başlamadan önce tespit edilen kuru ağırlıkları üzerinden ağırlık değişimleri % cinsinden hesaplanmıştır. Ağırlık ölçümleri yapılmadan önce numuneler havuzlardan çıkartılarak kuru hale getirilmişlerdir.

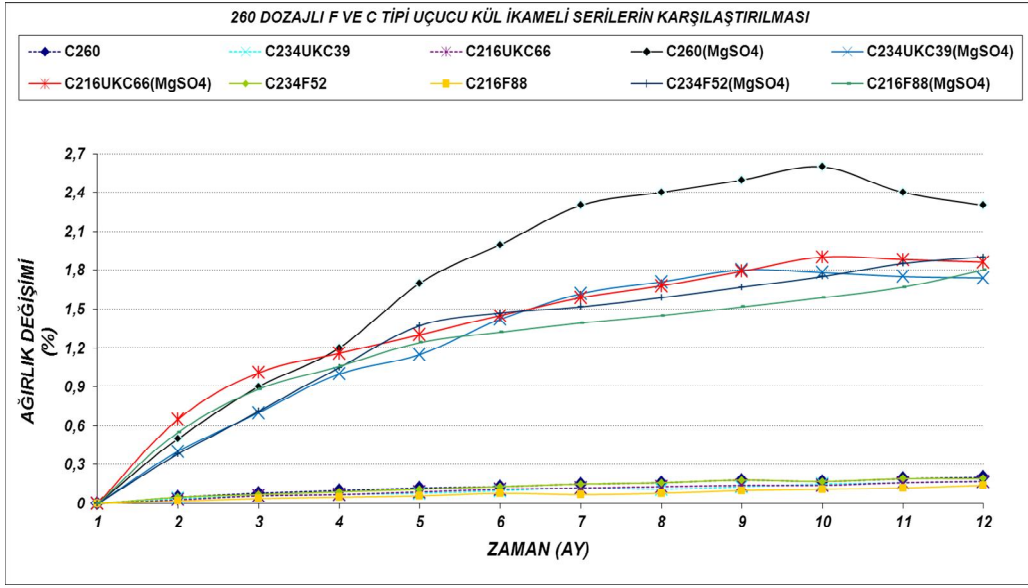
260 dozajlı betonlar (F ve C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol numuneler) dan F ve C tipi ikameli olanlar % 1.74-1.9 aralığında ağırlık artışı olurken kontrol numunesinde % 2.3 oranında artış meydana gelmiştir.

Kontrol numuneleri kendi içinde karşılaştırılacak olursa 260 dozajlıda % 2.3, 320 dozajlıda % 1.8, 400 dozajlıda % 0.8 oranında artış meydana gelmiştir. Burada en fazla ağırlık artışı düşük dozajlıda meydana gelmiştir. Çünkü boşluk oranı düşük dozajlılarda daha çok olduğu için artış oranı yüksek olmuştur. 320 dozajlılara bakıldığında F ve C tipi ikameli betonlardan en düşük ağırlık artışı % 1.11 ile C266F108 nolu F tipi ikameli seride meydana gelmiştir. 400 dozajlılara bakıldığında F ve C tipi ikameli betonlardan bütün serilerde en düşük ağırlık artışı % 0.54 ile C332F136 nolu F tipi ikameli seride meydana gelmiştir.

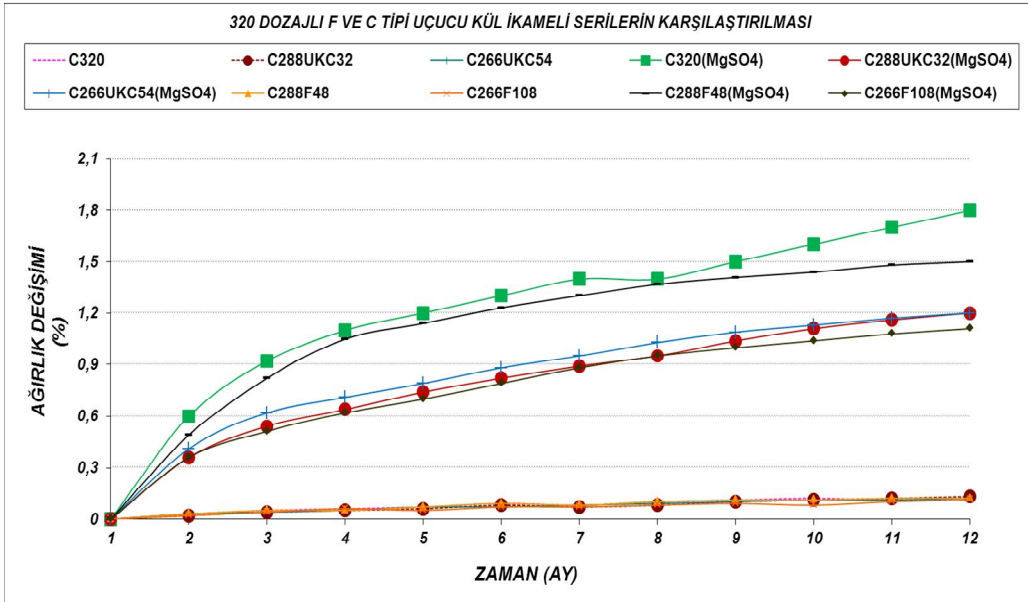
Erdoğdu ve Karataş yaptıkları çalışmada imento miktarının ağırlıkça % 10'u oranında silis dumanı ikame edilmiş prizmalar üretmiş deniz suyuna eşdeğer sülfat iyonu içeren Na_2SO_4 , MgSO_4 çözeltilerine ve deniz suyuna maruz bırakmışlardır. Ağırlıktaki artışın ilk 8 haftalık dönemde çok hızlı olduğu ve bu dönemden itibaren azalan hızda devam ederek artışın yaklaşık 40 haftalık dönemin sonunda sabit değerlerde gezdiğini 90 haftalık bir dönemin sonunda dahi numunelerin hiçbirinde genleşmenin neden olduğu bir çatlama görülmemiştir. F ve C tipi uçucu kül ikameli betonlardaki MgSO_4 zeltisi etkisi altında ağırlık artışı benzer özellikler göstermiştir [75].

Özgül ağırlıkları arasındaki farktan dolayı aynı kütledeki F tipi uçucu külün hacmi C tipinden daha fazla olduğundan daha fazla boşluk doldurmuştur. Bir puzolanın bağladığı $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarı, puzolanın aktif fazlarının içerisindeki SiO_2 miktarı ile ilişkilidir. F tipi uçucu külün SiO_2 miktarı C tipi uçucu külden daha fazla olduğu için F tipi uçucu kül ikameli betonların daha iyi sonuç vermesine neden olmuştur.

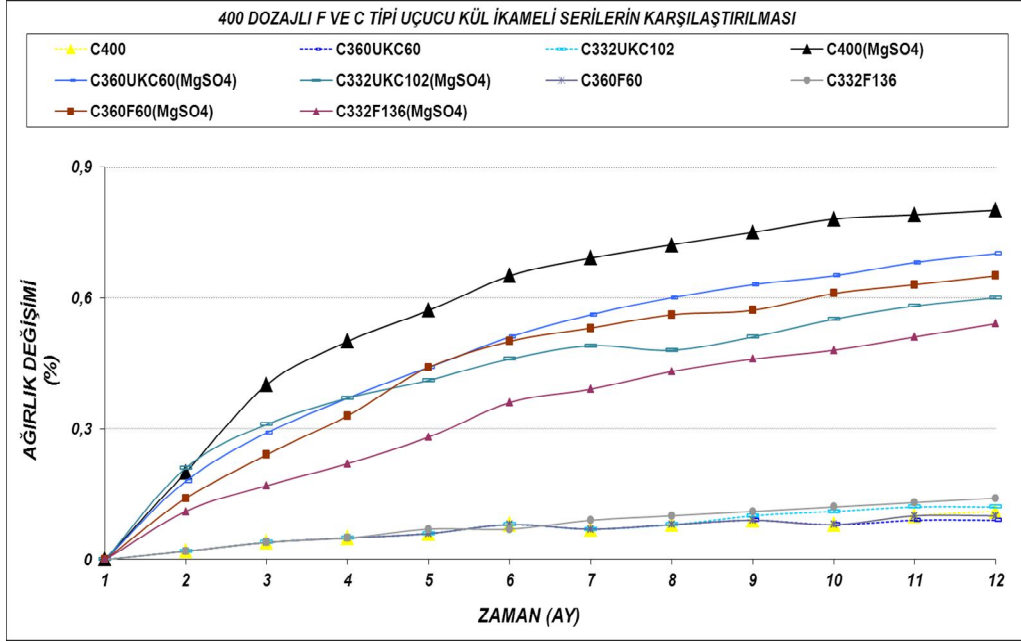
Yapılan gözle muayenede magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelerde yapılan inceleme sonucu en fazla bozulma uçucu kül ikamesiz kontrol numunelerde meydana gelmiştir. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerin yüzeyinde beyazımsı bir tabaka oluştuğu(ieklenme) ve bu beyazımsı tabakanın zamanla yumuşadığı, beton yüzeyinde dökülmelere neden olduğu grlmştir.



Şekil 5.26. Sülfat etkisi altında 260 dozajlı F ve C tipi ağırlık değişimi – zaman grafiği



Şekil 5.27. Sülfat etkisi altında 320 dozajlı F ve C tipi ağırlık değişimi – zaman grafiği



Şekil 5.28. Sülfat etkisi altında 400 dozajlı F ve C tipi ağırlık değişimi – zaman grafiği

260 dozajlı betonlardan (F ve C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol numuneler) F ve C tipi ikameli olanlar %1.74-1.9 aralığında ağırlık artışı olurken kontrol numunede % 2.3 oranında artış meydana gelmiştir. Kontrol numuneler kendi içinde karşılaştırılacak olursa 260 dozajlıda % 2.3, 320 dozajlıda % 1.8, 400 dozajlıda % 0.8 oranında artış meydana gelmiştir. Burada en fazla ağırlık artışı düşük dozajlıda meydana gelmiştir. Çünkü boşluk oranı düşük dozajlılarda daha çok olduğu için artış oranı yüksek olmuştur. 320 dozajlılara bakıldığında F ve C tipi ikameli betonlardan en düşük ağırlık artışı % 1.11 ile C266F108 nolu Ftipi ikameli seride meydana gelmiştir. 400 dozajlılara bakıldığında F ve C tipi ikameli betonlardan bütün serilerde en düşük ağırlık artışı % 0.54 ile C332F136 nolu F tipi ikameli seride meydana gelmiştir. F Tipi uçucu külün inceliği C tipinden daha fazla olduğundan boşlukları daha iyi doldurmuştur.

5.2.2.6. Boy değişimi sonuçlarının değerlendirilmesi

Şekil 5.30, 5.31 ve 5.32 incelendiğinde magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde ve suda bekleyen karşılaştırma numunelerinin zamanla boy değişimi oranları

gösterilmektedir. Boy değişim ölçümleri yapılmadan önce numuneler havuzlardan çıkartılarak kuru hale getirilmişlerdir.

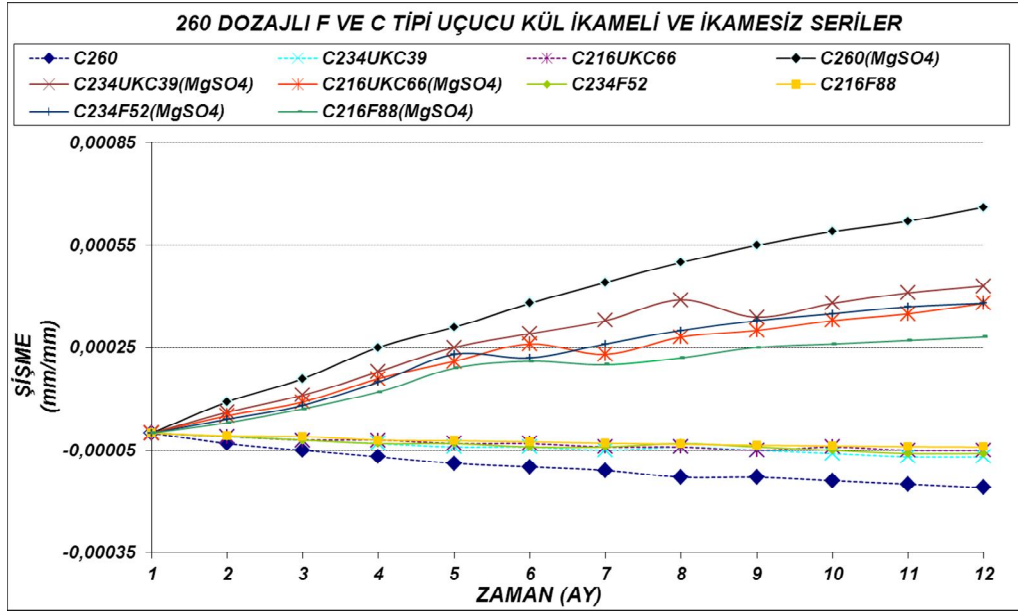
260 dozajlı betonlar (F ve C Tipi uçucu kül ikameli ve kontrol numuneler) dan F ve C tipi ikameli olanlar 0.00028-0.00043 aralığında boy değişimi artışı olurken kontrol numunede 0.00066 oranında artış meydana gelmiştir.

Kontrol numuneler kendi içinde karşılaştırılacak olursa 260 dozajlıda 0.00066 oranında, 320 dozajlıda 0.00092 oranında, 400 dozajlıda 0.0011 oranında artış meydana gelmiştir. Burada en fazla boy değişimi en yüksek dozajlıda meydana gelmiştir. 320 dozajlılara bakıldığında F ve C tipi ikameli betonlardan en düşük boy değişimi artışı 0,00048 ile C266F108 nolu F tipi ikameli seride meydana gelmiştir.

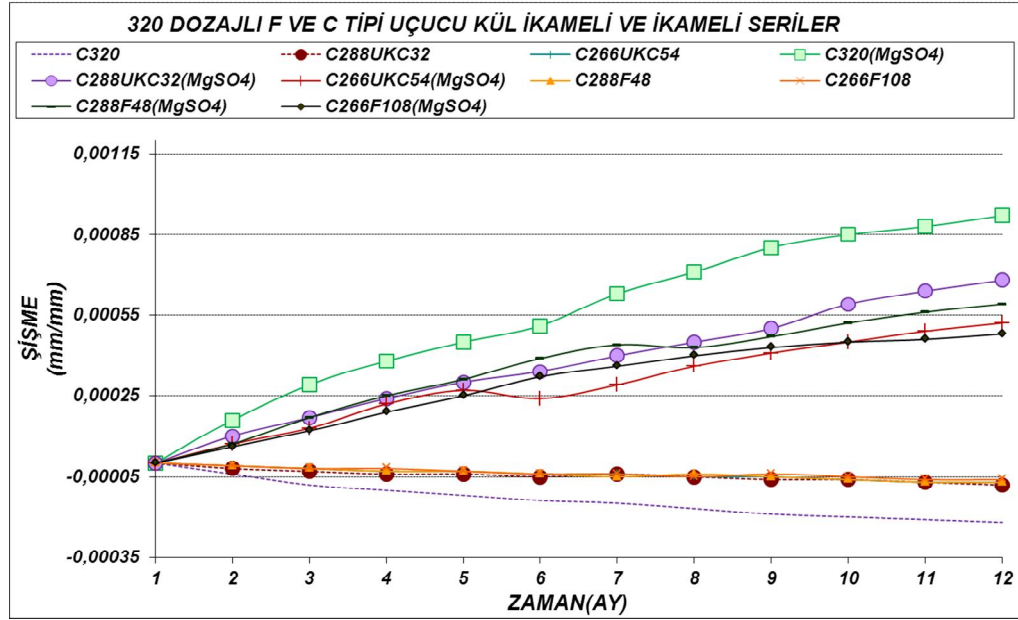
400 dozajlılara bakıldığında F ve C tipi ikameli betonlardan bütün serilerde en düşük boy değişimi artışı 0.00064 ile C332F136 nolu F tipi ikameli seride meydana gelmiştir. F Tipi uçucu külün hacmi C tipinden daha fazla olduğundan boşlukları daha iyi doldurmuştur.

Atahan ve arkadaşları iki farklı dozaj ve iki farklı su/çimento oranına sahip normal portland çimentosu kullanılmış ve sülfata dayanıklı çimento ile betonlar üretmiş % 10 Na₂SO₄ konsantrasyonlu çözelti içinde ve standart havuzda kontrol betonları 19 hafta boyunca boy değişimini incelemişlerdir. 19 haftalık zaman sonunda sülfatlı çözelti içerisinde bekleyen numunelerde meydana gelen en büyük boy değişimi yüksek dozajlı ve yüksek su/çimento oranına sahip seride yaklaşık 0.0006 yakın mertebesinde olmuştur. Bu tezde bulunan sonuçlarla karşılaştırıldığında birbirini destekleyen veriler elde edilmiştir [76].

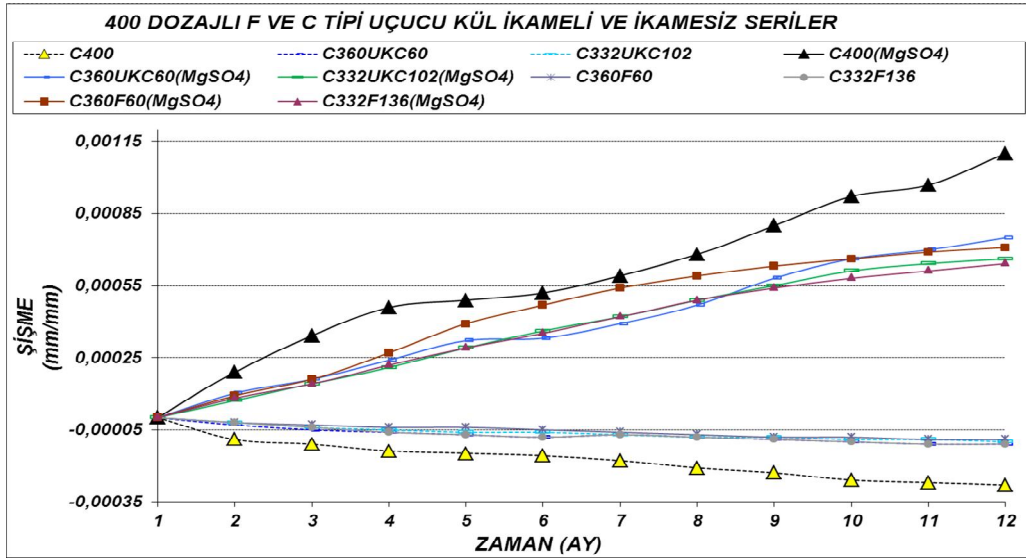
Bir puzolanın bağladığı Ca(OH)₂ miktarı, puzolanın aktif fazlarının içerisindeki SiO₂ miktarı ile ilişkilidir. Bir puzolandaki CaO/SiO₂ oranı arttıkça C-S-H azaldığından dolayı bu oran C Tipi uçucu kül ikamelilerde 0.32 iken F tipi ikamelilerde 0.02 mertebesinde olduğundan F Tipi ikameli karışımlarda C-S-H oranı yüksek olduğundan sülfata karşı en iyi direnç gösteren kül olmuştur.



Şekil 5.29. Sülfat etkisi altında 260 dozajlı F ve C tipi boy değişimi – zaman grafiği



Şekil 5.30. Sülfat etkisi altında 320 dozajlı F ve C tipi boy değişimi – zaman grafiği



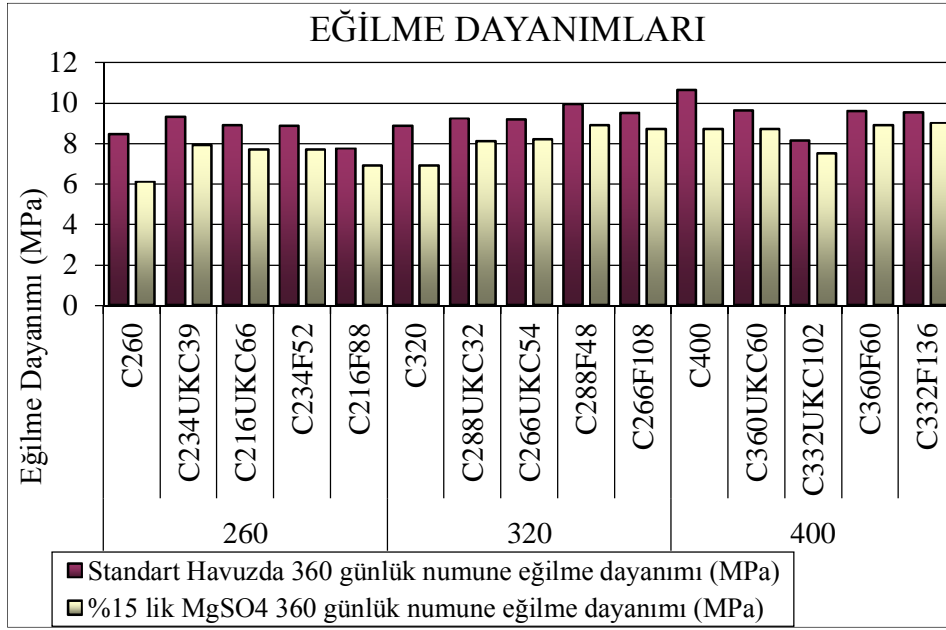
Şekil 5.31. Sülfat etkisi altında 400 dozajlı F ve C tipi boy değişimi – zaman grafiği

5.2.2.7. Eğilme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

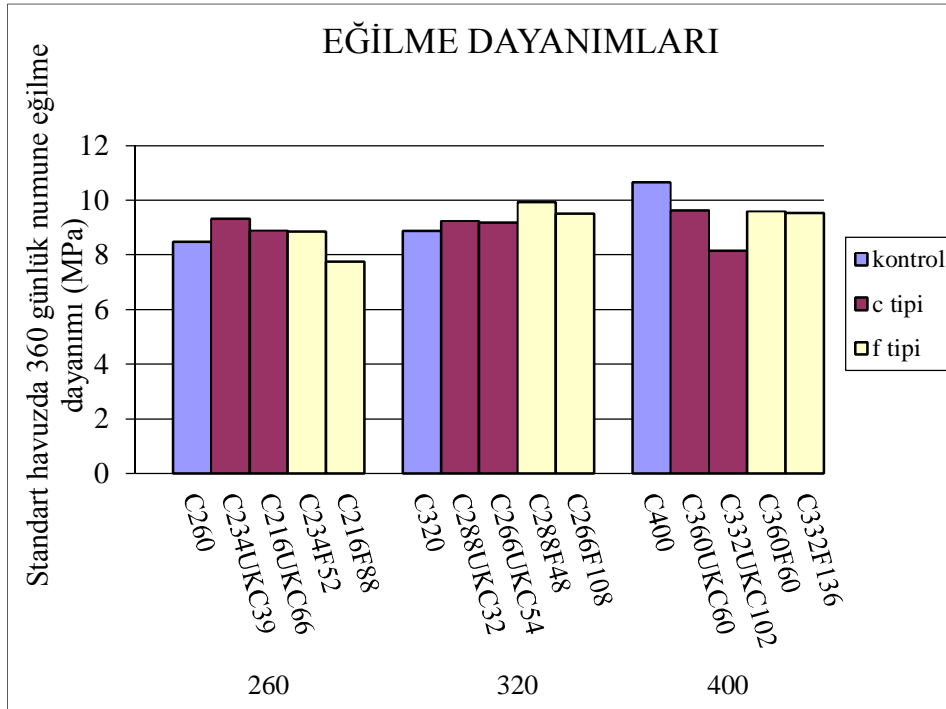
En yüksek eğilme dayanımı kaybı $MgSO_4$ çözeltisinde bekleyen 260 dozajlı kontrol numunede meydana gelmiştir.

400 dozajlı C332F136 kodlu F tipi uçucu kül ikameli beton, $MgSO_4$ etkisi altında standart havuzda bekleyen karşılaştırma numunesine göre % 5 eğilme dayanımı kaybıyla tüm serilerin içinde $MgSO_4$ etkisi altında en iyi sonucu vermiştir. 260, 320, 400 dozajlı kontrol numunelerde en büyük eğilme dayanımı kaybı meydana gelmiştir.

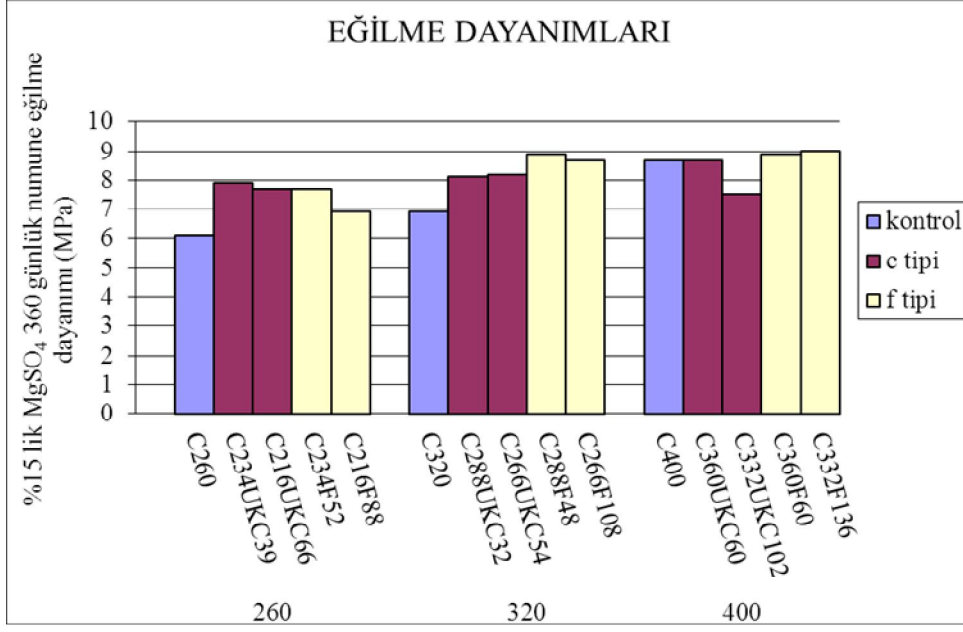
% 17 çimento çıkarım oranına sahip karışımlar % 10 çimento çıkarım oranlılara göre daha az eğilme dayanımı kaybına uğramıştır. 260, 320, 400 dozajlı betonları % 10 çimento çıkarımlı serilerin hem F tipi hem de C tipi uçucu kül ikameli betonlarda benzer eğilme dayanımı kaybına uğramışlardır. Çimento dozajı arttıkça eğilme dayanım kaybı azalmıştır.



Şekil 5.32. Sülfat etkisi altında kalmış ve standart havuzda bekleyen numunelerin eğilme dayanımı değerleri



Şekil 5.33. Standart havuzda bekleyen numunelerin eğilme dayanımı değerleri



Şekil 5.34. MgSO₄ etkisi altında kalmış betonların eğilme dayanımı değerleri

BÖLÜM 6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmayla F ve C tipi uçucu küllerin çimentoya ikame edilmesiyle üretilen betonların mekanik özellikleri, etkinlikleri ve dayanıklılığa etkileri karşılaştırılmış, elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda verilmiştir.

- F ve C tipi uçucu küllerin özgül yüzey alanlarının birbirine çok yakın olmasına rağmen genellikle aynı karışım oranlarında C tipi uçucu kül ikameli karışımların su ihtiyacının F tipi uçucu kül ikameli betonlara göre daha az olduğu görülmüştür. Bunun nedeni F tipi uçucu külün özgül ağırlığının C tipi uçucu küle göre düşük olmasıdır. Karışımlardaki uçucu kül miktarı ağırlıkça hesaplandığından aynı ağırlıktaki F tipi uçucu külün hacmi C tipine göre daha fazladır. Daha fazla hacimdeki uçucu kül su ihtiyacını arttırmıştır. Su/toplam bağlayıcı madde oranlarına baktığımızda ise her seride uçucu küllü betonların değerleri kontrol betonundan düşük çıkmıştır. Sonuç olarak uçucu kül miktarının artmasıyla su/bağlayıcı oranı azalmıştır. Böylece uçucu kül, işlenebilirliği iyileştirmiş ve betonda su ihtiyacını azaltmıştır.
- Basınç dayanımı deney sonuçlarına göre F tipi uçucu kül ikameli betonların daha çok erken yaşlarda kontrol betonuna çok yakın değerler aldığı ileriki yaşlarda ise uçucu küllü betonların basınç dayanımlarının büyük bir kısmının kontrol betonundan daha yüksek değerler aldığı görülmüştür. C tipi uçucu kül ikameli betonların daha çok erken yaşlarda F tipi uçucu kül ikameli betonlardan daha iyi basınç dayanımı sonucu verdiğini ancak ileriki yaşta ise F tipi uçucu kül ikameli betonların C tipi uçucu kül ikamelilere göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bunun nedeni ise F tipi uçucu külün ortamda serbest kireç oluşmasını beklemesinden dolayı zamana ihtiyaç duymasından kaynaklanmaktadır.

- Uçucu küllü betonların kompasite değerleri kontrol betonlarına göre daha yüksek değerler vermiştir. Buna sebep olarak, uçucu küllerin betondaki boşlukları azalttığı söylenebilir.
- F ve C tipi uçucu küllerin çimento ile ikame edilmesiyle üretilen betonların hem 28. günde hem de 90. günde ultrases geçiş hızları kontrol betonlarına göre daha yüksek çıkmıştır. 400 dozajlı F tipi uçucu kül ikameli betonların ultrases geçiş hızı aynı dozajdaki C tipi uçucu kül ikameli betonlara göre daha yüksek çıkmıştır. Yüksek dozajda ortamda bulunan serbest kireç daha fazla olduğundan F tipi uçucu kül ikameli betonların kimyasal bileşimindeki SiO_2 , Al_2O_3 oranının buna paralel olarak yüksek olması daha fazla serbest kireç bağlanmasını sağlamıştır.
- Ultrases geçiş hızı ölçüm boyu küp numuneler için 15 cm silindir numuneler için 20 cm'dir. Aynı karışımın farklı iki boyuttaki numunesinde ultrases geçiş hızı (küp/silindir) oranı dozaj arttıkça hem F hem de C tipi uçucu küllerin ikame edildiği betonlarda birbirine yaklaşmıştır.
- F ve C tipi uçucu küllü üretilen betonlarda basınç dayanımı ve elastisite modülü arttıkça etkinlik katsayısı da artmıştır.
- F ve C tipi uçucu küllü üretilen betonlarda uçucu küllerin etkinliği çimento dozajı arttıkça, yükselmiştir. Bunun sebebi ise karışımda çimento miktarı arttığı zaman ortamda hidratasyon ürünü Ca(OH)_2 artmış, bu nedenle Ca(OH)_2 ile reaksiyona giren uçucu kül miktarı artmıştır. Böylece dayanımda önemli rolü olan C-S-H (Kalsiyum Silika Hidrate) daha fazla oluşmuştur. Bu nedenle uçucu külün reaksiyona girdiği Ca(OH)_2 miktarında arttığından uçucu kül daha etkin kullanılmıştır.
- Uçucu kül etkinliğinin zamana göre değişimi ise, puzolanik özelliğinden dolayı betonun ilerleyen yaşlarında etkinliğin yükselmesi şeklinde meydana gelmiştir. 28 ve 90 günlük k etkinlik değerleri incelendiğinde, uçucu kül

etkinliğinin zaman içerisinde arttığı görülmüştür. Elde edilen k etkinlik faktörü sonuçlarından bir diğeri ise uçucu kül etkinliğinin F ve C tipi uçucu kül ikameli betonların % 17 çimento eksiltilemelerinde, % 10 eksiltilelen numunelere göre daha fazla olmasıdır.

- Su/çimento ve su/bağlayıcı oranı azaldıkça uçucu kül etkinliği artmıştır. Bunun nedenlerinden biri de uçucu külün içerdiği küresel tanecikler yağlama etkisi yaptığından belirli bir işlenebilirlik değeri için su ihtiyacı azalmıştır.
- F ve C tipi uçucu kül ikameli betonlarda dozaj arttıkça kılcallık katsayısında düşüş meydana gelmiştir. Uçucu kül ikamesiz betonlardaki boşluk oranının uçucu kül ikameli betonlardan daha büyük olduğundan kılcallık katsayısı da büyük olmuştur.
- % 10 ve % 17 çimento çıkarım oranlı seriler karşılaştırıldığında % 17 çimento çıkarım oranlı seriler daha düşük kılcallık katsayısı sonucunu vermiştir. Özgül ağırlık farkından dolayı aynı ağırlıktaki F tipi uçucu kül, C tipine göre daha fazla hacimdedir. Bu nedenle kılcallık deney sonuçlarına bakıldığında F tipi uçucu külün C tipi uçucu külden boşlukları daha iyi doldurduğu F tipi uçucu kül ikameli betonların kılcallık katsayılarının daha düşük sonuçlar verdiği görülmüştür.
- F Tipi uçucu kül kimyasal bileşim analizine bakıldığında içerisinde yer alan SiO_2 ve Al_2O_3 miktarının C Tipi uçucu küle oranla daha fazla olması kılcallık bakımından F tipi uçucu küllü betonların en düşük sonucu vermesine sebep olmuştur. Bir uçucu külün bağladığı $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarı, uçucu külün aktif fazlarının içerisindeki SiO_2 , Al_2O_3 miktarı ile ilişkilidir.
- Sadece portland çimento kullanılarak üretilen kontrol betonların hızlandırılmış klor geçirimliliği F ve C tipi uçucu kül ikameli betonlara göre oldukça yüksek çıkmıştır. Kontrol numunelerde 260 dozajdan 400 dozaja doğru dozaj arttıkça klor geçirimliliğinde bir düşüş meydana gelmiştir. 260, 320, 400 dozajlı karışımların tümünde % 17 çimento çıkarımlı F ve C tipi uçucu kül ikameli betonlar % 10 çimento çıkarımlı F ve C tipi uçucu kül

ikameli betonlara göre daha düşük klor geçirimliliği değeri vermiştir. Bunun sebebi ise karışımda çimento miktarı arttığı zaman ortamdaki hidratasyon ürünü Ca(OH)_2 'nin artması, böylece Ca(OH)_2 ile reaksiyona giren uçucu kül miktarının artması ve dayanımda önemli rolü olan C-S-H'nin daha fazla oluşmuşmasıdır.

- F ve C tipi uçucu kül ikameli betonlar ve kontrol betonların donma çözülme deneyleri sonunda eğilme dayanımlarındaki azalma değerleri incelendiğinde kontrol numunelerin çevrim sonrasındaki eğilme dayanımı kaybı uçucu kül ikameli betonlara göre daha yüksek olmuştur. Ayrıca 260 dozajlı serilerde dayanım kaybı en yüksek olurken 400 dozajlı kontrol ve uçucu küllü betonlarda eğilme dayanım kaybı daha az olmuştur.
- MgSO_4 çözültisi içinde 12 ay boyunca bekleyen 260 dozajlı F ve C tipi uçucu kül ikameli ve kontrol numunelerde sülfat etkisi direncinin 320 ve 400 dozajlılara göre daha az olduğu görülmüştür. Ancak aynı dozajda uçucu kül ikameli olanların kontrollere göre performansı daha iyi olmuştur. Özgül ağırlık farkından dolayı aynı ağırlıktaki F tipi uçucu kül, C tipine göre daha fazla hacimdedir. Bu nedenle incelikleri birbirine yakın olmasına rağmen F tipi uçucu kül daha fazla boşluk doldurabilmektedir. Bu da F tipi uçucu kül ikameli betonların boşluk miktarına bağlı olarak sülfat dayanıklılığı hususunda daha iyi sonuçlar vermesine neden olmuştur.
- Kontrol numuneler kendi içinde karşılaştırılacak olursa 260 dozajlıda 0.00066, 320 dozajlıda 0.00092, 400 dozajlıda 0.0011 oranında boy artışı meydana gelmiştir. Burada en fazla boy değişimi en yüksek dozajlıda meydana gelmiştir. Ca(OH)_2 miktarı yüksek dozajlı beton serilerde daha fazla olduğu için meydana gelen genişleme de o derece büyük olmuştur.
- Bir puzolanın bağladığı Ca(OH)_2 miktarı, puzolanın aktif fazlarının içerisindeki SiO_2 miktarı ile ilişkilidir. Puzolandaki CaO/SiO_2 oranı arttıkça C-S-H azaldığından dolayı bu oran C tipi uçucu kül ikamelilerde 0.32 iken F tipi ikamelilerde 0.02 mertebesinde olduğundan F tipi ikameli karışımlarda

C-S-H oranı yüksek olduğundan sülfata karşı en iyi direnç gösteren kül olmuştur.

- Yapılan gözle muayenede magnezyum sülfat çözeltisine maruz kalan beton numunelerde gözle yapılan inceleme sonucu en fazla bozulma uçucu kül katkısız numunelerde görülmüştür. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerin yüzeyinde beyazımsı bir tabaka oluştuğu (çiçeklenme) ve bu beyazımsı tabakanın zamanla yumuşadığı, köşe kısımlarında dökülmelere neden olduğu tespit edilmiştir.
- $MgSO_4$ çözeltisi içinde 12 ay boyunca bekleyen 260, 320, 400 dozajlı kontrol numunelerde en büyük eğilme dayanımı kaybı meydana gelmiştir. En yüksek eğilme dayanımı kaybı magnezyum sülfat etkisindeki 260 dozajlı kontrol numunede meydana gelmiştir. 400 dozajlı C332F136 kodlu F tipi uçucu kül ikameli beton, magnezyum sülfat etkisi altında standart havuzda bekleyen karşılaştırma numunesine göre % 5 kayıpla tüm serilerin içinde sülfat etkisi altında en iyi sonucu vermiştir.
- $MgSO_4$ çözeltisi içinde 12 ay boyunca bekleyen % 17 çimento çıkarım oranına sahip karışımlar % 10 çimento çıkarım oranlılara göre daha az eğilme dayanımı kaybına uğramıştır. 260, 320, 400 dozajlı betonları % 10 çimento çıkarımlı serilerin hem F tipi hem de C tipi uçucu kül ikameli betonlarda benzer eğilme dayanımı kaybına uğramışlardır. Çimento dozajı arttıkça eğilme dayanım kaybı azalmıştır.

- Yapılmış olan bu çalışmayla F tipi (Çatalağzı Termik Santrali) ve C tipi (Çayırhan Termik Santrali) uçucu küllerinin farklı çimento dozajlarında, iki farklı çimento çıkarım oranı ve üç farklı uçucu kül eklenme oranı ile çimentoya ikame edilmesiyle üretilen betonların mekanik özelliklerinin, etkinliklerinin ve dayanıklılığa etkilerinin karşılaştırılması incelenmiştir. Uçucu küllerin betonda kullanılması mekanik ve dayanıklılık özellikleri açısından yararlı olmuştur. Bu konuda ileride farklı incelik veya puzolanik özelliklere sahip uçucu küller kullanılarak araştırmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] ANUK, O., CEM I 42.5 çimentolu düşük dozajlı betonlarda F tipi uçucu külün etkinliği, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, 2004.
- [2] ÖZTURAN, T., Yüksek mukavemetli beton üretiminde mineral katkı maddelerin etkinliği, 2. Ulusal Beton Kongresi, Ankara, Türkiye, pp. 280-291, 1991.
- [3] POSTACIOĞLU, B., Bağlayıcı Maddeler Cilt-1, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul, 1986.
- [4] ASTM C 618, Specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete, 1991.
- [5] TOKYAY, M., ERDOĞDU, K., TÜRKER, P., Traslar ve Traslı Çimentolar, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 63 s, 2005.
- [6] ERDOĞAN, T., Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara, 741 s, 2003.
- [7] HEWLETT, P.C., Lea's Chemistry of Cement and Concrete, John Wiley and Sons Inc, Fourth Edition, New York, 982 p, 1998.
- [8] MASSAZZA, F., Evaluation of Cements and Cementitious Systems: History and Prospects, Cement and Concrete Technology in the 2000s, Second International Symposium, 6-10, TCMA, İstanbul, pp.3-28, September 2000.
- [9] MASSAZZA, F., Puzolanlar, Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları Semineri, (Çevirenler: Atalay, B., Çolakoglu, H., Ertürk, F., Katnas, F.), Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 166 s, 1989.
- [10] ÖZTURAN, T., ve GÖKÇE, A., Uçucu Kül Puzolanik Aktivitesi İle İlgili Bazı Mevcut Standartların Değerlendirilmesi, 4. Ulusal Beton Kongresi, Maya Basın Yayın, İstanbul, 432 s, 1996.
- [11] TUYGUN, C. S., Çayırhan Uçucu Külünün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Faktörünün İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, 2002.

- [12] BAYKAL, G., ÖZTURAN T., SAVAŞ M. VE RAMADAN K., Uçucu Külün İnşaat Mühendisliğinde Bazı Kullanım Olanakları, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, ss. 89-99, 1993.
- [13] ERDOĞAN, T., Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, ss. 1-8, 1993.
- [14] TS EN 450, Uçucu kül, betonda kullanılan tarifler, özellikler ve kalite kontrolü, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1998.
- [15] KARAYİĞİT, A. ve ONACAK, T., Çayırhan Termik Santrali Uçucu Küllerinden Zeolit Elde Edilmesi, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, YDAPÇAG-534 nolu proje, 188 s, 1999.
- [16] BERRY, E. E. and MALHOTRA, V. M., Fly Ash in Concrete, Energy, Mines and Resources Canada: CANMET, Ottawa, pp. 223-229, 1986.
- [17] TOKYAY, M., Betonda Uçucu Kül Kullanımı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, Türkiye, ss. 29-36, 1993.
- [18] TÜRKER, P., ERDOĞAN, B., KATNAŞ, F. VE YEĞİNOBALI, A., Uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 2003.
- [19] WESCHE, K., Fly Ash in Concrete Properties and Performance, E and FN Spon., London, 1991.
- [20] ATAKAY, O., Uçucu küllerin katkılı çimento üretiminde kullanılması-tane inceliği ve katkı miktarının etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2006.
- [21] ATANUR, A., BAYDAR, A., DEMİR, A., TEMOÇİN, C., YAĞIZ, F., KIZILKILIÇ, N. ve KOCAÇITAK, S., GÜRSU, Y., Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanılma Olanakları, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Direktörlüğü, Ankara, 158 s, 1979.
- [22] TOKYAY, M., ERDOĞDU, K., Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 70 s, 1998.
- [23] ÖNER, A., Uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren betonların mekanik ve durabilite özellikleri açısından optimum bileşiminin incelenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, 2005.
- [24] TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [25] ASTM C 618, Specification for fly ash & raw or calcined natural pozzolan for use a mineral admixture in portland cement concrete, 1978.

- [26] AIQIN, W., CHENGZHI, Z., AND WEI, S., Fly Ash Effects: 1. The Morphological Effect of Fly Ash, Cement and Concrete Research, USA, 33, 2023-2029, 2003.
- [27] MISHRA, S.R., KUMAR, S., PARK, A., RHO, J., LOSBY, J., AND HOFFMEISTER, B.K., Ultrasonic Characterization of the Coring Process of PCC Fly Ash-Cement Composites, 50, 317-323, 2003.
- [28] MCCARTHY, M.J., and DHIR R.K., Development of High Volume Fly Ash Cements For Use in Concrete Construction, Fuel, 84, 1423-1432, 2005.
- [29] ANTIOHOS, S.K., and TSIMAS, S., A Novel Way to Upgrade the Coarse Part of a High Calcium Fly Ash For Reuse Into Cement Systems, Waste Management, Greece, 2006.
- [30] KIATTIKOMOL, K., JATUAPIKATTUL, C., SONGPIRIYAKIJ, S., AND CHUTUBTIM, S., A Study of Ground Coarse Fly Ashes With Different Finenesses From Various Sources as Pozzolanic Materials, 2001, Cement & Concrete Composites, 23, 335-343, 2001.
- [31] AKMAN, M. S., Yapı Malzemeleri, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, Türkiye, 1987.
- [32] CROW, R.D., and DUNSTAN, E.R. "Properties of fly ash concrete", Proceedings, Symposium on Fly Ash Incorporation in Hydrated Cement Systems; Editor, Sidney Diamond; Materials Research Society; Boston; pp. 214-225; 1981.
- [33] COMPTON, F.R., and MACLNNIS, C. "Field trial of fly ash concrete"; Ontario Hydro Research News; pp. 18-21; Jan.-Mar., 1952.
- [34] BARROW, R.S., HADCHITI, K.M., CARRASQUILLO, P.M. and CARRASQUILLO, R. L., Temperatur Rise and Durability of Concrete Containing Fly Ash, Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete Volume 1, Trondheim, Norway, pp. 331-347, 1989.
- [35] LANGLEY, W.S., CARETTE, G.G. and MALHOTRA, V. M., Strength Development and Temperature Rise in Large Concrete Blocks Containing High Volumes of Low-Calcium (ASTM Class F) Fly Ash, ACI Materials Journal, 89, pp. 362-368, 1992.
- [36] HAQUE, M. N., DAY, R. L., LANGAN, B. W., Realistic Strength of Air-Entrained Concretes with and without Fly Ash, ACI Materials Journal, 85, pp. 241-247, 1988.
- [37] GEBLER, S., KLIEGER, P., Effect of fly ash on the air-void stability of concrete; Proceedings, First International Conference on the Use of Fly Ash,

- Silica Fume Slag and Other Mineral By-Products in Concrete; Montebello, Canada; July 31-August 5, 1983; Editor, V.M. Malhotra; ACI Special Publication SP-79; pp. 103-142; 1983.
- [38] POSTACIOĞLU, B., Bağlayıcı Maddeler Cilt-2, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul, 1987.
- [39] SIVASUNDARAM, V., CARETTE, G. G. AND MALHOTRA, V.M., Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of low-calcium fly ash, Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete Volume 1, Trondheim, Norway, pp. 45-73, 1989.
- [40] OLEK, J., DIAMOND, S., Proportioning of Constant Paste Composition Fly Ash Concrete Mixes, ACI Materials Journal, 85, pp. 241-247, 1989.
- [41] SCHIESSL, P. and HÄRDTL, R., The change of mortar properties as result of fly ash processing, Supplementary Papers of Third CANMET-ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete, Trondheim, Norway, pp. 277-294, 1989.
- [42] WELSH, G.B., and BURTON, J.R., Sydney fly ash in concrete; Commonwealth Engineer (Australia), pp. 62-67; Jan. 1, 1958.
- [43] KOCATAŞKIN, F., Betonun dünü, bugünü, yarını, 2. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, pp. 23-25, 1991.
- [44] COPELAND, B.G.T., PFA concrete for hydraulic tunnels and shafts, Dinorwick pumped storage scheme-case history; Proceedings, International Symposium on the Use of PFA in Concrete; University of Leeds, England; April 14-16, 1982; Editors, J.A. Cabrera and A.R. Cusens, pp. 323-343, 1982.
- [45] REHSI, S.S., Studies on Indian fly ashes and their use in structural concrete; Proc 3rd Int Ash Utilization Symposium; Pittsburg; March 13-14, 1973; Information Circular IC 8640; U.S. Bureau of Mines, pp. 231-245, 1973.
- [46] LANE, R.O., and BEST J.F., Properties and use of fly ash in portland cement concrete; Concrete International 4, pp. 81-92, July 1982.
- [47] OKADA, R., HIRANO, S., NAKAPAWA, Y., NAKAHIRA, J., MATSUOKA, Y., and OHTOMO, T., Characteris of Antiwashout under water concrete with high granulated blast-furnace slag and fly ash content, Fourth CANMET/ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, İstanbul, Turkey pp.953-970, 1992.
- [48] MEHTA, P. K. and GJORV, O. E., Properties of Portland Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica Fume, Cement and Concrete Research, 12, pp. 587-595, 1982.

- [49] YUAN, R.L., and COOK , J.E., Study of a class C fly ash concrete; Proceedings, first international conference on the use of fly ash, silica fume slag and other mineral by-products in concrete; montebello, Canada; July 31-August 5, 1983; Editor, V.M. Malhotra; ACI Special Publication SP-79, pp. 307-319, 1983.
- [50] ŞENGÜL, Ö., TAŞDEMİR, M.A., SÖNMEZ, R., Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Klor Geçirimsizliği, İMO Bülten, Sayı:77, 2005.
- [51] CROW, R.D., and DUNSTAN, E.R., Properties of fly ash concrete, Proceedings, Symposium on Fly Ash Incorporation in Hydrated Cement Systems; Editor, Sidney Diamond; Materials Research Society; Boston, pp. 214-225, 1981.
- [52] GALEOTA, D., GIAMMATTEO M.M., MARINO R., Mechanical properties of concretes containing fly ash, Fourth CANMET/ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, İstanbul, Turkey pp.209-219, 1992.
- [53] GIFFORD, P.M., and WARD, M.A., Results of laboratory tests on lean mass concrete utilizing PFA to a high level of cement replacement, Proceedings, International Symposium on the Use of PFA in Concrete; University of Leeds, England; April 14-16, 1982; Editors, J.A. Cabrera and A.R. Cusens; pp. 221-230, 1982.
- [54] KANITAKIS, I.M., Permeability of concrete containing pulverized fuel ash; Proceedings, Fifth International Symposium on Concrete Technology; Nuevo Leon, Mexico; Dept. Of Civil Engineering, University of Nuevo Leon; Monterrey, Mexico; pp. 311-322, March 1981.
- [55] AKMAN, M. S. ve ERDİNÇ, M., Uçucu Küllü Betonlarda Klor Geçirimsizliği, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Eskişehir, Türkiye, s. 1-19, 1997.
- [56] MANGAT, P. S. and KHATIB, J. M., Influence of fly ash, silica fume and slag on sulfate resistance of concrete, ACI Materials Journal, 92, pp. 542-552, 1995.
- [57] TIKALSKY, P. J. and CARRASQUILLO, R. L., Influence of Fly Ash on the Sulfate Resistance of Concrete, ACI Materials Journal, 89, pp. 69-75, 1992.
- [58] FIDJESTOL, P., Durability of silica fume and fly ash concretes exposed to organic acids, Supplementary Papers of Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete, Trondheim, Norway, pp.459-485, 1989.

- [59] KOBAYASHI, S., HOZUMI, Y., NAKANO, T. and YANAGIDA, T., Study on the effect of the quality of fly ash for controlling alkali – aggregate reactions, Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete Volume 1, Trondheim, Norway, pp. 417-430, 1989.
- [60] VIRTANEN, J., Freeze-thaw resistance of concrete containing blast-furnace slag, fly ash or condensed silica fume; Proceedings, First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume Slag and Other Mineral By-Products in Concrete; Montebello, Canada; July 31-August 5, 1983; Editor, V.M. Malhotra; ACI Special Publication SP-79; pp.923-942, 1983.
- [61] ONABOLU, O.A., Some Properties of Crude Oil-Soaked Concrete–I. Exposure at Ambient Temperature, ACI Materials Journal, 86, pp. 150-158, 1989.
- [62] ÇİL, İ., Betonarme Donatısında Elektriksel Yöntemlerle Korozyon Ölçümü, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt:8, Sayı:1, ss.59-63, 2006.
- [63] BARADAN, B., YAZICI, H., ÜN, H., Betonarme yapılarda kalıcılık, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, 282 s., 2002.
- [64] AKÖZ, F., TÜRKER, F., KORAL, S., YÜZER, N., Effects of sodium sulfate concentration on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume, Cement and Concrete Research, Vol.25, pp.1360-1368, 1995.
- [65] NEVILLE, A.M., The confused world of sulfate attack on concrete, Cement and Concrete Research, Vol.34, pp.1275-1296, 2004.
- [66] AL-AMOUDI, O.S.B., Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments, Cement and Concrete Composites, Vol. 24, pp. 305-316, 2002.
- [67] POON, C.S., AZHAR, S., ANSON, M., WONG, Y.W., Comparison of the strength and durability performance of normal and high strength pozzolanic concretes at elevated temperatures, Cement and Concrete Research, Vol.31, pp.1291-1300, 2001.
- [68] PEKMEZCİ, B. Y. ve UYAN, M., Uçucu Küllerde Etkinlik Faktörü Kavramı, ss. 65-68, Hazır Beton, Mayıs-Haziran 2001.
- [69] SMITH, I. A., The Design of Fly Ash Concretes, Proc Inst Civil Engineers, London, England, pp. 769-790, 1967.
- [70] ÖZCAN, M., Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Beton Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Katsayılarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, 1997.

- [71] GÜLER, H., Uçucu küllü betonlarda bağlayıcı dozajı ve bileşiminin geçirimsizliğe etkisi, Lisans Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul, Türkiye, 1994.
- [72] AKMAN, S.M. and YÜCEL, K.T., Efficiency Factors of Turkish C Class Fly Ashes, Türkiye Hazır Beton Birliği XI. Beton Kongresi, İstanbul, Türkiye, 1995.
- [73] BABU, K.G. and RAO, G. S. N., Efficiency of Fly Ash in Concrete, Cement and Concrete Composites, 15, pp. 223-229, 1993.
- [74] ASTM C-1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM, U.S.A., 1997.
- [75] ERDOĞDU, Ş., KARATAŞ, E., Sülfat iyonu konsantrasyonu düşük ortamlara maruz betonun durabilitesinin karşılaştırılmalı olarak incelenmesi, Betonun Dayanıklılığı (Durabilite) 5.Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, pp. 555-565, 2003.
- [76] ATAHAN, H., PEKMEZCİ, B., UYAN, M., YILDIRIM, H., Sülfatların portland çimentolu ve sülfata dayanıklı çimentolu betonların durabilitesine etkisi, Betonun Dayanıklılığı (Durabilite) 5.Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, pp. 411-419, 2003.

ÖZGEÇMİŞ

13.09.1976 tarihinde İstanbul'da doğan Veysel AKYÜNCÜ ilköğrenimini Ali Kuşçu İlkokulu'nda ortaöğretimini Gelenbevi Ortaokulu'nda, lise öğrenimini Pertevniyal Lisesi'nde tamamlamıştır. 1999 yılında Pamukkale Üniversitesi'ni bitirmiş ve aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislik Fakültesi Yapı Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başlamış, 2002 yılında mezun olmuştur. 2005 yılında aynı fakültenin Yapı Malzemesi Anabilim Dalı'nda doktora öğrenimine başlamıştır.