

51.10.1

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

55789

**UÇUCU KÜL İNCELİĞİNİN
YÜKSEK DOZAJLI BETONUN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞ.MÜH. Osman Cihan ÇİÇEKLİ

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet UYAN 29./02/1996

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Saim AKYÜZ 29./02/1996

Doç. Dr. Hulusi ÖZKUL 29./02/1996

Y.O. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOKÜMANTASYON

OCAK 1996

ÖNSÖZ

Çalışmam sırasında anlayış ve yardımını esirgemeyen Değerli Hocam Prof. Dr. Mehmet Uyan'a teşekkürlerimi sunarım.

Yardımlarını anmadan geçemeyeceğim Prof. Dr. Erbil Öztekin'e, Akçimento ve Aslan Çimento Fabrikası yetkililerine, deneysel çalışmamda yardım ve ilgilerini esirgemeyen İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmanın her aşamasındaki yardımlarından dolayı arkadaşım İnş.Y. Müh. Ahmet Gökçe'ye teşekkür ederim.

Ayrıca beni her zaman destekleyen aileme minnet borçluyum.

Kütahya , Ocak 1996

Osman Cihan ÇİÇEKLI

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ	ix
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	3
1.1.1. Puzolan Tanımı ve Sınıflandırılması	3
1.1.2. Puzolanik Reaksiyon	4
1.1.3. Uçucu Kül	8
1.1.3.1. Uçucu Külün Kaynağı	11
1.1.3.2. Uçucu Külün Fiziksel Özellikleri	12
1.1.3.3. Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri	14
1.1.4. Uçucu Kül ve Beton	17
1.1.4.1. Taze Betonda Uçucu Kül Etkisi	18
1.1.4.2. Sertleşmiş Betonda Uçucu Kül Etkisi	22
1.1.4.3. Uçucu Kül İçeren Betonların Karıştırma Oranları	37
1.1.5. Uçucu Külün Çeşitli Alanlarda Kullanımı	42
1.2. Konuyla İlgili Çalışmalar	46
1.3. Araştırmanın Amacı	46
BÖLÜM 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	47
2.1. Deneysel Çalışmanın Kapsamı	47
2.2. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	47
2.2.1. Uçucu Külün Özellikleri	47
2.2.2. Portland Çimentosu Özellikleri	51
2.2.3. Agrega Özellikleri	53
2.3. Beton Üretimi ve Deneyler	53
2.3.1. Basınç Dayanımı	57
2.3.2. Eğilme Dayanımı	58
2.3.3. Dinamik Elastisite Modülü	59
2.3.4. Kılcallık Deneyi	60

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE İRDELENMESİ	62
3.1. Uçucu Kül ve Taze Beton Özellikleri	62
3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	65
3.2.1. Basınç Dayanımı	65
3.2.2. Eğilme Dayanımı	74
3.2.3. Dinamik Elastisite Modülü	83
3.2.4. Kılcallık Deneyi	92
BÖLÜM 4. SONUÇLAR	99
KAYNAKLAR	103
ÖZGEÇMİŞ	106



SEMBOL LİSTESİ

CH	: Ca(OH)_2
S	: SiO_2
CSH	: Kalsiyum - Silikat - Hidrat
A	: Al_2O_3
F	: Fe_2O_3
R	: Sülfat dayanım faktörü
C	: X mesafesinde t süresindeki klorit konsantrasyonu
D_c	: Klorit iyonu difüzyon katsayısı
δ	: Özgü ağırlık
E_d	: Dinamik Elastisite Modülü
ν	: Poisson oranı
V	: Ultrases hızı
Δ	: Betonun birim ağırlığı
k	: Kılcallık katsayısı
m	: Kılcallık katsayısının tespitinde uygun doğru eğimi

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 Hidrate Olan Portland-Puzolan Çimentosunda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'deki Azalma	5
Şekil 1.2 İyi Hidrate Olmuş Portland Çimentosu Hamuru İle Portland-Puzolan Çimentosu Hamurunun Şematik Gösterimi	6
Şekil 1.3 Çeşitli Oranlarda Santorin Toprağı İhtiva Eden Hidrate Olmuş Çimento Hamurlarının Boşluk Boyutu Dağılımı	7
Şekil 1.4 Uçucu Küllü ve Külsüz Betonda Basınç Dayanımının Zamanla Değişimi	23
Şekil 2.1 Seyitömer Termik Santralı İnce Uçucu Külü Granülometri Eğrisi	48
Şekil 2.2 Seyitömer Termik Santralı Orta Uçucu Külü Granülometri Eğrisi	49
Şekil 2.3 Seyitömer Termik Santralı Kalın Uçucu Külü Granülometri Eğrisi	49
Şekil 2.4 Agrega Karışım Granülometri Eğrisi	53
Şekil 3.1 İnce Uçucu Külün Taramalı Elektron Mikroskobu Altındaki Görünüşü	64
Şekil 3.2 İri Uçucu Külün Taramalı Elektron Mikroskobu Altındaki Görünüşü	64
Şekil 3.3 İri Uçucu Külün Taramalı Elektron Mikroskobu Altındaki Başka Bir Görünüşü	65
Şekil 3.4 % 10 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Basınç Dayanımlarının Zamanla Değişimi	66
Şekil 3.5 % 20 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Basınç Dayanımlarının Zamanla Değişimi	67
Şekil 3.6 % 30 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Basınç Dayanımlarının Zamanla Değişimi	68
Şekil 3.7 İnce Uçucu Kül İçeren Betonların Basınç Dayanımlarının Zamanla Değişimi	69

Şekil 3.8	Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Betonların Basınç Dayanımlarının Zamanla Değişimi	70
Şekil 3.9	Kalın Uçucu Kül İçeren Betonların Basınç Dayanımlarının Zamanla Değişimi	71
Şekil 3.10	Deniz Suyunda Islanma-Kuruma Çevrimine Maruz Bırakılmış Betonların Basınç Dayanımlarının Zamanla Değişimi	72
Şekil 3.11	Musluk Suyunda Kür Gören ve Deniz Suyunda Islanma-Kuruma Çevrimine Tabi Tutulan Betonların Basınç Dayanımları	73
Şekil 3.12	% 10 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Eğilme Dayanımlarının Zamanla Değişimi	75
Şekil 3.13	% 20 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Eğilme Dayanımlarının Zamanla Değişimi	76
Şekil 3.14	% 30 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Eğilme Dayanımlarının Zamanla Değişimi	77
Şekil 3.15	İnce Uçucu Kül İçeren Betonların Eğilme Dayanımlarının Zamanla Değişimi	78
Şekil 3.16	Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Betonların Eğilme Dayanımlarının Zamanla Değişimi	79
Şekil 3.17	Kalın Uçucu Kül İçeren Betonların Eğilme Dayanımlarının Zamanla Değişimi	80
Şekil 3.18	Deniz Suyunda Islanma-Kuruma Çevrimine Maruz Bırakılmış Betonların Eğilme Dayanımlarının Zamanla Değişimi	81
Şekil 3.19.	Musluk Suyunda Kür Gören ve Deniz Suyunda Islanma-Kuruma Çevrimine Tabi Tutulan Betonların Eğilme Dayanımları	82
Şekil 3.20	% 10 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin Zamanla Değişimi	84
Şekil 3.21	% 20 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin Zamanla Değişimi	85
Şekil 3.22	% 30 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin Zamanla Değişimi	86
Şekil 3.23	İnce Uçucu Kül İçeren Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin Zamanla Değişimi	87

Şekil 3.24	Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin Zamanla Değişimi	88
Şekil 3.25	Kalın Uçucu Kül İçeren Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin Zamanla Değişimi	89
Şekil 3.26	Deniz Suyunda İslanma-Kuruma Çevrimine Maruz Bırakılmış Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin Zamanla Değişimi	90
Şekil 3.27	Musluk Suyunda Kür Gören ve Deniz Suyunda İslanma-Kuruma Çevrimine Tabi Tutulan Betonların Dinamik Elastisite Modülleri	91
Şekil 3.28	% 10 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Kılcallık Katsayılarının Zamanla Değişimi	93
Şekil 3.29	% 20 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Kılcallık Katsayılarının Zamanla Değişimi	94
Şekil 3.30	% 30 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Kılcallık Katsayılarının Zamanla Değişimi	95
Şekil 3.31	İnce Uçucu Kül İçeren Betonların Kılcallık Katsayılarının Zamanla Değişimi	96
Şekil 3.32	Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Betonların Kılcallık Katsayılarının Zamanla Değişimi	97
Şekil 3.33	Kalın Uçucu Kül İçeren Betonların Kılcallık Katsayılarının Zamanla Değişimi	98

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Puzolanların Sınıflandırılması	3
Tablo 1.2. 1984 Yılına Ait Çeşitli Ülkelerdeki Uçucu Kül Üretimi ve Kullanım Oranları	9
Tablo 1.3. Uçucu Kül Kimyasal Bileşimi Sınırlandırılması	15
Tablo 1.4. Uçucu Küllü Çimento Standardı	15
Tablo 1.5. F ve C Sınıfı Küllerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	16
Tablo 1.6. F ve C Sınıfı Küllerin Kimyasal Kompozisyonu	16
Tablo 1.7. Türkiye Uçucu Külleri Kimyasal Bileşimi	16
Tablo 1.8. Deniz Suyunda Bulunan Zararlı Maddelerin Uçucu Kül İçeren Betona Potansiyel Etkisi	31
Tablo 1.9. Örnek Rolkrit Karışımları	44
Tablo 1.10. Texas Commerce Tower’da Kullanılan Beton Karışımı	45
Tablo 2.1. Uçucu Küllerin Kimyasal Analizi	50
Tablo 2.2. Puzolanik Aktivite Deneyi Malzeme Miktarları ve Deney Sonucu	51
Tablo 2.3. Portland Çimentosu Fiziksel Özellikleri	52
Tablo 2.4. Portland Çimentosu Kimyasal Analizi	52
Tablo 2.5. Portland Çimentosu Dayanım Değerleri	52
Tablo 2.6. Kullanılan Agregaların Özellikleri	53
Tablo 2.7. Beton Üretim Grupları	54
Tablo 2.8. Deney Programı	55
Tablo 2.9. Üretilen Betonların Gerçek Bileşimleri ve Çeşitli Özellikleri	56
Tablo 2.10. Musluk Suyu ve Deniz Suyunda Bekletilen Betonların Basınç Dayanımları	57

Tablo 2.11.	Musluk Suyu ve Deniz Suyunda Bekletilen Betonların Eğilme Dayanımları	58
Tablo 2.12.	Ölçülen Ultrases Hızları	59
Tablo 2.13.	Beton Birim ağırlıkları	60
Tablo 2.14.	Musluk Suyu ve Deniz Suyunda Bekletilen Betonların Dinamik Elastisite Modülleri	60
Tablo 2.15.	Üretilen Betonların Kılcallık Katsayıları	61
Tablo 3.1.	Üretilen Betonların Eşit İşlenebilirlik İçin Su İhtiyacı ve Şahit Betona Kıyasla Su İhtiyacı Değişimi	63
Tablo 3.2.	Musluk Suyu ve Deniz Suyunda Bekletilen Betonların Şahit Betona Kıyasla Basınç Dayanımları	65
Tablo 3.3.	Musluk ve Deniz Suyunda Bekletilen Betonların Şahit Betona Kıyasla Eğilme Dayanımları	74
Tablo 3.4.	Musluk ve Deniz Suyunda Bekletilen Betonların Şahit Betona Kıyasla Dinamik Elastisite Modülleri	83
Tablo 3.5.	Üretilen Betonların Şahit Betona Kıyasla Kılcallık Katsayıları	92

ÖZET

Bu çalışmada, Seyitömer Termik Santrali'na ait üç farklı incelikteki uçucu kül kullanılarak, uçucu kül inceliğinin beton özelliklerine olan etkisi incelenmiştir.

Üç farklı incelikteki uçucu kül, ağırlıkça üç farklı ikame oranında (% 10, % 20 ve % 30) PÇ 32.5 yerine ikame edilerek, 375 kg/m^3 toplam bağlayıcı miktarına sahip, çökme hunisinde $12 \pm 1 \text{ cm}$. çökme yapabilecek şekilde sabit işlenebilirliği olan, herhangi bir katkı içermeyen betonlar üretilmiştir. Üretilen 10 betondan biri şahit, diğer 9 tanesi ise uçucu küllü betondur.

Üretilen betonlar, $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}$. ebadındaki prizmatik kalıplara dökülmüştür. Her seride, normal kür görmek üzere 8 adet, $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 'deki klima odasında, varil içindeki deniz suyunda haftalık ıslanma-kuruma çevrimine tabi tutmak amacıyla da 4 adet, her seride 12 ve toplam olarak 120 adet bu numunelerden üretilmiştir. Normal kür görmüş betonlarda, 28, 56 ve 91. günde ultrases hızı ölçülmüş, 3, 7, 28 ve 91 günde eğilme ve basınç deneyleri, 28 ve 91 günde ise kılcallık deneyleri yapılmıştır. Deniz ortamındaki numuneler üzerinde, 28 ve 56 günde ultrases hızı ölçülmüş, 28 ve 91 günde ise eğilme ve basınç deneyleri yapılmıştır.

Yapılan deneyler neticesinde şu sonuçlara varılmıştır:

TS 639'da yer alan puzolanik aktivite testi, öngördüğü su miktarı bakımından uçucu küllü harçların kalıplara homojen olarak yerleştirilmesine imkan vermediğinden, bu test açısından yetersiz görülmüştür. Bunun yerine, eşit kıvam için karışım hazırlanmasının daha uygun olacağı düşünülmektedir.

İnce ve orta incelikte kül içeren betonlar, düşük ikame oranlarında, hem dayanım hem de kılcallık açısından şahite yakın, hatta aşan bir performans göstermişlerdir.

SUMMARY

THE EFFECT OF FINENESS OF FLY ASH ON THE PROPERTIES OF CONCRETE WITH HIGH CEMENTIOUS CONTENT

According to ACI 116R, fly ash is 'the finely divided residue resulting from the combustion of ground or powdered coal that is transported from the fire box through the boiler by flue gases'. Fly ash possesses pozzolanic properties similar to naturally occurring pozzolanic materials, primarily of volcanic or sedimentary origin.

Fly ash is classified as an artificial pozzolan. Pozzolan is a 'siliceous or siliceous and aluminous material, which in itself possesses little or no cementitious value but will, in finely divided form and in the presence of moisture, chemically react with calcium hydroxide at ordinary temperatures to form compounds possessing cementitious properties'.

Pozzolans, such as fly ash, are used as ingredients in portland cement concrete.

ASTM 618 defines two classes of fly ash - Class F and Class C. Class F fly ash is usually produced by burning sub-bituminous coal or lignite. The separation fly ash into two classes reflects difference in composition which affects cementitious and pozzolanic properties. Class C fly ash usually has cementitious properties in addition to pozzolanic properties, while Class F fly ash is rarely cementitious when mixed with water alone.

Fly ash is used in concrete as a separately batched material and as an ingredient in blended cement.

Fly ash is used in concrete for reasons including economics, improvements and reduction in temperature rise in fresh concrete, workability, and contribution to durability and strength in hardened concrete.

When fly ash concrete is properly cured, fly ash reaction products help fill in the spaces between hydrating cement particles in the cement paste fraction of the concrete, thus lowering its permeability to water and aggressive chemicals.

The slower reaction rate of many fly ashes is a real help in limiting the amount of early heat generation and the detrimental early temperature rise in massive structures. Using fly ash in concrete saves energy by reducing the amount of

portland cement (an energy intensive product) required to achieve the desired concrete properties.

In Türkiye, 15 millions of tones of fly ash are obtained from coal-fired power plants annually. The production of cement, however is about 30-35 millions of tones. Fly ash is formed great potential whether in partially use instead of cement or in the production of cement.

Unfortunately, use of fly ash is nearly at zero level with respect to developed countries. Although Türkiye is not a wealthy country, not to use this potential is a big deficient. However, the concrete industry which is developing continuously has sufficient accumulation for use of fly ash.

The necessary thing is to determine perfectly the properties of fly ash and the properties that arise from its use and to maintain their properties. In order to verify this, a good labor between university, concrete industry and other official and private associations or a center that put forward studies including waste material, etc. is required urgently.

In this study, the effect of fineness of fly ash has been investigated on the properties of concrete with high cementitious content.

Having three different finenesses of fly ash corresponding to Seyitömer coal-fired power plants were used in experimental research. By using these ashes that have three different replacement ratios by weight instead of ordinary portland cement, 10 series of concrete has been produced.

Cementitious content and amount of workability are kept constant at 375 kg/m³ and 12±1 cm in the production of concrete, respectively. No admixture was used.

Some part of produced concretes was subjected to normal cure and the other part to weekly wetting-drying cycle in sea water kept in barrel waiting in climate room which has a temperature of 20±2 °C.

Pulse velocities, flexural and compressive strengths and capillarity coefficients of concretes subjected to normal cure were determined at 28 th, 56 th, and 91 th days; and 3 rd, 7 th, 28 th, and 91 th days; and 28 th and 91 th days, respectively.

Pulse velocities and flexural and compressive strengths of concretes subjected to wetting-drying cycle in sea water were determined at 28 th, 56 th and 91 th days; and 28 th and 91 th days, respectively.

The mix proportions of produced concretes, the properties of fresh concrete and the result of experiments mentioned above are presented in tables just below.

Table 1. Mix Proportions and Fresh Concrete Properties of Produced Concretes

Series	Cement OPC 32.5 (kg)	Fly Ash		Water (kg)	W C+FA	Aggregate				Air Content (%)	Unit Weight (kg/m ³)	Comp. (m ³ /m ³)	Slump (cm)
		Replacement Ratio (%)	Particle Size			D _{max} (mm)	C.S. I (kg)	C.S. II (kg)	Sand (kg)				
1	375.0	0	—	228	0.608	16	704	345	427	3	2342	0.769	11.5
2	337.5	10	FINE	235	0.627	16	697	343	405	1	2315	0.764	11.0
3	300.0	20	FINE	241	0.643	16	690	339	381	1	2284	0.758	11.5
4	262.5	30	FINE	250	0.667	16	680	334	350	3	2243	0.747	11.5
5	337.5	10	MEDIUM	239	0.637	16	692	340	390	2	2295	0.759	11.5
6	300.0	20	MEDIUM	243	0.648	16	690	338	358	1	2261	0.756	12.0
7	262.5	30	MEDIUM	251	0.669	16	678	333	319	4	2209	0.745	12.0
8	337.5	10	COARSE	240	0.640	16	692	340	385	1	2291	0.759	11.5
9	300.0	20	COARSE	252	0.672	16	678	331	341	2	2230	0.746	11.0
10	262.5	30	COARSE	262	0.699	16	666	326	293	5	2170	0.733	12.5

Table 2. Copressive Strengths of Concretes Cured in Standart and Sea Water

Particle Size Class	Replacement Ratio (%)	Compressive Strength (MPa)					
		Standart Cure Water				Sea Water	
		3 d.	7 d.	28 d.	91 d.	28 d.	91 d.
Control	--	27.36	32.73	40.47	45.34	41.57	46.66
Fine	10	19.60	32.56	40.88	53.32	43.80	45.70
Fine	20	13.84	22.19	36.39	42.52	34.45	36.65
Fine	30	11.64	19.36	32.16	37.81	31.08	35.99
Medium	10	18.02	29.03	41.10	44.39	39.55	44.85
Medium	20	15.27	25.52	32.35	37.35	34.61	36.68
Medium	30	12.71	20.73	31.55	34.80	31.51	35.07
Coarse	10	15.39	25.68	36.19	37.97	38.62	39.53
Coarse	20	15.00	21.18	34.02	37.50	33.10	35.20
Coarse	30	10.78	17.72	26.65	30.55	24.44	27.03

Table 3. Flexural Strengths of Concretes Cured in Standart and Sea Water

Particle Size Class	Replacement Ratio (%)	Flexural Strength (MPa)					
		Standart Cure Water				Sea Water	
		3 d.	7 d.	28 d.	91 d.	28 d.	91 d.
Control	--	4.440	6.022	7.568	8.912	6.023	7.780
Fine	10	3.593	5.493	6.336	7.864	5.532	7.462
Fine	20	2.571	4.557	6.832	7.931	4.517	6.949
Fine	30	2.582	4.010	6.983	7.641	4.702	7.005
Medium	10	3.798	5.867	7.641	8.628	5.129	7.936
Medium	20	3.246	5.103	7.864	8.449	5.231	6.520
Medium	30	2.722	4.534	7.194	7.791	5.031	5.237
Coarse	10	3.073	5.176	6.358	7.942	6.001	7.635
Coarse	20	3.636	4.467	5.493	7.038	4.534	6.698
Coarse	30	2.465	3.620	5.298	7.853	3.971	5.466

Table 4. Dynamic Modulus of Elasticity of Produced Concretes

Particle Size Class	Replacement Ratio (%)	Dynamic Modulus of Elasticity (GPa)					
		Standart Cure Water			Sea Water		
		28 d.	56 d.	91 d.	28 d.	56 d.	91 d.
Control	--	44.818	46.990	48.114	43.129	45.068	46.166
Fine	10	45.698	47.748	49.498	41.778	44.858	46.738
Fine	20	42.720	42.825	44.780	39.314	41.194	42.930
Fine	30	39.253	48.872	42.113	36.215	38.785	40.515
Medium	10	44.256	46.053	47.998	41.145	42.874	45.121
Medium	20	41.515	43.021	44.225	37.323	40.502	42.390
Medium	30	39.578	41.380	42.193	37.011	39.623	40.421
Coarse	10	43.996	46.794	46.369	41.969	43.584	45.797
Coarse	20	40.344	42.309	42.652	37.574	39.826	40.515
Coarse	30	36.292	38.443	38.868	33.259	35.971	37.372

Table 5. Capillarity Coefficients of Produced Concretes

Particle Size Class	Replacement Ratio (%)	Capillarity Coefficient (cm ² /sn)	
		28 d.	91 d
Control	--	6.637x10 ⁻⁶	2.091x10 ⁻⁶
Fine	10	5.772x10 ⁻⁶	1.944x10 ⁻⁶
Fine	20	5.078x10 ⁻⁶	2.522x10 ⁻⁶
Fine	30	7.245x10 ⁻⁶	5.468x10 ⁻⁶
Medium	10	6.601x10 ⁻⁶	3.413x10 ⁻⁶
Medium	20	5.134x10 ⁻⁶	3.439x10 ⁻⁶
Medium	30	6.972x10 ⁻⁶	3.435x10 ⁻⁶
Coarse	10	7.914x10 ⁻⁶	2.321x10 ⁻⁶
Coarse	20	8.913x10 ⁻⁶	3.566x10 ⁻⁶
Coarse	30	12.080x10 ⁻⁶	6.377x10 ⁻⁶

The conclusions derived from results of experiments can be summarized as follows:

- Although Turkish fly ashes generally increase water demand of mortars, pozzolanic activity test carried out according to TS 639 reduces water amount for fly ash mortar compared to control mortar. TS 639 is inconvenient from the point of view of pozzolanic activity test.

- As the replacement ratio and coarseness increase, water amount that is necessary for equal workability in concrete increases for used fly ashes. This phenomenon can be explained in such a way that as the fly ash gets coarser, it loses its spherical form and becomes rough and porous.

- Concrete containing fine and medium fly ash shows good performance from the point of view of whether mechanical strength and capillarity at the low replacement ratios.



BÖLÜM 1.

GİRİŞ

Çeşitli endüstriyel alanlardaki üretim sonucu, çeşitli atık malzemeler açığa çıkmaktadır. Bu endüstriyel atıkların büyük bir kısmı kullanılmamakta; üretimin yapıldığı yere yakın bir yerde depolanmaktadır. Bu depolama sonucu toprak, hava ve su kirlenmektedir. Üstelik bu atık maddelerden bir kısmı ekonomik değere de sahiptir.

Öte yandan beton kullanımı yaygın olan ve bu gidişle yerini kaptırmayacağı anlaşılan bir yapı malzemesidir. Günümüzde, sürekli olarak artan bir şekilde, bir ürünü kaliteden taviz vermeksizin nasıl ucuza üretebiliriz eğilimi yerleşmektedir. Ülkemizin ekonomik durumu da düşünüldüğünde, beton gibi ülkemiz inşaat sektöründe çok yaygın olarak kullanılan bir malzeme için de bu yaklaşım bir zorunluluktur.

Ülkemizde toz haline getirilmiş kömür kullanılarak yapılan elektrik üretimi, enerji üretiminin yarısından fazlasını oluşturmaktadır. Bu üretim sonucu açığa çıkan uçucu kül denilen malzemenin yıllık miktarı 15 milyon tonu bulmaktadır. Ülkemizde, kullanım açısından, endüstriyel atıklar içinde en büyük potansiyeli uçucu kül oluşturmaktadır. Maalesef, çoğu zaman uçucu küller ya bir tepe oluşturacak şekilde depolanmakta ya da denize dökülmektedir.

Uçucu külün de dahil olduğu endüstriyel atıkların beton imalinde kullanılması, onların atık olmaktan çıkarılıp ekonomik bir değer haline getirilmesi çok büyük faydalar sağlamaktadır. Uçucu külün kullanılması ile beton özelliklerine olumlu katkının yanında, ekonomik ve hatta ekolojik faydalar sağlanacaktır.

Zaten toplumumuzda, inşaat projelerini gerçekleştirenlerin, işin sosyal, ekonomik ve çevresel sonuçlarını göz önüne almaları hususunda artan bir bilinç vardır. Maalesef, ülkemizde uçucu kül kullanımı, en çok kullanım olduğu yılda dahi üretimin % 7'sini aşamamıştır. Kullanımın bu kadar az olması, beton sektörünün

genellikle yeni yöntem ve malzemelere soğuk bakmasına; Türkiye uçucu küllerinin özellikleri ve kullanımı hakkında yeterli bilginin olmamasına; uçucu küllerin sabit özelliklere sahip olmamasına; çimento sektörünün kazanç kaygısına bağlanabilir.

Uçucu külün kullanımını yaygınlaştırmak için, uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin fazla değişim göstermeksizin belirlenmesi gereklidir. Bu konuda, ülke çapında organize bir çalışmaya çok ihtiyaç duyulmaktadır.

Uçucu kül, betonda doğrudan doğruya portland çimentosu yerine ikame edilerek veya portland çimentosu klinkeri ile öğütülerek uçucu küllü çimento üretiminde kullanılır. Böylece uçucu kül, maliyeti yüksek olan portland çimentosundan tasarruf sağlanmasına yardım ederken, taze betonda sıcaklık yükselişini düşürür, işlenebilirliği artırır; sertleşmiş betonda uzun vadede mekanik dayanıma ve durabiliteye olumlu katkıda bulunur. Uçucu külün betonda kullanımında, öncelikle uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmeli, özelliklerinin sürekli kontrolü yapılmalı, deneme karışımları hazırlanmalı, beton üretiminde ve betonun yerleştirilmesine özen gösterilmeli, rutubet kürüne önem verilmelidir.

Beton sektörünün dışında uçucu külü, geoteknikte, tarım sektöründe, ilaç sanayinde, tuğla ve kiremit üretiminde ve hatta çevre teknolojilerinde kullanmak mümkündür.

Bu çalışmada, Seyitömer Termik Santrali'na ait ince uçucu kül, iri baca altı külü ve bu iki külün ağırlıkça yarı yarıya karıştırılması ile elde edilen orta incelikteki uçucu kül kullanılmıştır. Aynı kaynağa ait bu üç farklı incelikteki kül, ağırlıkça üç farklı oranda (% 10, % 20 ve % 30) PÇ-32.5 çimentosu yerine ikame edilerek, eşit işlenebilirliğe sahip, katkı maddesi içermeyen, biri şahit beton olmak üzere 10 seri beton üretilmiştir. Uçucu külün performansının önemli parametrelerinden biri olan inceliğin, yüksek dozajlı beton özelliklerine ve yine uçucu külün deniz ortamında ıslanma-kuruma çevrimine tabi tutulmuş betonun özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır.

Bu çalışma uçucu külün inşaat sektöründe kullanılmasına bir katkıda bulunmak, kullanımın artmasına yardımcı olmak amacıyla yapılmıştır. Elbette ki, bu yaygınlaşmanın sağlanması için, endüstriyel atıkların özelliklerinin ve performanslarının, Türkiye çapında organize bir çalışma, kurumlararası yardımlaşma, işbirliği içinde belirlenmesi ve kamuoyu oluşturulması gereklilik arz etmektedir.

1.1. Genel Bilgiler

1.1.1. Puzolan Tanımı ve Sınıflandırılması

Puzolan reaktif formda silis ihtiva eden doğal veya yapay malzeme olarak tanımlanmaktadır. ASTM C 618'e göre puzolan tek başına çok az bağlayıcılığı olan veya hiç olmayan, fakat ince toz halde, rutubet olması durumunda, bağlayıcılık özelliği olan bileşikler oluşturmak için normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksit ile kimyasal reaksiyon yapan silisli veya hem silisli hem de alüminli malzeme olarak tanımlanmaktadır [1]. Bu tanım uçucu kül, pirinç kapçığı külü, yoğunlaştırılmış silis dumanı vs. gibi normal sıcaklıkta kireç ile reaksiyona giren pek çok endüstriyel ürünleri de kapsamaktadır [2]. Puzolanlar Tablo 1.1.'de olduğu gibi sınıflandırılabilir.

Tablo 1.1. Puzolanların Sınıflandırılması [3]

PUZOLANLAR	
DOĞAL PUZOLANLAR	YAPAY PUZOLANLAR
1-Volkanik Kül	1-Uçucu Kül
2-Volkanik Tüfler	2-Yüksek Fırın Cürufu
3-Diyatome Toprağı	3-Öğütülmüş Pişmiş Kil
4-Riyolitik Ponza Taşı	4-Silis Dumanı
	5- Pirinç Kapçığı Külü
	6-Demirli Olmayan Cüruf

Yaklaşık 2000 yıl kadar önce Romalılar "Pulvis Puteolanus" denilen volkanik külü kireç ile harç ve beton üretmek üzere karıştırdılar [4]. 19. yüzyılda portland çimentosunun bulunuşuyla, puzolan-kireç karışımları, portland çimentosunun daha hızlı priz alıp sertleşmesi nedeni ile nadiren yapı betonlarında kullanıla gelmiştir. Portland çimentosu temel olarak, hidrasyonda kalsiyum silikat hidratları ve kalsiyum hidroksit oluşturan, dikalsiyum ve trikalsiyum silikatları içermektedir. Kalsiyum hidroksit bağlayıcı bir malzeme değildir ; ancak beton karışımına puzolan katılırsa bağlayıcı olabilmektedir. Puzolanlar ikincil bağlayıcı olarak portland çimentosunun

ağırlık yüzdesi oranında çimentonun bir kısmı yerine veya ilave olarak çimentoya önceden karıştırılarak katkılı çimento üretiminde kullanılırlar [2].

Puzolan nasıl kullanılırsa kullanılsın, puzolanik reaksiyon ile birlikte faydalar da aynı kalmaktadır. Puzolanın portland çimentolu betonda kullanımından sağlanan temel teknik avantajlar, işlenebilirliğin artması, hidrasyon ısısının düşmesi ile termal çatlakların azalması, su geçirimsizliğinin artması, sülfat ve asit ortamlarında durabilitenin artması ve alkali-agrega reaksiyonu ile oluşan çatlamlara karşı dayanımın artmasıdır [2].

Uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve doğal puzolanlar mineral katkı maddeleri olarak bilinirler ve harç ve beton üretiminde büyük çoğunlukla ikincil bağlayıcı madde şeklinde, portland çimentosunun ağırlık yüzdesi oranında çimentonun bir kısmı yerine veya ilave olarak bazen de çimentoya önceden karıştırılarak katkılı çimento şeklinde kullanılırlar. Mineral katkı maddeleri taze betonun işlenebilme ve su ihtiyacı ile reolojik özelliklerine; terleme, ayrışma, hava sürüklenme, hidrasyon ısı ve plastik rötre gibi özelliklerine etki ederler.

Sertleşmiş betonda da bu maddeler mekanik özelliklere ve durabiliteye oldukça önemli etkiler yaparlar. Dayanım ve dayanım kazanma hızı ile elastisite modülü, sünme ve rötre mineral katkı kullanımından etkilenirler. Geçirimsizlik, asitlere ve sülfata dayanıklılık, alkali-agrega reaksiyonu, donma-çözülme tekrarlarına dayanıklılık, deniz ortamına dayanıklılık ve donatı korozyonu gibi tüm durabilite özellikleri de bu katkıların kullanımından etkilenmektedir. Mineral katkı maddelerinin özelliklere olan etkilerinin yönü ve şiddeti çoğu zaman katkının cinsi, kullanım miktarı, kullanım yöntemi, fiziksel, kimyasal ve puzolanik özellikleri gibi faktörlere bağlı olmaktadır [5].

1.1.2. Puzolanik Reaksiyon

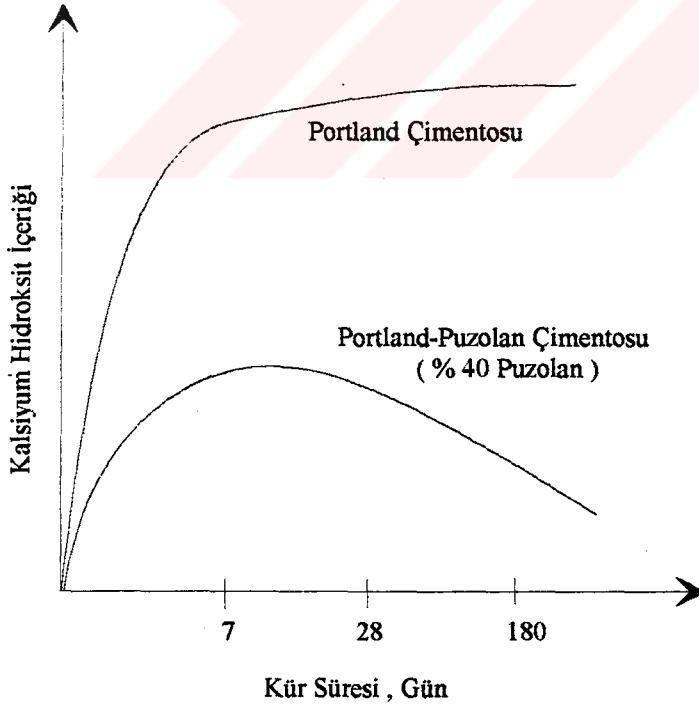
ASTM C 618 doğal puzolanların portland çimentosu betonunda kullanımı için SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 'in yüzde toplamalarının en az % 70 olmasını istemektedir [5]. Portland çimentosu ile puzolan ve su karışımında, puzolanda SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 amorf veya zayıf bir kristal yapıda mevcut olduğunda, bu oksitlerin kimyasal olarak normal sıcaklıkta, portland çimentosundaki kalsiyum silikatların hidrasyonu neticesi

oluşan kalsiyum hidroksit ile bağlayıcılık özelliği olan bileşikler oluşturmak için tepkimeye gireceği kabul edilir. Puzolanlar genellikle önemli yüzdede SiO_2 içerirler ve temel puzolanik reaksiyon, portland çimentosunun temel kalsiyum silikat reaksiyonuna benzer kalsiyum silikat hidrat (CSH) oluşumunu içerir.



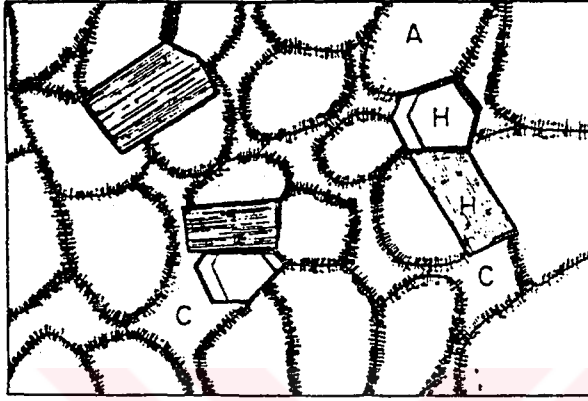
Puzolanik reaksiyon yavaştır; bu sebeple bu reaksiyon ile birlikte dayanım kazanma hızı ve hidratasyon ısısı düşük olur. Öte yandan, portland çimentosundaki C_3S hidratasyonu hızlıdır bu sebeple bu reaksiyon ile birlikte dayanım kazanma hızı ve hidratasyon hızı yüksek olur. Şu da belirtilmelidir ki; puzolanik reaksiyon kireç (CH) tüketen, portland çimentosu reaksiyonu ise kireç üreten reaksiyondur. Puzolanik reaksiyon, sıcaklık ve alkaliler ve sülfatlar gibi kimyasal katkılarla hızlandırılabilir.

Portland çimentosu ile bir puzolan karışımı hidrate olduğunda, puzolanik reaksiyonun ilerlemesi ile zamanla serbest kalsiyum hidroksitte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) azalma oluşur [2].



Şekil 1.1. Hidrate olan portland-puzolan çimentosunda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'deki azalma [2]

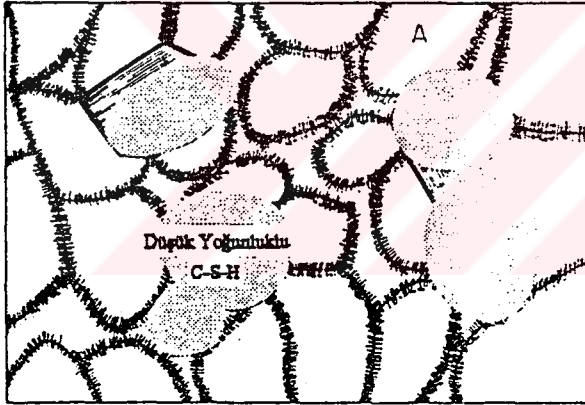
Özetle, iyi hidrate olmuş portland çimentosu hamuru ile kıyaslandığında, puzolan içeren benzer hamur daha az kalsiyum hidroksit ve daha fazla CSH ihtiva edecektir. Ayrıca, hidrate olmuş portland-puzolan çimentosunda mevcut olan CSH'daki CaO'nun SiO_2 'e oranının hidrate olmuş portland çimentosundakinden biraz düşük olduğu ileri sürülmektedir. Bu kısmen, portland-puzolan çimentosunun üstün kimyasal dayanımını açıklamaktadır [2].



A - En az bir koloidal boyuta (1-100 nm) sahip zayıf kristalli C-S-H taneceklerini kümesini temsil eder. Kümedeki tanecekler arası boşluk 0.5 ile 3.0 nm. arası değişmektedir. Ortalama ise 1.5 nm. dir

H - CH , $\text{C}_4\text{A}\cdot\text{SH}_{12}$, C_4AH_{10} gibi hegzagonal ürünleri temsil etmektedir.

C - Aslında su ile kaplı olan boşlukların tamamen çimento hidrasyon ürünleri ile doldurulmadığında var olan kapiler boşlukları temsil etmektedir. Bu kapiler boşlukların boyutları 10 nm. den 1 μm. ye kadar değişir ; fakat iyi hidrate olmuş , düşük su/çimento oranına sahip hamurlarda 100 nm. den küçüktür.



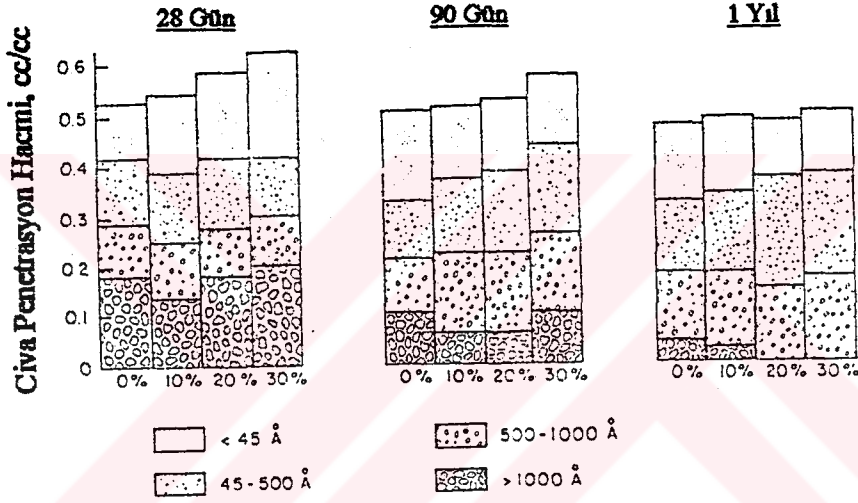
$\text{CH} + \text{S} \rightarrow \text{C-S-H}$ (Düşük Yoğunluklu)

Puzolanik reaksiyon, yoğun olan CH fazını ve büyük boşlukları düşük yoğunluklu C-S-H fazına ve küçük boşluklara çevirir

Şekil 1.2. İyi Hidrate Olmuş Portland Çimentosu Hamuru (Üstteki) İle Portland - Puzolan Çimentosu Hamurunun Şematik Gösterimi [2].

Pek çok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalar, kimyasal özelliklerden çok çimento hamurunun boşluk boyutlarını da içeren puzolanik reaksiyonun fiziksel özelliklerinin, mekanik dayanımın ve kimyasal durabilitenin artması için muhtemelen daha önemli olduğunu ortaya koymuştur [2]. Yapılan bir çalışmada, boşluk dağılımı

grafikleri, portland çimentosu-Santorin toprağı ihtiva eden hamurların 28, 90 gün ve 1 yıllık yaşlarda civa girişi porozimetresi ile elde edilmiştir. Büyük boşluklar (yani 1000 ve 500 Å'dan büyük olan boşluklar) düşük dayanım ve yüksek permeabiliteyi getirmektedir. Çalışmada, 1 yıllık yaşta % 20 veya % 30 puzolan içeren çimentolarda su geçirirmliliğinde önemli azalmalar gözlenebilmiştir. Bu durumda, yani 1 yıllık yaşta 1000 Å'dan büyük boşlukların ufalması tamamlanmaktadır [2].



Şekil 1.3. Çeşitli Oranlarda Santorin Toprağı İhtiva Eden Hidrate Olmuş Çimento Hamurlarının Boşluk Boyutu Dağılımı [2]

Betonda uçucu külün oluşturduğu dayanım katkısı, çekirdekleşme ve puzolanik faktörlerin toplamıdır. Puzolanik reaksiyonun dayanıma olan katkısının, uçucu kül / toplam bağlayıcı miktarı oranına bağlı olduğu bulunmuştur. Bu oran arttıkça, geç yaşlarda oluşan dayanım artışı artmaktadır. Bu oran azalırken de, puzolanik reaksiyonun dayanıma olan katkısı azalmaktadır [6].

1.1.3. Uçucu Kül

Bu terim elektrik enerjisi endüstrisinde 1930'lu yıllarda ortaya çıktı. 1930'larda kömür ile çalışan elektrik santrallerinden çok miktarda uçucu kül elde etmek mümkün hale geldi. Uçucu külün portland çimentosu içinde kullanımı yine bu tarihlerde başladı. 1937 yılında, R.E. Davis ve arkadaşları California Üniversitesi 'nde uçucu küllü betonla ilgili araştırma sonuçlarını yayımladı. Bu çalışma, ilk şartnamelerin, test metotlarının ve uçucu kül kullanımının temelini oluşturdu [4]. Davis ve meslektaşları çalışmalarında portland çimentosu hamurunda, uçucu külün kalsiyum ve alkali-hidroksitler ile reaktivitesini tanımladılar ; bununla da uçucu külün zararlı alkali-agrega reaksiyonlarına karşı önleyici davranışını tespit ettiler. A.B.D. Mühendisler Kolordusu, Islah Bürosu, büyük mühendislik firmaları ve diğer bazı kişi ve kurumlar uçucu külün kütle betonlarındaki yüksek sıcaklığı azaltması avantajını ve taze betonun işlenebilirliği üzerindeki olumlu etkisini tanıdılar ve uçucu külün faydalı yönleri ilk olarak büyük kütleli baraj inşaatlarında ortaya çıkmış oldu [4].

1970'lerdeki benzin krizi elektrik santrallerinde daha fazla kömür kullanımına sebep oldu. Daha fazla oranda kalsiyum oksit (CaO) ihtiva eden uçucu küller, yanmayan kısımlarında kalsiyum bileşikleri içeren taşkömürü ve linyit kullanımı nedeniyle elde edilebilir hale geldi. Uçucu külün artan elde edilebilme miktarı ile uyumlu olarak A.B.D., Kanada ve başka yerlerde yapılan yoğun çalışmalar kimyasal reaksiyonların daha iyi anlaşılmasına imkan verdi ve beton endüstrisi için şu anda kullanımı mümkün olan büyük miktardaki uçucu külün ekonomik olarak kullanımına olanak sağladı [4].

Dünyanın çeşitli ülkelerinde uçucu kül üretimi ve kullanım oranları Tablo 1.2'de verilmektedir. Tablodan görüleceği gibi gelişmiş ülkelerde, uçucu külün kullanım oranları % 10.64 -76.92 aralığında değişmektedir. Uçucu külün kullanımı, gelişmiş ülkelerde dahil, artan bilgi birikimi ile paralel olarak zamanla arttı. Aşağıdaki tabloda, dünyanın çeşitli ülkelerinde 1984 yılına ait uçucu kül üretim miktarları ile yüzde olarak kullanım oranları verilmektedir. Bu tablodan görüleceği, gelişmiş ülkelerde, kullanım oranları % 10.64 ile % 76.92 aralığında değişmektedir. Ülkemizin ekonomik durumu ve 15 milyon ton/yıl uçucu kül üretimi ve şimdiki kullanım oranının düşüklüğü düşünüldüğünde üzülmemek mümkün değildir.

Tablo 1.2. 1984 Yılına Ait Çeşitli Ülkelerdeki Uçucu Kül Üretimi ve Kullanım Oranları (Ton) [7]

ÜLKE	UÇUCU KÜL MİKTARI (10 ⁶)	
	ÜRETİM	KULLANIM(%)
AVUSTRALYA	3.5	7.14
KANADA	3.3	24.24
ÇİN	35	20.57
DANİMARKA	1	45
FRANSA	5.1	29.41
FEDERAL ALMANYA	2.6	76.92
HİNDİSTAN	19	2.63
JAPONYA	3.7	13.51
HOLLANDA	0.5	60
GÜNEY AFRİKA	12.9	0.78
İSVEÇ	0.1	20
İNGİLTERE	13.8	9.42
A.B.D	47	10.64

Türkiye’de uçucu kül ile ilgili çalışmalara, 1964 yılında D.S.İ. Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Kimya Lâboratuvarı uzmanları tarafından başlandığı görülmektedir. Yapılan çalışmada, Soma ve Tunçbilek uçucu küllerinin Gökçekaya barajında kullanım olanakları araştırılmıştır. Çalışma, A.S.T.M. ve Bureau of Reclamation metotlarına göre yapılmış ve iyi sonuç alınmıştır.

Aynı tarihlerde Karayolları Genel Müdürlüğü Lâboratuvarı’nda 4.Bölge Pazar Köprüsü inşaatı ile ilgili olarak uçucu küllü betonlar üzerinde bir araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada, kısmen çimento yerine kullanılan külün erken sürelerdeki basınç dayanımını olumlu şekilde etkilediği bildirilmiştir.

1968 yılında, uçucu kül standartlarının hazırlanmasına yardımcı olmak amacıyla İmar ve İskan Bakanlığı Yapı Malzemesi Lâboratuvarı’nda çeşitli santrallardan alınan küllerin puzolanik özellikleri üzerinde araştırma yapılmıştır. A.S.T.M. metotlarına göre yapılan deneyler sonucunda, elektrofiltrelerden alınmış olan küllerin, genellikle bu standartlara uygun olduğu, No. 200 elekten elendiği takdirde ise bu küllerin puzolanik değerlerinin daha da arttığı tespit edilmiştir [8].

1968 yılından 1973'e kadar geçen süre içinde iki barajın inşaatında 55000 tonun üzerinde uçucu kül kullanılmıştır. 1970'de Kütahya-Tavşanlı yolunun 700 m.lik bir bölümünde uçucu kül-çimento karışımı ile zemin stabilizasyonu çalışmaları yapılmıştır.

Çimento endüstrisinin uçucu külle tanışması ise yine 1970'lerde olmuştur. Bu yıllarda Afyon ve Balıkesir Çimento Fabrikaları'nda, Soma ve Seyitömer Termik Santralleri uçucu külleri kullanılarak, deneme amaçlı çimento üretimi gerçekleştirilmiştir.

1960 ve 1970'lerde uçucu kül üretimi sırasıyla 500.000 ve 1.200.000 ton/yıl civarında gerçekleşmiştir. Dolayısıyla, en fazla kullanım olduğu dönemlerde bile, uçucu kül kullanımı hiçbir zaman üretimin % 7'sini geçmemiştir. T.E.K yetkililerinden alınan bilgilere göre, kullanım son yıllarda daha da düşüktür. 1989 yılında üç termik santraldan 33355 ton uçucu kül satılmıştır. Bu rakam toplam üretimin % 0.4'ünden daha azdır. Aynı şekilde 1990'da tüketim üretimin % 0.3'ü civarında gerçekleşmiştir [9].

Türkiye'de uçucu kül kullanımının olması gerekenden daha az olmasının sebeplerini şöyle sıralayabiliriz :

- Sektörün nispeten tutucu karakterinden kaynaklanan yeni yöntem ve malzemelere duyulan şüphe,
- Türkiye uçucu küllerinin özellikleri ve yapı malzemesi olarak kullanılabilirlikleri hakkında yeterli birikimin bulunmaması,
- Uçucu küllerin sabit özellikleri sahip olmaması,
- Çimento sektörünün kazanç kaygısı.

TS 639'a göre uçucu kül toz halinde veya öğütülmüş taş kömürü veya linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucunda oluşan ve baca gazlarıyla sürüklenen silis ve alümino-silisli toz halinde bir yanma kalıntısıdır [10]. ACI 116 R'ye göre ise İngiltere'de toz haline getirilmiş yakıt külü olarak bilinen uçucu kül, kazan vasıtası ile gazlarla ocaktan taşınan öğütülmüş veya toz haline getirilmiş kömürün yanması neticesi oluşan ufak taneciklere ayrılmış kalıntı olarak tanımlanır.

Puzolanik katkı maddeleri arasında uçucu küllere aşağıda belirtilen nedenler dolayısıyla daha fazla önem verilmektedir :

- Uçucu küllerin santral civarındaki topluluklar ve ekilebilen arazi için mahzurlu olacağı düşünüldüğünden, bu küllerin toplanıp santral bölgesinden uzaklaştırılmaları gerekir. Örneğin, Tunçbilek santralında küller havai bir hat ile 3.5 km. uzaklıktaki bir vadiye boşaltılmakta; Çatalağzı'nda ise deniz kıyısına dökülmektedir. Küller beton teknolojisinde değerlendirildikleri takdirde santral işletmesine ve dolayısıyla da ülke ekonomisine yarar sağlayacaklardır [8].

- Santrallarda bilhassa elektrofiltreler yardımı ile toplanan uçucu küller genellikle çimento inceliğinde olduklarından, fabrikalarda ayrıca bir işleme tabi tutulmadan çimento ile beraber torbalanabilmekte veya arazide doğrudan doğruya betona katılabilmektedir. Buna karşılık, tras veya yüksek fırın cürufunun katkı maddesi olarak bu şekilde kullanılabilmesi için, çimento klinkeri ile beraber veya ayrıca öğütülmesi gerektiğinden, bu maddeler fabrika üretiminin arttırılması yönünden uçucu küller kadar etkili olamamaktadır [8].

1.1.3.1. Uçucu Külün Kaynağı

Toz haline getirilmiş kömürün elektrik santrallerinde artan kullanımından dolayı, uçucu kül elde edilmesi kolay bir malzemedir. Uçucu kül, normal olarak 200 no.lu elekten (75 μ m.) % 70-80 oranında geçecek şekilde parçalanmış ve öğütülmüş kömürün yanması ile ortaya çıkar. F sınıfı küller genellikle antrasit veya taşkömürü yakılması suretiyle meydana gelir. C sınıfı küller ise bitümlü şist veya linyit kömürünün yakılmasıyla meydana gelir [4].

Taşkömürü ve antrasit kömürü nadiren önemli oranda yüksek kalsiyumlu mineral maddeler içerir. Bitümlü şist ve linyit kömürleri yüksek oranda kalsiyum içerebilir veya bazen de içermeyebilir [4]. Uçucu külün iki sınıfa ayrılması, bağlayıcılık ve puzolanik özellikleri etkileyen kimyasal bileşimlerini yansıtır. C sınıfı küller puzolanik özelliklere ek olarak, bağlayıcılık özelliğine de sahiptir. F sınıfı küller ise tek başına su ile karıştırıldığında nadiren bağlayıcılık gösterir [4].

1.1.3.2. Uçucu Külün Fiziksel Özellikleri

Uçucu kül taneciklerinin boyut dağılımı, özgül ağırlığı ve bileşimi taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini etkilediği gibi sertleşmiş betonun dayanım gelişimini de etkiler.

Değişik santrallardan elde edilmiş veya aynı santraldan farklı kömür kaynaklarından sağlanmış uçucu küller farklı renklere sahip olabilir.

Uçucu kül rengi ve kullanılan uçucu kül miktarı, çimento veya ince agregadaki renk değişimlerini etkilediği gibi betonun rengini de etkileyebilir. Uçucu kül rengi, belli bir kaynaktan elde edilen uçucu kül renginin değişmesinin kömür kaynağının, kızdırma kaybının, demir içeriğinin ve yakma şartlarının değişmesinin göstergesi olması dışında genellikle bir mühendislik verisi değildir [4].

a) Tanecik Şekli

Bir uçucu külün tanecik şekli ve şekil özellikleri, kömürün kaynak ve üniformluğuna, yanmadan önceki toz haline getirilme derecesine, yanma ortamına (sıcaklık düzeyi ve oksijen temini), yanmanın üniformluğuna ve kullanılan toplama sisteminin mekanik ayırıcılığı, biriktirici filtreli veya elektrostatik çökelticili olup olmadığına, yani toplama sisteminin tipine bağlıdır. Uçucu kül taneciklerinin şekli aynı zamanda tanecik büyüklüğünün fonksiyonudur. Uçucu kül taneciklerinin çoğunluğu camsı, katı veya içi boş ve küresel şekillidir. İçi boş kürelere senosfer denir. Ufak kül tanecikleri içeren küreler ise plerosfer olarak bilinir. Kalan uçucu kül tanecikleri, yarı saydamlık ışık geçirmezlik, az boşlukluluk çok boşlukluluk aralığında yer alır ve şekilleri de yuvarlak ile uzun arasında değişir [4].

Avrupa'da yapılan çalışmalar göstermiştir ki; katkılı çimento üretiminde, uçucu kül ile çimentonun birlikte öğütülmesi, uçucu külün dayanıma katkısını artırmıştır [4]. Daha fazla öğütme, tanecik boyutunu ufaltır, senosferleri parçalar ve plerosferler tarafından içeren daha küçük parçalar ortaya çıkarır. Bununla birlikte, çimento klinkeri ile uçucu kül karışımı daha fazla öğütülürse su isteği artabilir.

b) İncelik

Uçucu küldeki tek tanelerin boyutu 1 μm . den küçük değerlerden 1 mm. den büyük değerlere kadar değişir. Mekanik ayırıcıların kullanıldığı eski santrallardan elde edilen uçucu kül, elektrostatik çöktürücülerin veya biriktirici filtrelerin kullanıldığı yeni santrallardan elde edilen uçucu küllerden daha kalındır. Betonda puzolan olarak kullanılması uygun olan uçucu küllerdeki tanelerin çoğu, 325 No.lu (45 μm) elekten geçerler. Belli bir kaynaktan elde edilen uçucu küllerin tanecik dağılımı, kömür kaynağında, kömür öğütülmesinde, proseste ve santral yükünde büyük bir değişiklik olmazsa genellikle sabit kalır [4].

Uçucu kül inceliğinin uçucu külün betondaki performansı üzerinde önemli etkisi vardır. Yapılan bir çalışmada, ASTM C 430 45 μm . elekten geçen inceliği, F sınıfı uçucu kül inceliği ile belli beton özellikleri arasında bağıntı kurmak için kullanıldı. Sonuçlar beton dayanımı, donma ve çözülme dayanımının No.325 elekten geçen uçucu kül oranının doğrudan fonksiyonu olduğunu göstermiştir. İnceliğin, uçucu külün betondaki performansının sağlam bir göstergesi olduğu ve inceliğin artmasıyla bu performansın olumlu yönde geliştiği kanaatine varılmıştır [4].

Pek çok C ve F sınıfı küllerin tanecik boyutu dağılımı hakkındaki bilgiler, büyük oranda 10 μm .’dan ufak taneciklerin dayanım üzerinde pozitif etkisi olduğunu göstermiştir [4].

c) Özgü ağırlık

Katı uçucu kül taneciklerinin özgül ağırlığı 1.97 ile 3.02 arasında değişmekte, fakat genelde 2.2 ile 2.8 arasında bir değer almaktadır. Bazı uçucu kül tanecikleri (örneğin senosferler) su üzerinde kalabilirler ki bu onların 1’den küçük özgül ağırlığa sahip olduğunu göstermektedir [4]. Camsı uçucu kül taneciklerinin içindeki hava kabarcıkları ve yığılmış tanecikler arasındaki boşluklar özgül ağırlıkta büyük değişikliklere sebep olabilmektedir. Özellikle demir ve karbon içeriğindeki oynamalar da, özgül ağırlıkta değişikliklere yol açabilmektedir. 100 μm . veya daha büyük ortalama dane çapına sahip uçucu küller maksimum 1.5-2.0 g/cm^3 arasında

özgül ağırlığa sahiptir. 50 µm. veya daha küçük ortalama dane çapına sahip uçucu küller 2.0-2.5 g/cm³ özgül ağırlığa sahiptirler [11]. Yani, yüksek özgül ağırlık çoğu zaman ince taneciklerin göstergesidir. F sınıfı küllerin C sınıfı küllere göre daha büyük özgül ağırlığa sahip olma eğiliminde olduğu belirtilmektedir [4]. C sınıfı küller daha ince taneciklere ve daha az senosfere sahiptirler. Böylece C sınıfı küller, 2.4 ile 2.8 arasında değişen yüksek özgül ağırlıklara sahip olabilmektedir.

Bazı kimyasal bileşenlerle özgül ağırlık arasında bağıntılar kurulmuştur. Bunlardan bir tanesi aşağıda verilmektedir [11].

$$\text{Özg.} = 2.23 + 0.016 (\text{Fe}_2\text{O}_3) - 0.006 (325 \text{ No.lu Elekte Kalan } \% \text{ U.K. Miktarı}) \quad (1.3.)$$

1.1.3.3. Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri

Uçucu küller kimyasal ve faz bileşimi dizilişinde karmaşıktır. Camsı ve billursu fazların heterojen terkbinden ibarettirler. Tipik bileşenler oksit şeklinde bulunmasalar da, kimyasal analizlerin sonuçlarını silika (SiO₂), alümina (Al₂O₃), ferrik oksit (Fe₂O₃), kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO) ve sülfür oksit (SO₃) şeklinde elementlerin oksitleri olarak açıklamak bir alışkanlık olmuştur [4].

Üç temel bileşende büyük değişiklikler olur. SiO₂ % 25-60, Al₂O₃ % 10-30 ve Fe₂O₃ % 5-25 miktarlarında bulunabilir. Eğer bu üç bileşenin yüzde toplamı % 70 veya daha fazla ise uçucu kül teknik olarak F sınıfı kül olarak adlandırılır. C sınıfı küller genellikle önemli oranda CaO denilen kalsiyum bileşikler ihtiva ettiğinden, biraz önce bahsedilen üç bileşenin toplamının % 50'den büyük olması gerekmektedir. MgO içeriği genellikle % 5'i aşmaz. Na₂O denilen alkali oksitlerin düzeyi C sınıfı küllerde genellikle % 5'ten azdır, fakat bazen bu küllerde % 10'a kadar çıkabilir.

C sınıfı küllerde kızdırma kaybı değerleri genelde % 1'den azdır, fakat % 1'den % 10'a kadar çeşitli değerler alabilir. Betonda kullanılan küllerdeki tipik kızdırma kaybı % 6'dır. F sınıfı küllerin esas aktif bileşeni silisli veya alüminosilikatlı camdır. C sınıfı küllerde ise kalsiyum alümino-silikattır [4].

Uçucu külün elde edildiği kömürün orijinine bağlı olarak değişik miktarlarda bulunacak ikinci derecede elementler titanyum, demir, magnezyum, fosfor, sülfür, oksijen, potasyum, sodyum, karbon ve çok az miktarda diğer bazı elementlerdir.

Ayrıca bazı uçucu küller, yanmamış kömürden başka çok az miktarda organik bileşikler içerirler. Kömür yakımında ve külün toplanması aşamalarında kullanılan bazı malzemeler uçucu külün özelliklerini etkileyebilir.

Karbon içeriği doğrudan belirlenemese de çoğu zaman kızdırma kaybı miktarına eşit olduğu kabul edilir. Bununla birlikte, yanma kaybı ayrıca birleşik su ve ortaya çıkabilecek hidrat ve karbonatların ayrışmasıyla kaybolan bir miktar karbondioksit içerir.

Ateşten uzaklaşırken ergimiş haldeki uçucu külün hızlı soğutulması, uçucu külün az miktarda billursu müllit, kuartz, magnetit ve hepatit gibi bileşenli baskın miktarda camsı malzeme olmasına sebep olur. Yüksek kalsiyumlu uçucu küllerde varolabilecek diğer bileşenler perikleyz, anidrit, alkali sülfat, melilit, mervinit, nefelin, sodalit, C_3S , C_3A ve diğer bazı bileşenlerdir. TS 639 uçucu kül standardı Tablo 1.3'de verilmiştir.

Tablo 1.3. Uçucu Kül Kimyasal Bileşimi Sınırlandırılması [10]

$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ (%)	>70.0
MgO (%)	<5.0
SO_3 (%)	<5.0
Rutubet (%)	<3.0
Kızdırma Kaybı (%)	<10.0

Tane Büyüklüğü : 200 μ elekte maksimum % 0.3

90 μ elekte maksimum % 8 kalıntı kalmalı.

Özgülyüzey : En az 3000 cm^2/gr . (Blaine inceliği) olmalı.

Uçucu küllü çimento çimento standardı (TS 640) Tablo 1.4.'de verilmiştir.

Tablo 1.4. Uçucu Küllü Çimento Standardı [12]

MgO (%)	<5.0
SO_3 (%)	<4.0
Tortu	<29.0
Kızdırma Kaybı (%)	<5.0

7 günlük basınç dayanımı 21 MPa

28 günlük basınç dayanımı 32.5 MPa

TS 640'a göre, uçucu kül katkıli çimentolara % 70-90 oranında portland çimentosu ile % 10-30 oranında uçucu kül karıştırılabilir.

TS 639 uçucu küllere yeterli bir tanımlama getirememektedir. Aitcin ve arkadaşlarınca hazırlanan tablolar aşağıda verilmiştir (Bkz. Tablo 1.5. ve Tablo 1.6.).

Tablo 1.5. F ve C Sınıfı Küllerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri [13]

ASTM Sınıflandırması	F Sınıfı			C Sınıfı			Diğer
Tanımlama	Ff	Fc	Fa	C1a	C2a	C1f	C2f
Kimyasal Yapı	Si. Alüminoz		Siliko-Kalsik		Sülfo Kalsik		
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	90.7	84.8	74.9	60.0	63.9	59.5	22.5
Özgülağırlık (gr/cm ³)	2.18	2.42	2.46	2.69	2.68	2.75	3.11
Özgülyüzey(cm ² /gr)	3600	3750	2600	2900	3200	7200	3650
D50 µm*	15	12	18	11	11	16	16
Puzolanik Aktivite	—	81	90	99	98	—	—

(*) D50 : Danelerin %50'sinin geçtiğı elek göz boyu

Tablo 1.6. F ve C Sınıfı Küllerin Kimyasal Kompozisyonu [13]

ASTM Sınıflandırması	F Sınıfı			C Sınıfı			Diğer
Tanımlama	Ff	Fc	Fa	C1a	C2a	C1f	C2f
Kimyasal Yapı	Si. Alüminoz		Siliko-Kalsik		Sülfo Kalsik		
SiO ₂	59.4	41.4	47.4	36.3	37.9	24.0	13.5
Al ₂ O ₃	22.4	24.8	21.3	17.4	18.9	18.5	5.5
Fe ₂ O ₃	8.9	18.6	6.2	6.4	6.5	17.0	3.5
SiO ₂ +R ₂ O ₃	90.4	84.8	74.9	60.0	63.3	59.5	22.5
CaO	2.6	2.5	16.6	26.5	24.9	24.0	59.0
Na ₂ O	2.2	1.5	0.4	2.2	0.8	0.8	—
MgO	1.3	0.7	4.7	6.6	6.6	1.0	1.8
SO ₃	2.4	1.2	1.5	2.8	3.0	8.0	15.1
Kızdırma Kaybı	2.0	9.5	15.0	0.6	0.8	—	—
Serbest Kireç				2.8	2.2		28.0

Türkiye'deki uçucu küllerin kimyasal özellikleri ise Tablo 1.7'de verilmiştir.

Tablo 1.7. Türkiye Uçucu Külleri Kimyasal Bileşimi [3,13,14]

Uçucu Kül Oksit (%)	Afşin Elbistan	Çatalağızı	Seyitömer	Soma-B	Tunçbilek	Yatağan	Orhaneli	TS 639 Limitleri	ASTM C 618 Limitleri	
									F	C
SiO ₂	27.4	56.8	40.6	39.8	56.4	51.2	48.8	—	—	—
Al ₂ O ₃	12.8	6.8	9.1	22.3	23.0	22.9	19.6	—	—	—
Fe ₂ O ₃	5.5	24.1	7.7	4.4	10.1	7.8	6.5	—	—	—
S+A+F	45.7	87.7	57.4	66.5	89.5	81.9	68.4	>70	>70	>50
CaO	47	1.4	19.9	25.4	2.1	13.0	10.1	—	—	—
MgO	2.5	2.4	8.1	1.9	3.3	2.8	4.0	<5	<5	<5
SO ₃	6.2	2.9	10.6	4.8	0.4	0.3	4.2	<5	<5	<5
Alkali	0.3	3.0	1.4	0.4	0.9	2.9	1.7	—	—	<1.5
TiO ₂	0.7	1.1	n.d	0.6	n.d	0.9	—	—	—	—
K. Kaybı	1.6	0.6	1.4	0.4	1.1	0.4	—	<10	<12	<6

Yukarıdaki sonuçlara baktığımız zaman, Çatalağzı, Yatağan ve Tunçbilek uçucu külleri $S+A+F > 70$ şartını sağlamakta, Orhaneli ve Soma-B ise bu şarta yaklaşmaktadır. Sonuç olarak Çatalağzı, Yatağan ve Tunçbilek F sınıfı, diğerleri ise C sınıfı küllerdir. Fakat başka çalışmalarda farklı değerler önümüze çıkmakta; bu da farklı zamanlarda alınan uçucu kül numunelerinin farklı özellikte olabildiğini göstermektedir. Bu değişiklikler, kömür bileşimindeki değişikliklere, yanma koşullarına, kül toplama sistemine, santral yükündeki değişikliklere bağlanabilir. Tek kaynağa ait uçucu küllerde kısa aralıklarda dahi özellikler açısından büyük değişiklikler olabileceği belirtilmektedir [11]. Deneysel çalışmada kullanılan Seyitömer Termik Santrali'ne ait kimyasal analiz sonucunda, $S+A+F$ toplamı yaklaşık % 75-83 aralığında değişmekte, dolayısıyla ASTM F sınıfı kül olarak tanımlanabilmektedir.

1.1.4. Uçucu Kül ve Beton

Uçucu kül, dünyanın pek çok yerinde doğal olarak bulunan özellikle tortul veya volkanik kökenli puzolanik malzemelere benzer puzolanik özelliklere sahiptir. Uçucu kül gibi puzolanlar, portland çimentosunun bir bileşeni olarak kullanılır.

Uçucu kül, ekonomi, taze betonda sıcaklık yükselişini düşürmesi, işlenebilirlik ve sertleşmiş betonda dayanım ve durabiliteye olumlu katkılarından dolayı kullanılmaktadır. Uçucu kül portland çimentosunun hidrasyon ürünlerinin etkin kullanımını sağlar. Bunlar :

a) Çimento hamurunun boşluk yapısında bulunan kalsiyum ve alkali hidroksit solüsyonları

b) Uçucu külün reaksiyonunun başlangıcı için önemli bir faktör olan Portland çimentosunun hidrasyon ısı [4].

Uçucu kül betonu gereği gibi kür edilirse, betonun çimento hamuru kısmındaki hidrate olmuş partiküller arası boşlukların doldurulmasına yardım eder, böylece su geçirimsizliği azalır, kimyasal zararlılara dayanım artar. Birçok uçucu külün yavaş reaksiyon hızı, kütle betonlarındaki zararlı ilk sıcaklık yükselişini ve erken ısı üretimi miktarının sınırlandırılmasına imkan verir. Betonda uçucu kül kullanımı, arzu edilen beton özelliklerini elde etmek için gerekli olan, üretiminde yoğun enerji harcanan

portland çimentosu miktarının azaltılması ile enerji tasarrufu sağlanmasına imkan verir. Atık bir malzeme olan uçucu külün kullanımı ile çevre kirliliği azalır.

Uçucu kül, beton ve harç üretiminde büyük çoğunlukla ikincil bağlayıcı madde şeklinde, portland çimentosunun ağırlık yüzdesi oranında çimentonun bir kısmı yerine veya ilave olarak, bazen de çimentoya önceden karıştırılarak katkılı çimento şeklinde kullanılır [5].

1.1.4.1. Taze Betonda Uçucu Kül Etkisi

Taze beton, kireç ve diğer bileşenlerden oluşan bir çözelti içinde büyük değişkenlik gösteren yoğunlukta, tanecik boyutunda, kimyasal bileşimde olan tanecik haldeki malzemelerin yoğunlaşmış süspansiyonudur. Sistem dengede değildir. Çimento su ile karışır karışmaz beton kütlelerini neticede birleştiren bağlayıcıyı oluşturacak reaksiyonlar başlar ; yeni tanecikler oluşur ve ilk tanecikler çözünür veya bağlayıcı ürünler ile kaplanır. Dağılma, topaklaşma ve yerçekimi kuvvetleri değişen kütledeki malzemelerin ortam içi dağılımını belirlemek için çekişirler. Kimyasal reaksiyon esnasında, ısı açığa çıkar ve sıcaklık yükselir. Bu olayların hepsinde uçucu kül bazı roller oynar. Düşük kalsiyumlu uçucu küller, büyük oranda küresel formlu ince agrega olarak rol oynarken yüksek karbonlu uçucu küller erken bağlayıcı reaksiyonlara katkıda bulunabilirler [15].

Beton, çoğu zaman yüksek yoğunlukta donatılı kalıp içine yerleştirildiğinden, çoğu durumda belli bir akıcılık, işlenebilirlik gereklidir. Bu işlenebilirlik, tüm bileşenlerin etkilediği sistemin reolojik özellikleri tarafından belirlenir. İşlenebilirliğin kontrolü, karışım hesabının amaçlarından birisidir. Bu sebeple uçucu külün optimum kullanımı gerçekleştirilecekse, taze beton reolojisindeki rolünün anlaşılması esastır [15].

Uçucu kül kullanımı, genellikle priz başlangıç ve bitiş sürelerinin uzamasına sebep olur. Hedef çökme miktarını elde etmek için gerekli olan karma suyu miktarı genellikle uçucu kül kullanımı ile azalmaktadır. Uçucu kül taneciklerinin ince ve yuvarlak olması, belli bir çökme değerinde betonun kohezyonunu ve işlenebilirliğini genellikle artırır. Çoğu zaman, ayrışma ve kanama azalır. Uçucu kül beton karışımının pompalanabilirliğini artırır ve kat betonu bitirme işlemini kolaylaştırır.

Bununla birlikte beton bitirme işlemi süresi, priz süresinin değişmesinden dolayı değiştirilebilir. Beton sertleşirken, uçucu kül, puzolanik reaksiyonları hızlandırmak için portland çimentosu hidrasyonunu geliştirir ve bu şekilde uçucu külün mevcut kalsiyum ve alkali hidroksitler ile reaksiyonunu kolaylaştırır [4].

a) İşlenebilirlik

Uçucu kül ve çimento içeren betonun mutlak hacmi, benzer uçucu külsüz betonunkini geçer. Bunun sebebi, çimento yerine ikame edilen uçucu kül kütlelerinin genellikle eşit veya fazla olmasından ve de uçucu külün düşük özgül ağırlığa sahip olmasından ileri gelir. Kullanılan oranlara bağlı olmakla birlikte, hamur yapısındaki hacim artışı, geliştirilmiş plastisiteli ve daha iyi kohezyonlu beton meydana getirir [4]. Ayrıca, CaO üzerine SiO_2 konsantrasyonundaki artış, yüksek alkaline taze beton içindeki çimento ve uçucu kül tanecikleri dağılımının stabilitesini geliştirir.

Uçucu kül çimento hamurunun akış davranışını değiştirir, üstelik genellikle küresel olan uçucu kül tanecikleri belirli çökme değeri için çoğunlukla karışım suyunun azalmasına imkan verir. Uçucu kül, su azalmasına ilave olarak katı - sıvı oranını artırır. Bununla birlikte; kalın, yüksek karbonlu tipik puzolan şartlarını sağlamayan uçucu kül genellikle su ihtiyacını çok hafif artırır. C sınıfı küller genellikle, beton işlenebilirliğini tercih edilir şekilde etkileyen $10\ \mu\text{m}$ 'den ufak taneciklere yüksek oranda sahiptir [4].

Owens'a göre beton işlenebilirliği üzerinde uçucu külün etkinliğini etkileyen en önemli faktör uçucu küldeki kaba malzeme ($> 45\ \mu$) oranıdır. Yapılan çalışmada, örnek olarak, çimentonun ağırlıkça % 50 oranında yer değiştirmesi ile su ihtiyacında değişme olmamaktadır [15].

Birçok Hindistan uçucu külü ile yapılan deneylerden, betonun su ihtiyacının tüm denemelerde arttığı ortaya çıkmıştır. Genellikle, zayıf su isteği karakteristikleri, fazla karbonlu ve kalın taneciklerin yaygın olarak bulunduğu eski santrallarda ortaya çıkmaktadır [15].

İnce külün işlenebilirliğin geliştirilmesinde kalın külden daha etkin olduğu bulunmuştur [15].

Yüksek oranda uçucu kül içeren betonlar, kreyn, kova sistemi, konveyör veya pompa kullanılarak iyi bir şekilde yerleştirilebilir. Pompa ile yerleştirme için, beton karışımının yeteri kadar hamur içeriğine sahip olması gereklidir. Yüksek oranda uçucu kül içeren betonlar, sıcaklık yükselişinde ve dayanım gelişiminde olumsuz bir etki olmaksızın, 5 m. yüksekliğindeki kalıba yerleştirilebilmektedir. Böylece, yapısal birleşim noktalarının elimine edilmesi ile önemli ekonomi ve süre tasarrufu sağlanır [16].

b) Kanama

Hava sürüklenmiş ve sürüklenmemiş beton karışımlarında uçucu kül kullanımı, belirli bir işlenebilirlik için daha fazla ince malzeme hacmi ve daha az su içeriği sağlayarak kanamayı azaltır. Uçucu külde mevcut ince taneler ince agregadaki eksikliği giderir ve kanama kanallarını tıkamaya yardım eder [4].

Kanama suyunun aktığı kanal boyutlarını azaltmak için, hem çimento hem de mineral katkının beton karışımı içinde iyi dağılması gerekmektedir [7].

c) Pompalanabilirlik

Uçucu kül kullanıldığında beton pompalanabilirliğinin arttırımı genellikle sağlanır. Çimentosu az olan veya ince agregasında ufak taneleri az olan karışımlar için, agregaya ilavesi olarak katılan fazla uçucu kül betonu veya harcı daha fazla kohezif ve de ayrışma ve kanamaya daha az eğilimli yapar. Ayrıca uçucu kül taneciklerinin küreselliği agregaya tanecikleri ile beton ve pompa borusu arasındaki sürtünmeyi azaltarak pompalanabilirliği arttırmak için işlev görür [4].

d) Priz Süresi

Uçucu külün çimentonun sertleşme hızını bir veya birkaç sebepten dolayı etkilemesi beklenebilir. Bu sebepler şu şekilde sıralanabilir :

- Uçucu külün kendisinin bağlayıcı olabilmesi (yüksek kalsiyumlu);

- Uçucu külün, portland çimentosuna katılmış kireç gibi çimento ile tepkimeye giren sülfatlar içerebilmesi,
- Uçucu kül - çimento harcının, uçucu külün varlığı nedeniyle daha az su içererek sertleşme hızını etkileyebilmesi,
- Külün reolojiyi değiştirmek için katılan yüzey aktif maddeleri abzorbe ederek harcın katılığını etkileyebilmesi,
- Uçucu kül taneciklerinin çimento hidratasyon ürünlerinin kristalizasyonunda çekirdek olarak davranabilmesi [15]

Uçucu kül kullanımı betonun priz süresini geciktirir. C sınıfı küller bu süreyi arttırabilir, bazen azaltabilir ve bazen de önemli bir etki yapmayabilirler. F sınıfı küller genellikle bu süreyi arttırabilir. C sınıfı küllerin erken C_3S hidratasyonunu geciktirdiği bildirilmektedir. Betonun priz karakteristikleri çevre ve beton sıcaklığından, çimento tipinden, çimento kaynağından, çimento içerik ve inceliğinden, katkı kullanımından, uçucu kül miktarından ve uçucu külün incelik ve kimyasal bileşiminden etkilenir. Kalıplardaki basınç; artan işlenebilirlik, daha az çökme kaybı ve geciken priz karakteristikleri nedeniyle uçucu küllü betonlarda artabilir [4].

e) Bitirme Özellikleri

Uçucu küllü beton, normalde uçucu külsüz betona göre daha uzun süren prize sahip olduğundan, böyle karışımlar uçucu külsüz karışımlara göre daha geç bitirilmelidir. Bu şekilde yapılmazsa, zayıf bir satıh oluşturan üst yüzey altındaki kanama suyunu kapayabilir ve ilkel perdahlamaya sebep olur. Daha uzun süreli priz süreleri, plastik büzülme çatlamlarına sebep olabilir ve bundan başka yüksek buharlaşma hızı şartlarında yüzey kabuğu oluşumuna neden olabilir. Önemli miktarda çok hafif yanmamış kömür tanecikli veya senosferli uçucu kül içeren çok yaş karışımlar, bu taneciklerin yukarı doğru hareket etmesine ve yüzeyde toplanmasına neden olabilir [4].

1.1.4.2. Sertleşmiş Betonda Uçucu Kül Etkisi

a) Basınç Dayanımı ve Dayanım Kazanım Hızı

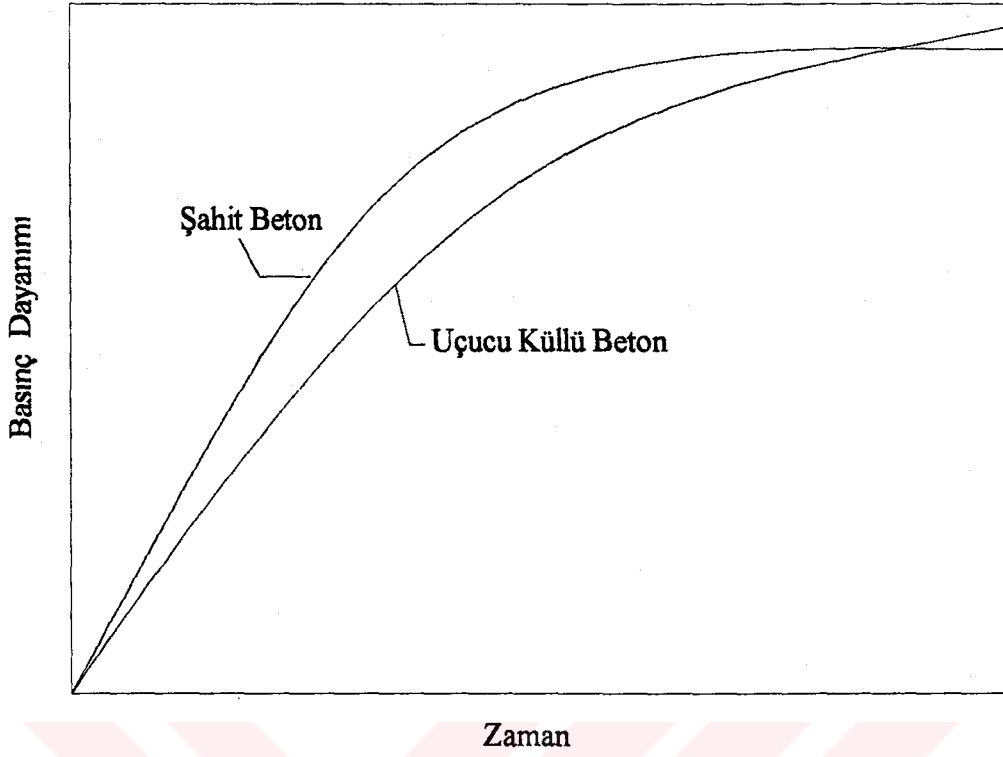
Uçucu küllü betonda dayanım gelişimini pek çok değişken etkiler. Bu değişkenler :

- Uçucu külün özellikleri,
- Kimyasal bileşim,
- Tanecik boyutu,
- Reaktivite,
- Sıcaklık ve diğer kür koşulları [15].

28 günlük eşit basınç dayanımı için hesaplanmış uçucu külsüz beton ile kıyaslandığında, tipik F sınıfı kül ihtiva eden beton oda sıcaklığında 7 gün ve öncesinde daha az dayanım gösterir. Bununla birlikte, eğer uçucu külsüz betonla eşit 3 veya 7 günlük basınç dayanımı isteniyorsa, priz hızlandırıcı katkı veya karışım değiştirme yoluyla bu sağlanabilir. Test sonuçları, erken yaş dayanımını arttırmak için silis dumanı kullanılabileceğini göstermiştir. Silis dumanı ile uçucu külün aynı anda kullanımı, hem silis dumanı reaksiyonunun hem de uçucu kül reaksiyonunun uzun süre devam etmesi için yeterli olan kalsiyum hidroksit varlığını gösteren 56 ve 91 günlük devam eden dayanım artışları ile sonuçlanmıştır [4].

Portland çimentosunun dayanım kazandırma hızı yavaşladıktan sonra, uçucu külün devam eden pozolanik reaksiyonu, eğer beton rutubette korunursa, daha sonraki yaşlarda dayanım arttırışına katkıda bulunur. Şekil 1.4'de bu olay gösterilmektedir. Referans olarak 28 günlük dayanımların kullanıldığı bir çalışmada, bir yıllık bir sürede uçucu küllü beton için % 50'lik bir dayanım artışı, uçucu külsüz beton için ise % 30'luk bir dayanım artışı elde edilmiştir.

C sınıfı küller çoğu zaman erken yaşlarda F sınıfı küllerden daha yüksek reaksiyon hızı gösterirler. F sınıfı küller ile yapılan bir çalışmada, pek çok durumda, 45 µm. elekten geçen malzeme yüzdesi ile orantılı olarak tüm yaşlarda pozolanik aktivitenin arttığı neticesi çıkmıştır. Diğer bir çalışmada, eşit ağırlık esasına göre C sınıfı bazı uçucu küllerin portland çimentoşu kadar etkili olduğu ortaya çıkmıştır [4].



Şekil 1.4. Uçucu Küllü ve Külsüz Betonda Basınç Dayanımının Zamanla Değişimi [15]

Tanecik boyutu dayanım gelişimini iki şekilde etkileyebilir. Birincisi, 45 μm .’ den büyük olan tanecikler, su ihtiyacını ters yönde etkiler. Böylece, erken yaşlarda uçucu külün düşük reaksiyon hızını karşılamak için kullanılan karışım metotlarının ihtiyaçlarına ters rol oynarlar. İkincisi, konsantre olmuş hamurun difüzyon ve çözülmesini kapsayan heterojen işlemler yoluyla, katı yüzey üzerinde bağlayıcı aktiviteler oluşur. Yüzey alanı, böyle işlemlerin kinetiğinin belirlenmesinde önemli rol oynayabilmektedir [15].

Tanecik boyutunun dayanım kazanımına olan etkisinin doğrudan deneysel ispatı çelişkilidir. Tanecik boyutu ile bir münasebet kurabilmek için ya diğer tüm değişkenleri minimum bir değerde sınırlamak ya da çok değişkenli deneyler gerçekleştirmek gereklidir.

Uçucu kül çok kademeli elektrostatik çökticilerde toplandığında, tanecik boyutuna göre ayrışma meydana gelir. İnce boyuttaki tanecikler firından en uzak bölmede toplanır. Her bölmeden kül alınarak, farklı tanecik boyut dağılımları aynı kaynaktan aynı anda elde edilir.

Ne var ki, bölmeler arasında sadece boyut faktörü değişmez. Kimyasal özellikler, yoğunluk ve taneciklerin morfolojisi de değişmektedir. Kimyasal olarak karbon büyük tanecikler ile ayrılma eğilimindedir. Alkali sülfatlar ve kloritler ise çökelticilerin soğuk bölmelerinde ince taneciklerin yüzeylerinde toplanma eğilimindedir. Düşük yoğunluklu tanecikler çökelticide farklı şekilde dağılır. Senosferler ve düzensiz şekilli tanecikler ilk bölmedeki gazdan çökme eğilimindedir ve böylece ortalama yoğunluk ölçümlerini etkilerler. Bununla birlikte, tek bir kaynaktan farklı boyuttaki küllerin incelenmesi, tanecik boyutunun dayanım üzerindeki etkisinin belirlenmesi, bazı faktörlerin sınırlanması ile mümkün görünmektedir [15].

Mineral katkı maddelerinin harç ve betonların mukavemetlerine olan etkileri bunların çimentonun bir kısmı yerine veya çimentoya ilaveten kullanılması, puzolanik aktiviteleri, kimyasal ve fiziksel özellikleri ile kullanım miktarları gibi faktörlere bağlı olmaktadır [5].

Yapılan bir çalışmada, yüksek miktarda uçucu kül içeren betonların basınç mukavemetlerinde 28 günden sonra önemli gelişmeler gözlemlendiği ve bunun da uçucu külün betonun uzun süreli mukavemetine olan olumlu katkısını gösterdiği belirtilmektedir [5].

Diğer bir çalışmada, C tipi uçucu külün % 20, 30 ve 35 kullanım oranlarında 7 günde kontrol betonundan daha düşük mukavemetler elde edilmiş, % 20 ve 35 oranlarında 28 günde kontrol betonun mukavemetine erişilirken, 80 günde % 20 kül içeren karışımın mukavemeti kontrol betonunu geçmekte, % 50 kül içeren beton ise daha düşük mukavemette kalmaktadır [5].

F tipi uçucu külle üretilen betonlarda ilk mukavemetlerin kür şartlarından çok etkilendiği yapılan bir çalışmada gözlemlenmiştir.

Çeşitli yöntemlerle uçucu külün inceliği arttırılarak, beton mukavemet gelişimi etkilenebilmektedir. Tozawa ve arkadaşları inceliği 200.000-1.300.000 cm²/gr olan uçucu küller ile yapılan harçlarda mukavemetin ileri yaşlarda çok hızlı arttığını gözlemişlerdir [5].

Normal kür metotları uygulandığında, yüksek incelik ve düşük karbon miktarı taşıyan uçucu kül, eşit ağırlıkta çimento yerine kullanılmışsa, 90 güne kadar basınç

dayanımının düşük olmasına, ancak bu süreden sonra yükselmesine sebep olmaktadır [8].

Azaltılan çimento miktarından daha fazla kül kullanıldığı zaman basınç dayanımı katkısız betonunkine eşit ve hatta daha yüksek bir seviyeye getirilebilmektedir. Bu sonuçlar, beton karışımının tipine, kullanılan malzeme cinsine ve fazladan katılan kül miktarına göre değişmektedir [8].

Düşük dozajlı betonlarda kullanıldığında uçucu kül, basınç dayanımını daha olumlu şekilde etkilemektedir.

Yüksek ısı altında kür edildiğinde, uçucu küllü beton dayanımları erken yaşlarda dahi eşit olabilmekte, hatta daha yüksek olabilmektedir. Yoğurma suyunu azaltacak kimyasal katkıları kullanıldığında da benzer sonuçlar elde edilmektedir [8].

b) Elastisite Modülü

Betonun elastisite modülü, doğrudan mineral katkı ilavesinden etkilenmez. Bu özellikler, büyük miktarda agrega miktarı ve rijitliği ile betonun dayanımından (su/çimento ve kür) etkilenir. Genellikle, dayanım azaldığında elastisite modülü azalır [7].

Uçucu küllü betonun elastisite modülü erken yaşlarda biraz düşüktür; daha sonraki yaşlarda ise büyüktür. Genellikle uçucu kül, uçucu küllü ve külsüz aynı dayanımdaki betonlar kıyaslandığında elastisite modülünü artırır [15].

Betonun basınç dayanımını kontrol eden özellikler az miktarda elastisite modülünü de etkiler. Elastisite modülü, basınç dayanımı gibi, uçucu külsüz beton ile kıyaslandığında erken dayanımlarda düşüktür ve son dayanım değerinde de yüksektir [7].

C sınıfı küller üzerinde yapılan bir çalışmada uçucu küllü betonun elastisite modülü ve basınç dayanımı ilk yaşlarda biraz küçüktür ve daha sonraki yaşlarda ise uçucu külsüz betonlara nazaran bir miktar yükselir. Uçucu külün elastisite modülü üzerine olan etkisi, uçucu külün basınç dayanımı üzerine olan etkisi kadar belirgin değildir. Yine aynı çalışma neticesinde, uçucu kül kullanımından çok, çimento ve agrega karakteristiklerinin elastisite modülü üzerine etkisi olacağı belirtilmektedir [4].

Benzer dayanıma sahip portland çimentosu içeren betonlara kıyasla, yüksek oranda uçucu kül içeren betonların σ - ϵ eğrileri daha az lineerdir ve 28 günlük dayanımın % 60-70'i civarında sapmaya başlar [17].

c) Kılcal Geçirimsizlik

Betonun sahip olduğu birbirleriyle temas halindeki boşluk hacmi miktarı ölçüsünde, su geçirimsizliği vardır. Betonun geçirimsizliği bağlayıcı malzeme miktarı, su içeriği, agrega dane dağılımı, koruma ve kürün etkinliği gibi değişkenlere bağlıdır. Hidrate çimento tarafından salıverilen kalsiyum hidrat suda çözünür ve boşlukları suyun girişi için terk ederek sertleşmiş betonun dışına çıkar. Uçucu kül, puzolanik özellikleri ile, kimyasal olarak kalsiyum, potasyum ve sodyum hidroksit ile birleşerek C-S-H oluşturur ve kalsiyum hidroksitin dışarı çıkma riskini azaltır. Sonuçta geçirimsizlik azalır. Ayrıca uçucu kül birikintisinin azalan geçirimsizliği, su giriş hızını, korozyon kimyasallarının ve oksijenin girişini azaltır [4].

Zararlı çözeltilerin beton kütlesi içine hareketi veya çözünmüş reaksiyon ürünlerinin beton dışına çıkması kimyasal etkilerin sebep olduğu betondaki zararın gelişim hızının belirlenmesinde önemli rol oynayabilmektedir. Beton kütlesinin geçirimsizliği, bu sebeple zararlı kimyasal olayla ilgili kütle taşınımının belirlenmesinde temel teşkil eder. Şu kabul edilmelidir ki, tüm bağlayıcı hidratlar ve beton yapımında kullanılan agregalar sadece sülfatlardan, kloritlerden, asitlerden, organik maddelerden kimyasal etkiye maruz kalmazlar. Tek başına sudan da zarar görebilirler. Betonun sulu ortamlarda işlevini görebilmesi şu iki şeye maledilebilir:

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

Çimento ve agreganın belli bir kompozisyonunda, genellikle, beton ne kadar az geçirgen olursa aynı betonun su veya başka zararlı çözeltilere karşı dayanımının fazla olduğu söylenebilir [15].

Yapılan bir çalışmada, açıkça anlaşılmaktadır ki betonun belli bir yaşta geçirimsizliği hidrate olmuş bağlayıcı malzeme miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Biraz puzolanik aktivitenin oluşabileceği 28 günlük kür sonrası, uçucu küllü betonlar kontrol betonundan daha geçirgen olmaktadır. 6 ay sonrası, bu tersine çevrilmekte

önemli miktarda su geçirimsizliği ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi, muhtemelen puzolanik aktivitedir [15].

Sarıçimen ve arkadaşları, arazi ve lâboratuar kür şartlarının normal ve uçucu küllü betonların geçirimliliğine etkilerini incelemişler ve geçirimsizlik sağlanması için sürekli su kürünün gerekli olduğu sonucuna varmışlardır. Uçucu küllü çimento içeren beton, özellikle kalın bölgelerde yetersiz küre daha duyarlıdır. Bu yüzden, sıcak ve kuru çevre koşullarında, kalın beton elemanlarda küre özel önem verilmelidir. Yazarlar uçucu küllü betonların daha geçirimsiz olduklarını saptamışlardır. F, C ve F/C sınıfı uçucu küllü betonlar içinde, F ve F/C sınıfı uçucu küllü betonlar C sınıfı uçucu küllü betonlara oranla daha geçirimsiz olmaktadır [18].

Torii ve Kawamura, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanının betonun boşluk yapısı ve klor geçirimliliğine etkilerini inceledikleri çalışmalarında kür ve ortam şartlarına bağlı olmaksızın mineral katkılı betonların daha geçirimsiz olduklarını gözlemişlerdir [5].

d) Sünme ve Rötre Davranışı

Sünme ve rötre özellikleri doğrudan mineral katkı ilavesinden etkilenmez. Bu özellikler büyük miktarda agrega miktarı ve rijitliği ile betonun dayanımından (su/çimento oranı ve kür şartları) etkilenir. Genellikle dayanım azaldığında, sünme ve rötre artar. Sünme ve rötre erken yaşlarda yüksek, fakat sonraki yaşlarda ise düşüktür [7].

Tecrübelerden, erken yaşlarda uçucu küllü betonların uçucu külsüz şahit beton ile kıyaslandığında daha büyük, ileri yaşlarda ise daha küçük sünme şekil değiştirmeleri yaptığı bulunmuştur. Ayrıca, uçucu külün betonun sünmesi üzerindeki etkisinin öncelikle basınç dayanımını etkileme miktarı ile sınırlı olduğu konusunda ortak bir fikir vardır [7].

Yüksek kireçli uçucu küller ile yapılan bir çalışmada, kontrol betonu ile % 20 uçucu kül içeren betonların sünme şekil değiştirmeleri arasında çok az fark bulunmuştur. Yüksek oranda ağırlıkça uçucu kül ilavesi ise (% 30-50) önemli derecede sünme şekil değiştirmelerine sebep olmaktadır. Bunun sebebi, düşük

dayanıma ek olarak mineral katkının düşük yoğunluğundan dolayı çimento hamurunun hacminin artmasıdır [7].

Mineral katkı içeren betonların rötre davranışı genellikle sünme davranışına benzer. Pek çok çalışmada, % 25'e kadar uçucu kül ikame edilmiş ve iyi kür görmüş betonlarda önemli bir fark görülmemiştir. Bir çalışmada ise, pek çok uçucu kül ve kontrol betonu arasında rötre açısında çok az fark görülmüştür [7].

e) Alkali - Agrega Reaksiyonu

Bazı reaktif agregalar, çimentodaki alkali ve hidroksil iyonları ile reaksiyona girerek, genişleyen jel oluştururlar ve çimento hamurunun çatlamasına neden olurlar. Mineral katkı maddeleri genelde betonda alkali - agreg a reaksiyonunu önleyici etkiye sahiptirler [5].

Yüksek oranda uçucu kül içeren betonlarda, 10 sene sonra dahi alkali - agreg a reaksiyonu izlerine rastlanmadığı belirtilmektedir [5].

Uygun uçucu kül oranı ile deniz ortamındaki betonda, alkali - agreg a reaksiyonunu kontrol etmenin mümkün olduğu gözlemlenmiş ve uçucu külün etkisinin çimentodaki alkali miktarına bağlı olduğu saptanmıştır [5].

Yüksek kalsiyumlu uçucu küllerin daha yüksek ikame oranları ile genişleme azalabilmektedir. Yüksek kalsiyumlu uçucu küller fazla miktarda alkali sülfatlar içerdiğinde, betondaki suda çözünabilir alkali miktarını artırma eğilimi gösterebilirler. Kökeni ne olursa olsun, suda çözünen toplam alkali miktarı 2.5 kg/m^3 aştığında zararlı alkali - agreg a reaksiyonu olacağına inanılmaktadır [7].

Çoğu zaman, alkali - agreg a reaksiyonu neticesi oluşacak zararı önlemek için gerekli uçucu kül miktarı, betonun dayanım ve işlenebilirliği için gerekli olan optimum miktardan daha fazla olmaktadır [4].

f) Sülfat Dayanımı

Asitler gibi zararlı kimyasallar Ca(OH)_2 ile reaksiyona girip suda çözünen tuzlar oluştururlar. Bu tuzların betondan yıkanmasıyla geçirimsizlik artmakta ve

böylece zararlı kimyasalların beton içine girişi hızlanmaktadır. Sülfatlar da aynı tip reaksiyon sonucu, genleşen ve betonda çatlaklara sebep olan etrenjit üretirler [5].

Genel bir kural olarak, F sınıfı küller, kullanıldığı betonların sülfat dayanımını artırır. C sınıfı küllerde durum daha az açıktır. Tecrübeler C sınıfı küllerin, normal oranlarda kullanıldığında, sülfat dayanımını azaltabildiğini göstermiştir. Yüksek C_3A içeren çimentolarla % 30 oranında farklı pek çok C sınıfı uçucu kül ikamesi ile üretilen betonların sülfat dayanımının azaldığını görülmüştür. Daha fazla araştırma yapmak gerekmele birlikte, bazı araştırmacılar, toplam bağlayıcı malzeme miktarının nispeten yüksek bir oranının, C sınıfı uçucu kül olarak kullanılması halinde betonun sülfat dayanımının artabileceğini ileri sürmüşlerdir. Bazılarına göre, sülfat dayanımındaki artışın, çimento hamurundaki kapiler boşlukları dolduran, geçirimsizliği ve sülfat solüsyonlarının girişini azaltan ilave kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) oluşumunu devam ettirmek için, kısmen betonda uçucu külün hidroksitler ile devam eden reaksiyonu nedeniyle olduğuna inanmaktadırlar [4].

Sülfat etkisi nedeniyle oluşan zarar ilk tepkimeye giren elemanların hacminden büyük olan ürünler ile sonuçlanan kimyasal reaksiyonlara bağlıdır.

Genellikle dış kaynaklı olan sülfatlar ile kalsiyum sülfatların oluşturduğu reaktif fazlar arasında, Lea tarafından tanımlandığı gibi bir reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyon nedeniyle meydana gelen hasar, betondaki C_3A miktarını minimize ederek azaltılabilir. Dikeou ve Pierce, ıslanma ve kuruma koşullarına maruz betonlarda kullanılan belli uçucu küllerin farklı tipteki bütün çimentolarla üretilmiş betonların sülfat dayanımını büyük oranda arttırdığını kanıtlamışlardır [4].

Uçucu küllü betonların sülfat dayanımı, uçucu külsüz betonlarda olduğu gibi, kür şartları, maruz kaldığı etkiler, su/bağlayıcı malzeme oranı gibi faktörlere bağlıdır.

Uçucu külün nispi sülfat dayanımı, Dunstan tarafından geliştirilen 'R değeri' diye bir gösterge ile gösterilmiştir. R değeri kalsiyum oksidin demir oksite oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$R = (\% \text{ CaO} - 5) / (\% \text{ Fe}_2\text{O}_3) \quad (1.4)$$

Genellikle Dunstan'ın testi ile test edilmiş, 1.5 veya daha küçük R değerine sahip uçucu küllerin sülfat dayanımı artmış, 1.5'tan büyük R değerlerine sahip uçucu

küllerde ise artmamıştır. Özetle, en yüksek sülfat dayanımı, düşük bir su/çimento oranı, sülfata dayanıklı portland çimentosu kullanımı, sülfata karşı iyi bir dayanım gösteren uçucu kül kullanımı ile elde edilebilir. Bir beton karışımına maksimum sülfat dayanımı verecek uçucu kül seçerken, R değeri minimum olan ve laboratuvar ve uygulama testleri sonucu yeterliliği kanıtlanmış bir kül olmasına dikkat etmelidir [4].

Erdoğan ve arkadaşları sülfata dayanıklılığı ölçmek için $\text{CaO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ oranının sülfat dayanımı faktöründen daha uygun bir ölçek olduğunu ileri sürmektedirler [5].

Freeman ve Carrasquillo, uçucu küllü çimento kullanmanın sülfata dayanıklılık açısından uçucu külü betona karıştırma sırasında katmaktan daha faydalı olduğunu ileri sürmektedir [5].

Yapılan deneysel bir çalışma sonucu, yüksek miktarda kalsiyum oksit (CaO) ve amorf kalsiyum alüminat içeren uçucu küllerin, betonun sülfat etkisine karşı hassasiyetini arttırdığı, düşük miktarda kalsiyum içeren uçucu küllerin ise betonun sülfat dayanımını geliştirdiği ortaya çıkmıştır [19].

400 kg/m^3 bağlayıcı ve % 50 oranında uçucu kül içeren yüksek oranda uçucu küllü beton, % 10 Na_2SO_4 solüsyonunda dahi basınç dayanımı kazanmaya devam etmiş, 2 yıllık periyotta, sülfat etkisiyle oluşan önemli bir hasar ortaya çıkmamıştır. Ayrıca, yüksek oranda uçucu kül içeren betonların sülfat dayanımı üzerinde, uçucu kül tipinin önemli etkisi vardır. % 10 Na_2SO_4 solüsyonunda içinde portland çimentolu betonun zarar görmesi büyük oranda, alçı ve/veya etrenjit ile birlikte çimento hamurunun gevşemesine bağlıdır. Yüksek oranlarda uçucu kül içeren betonlarda, genişleyen reaksiyon ürünlerinin oluşumu daha azdır ve hem bağlayıcı hem de ikame oranının yüksek olması durumunda, bu olay yüzeye yakın yerler için sınırlıdır. Yüksek oranda uçucu kül içeren betonların sülfat dayanımı, kalsiyum hidroksit içeriğindeki azalmaya, yoğunluğa, kür ve etkiye maruz kalma esnasında uçucu küllerin pozolanik reaksiyonun yeterliliğinden kaynaklanan süreksiz boşluk yapısına bağlıdır [20].

g) Deniz Suyu Dayanımı

Deniz ortamındaki betonun bozulması kompleks bir konudur. Gel-git bölgesindeki beton, değişen yaşlanma-kuruma etkisine, kum aşınmasına, sık meydana gelen donma-çözünme etkisine ve donatı korozyonuna maruz kalır. Bu zararlı

ortamda oluşan kimyasal zararlar en zararlı olanlarıdır. Sürekli deniz suyu içinde olan beton daha az etkiye maruz kalır [15].

Geçirimlilik, deniz suyundaki betonun durabilitesini etkileyen en büyük faktör olarak düşünülmesine rağmen aşağıdan da belli olduğu gibi deniz ortamında betonun durabilitesine pek çok açıdan uçucu külün katkısı vardır. Ayrıca aşağıdan da belli olduğu gibi araştırılacak pekçok yön vardır [15].

Dunstan ve arkadaşları, yüksek oranlarda uçucu kül içeren beton ile yapılan deniz yapısının, sürekli gel-git olayına maruz kalmasına rağmen gayet iyi performans gösterdiğini belirtmektedir [5].

Tablo 1.8.'de deniz suyuna maruz kalan uçucu küllü betonun çeşitli etkilere karşı davranışı belirtilmektedir.

Tablo 1.8. Deniz Suyunda Bulunan Zararlı Maddelerin Uçucu Kül İçeren Betona Potansiyel Etkisi [15]

Etki Şekli	Uçucu Kül Etkisi	Notlar
Islanma-Kuruma	Yok	Eğer karışım ve kür uygunsa
Donma-Çözünme	Yok	Eğer karışım, hava uzaklaştırma ve kür uygunsa
Sülfat	Düşük kalsiyumlu külle iyileşir	
Alkali-Agrega	Genişlemeyi azaltıcı rol oynar	
Donatı Korozyonu	Yok	Eğer karışım ve kür uygunsa
Geçirimlilik	Geç yaşlarda gelişir	Eğer karışım ve kür uygunsa
Magnezyum Tuzları	Bilinmiyor	

h) Çeliğin Betonda Korozyonu

Betondaki donatı çeliği, donatı korozyonunun başlayabilmesi ile sonuçlanan elektrokimyasal reaksiyonlardan önce yok edilmesi gereken pasif demir oksit filmi ile kaplı kalır. Çeliğin depasivasyonu kloritlerin mevcut olması durumunda veya betonun PH'ının karbonatlaşma gibi asit etkisiyle 11'den az bir değer alması halinde meydana

gelebilir. Çelik depasifize olduğunda, korozyonun ilerleyişi, oksijen oranı ve çeliğe doğru olan rutubet akışı ile betonun elektriksel dayanımı tarafından kontrol edilecektir.

Mineral katkı ilavesi vasıtasıyla, çeliğin korozyonu ile oluşan betonun çatlama ve genleşmesi üzerinde önemli etki oluşturmak mümkündür. Azalan önem sırası ile, betondaki çeliğin korozyon derecesini kontrol eden anahtar faktörler geçirimsizlik, direnç ve karbonatlaşma olarak ortaya çıkmaktadır. Betonun geçirimsizliği, sadece karbonatlaşma hızını veya korozyon hadisesinin başlangıcı için değil, aynı zamanda korozyon olayının gelişimini etkileyen oksijen oranı ve rutubet akışı için de önemlidir. Betona mineral katkı ilavesi, geçiş bölgesindeki mikro çatlaklar beton geçirimsizliğinin temel kaynağı olduğundan, geçiş bölgesini güçlendirerek daha iyi sonuçlar elde edilmesine sebep olur [7].

Mineral katkı içeren betonlarda düşük miktarda kalsiyum hidroksit olmasından dolayı, karbonatlaşma davranışıyla bir ilişki bulunmaktadır. Yapılan bir çalışma neticesi; iyi sıkıştırılmış, özel olarak kür görmüş ve düşük su / çimento oranına sahip betonların, ilk birkaç milimetrenin ötesindeki atmosferik karbonatlaşma ilerlemesine karşı koymak için yeteri kadar geçirimsiz oldukları ortaya çıkmıştır [7].

Yapılan bir çalışmada, eşit ağırlık esasına göre % 30 uçucu kül ikame edilmiş betonlar, uçucu kül içermeyen betondan daha fazla karbonatlaşma yapmıştır. Uçucu küllü betonların 4 yıllık basınç dayanımları, uçucu kül içermeyen betondan % 18 daha düşük bulunmuştur [21].

Dunstan ve arkadaşları, yüksek oranlarda uçucu kül içeren beton ile yapılmış deniz yapılarında, 10 yıl sonra yapılan incelemelerde, donatının iyi korunmuş olduğunu gözlemişlerdir [5].

Ayrıca, betonun içinde bulunan veya dışarıdan beton içerisine nüfuz eden klorit iyonu nedeniyle betonda zararlı etkiler oluşur. Klorit iyonları, beton içinde donatı çeliğine ulaşır. Beton içine girmiş klorit iyonlarının hepsi, boşluk yapısında serbest kalmazlar. İyonların bir kısmı hidrasyon ürünlerine kimyasal reaksiyon ile bağlanarak, kalsiyum kloroalüminat hidrat oluşturur. Bazı klorit iyonları, çimentonun çeşitli hidratları tarafından absorbe edilir. Böylece, bir kısmı serbest kalır ve beton yapılara zarar verir. Serbest klorit iyonlarını minimize eden puzolanik katkı maddelerin büyük yararı vardır [22].

Klorit gibi iyonların difüzyonu Fick Difüzyon Denklemi ile ifade edilir.

$$\frac{dc}{dt} = D_c \frac{d^2 c}{dx^2} \quad (1.5)$$

Burada;

c : x mesafesinde t süresindeki klorit konsantrasyonu

D_c : Klorit iyonu difüzyon katsayısı.

Yapılan bir çalışmada, farklı çimento tiplerine ait difüzyon katsayıları bulunmuştur [23].

<u>Çimento Tipi</u>	<u>$D_c \times 10^9$ (cm²/sn)</u>
Portland Çimentosu	44.7
Sülfata Dayanıklı Çimento	100.0
Uçucu Küllü Çimento	14.7
Cürufllu Çimento	4.1

Bu neticelerden, uçucu kül ve cüruf içeren çimentoların klorit iyonu difüzyonunu önlemede sülfata dayanıklı çimentodan ve portland çimentosundan daha etkili olduğu bulunmuştur [23].

Uçucu külün varlığı, Cl^- iyonlarının çevredeki sodyum klorit solüsyonlarından girmesi durumunda, betondaki serbest Cl^- iyonlarını önemli derecede azaltır. Normal, uçucu külsüz betonda akışkanlaştırıcı katkı kullanılması, serbest Cl^- iyonlarını azaltmakla birlikte, uçucu kül içeren betonlarda durum tersinedir. Genelde, uygun şekilde uçucu kül kullanılması, beton yapılarıdaki klorit iyonu nedeniyle oluşan etkiyi azaltır [22].

Yapılan bir çalışmada, bağlayıcı oranının % 2'si kadar Cl^- içeren uçucu küllü numunelerin aşırı çatlamasına dayanılarak, uçucu küllü betonların nispeten yüksek korozyon hassasiyetine sahip oldukları belirtilmektedir [21].

Yapılan bir diğer çalışmada, % 5 sodyum klorit solüsyonu içinde, üretilen numuneler 1000 günden fazla bekletilmiş ve korozyon dayanımı araştırılmıştır. Sonuçta, uçucu kül ilavesinin, donatı çeliğinin korozyonunu önlemede etkili olduğu

bulunmuştur. Uçucu külün ilave olarak kullanıldığı betonlardaki korozyon dayanımının, uçucu külün ikame edilmesiyle üretilmiş betonlarınkinden daha iyi olduğu bulunmuştur. Korozyonu önlemede uçucu küllü betonun korozyonu önlemede üstün performansı, uçucu küllü beton karışımlarında meydana gelen puzolanik reaksiyon nedeniyle oluşan çimento hamuru matrisinin yoğunlaşmasına bağlanabilir [24].

i) Donma-Çözülme Dayanımı

Portland çimentolu beton donma-çözülme çevrimine maruz bırakıldığında, hava sürükleyici kullanımı ile genleşme ve çatlaklara karşı korunmalıdır. Uçucu küllü veya külsüz betonla üretilmiş betonun donma ve çözülme nedeniyle oluşan hasara karşı dayanımı, hava boşluğu sisteminin uygunluğuna, agreganın sağlamlığına, betonun yaşına, hidrasyon derecesine, çimento hamurunun dayanımına, betonun rutubet şartlarına bağlıdır [4].

Portland çimentolu tüm betonlarda olduğu gibi, donma-çözülme ortamlarında, mineral katkı içeren betonları korumak için özel hava sürükleyici gereklidir. Mineral katkı içeren ve içermeyen betonların nispi don dayanımı ile ilgili bir çalışmada, hava sürükleyici olmayan, uçucu kül içeren betonların, portland çimentolu kontrol betonuna göre daha yetersiz sonuçlar gösterdiği bulunmuştur [7].

İlk donma-çözülme çevrimine maruz bırakıldığında, betonların sadece yeterli bir dayanım (3500 psi veya fazlası - $\sim 250 \text{ kg/cm}^2$ veya fazlası) sahip olmalarını sağlamak için değil, aynı zamanda kıyaslanabilir bir olgunluk (maturity) düzeyinde olmalarını temin için de karışım oranlarının belirlenmesine özen gösterilmesi için uyarıda bulunmaktadır [7].

Örneğin, normal çevre sıcaklığında düşük kalsiyumlu uçucu küllü betonun yavaş dayanım kazanmasından dolayı, 28 günde kıyaslanabilir olgunluğu elde etmek için öncelikle daha fazla bağlayıcı malzeme (çimento+uçucu kül) kullanmak gerekir. Artan bağlayıcı malzeme miktarı çoğu zaman, eşit hava miktarını elde edebilmek için birim hacimdeki hava sürükleyici katkı miktarının artırılmasını gerektirir [7].

Uygun şekilde hava uzaklaştırılmış betonlar karşılaştırıldığında, F ve C sınıfı kül içeren betonlar ile uçucu kül içermeyen betonlar arasında önemli bir fark

bulunmamıştır [4]. Bununla birlikte buz çözücü uygulamalarının, uçucu küllü betonlarda bir miktar fazla yüzey harcı kaybına sebep olduğu gözlemlenmiştir [4].

j) Termal Şekil Değiştirme

Sadece beton barajlarda değil, aynı zamanda büyük temellerde, kazıklarda ve kirişlerde çimento hidrasyon ısı, yapı çevre sıcaklığına kadar soğuduğunda oluşan büzülme ve kırılmanın izlediği aşırı sıcaklık yükselişini önlemek için özel bir tedbir gerektirecek büyüklükte olabilir. Ciddi çatlaklar, yapısal güvenliği tehlikeye atar ve daha önemlisi yapıya daha değişik zararlar verebilecek hadiselerle sebep olan geçirimsizliği artırır. Yapının boyut ve şekline, çimento tip ve içeriğine, yerleştirme anındaki beton sıcaklığına bağlı olarak, normal beton ile yapılmış kütle yapılarında, ısı alış veriş olmasın sırasıyla 30-50 °C yükselişler normal görülmektedir. Yüksek dayanımlı beton karışımlarında daha da yüksek sıcaklıklar ortaya çıkmaktadır. Normal portland çimentosu ile yapılan grobeton durumunda ise, en yüksek sıcaklığa betonun yerleştirilmesini izleyen 2 ile 5 gün içerisinde ulaşabilmektedir; ve eğer çevre sıcaklığına düşme hızlı olursa , yapıda termal çatlaklar meydana gelmektedir [7].

Sıcaklık yükselişini azaltmanın yollarından bir tanesi, çimentonun bir kısmı yerine mineral katkı kullanmaktır. Böylece, uçucu kül gibi mineral katkı kullanımı, istenen dayanıma etki etmeksizin, betondaki termal büzülme çatlaklarını kontrol etmek için etkili bir yol olmaktadır [7].

A.B.D.'nde son 30 yıl içinde yapılmış beton ağırlık barajlarının çoğunda, çimento ağırlığının % 25-35'i kadar uçucu kül kullanılmış, yine son zamanlarda yapılan silindirlerle sıkıştırılmış beton barajların pek çoğunda benzer oranlarda uçucu kül kullanılmıştır. Çimentonun % 30 uçucu kül ile ikame edilmesi ile betondaki sıcaklık yükselişindeki azalma % 15 civarında olmaktadır. Kütle betonlarında uçucu kül kullanımı ile elde edilen diğer avantajlar ise su azaltma özelliği (böylece verilen bir su/çimento oranında daha fazla çimento azaltma imkanı), ve portland çimentosundan daha iyi olan termal aktivasyon potansiyelidir. Yüksek kür sıcaklıklarında, sadece kalın taneli uçucu külün bile hidrasyon hızı yüksek hale gelmemekte, aynı zamanda portland çimentosu-uçucu kül hamurunun mikroyapısı ve mekanik özellikleri de genellikle katkısız portland çimentosu hamurundan üstün olmaktadır [7].

Kütle betonlarında, % 30 uçucu kül içeren portland çimentosu-uçucu küllü beton karışımlarının (400 kg/m^3 bağlayıcı), katkısız portland çimentolu beton karışımlarının nispi sıcaklıklarının yerinde ölçümlerinden uçucu küllü betonda 47.5°C , külsüz betonda ise 54.5°C 'lik sıcaklık yükselişleri ortaya çıkmıştır. Bu % 15'lik azalmayı doğrulamaktadır [7].

k) Aşınma Dayanımı

Betonun aşınmaya karşı dayanımı, büyük oranda agreganın dayanım karakteristiklerinden etkilenir. Belli bir agregası tipi ve çimento hamuru ile geçiş bölgesinin dayanımları, yüzey aşınmasını etkilerler. Her ikisi de, su/çimento oranı ve kür koşullarına bağlı olduğundan, betonun aşınmaya karşı dayanımı üzerinde katkılı portland çimentolarının etkisi, kontrol betonunun kür ihtiyaçları ve su/çimento oranını değiştirme derecesinden etkilenecektir [7].

Basınç dayanımı, kür, bitirme, agregası özellikleri betonun aşınma dayanımını kontrol eden önemli faktörlerdir. Eşit basınç dayanımında, uygun şekilde bitirilmiş ve kür edilmiş uçucu küllü ve külsüz betonlar, aşınmaya karşı esasen eşit dayanım gösterirler [4].

l) Hava Sürüklenme

Uçucu kül taze betonda hava yüzdesini ve sürüklenmiş hava boşluklarının stabilitesini etkileyebilir. Hava sürüklenmiş betonlarda uçucu kül kullanımı, genellikle hava sürükleyici katkının dozaj oranında bir miktar artışa neden olur. Hava içeriğini sabit tutmak için, katkı dozajları, karbon içeriği, yakma kaybı, incelik ve uçucu küldeki organik malzeme miktarına bağlı olarak artırılmalıdır [4].

Özellikle karbon içeriği yüksek olan küller kullanıldığında, hava uzaklaştırıcı katkı dozajı artabilir. Değişken veya yüksek yanma kayıpları, uçucu küllü betonun hava içeriğinin kontrolünü güç hale getirebilir. Uçucu külün yanma kaybı yüksek olduğunda ve başka kirlilikler mevcut olduğunda, taşıma veya devam eden karıştırma esnasında, hava içeriği kayıp oranı artabilir. Uçucu külün hava içeriğinin sürekli

kontrolü, beton üreticisine gerektiği gibi hava sürükleyici katkı dozajını değiştirme imkanı sağlar [4].

m) Çiçeklenme

Otoyol yapıları için kullanılan betonlarda uçucu kül kullanımı, geçirimsizliği azaltarak çiçeklenmeyi azaltmada etkili olabilmektedir. Bununla birlikte, yüksek alkalili ve yüksek sülfat içeriğine sahip bazı C sınıfı uçucu küller, çiçeklenmeyi arttırabilmektedirler [4].

1.1.4.3. Uçucu Kül İçeren Betonların Karışım Oranları

Pek çok uygulamada, betonda uçucu kül kullanımının amacı aşağıdaki faydalardan birini sağlamak içindir :

- Maliyeti azaltmak için çimento miktarını azaltmak,
- Düşük hidratasyon ısısı sağlamak,
- İşlenebilirliği arttırmak,
- 90 gün sonrasında betonda gerekli dayanım düzeyine ulaşmak.

Pratikte uçucu kül beton içerisinde iki şekilde kullanılabilir :

- 1- Uçucu küllü çimento portland çimentosu yerine kullanılarak,
- 2- Uçucu kül ilave bir bileşen olarak beton santralinde veya şantiyede beton içerisine katılarak.

İlk metot daha basittir ve ilave olarak uçucu kül katılmasından daha az sakıncalıdır ve sürekli kontrol uçucu küllü çimento ile sağlanabilir. Nispi uçucu kül ve çimento karışım oranları böylece önceden belirlenir ve karışım oranlarının değişme aralığı sınırlıdır.

İkinci metot esnektir ve beton içinde uçucu kül özelliklerinin tam olarak işletilmesine imkan verir. Karışım oranlarının tespitinde uçucu kül özellikleri tam olarak göz önüne alınmalıdır. Kuzey Amerika’ da kullanımdaki eğilim, uçucu külün ayrı olarak karıştırılması yönündedir.

Uçucu kül, betonda birden fazla rol oynar. Taze beton durumunda genellikle ince agrega olarak iş görür ve bir dereceye kadar su ihtiyacını azaltılabilir. Sertleşmiş betonda, puzolanik özelliğinden dolayı uçucu kül bağlayıcı matrisin bir bileşeni halini

alır ve dayanım ve durabiliteyi artırır. Böylece işlenebilirlik, dayanım, su-çimento oranı arasında kabul edilen oranlar kullanıldığında, betonda uçucu kül kullanımı karışım konusunda birçok karmaşıklığa sebep olur [15].

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

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

İki kabul bütün dünyada genellikle doğrudur ve her ikisi de yaygın olarak kullanılan beton bileşenlerinin varlığından etkilenir. Bununla birlikte, her iki kabul uçucu kül kullanılan beton karışım oranları problemine yaklaşım tarzlarını önemli derecede etkilemiştir.

Uçucu külün betonda kullanıldığı uzun zaman dilimi içerisinde, uçucu küllü beton karışım oranlarını uçucu külsüz betonunki ile karşılaştırmak adet olmuştur. Benzer şekilde, taze ve sertleşmiş betonun özellikleri genellikle kontrol betonunki ile karşılaştırılmıştır. Böylece, uçucu kül genellikle, özellikle çimento, kum ve su gibi bileşenlerin fonksiyonlarını tamamlayan bir bileşen olmaktan çok çimentonun yerini alan bir malzeme olarak düşünülmüştür. Son zamanlarda, uçucu küllü betonun bileşenlerini bir bütün olarak ele alma ve de uçucu küllü betonu bir denk referans betonla karşılaştırmaksızın tek bir malzeme olarak inceleme eğilimi vardır. Bu farklı görüşlerin neticesinde, uçucu külün betona katılımında üç temel karışım oranı metodu geliştirilmiştir :

- 1- Çimento yerine kısmi ikame (Basit ikame metodu)
- 2- Uçucu külün ince agrega olarak ilavesi (İlave metodu)
- 3- Çimento , ince agrega ve su yerine kısmi ikame (Kısmi ikame metodu)

Sonuncu metotda ikiye ayrılır :

- Modifiye ikame metodu
- Rasyonel Karışım Oranı Metodu

1- Basit İkame Metodu

Basit ikame metodu, portland çimentosunun bir kısmının uçucu külle doğrudan yer değiştirmesini önermektedir. Pek çok araştırma, portland çimentosunun hangi yüzdeyle olursa olsun ister hacim ister ağırlıkça bire bir uçucu külle yer değiştirmesi halinde betonun basınç, eğilme dayanımının üç aya kadar olan nem kürü durumunda düşmekte olduğunu, altı aydan daha fazla sürede ise daha fazla dayanım artışı olduğunu göstermiştir [15]. % 20'ye kadar uçucu kül ikamesi, 3-6 ay sonrasında, portland çimentosu betonuna göre bu metot dayanım artışlarına sebep olur [11]. Uçucu külün ilk defa kullanıma girdiği kütle betonu uygulamalarında, bu erken yaş dayanım azalmaları arzu edilen ısı yükselişi azalmasına nazaran daha az yapısal öneme sahiptir. Genellikle bu tip uygulamalarda bu metot kullanılmıştır.

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

Bu hususta, yüksek kireçli uçucu küller büyük oranda az kireçli uçucu küllerden farklılık gösterir [15].

2- İlave Metodu

Bu metotda, uçucu kül karışıma kullanılan çimento miktarında bir azaltma yapılmaksızın ilave edilmektedir. Betondaki efektif bağlayıcı miktarı (özellikle uzun süreli nem küründen sonra) bu metotla artırılır. Diğer karışım ayarlamaları agrega bileşiminin değiştirilmesi ile yapılır ve bu düzeltmeler işin niteliğine bağlıdır.

Bu yaklaşımın bir örneği Price tarafından yapılan Güney Saskatchewan Baraj inşaatı için beton malzeme araştırması neticesi çıkmıştır. Sülfat dayanımından dolayı, minimum bir çimento faktörü ve çimentodan ziyade ince agrega yerine bir puzolan kullanmanın önemli olduğu düşünülmüştür. İlave yapılan uçucu külün tüm yaşlarda genellikle dayanım artışına sebep olduğu bulunmuştur. Artışların 7 güne kadar az olduğu fakat 3 aylık ve 1 yıllık periyotta 6.9 Mpa. düzeylerine ulaştığı gözlenmiştir.

Uçucu kül ilavesi ile elde edilen artışların aynı miktarda çimento ilave edilmesiyle elde edilen artışlara eşit veya bu artışlardan fazla olduğu gözlenmiştir [15].

3- Kısmi İkame Metodu

Uçucu külün kullanılması için geliştirilen üçüncü metot, ince agregada ve su içeriğinde bir ayarlama yaparak, ağırlıkça bir miktar fazla uçucu küle ikame edilecek bir miktar çimento gerektirir [15]. Çimento, su ve ince agrega yerine kısmi ikame yapılarak, çimento+uçucu kül miktarının arttığı durumlarda, dayanım gelişimi ve ekonomi için karışım optimizasyonu kavramı ortaya çıkar [11]. Metodun iki değişik hali vardır. Orjinal şeklinde buna modifiye ikame metodu denilmektedir. Son zamanlarda uygulamadaki gelişmelerle rasyonel karışım metodu denilen metot ortaya çıkmıştır.

a- Modifiye İkame Metodu

Bu metot karışım oranlarının modifikasyonu ile ilk yaşlarda kontrol betonu ile kıyaslanabilir dayanıma sahip uçucu küllü beton üretilebileceğini göstermiş olan Lovewell ve Washa'nın 1958 yılındaki çalışmasına dayanmaktadır [15].

Temel noktaları şunlardır :

“ İlk yaşlarda uçucu küle yapılan karışımlarda, 3 ve 28 günler arasındaki yaşlarda, yaklaşık olarak aynı basınç dayanımını sağlayabilmek için uçucu kül ve çimento toplam ağırlığı kıyaslanabilir dayanımlı portland çimentolu karışımdaki çimento ağırlığından fazla olmalıdır. ”

1960'ların başlarında anlaşılmıştır ki uçucu küllü beton eğer belirtilen işlenebilirlik ve dayanım ile ilgili şartlara uymalı ise, bu özelliklere en çok etkiyen karakteristikler karışım oranlarında izah edilmelidir. Bu anlayış Abrams'ın dayanım ve su/çimento oranı arasındaki oranı temel alan pek çok karışım oranlaması ile neticelenmiştir.

b- Rasyonel Karışım Oranı Metodu

Smith uçucu küllü betonların rasyonel oranlamasını öneren muhtemelen ilk kişidir. Alışılmış karışım oranları işlemlerini, çimento içeriği ve su / çimento oranı

değerlerini elde etmek için uçucu kül bağlayıcılık etkinliği faktörü (k) diye bir şey tanımlayarak değiştirmiştir. Bu faktörün her kül için tek olduğu kabul edilmiş ve bu faktörün uçucu küllü betonların performansından veya başlangıçta yapılacak testler ile belirleneceği söylenmiştir [15].

Bağlayıcılık etkinliği faktörü , bir kütle uçucu külün (F), bir kütle çimentoya (kF) eşit olması şeklinde tanımlanmıştır. Uçucu küllü betonun dayanım ve işlenebilirliğinin, çimento büyüklüğündeki tanelerin su ve agregaya hacımsal oranları ve de dayanım ile suyun toplam bağlayıcı malzemeye oranı ($w / (c + k F)$) arasındaki bağıntı tarafından kontrol edilebildiği göz önüne alınmaktadır [15].

Bu metot İngiltere’de uygulanmış, karışım hesaplarını kolaylaştırmak için tablolar hazırlanmıştır. Bununla birlikte Munday ve arkadaşlarının [15] belirttiği gibi yaklaşımın pratikte belirli kusurları vardır:

1- k değeri belirli bir uçucu kül için sabit değildir; k değeri kullanılan çimentoya, kür şartlarına ve betonun hangi nominal mukavemete göre karışımının yapıldığına bağlı olarak değişir.

2- Çimento ile uçucu kül ve farklı uçucu küller arasında su isteğinin farklı olması, istenen işlenebilirliği sağlamak amacıyla agrega içeriği için gerekli olan ayarlamaları yapmaya sebep olur. Bunun inşaat sahasında pratik olmadığı düşünülmüştür. Çünkü su içeriği genellikle değiştirilmekte ve böylece erişilen dayanımların değişkenliği artmaktadır.

3- Metot kompleks olup muhtemelen de pek çok amaç için pratik değildir.

Esas itibarıyla son belirtilen karışım oranı metotları, uçucu küllü betonların uçucu kül içermeyen betonlara kıyasla, istenen yaşta istenen dayanıma eşit veya fazla dayanım elde edebilmeyi mümkün kıldığını göstermiştir. Bununla birlikte, bu yaklaşımlar kullanılırken bir takım şeyler göz önünde bulundurulmalıdır.

- Normal karışım oranı tespiti sürecinde olduğu gibi, deneme karışımları yapılmalı ve beton bileşenleri ayarlanmalıdır. Ayrıca, her uçucu külün kendine has özellikleri olduğundan, her uçucu kül ile ilgili bilgiler deneme karışımına yardımcı olması için elde edilmelidir.

- Bu karışım oranı metotları ile ortaya konan ekonomik avantajları doğru olarak tahmin etmek için uçucu kül bir katkı olarak ayrıca karıştırıldığında fazladan, başka bir bileşen kullanımı göz önünde bulundurulmalıdır.

- Uçucu kül içeren betonların, kür esnasında sıcaklık ve neme normal betondan daha hassas oldukları göz önüne alınmalıdır.

1.1.5. Uçucu Külün Çeşitli Alanlarda Kullanımı

a) Katkılı Çimento Üretiminde

Portland çimentosu üretiminde kullanılan çimento klinkerinin bir miktarı azaltılarak yerine uçucu kül konulmakta ve böylece sadece klinkerin (küçük bir miktar alçıtaşı ile birlikte) öğütülmesi sonucunda elde edilen portland çimentosu yerine uçucu kül katkıli portland çimentosu elde edilmektedir. Bu tür çimentolar, içlerine katılan uçucu kül miktarına bağlı olarak, Türkiye’de genellikle doğal puzolanlarla üretilen katkıli çimentoya veya traslı çimentoya benzer karakteristikler göstermektedirler [25].

b) Yol Yapımında ve Geoteknik Uygulamalarında Kullanımı

Uçucu kül yol yapımında ve geoteknik uygulamalarda genellikle iki şekilde kullanılmaktadır :

- Dolgu malzemesi olarak
- Toprak stabilizasyonu sağlanarak alt ve temel malzemesi olarak.

Uçucu küller silt gibi küçük boyutlu ve oldukça üniform malzemelerdir. Doğal zemine göre daha düşük özgül ağırlığa sahiptirler. Suyu doygun olmadıkları zaman suyun yüzeysel geriliminden dolayı kohezyon gösterirler. İçlerinde önemli miktarda kireç bulunan uçucu küllerin zamana bağlı sertleşme nedeniyle kohezyonlarında ve serbest basınç dayanımlarında önemli artışlar yer alabilmektedir. Genel olarak geçirgenlikleri düşüktür ve sıkışabilir malzemelerdir. Uçucu kül sıkıştırıldığı vakit, diğer dolgu malzemelerine oranla daha düşük bir yoğunluğa sahip olabilmektedirler. Bu durum özellikle sıkıştırılabilme özelliği yüksek zeminler üzerinde bu malzemenin daha uygun bir dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesine neden olmaktadır. Ayrıca birçok uçucu kül sıkıştırıldığında kendi kendine yeterli bağlayıcılık vasfı

kazanmaktadır. Bu tip uçucu külün kullanılması ile malzemede yerleşme nedeniyle oluşan deformasyonlar daha düşük olabilmektedir. Özellikle yerleşme hareketinin büyük sorunlar meydana getirdiği köprü ayaklarında uçucu kül kullanılması büyük yararlar sağlamaktadır [25].

Uçucu kül kendi başına yol altyapı malzemesi veya taban malzemesi olarak kullanılmamaktadır. Ancak stabilizasyon sonunda bu şekilde kullanım mümkün olabilmektedir. Stabilizasyon ekonomik miktarlarda kireç veya çimento karışımı ile elde edilebilmektedir ve böylece toprağın fiziksel özellikleri iyileştirilebilmektedir.

c) Hafif Agregalı Üretiminde Kullanımı

Uçucu küller 1100-1200 °C’de bir miktar ergime göstererek ve de uygulanan sertleşme yöntemine bağlı olarak yuvarlak veya silindirik taneli agregalar oluşturmaktadırlar. Doğal agregaya oranla daha hafif olan bu agregaların kullanılması ile hafif beton bloklar ve yapıda hafif beton elde edilmektedir. Bu şekilde yapılan betonlar normal ağırlıklı betonlar kadar yüksek dayanıma sahip olmaktadır. Bunun yanında, hafiflik nedeniyle yapılarda işçilik kolaylaşmakta, ısı ve ses iletkenliği düşük olan malzeme elde edilebilmektedir. Elde edilen betonların havada kurutulmuş yoğunluğu 1100-1800 kg/m³ mertebesindedir. Uçucu küllerden elde edilen iyi kalitede agregalarla yapılan betonların 28 günlük basınç dayanımları yaklaşık 450 kg/cm² mertebesinde olabilmektedir [25].

d) Tuğla Üretiminde Kullanımı

Uçucu küller, çok ince taneli olmaları ve sertleştikleri zaman yüksek dayanım vermeleri nedeniyle tuğla üretiminde hammadde olarak kullanılabilirler [25].

e) Silindirle Sıkıştırılmış Beton Üretiminde Kullanımı

Çok düşük çimento dozajları ile üretilen, hiç çökme vermeyen ve titreşimli yol silindirlerini taşıyabilecek kadar kuru ve bu araçlarla sıkıştırıldıklarında alt tabakalara yapışacak kadar nemlenen bu betonlara kısaca rolkrit (Roller Compacted Concrete)

de denilmektedir. Bunların taşınmasında ve serilmesinde de yol yapım araçları olan damperler ve dozerler kullanılır.

Bu tip uygulamalar 1960 yılından başlayarak barajlarda uygulanmaktadır. Rolkrit tipine göre bağlayıcı dozajı yaklaşık 100-150 kg. civarında değişir ve bunun da puzolan yüzdesi 20 ile 80 arasında değişir. Çoğunlukla F tipi uçucu kül kullanılır. Bazı örnek rolkrit karışımları aşağıda verilmiştir [23].

Tablo 1.9. Örnek Rolkrit Karışımları [23]

Karışım	Maks.Agr. Boyutu (cm)	Çimento (kg/m ³)	Puzolan (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	İnce Agrega (kg/m ³)	Kaba Agrega (kg/m ³)
1	7.6	56	77	77	60	1649
2	11.4	139	0	80	618	1774
3	7.6	139	0	86	683	1691
4	7.6	139	0	83	676	1602
5	7.6	42	78	83	676	1602
6	3.8	75	164	89	745	1426
7	3.8	45	178	84	727	1438
8	3.8	116	139	103	657	1438

Rolkrit; geçirimsizlik, çekme dayanımı, çekme deformasyon kapasitesi, elastisite modülü, sünme hızı, termik gerilme katsayısı, termik difüzyon ve iklim katsayıları, hacim sabitliği, kavitasyon ve erozyon dayanıklılığı, donma ve çözülme dayanıklılığı ve kayma dayanımı için yeterli niteliklere sahiptir [13].

f) Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Kullanımı

Yüksek dayanımlı beton tanımını TS 500/84, silindir basınç dayanımı 30 ile 50 MPa arasında değişen betonlar olarak yapmaktadır. Ağustos 1990 tarihinde, CEB/FIP komisyon raporunda ise bu sınırların 60 MPa ile 130 MPa arasında olması öngörülmektedir [26].

Özellikle 60 MPa'dan yüksek dayanıma sahip betonların üretiminde, portland çimentosuna ikame olarak uçucu kül, ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu gibi mineral katkılar yabancı ülkelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu katkıların iki yararı vardır:

1- Çimento yerine uçucu kül veya yüksek fırın cürufu kullanılması, erken zamanda hidratasyon ısı artışlarını kontrol eder ve özellikle büyük hacimli yapı kesimlerinde zararlı olabilecek bir iç sıcaklık düzeyine ulaşmadan, betona bol miktarda bağlayıcı ürün sağlar.

2- Bunların girdiği pozolanik reaksiyonlarda, çimento hidratasyonu ile kirecin büyük bir kısmı kullanılır ve serbest kalan çok az miktardaki kirecin hamur-agrega arakesitlerinde oluşturacağı kristallerde daha az olarak arakesitte oluşan bağ zayıflatılmamış olur [27]

Uçucu külün kullanıldığı Texas Commerce Tower'daki beton karışımı, yüksek dayanımlı beton karışımına bir örnek olarak Tablo 1.10'da verilmektedir.

Tablo 1.10. Texas Commerce Tower'da Kullanılan Beton Karışımı [28]

Çimento	448.5 kg/m ³
Uçucu Kül	112 kg/m ³
Uçucu Kül / Toplam Bağlayıcı	0.20
Su Azaltıcı Katkı	0.8 lt/m ³
Çökme	10 cm.
Su/Çimento	0.30
Dayanım	72.7 N/mm ²

Yapılan deneysel bir çalışmada, PÇ 42.5 çimentosunun kullanıldığı, 550 kg/m³ bağlayıcı miktarına sahip, süper akışkanlaştırıcı katkı içeren, ağırlıkça % 25 oranında C sınıfı Soma-B Termik Santrali uçucu külü ile ikame edilmiş beton üretilerek, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü deneyi, permeabilite deneyi, donma-çözülme, asit, tuz ve sülfat testleri ve yüzeysel aşınma testi yapılmış ve kontrol betonu ile sonuçlar kıyaslanmıştır. Netice olarak, dayanımdan biraz fedakarlık yapılarak, kimyasal etkilere karşı uçucu kül kullanımının önemli yararlar sağlamanın yanında, önemli bir ekonomi ve çevre kirliliğini önlemede dikkate değer bir katkı oluşturacağı belirtilmektedir [29].

g) Diğer Kullanım Alanları

- Gaz beton üretiminde
- Püskürtme beton uygulamalarında.

- Harç yapımında
- Maden ocaklarında filler olarak
- Yalıtım malzemesi olarak
- İlaç sanayinde hammadde olarak

1.2. Konuyla İlgili Çalışmalar

Aynı kaynaktan elde edilen uçucu küllerin özelliklerinin, eğer santral yükünde büyük bir değişiklik olmazsa sabit kalacağı, fakat farklı filtrelerden elde edilen uçucu küllerin filtrenin değişmesiyle sadece inceliğinin değişmediği, ayrıca kimyasal özelliklerinin, özgül ağırlıklarının ve taneciklerin morfolojilerinin de değiştiği belirtilmektedir [4,11,15]. Bununla birlikte, tek kaynağa ait farklı incelikteki uçucu küllerin incelenmesinin, bazı faktörlerin sınırlanması kaydıyla, inceliğin beton özellikleri üzerine olan etkisini belirlemede en basit yol olduğu belirtilmektedir [15].

İnceliğin, uçucu külün betondaki performansının sağlam bir göstergesi olduğu ve inceliğin artmasıyla bu performansın olumlu şekilde geliştiği belirtilmektedir [4].

1.3. Araştırmanın Amacı

Bu çalışmadaki amaç, tek bir kaynaktan elde edilmiş, farklı inceliklere sahip uçucu küllerin, üç farklı oranda (% 10, % 20 ve % 30) portland çimentosu yerine ikame edilmesi ile üretilen eşit işlenebilirliğe sahip yüksek dozajlı betonların özelliklerine ve aynı betonların deniz suyunda ardışık haftalarda ıslanma-kuruma çevrimine tabi tutulması oluşan etkiler incelenmiştir.

Bu çalışma ile, uçucu kül dediğimiz atık maddenin, betonda kullanımı ile betondaki yabana atılamayacak performansını göstererek, zengin denilemeyecek olan Türkiye'miz'deki kullanımının artmasına, dolayısıyla ekonomi ve çevresel faydalar sağlanmasına bir katkı yapmak amaçlanmaktadır.

BÖLÜM 2.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Deneysel Çalışmanın Kapsamı

Deneysel çalışmada, Seyitömer Termik Santrali'nden sağlanan ince, kalın ve bu iki farklı incelikteki uçucu külün ağırlıkça yarı yarıya karıştırılması ile elde edilen orta incelikteki uçucu külün, PÇ 32.5 yerine ağırlıkça % 10, % 20 ve % 30 oranlarında ikame edilmesi ve sadece PÇ 32.5 kullanılması ile üretilen 12 ± 1 cm. sabit çökmeye sahip betonların su ihtiyaçları ve zamanla basınç dayanımları, eğilme dayanımları, kılcalıkları, dinamik elastisite modüllerinde meydana gelen değişiklikler tespit edilmiştir. Bundan başka, aynı özelliklere sahip olan betonlar bir plastik varil içine konulmuş deniz suyunda, ardışık tek haftalarda bekletilerek, basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve dinamik elastisite modüllerindeki değişikliklerin zamanla değişimi bulunmuştur. Bu çalışmada bağlayıcı dozajı (çimento+uçucu kül) 375 kg. olarak sabit tutulmuştur, katkı maddesi kullanılmamıştır. Mutlak hacmi sağlamak için kum ağırlığı azaltılmıştır. Aralık 1994 ile Mayıs 1995 tarihleri arasında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Lâboratuvarı'nda gerçekleştirilen bu çalışmanın amacı, uçucu külün inceliği ile betonun yukarıda bahsedilen özelliklerinin değişiminin bulunmasıdır.

2.2. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

2.2.1. Uçucu Küllerin Özellikleri

Çalışmada Seyitömer Termik Santrali'ne ait, II no.lu filtrede tutularak bunkerlere aktarılan, ortalama 22 mikron dane çapına sahip ince uçucu kül, ortalama 81.7 mikron dane çapına sahip yine Seyitömer Termik Santrali'ne ait kalın baca altı külü ve bu ikisinin ağırlıkça yarı yarıya karıştırılması ile elde edilen ortalama 48 mikron dane çapına sahip orta incelikteki uçucu kül kullanılmıştır. Baca altı külü

250 mikron elekten elenerek elek altına geçen kısmı çalışmada kullanılmıştır. Uçucu külün fiziksel, kimyasal özellikleri, puzolanik özellikleri bu bölümde verilecektir.

- Fiziksel Özellikler

İnce uçucu kül, kahverengi ile mor arası bir renge, kalın baca altı külü ise açık gri renge sahiptir. Baca altı külleri, bir miktar siyah tanecikler içermektedir. Bunlar, yanmamış kömür tanecikleridir.

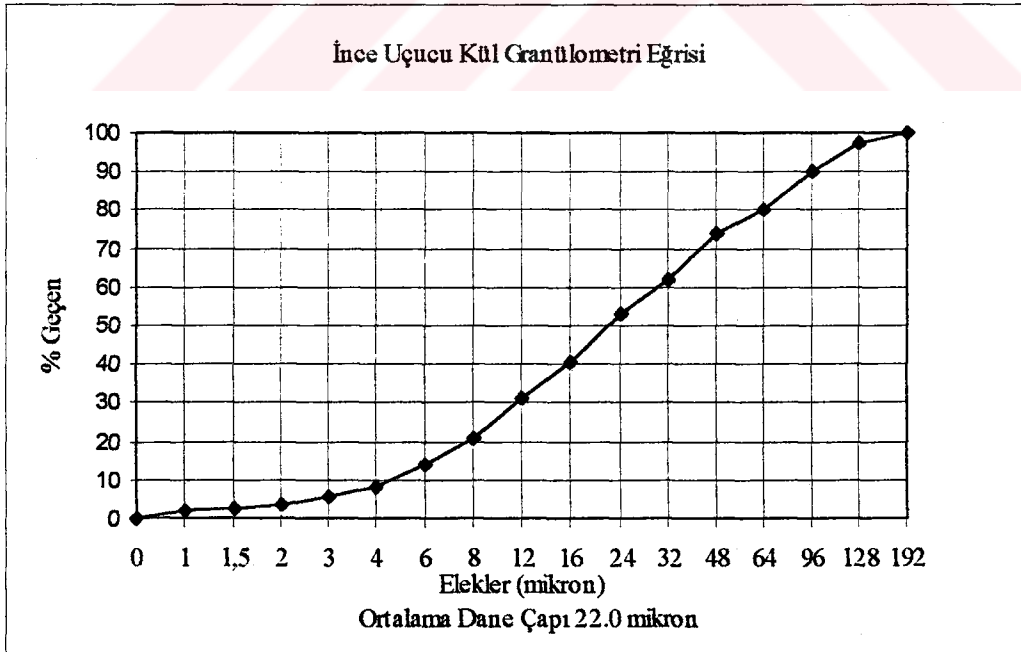
Uçucu küllerin özgül ağırlıkları TS 619'a göre Le Chatelier balonu ile tayin edilmiştir.

İnce Seyitömer Uçucu Külü $\delta = 1.89 \text{ gr/cm}^3$

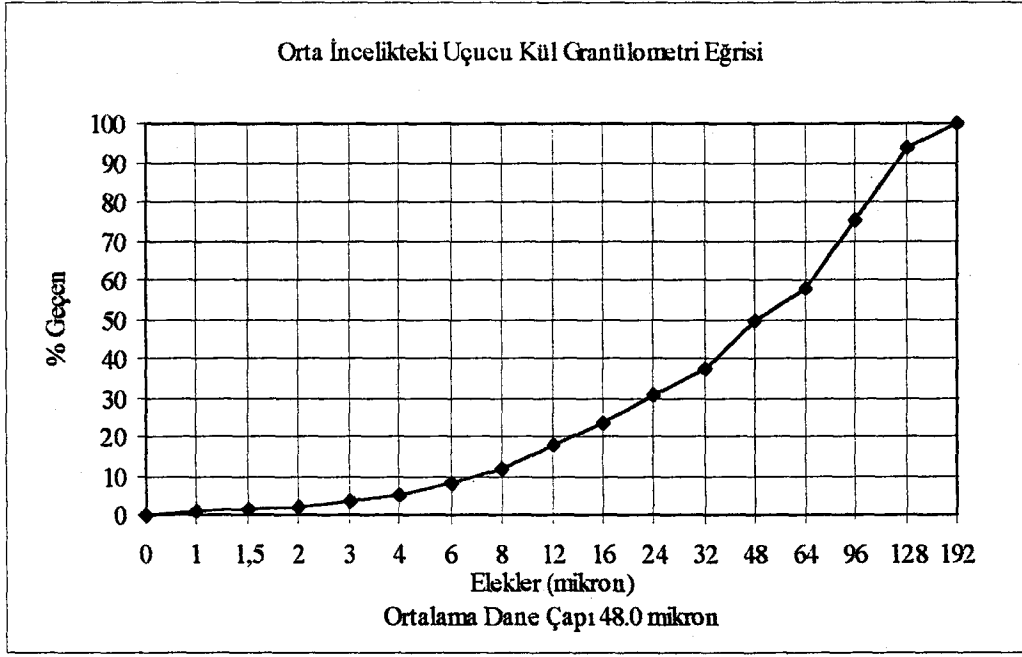
Orta Seyitömer Uçucu Külü $\delta = 1.59 \text{ gr/cm}^3$

Kalın Seyitömer Uçucu Külü $\delta = 1.45 \text{ gr/cm}^3$

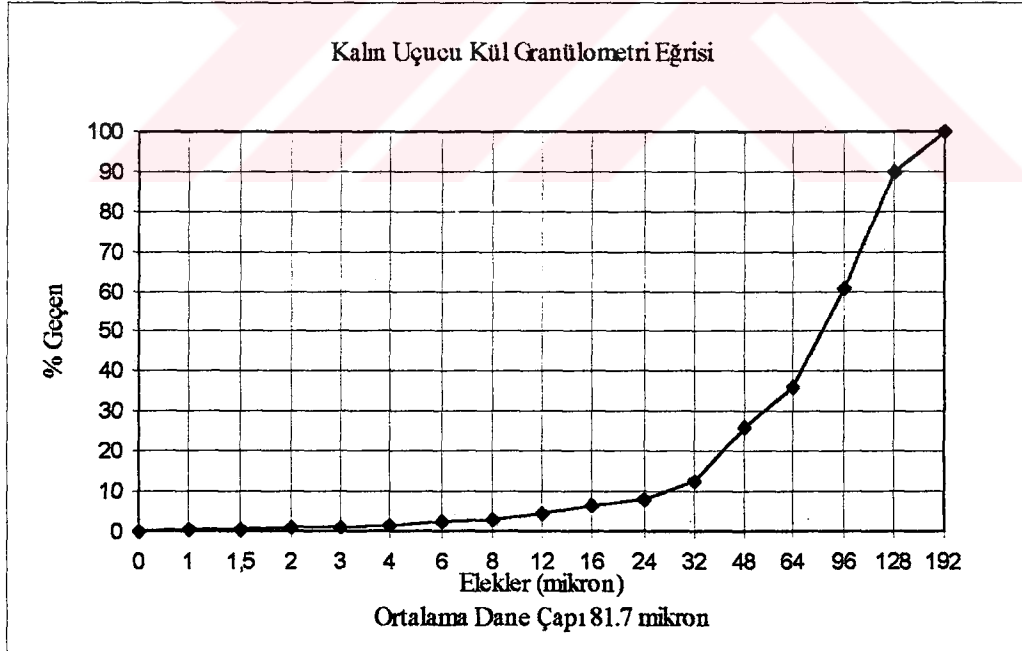
Uçucu küllerin granülometri analizleri, Akçimento-Sa Çimento Fabrikası Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 2.1, Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'de verilmektedir.



Şekil 2.1. Seyitömer Termik Santrali İnce Uçucu Külü Granülometri Eğrisi



Şekil 2.2. Seyitömer Termik Santralı Orta Uçucu Külü Granülometri Eğrisi



Şekil 2.3. Seyitömer Termik Santralı Kalın Uçucu Külü Granülometri Eğrisi

- Kimyasal Özellikler

Uçucu küllerin kimyasal analizleri Aslan Çimento Fabrikası Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonuçları Tablo 2.1.'de verilmektedir.

Tablo 2.1. Uçucu Küllerin Kimyasal Analizi

		İNCE U. K.	ORTA U. K.	KALIN U. K.	TS 639 SINIRLARI
Toplam SiO ₂	%	48.13	50.75	53.37	--
Al ₂ O ₃	%	14.64	15.10	15.55	--
Fe ₂ O ₃	%	12.13	12.92	13.70	--
CaO	%	9.52	8.67	7.82	--
MgO	%	5.70	5.11	4.52	<5
SO ₃	%	4.32	2.44	0.56	<5
Na ₂ O	%	0.50	0.47	0.44	--
K ₂ O	%	2.00	1.69	1.38	--
S+A+F	%	74.90	78.76	82.62	>70
Kızdırma Kaybı	%	2.36	2.85	3.33	<10

Yukarıdaki sonuçlardan ilk olarak dikkati çeken, Bölüm 1. Tablo 1.7.'de Seyitömer Termik Santrali uçucu külünün C sınıfı (S+A+F miktarı > % 50) olarak gözükmekte olmasına rağmen, tez çalışması için yapılan analiz sonucunda F sınıfı olarak ortaya çıkmasıdır. Tereddüde düşülerek bu analiz, Akçimento-Sa Çimento Fabrikası Laboratuvarı'nda bir kez daha yaptırılmış ve yukarıdaki tabloya benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar da göstermektedir ki, Türkiye'deki uçucu küller için sabit özellikler tesbit etmek güçtür.

- Puzolanik Aktivite Deneyi

Bu deney TS 639'a göre, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı klima odasında gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde sadece portland çimentosu, ince uçucu kül, orta uçucu kül ve kalın uçucu kül için standart kum ile harç karışımları hazırlanmıştır.

Şahit (sadece portland çimentolu) ve ince, orta, kalın uçucu küllerin herbiri için 3'er adet olmak üzere 12 adet 40x40x160 mm. numune üretilmiş ve yerleştirmeyi

takiben kalıpların üzeri camla örtülmüştür. Numuneler 1 gün sonra kalıptan çıkarılarak, kirece doymun 20 ± 2 °C'deki suda bekletilmiştir. Uçucu küllü numuneler, kür esnasında, 1-2 cm. uzunluğundaki beyaz sarkıt-dikitler ile kaplanmış, numunelerden belirgin kireç çıkışı olmuştur. Numuneler, 28. günde kırılmadan 2 saat kadar önce sudan çıkarılarak önce eğilme, daha sonra da basınç dayanımları bulunmuştur. Puzolanik aktivite, uçucu küllü harç numunelerinin 28. gündeki basınç dayanımlarının, şahit harcın aynı yaştaki basınç dayanımına oranlaması ile bulunur.

TS 639, uçucu küllü harç karışımları için su miktarını şahit harç için öngörülene göre azaltmaktadır. Halbuki, Türkiye uçucu külleri, harçların su ihtiyacını arttırmaktadır [13]. Yapılan testte, öngörülen su miktarı uçucu küllü harçların kalıplara rahat, homojen yerleştirilmesine imkan vermemiştir. Bu sebeple, TS 639 puzolanik aktivite testinde, eşit kıvam için uçucu küllü harç karışımlarının hazırlanması düşünülebilir.

Deneyde kullanılan malzeme miktarları ve deney sonucu Tablo 2.2.'de verilmektedir.

Tablo 2.2. Puzolanik Aktivite Deneyi Malzeme Miktarları ve Deney Sonucu

	Çimento (gr)	U. Kül (gr)	Standart Kum (gr)	Su (gr)	Puzolanik Aktivite	TS 639 Sınırı
Şahit	450	--	1350	225.0	--	--
İnce U. K.	293	95.7	1350	194.4	0.423	0.70
Orta U. K.	293	80.5	1350	186.7	0.296	0.70
Kalın U.K.	293	73.4	1350	183.2	0.191	0.70

2.2.2. Portland Çimentosu Özellikleri

Deneyisel çalışmalarda, Akçimento-Sa A.Ş. Çimento Fabrikası'na ait Kasım 1994 üretimi PÇ 32.5 çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri Tablo 2.3.'te, kimyasal özellikleri Tablo 2.4.'de ve dayanım değerleri de Tablo 2.5.'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Portland Çimentosu Fiziksel Özellikleri

Özgürlük (gr/cm ³)		3.13
Priz Süresi	Başlangıç	2 ¹⁰
	Bitiş	3 ¹⁰
Hacim Sabitliği (Le Chatelier) mm.		2
İncelik	Özgürlük (Blaine) cm ² /kg.	3239
	(200 µ) elekten kalıntı	0.1
	(90 µ) elekten kalıntı	4.0

Tablo 2.4. Portland Çimentosu Kimyasal Analizi

Kimyasal Analiz	Kimyasal Analiz Sonuçları
SiO ₂ ————— Çözünmeyen	0.65
————— Çözünen	21.21
Al ₂ O ₃	5.55
Fe ₂ O ₃	3.31
CaO	64.16
MgO	1.15
SO ₃	2.66
Kızdırma Kaybı	0.98
Ölçülemeyen	0.33
TOPLAM	100
Serbest CaO	1.13
Hidrolik Modül	2.13
Silikat Modül	2.33
Alümin Modül	1.68
Kireç Standardı	91.50
C ₃ S	45.73
C ₂ S	26.39
C ₃ A	9.11
C ₄ AF	10.07

Tablo 2.5. Portland Çimentosu Dayanım Değerleri

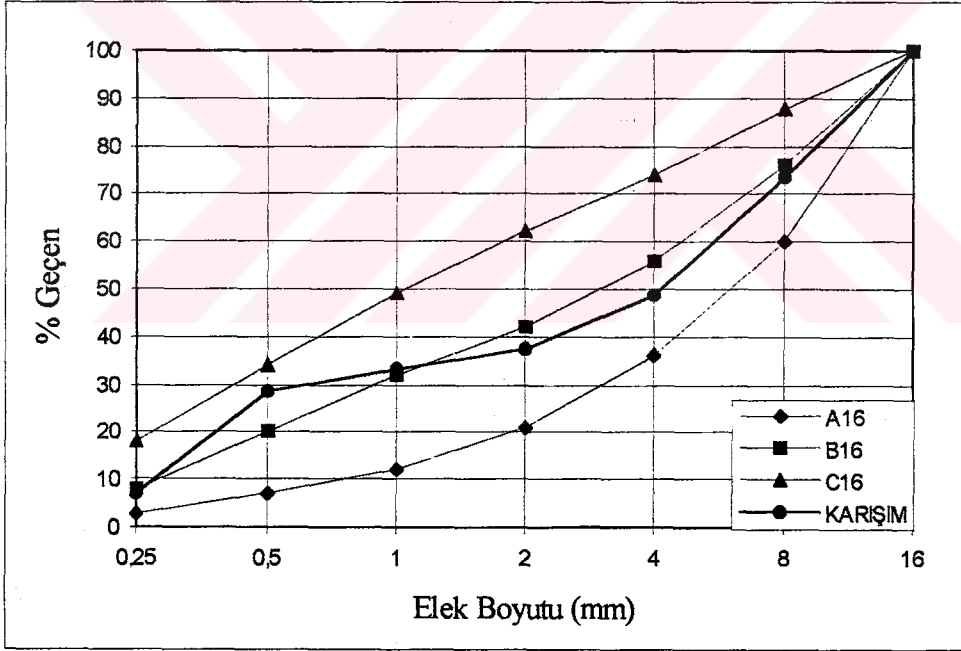
Gün	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Basınç Dayanımı (N/mm ²)
2	5.2	23.3
3	8.0	25.7
7	8.4	37.1
28	8.9	44.1

2.2.3. Agrega Özellikleri

Beton üretiminde, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda mevcut olan kırmataş-I, kırmataş-II, deniz kumu ve kırmataş tozu kullanılmıştır. Bu malzemelerin özellikleri Tablo 2.6.'da ve karışımın granülometrisi de Şekil 2.4.'de verilmiştir.

Tablo 2.6. Kullanılan Agregaların Özellikleri

Elek Boyutu (mm) → Agrega Türü ↓	16	8	4	2	1	0.50	0.25	Özgürlük (gr/cm ³)
Kırmataş I (% 40)	100	74	20	7	6	5	4	2.71
Kırmataş II (% 20)	100	19	4.5	2.6	2.2	1.9	1.4	2.66
Kum (% 25)	100	100	100	97	96	91	16	2.63
Kırmataş Tozu (% 15)	100	100	99	65	43	24	9	2.70
Karışım	100	73.4	48.8	37.3	33.3	28.7	7.2	--



Şekil 2.4. Agrega Karışım Granülometri Eğrisi

2.3. Beton Üretimi ve Deneyler

Daha önce belirtildiği gibi deneysel çalışmada Seyitömer Termik Santrali'ne ait üç farklı incelikteki uçucu kül ağırlıkça % 10, 20 ve 30 oranlarında portland

çimentosu yerine ikame edilerek 375 dozajlı betonlar üretilmiştir. Karışımlarda herhangi bir katkı kullanılmamıştır. Bütün betonlarda işlenebilme 12 ± 1 cm. çökme miktarında sabit tutulmaya çalışılmış, su miktarı buna göre ayarlanmıştır. Uçucu külün ikame edilmesiyle meydana gelen hacim artışı, kum miktarı azaltılarak dengelenmiştir. Üretim grupları Tablo 2.7.'de verilmiştir.

Beton üretimi kapsamında, her seride musluk suyunda bekletilmek üzere her yaş için 2'şer adetten 8 adet $7\times 7\times 28$ cm. ebadında numune, deniz suyunda bekletilmek üzere her seride yine her yaş için 2'şer adet olmak üzere 4 adet $7\times 7\times 28$ cm. ebadında numune üretilmiştir. Toplam olarak 120 adet $7\times 7\times 28$ cm. ebadında numune üretilmiştir.

Tablo 2.7. Beton Üretim Grupları

ÜRETİM GRUPLARI	AÇIKLAMA
ŞAHİT	Sadece portland çimentosu içeren beton
İ10	Ağırlıkça %10 ince uçucu kül içeren beton
İ20	Ağırlıkça %20 ince uçucu kül içeren beton
İ30	Ağırlıkça %30 ince uçucu kül içeren beton
O10	Ağırlıkça %10 orta uçucu kül içeren beton
O20	Ağırlıkça %20 orta uçucu kül içeren beton
O30	Ağırlıkça %30 orta uçucu kül içeren beton
K10	Ağırlıkça %10 kalın uçucu kül içeren beton
K20	Ağırlıkça %20 kalın uçucu kül içeren beton
K30	Ağırlıkça %30 kalın uçucu kül içeren beton

Musluk suyunda kür gören numuneler kırılmadan önce 28, 56 ve 91. günlerde ultrases hızı ölçülmüştür. 3, 7, 28 ve 91. günlerde $7\times 7\times 28$ cm. ebadındaki numuneler açıklık ortasından yüklenerek eğilme deneyi yapılmış, daha sonra ikiye ayrılan numunelerin üzerine metal plaka konularak basınç deneyi yapılmıştır. Kirece doymun hale getirilmiş 20 ± 2 °C'deki musluk suyunda bekletilen numunelerde her seriden eğilme deneyi sonrası ikiye ayrılan iki numune alınarak 28 ve 91. günlerde kılcalık deneyi yapılmıştır.

Ardışık haftalarda yaklaşık 20 °C sıcaklığa sahip kür odasında tutulan, Emirgan - İstanbul'dan temin edilmiş deniz suyu ile dolu plastik varil içinde bekletilen 7x7x28 cm. ebadındaki prizmalar üzerinde önce 28, 56 ve 91. günlerde ultrases hızı ölçülmüş, daha sonra eğilme deneyi yapılmıştır. Eğilme deneyi sonucu ikiye ayrılan numuneler üzerinde, yine plaka konularak basınç deneyi yapılmıştır (Bkz. Tablo 2.8.).

Tablo 2.8. Deney Programı

Numune Bekleme Ortamı	Musluk Suyu												
Deney Türü	Basınç Deneyi				Eğilme Deneyi				Ultrases Deneyi			Kılcallık Deneyi	
Deney Yaşları	3	7	28	91	3	7	28	91	28	56	91	28	91
Numune Bekleme Ortamı	Deniz Suyu (Ardışık Tek Haftalarda)												
Deney Türü	Basınç Deneyi				Eğilme Deneyi				Ultrases Deneyi				
Deney Yaşları	28		91		28		91		28	56	91		

Beton üretimi, dikey eksenli karıştırıcıda yapılmıştır. Üretimlerde 30 lt. beton üretilmiştir. Önce bütün malzemeler kuru olarak 1-2 dakika karıştırmış, ardından 12±1 cm. çökme değerini elde edebilmek için su karıştırma devam ederken yavaş yavaş katılmıştır. Yoğurma suyu olarak, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi şebeke suyu kullanılmıştır. Bu işlem 1-2 dakika almıştır. Sonra betonun taze birimağırlığı bulunmuştur. Ardından beton kalıplara yerleştirilerek sarsma tablasında kalıplara 10-15 saniye vibrasyon uygulanmıştır. Yaklaşık 24 saat sonra betonlar kalıplardan çıkarılarak kür havuzuna ve deniz suyuna bırakılmıştır. Deney gününde numuneler, yaklaşık 2 saat kurumaya bırakılmıştır.

Üretilen betonların gerçek bileşimleri Tablo 2.9.'da verilmiştir.

Tablo 2.9. Üretilen Betonların Gerçek Bileşimleri ve Çeşitli Özellikleri

Beton Grubu	Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	Su (kg)	Su — Ç+UK	Kırmataş I (kg)	Kırmataş II (kg)	Kum (kg)	Kırmataş Tozu (kg)	Hava (%)	Taze B. ağırlık (kg/m ³)	Komp.	Çökme (cm)
Şahit	375.0	—	228	0.608	704	345	427	263	3	2342	0.769	11.5
İ10	337.5	37.5	235	0.627	697	343	405	260	1	2315	0.764	11.0
İ20	300.0	75.0	241	0.643	690	339	381	258	1	2284	0.758	11.5
İ30	262.5	112.5	250	0.667	680	334	350	254	3	2243	0.747	11.5
O10	337.5	37.5	239	0.637	692	340	390	259	2	2295	0.759	11.5
O20	300.0	75.0	243	0.648	690	338	358	257	1	2261	0.756	12.0
O30	262.5	112.5	251	0.669	678	333	319	253	4	2209	0.745	12.0
K10	337.5	37.5	240	0.640	692	340	385	259	1	2291	0.759	11.5
K20	300.0	75.0	252	0.672	678	331	341	253	2	2230	0.746	11.0
K30	262.5	112.5	262	0.699	666	326	293	248	5	2170	0.733	12.5

2.3.1. Basınç Dayanımı

Üretilen 7x7x28 cm. ebadındaki prizmalar üzerinde ultrases hızı ölçümü ve bunu takiben eğilme deneyi yapılmıştır. Eğilme deneyi sonucu ikiye ayrılan numuneler üzerinde basınç deneyi yapılmıştır. Musluk suyunda bekletilen numunelerde bu deney 3, 7, 28 ve 91. günlerde; deniz suyunda bekleyen numuneler için ise 28 ve 91. günlerde bu deney gerçekleştirilmiştir. Her yaş için iki adet 7x7x28 cm. ebadındaki numuneden eğilme deneyi sonucu ortaya çıkan dört yarım numune kullanılmıştır. Bu deneyin sonuçları Tablo 2.10'da gösterilmiştir. Parantez içinde, musluk suyunda kür gören şahit betonun 28 günlük basınç dayanımı 100 kabul edilerek bulunmuş değerler verilmektedir.

Tablo 2.10. Musluk Suyu ve Deniz Suyunda Bekletilen Betonların Basınç Dayanımları (MPa)

Bekleme Ortamı	Muskuk Suyu				Deniz Suyu	
Yaş (Gün) → Grubu ↓	3	7	28	91	28	91
Şahit	27.36 (67.61)	32.73 (80.87)	40.47 (100)	45.34 (112.03)	41.57 (102.71)	46.66 (115.30)
İ10	19.60 (48.43)	32.56 (80.45)	40.88 (101.01)	53.32 (131.75)	43.80 (108.23)	45.70 (112.92)
İ20	13.84 (34.20)	22.19 (54.83)	36.39 (89.92)	42.52 (105.07)	34.45 (85.12)	36.65 (89.82)
İ30	11.64 (28.76)	19.36 (47.84)	32.16 (79.47)	37.81 (93.43)	31.08 (76.80)	35.99 (88.93)
O10	18.02 (44.53)	29.03 (71.73)	41.10 (101.56)	44.39 (109.69)	39.55 (97.73)	44.85 (110.82)
O20	15.27 (37.73)	25.52 (63.06)	32.35 (79.94)	37.35 (92.29)	34.61 (85.52)	36.68 (90.64)
O30	12.71 (31.41)	20.73 (51.22)	31.55 (77.96)	34.80 (85.99)	31.51 (77.86)	35.07 (86.66)
K10	15.39 (38.03)	25.68 (63.45)	36.19 (89.42)	37.97 (93.82)	38.62 (95.43)	39.53 (97.68)
K20	15.00 (37.06)	21.18 (52.34)	34.02 (84.06)	37.50 (92.66)	33.10 (81.79)	35.20 (86.98)
K30	10.78 (26.64)	17.72 (43.79)	26.65 (65.85)	30.55 (75.49)	24.44 (60.39)	27.03 (66.80)

2.3.2. Eğilme Dayanımı

7x7x28 cm. ebadındaki numunelerin ultrases hızının ölçülmesinin ardından, her yaştan ikişer adet olmak üzere, musluk suyunda bekletilen numunelerde 3, 7, 28 ve 91. günlerde eğilme dayanımı tesbit edilmiştir. Deniz suyunda bekleyen numunelerde ise 28 ve 91. günlerde eğilme deneyi yapılmıştır. Bu deneyde elle çalışan hidrolik, açıklığı ayarlanabilir, 2000 kg. kapasiteli, açıklık ortasından yüklemeli mekanik alet kullanılmıştır. Açıklık 25 cm. olarak ayarlanmış ve numunenin temas eden yüzeyleri ile yük uygulanan kısmına ince plastik şeritler yerleştirilmiş ve yük uygulanmıştır. Kırılmaya sebep olan yük bulunmuştur. Basit mukavemet formülleri ile eğilme dayanımı hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 2.11.'de sunulmuştur. Parantez içinde, musluk suyunda bekletilen şahit betonun 28 günlük eğilme dayanımı 100 kabul edilerek bulunmuş değerler verilmektedir.

Tablo 2.11.Musluk Suyu ve Deniz Suyunda Bekletilen Betonların Eğilme Dayanımları (Mpa)

Bekleme Ortamı	Musluk Suyu				Deniz Suyu	
Yaş (Gün) → Grubu ↓	3	7	28	91	28	91
Şahit	4.440 (58.67)	6.022 (79.57)	7.568 (100)	8.912 (117.76)	6.023 (79.59)	7.780 (102.80)
İ10	3.593 (47.78)	5.493 (72.58)	6.336 (83.72)	7.864 (103.91)	5.532 (73.10)	7.462 (98.60)
İ20	2.571 (33.97)	4.557 (60.21)	6.832 (90.27)	7.931 (104.80)	4.517 (59.69)	6.949 (91.82)
İ30	2.582 (34.12)	4.010 (52.99)	6.983 (92.27)	7.641 (100.96)	4.702 (62.13)	7.005 (92.56)
O10	3.798 (50.18)	5.867 (77.52)	7.641 (100.96)	8.628 (114.01)	5.129 (67.77)	7.936 (104.86)
O20	3.246 (42.89)	5.103 (67.43)	7.864 (103.91)	8.449 (111.64)	5.231 (69.12)	6.520 (86.15)
O30	2.722 (35.97)	4.534 (59.91)	7.194 (95.06)	7.791 (102.95)	5.031 (66.48)	5.237 (69.20)
K10	3.073 (40.61)	5.176 (68.39)	6.358 (84.01)	7.942 (104.94)	6.001 (79.29)	7.635 (100.89)
K20	3.636 (48.04)	4.467 (59.02)	5.493 (72.58)	7.038 (93.00)	4.534 (59.91)	6.698 (88.50)
K30	2.465 (32.57)	3.620 (47.83)	5.298 (70.00)	7.853 (103.77)	3.971 (52.47)	5.466 (72.23)

2.3.3. Dinamik Elastisite Modülü

Ultrases hızı ölçümü, musluk suyu ve ardışık tek haftalarda deniz suyunda bekleyen 7x7x28 cm. ebadındaki numuneler üzerinde 28, 56 ve 91. günlerde yapılmıştır. Her yaşta, mevcut, kırılmamış tüm numuneleri kullanarak bu deney gerçekleştirilmiştir. 91.günde ise sadece iki numune üzerinde bu deney gerçekleştirilmiştir. Numuneler beklediği yerden çıkarıldıktan yaklaşık iki saat sonra, düzgün bir sathi konulmuş ve hava boşluğunu önlemek için numunelerin iki yüzü gres yağı ile yağlanmıştır. Ölçümler 9999 mikrosaniyeye kadar ölçüm yapabilen, 5 cm. alıcı-verici kafalı, 50 Khz. frekanslı, 0.1 mikrosaniye hassasiyetli ultrases cihazı ile yapılmıştır. Yapılan ölçümler aşağıdaki formülde konularak dinamik elastisite modülü bulunmuştur [30].

$$E_d = \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \cdot V^2 \cdot \Delta \quad (3.1)$$

E_d : Dinamik Elastisite Modülü (GPa)

ν : Poisson Oranı (0.21 alınmıştır)

V : Ultrases Hızı (km/sn)

Δ : Betonun Birim ağırlığı (kg/dm³)

olmaktadır

Ultrases hızları, birim ağırlıklar ve hesaplanan dinamik elastisite modülleri aşağıda sunulmuştur.

Tablo.2.12. Ölçülen Ultrases Hızları (km/sn)

Bekleme Ortamı	Muskuk Suyu			Deniz Suyu		
Yaş (Gün) → Grubu ↓	28	56	91	28	56	91
Şahit	4.73	4.84	4.89	4.64	4.74	4.79
İ10	4.79	4.88	4.95	4.58	4.73	4.81
İ20	4.67	4.68	4.79	4.48	4.59	4.69
İ30	4.56	4.64	4.70	4.38	4.52	4.61
O10	4.75	4.84	4.93	4.58	4.67	4.78
O20	4.63	4.71	4.77	4.39	4.57	4.67
O30	4.55	4.66	4.71	4.40	4.56	4.61
K10	4.72	4.87	4.85	4.61	4.70	4.82
K20	4.58	4.70	4.73	4.42	4.56	4.61
K30	4.45	4.59	4.63	4.26	4.44	4.54

Tablo 2.13. Beton Birim ağırlıkları (kg/dm³)

Yaş (Gün) → Grubu ↓	28	56	91
Şahit	2.255	2.258	2.265
İ10	2.242	2.257	2.274
İ20	2.205	2.201	2.197
İ30	2.125	2.137	2.146
O10	2.208	2.213	2.223
O20	2.180	2.183	2.188
O30	2.152	2.145	2.141
K10	2.223	2.221	2.219
K20	2.165	2.156	2.146
K30	2.063	2.054	2.041

Tablo 2.14. Musluk Suyu ve Deniz Suyunda Bekletilen Betonların Dinamik Elastisite Modülleri (GPa)

Bekleme Ortamı	Muskuk Suyu			Deniz Suyu		
Yaş (Gün) → Grubu ↓	28	56	91	28	56	91
Şahit	44.818	46.990	48.114	43.129	45.068	46.166
İ10	45.698	47.748	49.498	41.778	44.858	46.738
İ20	42.720	43.825	44.780	39.314	41.194	42.930
İ30	39.253	41.872	42.113	36.215	38.785	40.515
O10	44.256	46.053	47.998	41.145	42.874	45.121
O20	41.515	43.021	44.225	37.323	40.502	42.390
O30	39.578	41.380	42.193	37.011	39.623	40.421
K10	43.996	46.794	46.369	41.969	43.584	45.797
K20	40.344	42.309	42.652	37.574	39.826	40.515
K30	36.292	38.443	38.868	33.259	35.971	37.372

2.3.4. Kılcallık Deneyi

Kılcallık deneyi, musluk suyunda bekleyen, her seriden bir adet 7x7x28 cm. ebadındaki numunenin eğilme deneyi sonucu ikiye ayrılması ile oluşan iki parça üzerinde 28 ve 91. günlerde yapılmıştır. Bu parçalar önce elektrikli, tablalı testerede bir yüzü traşlanarak düzgün yüzey elde edilmiş, sonra 24 saat 105 °C'deki etüvde bekletilmiştir. Numunenin kuru ağırlığı tesbit edilerek, kılcallık deneyi yapılacak yüzeye dik olan yüzlerin yaklaşık 1 cm. lik kısmı parafinle kaplanmıştır. Numunelerin

su ile temas yüzeyinden yaklaşık 5 mm. lik su seviyesi olacak şekilde su ile dolu bir kaba yerleştirilen cam çubuklar üzerine numuneler yerleştirilmiştir. 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 ve 64. dakikalarda numuneler tartılarak numune içine giren su miktarı bulunmuştur. UYAN'ın çalışmasından yararlanılarak kılcallık katsayısı şu şekilde bulunmuştur [33]: Birim alandan emilen su miktarı düşey ekseninde, zamanın karekökü yatay ekseninde gösterilmiş, oluşan noktalardan en uygun doğru bir bilgisayar programı yardımıyla geçirilmiştir. Bu doğrunun eğiminden, aşağıdaki formül yardımıyla kılcallık katsayısı hesaplanmıştır.

$$k = m^2 \quad (3.2)$$

Burada k , kılcallık katsayısı (cm^2/sn); m , uygun doğrunun eğimi ($\text{cm}/\text{sn}^{1/2}$) olmaktadır. Hesaplanan kılcallık katsayıları aşağıda verilmektedir.

Tablo 2.15. Üretilen Betonların Kılcallık Katsayıları (cm^2/sn)

Beton Serisi	28. Gün	91. Gün
Şahit	6.637×10^{-6}	2.091×10^{-6}
İ10	5.772×10^{-6}	1.944×10^{-6}
İ20	5.078×10^{-6}	2.522×10^{-6}
İ30	7.245×10^{-6}	5.468×10^{-6}
O10	6.601×10^{-6}	3.413×10^{-6}
O20	5.134×10^{-6}	3.439×10^{-6}
O30	6.972×10^{-6}	3.435×10^{-6}
K10	7.914×10^{-6}	2.321×10^{-6}
K20	8.913×10^{-6}	3.566×10^{-6}
K30	12.080×10^{-6}	6.377×10^{-6}

BÖLÜM 3.

DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE İRDELENMESİ

Uçucu kül inceliğinin yüksek dozajlı betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerine etkisinin araştırıldığı deneysel çalışmaların neticesinde elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve irdelenmesi bu bölümde sunulmaktadır.

3.1. Uçucu Kül ve Taze Beton Özellikleri

İnce uçucu kül, 22 mikron ortalama dane çapına sahiptir. Bu değer oldukça iyi bir değerdir. Orta incelikteki uçucu kül 48 mikron ortalama dane dağılımına, iri uçucu kül ise 81.7 mikron ortalama dane çapına sahiptir. Bu değer oldukça büyük bir değerdir. Uçucu küllerin düşük özgül ağırlığa sahip olmasının sebebi, boşluklu tane yapısına bağlanabilir.

TS 639'da belirtildiği şekilde yapılan puzolanik aktivite deneyi sonucu, TS 639'un öngördüğü % 70 sınırından küçük değerler elde edilmesi, uçucu küllerden kaynaklanmamaktadır. Bu testin öngördüğü su miktarı, uçucu küllü harçların kalıba homojen olarak yerleştirilmesine dahi imkan vermemektedir. Eşit kıvam için harç karışımlarının hazırlanmasının puzolanik aktivite testi için daha uygun olacağı düşünülmektedir. Bu şekilde bir aktivite testi ile bu çalışmada kullanılan uçucu küllerin daha yüksek aktivite değerleri vereceğine inanılmaktadır.

İnce uçucu külün $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamı % 74.9 iken, iri külün % 82.62'dir. MgO miktarı TS 639'un sınırlamasını aşmaktadır.

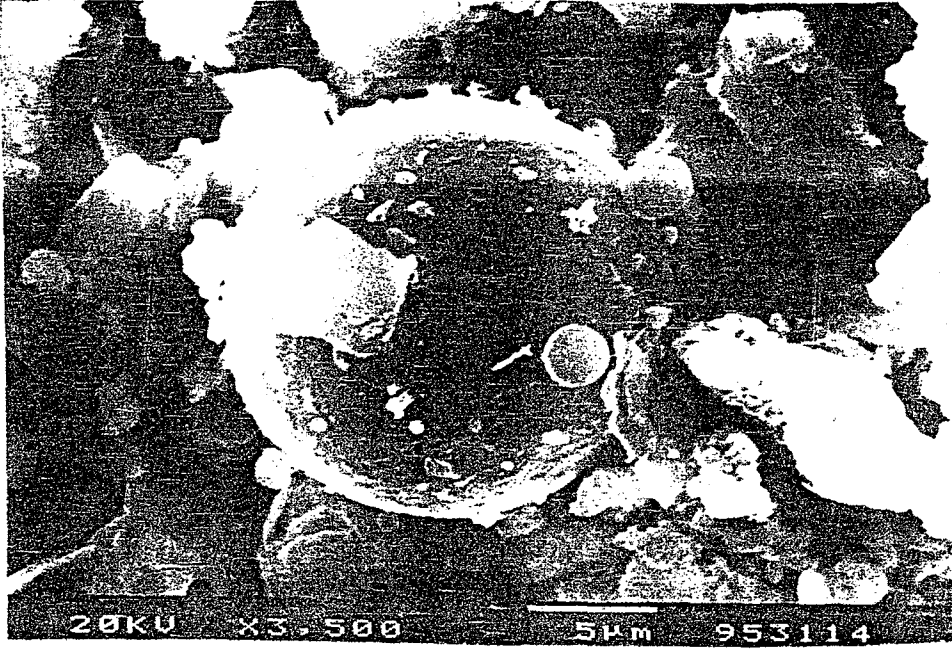
Önemli bir nokta, daha önceki çalışmalarda [3,13,14], Seyitömer Termik Santrali'ne ait uçucu küllerin CaO miktarı % 10'dan fazla belirtilmekte olmasına rağmen bu çalışmada iki defa yapılan kimyasal analiz sonucu bu değer yaklaşık % 8-9 bulunmuş olmasıdır. Bundan başka, yine aynı çalışmalarda, S+A+F toplamı % 57.4 olarak belirtilmekte olmasına rağmen, bu çalışmada yaklaşık % 75-82 civarında

bulunmuştur. Bu da göstermektedir ki, Türkiye’de uçucu küller özellikleri bakımından büyük değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenlik büyük bir olasılıkla, termik santral yükündeki değişikliklerden, teknoloji geriliği veya arızalardan kaynaklanıyor olabilir.

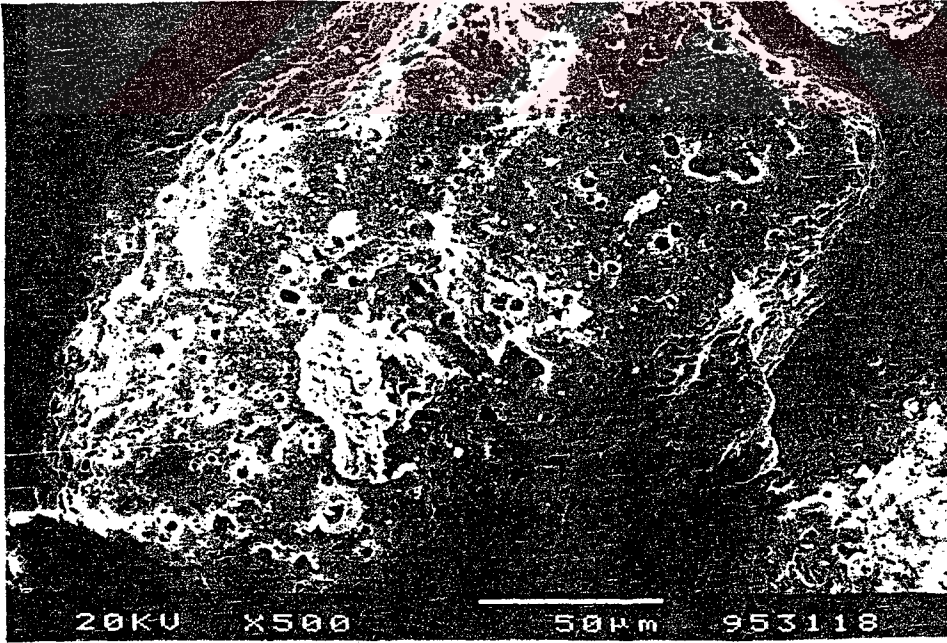
Uçucu külün betonun işlenebilirliğine etkisini Tablo 3.1.’den görmek mümkündür. Bu tabloda, eşit işlenebilirlik için kullanılan su miktarları ve şahit beton 100 kabul edilerek hesaplanan kıyaslanmış oranlar verilmiştir. Bu tablonun yardımıyla, % 10 ikame oranında farklı incelikteki küllerin su ihtiyacını, birbirlerinden az farklarla bir miktar arttırdığını; % 20 ve 30 ikame oranlarında, ince ve orta incelikteki uçucu küller su ihtiyacını birbirinden az farklarla arttırırken, kalın uçucu küllü seride bu artışın daha şiddetli olduğunu söyleyebiliriz. Bunun sebebinin uçucu kül tanelerinin yüzey bozukluğu, geometri kötülüğü (küresellikten sapma) ve boşlukluluk olduğu düşünülmektedir. Nitekim, bu çalışmada kullanılan uçucu küllere ait taramalı elektron mikroskobu fotoğraflarında bu görülmektedir [34]. Bu fotoğraflarda, ince uçucu kül küresel forma sahip iken, iri uçucu külün küresellikten uzaklaşıp şekilsiz bir hal almakta olduğu; poroz, süngerimsi bir yapıya dönüştüğü gözlenebilmektedir. Eşit çökme için daha fazla su ihtiyacının ortaya çıkması yukarıdaki sebeplere bağlanabilir. Bundan başka, ince uçucu küllerin diğer inceliklere göre daha küresel olduğundan, yağlayıcı etki nedeniyle eşit işlenebilirlik için su ihtiyacı daha az artmaktadır (Bkz. Tablo 3.1.).

Tablo 3.1. Üretilen Betonların Eşit İşlenebilirlik İçin Su İhtiyacı ve Şahit Betona Kıyasla Su İhtiyacı Değişimi (%)

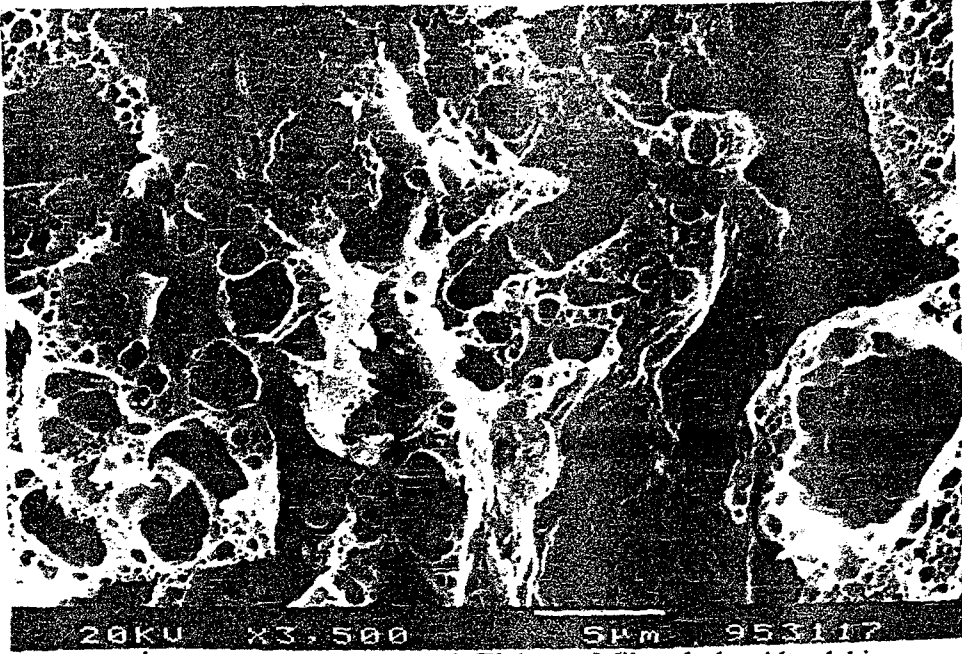
Beton Serisi	Su İhtiyacı (kg)	Kıyaslanmış Su İhtiyacı (%)
Şahit	228	100
İ10	235	103.07
İ20	241	105.70
İ30	250	109.65
O10	239	104.82
O20	243	106.58
O30	251	110.09
K10	240	105.26
K20	252	110.53
K30	262	114.91



Şekil 3.1. İnce Uçucu Külün Taramalı Elektron Mikroskobu Altındaki Görünüşü [34]



Şekil 3.2. İri Uçucu Külün Taramalı Elektron Mikroskobu Altındaki Görünüşü [34].



Şekil 3.3. İri Uçucu Külün Taramalı Elektron Mikroskobu Altındaki Başka Bir Görünüşü [34].

3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

3.2.1. Basınç Dayanımı

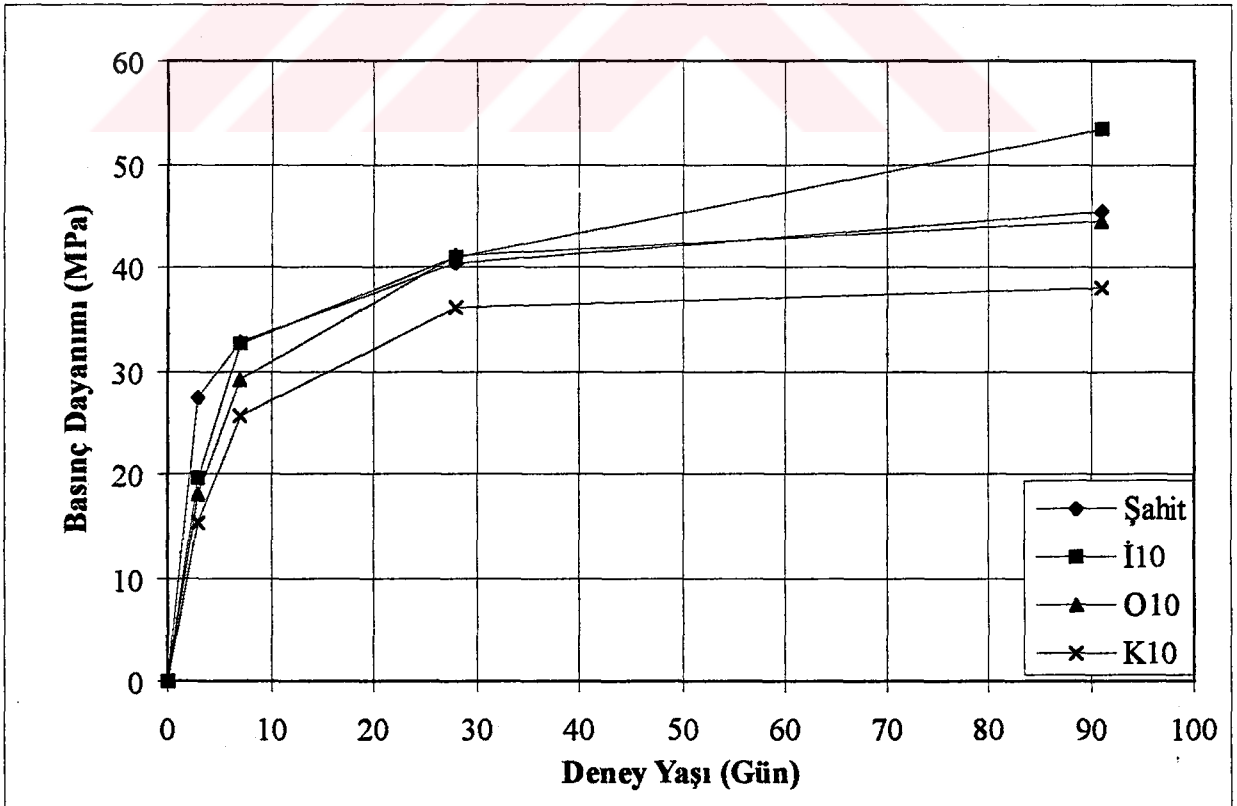
Her yaşta şahit beton dayanımı 100 kabul edilerek diğer serilerin dayanımı şahitle yüzde olarak kıyaslanmıştır; bu verilerden yararlanarak da beton performanslarının zaman, uçucu kül inceliği ve ikame oranı ile değişimi değerlendirilmiştir.

Tablo 3.2. Musluk Suyu ve Deniz Suyunda Bekletilen Betonların Şahit Betona Kıyasla Basınç Dayanımları (%)

Bekleme Ortamı	Muskuk Suyu				Deniz Suyu	
Yaş (Gün) →	3	7	28	91	28	91
Grubu ↓						
Şahit	100	100	100	100	100	100
İ10	71.61	99.48	101.01	117.60	105.36	97.94
O10	65.84	88.70	101.56	97.90	95.14	96.12
K10	56.23	78.40	89.42	83.75	92.90	84.72
İ20	50.57	67.80	89.92	93.78	82.87	78.55
O20	55.79	77.97	79.94	82.38	83.26	78.61
K20	54.80	64.71	84.06	82.71	79.62	75.44
İ30	42.53	59.15	79.47	83.39	74.77	77.13
O30	46.44	63.34	77.96	76.75	75.80	75.16
K30	39.39	54.14	65.85	67.38	58.79	57.93

Üç Farklı İncelikteki Uçucu Külün % 10 İkame Oranında Beton Basınç Dayanımına Olan Etkisinin Zamanla Değişimi

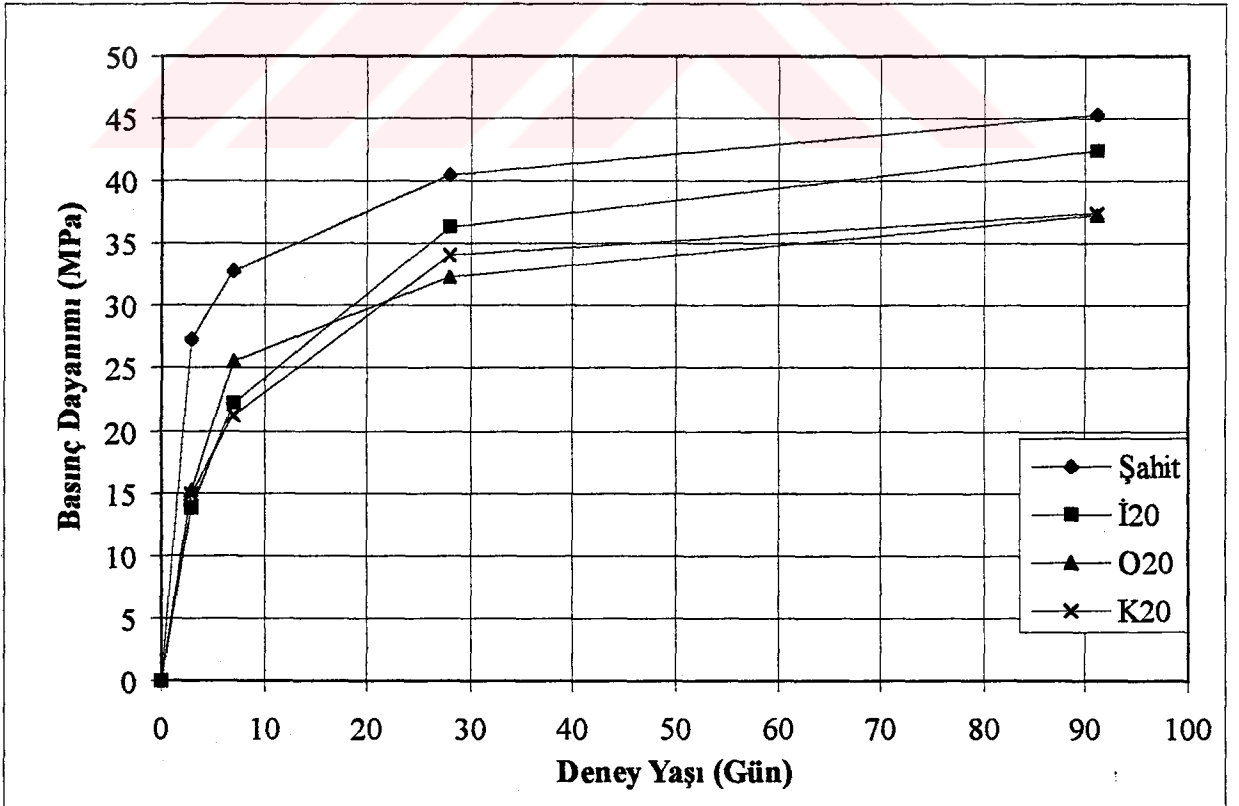
3. günde ince, orta ve kalın uçucu küllü betonlar, şahit betonun sırasıyla % 28.39, 34.16 ve 43.77 altında kalmaktadır. 7. günde ise ince uçucu küllü beton şahit beton performansını yakalamakta; orta ve kalın uçucu küllü betonlar, şahit betonun sırasıyla % 11.3 ve 21.6 altında değerler almaktadır. 28 günde, ince ve orta küllü beton, şahit beton dayanımını küçük bir miktar geçmektedir. 91 günde ise ince uçucu küllü beton şahit betonun basınç dayanımını % 17.6 aşmakta, orta incelikteki uçucu küllü beton az bir miktar altında kalırken, kalın uçucu küllü beton % 16.25 düşük bir dayanım göstermektedir. 3. günden başlayarak incelik etkisini göstermekte, uçucu kül inceleştikçe performansı iyileşmektedir. İnce uçucu külde puzolanik aktivite etkisini 28. günden sonra göstererek, beton dayanımına önemli katkı sağlamaktadır. Tüm serilerde, dayanım artışı daha çok 28. güne kadar olmakta, 28. günden sonra azalmaktadır. Fakat, ince uçucu kül içeren beton % 10 ikame oranında, 28. günden sonra şahitten çok daha hızlı dayanım artışı göstermektedir. Bu ikame oranında, uçucu küller kalınlaştıkça dayanım artış hızı da düşmektedir. Orta ve kalın küllü betonlar, 28. günden sonra şahitin de altında dayanım artışı göstermektedir (Bkz. Şekil 3.4.)



Şekil 3.4. % 10 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Basınç Dayanımlarının Zamanla Değişimi

Üç Farklı İncelikteki Uçucu Külün % 20 İkame Oranında Beton Basınç Dayanımına Olan Etkisinin Zamanla Değişimi

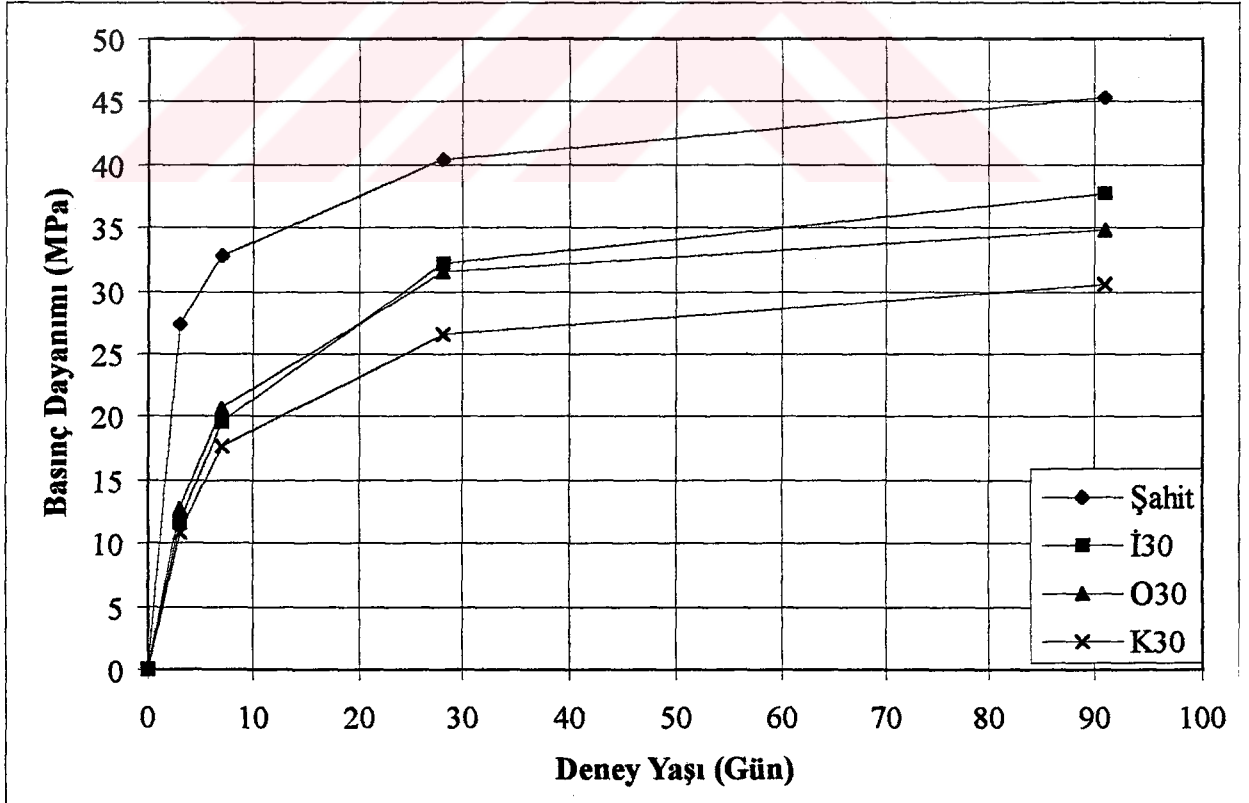
% 20 ikame oranında, 3. günde incelik dolayısıyla bir farklılık ortaya çıkmamakta, şahit betonun % 51-56'sı mertebesinde basınç dayanımları elde edilmektedir. 7. günde, orta incelikte uçucu kül içeren beton, ince ve kalın uçucu küllü betonun bir miktar üzerine çıkmaktadır. Bu yaşta, incelik sırasına göre, şahit betona kıyasla, % 67.80, % 77.97 ve % 64.71'lik basınç dayanımları elde edilmiştir. 28. günde, basınç dayanımları, şahit betona göre ve incelik sırasına göre, % 89.92, % 79.94 ve % 84.06 mertebesinde dir. 91. günde ise, şahit betona kıyasla ve incelik sırasına göre % 93.78, % 82.38 ve % 82.71 mertebesinde değerler elde edilmiştir. % 20 ikame oranında, tüm uçucu küllü seriler, şahit betonun altında değerler vermiştir. Zamanla, uçucu küllü seriler şahit betona yaklaşmaktadır. Bu ikame oranında, ince uçucu kül öne çıkmakta, kalın ve orta uçucu küllü seriler birbirlerine yakın değerler vermektedir (Bkz. Şekil 3.5).



Şekil 3.5. % 20 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Basınç Dayanımlarının Zamanla Değişimi

Üç Farklı İncelikteki Uçucu Külün % 30 İkame Oranında Beton Basınç Dayanımına Olan Etkisinin Zamanla Değişimi

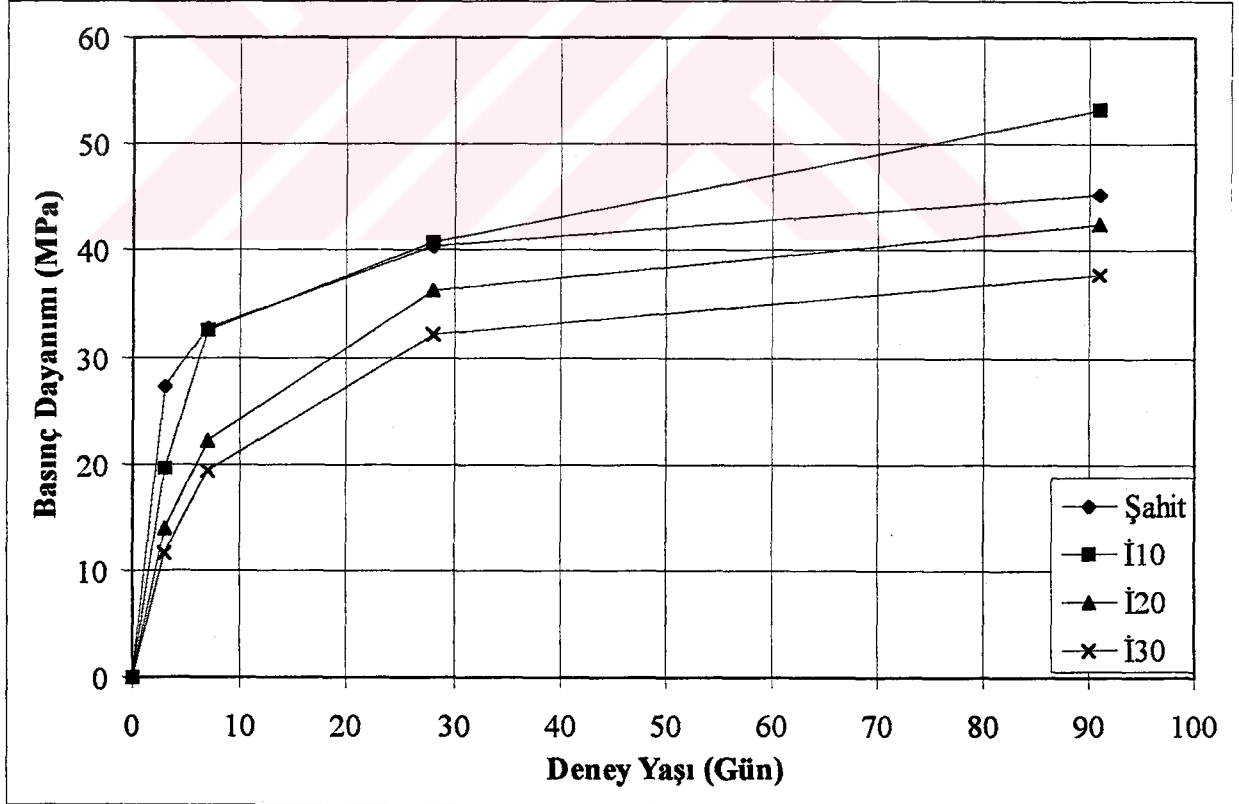
28 güne kadar, ince ve orta incelikte uçucu kül içeren betonlarda, fazla bir farklılık görülmemekte; fakat bu iki incelikteki betonlar ile kalın uçucu kül içeren beton arasında tüm yaşlarda bir miktar fark görülmektedir. 91 günde ise, farklı inceliklerde uçucu kül içeren betonlar arasında yine bir farklılık vardır. 3. günde şahit betonun dayanımına kıyasla, incelik sırasına göre % 42.53, % 46.44 ve % 39.39; 7. günde % 59.15, % 63.14 ve % 54.14; 28. günde % 79.47, % 77.96 ve % 65.85; 91. günde ise % 83.39, % 76.75 ve % 67.38 değerleri elde edilmiştir. Uçucu kül içeren serilerde % 30 ikame oranında, 28. günden sonra ince uçucu küllü seri şahit betondan daha hızlı dayanım artışı göstermektedir. Orta ve kalın uçucu küllü betonlar ise 28 günden sonra şahit betondan daha yavaş dayanım artışı göstermektedir (Bkz. Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. % 30 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Basınç Dayanımlarının Zamanla Değişimi

İnce Uçucu Kül İçeren Betonların Basınç Dayanımlarının İkame Oranı İle Değişimi

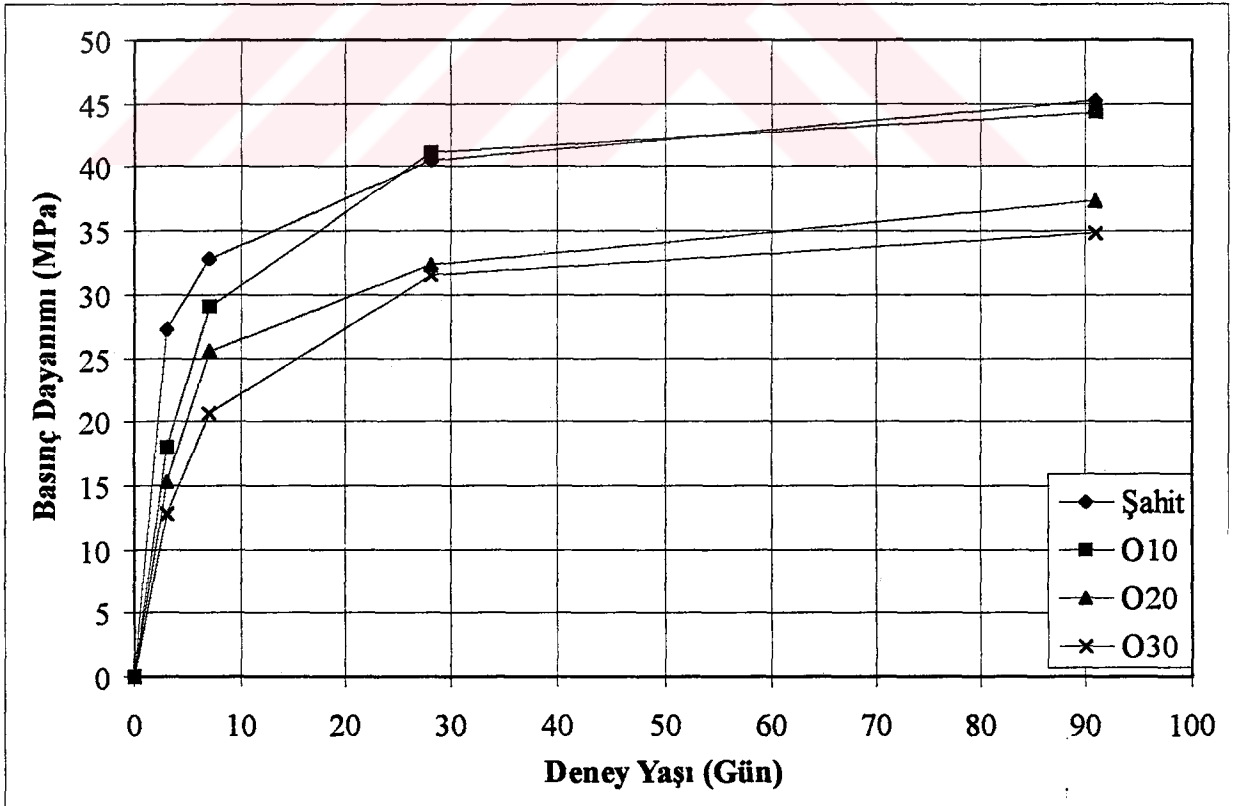
Ağırlıkça % 10 ikame oranına sahip beton daha 7. günde şahit beton dayanımını yakalamış, 28 ve 91. günde ise aşmıştır. % 20 ve % 30 ikame oranlarında ise basınç dayanımı her yaşta şahit betonun altında kalmaktadır. 7. günden sonra, ince uçucu küllü seriler, şahite göre daha hızlı dayanım artışı göstermektedir. Fakat, ikame oranının artmasıyla dayanım artış hızı azalmaktadır. % 10 ikame oranında ince uçucu küllü beton, 28 günden sonra, şahit betona göre çok hızlı dayanım artışı göstermektedir. Bu betonun, 91 günün ötesinde, puzolanik etki ile şahit betonla arasındaki farkı daha da açması beklenebilir. Aynı şekilde, % 20 ve % 30 ikame oranlarında ince uçucu kül içeren betonların, şahit betonla aralarındaki farkı kapatması beklenebilir (Bkz. Şekil 3.7.).



Şekil 3.7. İnce Uçucu Kül İçeren Betonların Basınç Dayanımlarının Zamanla Değişimi

Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Betonların Basınç Dayanımlarının İkame Oranı İle Değişimi

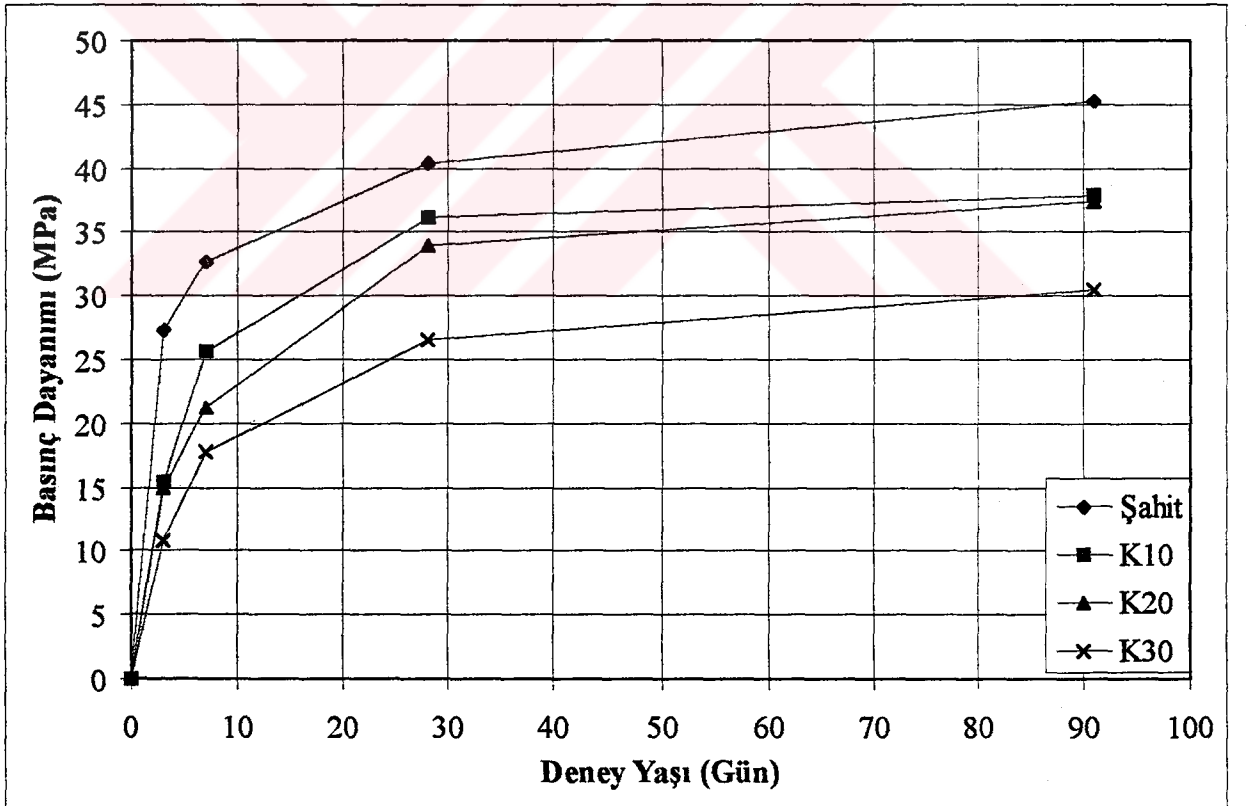
Orta incelikte uçucu kül içeren betonlarda, 3. günde artan ikame oranını ile sırasıyla şahit beton dayanımının % 65.84, % 55.79 ve % 46.44'üne; 7. günde % 88.70, % 77.97 ve % 63.34'üne; 28. günde % 101.56, % 79.94 ve % 77.96'sına; 91. günde ise % 97.90, % 82.38 ve % 76.75'ine ulaşmıştır. Görüldüğü gibi % 10 ikame oranında 28 ve 91. günlerde şahit beton dayanımına ulaşmıştır. 3. günden başlayarak, ikame oranının artmasıyla, uçucu küllü betonların performansları birbirlerine göre düşmektedir. 28 güne kadar uçucu küllü betonlar, şahit betona göre daha iyi artış hızları göstermektedir. Fakat, 28 günden sonra, % 20 ikame oranı hariç, orta incelikte uçucu küllü betonlar, şahit betonun altında dayanım artışı göstermektedir. Orta incelikte, puzolanik aktivitenin, şahit betonu yakalayacak miktarda olmadığı söylenebilir (Bkz. Şekil 3.8.).



Şekil 3.8. Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Betonların Basınç Dayanımlarının Zamanla Değişimi

Kalın Uçucu Kül İçeren Betonların Basınç Dayanımlarının İkame Oranı İle Değişimi

Bu incelekte tüm yaşlarda şahit betonun altında basınç dayanımları elde edilmiştir. % 10 ve 20 ikame oranındaki betonlar, zamanla birbirine daha da yaklaşan değerler sergilemektedir. % 30 ikame oranındaki beton düşük değerlerde kalmaktadır. 7. günden 28. güne kadar, şahite göre daha hızlı artış olmakta, 28.günden 91. güne kadar, şahit betondan daha yavaş dayanım artışı olmaktadır. 28. günden sonra kalın uçucu kül içeren seriler ile şahit beton arasındaki fark artmaktadır. İkame oranının artmasıyla, kalın uçucu kül içeren seriler arasındaki dayanım artış hızı artmaktadır (Bkz. Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. Kalın Uçucu Kül İçeren Betonların Basınç Dayanımlarının Zamanla Değişimi

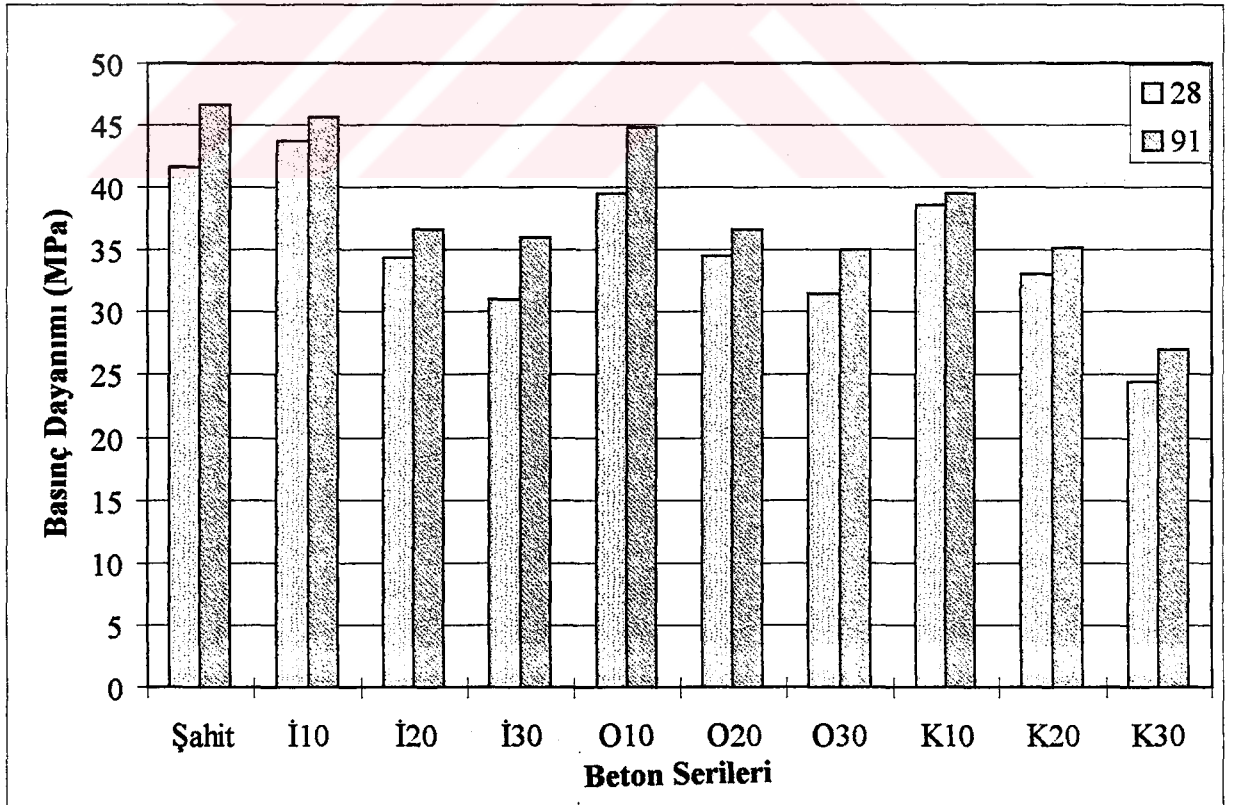
Deniz Suyunda Bekletilmiş Betonların Basınç Dayanımları

20±2 °C sıcaklığa sahip klima odasında varil içine doldurulmuş deniz suyunda ardışık haftalarda bekletilen betonların içinde, ince uçucu küllü, % 10 ikame oranına sahip beton, 28. günde şahit betonu geçmekte, 91. günde yaklaşık değer vermektedir. % 20 ve 30 ikame oranlarında ise 28 ve 91 günde şahit betona göre düşük sonuçlar elde edilmektedir.

Orta kalınlıktaki uçucu küllü betonlarda, tüm ikame oranlarında, % 10 ikame oranında tüm yaşlarda şahit betona yakın değerler elde edilmiştir. % 20 ve 30 ikame oranlarında ise düşük değerlere ulaşılmıştır.

Kalın uçucu küllü betonlarda, tüm ikame oranlarında ve iki yaşta da şahit betona göre kötü bir performans ortaya çıkmıştır.

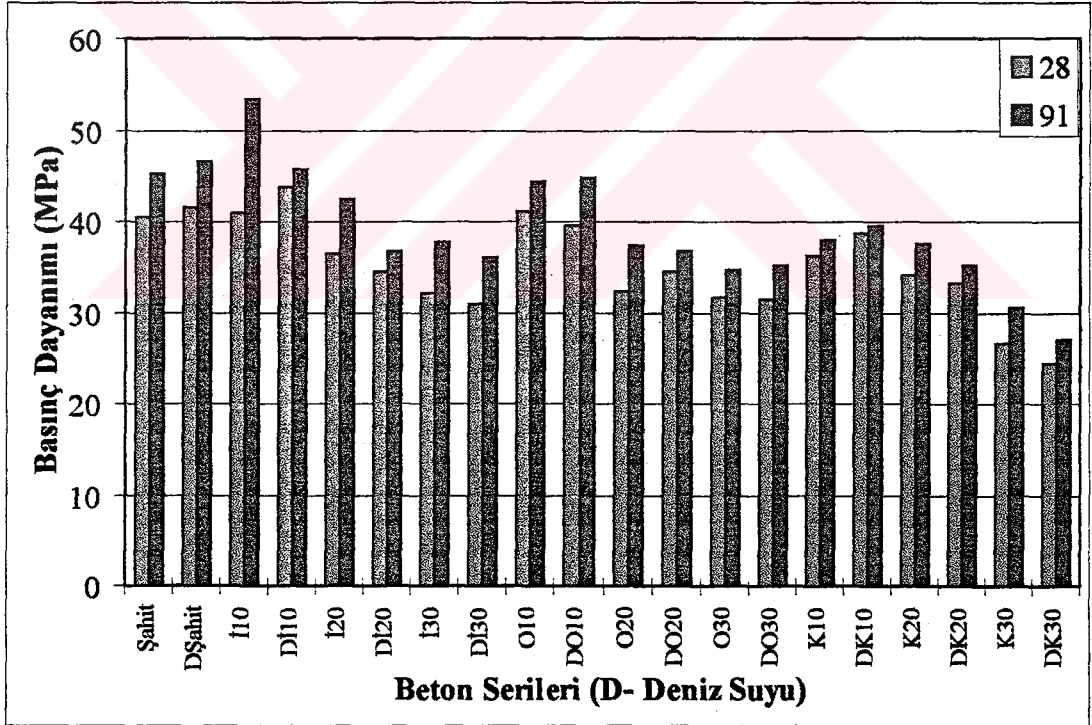
Farklı inceliklerde ise % 10 ve 20 ikame oranlarında, 28 günde fazla bir farklılık ortaya çıkmamakta, 91 günde ise kalın uçucu küllü seri bir miktar düşük kalmaktadır. % 30 ikame oranında ise kalın uçucu küllü seri diğer iki uçucu kül inceliğine göre düşük kalmaktadır (Bkz. Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. Deniz Suyunda Islanma - Kuruma Çevrimine Maruz Bırakılmış Betonların Basınç Dayanımlarının Zamanla Değişimi

Musluk ve Deniz Suyunda Bekletilen Betonların Basınç Dayanımları

Şahit beton deniz suyunda, musluk suyuna göre iyileşen değer vermiştir. İ10 betonu, 28 günde şahit betona göre iyi sonuç vermesine rağmen, 91 günde şahit betonun altında dayanım vermiştir. O10 betonu da, 91 günde, deniz suyunda musluk suyuna göre daha iyi, fakat şahit betonun biraz altında bir dayanım göstermiştir. Diğer uçucu kül içeren betonlar, deniz suyunda, musluk suyuna göre azalan bir performans ortaya koymaktadır. İnce ve orta incelikte uçucu kül içeren betonlar, deniz suyunda birbirlerine yakın dayanım değerleri vermektedir. İkame oranının artmasıyla, deniz ortamında performans düşmektedir. Deniz suyunda 28 günden sonraki dayanım artışı, musluk suyundakine kıyasla, uçucu küllü betonlarda şahit betona göre daha azdır (Bkz. Şekil 3.11.).



Şekil 3.11. Musluk Suyunda Kür Gören ve Deniz Suyunda Islanma-Kuruma Çevrimine Tabi Tutulan Betonların Basınç Dayanımları

3.2.2. Eğilme Dayanımı

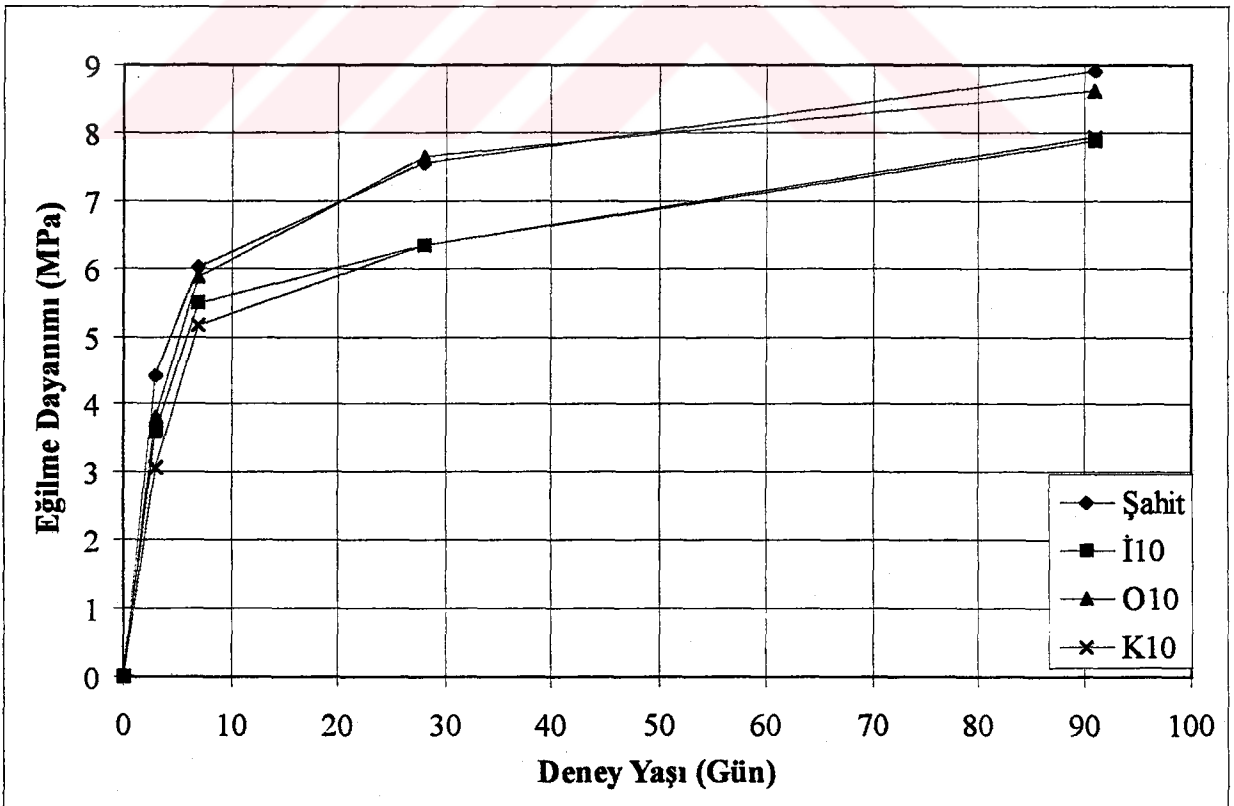
Her yaşta şahit beton dayanımı 100 kabul edilerek diğer serilerin dayanımı şahitle yüzde olarak kıyaslanmıştır; bu verilerden yararlanarak da beton performanslarının zaman, uçucu kül inceliği ve ikame oranı ile değişimi değerlendirilmiştir.

Tablo 3.3. Musluk ve Deniz Suyunda Bekletilen Betonların Şahit Betona Kıyasla Eğilme Dayanımları (%)

Bekleme Ortamı	Mosluk Suyu				Deniz Suyu	
Yaş (Gün) → Grubu ↓	3	7	28	91	28	91
Şahit	100	100	100	100	100	100
İ10	80.92	91.22	83.72	88.24	91.85	95.91
O10	85.54	97.43	100.96	96.81	85.16	102.01
K10	69.21	85.95	84.01	89.12	99.63	98.14
İ20	57.91	75.67	90.27	88.99	75.00	89.32
O20	73.11	84.74	103.91	94.80	86.85	83.80
K20	81.89	77.50	72.58	78.97	75.27	86.09
İ30	58.15	66.59	92.27	85.74	78.07	90.04
O30	61.31	75.29	95.06	87.42	83.53	67.31
K30	55.52	60.11	70.01	88.12	65.93	70.26

Üç Farklı İncelikteki Uçucu Külün % 10 İkame Oranında Beton Eğilme Dayanımına Olan Etkisinin Zamanla Değişimi

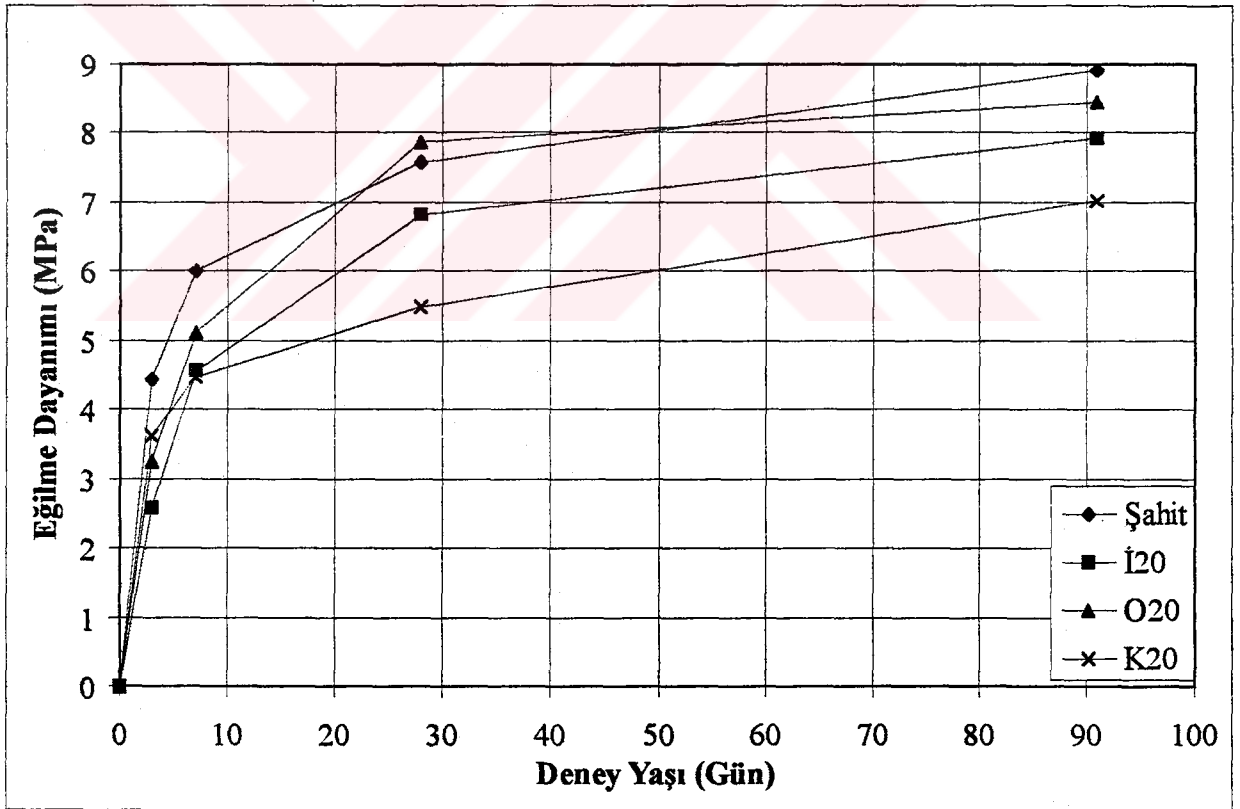
3. günde ince ve orta incelikte uçucu kül içeren seri birbirlerine yakın, fakat şahit betonun, sırasıyla % 80.92 ve % 85.54'ü kadar dayanım vermişken, kalın uçucu küllü beton % 69.21'lik dayanım vermiştir. 7. günde, şahite yaklaşılmıştır. İncelik sırasına göre, şahit beton dayanımına kıyasla, % 91.22, % 97.43 ve % 85.93'kül dayanımlar elde edilmiştir. 7. günde orta incelikte uçucu kül içeren serinin, şahit beton performansına yaklaştığı görülmektedir. 28. günde ise, ince ve kalın uçucu küllü seriler, şahit betonun yaklaşık % 16 altında kalırken, orta incelikte uçucu kül içeren seri şahit betonu geçmiştir. 91. günde ise yine ince ve kalın uçucu küllü seriler yaklaşık % 12 oranında şahit betonun altında dayanım göstermektedirler. Orta incelikte uçucu küllü seri, 7. günden itibaren şahite yakın değer vermiştir. % 10 ikame oranında, uçucu küllü seriler 28. günden sonra şahit ile aradaki farkı kapatmaktadır. Bu ikame oranında orta incelikte uçucu kül içeren seri öne çıkmaktadır (Bkz. Şekil 3.12.).



Şekil 3.12. % 10 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Eğilme Dayanımlarının Zamanla Değişimi

Üç Farklı İncelikteki Uçucu Külün % 20 İkame Oranında Beton Eğilme Dayanımına Olan Etkisinin Zamanla Değişimi

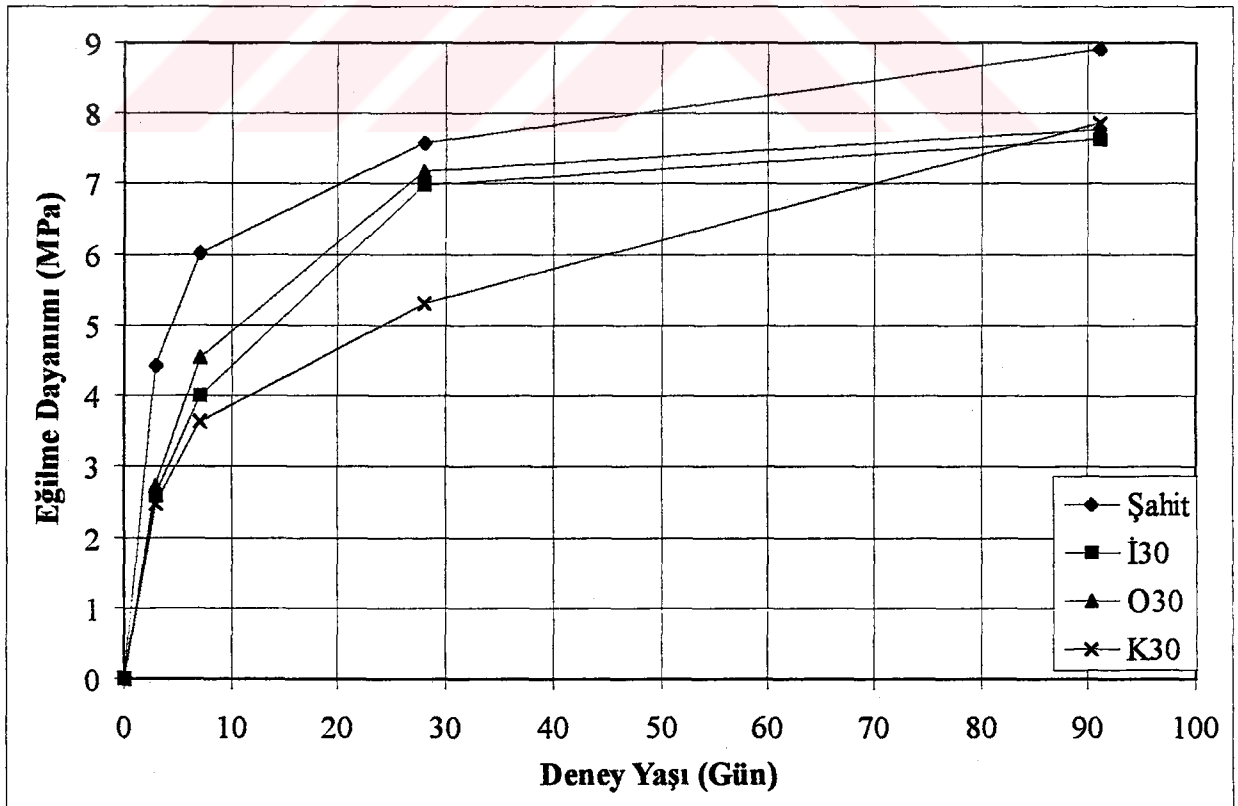
Bu ikame oranında, 3. günde anlamsız sonuçlar çıkmaktadır. 7 ve 28. günde orta incelikte uçucu kül içeren beton, diğer inceliklere göre en iyi performansı sergilemektedir. 28. günden itibaren, incelik etkisini göstermekte, orta incelikte uçucu kül içeren beton şahite göre daha iyi bir performans sergilemektedir. 91. günde ise, orta incelikte uçucu kül içeren şahite göre % 94.80, ince uçucu küllü seri % 88.99 ve kalın uçucu küllü seri de % 78.97'lik dayanım göstermektedir. Bu ikame oranında, 28. günden sonra, uçucu küllü seriler, kalın uçucu küllü seri hariç, şahit betonun altında dayanım artışı göstermektedir (Bkz. Şekil 3.13.).



Şekil 3.13. % 20 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Eğilme Dayanımlarının Zamanla Değişimi

Üç Farklı İncelikteki Uçucu Külün % 30 İkame Oranında Beton Eğilme Dayanımına Olan Etkisinin Zamanla Değişimi

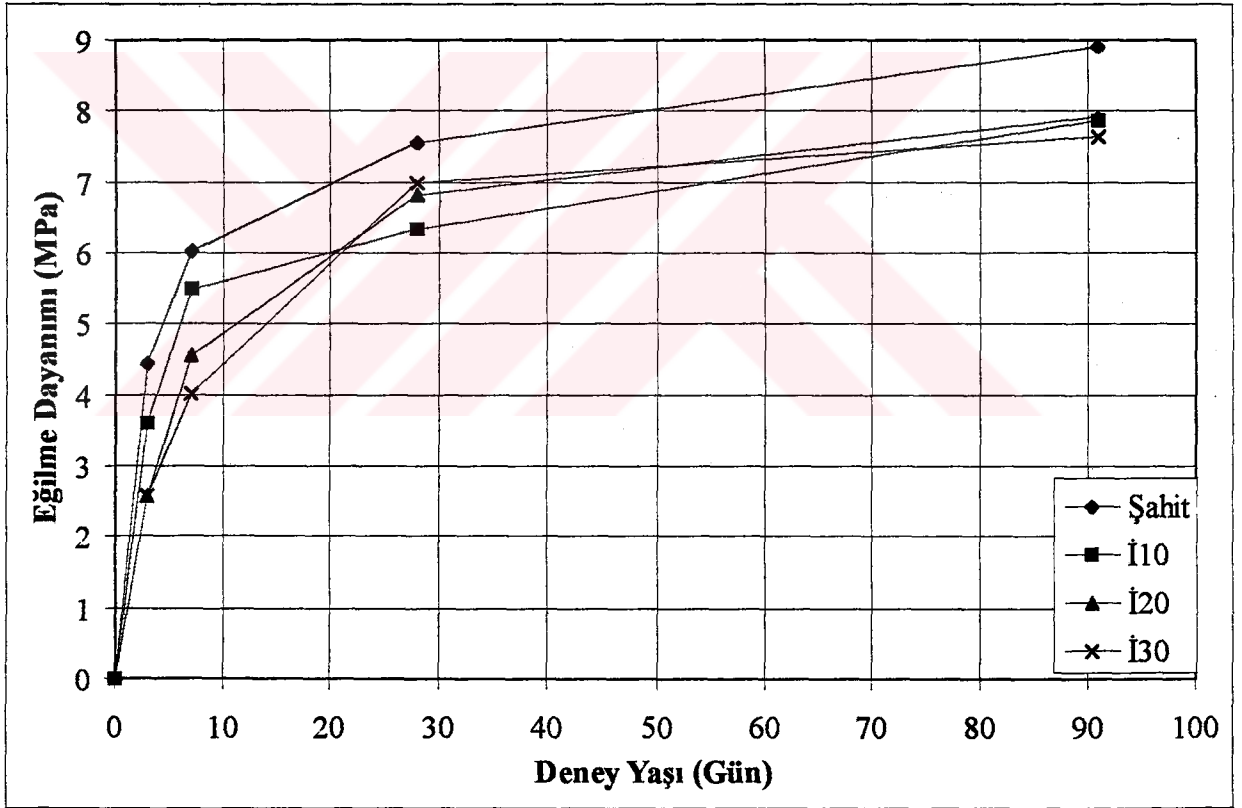
3 ve 7. günde farklı inceliklerde uçucu kül ilavesi yapılan betonlar arasında önemli farklılıklar görülmemektedir. 3. günde şahite kıyasla, incelik sırasına göre % 58.15, % 61.31 ve % 55.52; 7. günde % 66.59, % 75.29, % 60.11'lik dayanımlar elde edilmiştir. 28. günde ince ve orta incelikte uçucu kül içeren seriler birbirine yakın değerler verirken kalın uçucu küllü seri düşük değerler vermektedir. Bu değerler sırasıyla, % 92.27, % 95.06 ve % 70.01 şeklindedir. 91 günde ise, şahit betona kıyasla, incelik sırasına göre, % 85.74, % 87.74 ve % 88.12'lik eğilme dayanımları elde edilmiştir. Uçucu kül içeren seriler, 7 ile 28 gün arasında, şahit betona göre daha hızlı dayanım artışı göstermektedir. 28 ile 91 gün arasında en hızlı dayanım artışını kalın uçucu küllü beton göstermektedir. Eğilme dayanımı açısından, bu ikame oranında, 91 günde incelikten kaynaklanan bir farklılık görülmemektedir. (Bkz. Şekil 3.14.).



Şekil 3.14. % 30 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Eğilme Dayanımlarının Zamanla Değişimi

İnce Uçucu Kül İçeren Betonların Eğilme Dayanımlarının İkame Oranı İle Değişimi

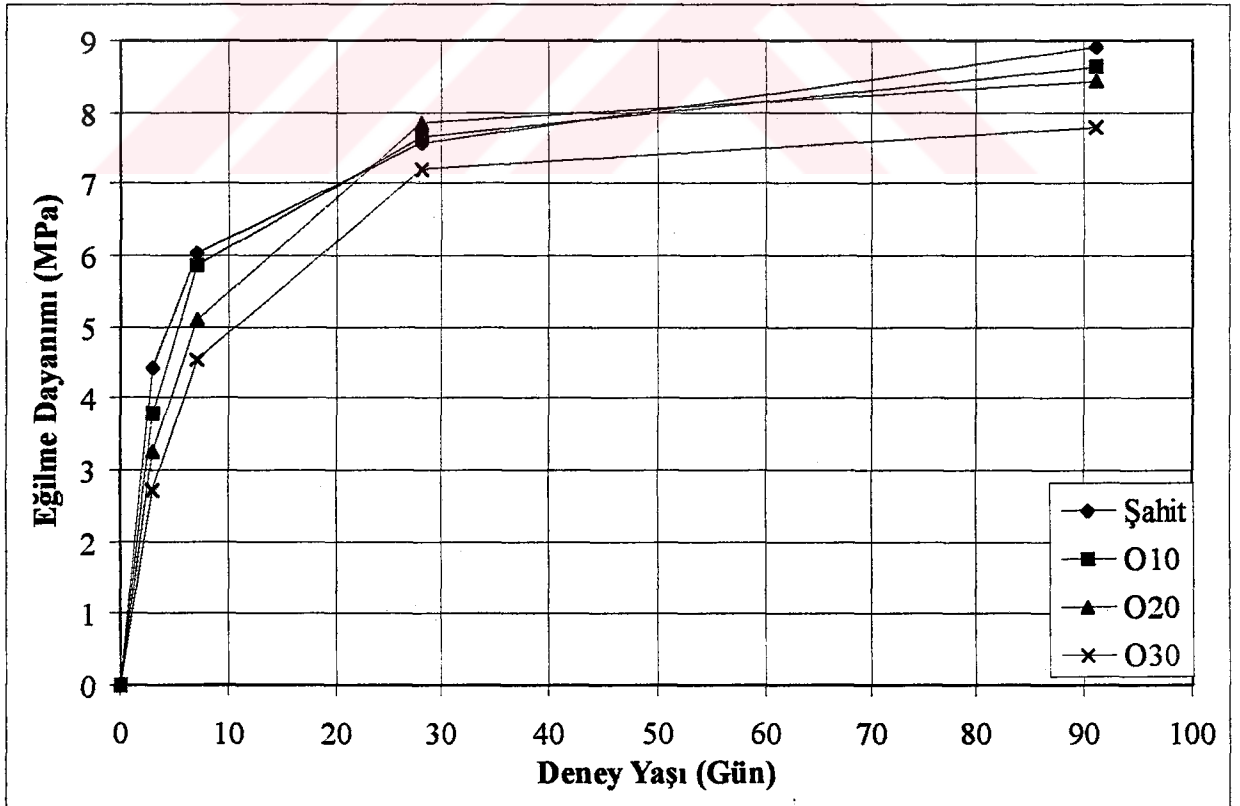
İnce uçucu kül içeren serilerde, % 10 ikame oranında tüm yaşlarda, şahit betona göre % 9-20 düşük sonuçlar elde edilmiştir. % 20 ikame oranında, % 9-42, % 30 ikame oranında ise, % 8-42 düşük sonuçlara varılmıştır. 28. günden sonra ikame oranının etkisi fazla görülememektedir. 28. günden sonra, ince uçucu kül içeren betonlar, şahit betona göre daha yavaş dayanım artışı göstermektedir (Bkz. Şekil 3.15.)



Şekil 3.15. İnce Uçucu Kül İçeren Betonların Eğilme Dayanımlarının Zamanla Değişimi

Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Betonların Eğilme Dayanımlarının İkame Oranı İle Değişimi

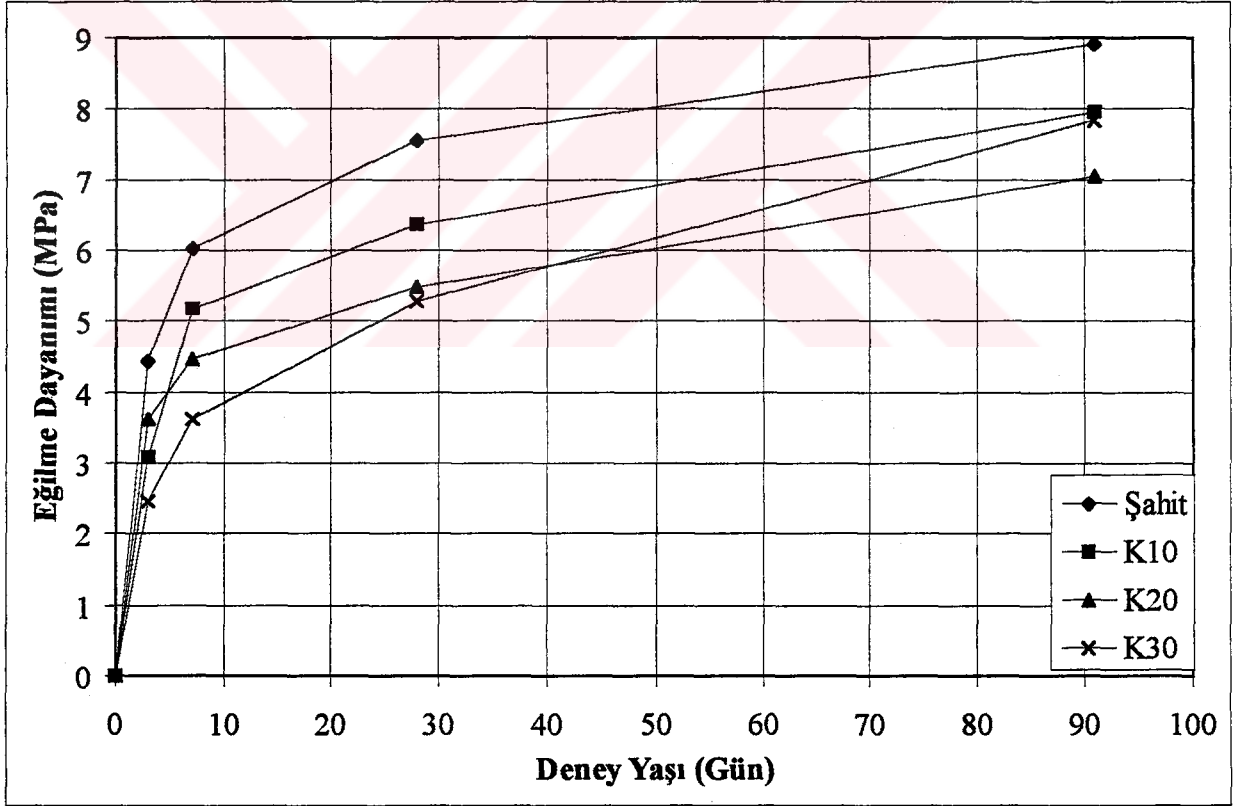
Orta incelikte uçucu kül içeren betonlarda % 10 ikame oranında, 7. günden başlayarak şahit betonun performansına ulaşmaktadır. % 20 ikame oranında ise 28. günde şahit betonun performansının üzerine çıkılmakta, 91. günde yaklaşık değer elde edilmektedir. % 30 ikame oranında, 28 günde şahit betonun dayanımına ulaşmakta ise de diğer yaşlarda düşük değerler elde edilmiştir. 28. günden itibaren % 10 ve % 20 ikame oranındaki seriler şahit betona yaklaşık değerler vermekte, % 30 ikame oranına sahip seri düşük değerde kalmaktadır. Uçucu küllü seriler, 7 ile 28 gün arasında şahite göre daha hızlı artış gösterirken, bu durum 28 ile 91 gün arasında değişmektedir. Orta incelikte uçucu kül içeren serilerde, özellikle % 10 ve 20 ikame oranında şahite yakın değerlere ulaşılmıştır (Bkz. Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Betonların Eğilme Dayanımlarının Zamanla Değişimi

Kalın Uçucu Kül İçeren Betonların Eğilme Dayanımlarının İkame Oranı İle Değişimi

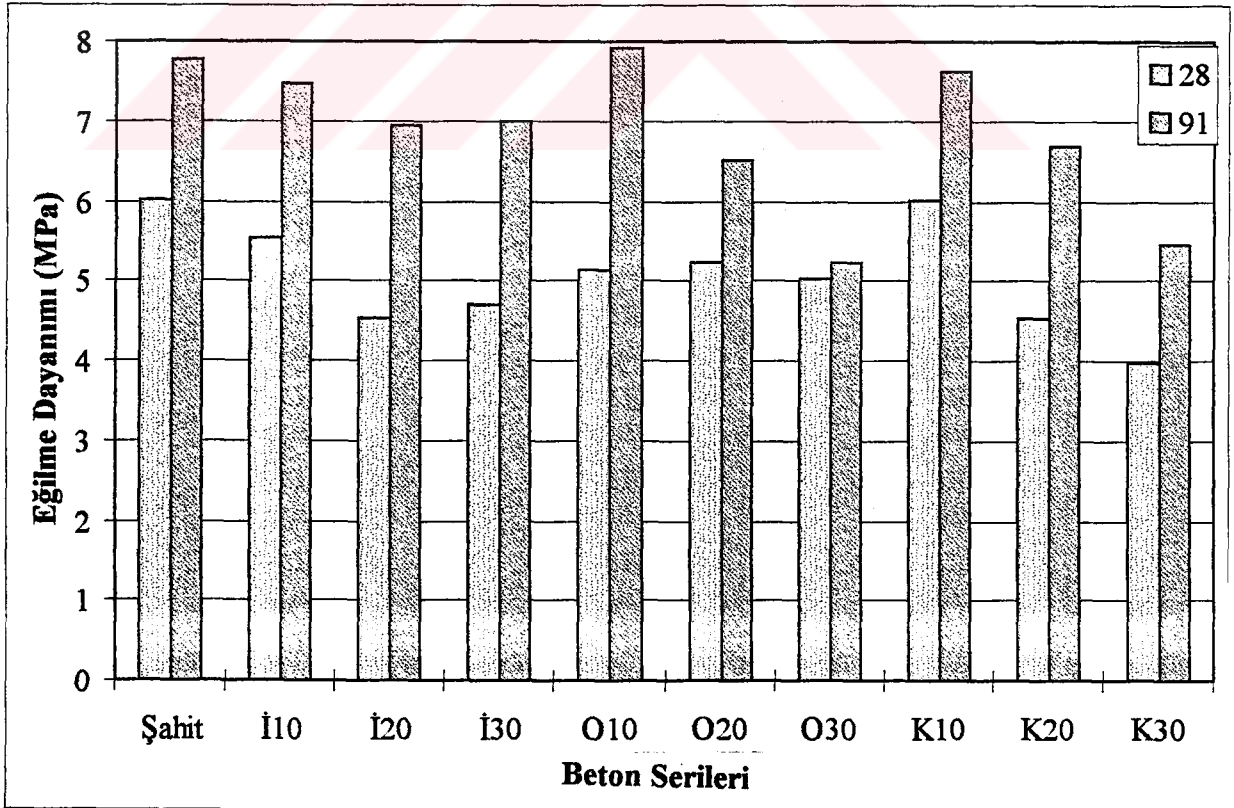
Kalın uçucu küllü serilerde, tüm yaşlarda % 10 ve 20 ikame oranlarında şahit betonun % 12-16'sı kadar altında, birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Kalın uçucu küllü seri ise tüm yaşlarda, şahit betona göre % 19-23 düşük eğilme dayanımları vermiştir. 7 ile 28 gün arasında, uçucu küllü seriler, şahit betondan daha düşük dayanım artışı gösterirken, 28 ile 91 gün arasında, uçucu kül içeren seriler şahit betondan daha hızlı dayanım artışı göstermektedir. (Bkz. Şekil 3.17.).



Şekil 3.17. Kalın Uçucu Kül İçeren Betonların Eğilme Dayanımlarının Zamanla Değişimi

Deniz Suyunda Bekletilmiş Betonların Eğilme Dayanımları

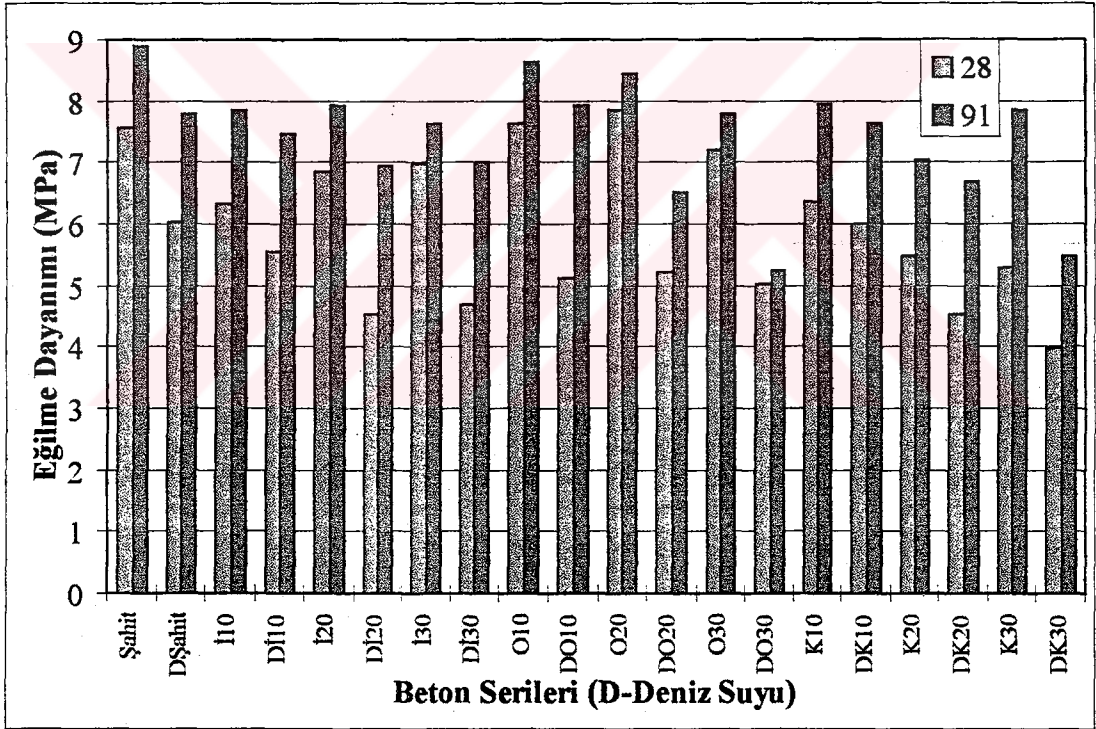
İnce uçucu kül içeren betonlarda, % 10 ikame oranında, 28 günde, şahit betonun % 9 altında değer elde edilmiş olmasına rağmen, 91 günde şahit betona yakın değer elde edilmiştir. % 20 ve 30 ikame oranlarında ise, 28 ve 91 günde şahit betonun altında değerler elde edilmiştir. Orta kalınlıktaki uçucu küllü serilerde, % 10 ikame yapılmış seride, 28 günde düşük sonuç çıkmasına rağmen, 91 günde şahit betonun performansı aşılmaktadır. % 20 ve 30 ikame oranlarında ise, 28 ve 91 günde, şahit betonun altında sonuçlar elde edilmektedir. Kalın uçucu kül içeren serilerde, % 10 ikame oranında, 28 ve 91 günde yaklaşık değerler elde edilmektedir. % 20 ve 30 ikame oranlarında yetersiz sonuçlar elde edilmiştir. Farklı incelikler arasında % 10 ikame oranında, farklı incelikler arasında çok büyük farklılıklar ortaya çıkmamıştır. 28 günde, kalın uçucu küllü seri şahiti yakalarken, 91 günde orta incelikte uçucu kül içeren seri şahit performansına ulaşmakta, diğer iki seride ise şahite yakın sonuçlar elde edilmektedir. % 20 ikame oranında, 28 günde, orta incelikteki uçucu küllü seri, şahitin % 86.85'i, ince ve kalın uçucu küllü seriler ise sırasıyla yaklaşık % 75'i dayanım göstermiştir. 91 günde ise tüm inceliklerde % 84-90 aralığında birbirine yakın sonuçlar bulunmuştur. % 30 ikame oranında 28 günde, ince ve orta küllü betonların şahite yakın sonuç verirken, 91 günde ise ince uçucu küllü seri diğer uçucu küllü serileri geçmekte, orta ve kalın arasında ise az fark kalmaktadır. (Bkz., Şekil 3.18)



Şekil 3.18. Deniz Suyunda Islanma - Kuruma Çevrimine Maruz Bırakılmış Betonların Eğilme Dayanımlarının Zamanla Değişimi

Musluk ve Deniz Suyunda Bekletilen Betonların Eğilme Dayanımları

28 günde, deniz suyunda şahite en yakın değeri, K10 betonu vermiştir. Aynı beton 91 günde ise deniz suyunda şahit beton dayanımını geçmiştir. Tüm betonlarda, 28 güne kadar, deniz suyunda, musluk suyuna göre düşüş fazla iken, bu yaştan sonra düşüş azalmaktadır. Zamanla, deniz suyu etkisiyle oluşan, eğilme dayanımı azalması düşmektedir. Musluk suyunda 28 ve 91 günde, O10 ve O20 betonu öne çıkarken, deniz suyunda 28 günde K10 ve İ10, 91 günde ise O10, K10 ve İ10 öne çıkmaktadır. Genelde, eğilme dayanımı açısından iki ortamda da O10 betonu şahite yakın değerler vermektedir (Bkz. Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Musluk Suyunda Kür Gören ve Deniz Suyunda Islanma-Kuruma Çevrimine Tabi Tutulan Betonların Eğilme Dayanımları

3.2.3. Dinamik Elastisite Modülü

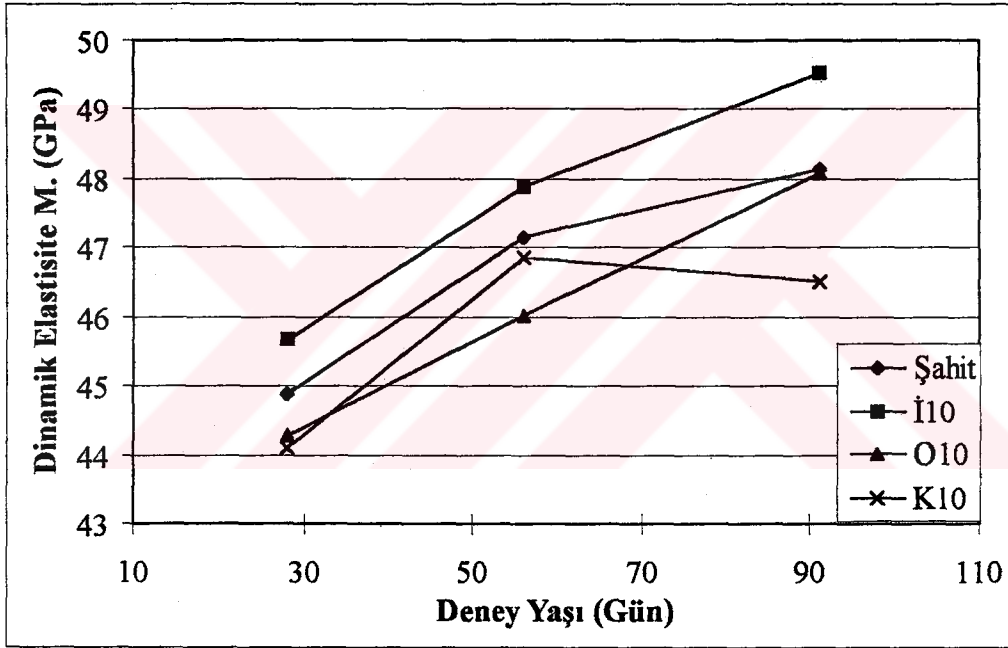
Her yaşta şahit beton dinamik elastisite modülü 100 kabul edilerek diğer serilerin modülleri şahitle yüzde olarak kıyaslanmış; bu verilerden yararlanarak da beton performanslarının zaman, uçucu kül inceliği ve ikame oranı ile değişimi değerlendirilmiştir.

Tablo 3.4. Musluk Suyu ve Deniz Suyunda Bekletilen Betonların Şahit Betona Kıyasla Dinamik Elastisite Modülleri (%)

Bekleme Ortamı	Mosluk Suyu			Deniz Suyu		
Yaş (Gün) → Grubu ↓	28	56	91	28	56	91
Şahit	100	100	100	100	100	100
İ10	101.71	101.90	102.94	96.87	99.53	101.24
O10	98.65	97.94	99.93	95.40	95.13	97.74
K10	98.25	99.75	96.66	97.31	96.71	99.20
İ20	95.52	91.55	93.26	91.15	91.40	92.99
O20	92.47	91.72	92.09	86.54	89.87	91.82
K20	89.75	91.13	88.80	87.12	88.37	87.89
İ30	87.75	87.42	87.83	83.97	86.06	87.76
O30	88.57	88.18	88.15	85.81	87.92	87.56
K30	81.17	82.10	81.00	77.12	79.81	80.95

Üç Farklı İncelikteki Uçucu Külün % 10 İkame Oranında Beton Dinamik Elastisite Modülüne Olan Etkisi

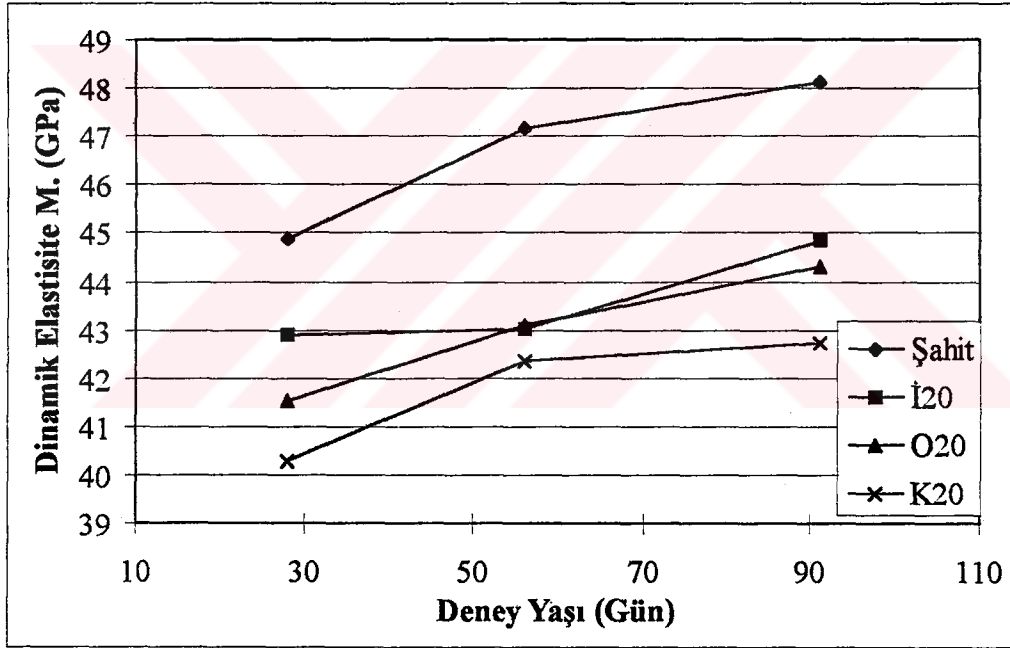
Bu ikame oranında, tüm inceliklerde ve tüm yaşlarda şahit performansına yaklaşılmış; hatta ince uçucu küllü seri, üç yaşta da şahit beton performansını aşmıştır. Elde edilen değerler Şahit betona oranla % 97-103 aralığında değişmektedir. % 10 ikame oranında, 28 günden itibaren, ince ve orta uçucu kül içeren betonlarda, dinamik elastisite modülleri, şahit betona kıyasla daha hızlı artış göstermektedir (Bkz. Şekil 3.20.).



Şekil 3.20. % 10 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin Zamanla Değişimi

Üç Farklı İncelikteki Uçucu Külün % 20 İkame Oranında Beton Dinamik Elastisite Modülüne Olan Etkisi

% 20 ikame oranında, tüm yaşlarda birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Bu değerler şahit beton dinamik elastisite modülüne oranla % 88.76 ile % 95.52 arasında değişmektedir. 28 ile 56 gün arasında uçucu kül içeren seriler, şahit betona kıyasla daha az dinamik elastisite modülü artışı göstermekte, 56 ile 91 gün aralığında, ince uçucu kül içeren seri, şahit betondan daha hızlı dayanım artışı göstermektedir. Uçucu kül kalınlaştıkça, bu zaman aralığında dinamik elastisite modülü artış hızı düşmektedir (Bkz. Şekil 3.21.).

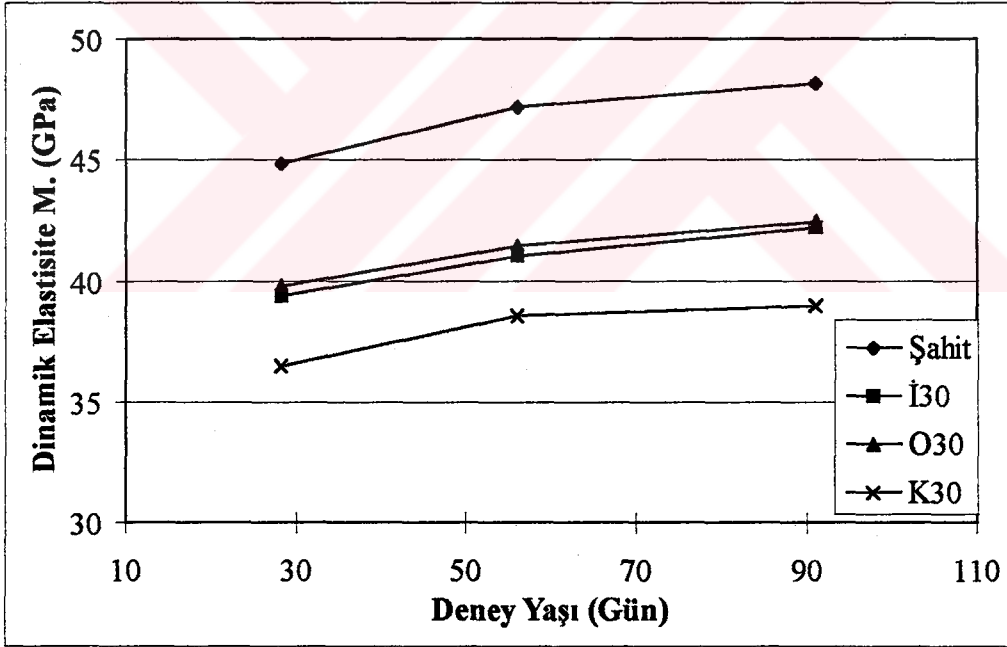


Şekil 3.21. % 20 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin Zamanla Değişimi

Üç Farklı İncelikteki Uçucu Külün % 30 İkame Oranında Beton Dinamik Elastisite Modülüne Olan Etkisi

Tüm yaşlarda, ince ve orta incelikte uçucu kül içeren seriler, şahit betona oranla % 88 değer verirken, kalın uçucu küllü seri ise yine şahite oranla % 82'lik bir dayanım göstermektedir. 28-56 gün aralığında, şahit beton, uçucu küllü betonlara oranla daha hızlı artış göstermiştir. Bu zaman aralığında, uçucu küllü seriler birbirlerine yakın artış hızları göstermiştir. 56-91 gün aralığında, uçucu kül kalınlaştıkça, artış hızı düşmüştür (Bkz. Şekil 3.22.).

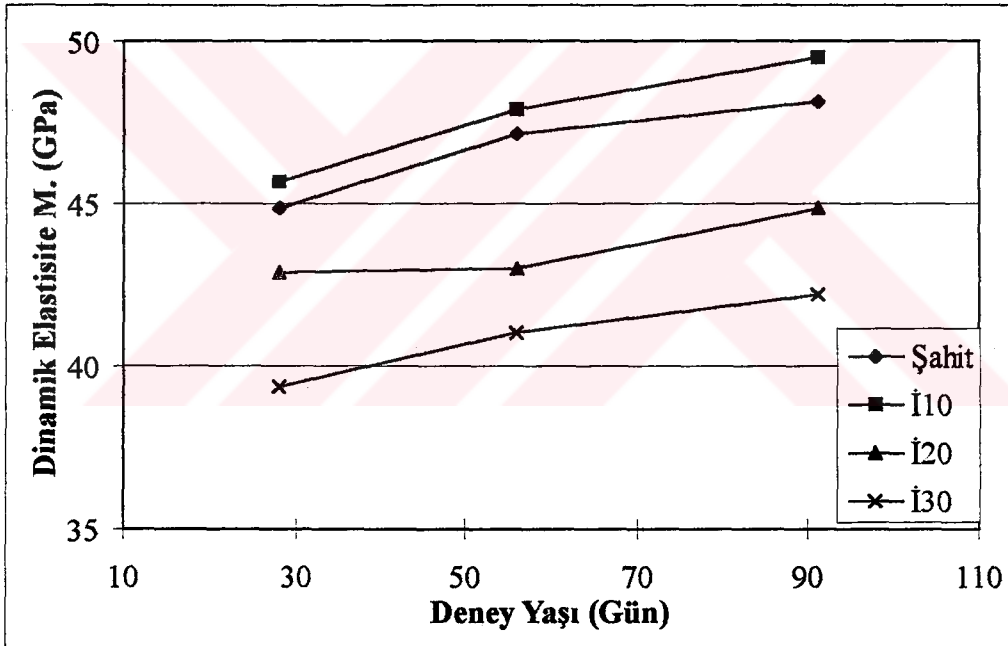
Tüm betonlar için dinamik elastisite modülü açısından şu değerlendirme yapılabilir; genelde, tüm ikame oranlarında ve yaşlarda incelikten kaynaklanan az bir farklılık görülmüş, fakat ikame oranının artmasıyla performans bir miktar düşmüştür.



Şekil 3.22. % 30 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin Zamanla Değişimi

İnce Uçucu Kül İçeren Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin İkame Oranı İle Değişimi

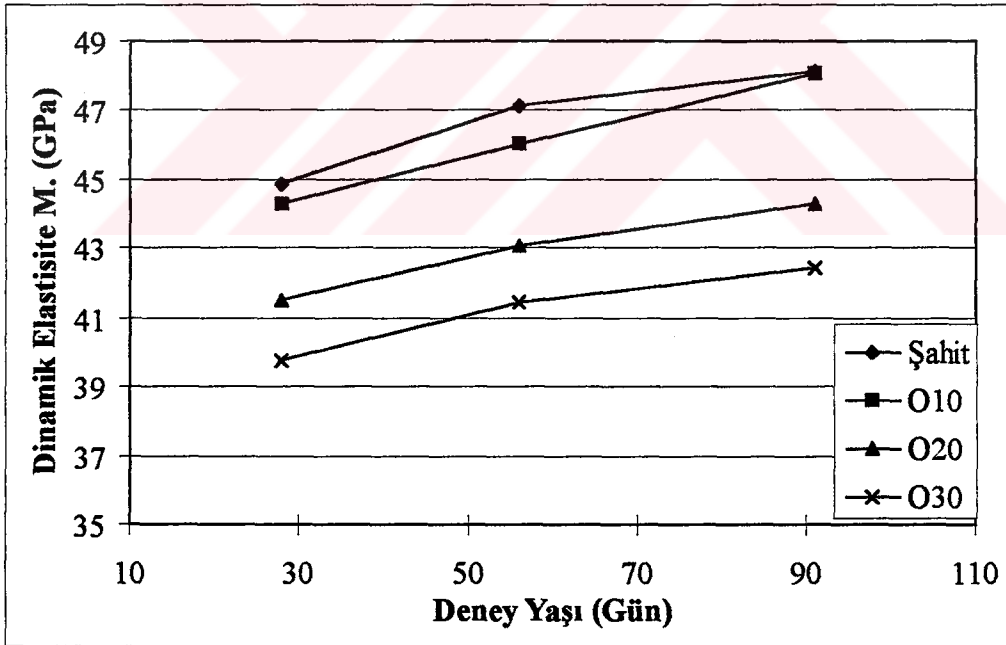
% 10 ikame oranında tüm yaşlarda şahit betonun değeri aşılmış, % 20 ve 30 ikame oranlarında ve tüm yaşlarda nispeten şahit değerine yakın dinamik elastisite modülü değerlerine ulaşılmıştır . Bu değerler şahit betona oranla % yaklaşık % 88-96 arasında değişmektedir. İkame oranının artmasıyla performansta düşme vardır. % 10 ikame oranında, 56. günden sonra, şahite göre, dinamik elastisite modülünün artışı artmaktadır. Aynı şekilde, % 20 ve % 30 ikame oranlarında da, 56. günden sonra şahitten daha hızlı artış ortaya çıkmaktadır (Bkz. Şekil 3.23).



Şekil 3.23. İnce Uçucu Kül İçeren Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin Zamanla Değişimi

Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin İkame Oranı İle Değişimi

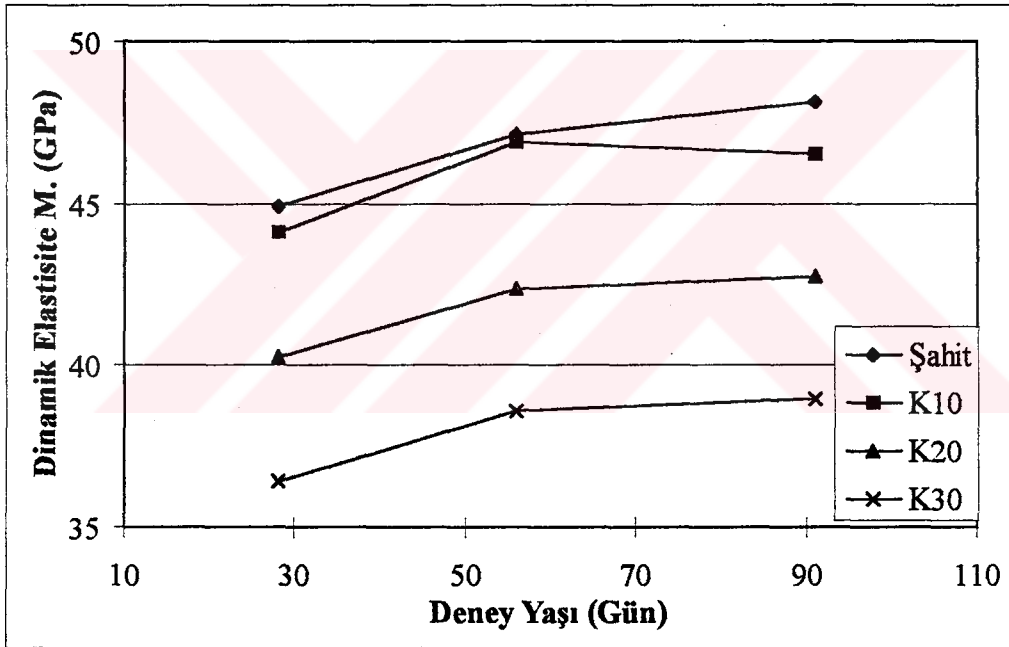
Orta incelikte uçucu kül içeren betonlarda, % 10 ikame oranında tüm yaşlarda şahit beton değerlerine yaklaşılmıştır. İkame oranının artmasıyla değerler biraz düşmektedir. İkame oranının artmasıyla bulunan değerler şahit betona oranla % 88-100 aralığında değişmektedir. 28 ile 56 gün aralığında, şahit beton, uçucu küllü serilere göre daha hızlı artış göstermektedir. 56. günden sonra ise % 10 ikame oranında, orta incelikte uçucu kül içeren seri, şahit betondan daha hızlı artış gösterirken, % 20 ve % 30 ikame oranlarında, artış hızları düşmektedir. 56 günden sonra, artış hızları, şahit beton dahil tüm betonlarda düşmekte, fakat bu düşüş % 30 ikame oranında daha fazla olmaktadır. % 10 ikame oranında, bu incelikte 91 günün ötesinde iyi sonuçlar beklenebilir (Bkz. Şekil 3.24).



Şekil 3.24. Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin Zamanla Değişimi

Kalın Uçucu Kül İçeren Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin İkame Oranı İle Değişimi

Kalın uçucu kül içeren serilerde % 10 ikame oranında şahit betona çok yakın değerler elde edilmiştir. Kalın uçucu kül içeren serilerde, ikame oranının artmasıyla, şahit betona göre performans düşmektedir. Kalın uçucu küllü seriler, 28-56 gün aralığında, şahit betona yakın hatta, % 10 ikame oranı için, şahit betonu geçen dinamik elastisite modülü artışları göstermişlerdir. 56. günden sonra, şahit betona göre, kalın uçucu küllü serilerde, artış hızları düşmüştür. % 10 ikame oranındaki düşüş, deney hatasından kaynaklanabilir (Bkz.Şekil 3.25).

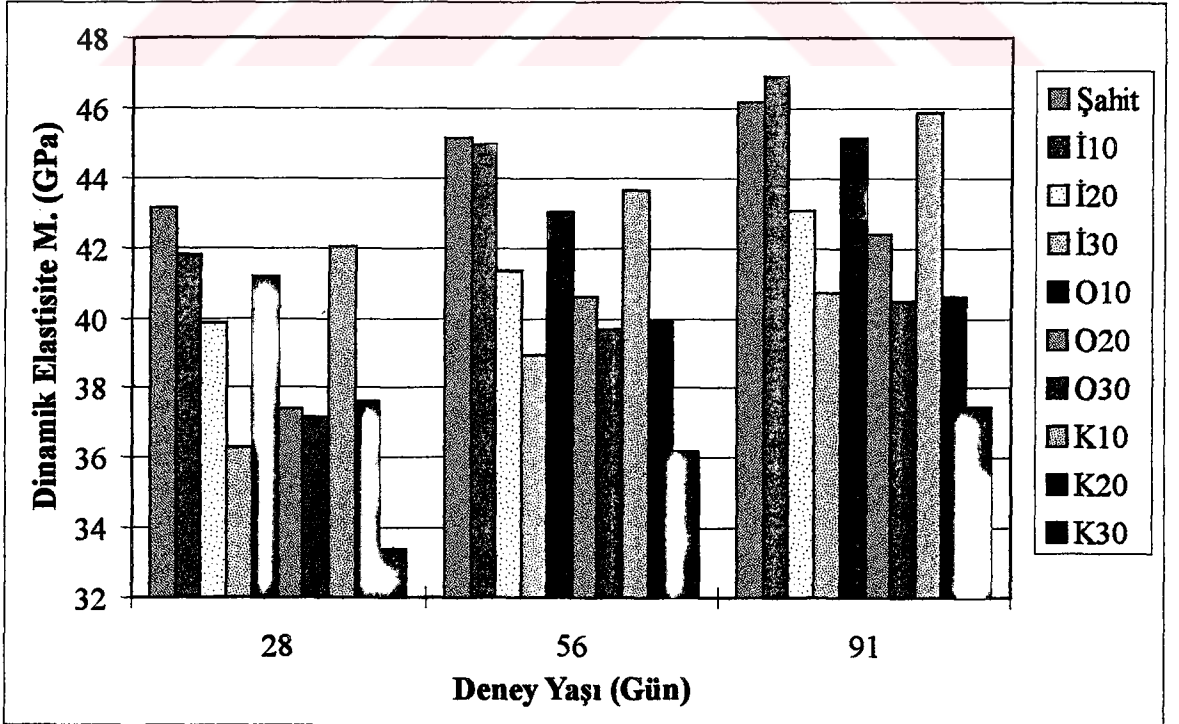


Şekil 3.25. Kalın Uçucu Kül İçeren Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin Zamanla Değişimi

Deniz Suyunda Bekletilmiş Betonların Dinamik Elastisite Modülleri

% 10 oranında ince uçucu küllü beton, 28 ve 56 günde, şahite yakın sonuç vermiştir. 91 günde ise şahit betona göre daha iyi sonuç elde edilmiştir. İkame oranının artmasıyla performans düşmektedir. Orta incelikte uçucu küllü betonlarda, % 10 ikame oranına sahip beton, şahit betona yaklaşık değerler vermiştir. Yine, ikame oranının artmasıyla şahit altında değerler elde edilmiştir. Kalın uçucu küllü betonlarda, % 10 ikame oranında, tüm yaşlarda şahite çok yakın değerler elde edilmiştir. İkame oranının artmasıyla tüm yaşlarda, düşük değerler elde edilmiştir. % 10 ikame oranında, tüm inceliklerde birbirine yakın değerlere varılmıştır. Bu değerler, şahite kıyasla % 95-102 arasında değişmektedir. % 20 ikame oranında tüm yaşlarda ve tüm inceliklerde birbirine yakın değerler elde edilmiştir ve bu değerler şahite kıyasla % 87-93 arasındadır. % 30 ikame oranında ise, ince ve orta incelikte uçucu kül içeren seriler birbirine yakın, kalın uçucu kül içeren seri ise düşük değerler vermektedir. Bu değerler şahit betonun % 80-88'i değerlerdir.

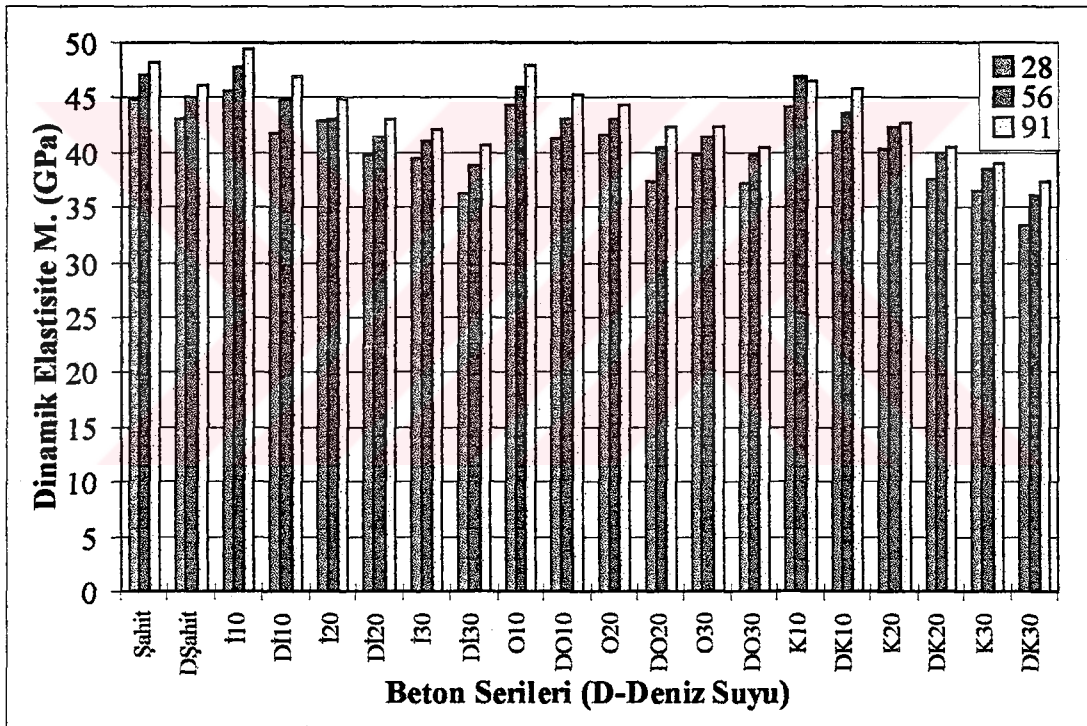
Genelde ise, farklı incelikler arasında aynı ikame oranında açık farklılık görülememekte, fakat ikame oranının artmasıyla her incelikte bir miktar düşme olmaktadır. Zamanla ise şahite oranla büyük değişiklikler olmamaktadır (Bkz. Şekil 3.26).



Şekil 3.26. Deniz Suyunda Islanma - Kuruma Çevrimine Maruz Bırakılmış Betonların Dinamik Elastisite Modüllerinin Zamanla Değişimi

Musluk ve Deniz Suyunda Bekletilen Betonların Dinamik Elastisite Modülleri

Deniz suyunda, musluk suyuna göre tüm betonlarda dinamik elatisite modüllerinde bir düşüş vardır. Deniz ortamında, İ10 betonu sadece 91 günde şahit beton performansını aşabilmiştir. O10 ve K10 betonları, deniz ortamında, şahite yakın değerler vermişlerdir. Deniz ortamında, uçucu kül içeren betonlarda, 28. günden sonra dinamik elastisite modülleri musluk suyuna göre azalmaktadır. % 10 ikame oranında, deniz ortamında, farklı incelikler arasında, birbirine yakın değerlere ulaşılmıştır (Bkz. Şekil 3.27)



Şekil 3.27. Musluk Suyunda Kür Gören ve Deniz Suyunda Islanma-Kuruma Çevrimine Tabi Tutulan Betonların Dinamik Elastisite Modülleri

3.2.4. Kılcallık Deneyi

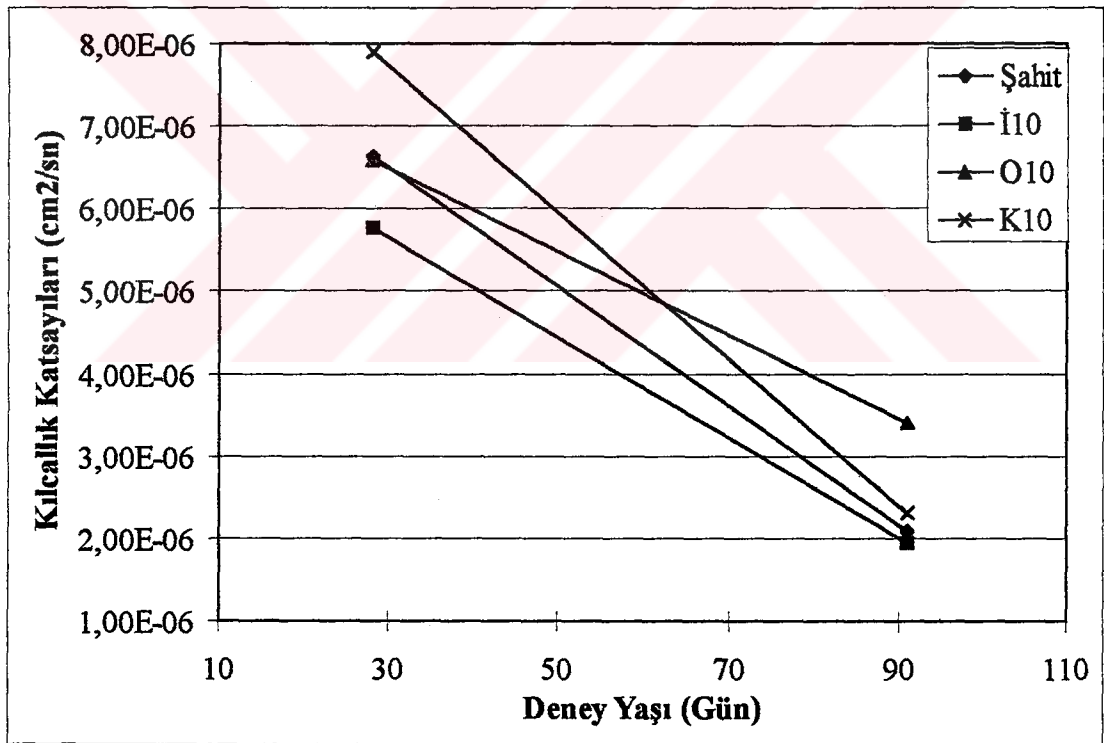
Her yaşta şahit beton kılcallık katsayısı 100 kabul edilerek diğer serilerin kılcallık katsayıları, şahitle yüzde olarak kıyaslanmıştır; bu verilerden yararlanarak da beton performanslarının zaman, uçucu kül inceliği ve ikame oranı ile değişimi değerlendirilmiştir.

Tablo 3.5. Üretilen Betonların Şahit Betona Kıyasla Kılcallık Katsayıları (%)

Beton Serisi	28. Gün	91. Gün
Şahit	100	100
İ10	86.97	92.97
O10	99.46	163.22
K10	119.24	111.00
İ20	76.51	120.61
O20	77.35	164.47
K20	127.14	170.54
İ30	109.16	261.50
O30	105.05	164.29
K30	182.01	304.97

Üç Farklı İncelikteki Uçucu Külün % 10 İkame Oranında Beton Kılcallık Katsayısına Olan Etkisi

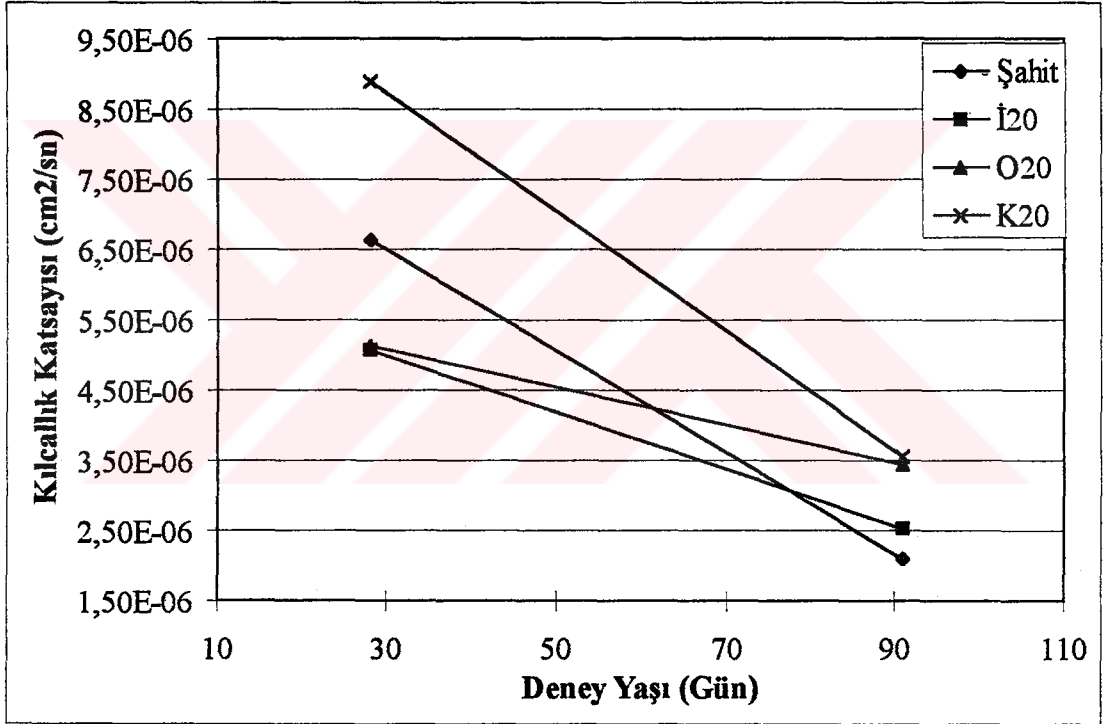
% 10 ikame oranında, 28 günde, ince uçucu küllü seri şahite kıyasla % 13 düşük, orta incelikte uçucu kül içeren seri şahite yakın, kalın uçucu kül içeren seri ise şahite göre % 19.24 fazla kılcallık göstermektedir. 91 günde ise, ince uçucu kül içeren seri şahite göre % 7 düşük, orta ve kalın uçucu kül içeren seriler ise sırasıyla şahite göre % 63 ve % 11 büyük kılcallık katsayısı vermiştir. 28 ve 91 günde, ince uçucu küllü seri şahite göre daha iyi sonuç vermiştir. % 10 ikame oranında, ince uçucu kül içeren beton iki yaşta da şahite kıyasla iyi performans göstermektedir (Bkz. Şekil 3.28.).



Şekil 3.28. % 10 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Kılcallık Katsayılarının Zamanla Değişimi

Üç Farklı İncelikteki Uçucu Külün % 20 İkame Oranında Beton Kılcallık Katsayısına Olan Etkisi

% 20 ikame oranında, 28. günde, ince ve orta uçucu küllü seriler şahitten yaklaşık % 13 daha düşük değerler vermektedir. Kalın uçucu küllü seri ise yaklaşık % 27 daha fazla kılcallık göstermiştir. 91 günde ise, tüm inceliklerde şahite göre kötü sonuç vermektedir. İncelik sırasına göre, şahite oranla % 20.61, % 64.47 ve % 70.54 daha kötü sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Bu ikame oranında, uçucu küllü betonlar, zamanla şahit betonla aralarındaki farkı kapatmaktadır (Bkz. Şekil 3.29.).

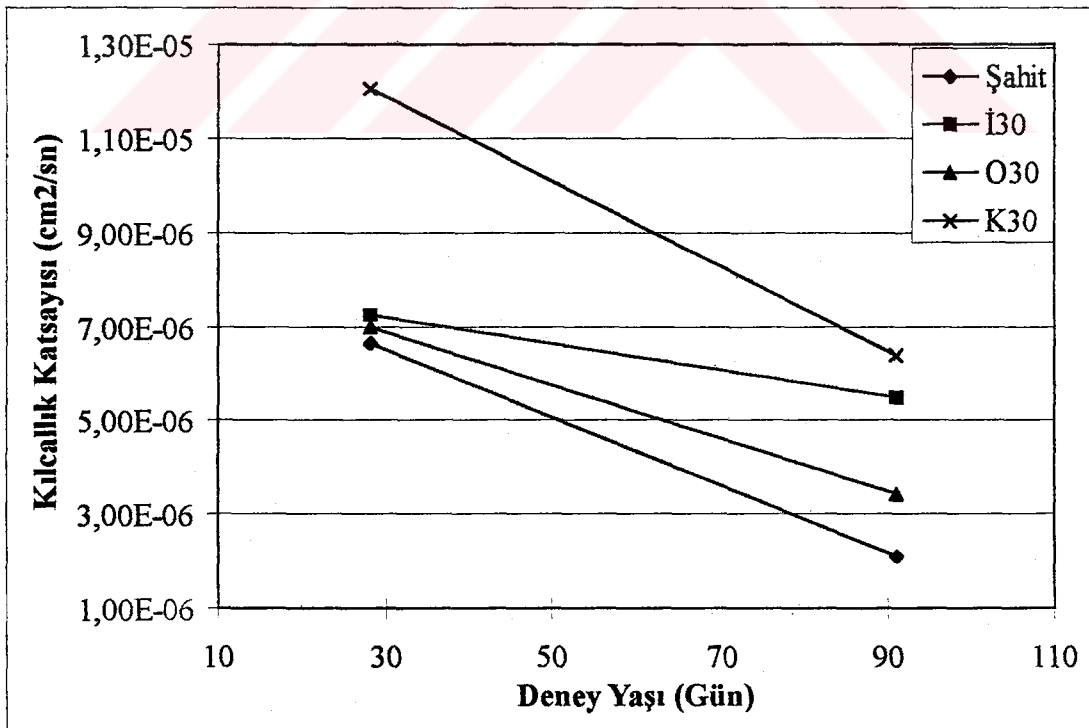


Şekil 3.29. % 20 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Kılcallık Katsayılarının Zamanla Değişimi

Üç Farklı İncelikteki Uçucu Külün % 30 İkame Oranında Beton Kılcallık Katsayısına Olan Etkisi

28 günde, ince ve orta uçucu küllü seriler şahite kıyasla sırasıyla % 9.16 ve % 5.05 kötü sonuç vermiştir. Kalın uçucu kül içeren seri ise % 82.01 fazla kılcallığa sahiptir. 91 günde ise incelik sırasına göre, şahite oranla % 161.50, % 64.29 ve % 214.97 daha kötü sonuç vermiştir (Bkz. Şekil 3.30).

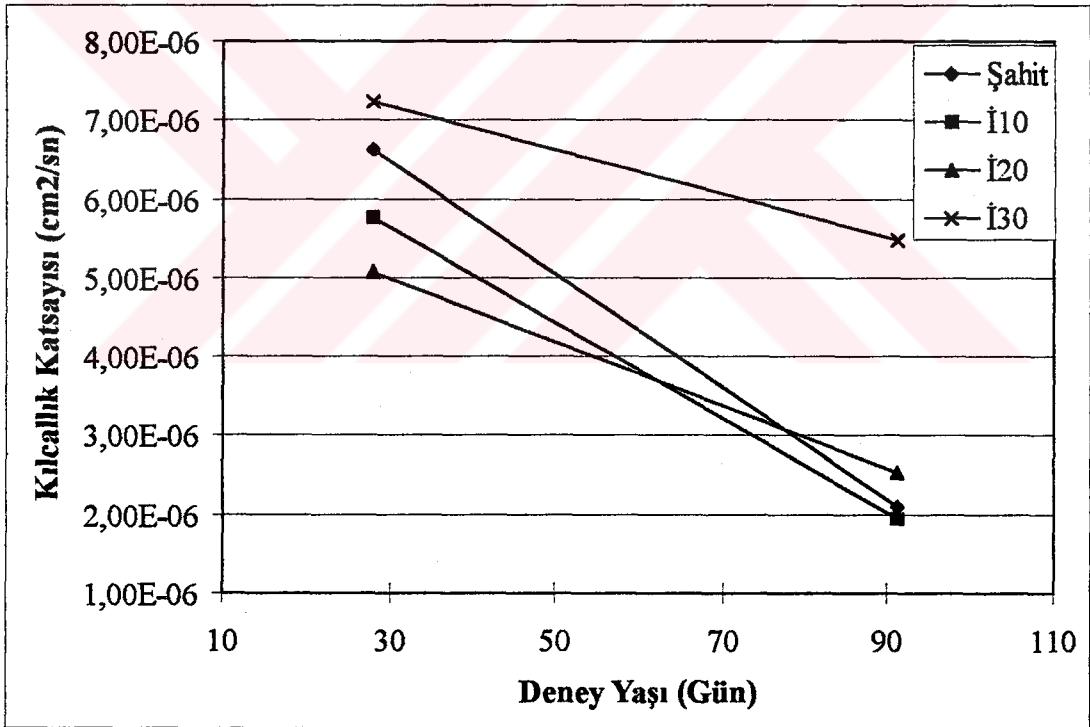
Kılcallık için tüm betonlar ile ilgili genel bir yorum yapılacak olursa; % 10 ikame oranında ince uçucu kül içeren seri 28 ve 91 günde iyi sonuç vermiştir. Diğer serilerde zamanla kötüleşen sonuçlara ulaşılmıştır. 28 günde % 10 ve % 20 ikame oranında ince ve orta uçucu küllü seriler iyi sonuç vermiştir. % 30 ikame oranında ise bu durum değişmiştir. 91 günde, ikame oranının artışıyla ve kalınlığın artmasıyla kılcallık artmıştır. Bu, kalınlığın artması ile puzolanik özelliklerin azlığından dolayı, boşlukların kılcallık için uygun boyutlara ufalması, fakat kılcal yollarda tıkanma söz konusu olmaması şeklinde açıklanabilir.



Şekil 3.30. % 30 İkame Oranında Farklı İnceliklerde Uçucu Kül İçeren Betonların Kılcallık Katsayılarının Zamanla Değişimi

İnce Uçucu Kül İçeren Betonların Kılcallık Katsayılarının İkame Oranı İle Değişimi

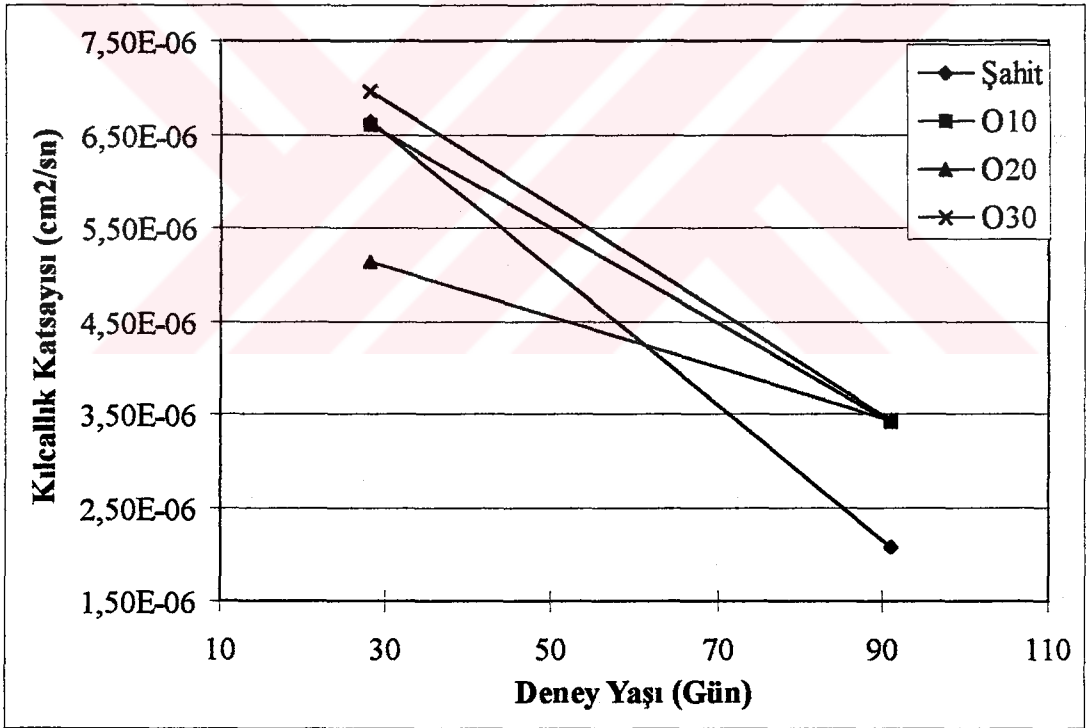
İnce uçucu küllü betonlarda, % 10 ikame oranına sahip beton, her iki yaşta da şahite kıyasla daha iyi kılcallık özelliklerine sahiptir. % 20 ikame oranında, 28 günde şahite kıyasla kılcallık az olmasına rağmen, 91 günde kılcallık şahit betonu % 20 oranında aşmaktadır. % 30 ikame oranında, her iki yaşta da kılcallık fazladır. 28 günde performans sıralaması olarak % 20, % 10 ve % 30 ikame oranı sıralaması oluşmakta, 91 günde ise ikame oranını artması ile performans düşmektedir. Zamanla, şahit betonun performansına oranla kılcallık azalması düşük düzeyde kalmaktadır (Bkz. Şekil 3.31.).



Şekil 3.31. İnce Uçucu Kül İçeren Betonların Kılcallık Katsayılarının Zamanla Değişimi

Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Betonların Kılcallık Katsayılarının İkame Oranı İle Değişimi

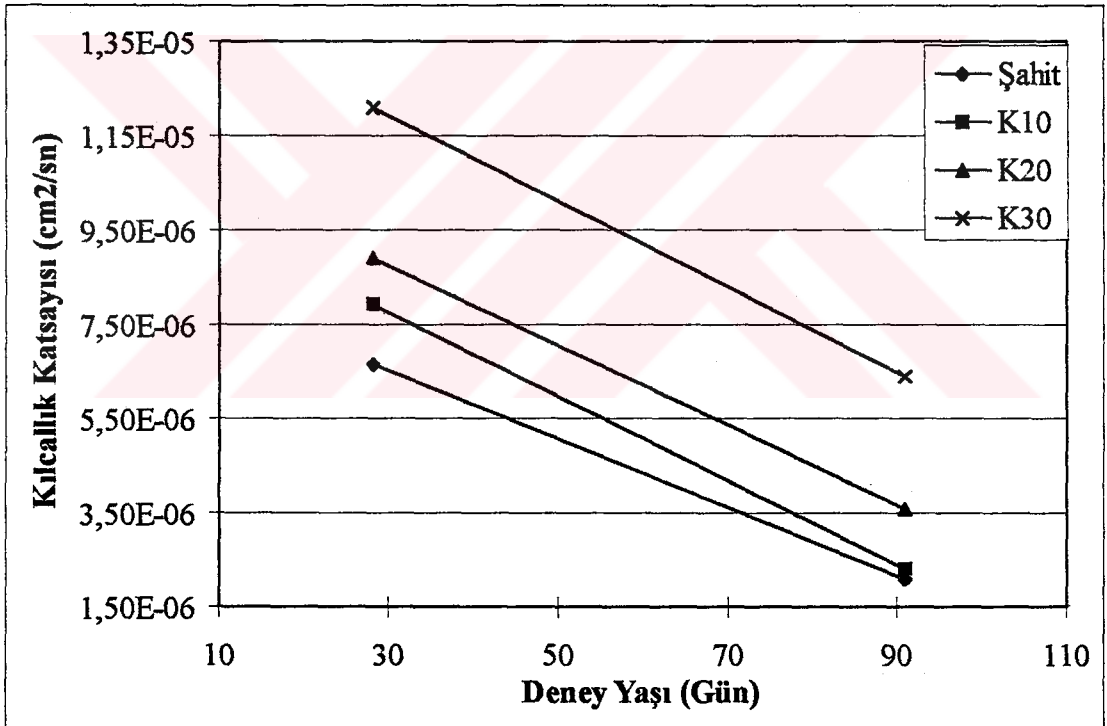
Orta kalınlıktaki uçucu küllü betonlarda, % 10 ikame oranında 28 günde iyi sonuç elde edilmiş olmasına rağmen 91 günde bu tersine dönmüştür. % 20 ikame oranında, 28 günde gayet iyi sonuç alınsa da , 91 günde sonuç kötü olmuştur. % 30 ikame oranında, 28 günde yakın değer elde edilmesine rağmen, 91 günde performans düşmektedir. 28 günde şahite oranla tüm ikame oranlarında iyi sonuçlar alınmasına rağmen , 91 günde bu değişmekte, tüm ikame oranlarında şahite göre yaklaşık % 64 kötü değerler elde edilmiştir. Şahit beton, 28 günden sonra, kılcallığın azalmasında, uçucu küllü serilere göre daha öndedir (Bkz. Şekil 3.32.).



Şekil 3.32. Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Betonların Kılcallık Katsayılarının Zamanla Değişimi

Kalın Uçucu Kül İçeren Betonların Kılcallık Katsayılarının İkame Oranı İle Değişimi

Kalın uçucu küllü serilerde, 28 ve 91günde ikame oranının artmasıyla sonuçlar kötüleşmektedir. 28. günde, incelik sırasına göre, % 19.24, % 27.14 ve % 82.01 daha kötü değerlere ulaşılmıştır. 91 günde ise, bu değerler, % 11, % 70.54 ve % 204.97 şeklindedir. Nispeten % 10 ikame oranında iki yaşta da şahit betona yakın sonuçlara ulaşılmıştır. Zamanla kalın uçucu küllü seriler, tüm ikame oranlarında, şahite yakın değerlere doğru gitmektedir. İkame oranının artmasıyla, uçucu küller arasında performans düşmektedir (Bkz. Şekil 3.33.).



Şekil 3.33. Kalın Uçucu Kül İçeren Betonların Kılcallık Katsayılarının Zamanla Değişimi

BÖLÜM 4.

SONUÇLAR

Seyitömer Termik Santrali'na ait üç farklı incelikteki uçucu külün kullanılması ile üretilen ağırlıkça % 10, % 20 ve %30 uçucu kül ikame oranına sahip betonlarda, uçucu kül inceliğinin betonun işlenebilirliğine, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve dinamik elastisite modülü gibi mekanik özelliklerine, durabilite özelliğini gösteren kılcallığa olan etkisinin; aynı betonların gel-git olayını temsilen ardışık haftalarda plastik varil içindeki deniz suyunda bekletilmesi ile yukarıdaki özelliklerin değişiminin araştırıldığı bu çalışmada ulaşılan sonuçlar şöyle sıralanabilir.

* Bu çalışmada, TS 639'a göre puzolanik aktivite testi yapılmış ve sonuçta öngörülen malzeme karışım miktarlarının, bazı Türkiye uçucu küllerinin işlenebilirliği olumsuz etkilemesi özelliğinin gözönüne alınmaması nedeniyle, puzolanik aktivite değerleri, standardın öngördüğü 0.70 sınırının altındadır. Türkiye uçucu külleri, genellikle harç karışımlarında işlenebilirlik için gerekli su ihtiyacını şahit harca kıyasla arttırmaktadır[14]. Halbuki, TS 639'da belirtilen puzolanik aktivite testi, uçucu kül özgül ağırlığına bağlı olarak verilmiş bir formülle, uçucu küllü karışımlar için su miktarını azaltmaktadır. Bu nedenle, uçucu küllü harçlar, kalıba neredeyse ıslak kum kıvamında olmaları nedeniyle homojen şekilde yerleştirilememiştir. TS 639 standardı, uçucu külün en önemli özelliği olan puzolanik aktivitenin ortaya konulması açısından, yetersiz kalmaktadır. Puzolanik aktivite testi için eşit kıvamda şahit ve uçucu küllü harç hazırlanması daha uygun olabilir. Bu şekilde bir test ile bu çalışmada kullanılan uçucu külleri daha iyi puzolanik aktivite değerleri vereceğine inanılmaktadır.

* Kullanılan uçucu küller, ikame oranının ve kalınlığın artmasıyla eşit işlenebilirlik için gerekli su miktarının arttırmaktadır. Bu olay, uçucu külün kalınlaştıkça küresel formdan uzaklaşıp, boşluklu ve pürüzlü hal almasına bağlanabilir.

İnce ve orta incelikte uçucu kül içeren betonlarda, aynı ikame oranında, az farklılık ortaya çıkmakta, kalın uçucu kül içeren serilerde, ikame oranının artmasıyla fark daha da belirginleşmektedir.

* 3 ve 7 günde uçucu günde, uçucu küllü seriler şahit betonun altında basınç dayanımları vermiştir. Tek istisna, % 10 ikame oranında ince uçucu kül içeren betondur. 7 günde bu beton, şahit beton dayanımını yakalamıştır. 3 ve 7 günde incelikten kaynaklanan açık farklılıklar görülmemektedir. Her incelikte, ikame oranının artmasıyla performans düşmektedir. 28 günde ince ve orta incelikte uçucu küllü betonlar yakın değerler verirken, kalın uçucu küllü seri geride kalmaktadır. Kalın uçucu küllü seride ikame oranını artmasıyla, performans daha şiddetli düşmektedir. 91 günde, % 10 ikame oranında, ince uçucu küllü beton çok iyi bir performans göstermektedir. Basınç dayanımı açısından, ince uçucu kül, özellikle % 10 ve nispeten % 20 ikame oranında, orta incelikteki uçucu kül ise % 10 ikame oranında şahit betona göre iyi sonuç vermiştir. 28 günden sonra, incelik etkisi ortaya çıkmakta, uçucu kül kalınlaştıkça şahite göre basınç dayanımı düşmektedir. Aynı şekilde, ikame oranının artmasıyla, uçucu küllü betonların dayanımları azalmaktadır. İnce uçucu küllü betonlar, tüm ikame oranlarında şahit betona kıyasla, 28 günden sonra daha hızlı dayanım artışı göstermektedir. Bu durum, ince uçucu külün iyi puzolanik özelliklere sahip olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

* Eğilme dayanımı açısından, şahite göre yakın, hatta şahiti aşan performansı, 7. günden başlayarak % 10 ikame oranında orta incelikte uçucu kül içeren beton göstermektedir. % 20 ikame oranında ise, orta incelikte uçucu kül içeren beton, 28. günden itibaren iyi performans göstermektedir. Performans olarak, ince uçucu küllü seri, tüm ikame oranlarında nispeten iyi sayılabilir. Bunu, kalın uçucu kül içeren beton takip etmektedir. Genelde, tüm inceliklerde, % 10 ve % 20 ikame oranlarında, 28 günden sonra, birbirlerine yakın değerler alınırken, % 30 ikame oranında bu tersine dönmektedir. Bu olay, karışım metodundan kaynaklanıyor olabilir. Bilindiği gibi, basit ikame metodu, genelde % 20 ikame oranına kadar verimli olabilen bir metoddur. 28 günden sonra, % 10 ikame oranında, ince ve kalın uçucu kül içeren betonlar, diğer ikame oranlarında ise, kalın uçucu küllü betonlar şahit betondan daha hızlı dayanım

kazanmaktadır. Uçucu küllü betonlar, genelde, şahit betona kıyasla basınç dayanımına göre biraz daha iyi eğilme dayanımı göstermektedirler.

* Tüm yaşlarda ve ikame oranlarında, kalınlık arttıkça dinamik elastisite modülü çok hafif düşmektedir. Bu düşüş, % 30 ikame oranında biraz daha fazladır. % 10 ikame oranında, ince uçucu küllü beton tüm yaşlarda gayet iyi performans sergilemektedir. % 20 ikame oranında ince ve orta uçucu küllü serilerde nispeten iyi sonuçlar elde edilmektedir. 28 günden sonra, ince uçucu kül içeren beton, % 10 ve % 20 ikame oranında, orta incelikte beton ise % 10 ikame oranında şahite göre daha hızlı elastisite modülü kazanmaktadır. Kalın uçucu kül içeren beton, tüm ikame oranlarında, diğer inceliklere daha kötü performans göstermektedir.

* Kılcallık deneyleri sonucunda, 28 ve 91 günde de en iyi sonucu % 10 ikame oranına sahip ince uçucu küllü seri vermiştir. Orta incelikte uçucu küllü seri, % 10 ve % 20 ikame oranlarında, 28 günde gayet iyi sonuçlar vermekte ise de 91 günde bu tersine dönmektedir. Kalın uçucu küllü seri, ikame oranının artmasıyla şahit betona göre çok kötüleşen sonuçlar vermiştir.

* Deniz suyunda ıslanma-kuruma çevrimine tabi tutulmuş uçucu küllü betonlarda, normal kür görmüş betonlara göre performansta bir miktar düşüş vardır.

Basınç dayanımı açısından, % 10 ikame oranında ince ve orta incelikte uçucu kül içeren betonlar iyi sonuçlar vermektedir. İnce ve orta incelikteki betonlar birbirine yakın sonuçlar verirken, kalın uçucu küllü seri düşük kalmaktadır.

% 10 ikame oranında, tüm inceliklerde iyi eğilme dayanımları elde edilmiştir. % 10 ve % 20 ikame oranlarında incelik farklılığından kaynaklanan önemli farklılıklar ortaya çıkmamıştır. Fakat, % 30 ikame oranında, belli bir miktar fark oluşmaktadır.

% 10 ikame oranında, tüm yaşlarda, incelik farkı gözlenmemiş; şahit betona yakın dinamik elastisite modülleri elde edilmiştir. % 20 ve % 30 ikame oranlarında ise ince ve orta incelikteki uçucu küllü betonlar, kalın uçucu küllü seriden iyi sonuçlar vermiştir.

* Genel bir değerlendirme yapılacak olursa, ince ve orta incelikte uçucu kül içeren betonlar düşük ikame oranlarında, gerek mekanik dayanım gerekse durabilite açısından iyi performans sergilemektedir.

* Daha ileride, etkinlik faktörü dikkate alınarak, yani eşit dayanım için azaltılan çimento miktarından daha fazla uçucu kül kullanılarak çalışma tekrarlanabilir. Çeşitli katkılarla da aynı çalışmalar yapılabilir. Son olarak da, bir çatı altında, uçucu kül ve benzeri malzemelerin özelliklerinin ve performanslarının belirlenmesi çalışmalarına kısa sürede geçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmaların koordineli ve programlı yürütülerek, bu malzemelerin daha fazla kullanımı için kamuoyu ve altyapı oluşturulmalıdır.



KAYNAKLAR

- [1] **ASTM C 618-91**, Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, (1991)
- [2] **MEHTA, P.K.**, Natural Pozzolans, Chapter 1, Supplementary Cementing Materials for Concrete, CANMET, Editor V.M. Malhotra, pp. 3-31, March (1987)
- [3] **İLHAN, T.**, Sülfo-Kalsik ve Siliko Kalsik Uçucu Küller İyileştirme ve Rolkrit'te Kullanımı, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Şubat (1995)
- [4] **ACI COMMITTEE 226**, Use of Fly Ash in Concrete, ACI Materials Journal, pp. 381-409, September-October (1987)
- [5] **ÖZTURAN, T.**, Uluslararası IV. CANMET - ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, s. 57-78, Ankara, Kasım (1993)
- [6] **GOPALAN, M.K.**, Nucleation and Pozzolan Factors in Strength Development of Class F Fly Ash Concrete, ACI Materials Journal, V. 90, No.2, pp. 117-121, March-April (1993)
- [7] **MEHTA, P.K.**, Pozzolan and Cementitious By-Products in Concrete- Another Look , Third International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Editor V.M. Malhotra, Trondheim, Norway, (1989)
- [8] **YEĞİNOBALI, A.** Uçucu Kül, Tras ve Yüksek Fırın Cürufunun Betonda Katkı Maddeleri Olarak Kullanılması ve Optimum Uçucu Kül Karışım Oranlarının Tayini, Tübitak, Proje No. Mag-157/A, Ankara, (1971)
- [9] **TOKYAY, M.**, Betonda Uçucu Kül Kullanımı (Türkiye Deneyimi), Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, s. 29-36, Ankara, Kasım (1993)
- [10] **TS 639**, Uçucu Küller, TSE, Nisan (1975)
- [11] **HELMUTH, R.**, Fly Ash in Cement and Concrete, Portland Cement Association, pp. 203, (1987)
- [12] **TS 640**, Uçucu Küllü Çimento, TSE, Nisan (1975)

- [13] **AKMAN, M.S.**, Ağırılık Barajlarında Uçucu Küllü Rolkrit Kullanımı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, s. 9-21, Ankara, Kasım (1993)
- [14] **TOKYAY, M.**, Termik Santral Küllerinin Çimento ve Beton Katkı Maddesi Olarak Kullanılma İmkanlarının Etüd ve Envanter Projesi Sonuç Raporu, Ankara, (1990)
- [15] **BERRY, E.E., MALHOTRA, V.M.**, Fly Ash in Concrete, Chapter 2, Supplementary Cementing Materials for Concrete, CANMET, Editor V.M. Malhotra, pp. 37-163, March (1987)
- [16] **BISAILLON, A., RIVEST, M., MALHOTRA, V.M.**, Performance of High-Volume Fly Ash Concrete in Large Experimental Monoliths, ACI Materials Journal, V. 91, No. 2, pp. 178-187, March-April (1994)
- [17] **ZHANG, M.H.**, Microstructure, Crack Propagation and Mechanical Properties of Cement Pastes Containing High Volumes of Fly Ash, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No.6, pp. 1165-1178, (1995)
- [18] **SARIÇİMEN, H., MASLEHUDDIN, M., AL-TAYYIB, A.J., AL-MANA, A.I.**, Permeability and Durability of Plain and Blended Cement Concretes Cured in Field and Laboratory Conditions, ACI Materials Journal, V. 92, No. 2, pp. 111-116, March-April (1995)
- [19] **TIKALSKY, P.J., CARRASQUILLO, R.L.**, Influence of Fly Ash on the Sulfate Resistance of Concrete, ACI Materials Journal, V. 89, No. 1, pp. 69-75, January-February (1992)
- [20] **TORII, K., TANIGUCHI, K., KAWAMURA, M.**, Sulfate Resistance of High Fly Ash Content Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.25 No. 4, pp. 759-768, (1995)
- [21] **HAQUE, M.N., KAWAMURA, M.**, Carbonation and Chloride-Induced Corrosion of Reinforcement in Fly Ash Concretes, ACI Materials Journal, V. 89, No.1, January-February (1992)
- [22] **HAQUE, M.N., KAYYALI, O.A., GOPALAN, M.K.**, Fly Ash Reduces Harmful Chloride Ions in Concrete, ACI Materials Journal, V. 89, No. 3 pp. 238-242, May-June (1992)
- [23] **BERRY, E.E., MALHOTRA, V.M.**, Fly Ash in Concrete, SP85-3, CANMET, pp. 178, February (1986)
- [24] **MASLEHUDDIN, M., SARIÇİMEN, H., AL-MANA, A.I.**, Effect of Fly Ash Addition on the Corrosion Resisting Characteristics of Concrete, ACI Materials Journal, pp. 42-51, Journal-February (1987)

- [25] **ERDOĞAN, T.Y.**, Atık Malzemelerin İnşaat Sektöründe Kullanımı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, s. 1-8, Ankara, Kasım (1993)
- [26] **BERKTAY, İ.**, Genelde Yüksek Dayanımlı Beton, 2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton, Bildiriler Kitabı, s. 1-14, İstanbul, Mayıs (1991)
- [27] **BALTA, İ.**, Yüksek Mukavemetli Betonlar ve Bileşenleri, 2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton, Bildiriler Kitabı, s.246-255, İstanbul, Mayıs (1991)
- [28] **ÖZKUL, M.H., KARAGÜLER, M.E.**, Yüksek Yapılarda Yüksek Dayanımlı Beton, 2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton, Bildiriler Kitabı, s. 256-261, İstanbul, Mayıs (1991)
- [29] **YAZICI, Ş., BARADAN, B.**, Uçucu Kül Katkılı Yüksek Dayanımlı Beton, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyum, Bildiriler Kitabı, s. 59-72, Ankara, 29-30 Kasım (1995)
- [30] **BAYAZIT, Ö.L.**, Beton ve Deneyleri, D.S.İ. Genel Müdürlüğü, s. 238, İkinci Baskı, Ankara, (1988)
- [31] **AKMAN, M.S.**, Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Ders Notları, 1.Baskı, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, (1987)
- [32] **POSTACIOĞLU, B.**, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton, Cilt 2, Agregalar, Beton, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, Nisan (1987)
- [33] **UYAN, M.** Beton ve Harçlarda Kılcallık Olayı, Doktora Tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, (1975)
- [34] **GÖKÇE, A.**, Farklı İnceliklerdeki Uçucu Küllerin Betondaki Performanslarının Karşılaştırılması, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağustos (1995)

YÖKÜKÜMÜSÜ

ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında Adapazarı'nda doğdu. İlkokulu 1982 yılında Adapazarı Atatürk İlkokulu'nda , ortaöğrenimini 1988 yılında Adapazarı Atatürk Lisesi'nde tamamladı.

Aynı yıl girdiği İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 1992 yılında mezun oldu. 1992 yılında girdiği İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde halen kayıtlıdır. 1993 yılından bu yana Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde araştırma görevlisidir.



İTÜ
Sakarya
Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği
Bölümü