

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CEM I 42.5 ÇİMENTOLU YÜKSEK DOZAJLI
BETONLARDA SİLİS DUMANININ ETKİNLİĞİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Emir İLTER**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

MAYIS 2007

**CEM I 42.5 ÇİMENTOLU YÜKSEK DOZAJLI
BETONLARDA SİLİS DUMANININ ETKİNLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Emir İLTER
501041032

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Haziran 2007

Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Hasan YILDIRIM
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hulusi ÖZKUL
Prof. Dr. Fevziye AKÖZ

MAYIS 2007

ÖNSÖZ

Bu tezi yöneten ve çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocam Prof. Dr. Mehmet UYAN ve Yrd.Doç.Dr. Hasan YILDIRIM'a

Çalışmalarım esnasında malzeme temini sağlayan LAFARGE ASLAN çimento fabrikasına, katkı malzemesi temin ettiğim Elkem Materials Yapı Kimyasalları'na, bana bilgi ve tecrübeleriyle yardımcı olan araştırma görevlilerine, laboratuvar hocalarıma, tüm laboratuvar personeline ve benden maddi manevi desteğini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Emir İLTER

Mayıs 2007

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2.GENEL BİLGİLER	4
2.1. Puzolanların Tanımı	4
2.2. Puzolanların Sınıflandırılması	4
2.3. Puzolanik Reaksiyon	5
2.4. Silis Dumanı	6
2.4.1. Tanımı	6
2.4.2. Silis Dumanının Yapısı	6
2.4.3. Silis Dumanının Kimyasal Yapısı	7
2.4.4. Silis Dumanının Aktivitesi	7
2.4.5. Silis Dumanlı Çimentolar	8
2.4.5.1. Silis Dumanının Çimento Tipi ile İlişkisi	9
2.4.5.2. Silis Dumanının Diğer Mineral Katkı Maddeleri ile İlişkisi	9
2.4.5.3. Jel Gözenek Suyu	9
2.4.6 Silis Dumanının Ortam Şartlarına Dayanıklılık Özellikleri	10
2.4.6.1. Geçirgenlik	10
2.4.6.2. Zararlı kimyasal maddeler ve sülfatlara karşı direnç	10
2.4.6.3. Alkali-agrega reaksiyonu	11
2.4.6.4. Çelik donatı korozyonu	11
2.4.6.5. Donma-çözölmeye karşı direnç	11
2.4.6.6. Aşınmaya karşı direnç	12
2.4.6.7. Yüksek sıcaklığa ve yangına karşı direnç	12
2.4.7. Silis Dumanının Taze Beton Özelliklerine Etkisi	13
2.4.7.1. İşlenebilme ve Su ihtiyacı	13
2.4.7.2. Priz süresi	13
2.4.7.3. Hidratasyon ısısı ve sıcaklık yükselmesi	13
2.4.7.4. Terleme ve plastik rötre	14
2.4.7.5. Hava sürüklenme	14
2.4.8. Silis Dumanının Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi	15
2.4.8.1. Basınç Dayanımı	15
2.4.8.2. Çekme ve Eğilme dayanımları	16

2.4.8.3. Elastisite modülü	16
2.4.8.4. Sünme ve rötre	17
2.8.4.5. Gözeneklilik, Geçirgenlik ve Su Emme	17
2.8.4.6. Agrega – Hamur Arayüzeyi	18
2.8.4.7. Aderans	18
2.8.4.8. Darbeye Karşı Dayanıklılık	19
2.5. k Etkinlik Faktörü ve Bu Konuda Yapılmış Çalışmalar	19
2.5.1. Basınç Dayanımı yardımıyla k etkinlik faktörü hesabı	20
2.5.2. Su Geçirirmliliği yardımıyla k etkinlik faktörü hesabı	23
2.5.3. Karbonizasyon yardımıyla k etkinlik faktörü hesabı	24
2.5.4. Klor Geçirirmliliği yardımıyla k etkinlik faktörü hesabı	25
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	32
3.1. Çalışmanın amacı	32
3.2. Üretilen Betonların Özellikleri	32
3.3. Kullanılan Malzeme Özellikleri	33
3.3.1. Çimento	33
3.3.2. Agregalar	35
3.3.3. Silis Dumanının Özellikleri	37
3.3.4. Süperakışkanlaştırıcı Katkı Maddesi	37
3.4. Beton Karışımları	38
3.5. Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme, Saklama ve Numune Boyutları	38
3.6. Taze Beton Deneyleri	38
3.7. Sertleşmiş Beton Deneyleri	39
4. DENEY SONUÇLARI	41
4.1. Taze Beton Deney Sonuçları	41
4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	42
4.2.1. Basınç Dayanımı	42
4.2.2. Su Emme Deneyleri	43
4.2.3. k Etkinlik Faktörünün Belirlenmesi	45
4.2.4. Oranlama Metoduna Göre k etkinlik Faktörünün Belirlenmesi	48
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	51
5.1. Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	51
5.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	52
5.2.1. Basınç Dayanımı Sonuçlarının İrdelenmesi	52
5.2.2. Su Emme Deney Sonuçlarının İrdelenmesi	58
5.2.3. k Etkinlik Faktörünün İrdelenmesi	63
6. SONUÇLAR	78

KAYNAKLAR

ÖZGEÇMİŞ

KISALTMALAR

ASTM	: American Society For Testing and Materials
ACI	: American Concrete Institute
TS	: Türk Standartları
CEN	: The European Standart Organization
SF	: Silis dumanı

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1 Pozolanların Sınıflandırılması Ve Türleri.....	4
Tablo 3.1 Üretilen Betonların İsimlendirilmesi.....	33
Tablo 3.2 Portland Çimentosunun Mekanik Özellikleri.....	34
Tablo 3.3 Portland Çimentosunun Fiziksel Özellikleri.....	34
Tablo 3.4 Portland Çimentosunun Kimyasal Özellikleri.....	34
Tablo 3.5 Agregaların Özgül Ağırlık Değerleri.....	35
Tablo 3.6 Agregaların Elek Analizi Sonuçları.....	35
Tablo 3.7 Standart Karışım Elek Analizi Değerleri.....	36
Tablo 3.8 Silis Dumanının Fiziksel Özellikleri.....	37
Tablo 3.9 Silis Dumanının Kimyasal Bileşimi.....	37
Tablo 4.1 Taze Beton Deney Sonuçları.....	41
Tablo 4.2 Deney Sonuçlarından Elde Edilen Basınç Dayanımı Değerleri.....	42
Tablo 4.3 90 Günlük Numunelerin Su Emme Deneyi İçin Gerekli Kuru Ve Yaş Ağırlıkları.....	43
Tablo 4.4 Üretilen 90 Günlük Betonların Ağırlıkça Su Emme Oranları.....	44
Tablo 4.5 Mukavemet İçin K Etkinlik Faktörü Değerleri.....	47
Tablo 4.6 Ağırlıkça Su Emme Oranı İçin Eşit İşlenebilme metodu ile hesaplanan k Etkinlik Faktörü Değerleri.....	48
Tablo 4.7 Oranlama Metoduna Göre Ağırlıkça Su Emme Oranı kullanılarak hesaplanan k Etkinlik Faktörü Değerleri.....	50
Tablo 5.1 Kontrol Betonuna Kıyasla Su İhtiyacı Değişimi.....	51
Tablo 5.2 Deney Sonuçlarından Elde Edilen Basınç Dayanımı Değerlerinin 28 Günlük Kontrol Betonlarına Göre Yüzdesel Olarak Karşılaştırılması.....	52

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : 20° C 'deki 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun çimento tipi ve silis dumanı yüzdesine bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri.....	21
Şekil 2.2 : 20° C 'deki 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun basınç dayanımı ve silis dumanı yüzdesine bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri.....	21
Şekil 2.3 : 20° C 'deki 1 ve 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun kür süresine bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri.....	22
Şekil 2.4 : 5° C 'deki 3 ve 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun kür süresine bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri.....	22
Şekil 2.5 : 35° C 'deki 1 ve 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun kür süresine bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri.....	23
Şekil 2.6 : Su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun basınç dayanımı ve kür koşullarına bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri.....	24
Şekil 2.7 : 1 ve 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun basınç dayanımı ve kür koşullarına bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri.....	25
Şekil 2.8 : k etkinlik faktörünün belirlenme şekli.....	29
Şekil 2.9 : Su/Çimento oranı ve k etkinlik faktörü arasındaki ilişki.....	30
Şekil 3.1 : TS 7706 Referans ve Karışım granülometri eğrileri.....	36
Şekil 4.1 : 90 günlük su içerisinde saklanmış 0.70 Su/Çimento oranlı %10 Silis Dumanı katkılı numunede k etkinlik faktörünün bulunması....	46
Şekil 4.2 : 90 günlük su içerisinde saklanmış 0,70 su çimento oranlı %10 silis dumanlı numunede Oranlama Metoduna göre k etkinlik faktörünün bulunması.....	49
Şekil 5.1 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,5 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği.....	53
Şekil 5.2 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,5 olan eşit işlenebilmeli hava içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği.....	53
Şekil 5.3 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,6 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği.....	54
Şekil 5.4 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,6 olan eşit işlenebilmeli hava içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği.....	55
Şekil 5.5 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,7 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği.....	56

Şekil 5.6 :	Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,7 olan eşit işlenebilmeli hava içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği	56
Şekil 5.7 :	Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,8 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği.....	57
Şekil 5.8 :	Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,8 olan eşit işlenebilmeli hava içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği.....	57
Şekil 5.9 :	Kontrol betonunun s/c oranı 0,5 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük Ağırılıkça su emme yüzdesi oranı-silis dumanı yüzdesi grafikleri.....	59
Şekil 5.10:	Kontrol betonunun s/c oranı 0,6 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük Ağırılıkça su emme yüzdesi oranı-silis dumanı yüzdesi grafikleri.....	60
Şekil 5.11:	Kontrol betonunun s/c oranı 0,7 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük Su emme yüzdesi grafikleri...	61
Şekil 5.12:	Kontrol betonunun s/c oranı 0,8 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük Su emme yüzdesi grafikleri...	62
Şekil 5.13:	Su ortamındaki numunelerin 7., 28. ve 90. gündeki k etkinlik faktörü-silis dumanı yüzdesi grafikleri.....	64
Şekil 5.14:	Hava ortamındaki numunelerin 7., 28. ve 90. gündeki k etkinlik faktörü-silis dumanı yüzdesi grafikleri.....	65
Şekil 5.15:	Ağırılıkça su emme oranına göre eşit işlenebilme metodu ile hesaplanmış su ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü silis dumanı yüzdesi grafikleri.....	66
Şekil 5.16:	Ağırılıkça su emme oranına göre eşit işlenebilme metodu ile hesaplanmış hava ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü silis dumanı yüzdesi grafikleri.....	67
Şekil 5.17:	Ağırılıkça su emme oranına göre Oranlama metoduyla hesaplanmış su ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü silis dumanı yüzdesi grafikleri.....	68
Şekil 5.18:	Ağırılıkça su emme oranına göre Oranlama metoduyla hesaplanmış hava ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü silis dumanı yüzdesi grafikleri.....	68
Şekil 5.19:	Su ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü-gün grafikleri.....	69
Şekil 5.20:	Hava ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü-gün grafikleri....	70
Şekil 5.21:	Su ortamındaki numunelerin 7. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	71
Şekil 5.22:	Hava ortamındaki numunelerin 7. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	71
Şekil 5.23:	Su ortamındaki numunelerin 28. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	72
Şekil 5.24:	Hava ortamındaki numunelerin 28. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	72
Şekil 5.25:	Su ortamındaki numunelerin 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	73
Şekil 5.26:	Hava ortamındaki numunelerin 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	73
Şekil 5.27:	Su ortamındaki numunelerin Ağırılıkça su emme oranı için eşit işlenebilme metoduna göre hesaplanmış 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	74

Şekil 5.28:	Hava ortamındaki numunelerin Ağırlıkça su emme oranı için eşit işlenebilme metoduna göre hesaplanmış 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	75
Şekil 5.29:	Su ortamındaki numunelerin Ağırlıkça su emme oranı için Oranlama metoduna göre hesaplanmış 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	76
Şekil 5.30:	Hava ortamındaki numunelerin Ağırlıkça su emme oranı için Oranlama metoduna göre hesaplanmış 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	76

SEMBOL LİSTESİ

C	: Çimento
SD	: Silis Dumanı
W	: Su
k	: Etkinlik Faktörü
C	: Çimento
φ	: Silis Dumanı/Çimento oranı
σ_b	: Basınç Mukavemeti

CEM I 42.5 ÇİMENTOLU YÜKSEK DOZAJLI BETONLARDA SİLİS DUMANININ ETKİNLİĞİ

ÖZET

Çeşitli ürünlerin elde edilmesi esnasında üretim amacının dışında yan ürün olarak üretilen birçok atık malzeme türü bulunmaktadır. Silis dumanı bu malzemeler arasında gerek miktar olarak gerekse inşaat sektöründeki kullanım olanakları açısından önemli bir yer tutmaktadır. Silis dumanları çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisidir.

Bu çalışmada Elkem Materials firmasından temin edilen silis dumanı ve CEM I 42.5 çimento kullanılmıştır. Çimento miktarı sabit tutularak %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı eklenerek betonlar üretilmiş ve silis dumanının betonun mukavemet ve ağırlıkça su emme oranı özelliklerine etkisi incelenmiştir. Numuneler hava ve su olmak üzere 2 farklı ortamda bekletilmiş, basınç dayanımına ve ağırlıkça su emme oranına bağlı olarak CEN TC 104 SCI adına çalışma grubunun önerdiği metotlardan eşit işlenebilme metodu kullanılarak silis dumanının etkinliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

350 kg/m³ dozlu çimento kullanılarak yapılmış olan çalışmada 4'ü kontrol betonu olmak üzere 16 seri beton üretilmiştir. Kontrol betonları 4 farklı Su/çimento oranına sahip olup (0,50, 0,60, 0,70 ve 0,80), bunlarda eşit işlenebilirlik verecek şekilde silis dumanlı betonlar üretilmiştir. 3 farklı oranda (%5, %10 ve %15) silis dumanı eklenmiştir. Her seride 10 adet 15x15x15 cm boyutlarında küp numune ve 1 adet 10x10x50 cm boyutlarında prizma numune üretilmiştir. Üretilmiş olan betonlar 23±2°C su içerisinde ve 20°C ile %65±5 rutubetli ortam olmak üzere 2 farklı kür koşulunda saklanmıştır. Agregra granülometrisinin sabit olduğu çalışmada, maksimum dane çapı 32 mm seçilmiştir. İşlenebilirlik, dört farklı oranda da kendi içinde sabit tutulmuş ve her seri için ön beton dökülerek ihtiyaç duyulan su miktarı belirlenmiştir.

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

Deneyler sonucunda silis dumanlarının betonda işlenebilirliği iyileştirdiği ve betonda su ihtiyacını azalttığı gözlenmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında genel olarak, silis dumanlı betonlar 28. güne kadar kontrol betonuna yakın değerler almışlar, ileriki yaşlarda ise kontrol betonunun üstünde değerler vermişlerdir. k etkinlik faktörü değerlerinde hava ve su ortamında en iyi sonucu %5 Silis dumanı katkılı numunelerin sağladığı görülmüştür. Ağırlıkça su emme oranı deneyleri sonucunda en yüksek su emme oranının %5 Silis dumanı katkılı betonda, en düşük su emme oranının ise %10 Silis dumanı katkılı betonda olduğu görülmektedir. Kür koşullarında ise, suda bekletilen numunelerin etkinlik faktörü değerlerinin genel olarak hava ortamında bekletilen numunelerden daha fazla olduğu görülmüştür.

EFFICIENCY OF SILICA FUME IN THE HIGH DOSAGE CONCRETES WITH CEM I 42,5 CEMENT

SUMMARY

In the process of making various products, we come up with many wastes as side products. One of the important wastes are blast furnace slag, with regard to its amount or field of use in civil engineering area. The silica fumes are mineral additives with pozzolanic properties and are one of the group of waste material products of metalurgy foundations.

In this study, the blast furnace slag from the Elkem Materials and CEM I 42.5 cement were used. Maintaining the cement amount fixed and at certain rates %5, %10 and %15 silica fume were added to concrete and the influence of the silica fumes on the resistance and water absorbe coefficient properties of the concrete were examined. The specimens were retained in 2 different cure, i.e. air and water and depending on the pressure strength and water absorbing ratios, the efficiency factor k of the silica fume was searched.

In the study using $350 \text{ kg} / \text{m}^3$ dosage cement, 16 series of concrete were produced of which 4 are controls. The control concretes had 4 different Water/cement ratios (0,50, 0,60, 0,70 and 0,80) and silica fume concretes were produced so that they will be provided with equal workability. Silica fumes at 3 different ratios (%5, %10 ve %15) were added. In each series, 10 units of $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$ cubic specimen and 1 unit of $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}$ prismatic specimen was produced. The produced specimens were cured in $23 \pm 2^\circ \text{C}$ water and 20°C with 65 ± 5 moisured air. Maximum aggregate size is selected 32 mm and aggregate granulometry is constant. Workability was maintained constant within itself in the four different ratios and for each series, a preliminary concrete was laid to determine the amount of water needed.

As for fresh concrete tests, slump, fresh density and air content while fort the hardened concrete tests, the compressive strength at the end of 7^{th} , 28^{th} and 90^{th} day in the water and air cure as well as the water absorbing tests for the 90^{th} days were performed. Using the compressive strength and water absorbing ratios so obtained, the k efficiency coefficient for the silica fume was obtained.

At the end of the tests it was found that silica improved the workability of the concrete while reducing the water requirement of the concrete. Considering the compressive strength results, the silica fume concretes realized close until 28^{th} day, while they provided higher values than the control concrete at the later ages. The water absorbing tests revealed that the samples to which 5% silica fume is added had highest water absorbe coefficient and showed a good performance. In the water and air, 5% silica fume added specimens provided the best results in the k efficiency coefficient values. Under the curing conditions, the k coefficient was higher in water medium when compared to air.

ÖNSÖZ

Bu tezi yöneten ve çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocam Prof. Dr. Mehmet UYAN ve Yrd.Doç.Dr. Hasan YILDIRIM'a

Çalışmalarım esnasında malzeme temini sağlayan LAFARGE ASLAN çimento fabrikasına, katkı malzemesi temin ettiğim Elkem Materials Yapı Kimyasalları'na, bana bilgi ve tecrübeleriyle yardımcı olan araştırma görevlilerine, laboratuvar hocalarıma, tüm laboratuvar personeline ve benden maddi manevi desteğini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Emir İLTER

Mayıs 2007

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2.GENEL BİLGİLER	4
2.1. Puzolanların Tanımı	4
2.2. Puzolanların Sınıflandırılması	4
2.3. Puzolanik Reaksiyon	5
2.4. Silis Dumanı	6
2.4.1. Tanımı	6
2.4.2. Silis Dumanının Yapısı	6
2.4.3. Silis Dumanının Kimyasal Yapısı	7
2.4.4. Silis Dumanının Aktivitesi	7
2.4.5. Silis Dumanlı Çimentolar	8
2.4.5.1. Silis Dumanının Çimento Tipi ile İlişkisi	9
2.4.5.2. Silis Dumanının Diğer Mineral Katkı Maddeleri ile İlişkisi	9
2.4.5.3. Jel Gözenek Suyu	9
2.4.6 Silis Dumanının Ortam Şartlarına Dayanıklılık Özellikleri	10
2.4.6.1. Geçirgenlik	10
2.4.6.2. Zararlı kimyasal maddeler ve sülfatlara karşı direnç	10
2.4.6.3. Alkali-agrega reaksiyonu	11
2.4.6.4. Çelik donatı korozyonu	11
2.4.6.5. Donma-çözölmeye karşı direnç	11
2.4.6.6. Aşınmaya karşı direnç	12
2.4.6.7. Yüksek sıcaklığa ve yangına karşı direnç	12
2.4.7. Silis Dumanının Taze Beton Özelliklerine Etkisi	13
2.4.7.1. İşlenebilme ve Su ihtiyacı	13
2.4.7.2. Priz süresi	13
2.4.7.3. Hidratasyon ısısı ve sıcaklık yükselmesi	13
2.4.7.4. Terleme ve plastik rötre	14
2.4.7.5. Hava sürüklenme	14
2.4.8. Silis Dumanının Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi	15
2.4.8.1. Basınç Dayanımı	15
2.4.8.2. Çekme ve Eğilme dayanımları	16

2.4.8.3. Elastisite modülü	16
2.4.8.4. Sünme ve rötre	17
2.8.4.5. Gözeneklilik, Geçirgenlik ve Su Emme	17
2.8.4.6. Agrega – Hamur Arayüzeyi	18
2.8.4.7. Aderans	18
2.8.4.8. Darbeye Karşı Dayanıklılık	19
2.5. k Etkinlik Faktörü ve Bu Konuda Yapılmış Çalışmalar	19
2.5.1. Basınç Dayanımı yardımıyla k etkinlik faktörü hesabı	20
2.5.2. Su Geçirimsizliği yardımıyla k etkinlik faktörü hesabı	23
2.5.3. Karbonizasyon yardımıyla k etkinlik faktörü hesabı	24
2.5.4. Klor Geçirimsizliği yardımıyla k etkinlik faktörü hesabı	25
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	32
3.1. Çalışmanın amacı	32
3.2. Üretilen Betonların Özellikleri	32
3.3. Kullanılan Malzeme Özellikleri	33
3.3.1. Çimento	33
3.3.2. Agregalar	35
3.3.3. Silis Dumanının Özellikleri	37
3.3.4. Süperakışkanlaştırıcı Katkı Maddesi	37
3.4. Beton Karışımları	38
3.5. Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme, Saklama ve Numune Boyutları	38
3.6. Taze Beton Deneyleri	38
3.7. Sertleşmiş Beton Deneyleri	39
4. DENEY SONUÇLARI	41
4.1. Taze Beton Deney Sonuçları	41
4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	42
4.2.1. Basınç Dayanımı	42
4.2.2. Su Emme Deneyleri	43
4.2.3. k Etkinlik Faktörünün Belirlenmesi	45
4.2.4. Oranlama Metoduna Göre k etkinlik Faktörünün Belirlenmesi	48
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	51
5.1. Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	51
5.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	52
5.2.1. Basınç Dayanımı Sonuçlarının İrdelenmesi	52
5.2.2. Su Emme Deney Sonuçlarının İrdelenmesi	58
5.2.3. k Etkinlik Faktörünün İrdelenmesi	63
6. SONUÇLAR	78

KAYNAKLAR

ÖZGEÇMİŞ

KISALTMALAR

ASTM	: American Society For Testing and Materials
ACI	: American Concrete Institute
TS	: Türk Standartları
CEN	: The European Standart Organization
SF	: Silis dumanı

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1 Pozolanların Sınıflandırılması Ve Türleri.....	4
Tablo 3.1 Üretilen Betonların İsimlendirilmesi.....	33
Tablo 3.2 Portland Çimentosunun Mekanik Özellikleri.....	34
Tablo 3.3 Portland Çimentosunun Fiziksel Özellikleri.....	34
Tablo 3.4 Portland Çimentosunun Kimyasal Özellikleri.....	34
Tablo 3.5 Agregaların Özgül Ağırlık Değerleri.....	35
Tablo 3.6 Agregaların Elek Analizi Sonuçları.....	35
Tablo 3.7 Standart Karışım Elek Analizi Değerleri.....	36
Tablo 3.8 Silis Dumanının Fiziksel Özellikleri.....	37
Tablo 3.9 Silis Dumanının Kimyasal Bileşimi.....	37
Tablo 4.1 Taze Beton Deney Sonuçları.....	41
Tablo 4.2 Deney Sonuçlarından Elde Edilen Basınç Dayanımı Değerleri.....	42
Tablo 4.3 90 Günlük Numunelerin Su Emme Deneyi İçin Gerekli Kuru Ve Yaş Ağırlıkları.....	43
Tablo 4.4 Üretilen 90 Günlük Betonların Ağırlıkça Su Emme Oranları.....	44
Tablo 4.5 Mukavemet İçin K Etkinlik Faktörü Değerleri.....	47
Tablo 4.6 Ağırlıkça Su Emme Oranı İçin Eşit İşlenebilme metodu ile hesaplanan k Etkinlik Faktörü Değerleri.....	48
Tablo 4.7 Oranlama Metoduna Göre Ağırlıkça Su Emme Oranı kullanılarak hesaplanan k Etkinlik Faktörü Değerleri.....	50
Tablo 5.1 Kontrol Betonuna Kıyasla Su İhtiyacı Değişimi.....	51
Tablo 5.2 Deney Sonuçlarından Elde Edilen Basınç Dayanımı Değerlerinin 28 Günlük Kontrol Betonlarına Göre Yüzdesel Olarak Karşılaştırılması.....	52

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : 20° C 'deki 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun çimento tipi ve silis dumanı yüzdesine bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri.....	21
Şekil 2.2 : 20° C 'deki 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun basınç dayanımı ve silis dumanı yüzdesine bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri.....	21
Şekil 2.3 : 20° C 'deki 1 ve 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun kür süresine bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri.....	22
Şekil 2.4 : 5° C 'deki 3 ve 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun kür süresine bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri.....	22
Şekil 2.5 : 35° C 'deki 1 ve 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun kür süresine bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri.....	23
Şekil 2.6 : Su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun basınç dayanımı ve kür koşullarına bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri.....	24
Şekil 2.7 : 1 ve 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun basınç dayanımı ve kür koşullarına bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri.....	25
Şekil 2.8 : k etkinlik faktörünün belirlenme şekli.....	29
Şekil 2.9 : Su/Çimento oranı ve k etkinlik faktörü arasındaki ilişki.....	30
Şekil 3.1 : TS 7706 Referans ve Karışım granülometri eğrileri.....	36
Şekil 4.1 : 90 günlük su içerisinde saklanmış 0.70 Su/Çimento oranlı %10 Silis Dumanı katkılı numunede k etkinlik faktörünün bulunması....	46
Şekil 4.2 : 90 günlük su içerisinde saklanmış 0,70 su çimento oranlı %10 silis dumanlı numunede Oranlama Metoduna göre k etkinlik faktörünün bulunması.....	49
Şekil 5.1 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,5 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği.....	53
Şekil 5.2 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,5 olan eşit işlenebilmeli hava içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği.....	53
Şekil 5.3 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,6 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği.....	54
Şekil 5.4 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,6 olan eşit işlenebilmeli hava içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği.....	55
Şekil 5.5 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,7 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği.....	56

Şekil 5.6 :	Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,7 olan eşit işlenebilmeli hava içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği	56
Şekil 5.7 :	Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,8 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği.....	57
Şekil 5.8 :	Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,8 olan eşit işlenebilmeli hava içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği.....	57
Şekil 5.9 :	Kontrol betonunun s/c oranı 0,5 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük Ağırılıkça su emme yüzdesi oranı-silis dumanı yüzdesi grafikleri.....	59
Şekil 5.10:	Kontrol betonunun s/c oranı 0,6 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük Ağırılıkça su emme yüzdesi oranı-silis dumanı yüzdesi grafikleri.....	60
Şekil 5.11:	Kontrol betonunun s/c oranı 0,7 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük Su emme yüzdesi grafikleri...	61
Şekil 5.12:	Kontrol betonunun s/c oranı 0,8 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük Su emme yüzdesi grafikleri...	62
Şekil 5.13:	Su ortamındaki numunelerin 7., 28. ve 90. gündeki k etkinlik faktörü-silis dumanı yüzdesi grafikleri.....	64
Şekil 5.14:	Hava ortamındaki numunelerin 7., 28. ve 90. gündeki k etkinlik faktörü-silis dumanı yüzdesi grafikleri.....	65
Şekil 5.15:	Ağırılıkça su emme oranına göre eşit işlenebilme metodu ile hesaplanmış su ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü silis dumanı yüzdesi grafikleri.....	66
Şekil 5.16:	Ağırılıkça su emme oranına göre eşit işlenebilme metodu ile hesaplanmış hava ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü silis dumanı yüzdesi grafikleri.....	67
Şekil 5.17:	Ağırılıkça su emme oranına göre Oranlama metoduyla hesaplanmış su ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü silis dumanı yüzdesi grafikleri.....	68
Şekil 5.18:	Ağırılıkça su emme oranına göre Oranlama metoduyla hesaplanmış hava ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü silis dumanı yüzdesi grafikleri.....	68
Şekil 5.19:	Su ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü-gün grafikleri.....	69
Şekil 5.20:	Hava ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü-gün grafikleri....	70
Şekil 5.21:	Su ortamındaki numunelerin 7. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	71
Şekil 5.22:	Hava ortamındaki numunelerin 7. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	71
Şekil 5.23:	Su ortamındaki numunelerin 28. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	72
Şekil 5.24:	Hava ortamındaki numunelerin 28. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	72
Şekil 5.25:	Su ortamındaki numunelerin 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	73
Şekil 5.26:	Hava ortamındaki numunelerin 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	73
Şekil 5.27:	Su ortamındaki numunelerin Ağırılıkça su emme oranı için eşit işlenebilme metoduna göre hesaplanmış 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	74

Şekil 5.28:	Hava ortamındaki numunelerin Ağırlıkça su emme oranı için eşit işlenebilme metoduna göre hesaplanmış 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	75
Şekil 5.29:	Su ortamındaki numunelerin Ağırlıkça su emme oranı için Oranlama metoduna göre hesaplanmış 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	76
Şekil 5.30:	Hava ortamındaki numunelerin Ağırlıkça su emme oranı için Oranlama metoduna göre hesaplanmış 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri.....	76

SEMBOL LİSTESİ

C	: Çimento
SD	: Silis Dumanı
W	: Su
k	: Etkinlik Faktörü
C	: Çimento
φ	: Silis Dumanı/Çimento oranı
σ_b	: Basınç Mukavemeti

CEM I 42.5 ÇİMENTOLU YÜKSEK DOZAJLI BETONLARDA SİLİS DUMANININ ETKİNLİĞİ

ÖZET

Çeşitli ürünlerin elde edilmesi esnasında üretim amacının dışında yan ürün olarak üretilen birçok atık malzeme türü bulunmaktadır. Silis dumanı bu malzemeler arasında gerek miktar olarak gerekse inşaat sektöründeki kullanım olanakları açısından önemli bir yer tutmaktadır. Silis dumanları çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisidir.

Bu çalışmada Elkem Materials firmasından temin edilen silis dumanı ve CEM I 42.5 çimento kullanılmıştır. Çimento miktarı sabit tutularak %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı eklenerek betonlar üretilmiş ve silis dumanının betonun mukavemet ve ağırlıkça su emme oranı özelliklerine etkisi incelenmiştir. Numuneler hava ve su olmak üzere 2 farklı ortamda bekletilmiş, basınç dayanımına ve ağırlıkça su emme oranına bağlı olarak CEN TC 104 SCI adına çalışma grubunun önerdiği metotlardan eşit işlenebilme metodu kullanılarak silis dumanının etkinliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

350 kg/m³ dozlu çimento kullanılarak yapılmış olan çalışmada 4'ü kontrol betonu olmak üzere 16 seri beton üretilmiştir. Kontrol betonları 4 farklı Su/çimento oranına sahip olup (0,50, 0,60, 0,70 ve 0,80), bunlarda eşit işlenebilirlik verecek şekilde silis dumanlı betonlar üretilmiştir. 3 farklı oranda (%5, %10 ve %15) silis dumanı eklenmiştir. Her seride 10 adet 15x15x15 cm boyutlarında küp numune ve 1 adet 10x10x50 cm boyutlarında prizma numune üretilmiştir. Üretilmiş olan betonlar 23±2°C su içerisinde ve 20°C ile %65±5 rutubetli ortam olmak üzere 2 farklı kür koşulunda saklanmıştır. Agregra granülometrisinin sabit olduğu çalışmada, maksimum dane çapı 32 mm seçilmiştir. İşlenebilirlik, dört farklı oranda da kendi içinde sabit tutulmuş ve her seri için ön beton dökülerek ihtiyaç duyulan su miktarı belirlenmiştir.

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

Deneyler sonucunda silis dumanlarının betonda işlenebilirliği iyileştirdiği ve betonda su ihtiyacını azalttığı gözlenmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında genel olarak, silis dumanlı betonlar 28. güne kadar kontrol betonuna yakın değerler almışlar, ileriki yaşlarda ise kontrol betonunun üstünde değerler vermişlerdir. k etkinlik faktörü değerlerinde hava ve su ortamında en iyi sonucu %5 Silis dumanı katkılı numunelerin sağladığı görülmüştür. Ağırlıkça su emme oranı deneyleri sonucunda en yüksek su emme oranının %5 Silis dumanı katkılı betonda, en düşük su emme oranının ise %10 Silis dumanı katkılı betonda olduğu görülmektedir. Kür koşullarında ise, suda bekletilen numunelerin etkinlik faktörü değerlerinin genel olarak hava ortamında bekletilen numunelerden daha fazla olduğu görülmüştür.

EFFICIENCY OF SILICA FUME IN THE HIGH DOSAGE CONCRETES WITH CEM I 42,5 CEMENT

SUMMARY

In the process of making various products, we come up with many wastes as side products. One of the important wastes are blast furnace slag, with regard to its amount or field of use in civil engineering area. The silica fumes are mineral additives with pozzolanic properties and are one of the group of waste material products of metalurgy foundations.

In this study, the blast furnace slag from the Elkem Materials and CEM I 42.5 cement were used. Maintaining the cement amount fixed and at certain rates %5, %10 and %15 silica fume were added to concrete and the influence of the silica fumes on the resistance and water absorbe coefficient properties of the concrete were examined. The specimens were retained in 2 different cure, i.e. air and water and depending on the pressure strength and water absorbing ratios, the efficiency factor k of the silica fume was searched.

In the study using $350 \text{ kg} / \text{m}^3$ dosage cement, 16 series of concrete were produced of which 4 are controls. The control concretes had 4 different Water/cement ratios (0,50, 0,60, 0,70 and 0,80) and silica fume concretes were produced so that they will be provided with equal workability. Silica fumes at 3 different ratios (%5, %10 ve %15) were added. In each series, 10 units of $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$ cubic specimen and 1 unit of $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}$ prismatic specimen was produced. The produced specimens were cured in $23 \pm 2^\circ \text{C}$ water and 20°C with 65 ± 5 moisured air. Maximum aggregate size is selected 32 mm and aggregate granulometry is constant. Workability was maintained constant within itself in the four different ratios and for each series, a preliminary concrete was laid to determine the amount of water needed.

As for fresh concrete tests, slump, fresh density and air content while fort the hardened concrete tests, the compressive strength at the end of 7^{th} , 28^{th} and 90^{th} day in the water and air cure as well as the water absorbing tests for the 90^{th} days were performed. Using the compressive strength and water absorbing ratios so obtained, the k efficiency coefficient for the silica fume was obtained.

At the end of the tests it was found that silica improved the workability of the concrete while reducing the water requirement of the concrete. Considering the compressive strength results, the silica fume concretes realized close until 28^{th} day, while they provided higher values than the control concrete at the later ages. The water absorbing tests revealed that the samples to which 5% silica fume is added had highest water absorbe coefficient and showed a good performance. In the water and air, 5% silica fume added specimens provided the best results in the k efficiency coefficient values. Under the curing conditions, the k coefficient was higher in water medium when compared to air.

1.GİRİŞ:

Betonda en önemli bileşen olan bağlayıcı maddelerin geçmişi günümüzden 5000 yıl öncelere kadar gitmekte ve eski Mısır kalıntılarında rastlanan alçı harçları ile başlayıp, eski Yunan ve Roma kalıntılarında rastlanan kireç harcı ile devam etmekte, yine eski Roma kalıntılarında rastlanan ve suda da sertleşebilen “kireç-puzolan” harç ve betonlarından geçerek yakın çağlara kadar gelmektedir. Kimyasal analiz metotlarının geliştirildiği yeni çağlarda ise su kireci, tabii çimento, portland çimentosu gibi yüksek kaliteli bağlayıcı maddelerin hızla geliştiği, bunlarda gerçek bileşimlerin ve kristal yapıların araştırmalarla ortaya konduğu, amaca uygun özel portland çimentoları ve özel çimento türlerinin geliştirildiği, yine araştırmalarla hidratasyon ürünleri, hidratasyon ısısı, priz ve sertleşme, hacim genleşmesi, rötre ve sünme gibi olayların da açıklandığı görülmektedir. Son yıllarda ise bu gelişmeleri katkı maddelerinin kullanılması ve silis dumanı, uçucu kül, cüruf, pirinç kabuğu külü gibi bağlayıcı atıkların kullanılması yenilikleri izlemiştir.[7]

Gelişen Sanayi ile birlikte endüstriyel alandaki üretimin sonucu birçok atık malzeme açığa çıkmaktadır. Bu atıkların büyük bir kısmı depo edilmekte bu da çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bunu önlemek amacıyla bu atık maddelerin çeşitli sektörlerde kullanılması gerekmektedir. Bu atık malzeme ve yan ürünlerin değerlendirilmesi, hem çok kısıtlı olan doğal malzemelerin kullanımını azaltarak doğanın tahrip edilmesini önlemekte, hem de malzemelerin atılmak üzere depolanması durumunda, çevrede meydana gelecek problemleri en aza indirmektedir. İnşaat mühendisliği alanı, atıl malzeme ve yan ürünlerin değerlendirilmesi açısından, yüksek hacimlerde malzeme kullanımına olanak verdiği için çok uygundur. Bir de inşaat mühendisliği uygulamalarında stabilitenin sağlanması için malzemelerin kompakt hale getirilmesi gerektiğinden çevre kirliliği problemi minimuma inmektedir.

Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkılardaki gelişmeler sonucu yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı betonların vazgeçilmez bir bileşeni haline gelen silis dumanı bugün endüstrisine problem yaratan bir atık değil para ile alınıp satılan değerli bir madde haline gelmiştir. Eldeki rakamlara göre Dünyadaki yıllık silis dumanı üretimi

1 milyon ton civarında olup bunda A.B.D.'nin payı 130.000 ton, Norveç2inki ise 120.000 ton civarındadır.

Silis dumanı bazı ülkelerde katkılı çimento üretiminde kullanılmakta olup portland silis dumanlı çimento türü Avrupa ve Türkiye standartlarında yer almaktadır. Ayrıca, kimyasal katkı ve silis dumanı ile başka maddeleri içeren patentli karışımlar klinker ile birlikte öğütülerek yüksek dayanım ve performanslı çimentolar elde edilebilmektedir.

Silis dumanı katkılı çimento ve betonlar yüksek dayanım ve dayanıklılık isteyen yerlerde kullanılmaktadır. Uygulama alanları olarak yerinde dökülmüş veya prefabrike yüksek dayanımlı veya erken dayanımı yüksek beton elemanları, ağır aşınmaya maruz döşemeler ve yol kaplamaları, erozyona ve oyulmaya maruz hidrolik yapılar, zararlı kimyasallara maruz betonlar, deniz yapıları, yüksek dayanımlı hafif beton elemanlar, beton elemanların onarımı ve güçlendirilmesi, çelik donatının korunması, yüksek performanslı çimento şerbet ve sıvaları sayılabilir.

Silis dumanı günümüzde yüksek dayanım ve performanslı çimento ve betonların üretiminde çok sık kullanılan bir katkıdır. Ülkemizde az miktarda elde edilmesine rağmen endüstride kullanılmakta ve üniversitelerde araştırmalara konu olmaktadır.

Türkiye’de silis dumanı Antalya’da Eti Elektrometalurji tesislerinde elde edilmektedir. Ferrosilisyum ve siliskoferrokrom baca tozları olarak yıllık üretim miktarları toplam 1.000-2.000 ton arasında değişmektedir. Buradan elde edilen silis dumanı1980’li yılların sonlarından itibaren özellikle üniversitelerimizde çimento ve beton katkı maddesi olarak çeşitli araştırmalarda kullanılmıştır. Silis dumanları zaman zaman inşaat, yalıtım ve ateş tuğlası endüstrilerinden alıcı bulmuştur. Son yıllarda bazı hazır beton üreticileri tarafından kullanılmaktadır.[8]

Bu çalışmada Lafarge Aslan çimentodan temin edilen CEM I 42.5 çimento ve Elkem Materials yapı kimyasallarından temin edilen silis dumanı kullanılmıştır. Çimento miktarı sabit tutularak belirli oranlarda (%5, %10 ve %15) silis dumanı eklenerek eşit işlenebilirliğe sahip 4’ü kontrol betonu olmak üzere 16 seri beton üretilmiştir.

Çimento dozajı $350 \text{ kg} / \text{m}^3$ olarak seçilmiştir. Her karışım için üretilen betonların yarısı hava ortamında yarısı su içerisinde saklanmıştır. 7.,28. ve 90. günlerde numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyleri, sadece 28. günde su emme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucu silis dumanının mekanik ve durabilite özelliklerine olan etkisi incelenmiş ve CEN TC 140 SCI adına çalışma grubunun önerdiği metotlardan eşit işlenebilme metodu kullanılarak k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur.

2. GENEL BİLGİLER:

2.1. Puzolanların Tanımı:

Yalnız başına kullanıldığı zaman bağlayıcılık özelliği olmayan fakat kireç yada çimento ile karıştırıldığı zaman su ile yaptığı reaksiyon sonucunda bağlayıcı madde özelliği kazanan maddelere puzolan denilmektedir.

Bilinen en eski yapı malzemesinin, Mısır piramitlerinde kullanılan kireç olduğu söylenmektedir. Daha sonraki dönemlerde ise Yunanlılar ve Romalıların keşfetmiş olduğu doğal puzolanlar kullanılmaya başlanmıştır. Romalılar daha ileriki dönemlerde Yunanlıların kullanmış olduğu teknikleri geliştirerek doğal puzolanları beton içerisinde kullanmaya başlamışlardır. Yapay puzolanların kullanılması ise daha ileriki dönemlerde olmuştur [18].

Puzolanik malzemeler genelde mineral katkı maddeleri olarak ta bilinmektedir. Bu mineral katkı maddeleri, betonun çeşitli fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini değiştirmek ve üretimde ekonomi sağlamak amacıyla kullanılan malzemelerdir.

Puzolanların içinde fazla miktarda koloidal elemanlar (özellikle silis ve daha az miktarda alümin) bulunmaktadır ve bu malzemeler betondaki boşluk yapısını iyileştirerek daha yoğun bir bağlayıcı hamurun oluşmasını, agrega-hamur ara yüzeyindeki aderansın artmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu mineral katkı maddelerinin süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddeleriyle birlikte kullanılmasıyla da beton üretiminde daha yüksek mukavemetlere erişmek mümkün olabilmektedir [18,36].

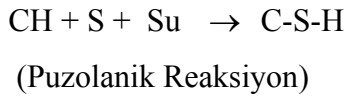
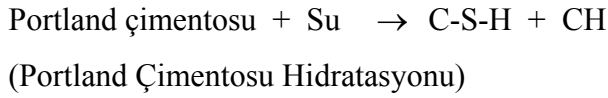
2.2. Puzolanların Sınıflandırılması

Tablo 2.1: Puzolanların sınıflandırılması ve türleri

DOĞAL PUZOLANLAR	YAPAY PUZOLANLAR
Volkanik curuflar	Yüksek fırın curufu
Volkanik tüfler	Uçucu kül
Kalşine kil ve seyl	Silis dumanı
Opalin silika	Pirinç kapçığı külü
Volkanik curuflar	Demirli olmayan curuflar

2.3. Pozolanik Reaksiyon

Puzolan içeren betonlarda temel pozolanik reaksiyon, puzolandaki silika (S) ile portland çimentosu hidratasyonu sonucu açığa çıkan serbest kireç (CH) arasında sulu ortamda şu şekilde gerçekleşmektedir;



Bu pozolanik reaksiyon sonucu portland çimentosunun silikatlı bileşenleri ile aynı hidrate ürünler açığa çıkmaktadır. Ancak, bu reaksiyonun hem serbest kireç oluşumunu beklemesi, hemde oldukça yavaş seyreden bir reaksiyon olması sonucu pozolanik etki nedeniyle mukavemet kazanma da yavaş olmaktadır. Kür sıcaklığının artması ve alkali ve sülfatlı bazı kimyasal katkı maddelerinin varlığı ise reaksiyonu hızlandırmaktadır.

Puzolan ve portland çimentosu karışımı hidratasyona girince pozolanik reaksiyonun etkisiyle bağlayıcı hamurundaki serbest kireç miktarı giderek azalmaktadır. Buna göre belirli bir süre sonunda puzolan içeren betonların serbest kireç ve daha çok kalsiyum silikat hidrate elemanları bulunmaktadır. Daha çok bağlayıcı ürün oluşması mukavemet artışına neden olurken, serbest kirecin azalması ve hamur boşluk yapısının iyileştirilmesi geçirimsizliği ve dolayısıyla zararlı dış etkilere dayanıklılığı artırmaktadır. Pozolanik reaksiyonun, portland çimentosu hidratasyonundan daha yavaş gelişmesi puzolanlı betonların mukavemet kazanma hızlarını da etkilemektedir. Genelde bu tür betonlarda ilk yaşlardaki mukavemetler daha düşük olmakta ancak puzolanların aktivitesinin yüksekliğine göre 28,56 yada 90 gün sonraki mukavemetler kontrol betonunu yakalamakta yada geçmektedir [7].

2.4. Silis Dumanı :

2.4.1. Tanımı :

Çimento ve betondaki enerjinin korunabilmesi için yapılan son araştırmalar, uçucu kül, yüksek fırın curufu ve doğal puzolan gibi malzemelerin üzerinde daha fazla yoğunlaşılmasını sağlamıştır.

En son olarak göz önüne alınan malzeme ise çimentoyla yer değiştirmek suretiyle yada karışıma bir mineral katkı maddesi olarak katılabilen *Silis dumanı* olmuştur [33].

Silis dumanı, ferrosilisyum ve silikon metalin üretimi sırasında oluşan bir yan üründür. Silis dumanı çok etkili bir puzolanik bir malzeme olmasına karşın beton içerisinde kullanıldığı zaman bazı problemler meydana gelmektedir [8].

Silis dumanının kullanılmasındaki zorluk, çok küçük taneli olması ve portland çimentosuyla karıştırıldığı zaman su ihtiyacının yüksek olmasıdır.

1976 yılından itibaren kullanılmaya başlayan Silis dumanı'nın performansı ile ilgili araştırmalar, halen Norveç ve Danimarka gibi çeşitli İskandinav ülkelerinde devam etmektedir. Kuzey Amerika'da ise Silis dumanıyla ilgili sınırlı sayıda kayıt bulunmaktadır [33].

2.4.2. Silis Dumanının Yapısı :

Silis dumanı, yüzey alanı yaklaşık olarak $20.000 \text{ m}^2 / \text{kg}$ olan çok küçük, düzgün yüzeyli, camsı ve küresel tanecikli bir yapıya sahiptir. Çok ince taneli ve hafif olduğundan özgül yüzey bazında inceliği Blaine metodu ile tayin edilememektedir. Bunda cihaz hücresine %50 boşluk oranı ile sıkıştırılmasındaki güçlük rol oynar. Çok ince taneli cisimlerde özgül yüzey Azot Adsorpsiyon (BET) metodu ile tayin edilebilmektedir. Burada özgül yüzey, tanelerin dış yüzeyleri ile içlerindeki açık boşlukların iç yüzeylerinden oluşan alanı 1 molekül kalınlığında bir tabaka ile kaplayacak azot gazı miktarından hesaplanmaktadır. Bu yöntem, taneler arasından hava geçiş hızını esas alan Blaine metodundan farklı olduğundan iki metodla elde edilen sayısal sonuçların doğrudan karşılaştırılması mümkün değildir [8,10].

2.4.3. Silis Dumanının Kimyasal Yapısı :

Silis dumanı tanecikleri yaklaşık olarak %90 (veya daha yüksek) oranda SiO_2 , (amorf olarak) içermektedir. İçerdiği diğer malzemeler ise, Karbon, Sülfür ve Alüminyum, Demir, Kalsiyum, Magnezyum, Sodyum ve Potasyum Oksittir.

Silis dumanının kimyasal yapısı ise alaşımın çeşidine ve üretildiği metalin cinsine göre değişmektedir. Örneğin, bir ferrosilisyum fırınından alınan Silis dumanı genellikle Silikon metali fırınından elde edilen Silis dumanından daha fazla Demir ve Magnezyum oksitleri içermektedir [33].

Silis dumanının esas kimyasal etkisi, Kalsiyumhidroksit ile girdiği reaksiyonun yüksek yüzey alanı ve amorf halede silis içeren diğer puzolanlara göre daha çabuk gerçekleşmesidir. 20° 'de kürlenmiş silis dumanı için puzolanik reaksiyon 2. günde başlayıp 28. günde tamamlanmaktadır. Kalsiyumhidroksit ile meydana gelen reaksiyonda porozite azalmaktadır çünkü puzolanik reaksiyon sonucu ortaya çıkan Kalsiyum Silika, silis dumanı ve Kalsiyum hidroksitten daha az yüzey alanı oluşturmaktadır [17].

2.4.4. Silis Dumanının Aktivitesi

Silis dumanı esas olarak %90 oranında Silisyum içeren SiO_2 bileşiminden meydana gelmektedir. Ayrıca çok az miktarda Karbon (C) ve diğer bileşenlerden oluşmaktadır. Çünkü Karbon hidratasyona katılmaz ve diğer bileşenler de çok düşük miktarda katılırlar, bu yüzden Silis dumanının %87.3 oranında Silis içerdiği varsayılır. Sonuç olarak, Silis dumanının aktivitesi aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir;



H konsantrasyonu ve porozite sonuçlarına bakıldığında, reaksiyona ilave edilen suyun, CH moleküllerinden daha fazla bağlayıcı özelliği olduğu görülmüştür. Bu nedenle, $z=0$ olur ve reaksiyon ürünleri $C_yS_xH_y$ şeklinde olmaktadır.

Sellevoid' ın yaptığı bir çalışmaya göre CSH içindeki bağlanmış suyun yüzdesi, Silis dumanı ile puzolanik reaksiyona giren CH'ın yüzdesi kadar olmaktadır. Bununla birlikte, Silis dumanlı çimento pastalarındaki çimentonun 1 gramındaki bağlanmış suyun yüzdesinin giderek arttığı gözlenmiştir.

Tamamen yakılmış CH bileşiminin toplam denge değeri de y/x oranını belirlemektedir.

Bu çalışmada, SFA1,SFA2 ve SFA3 numuneleri için hidratasyondan 1 yıl sonra Silis dumanı hacmi ve yakılan CH miktarları şu şekilde olmuştur; 41, 79 ve 106 kg / m^3 .

Aktif Silis dumanının ilk miktarı; SFA1=(%87.3) * 25.73 kg / m^3 = 22.46 kg / m^3

SFA2=44.92 kg / m^3 , SFA3=67.38 kg / m^3

Buradan y/x oranları şu şekilde bulunmaktadır; (S ve CH'ın moleküler ağırlıkları; 60.08 ve 74.10 olarak verilmektedir)

$$74.10*y/60.08*x = 41 / 22.46 \Rightarrow y/x = 1.48$$

$$74.10*y / 60.08*x = 79 / 44.92 \Rightarrow y/x = 1.43$$

$$74.10*y / 60.08*x = 106 / 67.38 \Rightarrow y/x = 1.28$$

Bu sonuçlara göre, y/x oranı 1.5 olarak tanımlanabilir. Bu durumda;



olarak elde edilir.

Silis dumanı ve CH reaksiyonunun sonuç ürünü $C_3S_2H_3$ 'nin, C_3S ve C_2S 'in hidratasyonu sonucu oluşan ürünle tamamen aynı olduğu görülmüştür. Sellevold'un bu çalışmasına ilave olarak birkaç araştırmacı daha bu sonuçlara yakın sonuçlar bulmuştur [23].

2.4.5. Silis Dumanlı Çimentolar

Yüksek dayanımlı veya performanslı betonlarda silis dumanı miktarı genellikle çimentonun %15'i kadar olmaktadır. Silis dumanlı çimentolardaki silis dumanının da bu miktarı geçmemesi beklenir. Silis dumanlı çimentoların üretimi ilk olarak İzlanda'da başlamış, bunu diğer ülkeler izlemiştir. Kanada'da iki büyük çimento şirketi %6.5-%8 oranlarında silis dumanı içeren katkı çimentolar üretmekte ve bunları normal portlanddan %10 kadar daha pahalı olarak piyasaya sürmektedirler. Türk standardı olarak kabul ettiğimiz Avrupa standardı TS EN 197-1 Avrupa ülkelerinde olduğu gibi ülkemizde de genel çimentolar içinde %6-%10 arasında silis dumanı içeren Portland Silis Dumanlı Çimento'ya yer vermektedir. Ayrıca, silis dumanı ile süperakışkanlaştırıcı katkıları da içeren bazı karışımların patentli olarak

formüle edilerek klinkerle birlikte öğütüldükleri ve yüksek performanslı çimentolar üretildiği bilinmektedir.

2.4.5.1. Silis Dumanının Çimento Tipi ile İlişkisi

Silis dumanı katkısı özellikle C_3S hidratasyonunu hızlandırmaktadır. Bu reaksiyondan meydana gelen CH'yi de bağlayarak C-S-H jeline dönüştüreceğinden silis dumanının C_3S miktarı yüksek çimentolarda daha etkili olacağı söylenebilir.

2.4.5.2. Silis Dumanının Diğer Mineral Katkı Maddeleri ile İlişkisi

Silis dumanının uçucu kül ve yüksek fırın curufu gibi diğer mineral katkılarla ilişkisi araştırılmıştır. Silis dumanı diğer puzolanların neden olduğu düşük ilk dayanımları yükseltmekte yararlı olabilmektedir. Çimento hidratasyonu sırasında başlangıçta oluşan CH silis dumanı tarafından bağlanmakta , diğer puzolanlar da geriye kalan CH ile reaksiyona girmektedir.

Bu şekilde uygun oranlar kullanıldığında silis dumanı ve mineral katkıları ile hem erken hem de ileri yaşlardaki dayanımlar olumlu etkilenebilmektedir. Uçucu kül katkılı hamurlarda uzayan priz süreleri %8 oranında katılan silis dumanı ile bir miktar kısaltılabilmektedir.

2.4.5.3. Jel Gözenek Suyu

Silis dumanı katkısı arttıkça hidratasyon ürünlerindeki Ca/Si oranı azalır ve C-S-H jeli daha fazla alkali ve alüminat bağlayarak jel gözenek suyundaki alkalilerin azalmasına neden olur. Ayrıca CH'nin de silis dumanı tarafından bağlanması sonucu ortamın pH değerinde düşüş görülür. Ancak, pratikte kullanılan silis dumanı miktarında bu düşüş çelik donatı çubuklarında korozyon riskini arttıracak kadar olmaz. Ayrıca silis dumanı katkılı çimento hamurlarında geçirgenliğin azalması da olası bir riski fazlasıyla dengeleyecek niteliktedir [8].

2.4.6 Silis Dumanının Ortam Şartlarına Dayanıklılık Özellikleri

2.4.6.1. Geçirgenlik

Normal betonlarda olduğu gibi silis dumanlı betonlarda da geçirgenlik bileşim, bileşenlerin özellikleri, yerleştirme koşulları ve bakım gibi faktörlere bağlıdır. Ancak, geçirgenliğin azalması bağlayıcı hidrasyonundan etkilendiğinden burada bakım metodu ve süresi daha da önem kazanmaktadır.

Silis dumanı, hamurlarda gözenek yapısını daha geçirimsiz hale getirmektedir. Ara yüzey bölgesinin de sıkılanması sonucu silis dumanı katkılı betonlarda benzer bakım koşullarındaki normal betonlara göre geçirgenlik azalmaktadır [8].

Genel olarak düşünüldüğünde, betonda geçirgenliği azaltmak için kullanılan Silis dumanının betonun erken yaşlardaki dayanımını artırdığı görülmüştür. Fakat bu, silis dumanının düşük oranlarda eklendiği düşük dayanımlı betonlar için geçerli bir sonuçtur [3,11].

2.4.6.2. Zararlı kimyasal maddeler ve sülfatlara karşı direnç

Silis dumanı, geçirgenliği etkin bir şekilde azaltması ve kalsiyum hidroksiti bağlamadaki yüksek aktivitesi dolayısı ile daha başlangıçtan itibaren betonda zararlı etkilere karşı en az diğer puzolanlar kadar direnç sağlar [11].

Silis dumanı katkısı özellikle sodyum sülfata karşı etkili olmaktadır. Fakat silis dumanı katkısının magnezyum sülfata karşı olan etkisi genellikle olumsuzdur. Diğer taraftan, silis dumanı katkısının harçların amonyum sülfata karşı olan direncini olumlu etkilediği yolunda bulgular vardır.

Yapılan diğer bir araştırmaya göre, %10-15 oranında çimentoyla yer değiştirilerek kullanılan silis dumanının, betonda sülfata karşı olan dayanımı artırdığı görülmüştür. [8].

2.4.6.3. Alkali-agrega reaksiyonu

Betonda zamanla genleşme ve çatlamalara ol açan alkali-agrega reaksiyonları genellikle alkali-karbonat ve alkali-silika reaksiyonları olarak iki ana grupta ele alınır.

Silis dumanı katkısının alkali-karbonat reaksiyonunun kontrol altına alınmasında fazla etkili olmadığı bildirilmektedir.

Alkali-silika reaksiyonu ise betona silis dumanı gibi bazı puzolanların yeterli miktarda katılması halinde geciktirilebilmekte veya önlenebilmektedir [8].

Yapılan bir araştırmaya göre, silis dumanının beton içerisinde katıldığı zaman Alkali-silika reaksiyonlarının geciktirilebildiğini yada tamamen önlenemediğini fakat silis dumanı ve agregaların kullanılmadan önce mutlaka araştırılması gerektiğini göstermektedir [16].

2.4.6.4. Çelik donatı korozyonu

Araştırma sonuçlarına göre silis dumanı katkısı dolayısı ile artan geçirimsizlik donatı çevresindeki betonda oksijen yayınmasını da azaltmakta, elektrik direncini yükseltmektedir.

Hızlandırılmış deneylerde, %10-20 oranlarında katılan silis dumanı ile korozyon başlangıcının önemli ölçüde geciktirdiği gözlenmiştir.

Diğer bir araştırmaya göre, %5 oranında kullanılan silis dumanının çelik üzerindeki korozyonu önemli ölçüde geciktirmediği fakat %10-%15 oranında kullanılan silis dumanının korozyonu geciktirdiği gözlenmiştir [25].

2.4.6.5. Donma-çözölmeye karşı direnç

Silis dumanı katkısının betonda donma-çözölme direnci üzerindeki etkisi konusundaki araştırmalardan çelişkili sonuçlar alınmaktadır. Bunun sebebi kullanılan malzeme özellikleri, beton karışımı, kür süresi ve hava katkısı gibi parametrelerdeki farklılıklara ilaveten uygulanan deney metodu da rol oynamaktadır.

Malhotra tarafından yapılan bir araştırmada ise, %0-5-10-15-30 oranlarında silis dumanı içeren ve 0,40 ve 0,60 Su/(imento+Bağlayıcı) oranlı betonun donmaya karşı direncinin zayıf olduğu görülmüştür [11].

Sabir tarafından yapılan diğer bir araştırmaya göre de %10-%20 oranlarında kullanılan silis dumanının donmaya karşı direnci düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır [27].

2.4.6.6. Aşınmaya karşı direnç

Silis dumanı katkısı gerek hamur gerekse hamur-agrega arayüzey dayanımlarını artırması nedeni ile betonun bu gibi yıpratıcı etkilere karşı direncini artırmaktadır.

2.4.6.7. Yüksek sıcaklığa ve yangına karşı direnç

Silis dumanı içeren betonlarda yüksek sıcaklıklara karşı direnç katkı miktarına ve dayanım düzeyine bağlı olarak değişebilmektedir. Silis dumanı miktarı %20'nin üzerinde olan yüksek dayanımlı betonların direnci normal dayanımlı betonlara göre daha azdır. Olumsuz etki, özellikle betonların rutubetli iken ani sıcaklık artışına maruz kalmaları halinde görülmekte, beton yüzeyinde kabarma ve parçalanmalar meydana gelmektedir [8,11].

Yapılan birkaç araştırma sonucuna göre, Silis dumanının kendi başına yangına karşı direncinin oldukça düşük olduğunu ve dolayısıyla beton içerisine katılan silis dumanının da betonun dayanımını düşüreceğini belirtmiştir [11].

Yapılan diğer bir araştırmaya göre de beton içerisinde düşük oranlarda kullanılan silis dumanının betonunun yüksek sıcaklıklardaki dayanımını etkilemediği ancak yüksek oranlarda kullanıldığında dayanımı azalttığı tespit edilmiştir [14].

2.4.7. Silis Dumanının Taze Beton Özelliklerine Etkisi

2.4.7.1. İşlenebilme ve Su ihtiyacı

Çok ince ve yuvarlak silis dumanı taneleri daha iri çimento taneleri arasına girerek burada sıkışan suyu dışarı iterler ve taze hamurun kıvamı üzerinde etkili hale getirirler. Bu olumlu etkiye karşın silis dumanı tanelerinin oluşturduğu büyük yüzey alanı su ihtiyacını artıracak ve kıvamı olumsuz etkileyecektir. Dolayısı ile sonuç hamurdaki çimento ve silis dumanı miktarları ile su/bağlayıcı malzeme orantısı gibi faktörlere bağlı olarak değişebilecektir. Araştırmalara göre çimentonun %5'i kadar katılan silis dumanı su ihtiyacını fazla değiştirmemekte, daha büyük miktarlarda ise su ihtiyacı artmaktadır. Benzer şekilde çimentonun %7.5'dan fazlası yerine silis dumanı katıldığında hamurun akma sınırı ve viskozitesinin arttığı, daha az miktarlarda ise azaldığı bulunmuştur [8,11].

Diğer bir deyişle, %5'ten daha yüksek oranlarda belirli bir işlenebilme düzeyi için karışım suyunu 1 L arttırmak gerekmektedir. İlave su, dayanımı düşüreceğinden silis dumanlı betonlarda akışkanlaştırıcı veya süper-akışkanlaştırıcı katkı kullanılması olağan hale gelmiştir. Katkı dozajı, katkının türüne, silis dumanı miktarına ve istenilen su/bağlayıcı orantısına bağlıdır.

2.4.7.2. Priz süresi

Silis dumanı katkısı çimento hamurunda priz sürelerini uzatmaktadır. Benzer şekilde taze betonda da görülmektedir. İlaveten betonda kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkıların da priz süreleri üzerinde etkileri söz konusudur. Örneğin, çimentonun %15'i yerine silis dumanı katılmış ve süperakışkanlaştırıcı kullanılmış betonlarda priz başlangıç ve bitiş sürelerinde sırası ile 1 ve 2 saatlik uzamalar gözlenmiştir. Diğer taraftan, aktivitesi daha az olan puzolanların sebep olduğu priz gecikmeleri silis dumanı ilavesi ile kısmen telafi edilebilmektedir .

2.4.7.3. Hidratasyon ısı ve sıcaklık yükselmesi

Çimentonun belirli bir miktarı yerine katılan puzolanlar hamurda açığa çıkan hidratasyon ısını azaltırlar. Silis dumanı katıldığında ise durum başlangıçta biraz

farklı olabilmektedir. Bazı araştırmacılara göre silis dumanı katkısının ilk 2-3 saat içinde hidrasyon ısını arttırdığını, ancak ileri yaşlarda eşit çimento dozajı bazında açığa çıkan ısıyı azalttığı belirtmektedirler. Başlangıçtaki ısı artışı silis dumanının çimento hidrasyonu hızlandırması ile açıklanmaktadır.

Silis dumanı katkısının hidrasyon ısısı üzerindeki etkisi çimentonun ne kadarı yerine katıldığına ve akışkanlaştırıcı kullanılma durumlarına bağlı olarak da değişebilmektedir. Silis dumanı katkısının betonda sadece hidrasyon ısını azaltmak amacı ile kullanılması tavsiye edilmemektedir .

2.4.7.4. Terleme ve plastik rötre

Silis dumanı tanelerinin büyük yüzey alanı taze beton içindeki serbest suyun önemli bölümünü bağlar. Ayrıca bu taneler boşluk ve gözenekleri doldurarak suyun beton yüzeyine çıkışını yavaşlatırlar. Sonuç olarak silis dumanı katkılı betonlarda terleme, katkı miktarı ile orantılı olarak önemli miktarda azalır.

Silis dumanı katılmış betonlarda terlemenin çok azalması veya hiç meydana gelmemesi özellikle beton yüzeyinden buharlaşmanın fazla olduğu ortamlarda plastik büzülmeden dolayı çatlama riskini artırır. Çatlakların oluşması priz başlangıcına kadar sürebilir. Bu süre içinde beton yüzeyinin kürüne itina edilmesi veya beton yüzeyinin örtülerek buharlaşmasının önlenmesi yararlı olur [8].

2.4.7.5. Hava sürüklenme

Silis dumanı, yaklaşık olarak basınç dayanımı 40-50 MPa olan betona ilave edildiği zaman hava sürüklenmeyi azaltmaktadır.

Bazı araştırmacılara göre, yüksek oranda silis dumanı ilave edilen betonda , süperakışkanlaştırıcı kullanıldığı durumda dahi %5 hava sürüklenmeyi tespit etmek oldukça zordur [2].

2.4.8. Silis Dumanının Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi

2.4.8.1. Basınç Dayanımı

Silis dumanı ilavesi, genel olarak boşluk çaplarını azaltması dolayısıyla betonun basınç dayanımı artırmaktadır. Silis dumanı, diğer puzolanlar gibi yeni C-S-H- jeli oluşmasını sağlamaları yanı sıra ince silis dumanı taneleri agrega-hamur arayüzey bölgesini kuvvetlendirerek beton dayanımını artırır. Buna karşın belirli bir işlenebilirlik için su ihtiyacını artırmaları gibi olumsuz etkileri de vardır. Dolayısı ile betondaki optimum silis dumanı miktarı bu etkilerin göreceli değerlerine bağlı olacak ve çimento, agrega, akışkanlaştırıcı katkı tipi ve miktarları ile bakım koşulları gibi klasik faktörlerden de etkilenecektir.[8,15]

Silis dumanının beton basınç dayanımına olumlu etkisi erken yaşlarda daha belirgindir. Normal bakım koşullarında bu etki 3-28 gün arasında kendini gösterir. İleri yaşlarda olumlu etki azalmakta olup bazı araştırmacılara göre silis dumanlı betonlarda dayanım 90, günden sonra düşebilmektedir. Diğer taraftan, 4-6 yıl sonra dahi dayanımlarda azalma olmadığını söyleyenlerde vardır [2,8].

Silis dumanlı betonun basınç dayanımı belirlemek için yapılan bir çalışmada yaklaşık 30 mm kalınlığa sahip silis dumanı katkılı beton kaplama malzeme üretilerek, üretilen numuneler üzerinde basınç deneyi yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda silis dumanı katkılı betonlar ile kontrol betonlarının basınç dayanımları karşılaştırıldığında erken dönemdeki basınç dayanımları arasındaki farkın çok az olduğu, ileriki dönemlerde ise kontrol betonuyla arasındaki farkın gittikçe arttığı gözlenmiştir.[12,20]

Silis dumanlı betonun basınç dayanımını belirlemek için yapılan diğer bir araştırmaya göre, su/çimento oranı 0,42 olan bir numunede %5 ile %30 arasında değişen oranlarda kullanılan silis dumanı için numunelerden elde edilen basınç dayanımı değerlerinin 55.0 ile 60.3 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir [22].

2.4.8.2. Çekme ve Eğilme dayanımları

Silis dumanı katkılı betonlarda çekme ve eğilme dayanımlarının basınç dayanımına oranı katkısız betonlarınkine benzerdir. Basınç dayanımı arttıkça çekme ve eğilme dayanımları da artar. Ancak artış hızı giderek yavaşlar. Silis dumanı miktarının artması veya süperakışkanlaştırıcı kullanılması eğilme-basınç dayanımları orantısının katkısız betonlarınkinden daha küçük olmasına yol açmaktadır [8].

Yapılan bir araştırmaya göre, %5 oranında Silis dumanı içeren ve 3 yıl hava ortamında bekletilmiş betonun çekme ve eğilme dayanımlarının basınç dayanımına oranı, katkısız betonunkine oldukça yakın çıkmıştır [11].

Silis dumanının çelik-beton yüzeyi arasındaki kenetlenme üzerindeki etkisini araştırabilmek için yapılan diğer bir araştırmaya göre hazırlanan numuneler üzerinde basınç ve eksenel çekme dayanımı değerleri ölçülmüştür ve sonuca göre çekme dayanımlarındaki artışı oranının basınç dayanımlarındaki artış oranına oldukça yakın değerler aldığı görülmüştür [13].

Özellikle Kireçtaşı ile yapılan testlerde, çekme dayanımlarında önemli artışlar meydana geldiği kaydedilmiştir.[24,28]

2.4.8.3. Elastisite modülü

Betona silis dumanı eklenmesiyle, beton karışımı içerisinde bulunan agrega ve hidrate olmuş çimento hamuru arasındaki geçiş bölgesinin porozitesi azalır. Dolayısıyla, agrega tanelerinin aralarındaki boşluk azalacak ve daha sert bir yapı oluşturarak betonun da daha sert, kompozit bir yapı olmasını sağlayacaktır [2].

Betonda elastisite modülü dayanımla birlikte artar, ancak artış katkısız betonlara göre daha yavaş olur. Bazı araştırmacılara göre normal ve silis dumanlı betonlarda gerilme-birim deformasyon ilişkisi veya aynı dayanımdaki elastisite modülü fazla farklılık göstermez. Diğer bir grup araştırmacıya göre silis dumanı katkısının elastisite modülünü arttıracaklarını ancak bu artışın dayanımdaki artış kadar fazla olmayacağını öne sürmüştür [8,11].

Yapılan bir araştırmaya göre, %5 oranında silis dumanı içeren numuneler ile %10,%15 ve %20 oranında silis dumanı içeren numunelerin elastisite modülleri karşılaştırılmış ve silis dumanı oranı yükseldikçe elastisite modülünün azaldığı görülmüştür.[21]

2.4.8.4. Sünme ve rötre

Çimento yerine ağırlıkça %15-25 miktarlarında katıldığında silis dumanı 50-100 MPa dayanım sınıflarındaki betonların sünmesini fazla etkilememektedir. Silis dumanı ile elde edilen yüksek dayanımlı, düşük çimento/bağlayıcı orantılı betonların sünmesi normal dayanımlı katkısız betonlarınkinden daha düşüktür.

Silis dumanlı betonlarda rötre, katkı miktarı, s/b orantısı ve ilk günlerdeki bakım koşullarından etkilenmekte ,bu faktörlere bağlı olarak elde edilen sonuçlar normal betonla elde edilenlerden farklı olabilmektedir. Katkı miktarı %10'dan az olduğunda rötre normal betonlardan farklı değildir. Daha yüksek silis dumanı miktarları, s/b orantısının 0.60'dan büyük olması, yetersiz ıslak bakım ve ileri yaşlar kuruma rötresini göreceli olarak artırmaktadır [8].

2.8.4.5. Gözeneklilik, Geçirgenlik ve Su Emme

Civalı porozimetre ile yapılan deneyler silis dumanı katkısının sertleşmiş çimento hamur ve harçlarında iri gözenekleri azaltarak daha fazla sayıda küçük gözenek oluşturduğunu ve gözeneklerin daha homojen olarak dağıldığını göstermiştir. Ancak iç yapıdaki toplam gözeneklilik değişmemektedir. Homojen yapı küçük gözeneklerdeki suyun daha yavaş ve kontrollü olarak buharlaşması ile ilişkilendirilmektedir.

Silis dumanı katkısı kılcal boşlukları küçülterek süresiz hale getirdiği için betonda geçirgenliği azaltır. Örneğin, çimento hamurunda $3,8 \times 10^{-13}$ m/s olarak ölçülen su geçirgenliği %10 ve %20 miktarlarında silis dumanı katıldığında sırası ile $0,9 \times 10^{-13}$ m/s ve $0,1 \times 10^{-13}$ m/s gibi değerlere düşmektedir.

2.8.4.6. Agrega – Hamur Arayüzeyi

Sertleşmiş çimento hamuru ile agregası arasında yaklaşık 50 μm kalınlığındaki arayüzey bölgesinin hidratasyon başlangıcından itibaren hamurun diğer bölgelerinden daha farklı bir yapı ile oluştuğu belirtilmiştir. Uçucu kül, yüksek fırın curufu ve özellikle silis dumanı katkıları bu bölgenin morfolojisini olumlu yönde değiştirerek beton dayanımının artmasına katkıda bulunurlar.

Silis dumanı katkısı ile bölgenin kalınlığı azalır. Bölgedeki CH kristalleri küçülür, eğimleri değişir, gözeneklilik azalır ve buradaki hamurun iç yapısı zamanla diğer bölgelerdekine benzemeye başlar.[32]

2.8.4.7. Aderans

Silis dumanlı betonlarda iç terleme azaldığından agregası alt yüzeylerinde olduğu gibi çelik donatı çubuklarının altında da su birikimi ve boşluk oluşumu azalır. Buna ilave olarak, daha sıkı ve yapışkan olan taze beton, agregayı, donatı çubuklarını ve betonun temasta bulunduğu diğer malzemeyi daha etkin olarak sarar, aradaki aderans kuvvetlenir.

Değişken tipteki agregalar ve %5’den %30’a kadar silis dumanı katkısı içeren betonlarda hamur-agrega arasındaki aderansın kuvvetlendiği çok sayıda araştırmacı tarafından bildirilmektedir. En az %5 Silis dumanı katkısı arayüzeyindeki kırılma enerjisini önemli ölçüde artırmaktadır.

Silis dumanlı betonlarda çelik donatıya olan aderans artmaktadır. Ezeldin ve Balaguru’ya göre %20 oranına kadar katılan silis dumanı ile donatı aderansı beton basınç dayanımının kare kökü ile orantılı olarak artmaktadır.

Arayüzey bölgelerindeki iyileşme silis dumanlı betonların diğer betonlara ve metal levha gibi diğer malzemeye daha kuvvetli yapışması yolu ile de kendini göstermektedir. Silis dumanlı hamurlarda karbon veya çelik liflere olan aderans da kuvvetlendirmektedir. Ancak, artan gevreklik nedeni ile lif tamamen sıyrılmadan önce hamurun çatlaması olasılığı vardır.[26]

2.8.4.8. Darbeye Karşı Dayanıklılık

Silis dumanı kakılı betonların dinamik yüklere karşı direncini belirlemek için yapılan bir çalışmada %25'e kadar silis dumanı katkısı içeren beton numuneler belirli yükseklikten düşen bir kütlenin ardışık darbelere maruz bırakılmışlar, ağırlık kayıpları ve ultrasonik puls geçiş hızları ölçülerek katkısız beton değerleri ile karşılaştırılmışlardır. Sonuçlara göre özellikle %10-15 katkı oranları betonun darbeye karşı direncini artırmaktadır. [8]

2.5. k Etkinlik Faktörü ve Bu Konuda Yapılmış Çalışmalar

Beton içerisindeki çimento ve bağlayıcı malzemelerin özelliklerini geliştirebilmek için karışım içerisinde puzolanik malzemeler katılmaktadır. *k* etkinlik faktörü bu bağlamda önemli bir yer tutmaktadır. *k* etkinlik faktörü genellikle basınç dayanımı üzerine kurulan hipotezlerle belirlenmektedir, buna ilave olarak kimi zaman karbonlaşma ve permeabilite gibi durabilite özelliklerine bağlı olarak ta hesaplanabilmektedir.

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

V.G.Papadakis ve S.Tsimas'ın yapmış oldukları çalışmaya göre Silisyum ve Alüminyumlu malzeme olarak birçok katı sanayi ürünü (uçucu kül, silis dumanı, curuf) ve bazı doğal puzolanik malzemeler (Volkanik tüfler, opalin, silika, vb.) çimento katkı malzemeleri (SCM) olarak bağlayıcı ve puzolanik özelliklerine göre çeşitlendirilebilir. Bu malzemeler çok geniş bir fiziksel ve kimyasal çeşitlilikte olup, betonda kullanımları için genel bir dizayn düzenlenmiştir.

Bu çalışmada etkinlik katsayısının konsepti, portland çimentosuyla karıştırılınca çimento katkı malzemelerinin performansının göreceli olarak ölçüsüdür. Çeşitli kompozisyonlardaki suni malzemeler ve bazı doğal puzolanlar üzerine çalışıldı. Basınç dayanımı ve hızlandırılmış klor penetrasyon testleri uygulandı. Bu testlerin sonucunda bu malzemeler için *k* etkinlik katsayıları hesaplandı.

Bugüne kadar yapılan tüm çalışmaların neticesinde çimento katkı malzemeleri agrega yerine konulunca basınç dayanımları kontrol betonundan yüksek çıktığı görülmüştür. Çimento katkı malzemeleri çimento yerine kısmi olarak yerleştirilince de erken dönemde basınç dayanımının daha düşük çıktığı, fakat ileriki dönemde karışımındaki daha yüksek aktif silika içeriğiyle çimentoyla beraber kontrol betonunun basınç dayanımını aştığı görülmüştür.

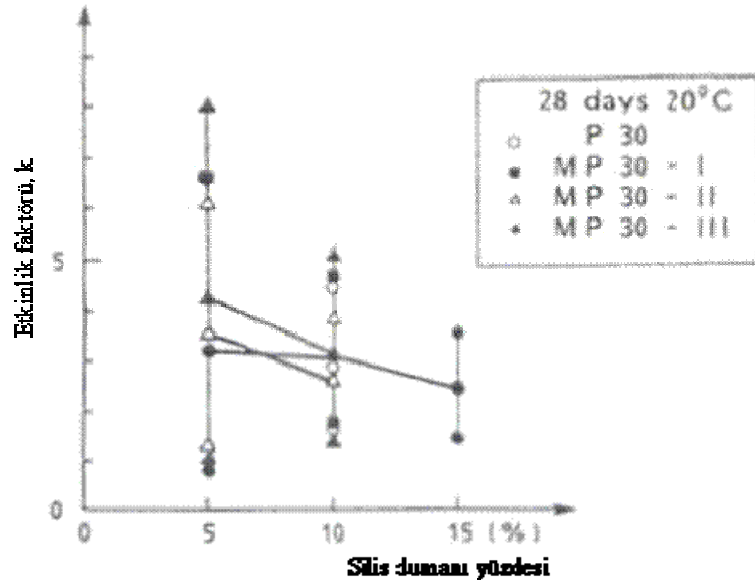
Silis dumanı için etkinlik faktörü k , beton karışım özellikleri değiştirilmeden, silis dumanının belirli bir kısmıyla yer değiştirebilen çimento tanelerinin sayısı olarak ifade edilir.[1,9]

2.5.1. Basınç Dayanımı yardımıyla k etkinlik faktörü hesabı

Bu faktörün ilk ortaya çıkışı, su içinde 28 gün bekletilen bir numune ile yapılan deney sonucunda bulunan basınç dayanımı yardımıyla hesaplanmıştır ve Silis dumanı için k etkinlik faktörü değerleri yaklaşık olarak 3-4 olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık değişimi ve kür koşullarına göre bu k etkinlik faktörü değişmektedir ve sıfıra kadar azalabilmektedir. Soğuk havada dökülen beton için bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.[33]

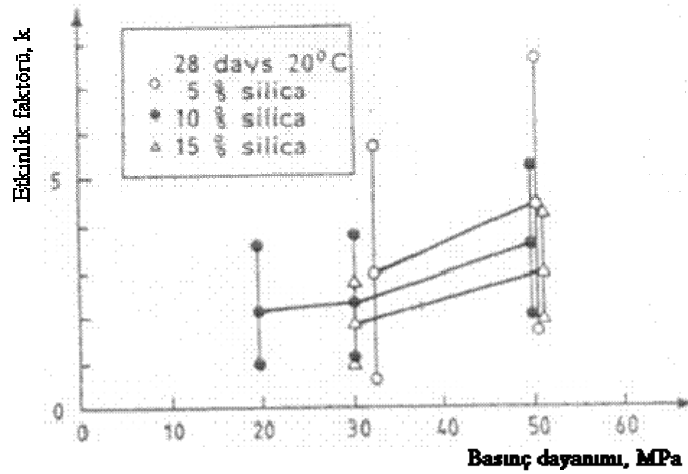
Silis dumanı için k etkinlik faktörünün hesabı için Şekil.2’de verilen 20°C’de su ortamında kürlen 28 günlük deney numunesini incelemek uygun olacaktır.

Şekil 2.1’de farklı Çimento tipleri ve farklı miktarlarda kullanılan Silis dumanı için hesaplanan k etkinlik faktörü değerleri gösterilmiştir. Burada görüldüğü gibi k etkinlik faktörü değerleri Çimento tiplerinden bağımsız olarak değişmektedir. Silis dumanı yüzdesinin artmasıyla da etkinlik faktörü değerleri fazla değişiklik göstermemektedir.



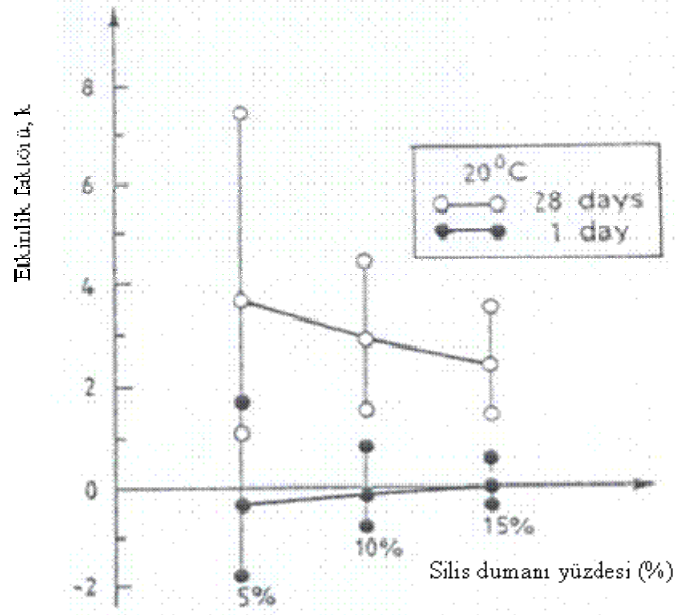
Şekil 2.1 : 20°C'deki 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun çimento tipi ve silis dumanı yüzdesine bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri

Şekil 2.2'de 20°C'de su ortamında kürlenmiş 28 günlük deney numunesi için basınç dayanımının k etkinlik faktörü değerleri üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Bu grafiğe göre k etkinlik faktörü, yüksek basınç dayanımı değerleri için de tanımlı olabilmektedir.



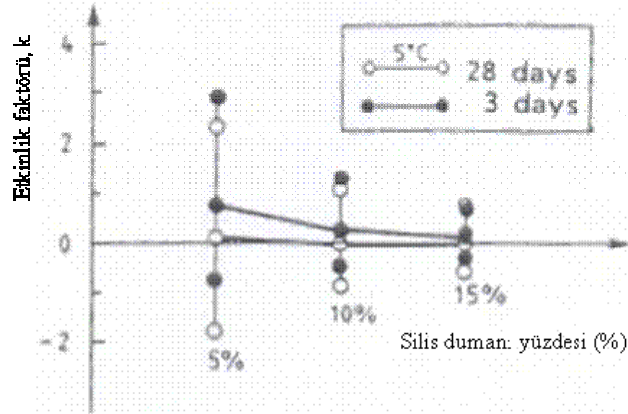
Şekil 2.2 : 20°C'deki 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun basınç dayanımı ve silis dumanı yüzdesine bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri

Şekil.2.3'de 20°C'de su ortamında kürlenmiş deney numunesinin 1. ve 28. günlerdeki k etkinlik faktörü değerleri gösterilmiştir. Bu grafiğe göre, k etkinlik faktörü değerleri 1. günden sonra sıfıra yaklaşmaktadır.



Şekil 2.3 : 20°C'deki 1 ve 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkı betonunun kütür süresine bağı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri

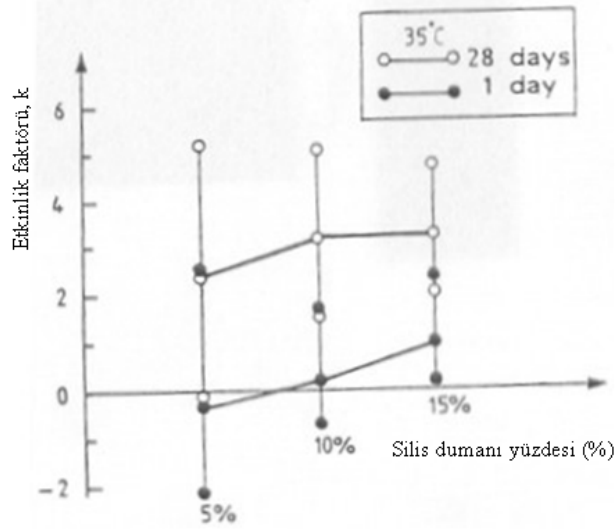
Şekil 2.4'de 5°C'de su ortamında kürlenenden deney numunesi için k etkinlik faktörü değerleri hesaplanmıştır. Buna göre, bu sıcaklıkta k etkinlik faktörü değerleri çok düşük basınç dayanımları vermesi ile birlikte 1. günden sonra hesaplanamamaktadır, onun yerinde 3. günden sonraki değerler hesaplanmıştır. Ayrıca, düşük sıcaklıklardaki reaksiyonlarda 28. günden sonra k etkinlik faktörü değerlerinin sıfıra yaklaştığı ve buradan hareketle pozolanik reaksiyonun başlamadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 2.4 : 5°C'deki 3 ve 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkı betonunun kütür süresine bağı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri

Şekil 2.5'de 35°C'de su ortamında kürlenenden deney numunesi için k etkinlik faktörü değerleri 1. günden sonra sıfıra yaklaştıkça, 28. günden sonra ise 3' yaklaştıkça.

Bu da 35°C 'deki su numunesi için 1.günden hemen sonra pozolanik reaksiyonun başlamadığını göstermektedir.



Şekil 2.5 : 35°C 'deki 1 ve 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkı betonunun kür süresine bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri

Deney sonuçlarına göre, 1 günden sonraki etkinlik faktörü değerleri için sabit bir değere ulaşabilmek için sıcaklık yaklaşık 50°C 'ye kadar yükseltilmelidir. Ayrıca nemli ortamda kürlenmiş deney numunesi ile su içinde kürlenmiş deney numunesi için erken yaştaki etkinlik faktörü değerleri karşılaştırıldığında aralarında önemli bir fark olmadığı ve 14 gün ve daha sonraki günler için k etkinlik faktörü değerleri, hava ortamında kürlenmiş numune için su ortamındaki numuneye göre daha düşük değerler aldığı görülmektedir.

Bununla birlikte, Beton karışımı içerisinde Silis dumanı ilave edilmesinin çimento miktarında azalma ihtiyacı meydana getirdiği ve dayanım seviyesinin sabit kaldığı görülmüştür. Buna ilave olarak, tek başına çimento miktarı azaltıldığında erken yaştaki dayanımın azaldığı görülmüştür.[2]

2.5.2. Su Geçirirliliği yardımıyla k etkinlik faktörü hesabı

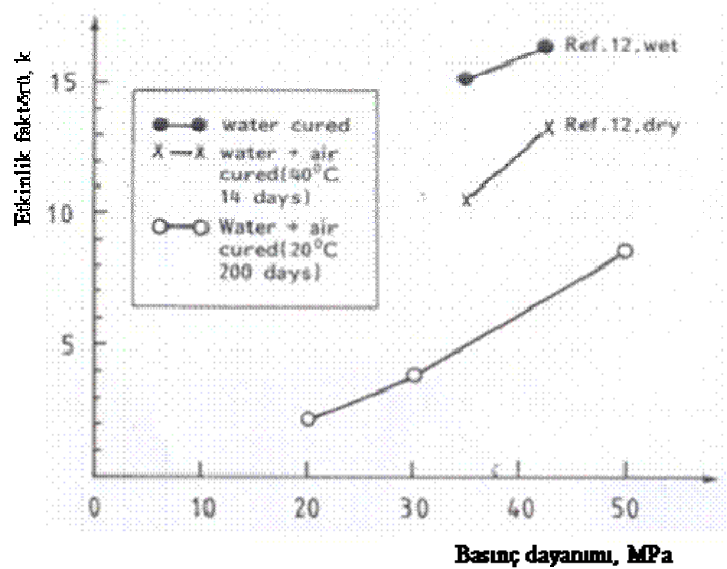
Su geçirirliliği, betonun durabilite özellikleri ve korozyon dayanımı üzerine tek başına etki edebilmektedir. Su geçirirliliği testlerinde, ölçülen değerlerin dağılımı oldukça yüksek olmakta ve sonuçları açıklamak oldukça zor olmaktadır.

Uygulanan test programında, 4 Çimento tipi arasındaki su geçirimsizliği arasındaki farklar oldukça küçüktür.

Şekil 2.6'de 4 Çimento tipi için hesaplanan ortalama değerler gösterilmiştir. Islak numuneler su içerisinde bekletilirken, nemli numuneler 14 günlük 40°C'deki su içerisindeki test işlemi gerçekleştirilene kadar su içerisinde tutulmuştur ve daha sonra test yapılmıştır.

Ayrıca, bu grafikte Su geçirimsizliğine dayanılarak hesap edilen k etkinlik faktörü değerlerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Etkinlik faktörü, basınç dayanımı arttıkça (Su/çimento oranı azaldıkça) artmaktadır.

Silis dumanı katkılı beton için, normal kür koşullarında saklanmış numunelerin kurutulması sonucu olarak düşük etkinlik faktörü değerleri çıkmakta ve bunun sebebi olarak ta beton içerisinde meydana gelen mikroçatlaklar gösterilmektedir. Bununla birlikte, tamamen su içerisinde tutulan numuneler için etkinlik faktörü değerlerinin negatif çıkabildiği de görülmüştür.



Şekil 2.6 : Su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun basınç dayanımı ve kür koşullarına bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri

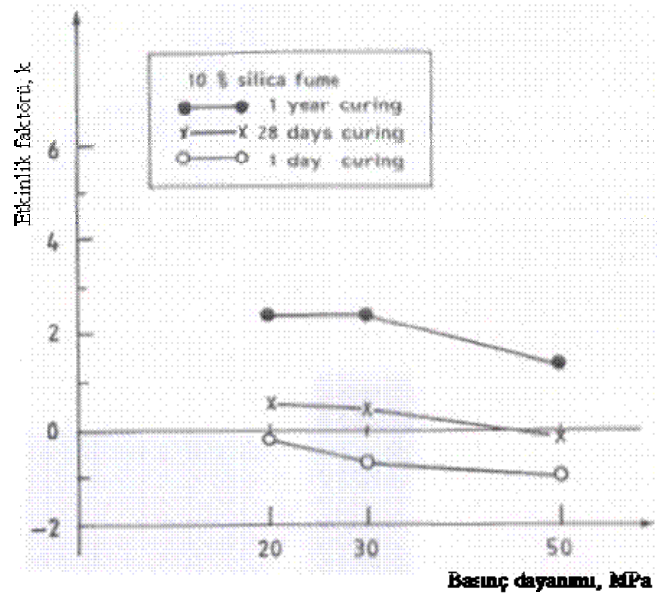
2.5.3. Karbonizasyon yardımıyla k etkinlik faktörü hesabı

Silis dumanı içeren beton içerisindeki $Ca(OH)_2$ miktarının azalması, silis dumanlı betonda gerçekleşen Karbonizasyonun silis dumanı içermeyen betona kıyasla daha

hızlı gerçekleştiğini göstermektedir. Beton geçirimsizliği de Karbonizasyon üzerinde önemli bir etken olmaktadır. $Ca(OH)_2$ ve Silis dumanı reaksiyonları arasındaki etkiler ve permeabilite de Karbonizasyon üzerinde etken olarak gösterilmektedir.

Şekil 2.7’de yapılan test sonuçları gösterilmektedir. Su içerisinde ileriki dönemlerde (1 yıl) etkinlik faktörü üzerinde pozitif bir etki meydana getirmekte ve değer olarak 2.0’a yaklaştırmaktadır. Bu sebepten dolayı permeabilite de azalma olmaktadır. Bu konudaki ana düşünce, basınç dayanımının artmasıyla k etkinlik faktörü değerlerinin yavaş olarak değişmesidir.

Bu kapsamda yapılan bazı araştırmalara göre, Silis dumanı katkılı beton için k etkinlik faktörü değerleri sıfıra yakın olarak değişmekte, fakat yapılan 20’nin üzerindeki araştırmaya göre de etkinlik faktörü değerleri 0 ile 1.0 değerleri arasında değişmektedir.



Şekil 2.7 : 1 ve 28 gün su içerisinde bekletilmiş Silis dumanı katkılı betonun basınç dayanımı ve kür koşullarına bağlı olarak hesaplanan etkinlik faktörü değerleri

2.5.4. Klor Geçirimsizliği yardımıyla k etkinlik faktörü hesabı

Klor geçirimsizliği, porozite ve boşluk çapı dağılımına bağlı olarak incelenmektedir. Pozolanik reaksiyonun boşluk dağılımına göre, normal koşullarda kürlenmiş Silis dumanı katkılı Çimentolar için azalan Klor geçirimsizliği olduğu tespit edilmiştir.[19]

Çimento tipleri için elde edilen ortalama değerler kullanılarak yapılan test sonuçlarına göre, 6 aydan daha fazla kürlenmiş Çimento pasta numunelerinde Klor geçirimsizliğine dayanarak hesaplanan etkinlik faktörü değerlerinin yüksek olduğu görülmüştür.

Bununla birlikte, betona ilave edilen %5 oranındaki Silis dumanının, %10 Silis oranındaki göre daha etkili olduğu belirlenmiştir. Bu da fazla gözenekli çimento pastalarında Silis dumanının etkisinin daha fazla olduğunu göstermektedir.

Test sonuçlarına daha detaylı bakıldığında, bunun sadece genel olarak bu şekilde kabul edilebileceği düşünülmüştür.

Norveç'te yapılan araştırmalara göre, etkinlik faktörünün Çimento pastalarında mı daha yüksek yoksa betonda mı daha yüksek olduğu tam olarak tespit edilememiştir. Bunun 2 sebebi olduğu düşünülmektedir. Birincisi, bir iskele yapısı düşünüldüğünde klorun, difüzyonla ve kapiler emilim ile taşınmakta olduğu anlaşılmıştır. Kapiler emilim difüzyondan daha hızlı gerçekleşen bir olaydır.

İkinci olarak, Silis dumanı içeren betonda mikroçatlak artışına karşı bir eğilim olduğu görülmüştür. Bunun sebebi de hızlı klor geçişidir.[2]

Çeşitli ülkelerde yapılan araştırmalar sonucunda Silis Dumanı için etkinlik faktörü değerlerinin 1.0 ile 2.5 arasında değiştiği görülmüştür. Bu değerler, Çimento tipine ve uygulanan metoda göre değişmektedir. Etkinlik faktörünün hesaplanması için Standard bir metot bulunmamakla birlikte sık kullanılan birkaç metot bulunmaktadır.[1,30]

- Maage, beton basınç dayanımı ve su/çimento arasındaki ilişkiyi kullanarak k etkinlik faktörünün hesabını şu şekilde yapmıştır [1];

$$k = \frac{(w/c)_s - (w/c)_r}{(s/c)_s * (w/c)_r}$$

Burada ,

$(w/c)_s$: Silis dumanı katkılı betonda su/çimento oranı

$(w/c)_r$: Katkısız betonda su/çimento oranı

$(s/c)_s$: Silis dumanı katkılı betonda, silis dumanı ve çimentonun arasındaki kütle oranı

Silis dumanının etkinlik faktörünü hesaplayabilmek için betonun basınç dayanımı, su geçirimsizliği, karbonlaşma ve klor difüzyonu durumları, ayrıntılı bir araştırma yapılarak incelenmelidir.

Etkinlik faktörünün hesaplanması için kesin bir yöntem yoktur, fakat Maage tarafından yapılan deney sonuçlarını göz önünde bulundurmak gerekir [1];

1) Silis dumanı için etkinlik faktörü değerleri, beton dayanım sınıfına, silis dumanı miktarına, kür sıcaklığına ve koşullarına bağlı olarak değişebilir. Bu değişim **-0.5 - +4.5** arasında olmalıdır.

2) Su geçirimsizliği için etkinlik faktörü değerleri, beton dayanım sınıfına ve kür koşullarına bağlı olmak koşuluyla 6 ay sonrasında, 2 ile 16 değerleri arasında değiştiği görülmüştür.

3) Karbonlaşma için etkinlik faktörü değerleri, yine kür koşullarına bağlı olarak -1.0 ile +2.5 arasında değişmiştir.

4) Çimento pastasındaki klor geçirimsizliği için etkinlik faktörü değerleri silis dumanı miktarı ve su/(çimento+katkı) oranına bağlı olarak 5 ile 19 değerleri arasında değişmiştir.

- Yeni Zelanda’da yapılan diğer bir çalışmada, Mikrosilica-600 adı verilen Silis dumanı kullanılarak yapılan deney çalışmalarında k etkinlik faktörü değerlerinin **2.1 – 3.3** arasında değiştiği gözlenmiştir. Örneğin maksimum basınç dayanımı 55 MPa olan bir endüstri yapısı betonu için etkinlik faktörü değeri **2.5** olarak bulunmuştur.[35]
- Norveç ve Kanada’da yapılan bir çalışmada ise, 0,55 ve daha yüksek Su/Çimento oranı olan ve %0-10 yüzde oranıyla çimentoyla yer değiştirilerek kullanılan silis dumanı için etkinlik faktörü değerlerinin **3.0-4.0** aralığında değiştiği görülmüştür.[33]

- Esping tarafından yapılan bir çalışmada ise, çimento ağırlığının %5-10'u oranla karışıma silis dumanı eklenmiştir ve silis dumanı ilavesiyle birlikte çimento miktarı azaltılmıştır. Başlangıçta 0,55 olan Su/Çimento oranı, Silis dumanı ilavesinden sonra Su/(çimento+bağlayıcı) olarak 0,58-0,61 değerleri arasında değişmiştir ve etkinlik faktörü değeri yaklaşık olarak **2.0** bulunmuştur.[34]

1996 yılında The European Standart Organization (CEN) k etkinlik faktörünün saptanması için bir çalışma grubu kurulmasını kararlaştırdı. 2000 yılında da CEN TC 140 SCI adına çalışma grubu (WG12) yayınladığı raporunda k etkinlik katsayısının belirlenmesi için çeşitli metotlar önermiştir. Bu raporda k etkinlik faktörünün hesabındaki temel nokta, kontrol betonu ve Silis dumanı eklenen betonların basınç dayanımının su/çimento oranıyla ilişkisidir. Yani önerilen metotta, Silis dumanı çimento miktarından çıkarılmamakta, belirli oranlarda eklenip basınç dayanımı su/bağlayıcı oranı grafiği yerine, basınç dayanımı su/çimento oranı grafiği çizilmekte ve daha sonra aynı basınç dayanımındaki Silis dumanlı beton diyagramlarının normal beton diyagramlarına çakışması sağlanarak k etkinlik faktörü bulunmaktadır. Bununla ilgili grafik Şekil 2.4'de gösterilmiştir.

Biz bu çalışmada bu metodu Silis dumanı için uygulayacağız. Bu metodu diğer metotlardan ayıran en önemli nokta çimento miktarının sabit kalması ve onun üzerine belirli oranlarda Silis dumanı eklenmesidir. Bununla birlikte formülasyon şu şekilde olmaktadır;

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

$$W_o = W_{\varphi} / (1 + k\varphi) \text{ denklemi elde edilir.} \quad (2.4)$$

k : etkinlik faktörü

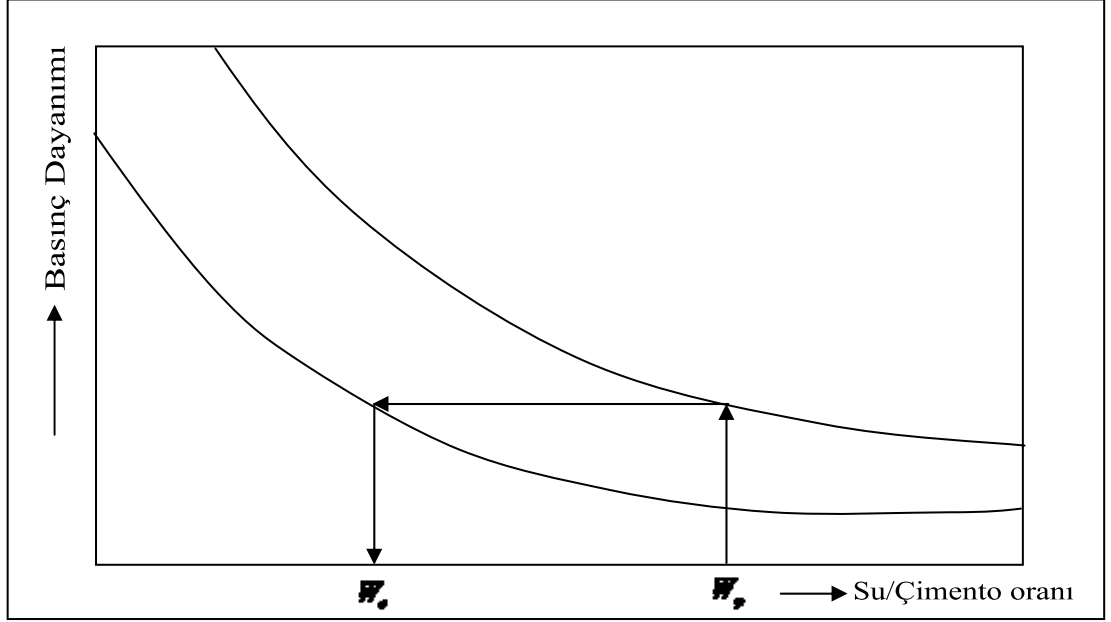
φ : Silis dumanı/Çimento oranı

W_o : Kontrol betonunun Su/Çimento oranı

W_{φ} : Silis dumanlı betonun Su/Çimento oranı

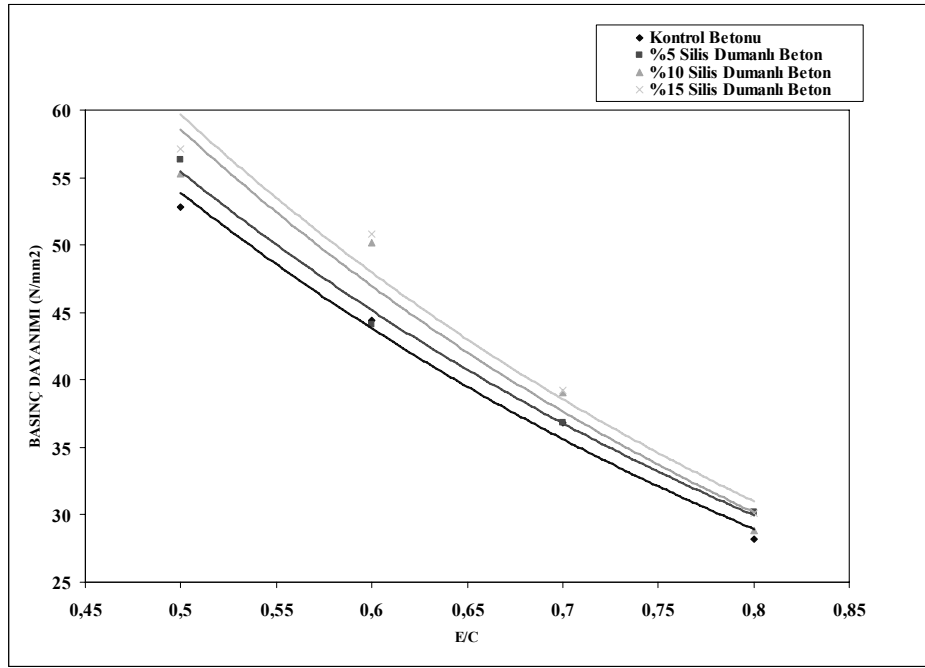
4.4. denklemden k değerini çekersek;

$$k = [(W_{\phi} / W_o) - 1] \times (1 / \phi) \quad \text{olarak bulunur.} \quad (2.5)$$



Şekil 2.8 : k etkinlik faktörünün belirlenme şekli

CEN TC 140 SCI adına çalışma grubu k etkinlik faktörünü etkileyen birçok faktörü olduğunu belirtmiştir. Bunlar, eklenen silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri, silis dumanının eklenme miktarı, çimento tipi, su/çimento oranı, kür koşulları, silis dumanı/çimento oranı, sıcaklık gibi faktörlerdir. Şekil 2.5’de 28 günlük silis dumanlı numunelerin çalışma grubunun önerdiği metoda göre bulmuş olduğumuz k etkinlik değerleri – su/çimento oranı grafiği verilmiştir.[41]



Şekil 2.9 : Su/Çimento oranı ve k etkinlik faktörü arasındaki ilişki

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

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

$$\beta_{D0} = a_0 - b_o * w_0 \quad (2.6)$$

$$\beta_{DF} = a_f - b_f * w_\varphi \quad (2.7)$$

W_o : Kontrol betonunun Su/Çimento oranı

W_φ : Silis dumanlı betonun Su/Çimento oranı

β_{D0} : Kontrol betonunun basınç dayanımı

β_{DF} : Silis dumanlı betonun basınç dayanımı

a_0, b_o, a_f, b_f : Basınç dayanımı Su/Çimento oranı arasındaki lineer parametrelerdir.

Burada $\beta_{DF} = \beta_{D0}$ eşitliğini uygulayarak ve 2.5 denklemini kullanarak k değeri çekilirse aşağıdaki denklem elde edilir;

$$k = [W_0 b_0 / a_0 - (a_f - b_f w \varphi) - 1] * 1 / \varphi \quad (2.8)$$

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

$$f_{c1} = A + B / W_0 \quad (2.9)$$

$$f_{c2} = P + Z / W_\varphi \quad (2.10)$$

Bu metotta da daha önceki metotta olduğu gibi f_{c1} ve f_{c2} denklemleri eşitlenip, 2.12 denklemi kullanılarak k etkinlik değeri bulunmaktadır.

c) Eşit işlenebilme metodu : Bu metodun temel noktası kontrol betonlarının ve silis dumanı eklenen betonların eşit çökmeye sahip olmasıdır. Bu eşit çökme silis dumanı eklenen betonlara su ekleyerek veya akışkanlaştırıcı kullanarak sağlanır. Daha sonra kontrol betonlarının ve silis dumanlı betonların daha önceki metotlardaki gibi dayanım-Su/Çimento oranı grafikleri çizilerek 2.5. denkleminde k etkinlik faktörü bulunur.

Şimdiye kadar yapılan çalışmalar sonucunda silis dumanının etkinlik faktörünün hesabında belli bir fikir birliğine varılamamıştır. Bunun sebebi de k etkinlik faktörü değerinin birçok faktöre bağlı olarak değişmesi ve k_e etkinlik faktörünün bulunması için çok farklı yöntemlerin bulunmasıdır.

Bu tez çalışmasında k etkinlik faktörünü hesaplayabilmek için CEN TC 140 SCI adına çalışma grubunun önerdiği grafiksel metotlardan “Eşit İşlenebilme Metodu” kullanılmıştır. Karşılaştırılacak olan kontrol betonu ve silis dumanlı betonlar, eşit çökme değerleri verilecek şekilde üretilmiştir. Çalışmada, Microsilica Grade 940 Silis dumanı ve CEM 42.5 çimento kullanılmıştır. Çimento dozajı 350 kg/m^3 seçilerek yüksek dozajlı betonlardaki Silis dumanının etkinliği araştırılmıştır. Bununla birlikte yüksek dozajda silis dumanı kullanımının poroziteye olan etkisini incelemek için su emme deneyleri de yapılmıştır.

3.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Çalışmanın Amacı:

Bu çalışmada, Eklem Materials firmasından temin edilen Grade 940 Silis dumanı ve Lafarge Aslan çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 çimento kullanılmıştır. Yüksek çimento dozajı seçilerek (350 kg/m^3) Silis dumanının betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmekte ve etkinliği belirlenmektedir.

Çalışmanın ana amacı olan k etkinlik faktörünün belirlenmesinde bugüne kadar birçok çalışma yapılmış ve çok farklı yöntemler denenmiştir. Bu çalışmada basınç dayanımı – Su/Çimento oranı ve Su emme – Su/Çimento oranı arasındaki ilişki kullanılarak iki türlü k etkinlik katsayısının belirlenmesi amaçlanmış ve CENTC140 SCI adına çalışma grubunun önerdiği metotlardan eşit işlenebilme metodu kullanılmıştır.

3.2. Üretilen Betonların Özellikleri:

İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılan çalışmada üç farklı Silis dumanı ekleme oranı (%5,%10 ve %15), dört farklı Su/Çimento oranı ve kontrol betonu da olmak üzere toplam 16 seri beton üretilmiştir. Numuneler $23 \pm 2^\circ \text{C}$ 'lik su içerisinde ve 20°C ile $\%65 \pm 5$ rutubetli ortamda saklanmıştır.

Üretilen betonlarda PÇ42.5 çimento ve Silis dumanı kullanılmıştır. Çimento dozajı sabit olarak 350 kg/m^3 seçilmiştir. İlk önce dört çeşit oranda (0,50,0,60,0,70 ve 0,80) kontrol betonu üretilmiş daha sonra aynı işlenebilirliği verecek şekilde üç farklı oranda Silis dumanı eklenen (%5,%10 ve %15) betonlar üretilmiştir. Aynı işlenebilirlik Silis dumanı içeren betonlarda ihtiyaç olduğu takdirde su ilave edilerek sağlanmıştır.0,50, 0,60, 0,70 ve 0,80 Su/Çimento oranlarında üretilen kontrol betonu ve Silis dumanı eklenen betonlarda süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Çalışmada agrega granülometrisi ve agrega türü aynı kalmış, maksimum dane çapı 32 mm

olarak seçilmiştir. Üretilen betonların karışım oranlarına göre isimlendirilmesi Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 :Üretilen Betonların İsimlendirilmesi

Silis Dumanı Ekleme Yüzdesi (%)	Üretim Grupları
0	KON50
5	SD5K50
10	SD10K50
15	SD15K50
0	KON60
5	SD5K60
10	SD10K60
15	SD15K60
0	KON70
5	SD5K70
10	SD10K70
15	SD15K70
0	KON80
5	SD5K80
10	SD10K80
15	SD15K80

KON50 : Su/Çimento oranı 0,5 olan kontrol betonu

SD15K50 : Kontrol betonunun Su/Çimento oranı 0,5 olan eşit işlenebilmeli %15

Silis dumanı eklenmiş betonu

3.3. Kullanılan Malzeme Özellikleri:

3.3.1. Çimento

Beton üretiminde Lafarge Aslan çimento fabrikasının üretimi olan CEM I 42,5 tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal özelliklerini, fiziksel ve mekanik özelliklerini gösteren deneyler Lafarge Aslan çimento fabrikasında yapılmış, bu deneylerin sonuçları Tablo 3.2, Tablo 3.3 ve Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.2 : Portland Çimentosunun mekanik özellikleri

Özgöl Ağırlık (kg / dm^3)		3.14
Priz süresi	Başlangıç	150 dakika
	Son	180 dakika
Hacim Sabiliği (Le Chatelier) Toplam (mm)		0,5
İncelik	Özgöl Yüzey (Blaine) cm^2 / gr	3490
	200 μm elek üstünde kalan yüzde (%)	0,1
	90 μm elek üstünde kalan yüzde (%)	1

Tablo 3.3 : Portland Çimentosunun fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasala Bileşimin Yüzdesi
Toplam SiO_2	20,11
Çözünmeyen Kalıntı	0,57
Al_2O_3	4,90
Fe_2O_3	2,83
CaO	64,37
MgO	1,49
SO_3	2,98
K_2O	0,72
Na_2O	-
Kızdırma Kaybı	2,40
Tayin edilemeyen	0,20
$S.CaO$	0,67
Klorür	0,02
Rutubet	-
C_3S	61,41
C_2S	11,33
C_3A	8,20
MS	2,60
MA	1,73

Tablo 3.4 : Portland çimentosunun kimyasal özellikleri

Gün	Basınç Dayanımları (N / mm^2)
7	48,0
28	58,7

3.3.2 Agregalar:

Çalışmada agrega olarak Kum, Kırmataş Tozu, Kırmataş I ve Kırmataş II kullanılmıştır. Agregaların TS 3526 'ya göre ölçülmüş özgül ağırlıkları Tablo 3.5'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan TS 3530'a göre yapılan elek analizi sonuçları Tablo 3.6'da görülmektedir. Agrega karışım granülometrisi B32 ile C32 eğrisi arasındaki bir eğri olarak seçilmiş olup Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.5 :Agregaların özgül ağırlık değerleri

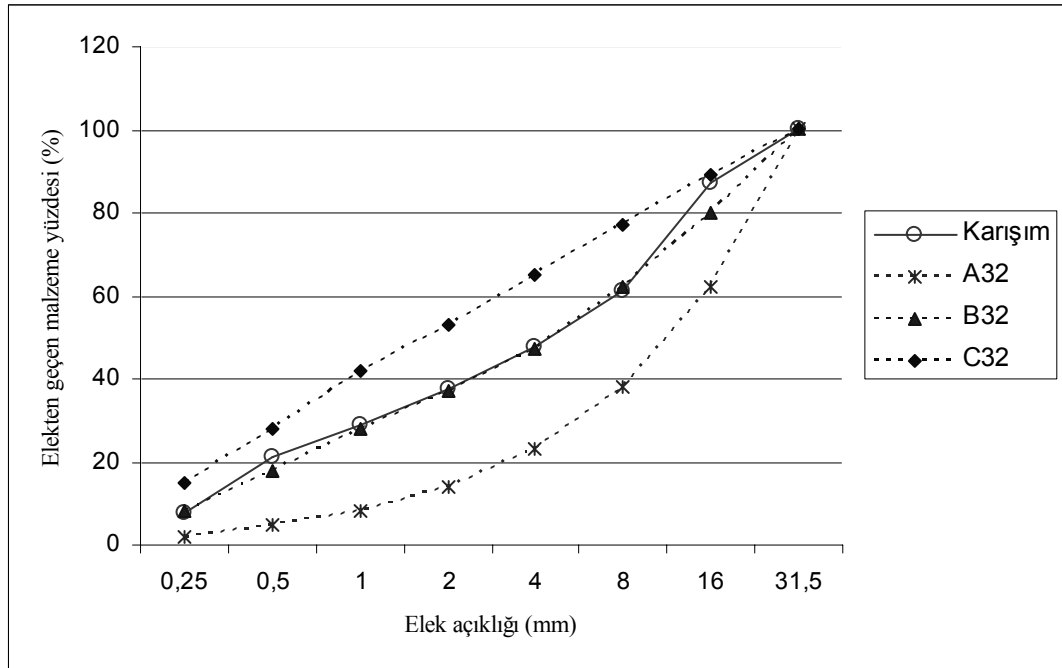
Malzeme	Özgül Ağırlık kg / dm^3
Kum	2,62
Kırmataş Tozu	2,68
Kırmataş I	2,72
Kırmataş II	2,72

Tablo 3.6 : Agregaların elek analizi sonuçları

Elek Boyutu	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25
Kum %25	100	100	99,7	98,9	94,5	79,5	58,1	15,1
Kırmataş Tozu %20	100	100	100	96,1	67,3	43,8	32,6	20,9
Kırmataş-I %25	100	100	65,0	15,0	1,5	1,3	1,2	0
Kırmataş-II %30	100	58,0	0,3	0	0	0	0	0
Karışım	100	87,4	61,3	47,7	37,5	29,0	21,4	7,9

Tablo 3.7 : Standart karışım elek analizi sonuçları

Elek Boyutu	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25
A32	100	62,0	38,0	23,0	14,0	8,0	5,0	2,0
B32	100	80,0	62,0	47,0	37,0	28,0	18,0	8,0
C32	100	89,0	77,0	65,0	53,0	42,0	28,0	15,0
A16	100	100	60	36	21	12	7	3
B16	100	100	76	56	42	32	20	8
C16	100	100	88	74	62	49	34	18
Karışım	100	87,4	61,3	47,7	37,5	29,0	21,4	7,9



Şekil 3.1 : TS 706 Referans ve Karışım granülometri eğrileri

3.3.3 Silis Dumanının Özellikleri:

Tablo 3.8 : Silis Dumanının fiziksel özellikleri

Özgül Ağırlık (kg / dm^3)		2.24
Hacim Sabiliği (Le Chatelier) Toplam (mm)		1.0
İncelik	Özgül Yüzey (Blaine) cm^2 / gr	3490
	200 μm elek üstünde kalan yüzde (%)	0
	90 μm elek üstünde kalan yüzde (%)	0
	45 μm elek üstünde kalan yüzde (%)	0,8

Çalışmada kullanılan Elkem Materials firmasından temin edilen Grade 940 Silis Dumanı olup kimyasal ve fiziksel özelliklerini gösteren deneyler orada yapılmıştır. TS EN 450'ye göre yapılan deneylerde Silis Dumanının özgül ağırlığı $2.24 kg / dm^3$ Olarak bulunmuştur. Bu deneylere ait veriler Tablo 3.8 ve Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9 : Silis Dumanının kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasal Bileşimin Yüzdesi (%)
SiO_2	96
H_2O (nem)	0,19
Kızdırma Kaybı	1,81
+45 mikron üzeri	0,58
Hacim Yoğunluğu	0,55-0,65 kg / dm^3
BET	23,36 $m^2 / gr.$

3.3.4 Süper Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesi:

Çalışmada yoğunluğu $1.04 kg / dm^3$ olan polikarboksil bazlı süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi yalnızca Su/Çimento oranı 0,5 olan kontrol betonlarda %0,7 oranında kullanılmıştır. Su/Çimento oranı 0,6, 0,7 ve 0,80 olan betonlarda süperakışkanlaştırıcı kullanılmamıştır.

3.4 Beton Karışımları:

Çimento dozajı 350 kg/dm^3 seçilerek en büyük agrega boyutu ve granülometrisi belirlenmiştir. Kontrol betonu ve Silis dumanı katkılı betonların İşlenebilirliği sabit tutulmuştur. 3 farklı Silis dumanı ekleme oranında (%5, %10 ve %15) ve dört farklı su/çimento oranında beton üretilmiştir. Her serisi 42 dm^3 üretilen 16 seri beton için 1 m^3 'e giren gerçek malzeme miktarları Tablo 3.9'da verilmiştir.

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

Beton üretimi 45 dm^3 kapasiteli düşey eksenli karıştırıcıda yapılmıştır. Eşit işlenebilirliği sağlayabilmek için Silis dumanı eklenen her seri için deneme betonları yapılmış ve eklenecek su miktarları bulunmuştur. Her seride toplam 42 dm^3 beton dökülmüş ve malzemeler ilk önce kuru olarak 2 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra konulacak suyun yarısı eklenerek 2 dakika karışım yapılmıştır. Son olarak suyun geri kalan kısmı süperakışkanlaştırıcı ile karıştırılarak beton karışımına ilave edilmiş ve gerekli kıvama gelene kadar karıştırma devam etmiştir. Sonra, numuneler yağlanmış kalıplara yerleştirilmiştir. Betonun kalıplara iyi yerleşebilmesi için numuneler kalıplara 3 aşamada yerleştirilerek her aşamada vibrasyon uygulanmıştır.

Toplam 10 adet $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$ boyutlarındaki küp ve 1 adet $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}$ boyutlarındaki prizma 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak $23 \pm 2^\circ \text{C}$ 'lik su içerisinde ve 20°C ile $\%65 \pm 5$ rutubetli ortamda saklanmıştır. 7, 28 ve 90. günler sonunda üretilen numuneler hava ve su ortamına alınarak sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır.

3.6 Taze Beton Deneyleri:

Dökülen her seride istenilen işlenebilirliği sağlayabilmek amacıyla su ihtiyacını tespit edebilmek için 20 dm^3 'lük betonlar üretilmiştir. Karışım için gerekli su miktarı bulunduktan sonra 42 dm^3 'lük esas betonlar dökülmüştür. Her seride işlenebilirliğin belirlenebilmesi için çökme hunisiyle deney yapılmış ve hacmi sabit kap ile taze betonun ağırlığı ölçülerek taze beton birim ağırlığı hesaplanmıştır.

Üretilmiş olan karışımların birim ağırlıklarının belirlenmesi sonucu karışımdaki gerçek malzeme ve hava miktarları bulunmuştur. Bu değerler Tablo 3.9'da gösterilmiştir.

3.7 Sertleşmiş Beton Deneyleri:

Sertleşmiş beton deneyleri 15x15x15 cm boyutlarındaki küp numunelerde ve 10x10x50 cm'lik prizma numunelerde yapılmıştır. Toplam 10 adet üretilen küp numunelerin 5 tanesi $23 \pm 2^{\circ}C$ 'lik su içerisinde ve 5 tanesi $20^{\circ}C$ ile $\%65 \pm 5$ rutubetli laboratuvar ortamında saklanmıştır. Her seride 1 adet üretilen prizma numuneler 24 saatten sonra 4 eşit parçaya kesilmiştir; kesilen bu numunelerden 2 tanesi $23 \pm 2^{\circ}C$ 'lik su içerisinde diğer 2 tanesi $\%65 \pm 5$ rutubetli laboratuvar ortamında saklanmıştır.

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

Su ve hava ortamında bekletilen 10x10x10 cm'lik kesilmiş prizma numunelerde 90. günde su emme deneyleri yapılmıştır. 90. günde etüvde 2 gün bekleyip tartılan numuneler daha sonra suda 2 gün bekletilip tekrar tartılmıştır ve su emme deneyi yapılmıştır.

Üretilen Betonların Gerçek Bileşimleri :

BETON KODU	Çimento (kg / m ³)	Silis Dumanı (kg / m ³)	Kum (kg / m ³)	K. Tozu (kg / m ³)	Kırmataş-I (kg / m ³)	Kırmataş-II (kg / m ³)	Su (kg / m ³)	S / Ç Oranı	Katkı Miktarı (kg)	Çökme (cm)	Ve- Be (sn)	Hava Boşluğu (%)	Birim Ağırlık (kg / m ³)	Kompasite (m ³ / m ³)
KON50	349	-	459	375	476	572	171	0,49	2,44	10	6	1,44	2,41	0,983
SD5K50	337	17	438	359	456	546	205	0,61	2,52	10	5	1,06	2,36	0,989
SD10K50	344	35	434	355	450	540	202	0,59	2,60	10	5	0,73	2,37	0,988
SD15K50	340	51	432	353	449	539	204	0,60	2,74	10	6	0,51	2,38	0,995
KON60	349	-	436	357	452	543	209	0,60	-	12	5	1,44	2,35	0,986
SD5K60	349	17	430	353	447	537	221	0,63	-	12	4	0,25	2,35	0,997
SD10K60	347	35	423	346	439	527	225	0,65	-	12	4	0,32	2,34	0,997
SD15K60	343	51	413	338	430	515	233	0,68	-	12	4	0,38	2,33	0,996

BETON KODU	Çimento (kg / m ³)	Silis Dumanı (kg / m ³)	Kum (kg / m ³)	K. Tozu (kg / m ³)	Kırmataş-I (kg / m ³)	Kırmataş-II (kg / m ³)	Su (kg / m ³)	S / Ç Oranı	Katkı Miktarı (kg)	Yayılma (cm)	Ve- Be (sn)	Hava Boşluğu (%)	Birim Ağırlık (kg / m ³)	Kompasite (m ³ / m ³)
KON70	349	-	413	338	428	515	244	0,70	-	45	3	1,44	2,29	0,986
SD5K70	347	17	405	332	421	505	254	0,73	-	45	3	0,74	2,28	0,993
SD10K70	346	35	399	327	415	497	263	0,76	-	45	2	0,14	2,28	0,998
SD15K70	342	51	391	320	406	488	269	0,78	-	45	3	0,22	2,27	0,998
KON80	349	-	279	390	320	405	279	0,80	-	70	2	1,40	2,23	0,986
SD5K80	348	17	384	315	400	479	289	0,83	-	70	2	0,44	2,23	0,995
SD10K80	346	35	376	308	391	469	291	0,84	-	70	2	0,82	2,22	0,996
SD15K80	342	51	369	301	382	458	299	0,87	-	70	2	0,71	2,20	0,993

4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Taze Beton Deney Sonuçları:

Taze beton deneylerinde, çökme deneyi ve birim ağırlık deneyi yapılarak hava miktarı değerleri hesaplanmıştır. Çökme deneyi için alt çapı 20 cm, üst çapı 10 cm ve yüksekliği 30 cm olan kesik çökme konisi kullanılmıştır. Koni 3 kademede doldurularak, her kısım 25 kere demir çubukla şişlenmiştir. Daha sonra koni sarsılmadan yukarı kaldırılarak çökme miktarı ölçülmüştür. Birim ağırlık deneyi için iç hacmi $7,24 \text{ dm}^3$ olan birim ağırlık kabı kullanılmıştır. Taze betonun iyice yerleşmesi için vibrasyon uygulanmış ve daha sonrada tartılmıştır. Üretilen serilere ait beton deney sonuçları Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 :Taze beton deney sonuçları

Beton Kodu	Çökme (cm)	Hava Miktarı (%)	Birim Ağırlık (kg / m^3)
KON50	10	1,44	2,41
SD5K50	10	1,06	2,36
SD10K50	10	0,73	2,37
SD15K50	10	0,51	2,38
KON60	12	1,44	2,35
SD5K60	12	0,25	2,35
SD10K60	12	0,32	2,34
SD15K60	12	0,38	2,33
Beton Kodu	Yayılma (cm)	Hava Miktarı (%)	Birim Ağırlık (kg / m^3)
KON70	45	1,44	2,29
SD5K70	45	0,74	2,28
SD10K70	45	0,14	2,28
SD15K70	45	0,22	2,27
KON80	70	1,40	2,23
SD5K80	70	0,44	2,23
SD10K80	70	0,82	2,22
SD15K80	70	1,44	2,29

4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları:

4.2.1 Basınç Dayanımı:

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

$$\sigma_b = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

Tablo 4.2 : Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımı değerleri

BETON KODU	BASINÇ DAYANIMI (N/mm^2)					
	SU			HAVA		
	7.GÜN	28.GÜN	90.GÜN	7.GÜN	28.GÜN	90.GÜN
KON50	45,2	52,8	56,4	39,1	47,2	47,9
SD5K50	46,4	56,3	59,1	44,4	48	53,8
SD10K50	44,1	55,3	58,3	41,3	45,2	49,8
SD15K50	43,6	57,1	58,1	40,9	46,1	57,3
KON60	39,3	44,4	44,3	30	39,2	41,1
SD5K60	40,9	44,1	50,7	34,4	42,8	46,4
SD10K60	45,6	50,2	59	31,1	44,9	47,1
SD15K60	47,3	50,8	55,1	31,7	44,5	50,1
KON70	28,3	36,8	38	24,2	27	33,3
SD5K70	29,1	36,8	42	27,3	32	37,4
SD10K70	29,2	39,1	47,8	24,3	36,8	37,8
SD15K70	28,5	39,2	42	21,4	31,9	34,7
KON80	18,5	28,2	30,5	16	21,7	27,9
SD5K80	21,4	30,2	31,6	18,2	22,9	28,8
SD10K80	21,6	28,8	29,1	16,6	24,1	30,9
SD15K80	20,8	30,1	30,9	19,2	22,9	30

4.2.2 Su Emme Deneyleri:

Su emme deneyleri suda ve laboratuarda hava ortamında bekletilen numuneler üzerinde 90. günlerde yapılmıştır. 10x10x50 cm ebadındaki numuneler mukavemet kazandıktan sonra dörde kesilerek iki adedi $23 \pm 2^{\circ}C$ su içerisinde diğer iki adedi de $20^{\circ}C$ ile $\%65 \pm 5$ rutubetli laboratuvar ortamında 10x10x10 cm ebadında numuneler olarak 88 gün kadar bekletildikten sonra su emme deneyi uygulanacak olan bu numuneler 48 saat kadar $60^{\circ}C$ 'lik etüvde beklemeye alınmıştır. Etüvden çıkarılan numuneler oda sıcaklığına geldikten sonra her biri numaralandırılarak hassas tartıda tartılmıştır. Ağırlıkları not edildikten sonra bu numuneler bu seferde 48 saat suda beklemeye alınmıştır. Daha sonra sudan çıkarılan numuneler üzerleri havluyla kurularak fazla kurumadan tek tek hassas tartıda tartılmıştır. Böylece her bir numunenin suya doymuş ve etüvde kurumuş haldeki ağırlıkları bulunarak su emme miktarları belirlenmiştir ve Tablo 4.3.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.3 : 90 günlük numunelerin su emme deneyi için gerekli kuru ve yaş ağırlıkları

BETON KODU	SU		HAVA	
	Numune Ağırlığı (suya doymuş) (gr.)	Numune Ağırlığı (etüv kuru) (gr.)	Numune Ağırlığı (suya doymuş) (gr.)	Numune Ağırlığı (suya doymuş) (gr.)
KON50	2501,7	2465,0	2514,1	2473,5
SD5K50	2398,2	2356	2346,1	2302,5
SD10K50	2344,1	2318,5	2386,3	2335
SD15K50	2386,3	2350	2357,6	2303
KON60	2329,7	2265	2370,7	2285,5
SD5K60	2334,5	2280,0	2353,3	2258,5
SD10K60	2411,9	2362,5	2411,8	2360,0
SD15K60	2380,1	2325,0	2402,1	2335,5
KON70	2285,4	2215,0	2287,5	2200,0
SD5K70	2298,0	2247,5	2296,0	2240,0
SD10K70	2270,6	2218,0	2283,1	2193,5
SD15K70	2295,4	2241,5	2245,2	2162,0
KON80	2257,2	2165,5	2253,9	2130,0
SD5K80	2227,6	2150,0	2233,2	2100,0
SD10K80	2170,9	2085,0	2221,0	2102,0
SD15K80	2145,8	2045,0	2169,1	2066,5

Su emme katsayılarını hesaplamak için Tablo 4.3'deki ağırlık değerlerini kullanarak TS 3624 standardına göre belirlenmiş Ağırlıkça Su emme Oranını bulmak için gerekli olan ve 4.2.'de tarif edilmiş olan bağıntı kullanılır.[42]

$$S_a = \frac{B - A}{A} * 100 \% \quad (4.2)$$

Bu denklemde,

S_a : Ağırlıkça su emme oranı (%)

B: Beton numunenin yaş ağırlığı (gr.)

A: Beton numunenin kuru ağırlığı (gr.)

Her bir seri için iki numune üzerinde su emme deneyi yapılarak bunların ortalaması alınmıştır ve su emme katsayıları bulunmuştur. Örnek vermek gerekirse;
Su ortamında 90 gün bekletilen KON50 betonu için ağırlıkça su emme oranı;

$$S_a = \frac{2501,7 - 2465,0}{2465} * 100 = 2,89 \%$$

Tüm numuneler için Su Emme katsayısı Tablo 4.4.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.4 Üretilen 90 günlük betonların ağırlıkça su emme oranları

BETON KODU	AĞIRLIKÇA SU EMME ORANI (%)	
	SU	HAVA
KON50	1,49	1,64
SD5K50	1,79	1,89
SD10K50	1,10	2,20
SD15K50	1,54	2,37
KON60	2,86	3,73
SD5K60	2,39	4,20
SD10K60	2,09	2,19
SD15K60	2,37	2,85
KON70	3,18	3,98
SD5K70	2,25	2,50
SD10K70	2,37	4,08
SD15K70	2,40	3,85
KON80	4,23	5,82
SD5K80	3,61	6,34
SD10K80	4,12	5,66
SD15K80	4,93	4,96

4.2.3. k Etkinlik Faktörünün Belirlenmesi:

Bu çalışmada k etkinlik faktörü, üretilen betonların basınç dayanımları, su emme katsayıları ve su/çimento oranları incelenerek bulunmuştur. CEN TC 104 SCI adına çalışma grubunun önerdiği metotlardan eşit işlenebilme metodu kullanılarak k etkinlik faktörü değerleri hesaplanmıştır. Bunun için önce dört farklı oranda (0,5,0,60, 0,70, 0,80) kontrol betonları üretilmiş ve kontrol betonlarının çökme değerleri bulunmuştur. Daha sonra çimento miktarı sabit tutularak üç farklı oranda (%5, %10 ve %15) silis dumanı eklenerek betonlar üretilmiştir. Silis dumanlı betonların üretimindeki temel nokta, kontrol betonuyla silis dumanı ilave edilen betonların eşit işlenebilirliğe sahip olmasıdır. Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kontrol betonu ve eşit işlenebilmeli silis dumanı eklenen betonlarda aynı oranlarda kullanılmıştır. Eşit işlenebilme silis dumanı ilave edilen betonlarda gerektiği takdirde su ilave edilerek sağlanmıştır.

K etkinlik faktörünün belirlenebilmesi için öncelikli olarak, numunelerin basınç dayanımları ve su/çimento oranları arasındaki grafik çizilmiştir. Bu grafik üzerinde kontrol betonu ve silis dumanlı beton arasındaki ilişki incelenmiştir. Aynı basınç dayanımındaki silis dumanlı beton diyagramlarının normal beton diyagramlarına çakışması sağlanarak k etkinlik faktörü bulunmuştur. Bu şekilde, deneyler sonucunda grafik üzerinde elde edilmiş her bir nokta için k etkinlik faktörü bulmak mümkündür. Elde edilen değerler, silis dumanı yüzdesine göre ayrılarak ortalaması alınmış ve böylece her bir silis dumanı için ayrı ayrı k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur. Aynı işlemler Su emme katsayısının tersi (1/Sa) ve Su/çimento oranları arasındaki grafik çizilerek de yapılmıştır. Böylece Su emme katsayısına göre de etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur. K etkinlik faktörüyle ilgili formülasyon şu şekildedir;

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

$$W_o = W_{\varphi} / (1 + k\varphi) \quad \text{denklemini elde edilir.} \quad (4.4)$$

k : Etkinlik faktörü

φ : Silis dumanı/Çimento oranı,

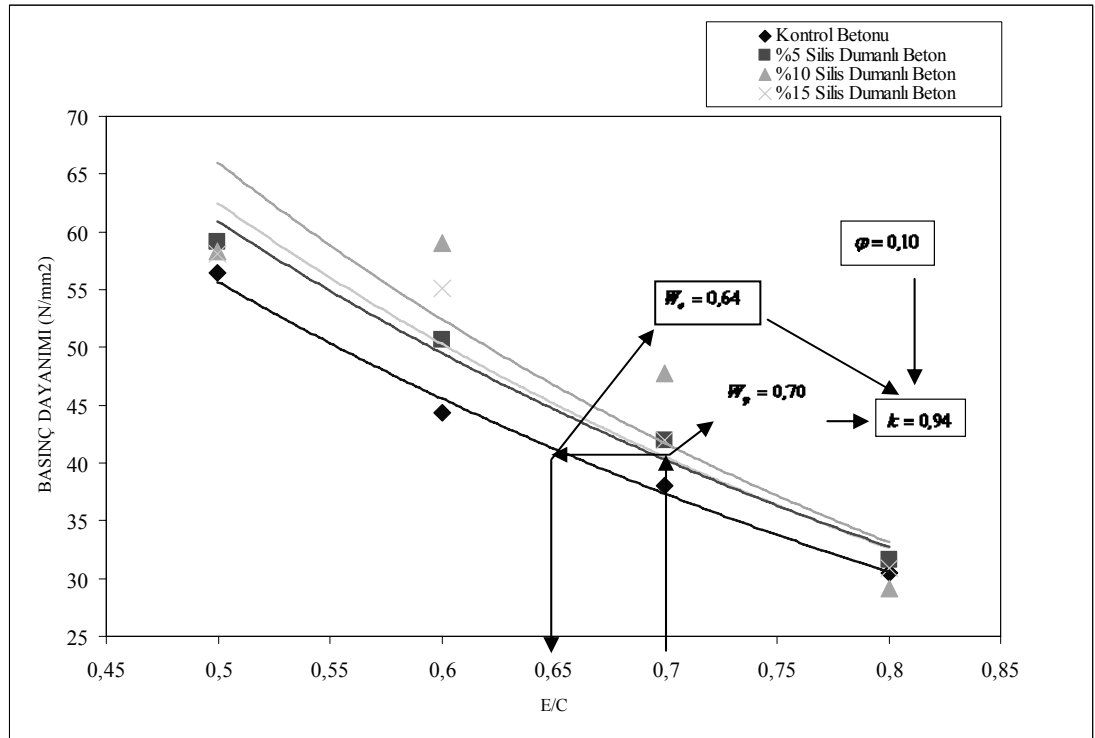
W_o : Kontrol betonunun Su/Çimento oranı

W_φ : Silis dumanlı betonun su/çimento oranı

4.4 denkleminde k değerini çekersek;

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

Bu metodun daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 4.1’deki örneğin incelenmesi uygun olacaktır.



Şekil 4.1 : 90 günlük su içerisinde saklanmış 0.70 Su/Çimento oranlı %10 Silis Dumanı katkılı numune k etkinlik faktörünün bulunması

Şekil 4.1’de görülen örnekte 0,70 su/çimento oranı ile üretilmiş %50 Silis dumanlı numunenin 28 günlük basınç dayanımı, 0,56 su/çimento oranı ile üretilmiş kontrol betonunun basınç dayanımına eşittir. Bu şekilde 0,70 su/çimento oranı ile üretilmiş %50 Silis dumanlı numunenin k etkinlik faktörü 4.5 denklemi kullanılarak 0,49 olarak bulunmaktadır. Aynı şekilde grafikteki her su/çimento oranı için aynı uygulamayı yaparak, 0,50, 0,60, 0,65, 0,70, 0,75 ve 0,80 oranında su/çimento içeren betonlar için k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur. Tablo 4.5’de 7., 28. ve 90.

günlerde silis dumanlı betonların k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur. Aynı yöntemle Su emme katsayısının tersi ($1/S_a$) su/çimento oranı grafiği kullanılarak ta k etkinlik katsayısı değerleri bulunmuştur.

Tablo 4.5 : Mukavemet için k etkinlik faktörü değerleri

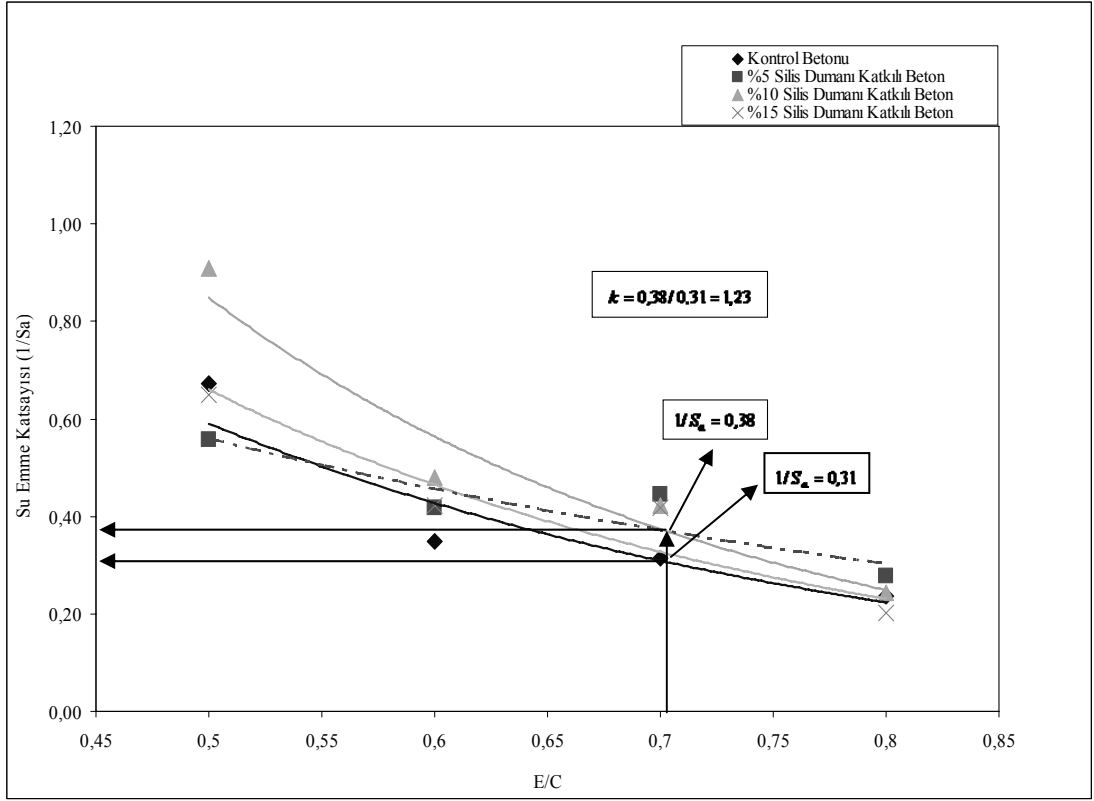
BETON KODU	k ETKİNLİK FAKTÖRÜ					
	Su içinde			Hava ortamında		
	7.GÜN	28.GÜN	90.GÜN	7.GÜN	28.GÜN	90.GÜN
SD5K50	0,41	0,83	1,74	1,74	0,83	3,26
SD5K55	0,37	0,75	1,57	1,57	0,75	2,92
SD5K60	0,34	1,43	1,43	1,43	1,05	1,82
SD5K65	0,63	0,97	1,31	1,31	0,97	1,67
SD5K70	0,59	1,54	1,21	0,90	0,90	1,54
SD5K75	0,83	1,43	1,13	0,83	1,13	1,13
SD5K80	1,05	1,33	1,05	0,78	1,05	0,78
%5 kort	0,60	1,18	1,35	1,22	0,95	1,87
SD10K50	0,20	0,87	1,90	0,20	0,20	0,87
SD10K55	0,19	0,78	1,70	0,19	0,38	0,78
SD10K60	0,17	0,71	1,32	0,17	0,53	0,91
SD10K65	0,32	1,02	1,02	0,16	1,02	0,83
SD10K70	0,29	0,77	0,94	0,29	0,77	0,94
SD10K75	0,83	0,87	0,71	0,27	1,03	1,03
SD10K80	1,05	0,96	0,67	0,25	1,11	0,96
%10 kort	0,44	0,85	1,18	0,22	0,72	0,90
SD15K50	0,14	0,74	0,91	0,14	0,14	1,67
SD15K55	0,12	0,67	0,82	0,12	0,25	1,30
SD15K60	0,11	0,74	0,61	0,11	0,23	1,03
SD15K65	0,21	0,68	0,56	0,10	0,32	0,80
SD15K70	0,10	0,74	0,40	0,10	0,30	0,51
SD15K75	0,28	0,69	0,38	0,09	0,38	0,28
SD15K80	0,35	0,64	0,35	0,17	0,44	0,26
%15 kort	0,19	0,70	0,57	0,12	0,29	0,84

Tablo 4.6 : Ağırlıkça Su Emme Oranı için Eşit İşlenebilme metodu ile hesaplanan k etkinlik faktörü değerleri

BETON KODU	k ETKİNLİK FAKTÖRÜ (k=1/Sa)					
	Su içinde			Hava ortamında		
	7.GÜN	28.GÜN	90.GÜN	7.GÜN	28.GÜN	90.GÜN
SD5K50	-	-	0,40	-	-	0,80
SD5K55	-	-	0,04	-	-	0,36
SD5K60	-	-	0,67	-	-	0,33
SD5K65	-	-	1,54	-	-	0,62
SD5K70	-	-	1,86	-	-	0,86
SD5K75	-	-	2,00	-	-	0,93
SD5K80	-	-	2,50	-	-	1,00
%5 kort	-	-	1,29	-	-	0,70
SD10K50	-	-	0,04	-	-	0,04
SD10K55	-	-	1,82	-	-	0,07
SD10K60	-	-	2,67	-	-	0,13
SD10K65	-	-	1,23	-	-	0,31
SD10K70	-	-	1,00	-	-	0,71
SD10K75	-	-	0,67	-	-	0,67
SD10K80	-	-	0,38	-	-	0,13
%10 kort	-	-	1,11	-	-	0,29
SD15K50	-	-	0,08	-	-	0,67
SD15K55	-	-	0,36	-	-	0,24
SD15K60	-	-	0,22	-	-	0,22
SD15K65	-	-	0,21	-	-	0,01
SD15K70	-	-	0,10	-	-	0,38
SD15K75	-	-	0,05	-	-	0,53
SD15K80	-	-	0,04	-	-	0,58
%15 kort	-	-	0,15	-	-	0,38

4.2.4 Oranlama Metoduna Göre k etkinlik Faktörünün Belirlenmesi:

Su emme katsayısı ve su/çimento oranı için yalnızca Eşit İşlenebilme Metodu değil ayrıca Oranlama Metodu kullanılarak ta k etkinlik faktörü değerleri hesaplanmıştır. Bu metotta yine aynı grafik üzerinde Silis dumanlı betonun 1/Sa değerini kontrol betonunun 1/Sa değerine oranlamak usulüyle hesaplanan bir yöntemdir. Bu metodun iyi anlaşılabilmesi için Şekil 4.2'deki örneğin incelenmesi uygun olacaktır.



Şekil 4.2 : 90 günlük su içerisinde saklanmış 0,70 su çimento oranlı %10 silis dumanlı numune için Oranlama Metodu ile k etkinliği faktörünün bulunması

Şekil 4.2’de görülen örnekte 0,70 su/çimento oranı ile üretilmiş %50 Silis dumanlı numunenin 90 günlük su emme katsayısı ve yine %70 su/çimento oranı ile üretilmiş kontrol betonunun 90 günlük su emme katsayısı şekil üzerinde görülmektedir. Bu şekilde %70 su/çimento oranı ile üretilmiş %50 Silis dumanlı numunenin k etkinliği faktörü şekil üzerinde belirtildiği üzere bu iki $1/S_a$ değerini birbirine oranlama metoduyla 1,23 olarak bulunur. Aynı şekilde grafikteki her su/çimento oranı için aynı uygulamayı yaparak 0,50, 0,55, 0,60, 0,65, 0,70, 0,75 ve 0,80 oranında su/çimento içeren betonlar için k etkinliği faktörü değerleri bulunmuştur. Tablo 4.7’de 90 günlük Silis dumanlı numunelerin k etkinliği faktörü değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.7 :Oranlama metoduna göre Ağırlıkça Su emme oranı kullanılarak hesaplanan k etkinlik faktörü değerleri

BETON KODU	k ETKİNLİK FAKTÖRÜ (k=1/Sa)					
	Su içinde			Hava ortamında		
	7.GÜN	28.GÜN	90.GÜN	7.GÜN	28.GÜN	90.GÜN
SD5K50	-	-	0,95	-	-	0,92
SD5K55	-	-	1,00	-	-	0,98
SD5K60	-	-	1,07	-	-	1,00
SD5K65	-	-	1,14	-	-	1,03
SD5K70	-	-	1,19	-	-	1,08
SD5K75	-	-	1,31	-	-	1,10
SD5K80	-	-	1,36	-	-	1,19
%5 kort	-	-	1,15	-	-	1,04
SD10K50	-	-	1,44	-	-	1,00
SD10K55	-	-	1,38	-	-	1,05
SD10K60	-	-	1,30	-	-	1,06
SD10K65	-	-	1,28	-	-	1,07
SD10K70	-	-	1,23	-	-	1,08
SD10K75	-	-	1,19	-	-	1,10
SD10K80	-	-	1,09	-	-	1,13
%10 kort	-	-	1,27	-	-	1,07
SD15K50	-	-	1,12	-	-	0,83
SD15K55	-	-	1,10	-	-	0,90
SD15K60	-	-	1,07	-	-	0,97
SD15K65	-	-	1,08	-	-	1,03
SD15K70	-	-	1,06	-	-	1,08
SD15K75	-	-	1,08	-	-	1,15
SD15K80	-	-	1,05	-	-	1,25
%15 kort	-	-	1,08	-	-	1,03

5.DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ:

5.1 Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi:

Kontrol betonu ve Silis dumanlı betonlarda eşit işlenebilirlik için ihtiyaç duyulan su miktarları bulunarak karışıma giren su miktarları, su/bağlayıcı oranı ve kontrol betonunun su miktarı 100 kabul edilerek hesaplanan su miktarları Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 : Kontrol Betonuna Kıyasla Su İhtiyacı Değişimi

Beton Kodu	Su (Kg)	Kontrol Betonuna Göre Su Değişimi	Su/Toplam Bağlayıcı Oranı	Çökme (cm)
KON50	171	100	0,50	10
SD5K50	205	120	0,58	10
SD10K50	202	118	0,53	10
SD15K50	204	119	0,52	10
KON60	209	100	0,60	12
SD5K60	221	106	0,60	12
SD10K60	225	108	0,59	12
SD15K60	233	111	0,59	12

BETON KODU	Su (Kg)	Kontrol Betonuna Göre Su Değişimi	Su/Toplam Bağlayıcı Oranı	Yayılma (cm)
KON70	244	100	0,70	45
SD5K70	254	104	0,69	45
SD10K70	263	108	0,69	45
SD15K70	269	110	0,68	45
KON80	279	100	0,80	70
SD5K80	289	104	0,79	70
SD10K80	291	104	0,76	70
SD15K80	299	107	0,76	70

Tablo 5.1’deki değerler incelendiğinde kontrol betonları Silis dumanlı betonlardan daha az karışım suyuna sahiptirler. Bunun sebebi üretilen betonlarda çimento miktarı sabit tutularak çeşitli oranlarda Silis dumanı eklenmesidir, yani toplam bağlayıcı miktarındaki artıştır. Su/toplam bağlayıcı oranlarına bakıldığında ise Silis dumanlı betonların almış olduğu değerler kontrol betonlarınken daha düşük çıkmıştır. %5, %10 ve %15 ilave edilen Silis dumanlı betonların hepsinde görülen ortak özellik ilave edilen Silis dumanı miktarı arttığında su/bağlayıcı miktarının daha düşük çıkmasıdır. Bu değerlendirmeler sonucu, Silis dumanı kullanımının taze betonda işlenebilirliği arttırdığı söylenebilir.

5.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi:

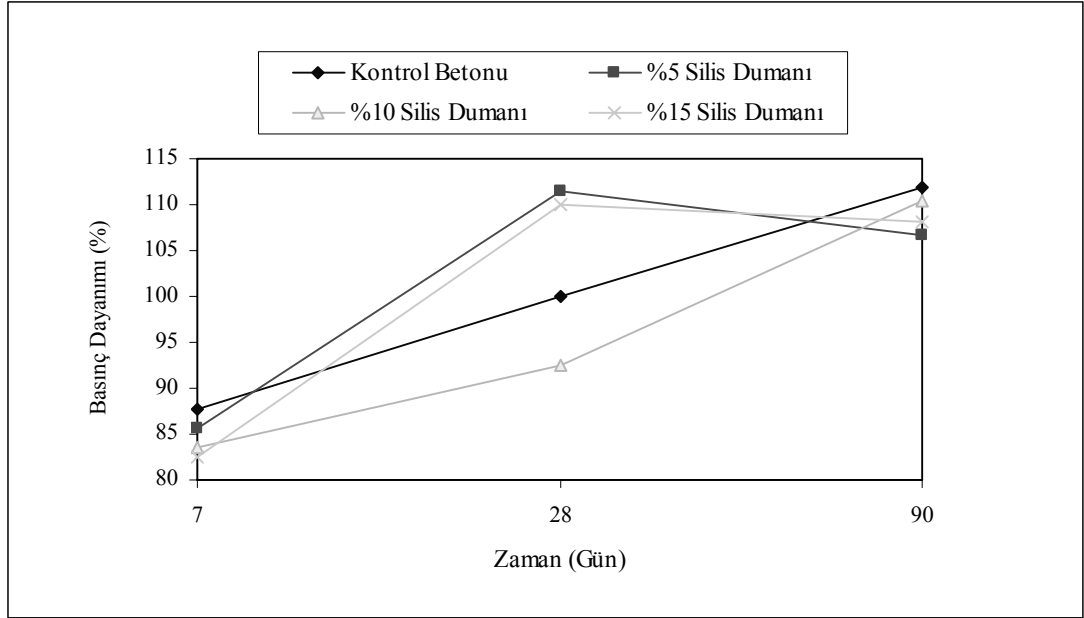
5.2.1. Basınç Dayanımı Sonuçlarının İrdelenmesi:

Tablo 4.2’de verilmiş olan basınç dayanımı deney sonuçları, Tablo 5.2’de görüldüğü gibi kontrol betonu dayanımına göre yüzde olarak kıyaslanarak verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi yüksek su/çimento oranlı betonların dayanım kazanma hızları ile düşük su/çimento oranlı betonların dayanım kazanma hızları arasında belirgin bir fark oluşmamaktadır.

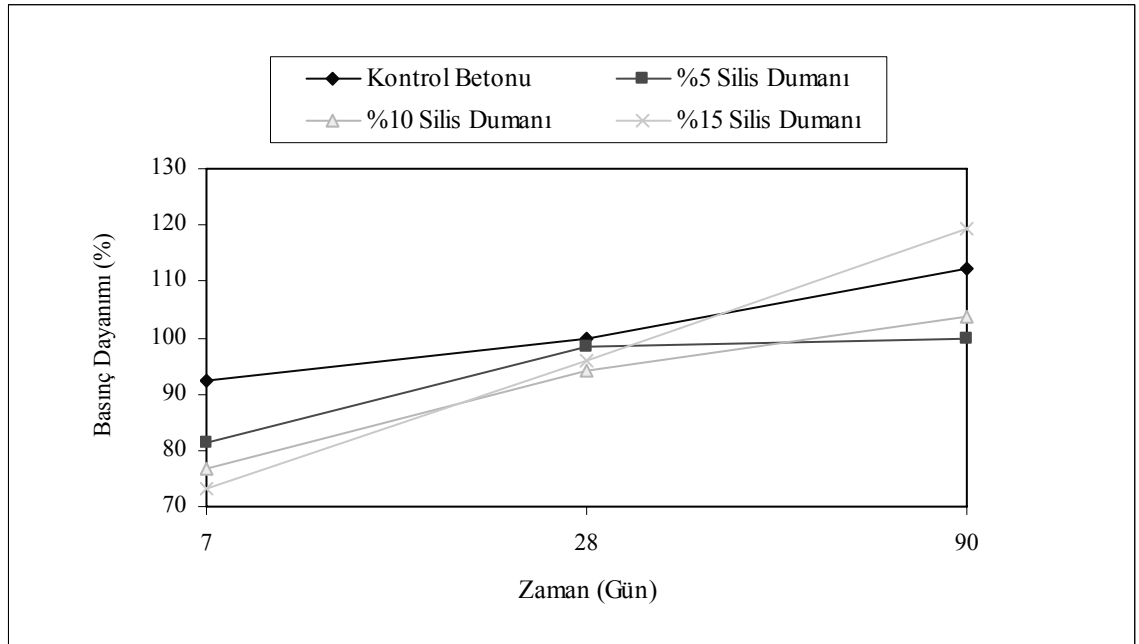
Tablo 5.2 : Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımı değerlerinin 28 günlük kontrol betonlarına göre yüzdesel olarak karşılaştırılması

BETON KODU	BASINÇ DAYANIMI (N/mm^2)					
	SU			HAVA		
	7.GÜN	28.GÜN	90.GÜN	7.GÜN	28.GÜN	90.GÜN
KON50	87,8	100	111,9	92,5	100	112,1
SD5K50	85,6	111,5	106,7	81,4	98,3	99,8
SD10K50	83,5	92,4	110,4	76,6	94,2	103,8
SD15K50	82,6	110,0	108,1	73,1	96,0	119,4
KON60	92,1	100	114,1	76,5	100	119,4
SD5K60	88,5	97,3	99,7	87,8	109,2	118,4
SD10K60	102,7	112,6	132,8	79,3	114,5	120,2
SD15K60	106,5	124,1	114,4	80,1	113,5	127,8
KON70	76,9	100	114,4	85,3	100	104,1
SD5K70	79,1	100	114,1	75,6	84,4	116,8
SD10K70	79,3	106,3	129,9	75,9	118,1	115,0
SD15K70	77,4	106,5	114,1	66,8	99,7	108,4
KON80	71,6	100	105,7	65,7	100	104,3
SD5K80	61,8	79,6	101,3	57,8	82,7	89,5
SD10K80	72,2	97,3	87,0	59,9	87,0	111,5
SD15K80	69,6	94,6	92,6	69,3	82,7	108,3

Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de numunelerin basınç dayanımları yüzdeleri kür koşullarına Silis dumanı yüzdelerine göre değişmektedir.



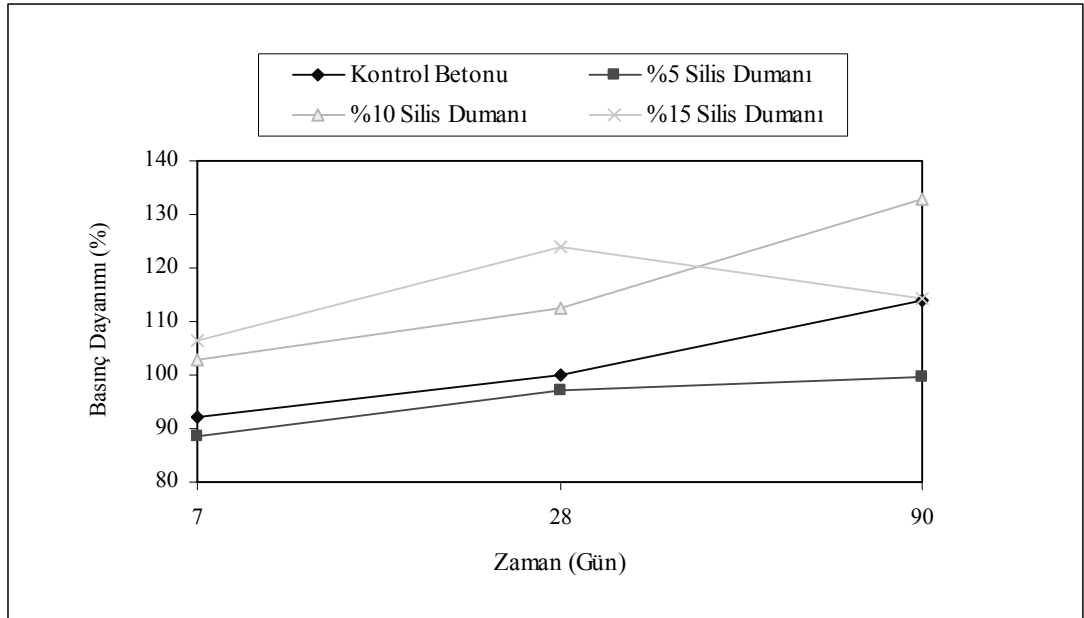
Şekil 5.1 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,5 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği



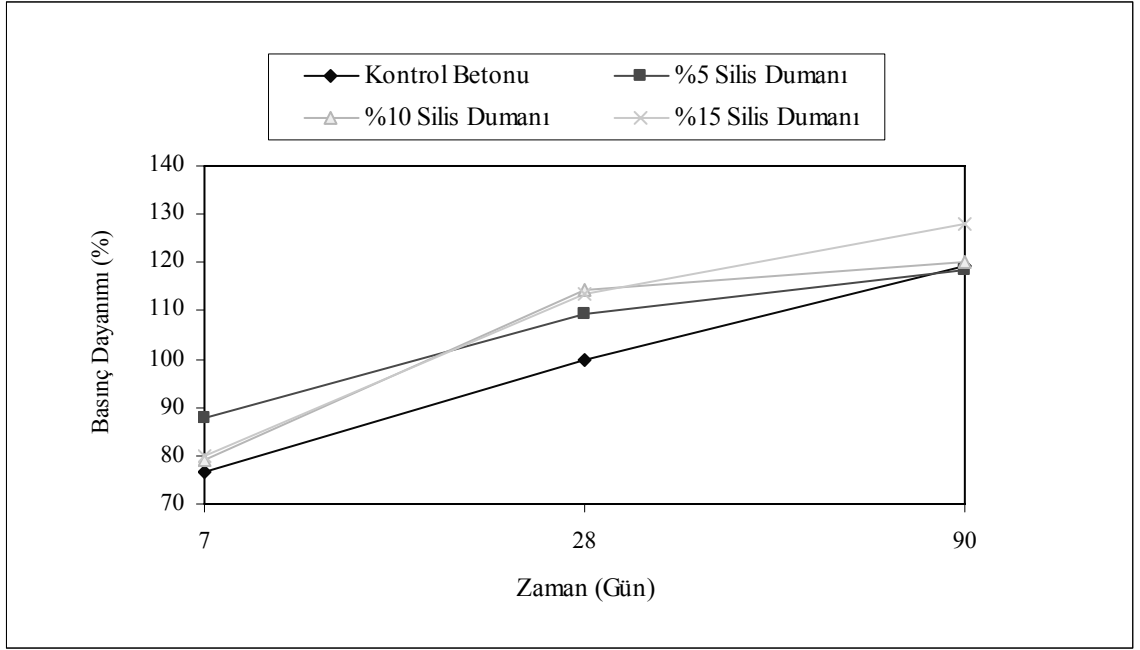
Şekil 5.2 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,5 olan eşit işlenebilmeli hava içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 incelendiğinde, Silis dumanı eklenen betonların erken yaşlarda kontrol betonuna göre 7 günlük basınç dayanımlarında Silis dumanı katkılı betonların daha düşük dayanımlara sahip oldukları görülmektedir. Bunun sebebi, puzolanik reaksiyonun geç başlamasıdır.

İleriki yaşlara bakıldığında, basınç dayanımındaki en büyük artışın %15 Silis dumanı katkılı betonda olduğu görülmüştür; En az artış ise %10 katkılı betonda olmuştur. Kür koşulları karşılaştırıldığında, özellikle 28. günde su ortamında katkılı betonların basınç dayanımlarının, hava ortamındaki katkılı betonlara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Fakat basınç dayanımlarındaki artış, hava ortamındaki numuneler için su ortamındaki numunelere göre daha kararlı olmaktadır.

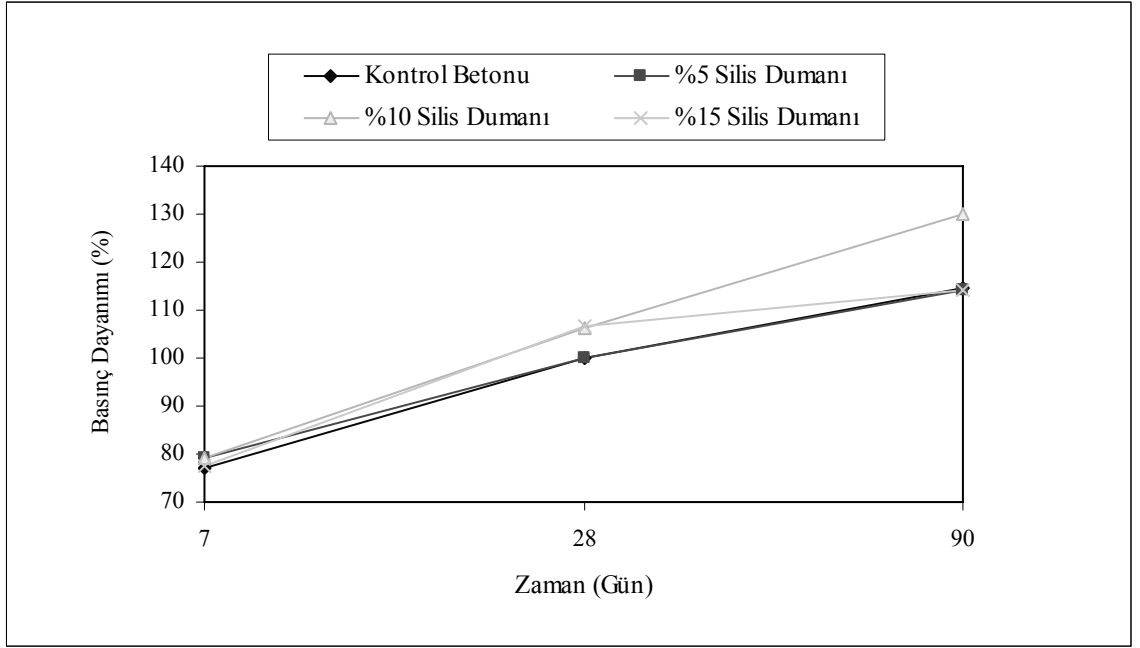


Şekil 5.3 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,6 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği

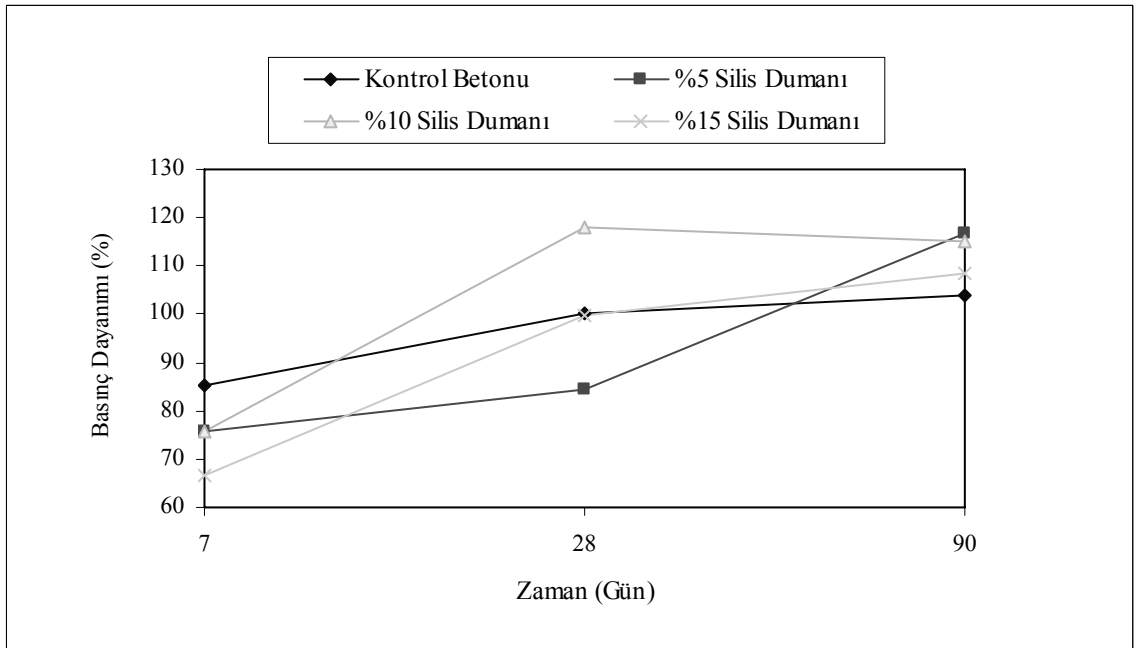


Şekil 5.4 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,6 olan eşit işlenebilmeli hava içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 incelendiğinde; 7., 28. ve 90. günlerde basınç dayanımlarının %5 katkılı beton haricinde diğer katkılı betonlarda kontrol betonuna göre daha fazla olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı artış miktarına bakıldığında ise en büyük artış 28. günde %15 katkılı betonda, 90. günde ise %10 katkılı betonda olmuştur. Kür koşullarına bakıldığında, basınç dayanımlarındaki artış, hava ortamındaki numuneler için su ortamındaki numunelere göre yine daha kararlı olmaktadır.



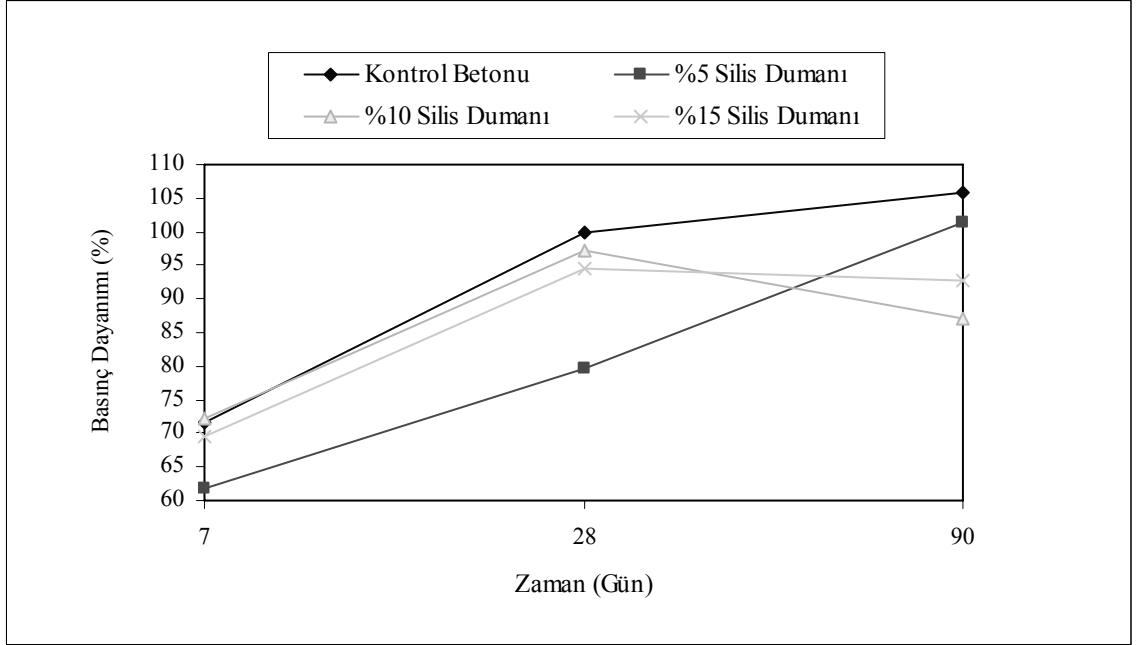
Şekil 5.5 :Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,7 olan eşit işlenebilirliği su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği



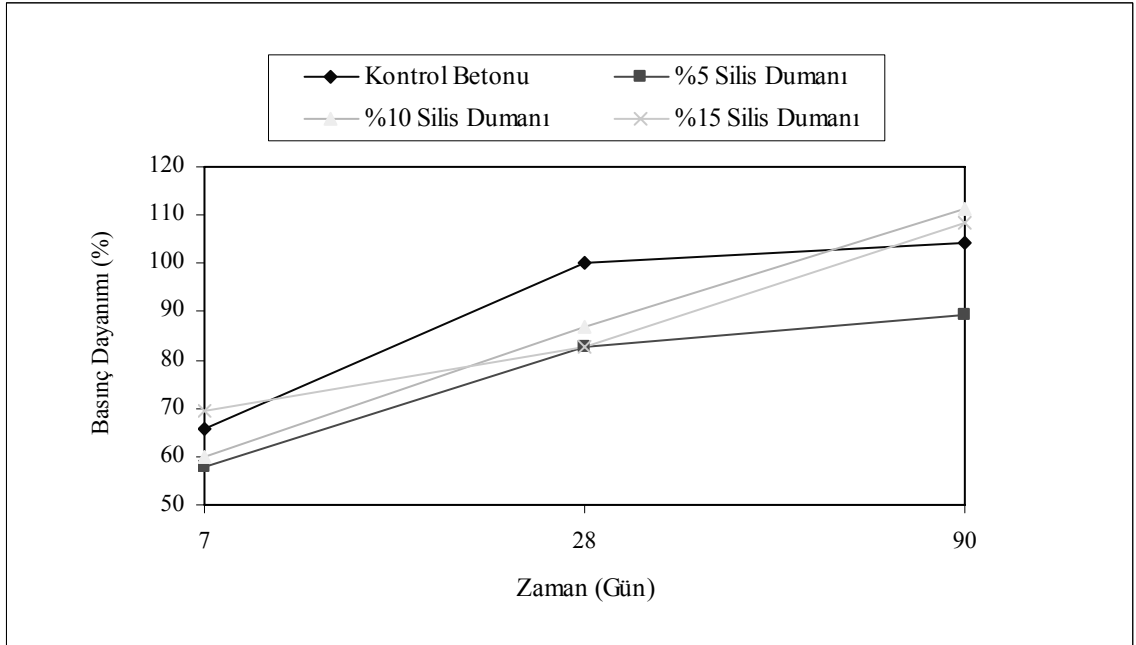
Şekil 5.6 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,7 olan eşit işlenebilirliği hava içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 incelendiğinde; en yüksek basınç dayanımlarının %10 ve %15 katkı betonlarda olduğu, %5 katkı betonunda ise daha düşük dayanım olduğu görülmektedir. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 incelendiğinde; en yüksek basınç dayanımlarının %10 ve %15 katkı betonlarda olduğu, %5 katkı betonunda ise daha

düşük dayanım olduğu görülmektedir. Kür koşullarına bakıldığında, basınç dayanımlarındaki artış, su ortamındaki numuneler için hava ortamındaki numunelere göre daha kararlı olmaktadır.



Şekil 5.7 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,8 olan eşit işlenebilmeli su içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği



Şekil 5.8 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,8 olan eşit işlenebilmeli hava içerisindeki numunelerin basınç dayanımı/zaman grafiği

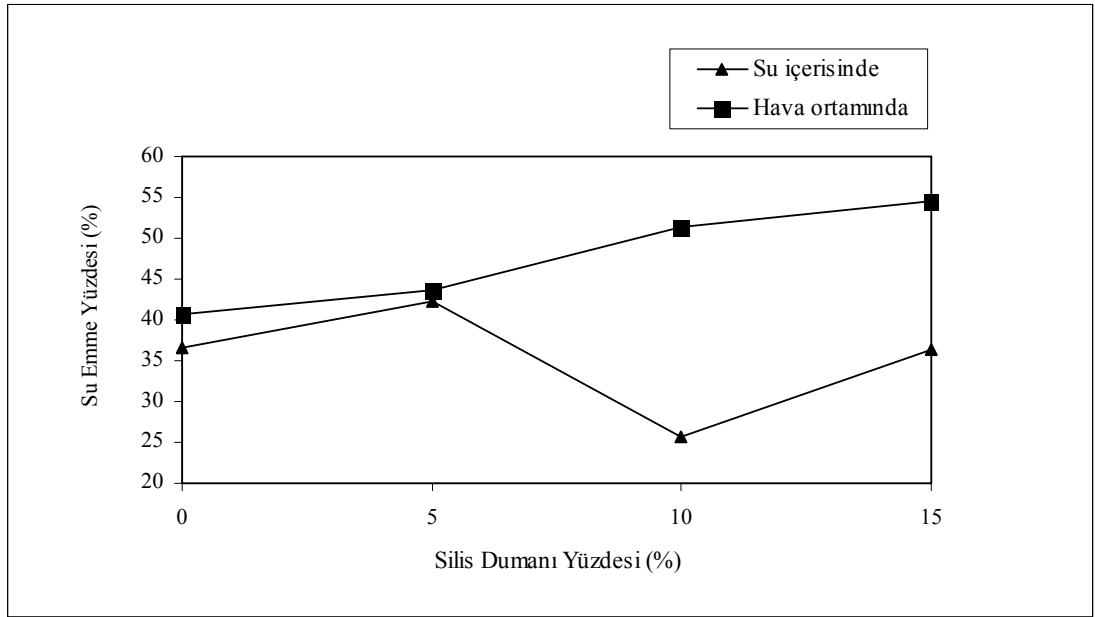
Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 incelendiğinde; basınç dayanımlarının, kontrol betonunda katkılı betonlara göre daha yüksek olduğu, en düşük basınç dayanımının da %5 katkılı betonda olduğu görülmektedir. %10 ve %15 katkılı betonlarının basınç dayanımları ise hava ortamındaki numuneler için 90. güne kadar artış göstermekte olup su ortamındaki numuneler için 28. güne artış göstermekte fakat 28. günden sonra ve ileriki yaşlarda azalmaktadır.

Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 bir arada incelendiğinde, ileriki yaşlarda Silis dumanı eklenen numunelerin basınç dayanımlarının kontrol betonundan fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise çimento miktarının sabit olması ve bunun üzerine Silis dumanı ilave edilmesidir.

Elde edilen deney sonuçları incelendiğinde, basınç dayanımı bakımından en iyi sonucu genel olarak %15 Silis dumanı katkılı betonun sağladığı görülmektedir. %10 Silis dumanı katkılı betonda da %15 katkılı betona yakın basınç dayanımları olduğu ve en düşük dayanımlarında %5 Silis dumanı katkılı betonda olduğu görülmektedir. Katkılı beton grafiklerine genel olarak bakılacak olursa bu betonların basınç dayanımlarındaki 28. güne kadar olan artış miktarının, 28 ile 90. gün arasında oluşan artış miktarından daha fazla olduğu, hatta kimi zaman 28. günden sonra basınç dayanımlarında azalma olduğu görülmektedir. 28. günden sonra azalan dayanımın sebebi şu şekilde açıklanabilir; Katkı miktarının artmasına bağlı olarak çimento dozajının düşük olması sebebiyle katkılı betonlar için yeterli miktarda kirecin oluşmaması düşünülebilir.

5.2.2 Su Emme Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

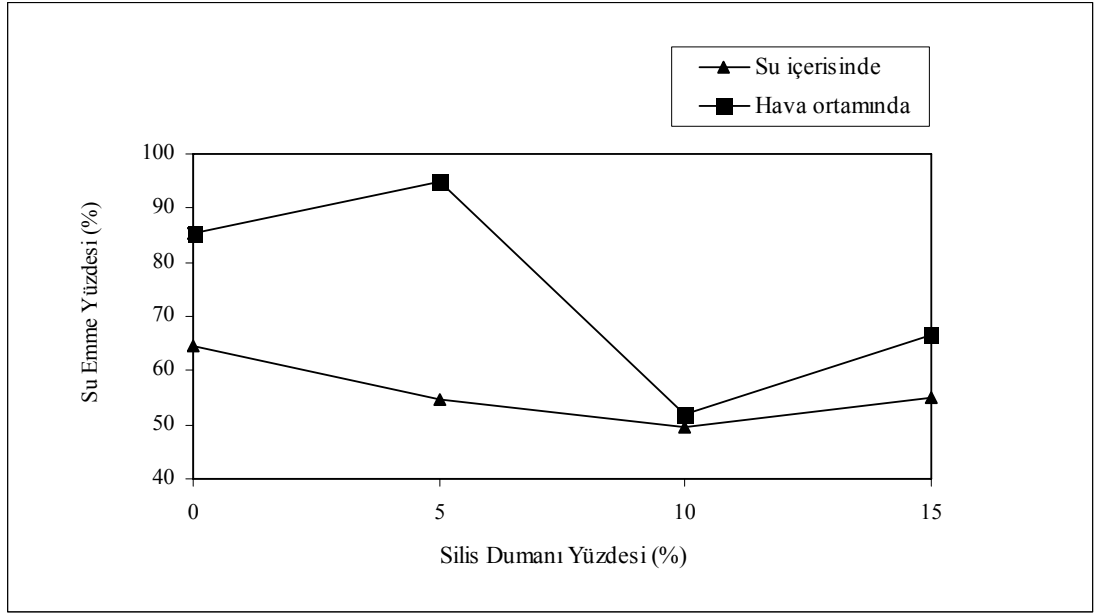
Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da su ve hava ortamındaki numunelerin 28. günlerde bulunan ağırlıkça su emme oranı değerlerinin silis dumanı yüzdesine bağlı grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 5.9 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,5 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük Ağırlıkça su emme yüzdesi oranı-silis dumanı yüzdesi grafikleri

Şekil 5.9 incelendiğinde su ortamındaki numunelerin ağırlıkça su emme oranı değerlerinin hava ortamına göre daha düşük çıkarak daha az su emdiği görülmektedir. Hava ve su ortamında bekletilen numunelerin ağırlıkça su emme oranı değerleri hava ortamındaki numuneler için kontrol betonunun üzerinde, su ortamındaki numuneler için ise genellikle altında çıkmıştır.

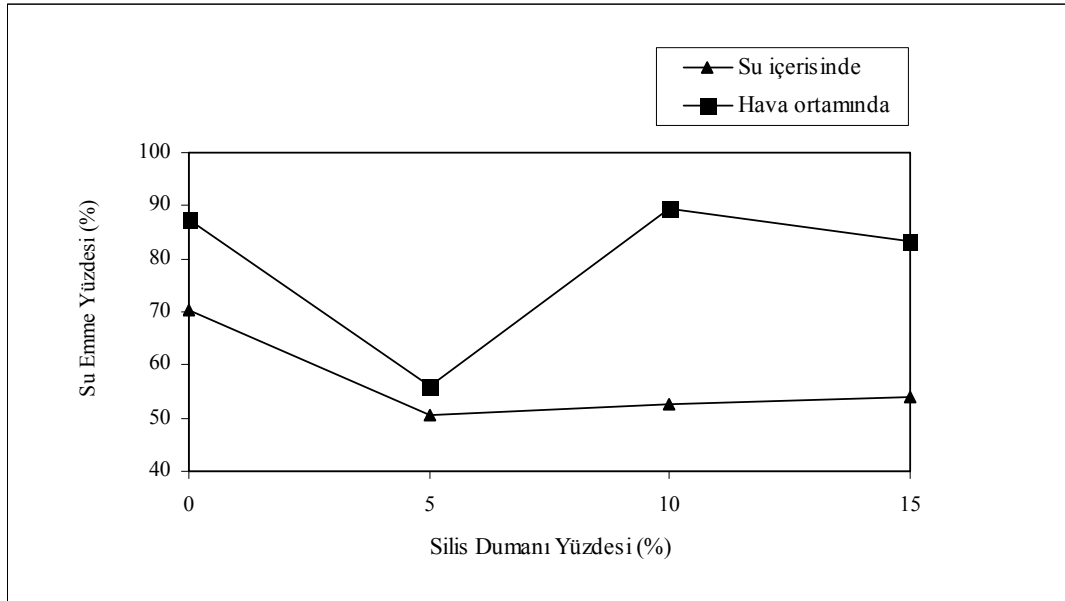
En yüksek su emme oranı değeri hava ortamındaki %15 Silis dumanı katkılı betonda, en düşük su emme oranı değeri ise su ortamındaki %10 Silis dumanı katkılı betonda meydana gelmiştir.



Şekil 5.10 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,6 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük Ağırlıkça su emme yüzdesi oranı-silis dumanı yüzdesi grafikleri

Şekil 5.10 incelendiğinde su ortamındaki numunelerin ağırlıkça su emme oranı değerlerinin hava ortamına göre daha düşük çıkarak daha az su emdiği görülmektedir. Hava ve su ortamında bekletilen numunelerin ağırlıkça su emme oranı değerleri hem hava hem de su ortamındaki numuneler için genellikle kontrol betonunun altında çıkmıştır.

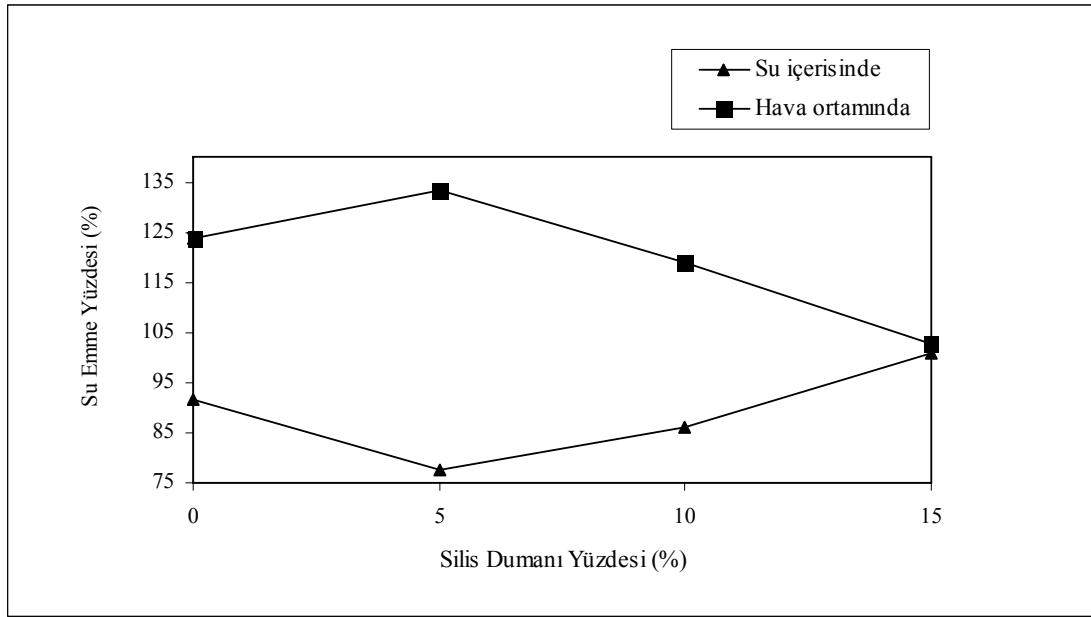
En yüksek su emme oranı değeri hava ortamındaki %5 Silis dumanı katkılı betonda, en düşük su emme oranı değeri ise su ortamındaki %10 Silis dumanı katkılı betonda meydana gelmiştir.



Şekil 5.11 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,7 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük Su emme yüzdesi grafikleri

Şekil 5.11 incelendiğinde su ortamındaki numunelerin ağırlıkça su emme oranı değerlerinin hava ortamına göre daha düşük çıkarak daha az su emdiği görülmektedir. Hava ve su ortamında bekletilen numunelerin ağırlıkça su emme oranı değerleri hem hava hem de su ortamındaki numuneler için kontrol betonunun altında çıkmıştır.

En yüksek su emme oranı değeri hava ortamındaki %10 Silis dumanı katkılı betonda, en düşük su emme oranı değeri ise su ortamındaki %5 Silis dumanı katkılı betonda meydana gelmiştir. Ayrıca, su ortamındaki %10 ve %15 Silis dumanı katkılı betonların su emme oranı değeri hemen hemen birbirine eşit çıkmıştır.



Şekil 5.12 : Kontrol betonunun su/çimento oranı 0,8 olan eşit işlenebilmeli su ve hava ortamındaki numunelerin 90 günlük Su emme yüzdesi grafikleri

Şekil 5.12 incelendiğinde su ortamındaki numunelerin ağırlıkça su emme oranı değerlerinin hava ortamına göre daha düşük çıkarak daha az su emdiği görülmektedir. Hava ve su ortamında bekletilen numunelerin ağırlıkça su emme oranı değerleri hem hava hem de su ortamındaki numuneler için genellikle kontrol betonunun altında çıkmıştır.

En yüksek su emme oranı değeri hava ortamındaki %5 Silis dumanı katkılı betonda, en düşük su emme oranı değeri ise su ortamındaki %5 Silis dumanı katkılı betonda meydana gelmiştir.

Sonuç olarak, gerek hava gerekse su ortamında silis dumanı yüzdesine bağlı olarak ağırlıkça su emme oranı değerleri farklılık göstermiştir. Genelde, silis dumanı katkılı betonların su emme oranı değerleri kontrol betonunun su emme oranı değerinden düşük çıkmıştır. %5 ve %10 Silis dumanı katkılı betonun su emme oranı değeri çoğunlukla kontrol betonuna göre daha düşük değerler alırken, %15 Silis dumanı katkılı betonun her koşulda su emme oranı değeri kontrol betonuna göre daha düşük değerler almıştır. Buradan hareketle, betonda silis dumanı miktarının artmasıyla betondaki ince malzeme oranının artırıldığı ve dolayısıyla boşluk çaplarının

küçüldüğü ve ağırlıkça su emme oranının da buna bağlı olarak düştüğü sonucuna ulaşabiliriz.

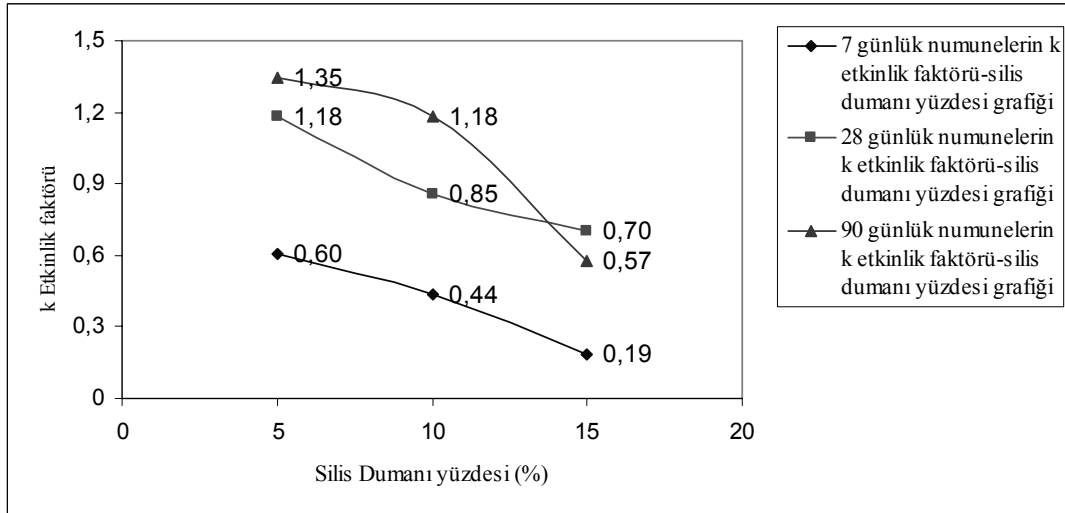
5.2.3 k Etkinlik Faktörünün İrdelenmesi:

Bu tez çalışmasında yapılmış olan deneysel çalışmaların esas amacı deneyler sonucunda elde edilen basınç dayanımı ve ağırlıkça su emme oranı değerlerini kullanarak k etkinlik faktörünün bulunmasıdır.

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

Çalışmada kullanılan metotta basınç dayanımı, su/çimento oranı grafiklerinde her bir nokta için ayrı ayrı k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur. Bulunan k etkinlik faktörü değerleri silis dumanı yüzdesine göre aritmetik ortalaması alınarak sınıflandırılmıştır.

Çalışma kapsamında üretilen betonların basınç deneyi sonuçlarının kullanılması sonucu elde edilen k etkinlik faktörü değerleri Tablo 4.5’de görülmektedir. Bu sonuçların daha iyi irdelenebilmesi için k etkinlik faktörü-silis dumanı yüzdesi grafikleri, k etkinlik faktörü-gün grafikleri ve k etkinlik faktörü-E/C grafikleri Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20, 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25, Şekil 5.26, Şekil 5.27, Şekil 5.28, Şekil 5.29 ve Şekil 5.30’da gösterilmiştir.

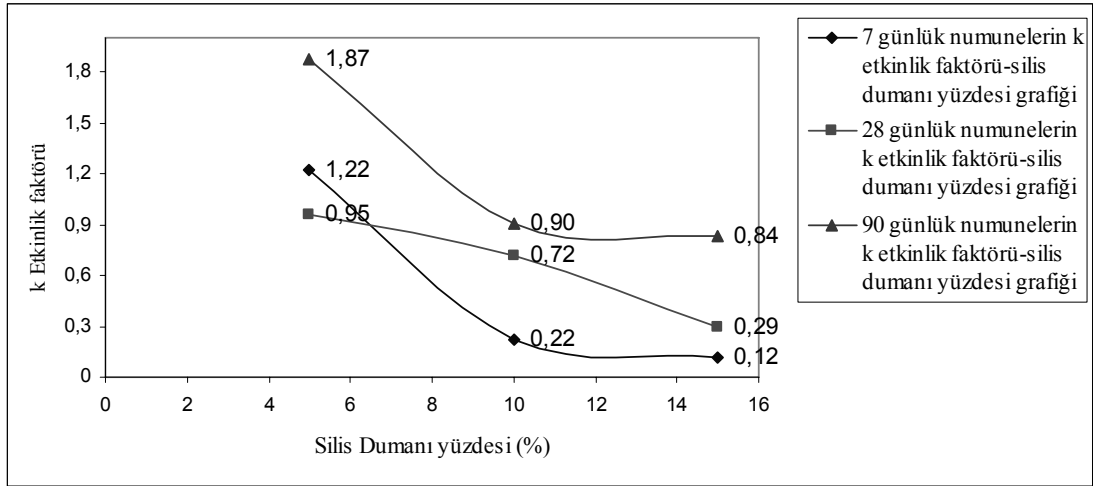


Şekil 5.13 : Su ortamındaki numunelerin 7., 28. ve 90. gündeki k etkinlik faktörü-silis dumanı yüzdesi grafikleri

Şekil 5.13 incelendiğinde k etkinlik faktörü değerlerinin erken yaşlarda genel olarak daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, erken yaşlarda puzolanik reaksiyonun gerçekleşmemesidir. Nitekim ileriki yaşlarda puzolanik reaksiyonun gerçekleşmesiyle etkinlik faktörü değerleri artmıştır. 7., 28. ve 90. günkü k etkinlik faktörü değerlerine bakıldığında 7., 28. ve 90. gündeki en yüksek etkinlik faktörü değerinin %5 Silis dumanı katkılı betonda, en düşük etkinlik faktörü değerinin ise %15 Silis dumanı katkılı betonda olduğu görülmektedir.

Kür süresine göre kıyaslama yapılacak olursa, katkılı betonların tamamında 7. ve 28. günler arasındaki etkinlik faktörü değerindeki artış miktarı, 28. ve 90. günler arasında meydana gelen artıştan daha fazla olmuştur.

Grafikteki kesişim noktasına dikkat edilecek olursa şöyle bir yorum yapılabilir; 28. gündeki %15 Silis dumanı ilavesine yakın bir oran için elde edilen k etkinlik faktörü değeri, 90. gündeki aynı katkı oranı için eşit olmaktadır.



Şekil 5.14 : Hava ortamındaki numunelerin 7., 28. ve 90. gündeki k etkinlik faktörü-silis dumanı yüzdesi grafikleri

Şekil 5.14 incelendiğinde k etkinlik faktörü değerlerinin erken yaşlarda genel olarak daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, erken yaşlarda puzolanik reaksiyonun gerçekleşmemesidir. ileriki yaşlarda ise puzolanik reaksiyonun gerçekleşmesiyle etkinlik faktörü değerleri artmıştır. 7., 28. ve 90. günkü k etkinlik faktörü değerlerine bakıldığında 7.,28. ve 90. gündeki en yüksek etkinlik faktörü değerinin %5 Silis dumanı katkılı betonda, en düşük etkinlik faktörü değerinin ise %15 Silis dumanı katkılı betonda olduğu görülmektedir.

Kür süresine göre kıyaslama yapılacak olursa, katkılı betonların tamamında 7. ve 28. günler arasındaki etkinlik faktörü değerindeki artış miktarı, 28. ve 90. günler arasında meydana gelen artış miktarıyla oldukça yakındır.

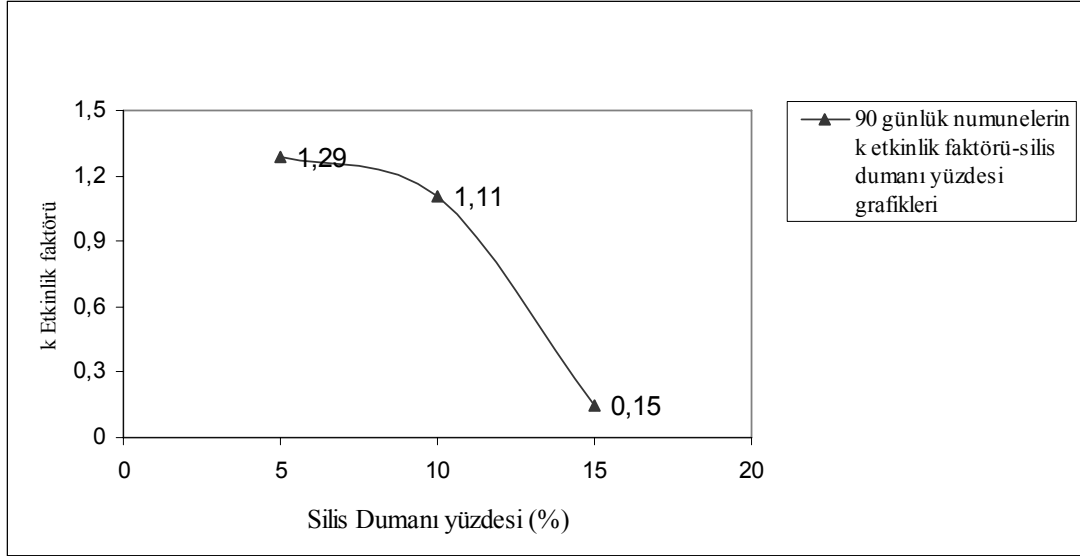
Grafikteki kesişim noktasına dikkat edilecek olursa şöyle bir yorum yapılabilir; 7. gündeki %6 Silis dumanı ilavesine yakın bir oran için elde edilen k etkinlik faktörü değeri, 28. gündeki aynı katkı oranı için eşit olmaktadır.

Ayrıca bu grafikte, Silis dumanı ilavesinin yaklaşık olarak %6 değerini geçtiği zaman 28. gündeki etkinlik faktörünü azalttığı, fakat 90. gündeki etkinlik faktörünü artırdığı görülmektedir.

Tüm k etkinlik faktörü değerleri incelendiğinde zaman içerisinde puzolanik reaksiyonun gerçekleşmesi ile k etkinlik faktörü değerlerinin arttığı görülmektedir.

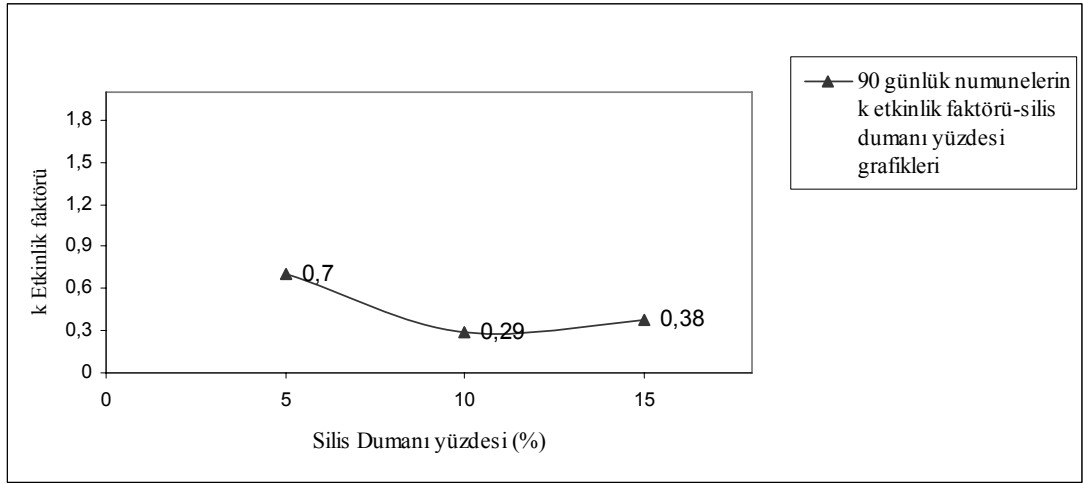
Kür koşulları göz önüne alındığında suda bekletilen numunelerin etkinlik faktörü değerlerinin genel olarak hava ortamında bekletilen numunelerden daha fazla olduğu görülmektedir.

Aynı incelemeyi ağırlıkça su emme oranı için hesaplanmış k etkinlik faktörü değerleri için de yapabiliriz.



Şekil 5.15 :Ağırlıkça su emme oranına göre eşit işlenebilirlik metodu ile hesaplanmış su ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü silis dumanı yüzdesi grafikleri

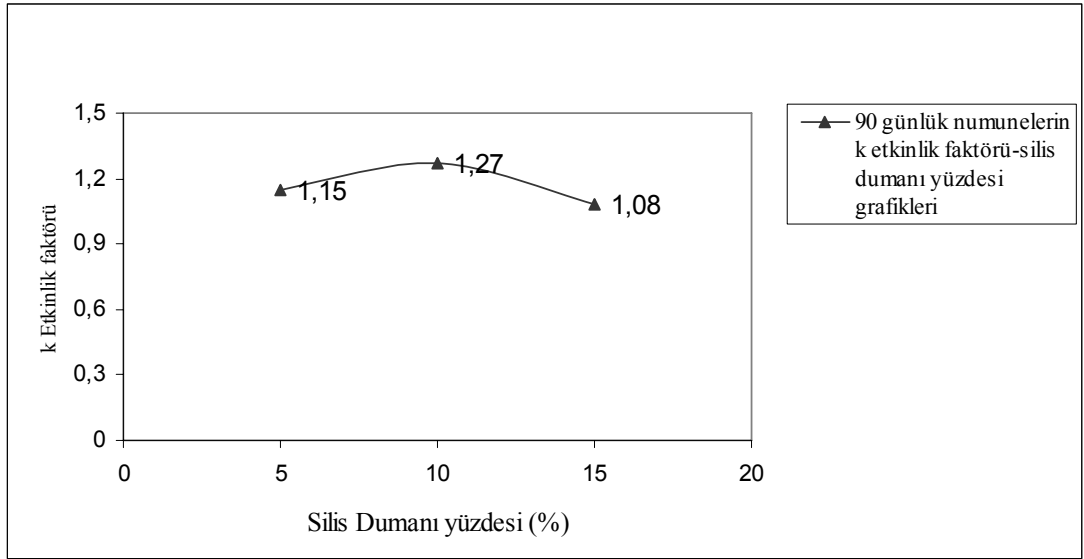
Şekil 5.15’de su ortamındaki ağırlıkça su emme oranına göre eşit işlenebilirlik metodu kullanılarak hesaplanmış k etkinlik faktörü silis dumanı yüzdesi grafiği gösterilmiştir. Grafiğe bakıldığında, en düşük etkinlik faktörü değerinin %5 Silis dumanı katkılı betonda, en yüksek etkinlik faktörü değerinin ise %15 Silis dumanı katkılı betonda olduğu görülmektedir.



Şekil 5.16 : Ağırlıkça su emme oranına göre eşit işlenebilme metodu ile hesaplanmış hava ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü silis dumanı yüzdesi grafikleri

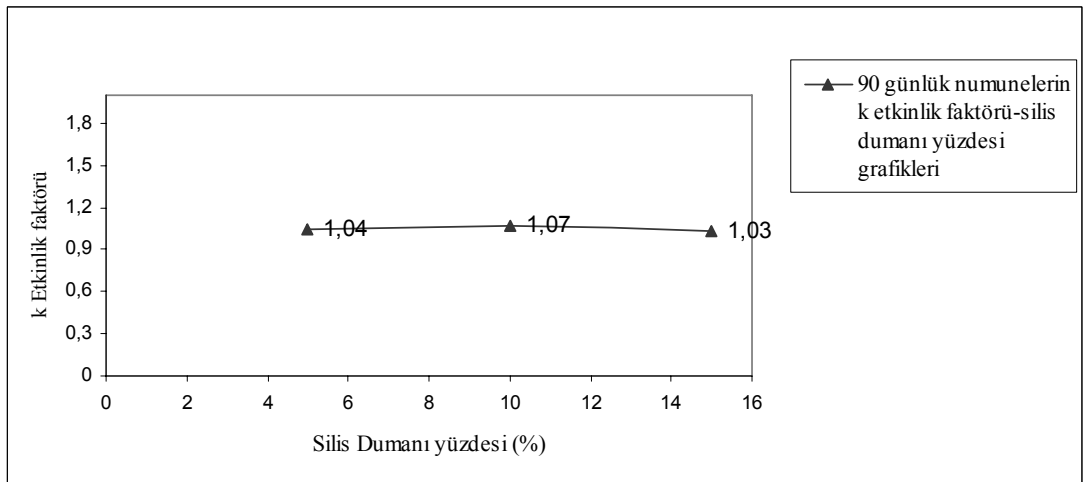
Şekil 5.16’da su ortamındaki ağırlıkça su emme oranına göre eşit işlenebilme metodu kullanılarak hesaplanmış k etkinlik faktörü silis dumanı yüzdesi grafiği gösterilmiştir. Grafiğe bakıldığında, en düşük etkinlik faktörü değerinin %5 Silis dumanı katkılı betonda, en yüksek etkinlik faktörü değerinin ise %10 Silis dumanı katkılı betonda olduğu görülmektedir. Ayrıca, 90. günde için %15 Silis dumanı katkılı numunenin etkinlik faktörü değerinin %10 katkılı betondan daha fazla olduğu da görülmektedir.

Aynı incelemeyi yine ağırlıkça su emme oranına göre fakat oranlama metoduyla hesaplanmış k etkinlik faktörü değerleri için de yapabiliriz.



Şekil 5.17 : Ağırlıkça su emme oranına göre Oranlama metoduyla hesaplanmış su ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü silis dumanı yüzdesi grafikleri

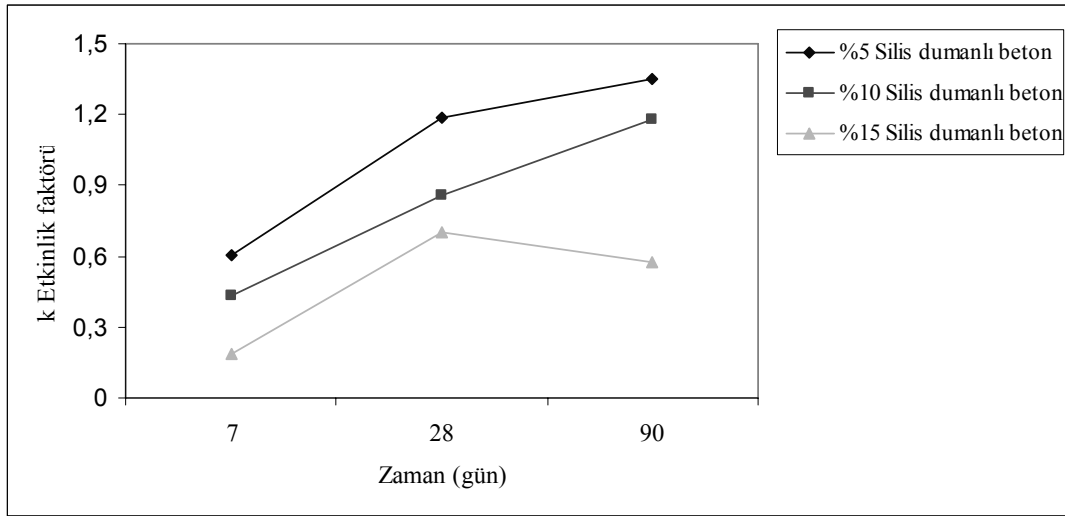
Şekil 5.17’de su ortamındaki ağırlıkça su emme oranına göre oranlama metodu kullanılarak hesaplanmış k etkinlik faktörü – Silis dumanı yüzdesi grafiği gösterilmiştir. Grafiğe bakıldığında en yüksek etkinlik faktörü değerinin %10 Silis dumanı katkılı numunelerde, en düşük etkinlik faktörü değerinin de %15 Silis dumanı katkılı numunelerde olduğu görülmektedir.



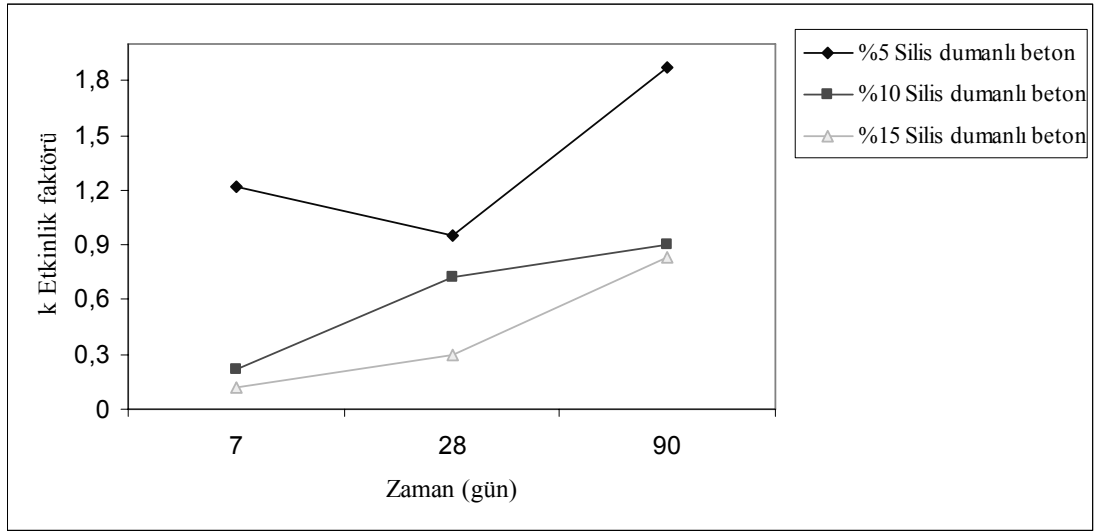
Şekil 5.18 : Ağırlıkça su emme oranına göre Oranlama metoduyla hesaplanmış hava ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü silis dumanı yüzdesi grafikleri

Şekil 5.18’de hava ortamındaki ağırlıkça su emme oranına göre oranlama metodu kullanılarak hesaplanmış k etkinlik faktörü – Silis dumanı yüzdesi grafiği gösterilmiştir. Grafiğe bakıldığında en yüksek etkinlik faktörü değerinin %10 Silis dumanı katkılı numunelerde, en düşük etkinlik faktörü değerinin de %15 Silis dumanı katkılı numunelerde olduğu görülmektedir. Fakat tüm katkılı numunelerin etkinlik faktörü değerlerinin birbirine çok yakın değerler aldığı da göz ardı edilmemelidir.

Ağırlıkça su emme oranı için hesaplanmış k etkinlik faktörü değerlerine baktığımızda eşit işlenebilme metodu ve oranlama metoduna göre çizilmiş grafiklerde su ortamındaki numuneler için birbirine yakın değerler aldığı, hava ortamındaki numuneler için ise birbirine yakın değerler almadığı görülmektedir.



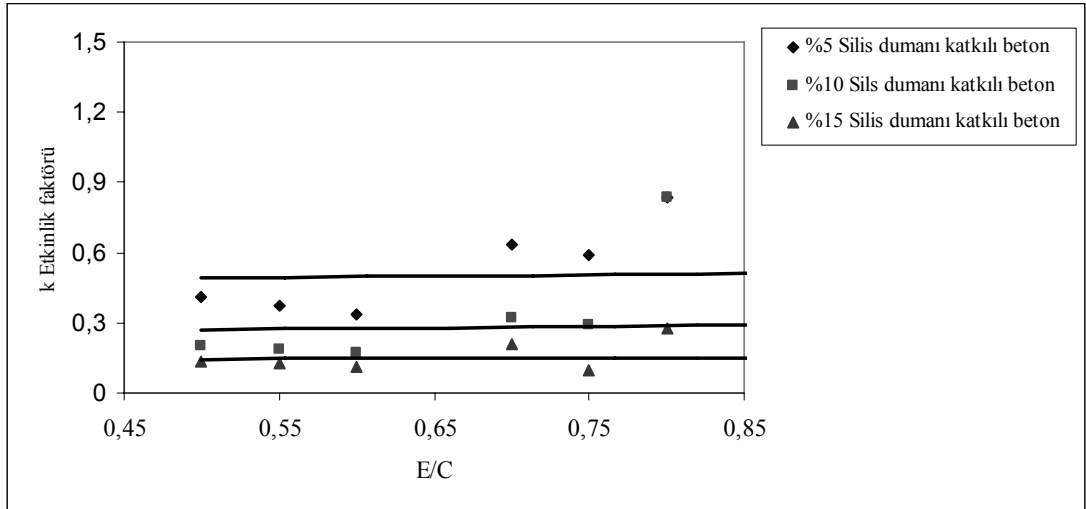
Şekil 5.19 : Su ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü-gün grafikleri



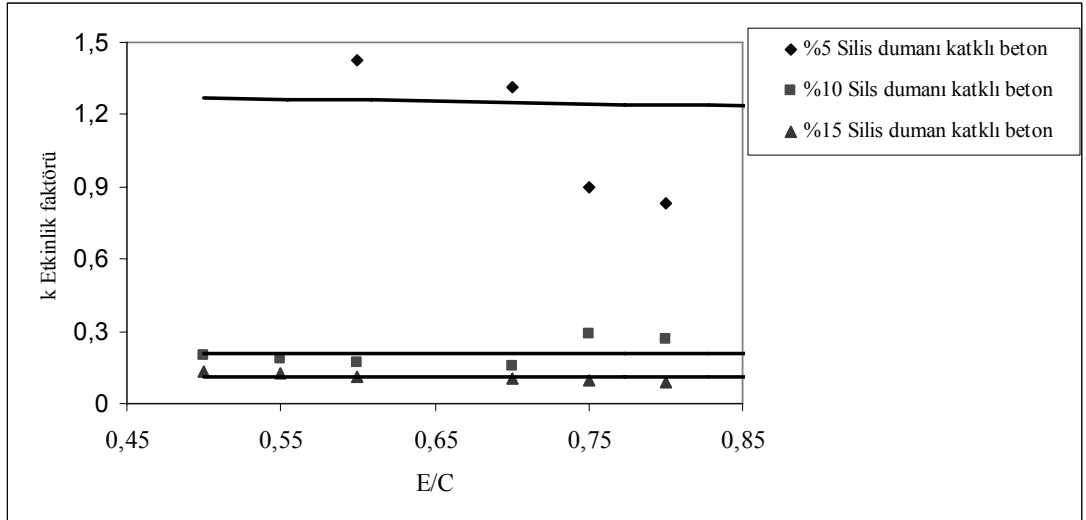
Şekil 5.20 : Hava ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü-gün grafikleri

Şekil 5.19’da elde edilen grafikte görüldüğü gibi Silis dumanının etkinlik faktörü değerlerinde su ortamındaki numuneler için %5 ve %10 Silis dumanı katkılı numuneler için 28. günden 90. güne kadar etkinlik faktöründeki değerlerde artış olduğu, %15 Silis dumanı katkılı numune için ise 28. güne kadar artma, 28. günden sonra ise azalma olduğu görülmektedir. Bunun sebebi çimento dozajının düşük olmasından dolayı %15 Silis dumanı eklenen numunelerin yeterli miktarda kireçle reaksiyona girmemesi olarak nitelendirilebilir.

Şekil 5.20’de elde edilen grafikte görüldüğü gibi Silis dumanının etkinlik faktörü değerlerinde hava ortamındaki numuneler için ise %10 ve %15 Silis dumanı katkılı numuneler için 28. günden 90. güne kadar artış, %5 Silis dumanı katkılı numuneler için ise 28. güne kadar meydana azalma, 28. günden sonra artış meydana geldiği görülmektedir. Hava ve su ortamındaki numunelerin k etkinlik faktörü – zaman grafiklerini karşılaştırdığımızda, %5 Silis dumanı katkılı numune için 28. gün haricinde her iki ortamda da artış meydana geldiği, %10 Silis dumanı katkılı numune için her iki ortamda da sürekli artış meydana geldiği, %15 Silis dumanı katkılı numune için ise 28. günden 90. güne kadar sürekli artış meydana geldiği fakat su ortamında meydana gelen artışın daha fazla olduğu görülmektedir.

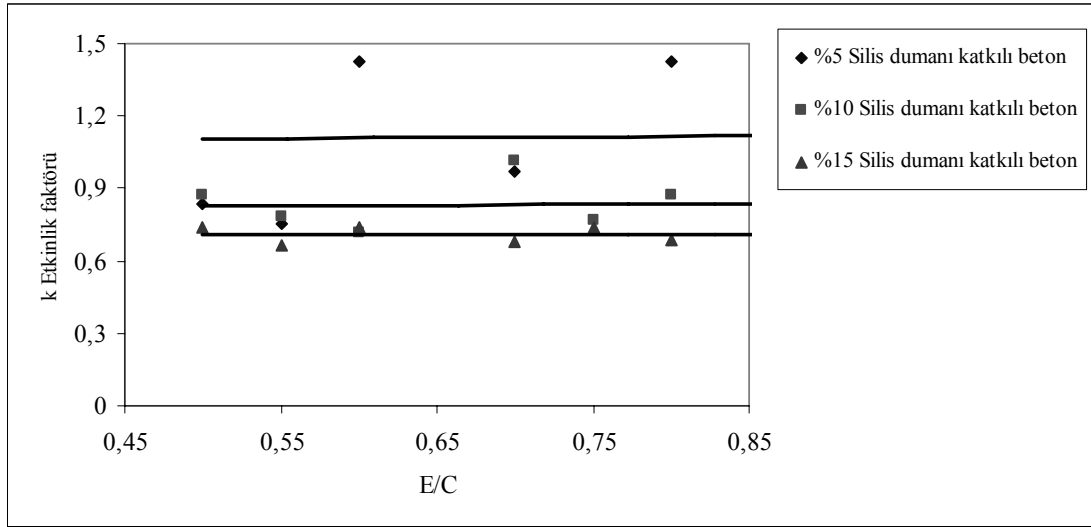


Şekil 5.21 : Su ortamındaki numunelerin 7. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri

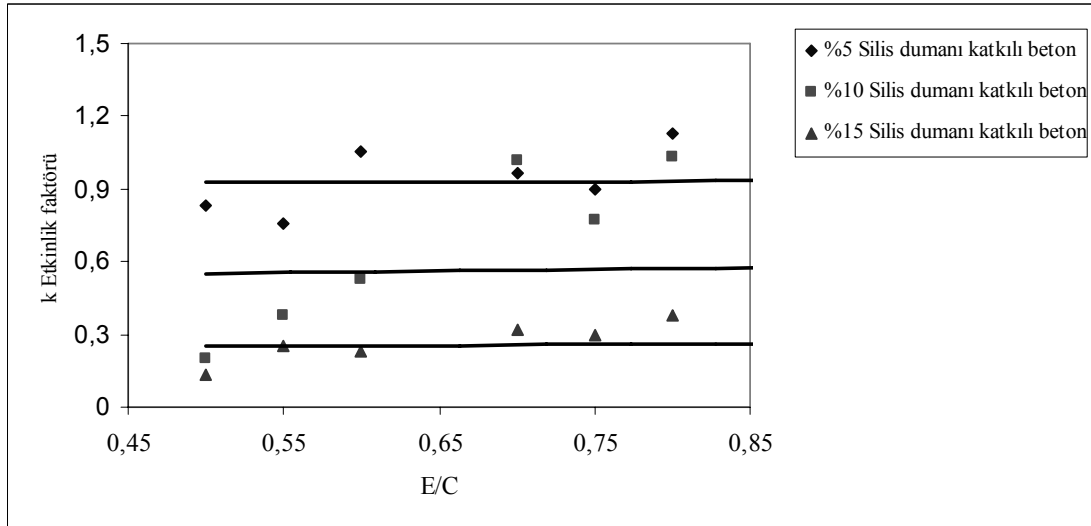


Şekil 5.22 : Hava ortamındaki numunelerin 7. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri

Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de görüldüğü gibi k etkinlik faktörü değerleri 7 günlük numuneler için her iki grafikte de birbirine benzer niteliktedir. Grafikleri incelediğimiz zaman en yüksek etkinlik faktörü değerlerinin %5 Silis dumanı katkılı betonlarda, en düşük etkinlik faktörü değerlerinin ise %15 Silis dumanı katkılı betonlarda olduğu görülmektedir. Ayrıca %10 ve %15 Silis dumanı katkılı betonlar için su ve hava ortamındaki değerler karşılaştırıldığında etkinlik faktörü değerlerinin her iki ortam için de benzer değerler aldığı, %5 Silis dumanı katkılı betonlar için ise etkinlik faktörü değerlerinin hava ortamındaki numunelerde su ortamındaki numunelere göre önemli bir artış olduğu görülmektedir.



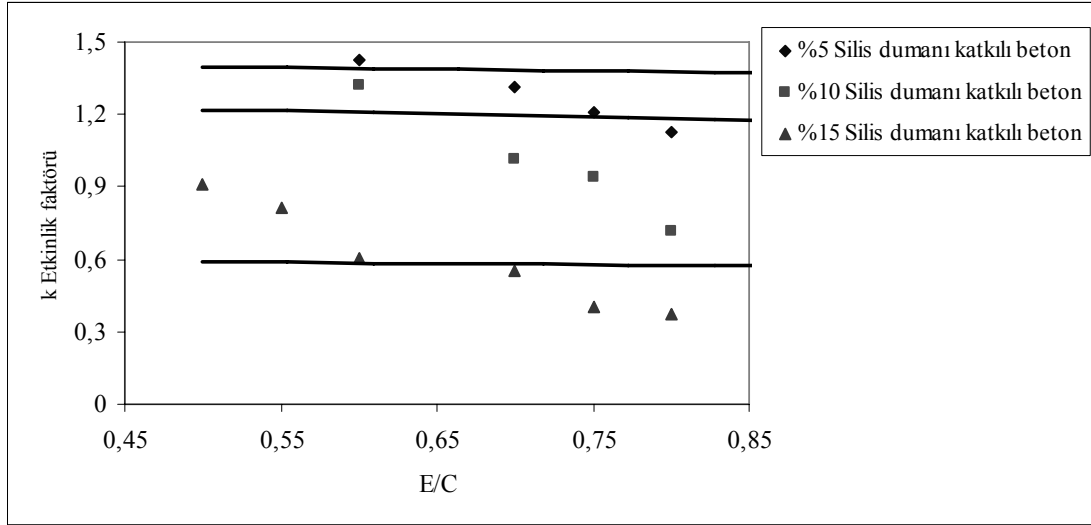
Şekil 5.23 : Su ortamındaki numunelerin 28. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri



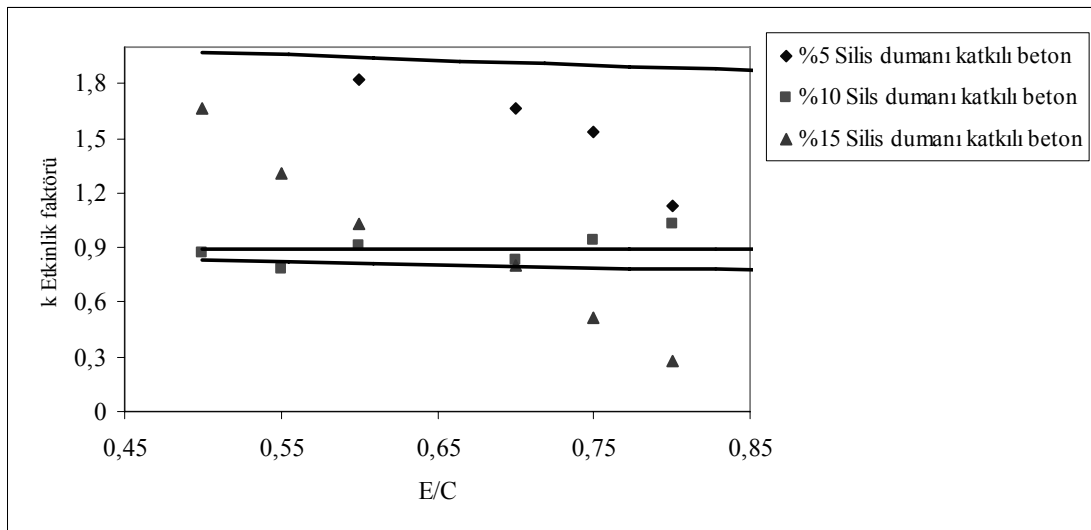
Şekil 5.24 : Hava ortamındaki numunelerin 28. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri

Şekil 5.23 ve Şekil 5.24’de görüldüğü gibi k etkinlik faktörü değerleri 28 günlük numuneler için her iki grafikte de birbirine benzer niteliktedir. Grafikleri incelediğimiz zaman en yüksek etkinlik faktörü değerlerinin %5 Silis dumanı katkıli betonlarda, en düşük etkinlik faktörü değerlerinin ise %15 Silis dumanı katkıli betonlarda olduğu görülmektedir. Genel olarak grafiklere bakıldığında, su ortamındaki tüm katkıli betonların etkinlik faktörü değerlerinin hava ortamındaki değerlere göre daha yüksek değerler aldığı; eğrilere baktığımızda ise tüm katkıli

betonlar için hava ve su ortamındaki kararlılıklarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 5.25 : Su ortamındaki numunelerin 90. günde k etkinlik faktörü-E/C grafikleri



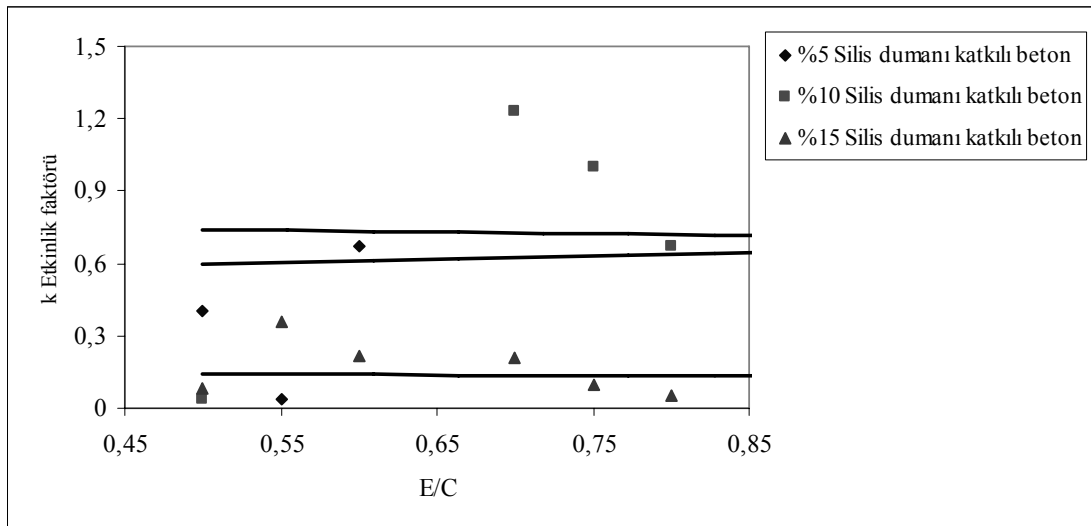
Şekil 5.26 : Hava ortamındaki numunelerin 90. günde k etkinlik faktörü-E/C grafikleri

Şekil 5.25 ve Şekil 5.26’da görüldüğü gibi k etkinlik faktörü değerleri 90 günlük numuneler için yaklaşık olarak iki grafikte de birbirine benzer sonuçlar çıkmıştır. Grafikleri incelediğimiz zaman en yüksek etkinlik faktörü değerlerinin %5 Silis dumanı katkılı betonlarda, en düşük etkinlik faktörü değerlerinin ise %15 Silis dumanı katkılı betonlarda olduğu görülmektedir. Genel olarak grafiklere bakıldığında, su ortamındaki tüm katkılı betonların etkinlik faktörü değerlerinin hava

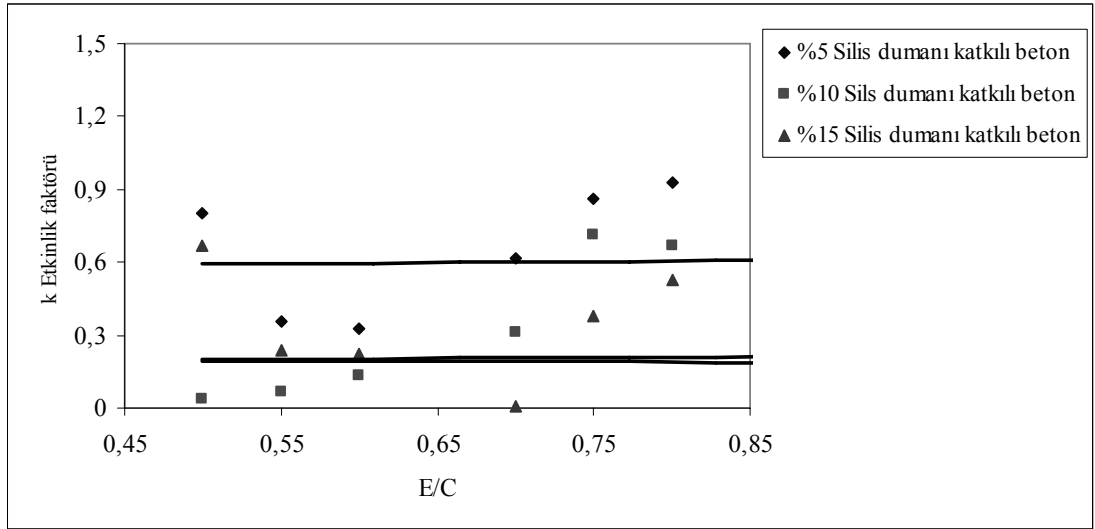
ortamındaki değerlere göre daha yüksek değerler aldığı; eğrilere baktığımızda ise tüm katkılı betonlar için hava ve su ortamındaki kararlılıklarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. %5 Silis dumanı katkılı numunelere bakıldığında, etkinlik faktörü için özellikle hava ortamında 7. ve 28. günlere göre oldukça yüksek değerler çıktığı görülmektedir. %10 ve %15 silis dumanı katkılı beton için ise 7. ve 28. günlerdeki etkinlik faktörü değerlerine yakın sonuçlar çıktığı gözlenmiştir.

Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'daki grafikler mukavemet değerleri için hesaplanmış etkinlik faktörü değerlerini göstermektedir. Genel olarak incelediğimizde, %5 Silis dumanı katkılı numunelerin etkinlik faktörü değerlerinin diğer numunelere göre daha yüksek değerler aldığını görebiliriz. Fakat %10 Silis dumanı katkılı betonunda %5 katkılı betona yakın sonuçlar aldığını da gözlemlemek mümkündür.

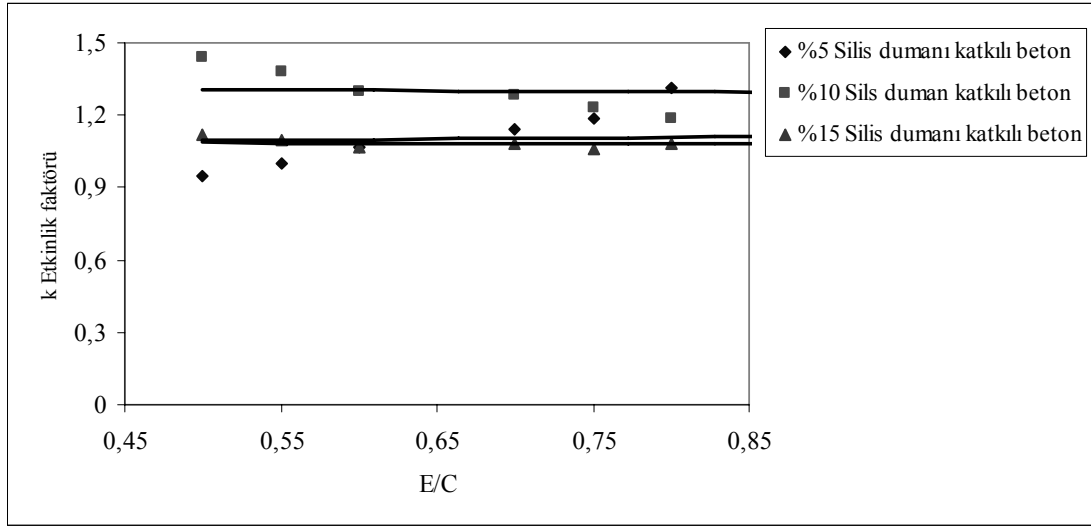
Aynı grafikleri k etkinlik faktörü silis dumanı yüzdesi grafiklerinde yaptığımız gibi ağırlıkça su emme oranı için hesaplanmış k etkinlik faktörü değerleri için de inceleyebiliriz.



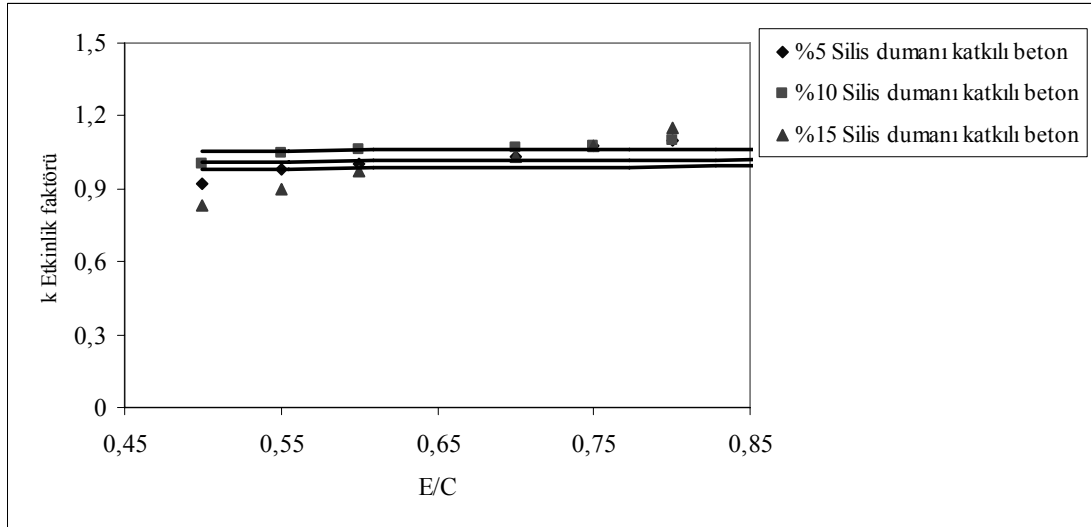
Şekil 5.27 : Su ortamındaki numunelerin Ağırlıkça su emme oranı için eşit işlenebilme metoduna göre hesaplanmış 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri



Şekil 5.28 : Hava ortamındaki numunelerin Ağırlıkça su emme oranı için eşit işlenebilme metoduna göre hesaplanmış 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri



Şekil 5.29 : Su ortamındaki numunelerin Ağırlıkça su emme oranı için Oranlama metoduna göre hesaplanmış 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri



Şekil 5.30 : Hava ortamındaki numunelerin Ağırlıkça su emme oranı için Oranlama metoduna göre hesaplanmış 90. gündeki k etkinlik faktörü-E/C grafikleri

Şekil 5.26, Şekil 5.27, Şekil 5.28 ve Şekil 5.29'daki grafikleri incelediğimizde genelde birbirine paralel grafikler olduğunu görüyoruz. Su/çimento oranı arttıkça etkinlik faktörünün genelde azaldığını görüyoruz. Ayrıca, mukavemet için çizilmiş olan grafiklerde olduğu gibi %5 ve %10 Silis dumanı katkılı betonların etkinlik faktörünün %15 katkılı numunelerden daha yüksek değerler aldığı görülmektedir.

Her iki metodu karşılaştıracak olursak, Oranlama metodunda çıkan grafiklerin Ağırlıkça su emme metoduna göre hesaplanan grafiklere göre daha kararlı bir artma veya azalma gösterdiği görülmektedir.

Dikkat edilmesi gereken diğer bir durumda etkinlik faktörü değerlerinin doğru hesaplanabilmesi için $1/Sa$ değerlerini yani ağırlıkça su emme oranı değerlerinin kesir olarak tersi değerleri kullanmış olmamızdır. Bu durumda %10 ve %15 Silis dumanı katkılı numunelerin etkinlik faktörü ne kadar fazla ise ağırlıkça su emme oranı değerleri diğer numunelere göre o kadar azdır, yani daha az su emmiştir. Bu sonuçtan da mukavemet için hesaplanmış etkinlik faktörü değerlerinin ağırlıkça su emme oranı için hesaplanmış etkinlik faktörü değerleriyle mantık açısından doğru orantılı olduğunu söyleyebiliriz. Yani mukavemet açısından etkinliği fazla olan numunelerin ağırlıkça su emme oranları düşüktür.

6. SONUÇLAR:

Elkem Microsilika Yapı Kimyasallarından temin edilen Silis dumanı kullanılarak üretilen betonlarda mukavemet ve ağırlıkça su emme oranı özellikleri eklenen silis dumanı yüzdelere göre incelenmiş ve elde edilen basınç dayanımı ve ağırlıkça su emme oranı değerleri kullanılarak her iki özellik için de ayrı ayrı k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur. Bulunmuş olan k etkinlik faktörü değerlerinin, silis dumanı yüzdesine, zamana ve kür koşullarına bağlı olarak almış olduğu değerler irdelenmiştir. Numuneler üzerinde su emme deneyleri yapılarak silis dumanı yüzdesine ve ortama göre elde edilen sonuçlar araştırılmıştır. Yapılan bu çalışmalar neticesinde ulaşılan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

A. Taze Beton Deney Sonuçları:

Yapılmış olan taze beton deneyleri sonucunda değişik oranlarda silis dumanı ilave edilmesiyle yani toplam bağlayıcı miktarının artmasıyla, eşit işlenebilirlik için ihtiyaç duyulan su miktarında artış olmuş, ancak su/toplam bağlayıcı oranlarına bakıldığında silis dumanı katkılı betonlarda kontrol betonuna göre daha düşük değerler elde edilmiştir. %5, %10 ve %15'lik serilerin hepsinde görülen ortak özellik silis dumanı yüzdesinin artmasıyla daha düşük su/bağlayıcı oranının elde edilmesidir. Buradan çıkarılan sonuç silis dumanının işlenebilirliği iyileştirdiği ve betonda su ihtiyacını azalttığıdır.

B. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları:

B.1 Basınç Dayanımı Sonuçlarının İrdelenmesi:

Basınç dayanımı deney sonuçlarında genelde silis dumanı eklenen betonların 28. güne kadar kontrol betonuna biraz daha yakın değerler aldığı görülmüştür. Bunun sebebi silis dumanının puzolanik reaksiyona girmesi için çimentonun hidrasyonu sonucu oluşacak kireci beklemesidir. 28. ve 90. günkü basınç dayanımları incelendiğinde silis dumanı eklenen betonların dayanımlarının kontrol betonların dayanımlarından fazla olduğu görülmektedir. Basınç dayanımları kür koşullarına

göre incelendiğinde ise hava ortamındaki numunelerin su ortamındaki numunelere göre daha düşük mukavemet verdiği görülmektedir.

B.2 Su Emme Deney Sonuçlarının İrdelenmesi:

Su emme deney sonuçları incelendiğinde su/çimento oranı arttıkça beton numunelerinin su emme oranlarının arttığı görülmektedir. Ağırlıkça su emme oranı değerleri ortam koşullarına bakılarak incelendiğinde, bütün serilerde su ortamındaki ağırlıkça su emme oranı değerleri hava ortamına göre daha düşük çıkarak daha az su emdiği görülmüştür.

B.3 k Etkinlik Faktörünün İrdelenmesi:

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

Kür koşulları göz önüne alındığında suda bekletilen numunelerin etkinlik faktörü değerlerinin genel olarak hava ortamında bekletilen numunelerden daha fazla olduğu görülmektedir. Puzolanik reaksiyonun nemli ortamda daha hızlı gelişmesinin bunda önemi büyüktür. Mukavemet değerleri için bulunan etkinlik faktörü değerleri ağırlıkça su emme oranı için de hem eşit işlenebilme metoduyla hem de oranlama metoduyla bulunmuştur. Bulunan sonuçlarda mukavemet için ve ağırlıkça su emme oranı için bulunan etkinlik faktörü değerlerinin genel olarak birbiriyle doğru orantılı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, numuneler mukavemet açısından etkinlik faktörü ne kadar yüksekse ağırlıkça su emme oranı o kadar düşüktür.

Yapılmış olan bu çalışma sonucunda Silis dumanının betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve etkinliği belirlenmiştir. Bu konu ile ilgili ileriki yıllarda k etkinlik faktörü değerlerinin hesaplanma yöntemlerine ilave olabilecek çalışmalar yapılmalı ve bu çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmalıdır.

KAYNAKLAR :

- [1] **Sivasundaram, V., Carette, G.G. and Malhotra, V.M.** , 1989 Efficiency factors for Condensed Silica Fume in Concrete, *Proceedings of Third International Conference on fly ash , silica fume , slag and natural pozzolans in concrete* , Volume-2 , Trondheim , Norway.
- [2] **Holand, I. , Carette, G.G. and Malhotra, V.M.** , 1989 *Proceedings of Third CANMET/ACI International conference on fly ash , silica fume , slag and natural pozzolans in concrete* , Trondheim , Norway.
- [3] **Wilson, H.S. , V., Carette, G.G. and Malhotra, V.M.** , 1992 *Proceedings of Fourth CANMET/ACI International conference on fly ash , silica fume , slag and natural pozzolans in concrete* , Volume-2 , Istanbul , Turkey.
- [4] **Özcan M.**,1997 Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Külünün Beton Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Katsayısının Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] **Tuygun, C.S.**, 2002 Çayırhan Uçucu Külünün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Faktörünün İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] **Anuk, O.** 2004 CEM I 42.5 Çimentolu Düşük Dozajlı Betonlarda F Tipi Uçucu Külün Etkinliği, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] **Özturan, T.**, 1991 Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği, 2. *Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul.
- [8] **Yeğinobalı, A.**, 2001 Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Ankara.
- [9] **Ramachandran V.S.** , 1984 Condensed Silica fume , *Classification of mineral admixtures, Concrete Admixtures Handbook, Properties, Science and Technology*, Ottawa, Canada.
- [10] **Dodson, H. Vance**, 1990 Silica Fume, *Concrete Admixtures*, New York
- [11] **Malhotra, V.M. , Carette, G.G.**, 1991 Silica Fume in Concrete, *CANMET/ACI International Workshop on Silica fume in concrete*, Washington, D.C., U.S.A.
- [12] **Özyıldırım, Ç.**, 1987 Laboratory Investigation of Concrete Containing Silica Fume for Use in Overlays, *ACI Materials Journal*, ,3-7.
- [13] **Gjorv, O.E., Monterio, P.J.** 1990 Effect of Condensed Silica Fume on the Steel-Concrete Bond, *ACI Materials Journal*, 87, 573-580.

- [14] **Hertz, K.D.**, 1992 Danish Investigations on Silica Fume Concrete at Elevated Temperatures, *ACI Materials Journal*, 89, 345-347.
- [15] **Cong, X., Gong, S.**, 1992 Role of Silica Fume in Compressive Strength of Cement Paste, Mortar, and Concrete, *ACI Materials Journal*, 89, 375-387.
- [16] **Hooton, R.D.**, 1993 Influence of Silica Fume Replacement of Cement on Physical Properties and Resistance to Sulfate Attack, Freezing and Thawing and Alkali-Silica Reactivity, *ACI Materials Journal*, 90, 143-151.
- [17] **Bayasi, Z., Zhou, J.**, 1993 Properties of Silica Fume Concrete and Mortar, *ACI Materials Journal*, 90, 349-356
- [18] **ACI Committee**, 1994 Use of Natural Pozzolans in Concrete, *ACI Materials Journal*, 91, 410-426.
- [19] **Ozyildirim, C., Halstead, W.J.**, 1994 Improved Concrete Quality with Combinations of Fly Ash and Silica Fume, *ACI Materials Journal*, 91, 587-601.
- [20] **ACI Committee**, 1995 Guide for the Use of Silica Fume in Concrete, *ACI Materials Journal*, 92, 437-440.
- [21] **Shannag, M.J.**, 2000 High Strength Concrete Containing Natural Pozzolan and Silica Fume, *Cement and Concrete Composites* 22, 399-406.
- [22] **Bhanja, S., Sengupta, B.**, 2002 Investigations on the Compressive Strength of Silica Fume Concrete Using Statistical Methods, *Cement and Concrete Research* 32, 1391-1394.
- [23] **Papadakis, V.G.**, 1999 Experimental Investigation and Theoretical Modeling of Silica Fume Activity in Concrete, *Cement and Concrete Research* 29, 79-86.
- [24] **Almusallam, A.A., Beshr, H.**, 2004 Effect of Silica Fume on the Mechanical Properties of Low Quality Coarse Aggregate Concrete, *Cement and Concrete Research* 26, 891-900.
- [25] **Dotto, J.M.R.**, 2004 Influence of Silica Fume Addition on Concretes Physical Properties and on Corrosion Behaviour of Reinforcement Bar, *Cement and Concrete Research* 26, 31-39.
- [26] **Jianyong, L., Pei, T.**, 1997 Effect of Slag and Silica Fume on Mechanical Properties of High Strength Concrete, *Cement and Concrete Research* 27, 833-837.
- [27] **Sabir, B.B.**, 1997 Mechanical Properties and Frost Resistance of Silica Fume Concrete, *Cement and Concrete Research* 19, 285-294.

- [28] **Bhanja, S., Sengupta, B.,** 2005 Influence of Silica Fume on the Tensile Strength of Concrete, *Cement and Concrete Research* 35, 743-747.
- [29] **Papadakis, V.G., Antiohos, S.,** 2002, Supplementary cementing materials in concrete Part II: A fundamental estimation of the efficiency factor, *Cement and Concrete Research* 32, 1533-1538.
- [30] **Babu, K.G., Kumar, V.S.,** 2000 Efficiency of GGBS in concrete, *Cement and Concrete Research* 30, 1031-1036
- [31] **Shamim, M.S.,** 1995 Minimum Length of Curing of Silica Fume Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering* , pp.134-139.
- [32] **Bubshait, A.A., Tahir, B.,** 1997 Effect of silica fume on the concrete–steel bond *Building Research and Information* 25, pp.365-369
- [33] **Malhotra, V.M., Carrette, G.G.,** 1982 Silica Fume , a pozzolan of new interest for use in some concretes, *Concrete Construction May*, pp.443-446
- [34] **Esping, O., Lofgren, I.,** 2005 Cracking due to plastic and autogenous shrinkage, *Department of civil and environmental engineering of Chalmers University*, Report 2005:11
- [35] **Microsilica 600–Application guidelines,** *New Zealand.*
- [36] **AASHTO M 307,** 1995 Microsilica for Use in Concrete and Mortar.
- [37] **ASTM C 311,** 2004 Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete.
- [38] **ASTM C 618,** 2005 Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolans for Use in Concrete.
- [39] **ASTM C 1240,** 2005 Silica Fume Used in Cementitious Mixtures.
- [40] **Postacıoğlu, B.,** 1975 Bağlayıcı Maddeler, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [41] **CEN TC 104 SCI,** 31 January (2000) k-Value Determination for Type II Additions, Arnherm, Holland.
- [42] **TS 3624,** Temmuz (1981) Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu, Türk Standardları Enstitüsü

ÖZGEÇMİŞ

1982 Yılında İstanbul’da doğan Emir İLTER, orta öğrenimini 2000 yılında Y.D.A.Otakçılar Lisesi’nde tamamladı. Aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne girerek öğrenim hayatını sürdürdü. 2004 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilim dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen bu bölümde öğrenim görmektedir.