

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOLLOİD SİLİKANIN UÇUCU KÜLLÜ HARÇLARIN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Doğan GÜNDOĞDU**

**Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği
Programı : Yapı Mühendisliği**

OCAK 2010

**KOLLOİD SİLİKANIN UÇUCU KÜLLÜ HARÇLARIN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Doğan GÜNDOĞDU
501061029**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Ocak 2010

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Bekir Y. PEKMEZCİ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hulusi ÖZKUL (İTÜ)
Doç. Dr. Nabi YÜZER (YTÜ)**

OCAK 2010

Aileme...

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında deneyimlerinden ve değerli fikirleriyle bana yol gösteren, çalışmamın her aşamasında yardım ve hoşgörüsünü esirgemeyen, üzerimde ki emeğini asla unutmayacağım danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Bekir Y. PEKMEZCİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen, danışman hocam kadar ilgi gösteren, çalışmalarımda büyük emeği olan Sayın Yrd. Doç. Dr. Hakan N. ATAHAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı malzemesi Ana Bilim Dalı'ndaki hocalarıma, araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve laboratuvar personeline samimi yardım ve desteklerinden dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Bana çalışmalarım sırasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen kuzenim Feride KAR, annem Hacer GÜNDOĞDU, babam Muzaffer GÜNDOĞDU ve kardeşim Duygu GÜNDOĞDU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2009

Doğan GÜNDOĞDU

İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç ve Kapsam.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Portland Çimentosunda Yer Alan Ana Bileşenlerin Özellikleri	3
2.1.1 Ara bileşenler	3
2.1.1.1 Trikalsiyum silikat (C_3S)	3
2.1.1.2 Bikalsiyum silikat (C_2S)	4
2.1.1.3 Trikalsiyum alüminat (C_3A)	4
2.1.1.4 Tetra kalsiyum alimünoferit (C_4AF)	5
2.1.2 Hidratasyon süreci	6
2.2 Puzolanlar.....	8
2.2.1 Puzolanik reaksiyonlar ve puzolanik malzemelerin aktivitesi.....	8
2.2.2 Puzolanik reaksiyon ürünleri	11
2.2.3 Puzolanların sınıflandırılması	12
2.2.3.1 Doğal puzolanlar	12
2.2.3.2 Yapay puzolanlar	12
2.2.4 Puzolanların hidratasyona etkisi.....	13
2.2.5 Uçucu kül.....	14
2.2.6 Uçucu külün sınıflandırılması.....	14
2.2.6.1 Uçucu külün fiziksel yapısı	16
2.2.6.2 Uçucu küllerin mineralojik yapıları ve kimyasal kompozisyonları	16
2.2.6.3 Uçucu kül kullanımının beton özelliklerine etkisi	18
2.2.7 Silis dumanı.....	19
2.2.8 Kolloid silika	21
2.2.8.1 Kimyasal yapısı ve üretim şekli	21
2.2.8.2 Tane boyutu	22
2.2.8.3 Silis dumanına göre karşılaştırılması	23
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	25
3.1 Üretilen Harçların Özellikleri	25
3.1.1 Kum	27
3.1.2 Çimento.....	27
3.1.3 Su.....	29
3.1.4 Uçucu kül.....	29

3.1.5 Süperakışkanlaştırıcı	30
3.1.6 Kolloid silika	30
3.2 Numunelerin Hazırlanması.....	30
3.3 Harç Üretimi, Karıştırma, yerleştirme, Saklama, Numune Boyutları.....	31
3.4 Uygulanan Deneyler.....	32
3.4.1 Taze harç deneyleri	32
3.4.2 Sertleşmiş harç deneyleri.....	33
4. DENEY SONUÇLARI.....	35
4.1 Taze Harç Deney Sonuçları.....	35
4.2 Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları	35
4.2.1 Eğilme mukavemeti deney sonuçları	35
4.2.2 Basınç mukavemeti deney sonuçları.....	39
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	43
5.1 Taze Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	43
5.2 Sertleşmiş Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	47
5.2.1 Eğilme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi	47
5.2.2 Basınç deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi	55
6. SONUÇLAR	63
6.1 Sonuçlar.....	63
KAYNAKLAR.....	64
EKLER.....	67

KISALTMALAR

KS	: Kolloid silika
UK	: Uçucu Kül
P.Ç.	: Portland Çimento
NS	: nanosilika
ASTM	: American Society for Testing and Materials
TS	: Türk Standartları
EN	: European Norms
SD	: Silis dumanı
TMOS	: trimethışlethoksilen
TEOS	: Tetraethoksilen
S/B	: Su / Bağlayıcı
P	: Kırılma anında max. yük
L	: Mesnet açıklığı
b	: Deney parçasının genişliğı
h	: Deney parçasının kalınlığı
P_k	: Numunenin kırılma kuvveti
a	: Prizma kesitinin boyutu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Portland Çimentosunun su ile reaksiyonun da ana bileşenlerinin kazandığı özellikler.....	5
Çizelge 2.2: Uçucu kül özellikleri.....	15
Çizelge 2.3: Türkiye’deki uçucu küllerin kimyasal özellikleri.....	17
Çizelge 2.4: Türkiye de ki santrallerden elde edilen uçucu külün mineralojik özellikleri.....	17
Çizelge 3.1: Üretilen harçların isimlendirilmesi.....	26
Çizelge 3.2: Kumun fiziksel özellikleri.....	27
Çizelge 3.3: PÇ 42,5 Portland Çimentosu fiziksel özellikleri.....	28
Çizelge 3.4: PÇ 42,5 Portland çimentosu mekanik özellikleri.....	28
Çizelge 3.5: PÇ 42,5 Portland çimentosu kimyasal özellikleri.....	29
Çizelge 3.6: Tunçbilek Uçucu Külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	29
Çizelge 3.7: Kolloid silika teknik özellikleri.....	30
Çizelge 3.8: Örnek karşım Bileşimleri.....	31
Çizelge 4.1: Kullanılan süperakışkanlaştırıcı miktarları.....	35
Çizelge 4.2: Uçucu kül içeren kontrol numuneleri 3 noktalı eğilme dayanımları.....	37
Çizelge 4.3: %20 oranında Uçucu kül içeren numunelerin 3 noktalı eğilme dayanımları.....	38
Çizelge 4.4: %40 oranında UK içeren numunelerin 3 noktalı eğilme dayanımları.....	38
Çizelge 4.5: %60 oranında Uçucu kül numunelerin 3 noktalı eğilme dayanımları.....	39
Çizelge 4.6: Uçucu kül içeren kontrol numuneleri basınç dayanımları.....	40
Çizelge 4.7: %20 oranında Uçucu kül içeren numunelerin basınç dayanımları.....	41
Çizelge 4.8: %40 oranında Uçucu kül numunelerin basınç dayanımları.....	41
Çizelge 4.9: %60 oranında Uçucu kül içeren numunelerin basınç dayanımları.....	42
Çizelge A.1: Kontrol numunelerinin malzeme miktarları.....	69
Çizelge B.1: Malzeme birim fiyatları.....	71
Çizelge B.2: 1 m ³ 350 dozlu beton içerisindeki kolloid silikanın fiyat analizi.....	72

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: C_3S ve C_3A 'nın hidratasyonlarının şematik gösterimi.	7
Şekil 2.2: Saf karma oksitlerin hidratasyon hızları.	8
Şekil 2.3: Pozolan ve Portland Çimento karışımlarının hidratasyonun da serbest kireç miktarının değişimi.	11
Şekil 2.4: Pozolanların Sınıflandırılması.....	12
Şekil 2.5: Çimento taneleri arasındaki boşlukları dolduran uçucu kül taneleri.	18
Şekil 2.6: Yüzey alanı ve tane boyutu ilişkisi.	23
Şekil 2.7: Silis Dumanı ve Kolloid Silikanın boşluk doldurma kabiliyetleri.	24
Şekil 3.1: Kumun granülometri eğrisi.	27
Şekil 3.2: Sarsma tablası.....	32
Şekil 4.1: Numune kodlama sistemi.	36
Şekil 5.1: %20 uçucu kül içeren harçlarda kolloid silika oranı ile sabit işlenebilirlik için kullanılan süperakışkanlaştırıcı oranı ilişkisi.	43
Şekil 5.2: %40 uçucu kül içeren harçlarda kolloid silika oranı ile sabit işlenebilirlik için kullanılan süperakışkanlaştırıcı oranı ilişkisi.	44
Şekil 5.3: %60 uçucu kül içeren harçlarda kolloid silika oranı ile sabit işlenebilirlik için kullanılan süperakışkanlaştırıcı oranı ilişkisi.	44
Şekil 5.4: 0,33 su/bağlayıcı oranında uçucu kül oranına göre süperakışkanlaştırıcı kullanım oranının değişimi.	45
Şekil 5.5: 0,38 su/bağlayıcı oranında uçucu kül oranına göre süperakışkanlaştırıcı kullanım oranının değişimi.	45
Şekil 5.6: 0,43 su/bağlayıcı oranında uçucu kül oranına göre süperakışkanlaştırıcı kullanım oranının değişimi.	46
Şekil 5.7: 0,48 su/bağlayıcı oranında uçucu kül oranına göre süperakışkanlaştırıcı kullanım oranının değişimi.	46
Şekil 5.8: 3 günlük eğilme deneyi sonuçlarının normalize edilmiş değerleri.....	48
Şekil 5.9: 7 günlük eğilme deneyi sonuçlarının normalize edilmiş değerleri.....	48
Şekil 5.10: (a) silis dumanı (b) uçucu kül ve (c) kolloid silika tanelerinin elektron mikroskobu ile çekilmiş fotoğrafları.	49
Şekil 5.11: 28 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımları.	51
Şekil 5.12: 90 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımları.	51
Şekil 5.13: %5 kolloid silika içeren numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımları karşılaştırması.....	53
Şekil 5.14: %10 kolloid silika içeren numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımları karşılaştırması.....	53
Şekil 5.15: %15 kolloid silika içeren numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımları karşılaştırması.....	54
Şekil 5.16: 3 günlük normalize edilmiş basınç dayanımları.	56
Şekil 5.17: 7 günlük normalize edilmiş basınç dayanımları.	56
Şekil 5.18: 28 günlük normalize edilmiş basınç dayanımları.	58

Şekil 5.19: 90 günlük normalize edilmiş basınç dayanımları.....	58
Şekil 5.20: %5 kolloid silika içeren numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımları karşılaştırması.	60
Şekil 5.21: %10 kolloid silika içeren numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük normalize edilmiş basınç dayanımları karşılaştırması.	60
Şekil 5.22: %15 kolloid silika içeren numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük normalize edilmiş basınç dayanımları karşılaştırması.	61

KOLLOİD SİLİKANIN UÇUCU KÜLLÜ HARÇLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

ÖZET

Günümüz beton teknolojisinde, beton maliyetini azaltma ve dayanım açısından puzolanlar önemli bir yer tutmaktadır. Ülkemizde ve dünyada beton karışımlarında çimento maliyetlerini düşürmek açısından, yapay puzolan sınıfına giren termik santral atığı uçucu küller en çok tercih edilen puzolandır. Uçucu külün durabiliteye katkısı olduğu önceden beri bilinmektedir. İnce tanecikli yapısı sayesinde filler özelliği de göstermektedir. Çimento taneleri arası boşlukları minimize ettiği için dayanıma katkısı vardır. Ancak uçucu kül betonun erken yaşlarında dayanım kaybına yol açmaktadır. Bu sebeple karışımlarda fazla oranda uçucu külün, çimentonun yerini alması sınırlı bir hal alır. Bu deneysel çalışmada uçucu külün neden olduğu erken yaşlardaki dayanım kaybının sentetik olarak üretilen bir malzeme olan kolloid silika ile giderilip giderilemeyeceği araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, sadece uçucu kül içeren kontrol numuneleri referans alınarak, çimento ile ağırlıkça yer değiştiren uçucu küllü karışımlara değişik oranlarda kolloid silika eklenmesi ile kolloid silikanın uçucu küllü harçlar üzerindeki mekaniksel etkisi araştırılmıştır.. UK oranları %20, %40, %60 olarak seçilmiştir. Her bir uçucu kül oranı için %0, %5, %10, %15 oranlarında kolloid silika eklenmiştir. Bu karışımlar 0,33, 0,38 0,43, 0,48 olmak üzere dört farklı su/bağlayıcı oranı ile üretilmişlerdir. Toplam 48 seri harç üretilmiştir. Her bir kolloid silika uçucu kül oranı için 3, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde bekletilmiş numuneler hazırlanmıştır. Numuneler eğilme ve basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler sonunda kolloid silikanın erken yaşlarda uçucu külün yaratmış olduğu dayanım kayıplarını giderdiği, buna karşın kolloid silikanın geç yaşlarda dayanım düşüklüğüne sebebiyet verdiği görülmüştür.

EFFECT OF COLLOIDAL SILICA ON MECHANICAL PROPERTIES OF FLY ASH CEMENT MORTARS

SUMMARY

At present concrete technology, pozzolans have an important role in terms of cost reduction and increasing performance of concrete. Fly ash which is a thermal power plant byproduct and classified as an artificial pozzolan, is the most preferred pozzolan in our country and around the world. It has a filler effect between cement particles due to its fine structure. This filler property of fly ash contribute to concrete's strength. Contribution of fly ash to durability of concrete has already known, however, using large amounts of fly ash on concrete mix leads to reduction of strength at early ages of concrete. Therefore, limitations are usually applied relevant to replacing a part of cement with fly ash. The purpose of this experimental study was to check whether if the colloid silica, which is a synthetic material, could overcome with strength reduction at early ages due to fly ash use. Within this study, control samples which contain only fly ash, reference to kolloid silica and fly ash mixture at different rates. Fly ash rates were selected as %20, %40, %60. Colloidal silica rates were selected as %5, %10, %15 and for each fly ash rate, colloid silica was added separately. Four different water /cement ratio, which were selected 0,33, 0,38, 0,43, 0,48 were applied all mixtures. Totally 48 series mortar were produced. Each specimen, containing only fly ash and kolloid silika +fly ash, was cured at 3, 7, 28, 90 days. Specimens are exposed to bending tests and compression tests. Experiments indicate that colloidal silica can improve the cement mortars's early age strength. The resulting high early age strength, however, is gained at the expense of low final strength.

1. GİRİŞ

İnşaat alanında Portland Çimentolu (PÇ) ürünler ve beton en çok kullanılan malzemeler arasındadır [1]. Betonun bu derece hayati bir malzeme olarak kabul edilmesinde en önemli etkenlerden biri; beton teknolojisindeki hızlı gelişmeler ile beton kalitesinin çok yüksek mertebelere ulaşmasıdır. Kimyasal katkıların kullanılmaya başlanmasıyla, su/çimento oranları oldukça düşük betonlar üretmek mümkün olmuş, buna bağlı olarak yüksek performanslı betonlar üretilmiştir. Günümüzde 100 N/mm²'ye kadar basınç dayanımına sahip betonlar beton santrallerinde rutin olarak üretilip yapılarda kullanılabilmektedir [2].

Son 25 yıl içerisinde fizik, kimya, biyoloji bilim dallarında devrim niteliğindeki gelişmeler bizlere, malzemeleri en küçük boyutlarda irdeleme ve kullanma imkanı vermiştir. Nanoteknoloji bu devrimin sonucudur. Nano, Latince cüce anlamına gelir ve 1 nanometre (nm) 10⁻⁹ m ye eşittir. Nanoteknoloji, malzeme dünyasını kontrol etmek adına vizyonumuzu, beklentilerimiz ve kabiliyetlerimizi top yekün değiştirmiştir [3].

Nano-bilimdeki gelişmeler yapı malzemesi alanında derin etkiler yaratmıştır. Bunların başında beton ve harç teknolojisi üzerindeki etkileri gelmektedir. Nano bilim ışığında yapılan çalışmalar ve gelişen teknolojik ekipmanlar sayesinde, çimentolu ürünlerin özellikleri üzerinde en etkin parametre olan hidrasyon gelişimini daha rahat gözlemleyebilme ve irdeleyebilme fırsatı doğmuştur [4].

1.1 Amaç ve Kapsam

Atık malzemelerden faydalanmak ve enerji tüketimini azaltmak amacıyla, çimento hamuru içerisine, mineral katkı olarak adlandırılan uçucu kül (UK) ,yüksek fırın curufu, silis dumanı gibi malzemeler eklenir. Mineral katkılar, dayanıma azımsanmayacak ölçüde katkı sağlarlar. Endüstriyel atıklardan yapay puzolan

sınıfına giren ve termik santral baca külü olan uçucu küller inşaat sektöründe çok yaygın kullanım alanı bulmuştur [4].

Uçucu küller, hem çimentoya hem de betona katkı maddesi olarak katılırlar. Uçucu kül, ince malzeme olduğundan, kırıcıda ve hammadde değirmeninde elektrik enerjisinden tasarruf edilebilmektedir. Bu madde, aynı zamanda kalsine olmuş ve kısmen pişmiş bir halde olduğundan fırında da enerji tasarrufu mümkün olmaktadır. Çimentodan daha ucuz olması nedeni ile de ekonomiktir. Ancak çimento içerisinde fazla miktarlarda kullanılan uçucu külün erken dayanıma negatif etkileri mevcuttur literatürde, uçucu külün bu negatif etkilerini gidermek için daha ince olan ve puzolanik aktivitesi daha fazla olan diğer bir yapay puzolan silis dumanı ile birlikte kullanılması da önerilmektedir.

Silis dumanı çok yüksek silis içeriğine sahip (>%90) bir endüstriyel atıktır ve genellikle amorf, düzgün yüzeyli küresel taneciklerden meydana gelmektedir. Silis dumanı taneleri boşlukları doldurmakta, CH kristallerini küçültmekte ve çimento ve betonun basınç dayanımının artmasına neden olmaktadır [5].

Yeni bir puzolanik malzeme olan kolloidal silika sentetik olarak üretilebilmektedir. Tane parçacıklarının nano boyutta olması nedeni ile içerisinde bulunduğu suda asılı vaziyette kalabilme kabiliyeti sayesinde kolloid olarak bulunan kolloid-silika (KS), nano boyuttaki tanecikleri sayesinde (1- 50 nm) nanosilika(NS) veya nano-SiO₂ olarak da adlandırılır. Aynı zamanda yüksek oranda amorf halde silis içermektedir (>%99). Nano boyuttaki tanelerinin yüzey alanı, diğer puzolanlara nazaran çok yüksektir. Kolloid silikanın nano boyuttaki taneciklerinin sahip olduğu yüksek yüzey alanı, erken yaşta yüksek oranda puzolanik reaksiyon yapmasına imkan verir [5]. Buna bağlı olarak puzolan içeren betonlarda erken yaşlarda ki dayanım kayıplarının giderilmesinde etkin bir malzeme olarak önerilir.

Bu tez çalışmasında kolloid silikanın uçucu küllü harçların mekanik özelliklerine etkileri incelenmektedir. Uçucu kül ve kolloid silika yüzdeleri dikkate alınarak P.Ç. tipi çimentoda nasıl bir etki yarattıkları belirlenmektedir. Bu sayede uçucu kül ve kolloid silikanın P.Ç. ile yer değiştirdiğinde, basınç ve eğilme dayanımları arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Portland Çimentosunda Yer Alan Ana Bileşenlerin Özellikleri

Çimento ve suyun birleşmesi sonucunda çimentoda bir dizi çok karmaşık kimyasal reaksiyonlar oluşmaktadır [6,8].

Çimento hamuru veya beton elde edebilmek için, çimento ve su bir araya getirilir getirilmez, her ana bileşen su ile ayrı ayrı reaksiyona girmekte ve her ana bileşenin reaksiyon hızı, reaksiyon esnasında açığa çıkan ısı ve reaksiyon sonucunda oluşan ürünün çimento hamurunun bağlayıcı özelliğine (dayanımına) katkısı farklı farklı olmaktadır [7,8].

Çimentonun ana bileşenlerinin çimentoya kazandırdığı özellikler aşağıda açıklanmıştır.

2.1.1 Ara bileşenler

2.1.1.1 Trikalsiyum silikat (C_3S)

$3CaO \cdot SiO_2$ formülünde kısaca Alit olarak bilinen bileşen klinkerin ana mineralidir ve mukavemet yönünden çok önemlidir. Bu mineralin üstünde az miktarda K_2SO_4 kristalleri bulunduğu gibi bazı Belit enklüzyonları da bu faz içinde yer alır [9,8]. Normal Portland Çimentosu klinkerinde C_3S 'in % 58-64 arasında olması istenir. Klinkerde C_3S %65 den fazla ise pişme zorluğunun yanı sıra çimento dayanımı da düşük olmaktadır [6,8]. Bu arada Alit kristallerinin büyüklüğü de mukavemette etkindir. Pişme süresinin artışı da alit kristallerini büyütür. Yapılan araştırmalar $1400\text{ }^{\circ}C$ 'de 10 dakikalık pişme süresinin, istenen 10-15 mikron büyüklüğünde alit kristalleri elde etmek için yeterli olduğunu göstermiştir. Daha büyük alit kristalleri hidratasyonu, dayanımları ve ögütmeyi ters yönde etkiler [10,8]. C_3S 'in çimento

hamurundaki hem ilk günlerdeki, hem de nihai dayanıma katkısı yüksek olmakla beraber ilk saatlerdeki katkısı düşüktür [7].

C₃S, ilk günlerdeki priz ve sertleşme üzerine en aktif etki yapan bir bileşendir. Hidratasyon neticesinde fazlaca Ca(OH)₂ meydana getirmektedir. Çimentoların esas bağlayıcılık değerini tayin eden bileşenler C₃S ve C₂S olmak üzere, kalsiyum silikatlı bileşenlerden biridir [12]. C₃S içeriği fazla olan çimentolar (özellikle ince taneli olanlar) daha hızlı hidratlaşacak ve daha erken dayanıma yol açacaklardır [11].

2.1.1.2 Bikalsiyum silikat (C₂S)

2CaO.SiO₂ formülüyle gösterilen ve özel adı Belit olan bu bileşeninde çimento özellikleri üzerindeki etkisi de oldukça önemlidir. Portland Çimentosu klinkerinde % 25 kadar C₂S bulunur. C₂S çimentonun son dayanımı kazanmasında etkindir [13].

Belit, Alitten daha yavaş sertleşir ama uzun zaman sonra aynı mukavemete ulaşır [6]. C₃S daha hızlı reaksiyona girer ve çabuk hidratlaşıp ısı çıkarır, fakat C₂S tam tersine yavaş reaksiyona girer ve daha geç hidrate olur bunun sonucunda da daha az ısı açığa çıkarır [14].

2.1.1.3 Trikalsiyum alüminat (C₃A)

3CaO.Al₂O₃ formülüne sahip olan ve özel olarak Alüminat olarak adlandırılan bileşiğin çimentonun özellikleri üzerine etkisi son derece önemlidir. Bu bileşik çimentoda % 15' i nadiren aşan genellikle % 9-12 gibi miktarlarda bulunan bir bileşendir [15].

Özellikle çimentonun kimyasal etkilere dayanıklılığını bu bileşen yönlendirir. C₃A sertleştikten sonra oldukça zayıf mukavemetli bir hidrat oluşturur. Aslında, C₃A'nın ilk birkaç saat içerisinde dayanıma sağladığı katkı oldukça yüksektir. Ama ilk zamanlar olarak ilk bir iki hafta göz önüne alınacak olursa C₃A'nın bağlayıcılık değerinin düşük olduğu belirtilebilmektedir [7]. Prizle ilk başlayan bileşen C₃A'dır. C₃A hızla priz yapıp, yüksek hidratasyon ısı çıkarır. C₃A'nın hızlı prizi denetim altına alınmazsa çimento tümüyle katılaşır ve silikatların

oluşmasına imkan tanımaz. C_3A 'nın priz hızı klinkere katılan alçı taşı ile ayarlanır[14].

Ancak C_3A , su ve alçıtaşı arasındaki reaksiyonlar, C_3A 'nın reaksiyonunu yavaşlatarak ani sertleşmeyi önlemekle birlikte $C_6AS_3H_{32}$ (etrenjit) ve C_4ASH_{12} gibi genişleme oluşturabilecek kalsiyum-sülfat alüminohidrat ürünlerinin oluşmasına yol açmaktadır [12]. C_3A 'nın Portland Çimentosu'nda %10'ları çok geçmesi durumunda çimentonun sülfat direnci azalmaktadır [13].

2.1.1.4 Tetra kalsiyum alimünoferit (C_4AF)

$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ formülüyle gösterilen ve özel adı Felit olan bileşenin çimentonun hidratasyonunda son dayanıma katkısı büyüktür. Çünkü çimentonun rengini etkileyen bir bileşendir. C_4AF ne kadar fazla olursa çimentonun rengi o kadar koyu olur [13].

Ayrıca C_4AF çimento fırınında klinkerleşme sıcaklığını düşürdüğü için yararlıdır. Hidratasyona girer fakat çimentoya fazla dayanım kazandırmaz [14].

C_4AF bileşeni, su ve alçıtaşı arasındaki reaksiyonlar, C_3A bileşenindeki kadar şiddetli olmamakla birlikte, burada da C_3A bileşeninin hidratasyon ürünlerine benzer sonuçlar ortaya çıkmaktadır [16]. Çimentonun su ile reaksiyonunda, ana bileşenlerin kazandırdığı özellikler **Çizelge 2.1'** de özet olarak verilmiştir [7].

Çizelge 2.1: Portland Çimentosunun su ile reaksiyonunda ana bileşenlerinin kazandığı özellikler [8].

Ana Bileşenler				
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Reaksiyon hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidratasyon ısısı	Orta	Az	Çok yüksek	Orta
İlk günlerde dayanıma katkısı	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Son günlerde dayanıma katkısı	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

2.1.2 Hidratasyon süreci

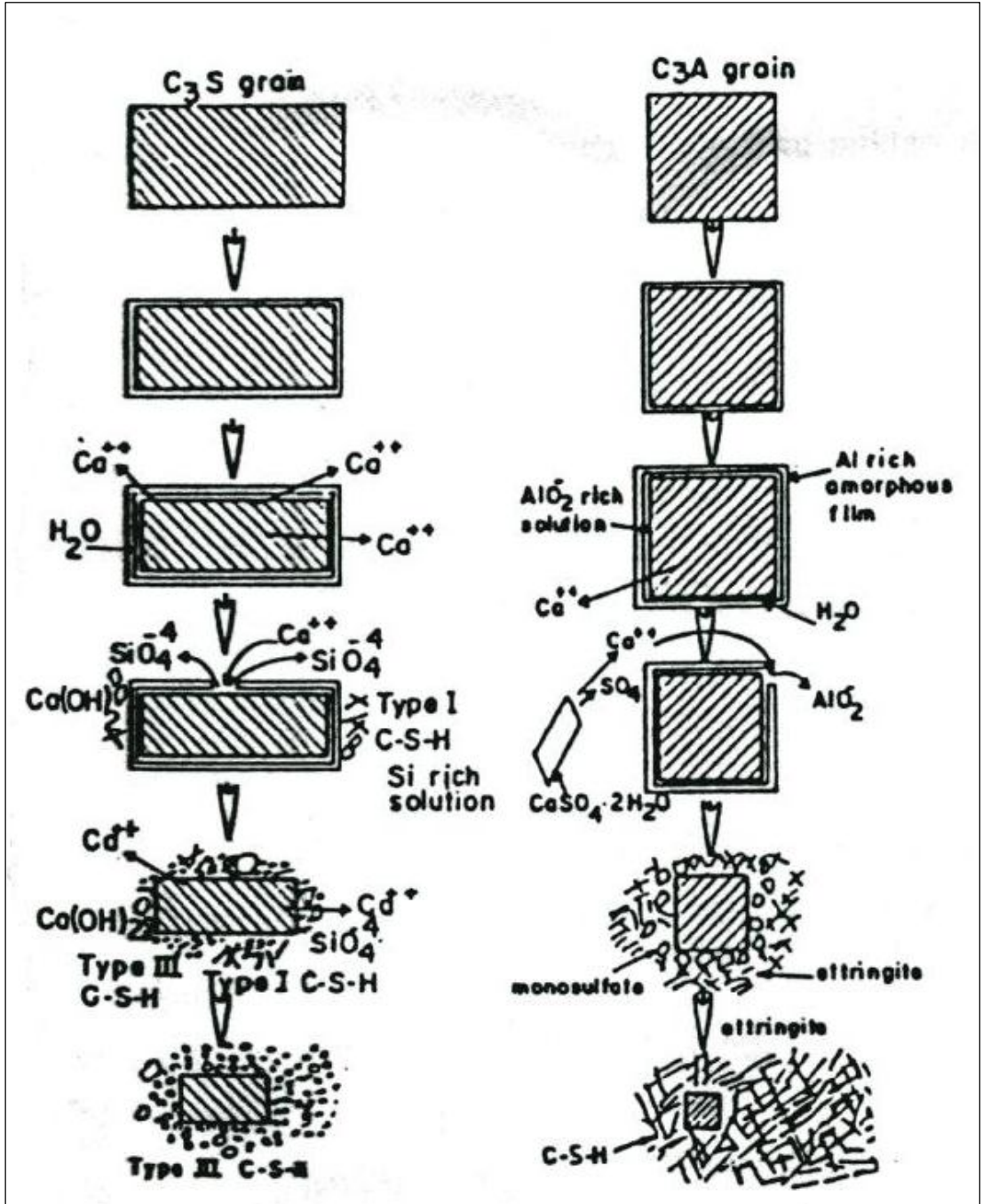
Çimentonun suyla yaptığı reaksiyonların tümüne “hidratasyon” denir. Çimento bileşenleri su içermediklerinden dolayı su ile temas eder etmez dekompoze olmaya başlayarak çeşitli hidratlar oluştururlar. Ancak, bu süreç su moleküllerinin veya hidroksil iyonlarının çimento taneciklerine bağlanması gibi basit bir işlem değildir. Çok genel hatlarıyla ele alındığında, çimento-su reaksiyonu başlangıçta her bir bileşenin tek başına suyla reaksiyonu olarak tanımlanabilir. Bu reaksiyonlar ilk aşamada, C_3A , C_4AF , C_3S ve C_2S sırasıyla oluşur.

Çimento ve çimento bileşenlerinin hidratasyonu ile ilgili çok geniş literatür bulunmasına karşın, hidratasyon reaksiyonlarının çok kompleks oluşu, hidratasyon sırasında bileşenlerin birbirleriyle etkileşimi, alçı, alkaliler, alçı serbest MgO , vb. bu etkileşimlerdeki payları ve rolleri gibi bir çok konu hakkında hala tam olarak anlaşılamamış noktalar kalmasına neden olmuştur [8].

Çimentonun hidratasyon mekanizması kısaca şu şekildedir: Suyla çimentonun temasıyla tüm reaktif fazlardan çeşitli iyonlar suya geçerek eriyebilirlikleri düşük hidrate bileşenler oluştururlar. Bu bileşenler daha önce suyla dolu olan boşluklarda çökerek önce kıvamda, daha sonra da porozitede azalmaya yol açarlar. Bu mekanizmaya örnek olarak C_3S ve C_3A ‘nın hidratasyonları şematik olarak **Şekil 2.1** gösterilmiştir [8].

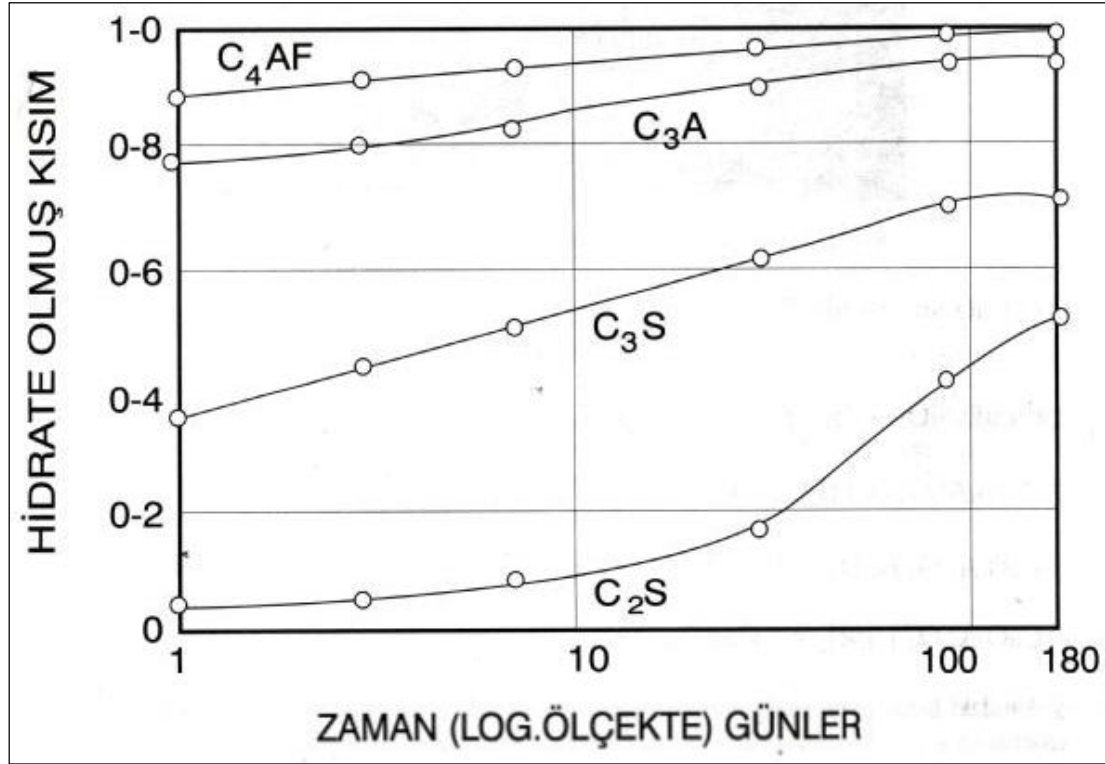
Hidratasyon olayının üç önemli özelliği vardır.

- a) Çimentonun klinker halinde, yani öğütülmemiş iken su karşısında reaksiyon yapmamasıdır. Çimentonun hidratasyon olayını yapması için gayet ince bir şekilde öğütülmesi gereklidir. Bu özellikten dolayı klinkerin açık havada bırakılmasında bir sakınca yoktur.
- b) Hidratasyon olayının zamanın bir fonksiyonu olmasıdır. Başka bir deyişle çimentodaki karmaşık bileşenlerin su ile yaptıkları kimyasal reaksiyon kısa bir zamanda sona eren bir reaksiyon değildir; tam tersine senelerce süren bir olaydır. İşte zaman içerisinde gelişmekte olan bu olaya “hidratasyon sinetiği” denilmektedir. **Şekil 2.2**’ te çimento bileşenlerinin hidratasyon hızları verilmiştir.



Şekil 2.1: C_3S ve C_3A 'nın hidratasyonlarının şematik gösterimi [8].

- c) Hidratasyon olayının ekzotermik bir olay olması, başka bir deyişle hidratasyon esnasında çimento hamurundan dışarıya verilmesidir. Dışarıya çıkan bu ısı hidratasyonun başında fazla olmasına rağmen zamanla azalarak hidratasyon olayı devam eder [8].



Şekil 2.2: Saf karma oksitlerin hidratasyon hızları [9].

2.2 Puzolanlar

ASTM C 6182' ye göre puzolanik maddeler, silisli veya alüminyum silikatlı veya bunların bileşiminden oluşan doğal maddelerdir. Puzolanik maddeler su ile karıştırıldığında kendi kendine sertleşmezler fakat, ince öğütüldüğünde ve suyun mevcudiyetinde normal çevre sıcaklığında çözünmüş kalsiyum hidroksitle ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), dayanımı geliştiren kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat bileşiklerini oluşturmak üzere reaksiyona girerler.

2.2.1 Puzolanik reaksiyonlar ve puzolanik malzemelerin aktivitesi

Puzolanların kompozisyonu büyük ölçüde silis ve alüminden oluşmaktadır. İnce taneli durumdaki puzolanlar, söndürülmüş kireç ve su ile birleştiğinde, bu malzemeler arasında bir takım kimyasal reaksiyonlar yer almaktadır. Kalsiyum hidroksit, silis su arasındaki, reaksiyon aynen Portland Çimentosunun hidratasyonunda olduğu gibi hidrolik bağlayıcılık özeliğine sahip kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin oluşmasına yol açmaktadır. Puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne ölçüde reaksiyona girebileceği, özellikle ne ölçüde

bağlayıcılık sağlayabileceği, “puzolanik aktivite” olarak tanımlanmaktadır. Puzolanik malzemenin yeterli aktiviteyi gösterebilmeleri için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda “silis + alümin + demir oksit” içermesi gerekmektedir. Puzolanik aktivite, puzolanik malzemelerle yapılan deneyler sonucunda tayin edilmektedir [7].

Bir puzolanın reaksiyon sonunda tespit ettiği kireç miktarı ne kadar fazla ise reaktivitesi o kadar büyüktür veya puzolanik özelliği o kadar yüksektir. Costa ve Massazza’nın araştırmalarına göre bu özellik en fazla puzolanın özgül alanına bağlıdır. Şu halde bir maddenin puzolanik özelliğini artırmak için onu çok ince bir şekilde öğütmek gerekir. Puzolanik özelliği etkileyen bir diğer faktör de puzolanın içerdiği reaktif maddeler amorf veya camsı fazda bulunan Al_2O_3 ve SiO_2 dir. Diğer taraftan puzolanik özellik Al_2O_3 ile SiO_2 ‘nin kireçle yaptığı reaksiyon sonunda meydana geldiğinden bir puzolanla (CaO) nun az miktarda bulunması gerekir. Bu açıklamalara göre puzolan denilen maddelerde SiO_2 ve Al_2O_3 fazla miktarda bulunmalı CaO az miktarda yer almalıdır. ASTM C 618 e göre bir puzolanla; $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > 0.70$ koşulu gerçekleşmelidir. Diğer taraftan CaO miktarı % 4’ü geçmemelidir [9].

Puzolanik aktivite, “dayanım aktivite indeksi” olarak adlandırılan bir değerın hesaplanmasıyla ifade edilmektedir. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Dayanım aktivite indeksi} = (A/B) \times 100$$

Burada,

A = Puzolanlı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı, ve

B = Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımıdır.

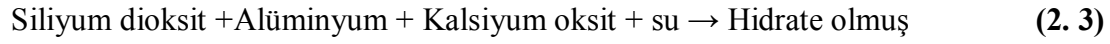
Doğal puzolanlar için, ASTM standartları, bu değerin en az 75 olması gerektiğini belirtmektedir (ASTM C 618, 1994). Türk standartlarına göre ise, bu değer en az 70 olmalıdır (TS 25, 1975).

Puzolanik reaksiyon şu şekilde gerçekleşmektedir; Portland Çimentosu ile su birleştiğinde çimentoların yaklaşık % 75’ni oluşturan silikat bileşimlerinin ($C_3S + C_2S$) hidrolik reaksiyonları nedeniyle ürün olarak çok küçük (koloidal) boyutlarda,

bağlayıcılık değeri yüksek çimento jelleri C-S-H (kalsiyum-silika-hidrat) ve kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂) (söndürülmüş kireç) ortaya çıkar. Çimento ve beton karışımı içerisinde çok ince taneli durumda yer almış olan puzolanlar, çimentonun hidratasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile ayrıca reaksiyona girerek yeni C-S-H jelleri oluşturarak bağlayıcılık özelliklerini kazanırlar. Bunlarla ilgili denklemler (4.1) ve (4.2) de verilmiştir [9].



Başka bir ifade ile ;



Kalsiyum silikat

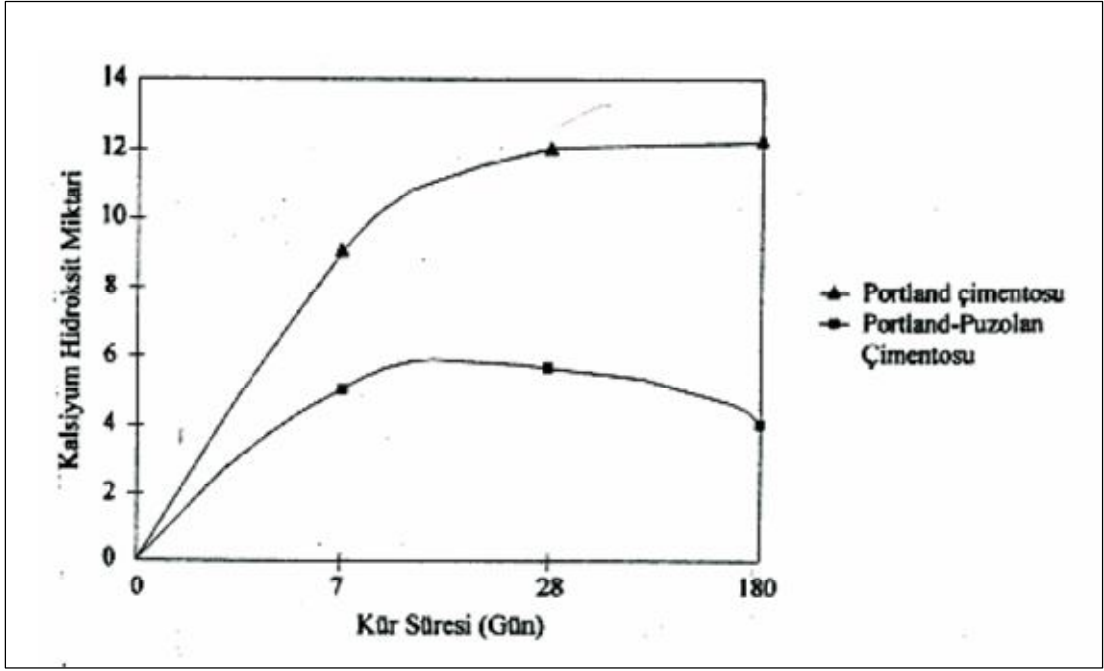
Hidrate olmuş

Kalsiyum alüminat

şeklinde [18].

Denklemlerde görüldüğü gibi Portland Çimentosu kireç üreten, puzolanik reaksiyon da kireç tüketen bir reaksiyondur. Burada amorf silisyum dioksit yüksek çözünürlüğü ve reaktifliği nedeniyle sahip olduğu puzolanik aktivitesi yüzünden çok önemli bir bileşiktir. Artan amorf silisyum dioksit (SiO₂) miktarı ile C-S-H jelinin arttığı iyi bilinmektedir [19]

Puzolan ve Portland Çimentosu reaksiyona girince puzolanik reaksiyonun etkisiyle bağlayıcı hamurdaki serbest kireç miktarı giderek azalmaktadır. Buna göre belli bir süre sonunda puzolan içeren betonların çimento hamurunda, Portland Çimentosu hamuruna oranla daha az serbest kireç ve daha çok kalsiyum silikat hidrat 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 [20]. **Şekil 2.3**'te puzolan ve Portland Çimento karışımlarının hidratasyonunda serbest kireç miktarının değişimi görülmektedir [21].



Şekil 2.3: Puzolan ve Portland Çimento karışımlarının hidratasyonun serbest kireç miktarının değişimi [21].

2.2.2 Puzolanik reaksiyon ürünleri

Kireç-puzolan tepkimesi puzolan tipinden bağımsız olarak, Portland Çimentosu'nun hidrate olmasıyla ortaya çıkan ürünlerle genel olarak aynı ürünleri verir. Olası farklılıklar küçüktür ve hidratasyon ürünlerinin yapısından çok miktarını etkiler [18].

Kireç-doğal puzolan tepkimesi sonucunda literatürde aşağıda sıralanmış ürünler oluştuğu yönünde ortak bir görüş vardır [18].

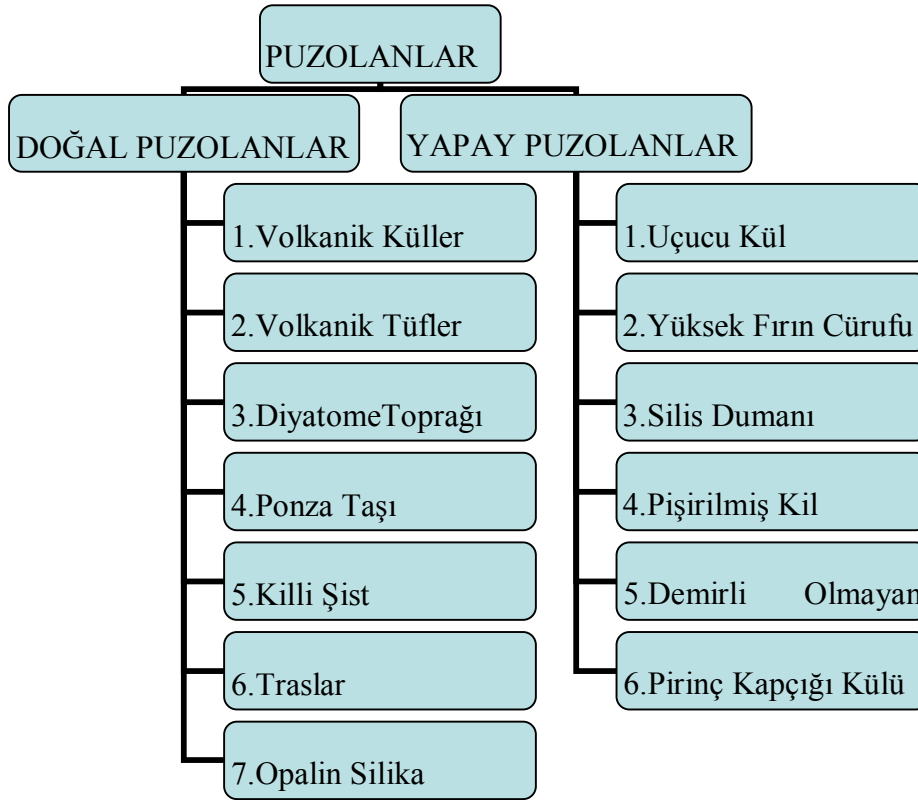
1. C-S-H formunda kalsiyum silikat hidrat
2. C_4AH_x formunda kalsiyum alüminat hidrat ($9 \leq x \leq 13$)
3. Hidrat gehlenit- C_2ASH_8
4. Kalsiyumkarboalüminat - C_3A . $CaCO_3 \cdot H_{12}$
5. Etrinjit- C_3A . $CaSO_4 \cdot H_{32}$
6. Kalsiyum alüminat monosülfat- C_3A . $CaSO_4 \cdot H_{12}$

Bu ürünlerin varlığı esas olarak doğal puzolanın kimyasal içeriğine, ortamda kirecin varlığına ve çevre şartlarına bağlıdır. Bilindiği gibi doğal puzolanlar, silikanın baskın

olduğu kompozisyonlardan, alüminyumun baskın olduğu kompozisyonlara kadar geniş bir yayılım göstermektedirler. Bu sebeple her doğal puzolanın kireçle tepkimesi aynı ürünleri açığa çıkarmaz [18].

2.2.3 Puzolanların sınıflandırılması

Puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere iki ayrı sınıfta incelenirler. Şekil 2.4’ te puzolanlar şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Puzolanların Sınıflandırılması

2.2.3.1 Doğal puzolanlar

Doğada bulunan ve ince taneli duruma getirildikten sonra kalsiyum hidroksit ve suyla birleştiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliği gösteren silisli ve alüminli malzemelere, “doğal puzolanlar” denilmektedir [7].

2.2.3.2 Yapay puzolanlar

Çeşitli fabrikalardan ve endüstriyel süreçlerden yan ürün olarak ortaya çıkan ve şu an atık olarak kabul edilen, yine aynı şekilde yalnız başına kullanıldığı zaman bağlayıcı

madde olmayan, fakat kireç veya çimento ile karıştırıldığı zaman su ile yaptığı reaksiyon sonucunda bağlayıcı özelliğini kazanan silis veya silis-alümin içeren maddelerdir [8].

Çalışmalarda yapay puzolanlar sınıfından olan uçucu kül kullanılmıştır. Yapay puzolanlardan uçucu kül ve silis dumanının özelliklerine ayrıntılı olarak ileride değinilecektir [8].

2.2.4 Puzolanların hidratasyona etkisi

Esas olarak, kireç-doğal puzolan karışımlarından oluşan tepkimeler Portland Çimentosu-doğal puzolan karışımlarında da olur. Fakat Portland Çimentosu-doğal puzolan karışımlarında doğal puzolanın tepkime verebilmesi için gerekli kireç, suyla karıştırıldığı ilk anda ortamda yoktur. Zamanla Portland Çimentosu'ndaki C_3S ve C_2S minerallerinin hidratasyonu ile ortama $Ca(OH)_2$ birikir ve trass puzolanik tepkimelerinin sonucunda C-S-H jelleri vermeye başlar [8].

Puzolanlar ve pek çok durumda klinker minerallerinin hidratasyonunu hızlandırırlar. Çimentonun hidratasyonu esnasında iki rakip reaksiyon meydana gelir; bunlardan biri kalsiyum hidroksit miktarının artışına, diğeri ise azalmasına yol açar. Bu reaksiyonlar hidratasyonun farklı kademelerinde farklı bir hızla ilerler. Böylece, mineral katkıları tarafından bağlanan kalsiyum hidroksit miktarı ile puzolanik aktivite tayini metotları katkı kalitelerinin belirsiz karakteristiklerini sağlar. Bu nedenle, sertleşmiş çimentoda yeniden oluşan diğer hidratasyon ürünlerinin miktarlarının da ayrı ayrı tayin edilmesi gerekir. Sertleşmiş beton özelliklerinin doğrudan, katkıya bağlanan kalsiyum hidroksit miktarına bağlı olmadığı bilinmektedir. Örneğin, dayanım hidratasyon ürünlerinin ve boşlukların dağılımı, büyüklüğü, şekli ve tipinden kuvvetlice etkilenir ve dayanım ile kimyasal reaksiyonun tamamlanma derecesi arasında doğrudan bir ilişki yoktur. Bundan dolayı, mekanik dayanım testleri ve yapısal incelemeler puzolanik aktivitenin belirlenmesi için kimyasal metotlarla bütünlenmelidir [23].

Çeşitli doğal puzolanlarla yapılan araştırmalara göre doğal puzolanlı çimentolarda bulunan Portland Çimentosu kısmının hidratasyonu tras sayesinde daha hızlı gerçekleşebileceği iddia edilmektedir. Bu durum genel olarak tüm ince öğütülmüş

puzolanlar için geçerlidir. Doğal puzolan parçacıklarının, yüksek incelikleri nedeniyle, ortamda hidratasyon ürünü olan C-S-H jellerinin toplanabileceği bir yüzey oluşturmasıyla puzolanlı çimentoların hidratasyon hızları katkısız olanlara göre genelde daha fazladır [18].

Puzolan içeren çimentoların puzolan/klinker oranı hidrotasyon ısını düşürür. % 30-40 oranında puzolan içeren puzolanik çimentolarda Portland Çimentolar'ına göre hidratasyon ısındaki azalma % 20'yi aşabilir [24].

2.2.5 Uçucu kül

Uçucu kül, termik enerji santrallerinde, kullanılan düşük kalori kömürün çoğunlukla pulvarize (öğütülmüş) olarak yanmasıyla ortaya çıkan bir yan üründür. T.S.EN 450-1'e göre Pulverize kömürün yanmaya yardımcı malzemeler ile birlikte veya tek başına yakılmasından elde edilen, puzolanik özelliklere sahip olan ve esas olarak SiO_2 ve Al_2O_3 'ten meydana gelen, EN 197-1'de belirtildiği gibi tarif ve tayin edilen reaktif SiO_2 muhtevası kütlece en az % 25 olan, büyük ölçüde küresel ve camsı taneciklerin ince tozu olarak tanımlanmaktadır [26].

2.2.6 Uçucu külün sınıflandırılması

Genellikle, termik santrallerde yakılan taş kömürlerinin %10-15'i, linyit kömürlerinin ise %35-40'ı küldür. Üretilen atığın %75-80' lik birincil kısmı, çok küçük tanecikler halinde yanma odasından gazlarla birlikte uçarlar. Modern santrallerde, bu ince malzemelerin %99'u gaz çıkmadan önce tutulmaktadır. Bu tanecikler, gazlarla birlikte bacadan havaya çıkarken, elektrostatik filtreler veya elektro mekanik yöntemler kullanılarak tutulur [25]. Kömürün yanmasından meydana gelen her kül, uçucu kül değildir. TS EN 450-1'e göre uçucu kül özellikleri **Çizelge 2.2'**de görülmektedir.

Çizelge 2.2: Uçucu kül özellikleri [26].

ÖZELLİK	STANDART SINIRLARI
Kızdırma kaybı (üst sınır değeri)	Kütlece % 7,0 (kategori A) Kütlece % 9,0 (kategori B) Kütlece % 11,0 (kategori C)
İncelik (üst sınır değeri)	Kütlece % 45 (kategori N) Kütlece % 13 (kategori S)
İncelik değişimi (alt ve üst sınır değerleri)	Beyan edilen değerden $\pm$ % 15 sapma (sadece kategori N için)
Klorür (üst sınır değeri)	Kütlece % 0,10
Serbest kalsiyum oksit (üst sınır değeri)	Kütlece % 2,6
Reaktif kalsiyum oksit (üst sınır değeri)	Kütlece % 11,0
Reaktif silisyum dioksit (alt sınır değeri)	Kütlece % 22
Sülfürik anhidrit (SO ₃)	$\leq$ %3
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	$\geq$ %65
Toplam alkali içeriği (üst sınır değeri)	Kütlece % 5,5
MgO	$\leq$ %4,5
Çözünbilir fosfat (üst sınır değeri)	110 mg/kg
Genleşme (üst sınır değeri)	10,0 mm
28 günlük aktivite indeksi (alt sınır değeri)	70%
90 günlük aktivite indeksi (alt sınır değeri)	80%
Tanecik yoğunluğu değişimi (alt-üst sınır değeri)	Beyan edilen değerden $\pm$ 225 kg/m ³ sapma
Su ihtiyacı (üst sınır değeri)	% 97 (sadece kategori S için)

Yapay puzolan sınıfına giren uçucu küller, kimyasal yapılarına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. Uçucu küller, içerdiği analitik CaO miktarı bakımından düşük kireçli/kalsiyumlu ve yüksek kireçli/kalsiyumlu uçucu kül olarak ikiye ayrılmaktadır. Uçucu küller, yapısındaki kireç ve SO₃ miktarına göre ise siliko alüminalı, siliko kalsik ve sülfö kalsik uçucu kül olarak üç grupta toplanmaktadır.

Uçucu küller, ASTM C 618'e göre de iki grup altında toplanmaktadır. Bunlar sırasıyla,

- 1- Bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) toplamı % 70'in üzerinde olan F sınıfı uçucu kül,
- 2- Genellikle linyit veya yarı bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı % 50'in üzerinde olan C sınıfı uçucu küllerdir.

Yukarıda belirtilen siliko alüminalı uçucu kül, F sınıfındadır. Siliko kalsik uçucu küllerin bazıları F sınıfı içinde, bazıları da C sınıfı içinde yer almaktadır. Sülfo kalsik uçucu küllerin çoğu, C sınıfı uçucu kül olarak isimlendirilmektedir [27]. Diğer bir sınıflandırma, TS EN 197-1'e göre yapılmakta ve uçucu kül, iki kategoriye ayrılmaktadır. Buna göre uçucu küllü çimentolarda kullanılacak olan uçucu küller, silisli ve kalkerli uçucu küller olarak sınıflandırılmıştır [28].

2.2.6.1 Uçucu külün fiziksel yapısı

Uçucu küllerin tane boyutları termik santraldeki kül toplama yöntem ve ekipmanlarına bağlıdır. Siklonlarda toplanan küller, elektro filtrelerde toplananlardan daha iri tanelidirler. Uçucu küllerin renkleri açık bejden kahverengiye, griden siyaha kadar değişik tonlarda olabilir. İçindeki yanmamış karbon miktarı artıkça uçucu küllerin rengi koyulaşır. Uçucu küller küresel biçimde olup, kül parçacıklarının tane boyları 0,5-200 mikron arasında değişmektedir [31].

2.2.6.2 Uçucu küllerin mineralojik yapıları ve kimyasal kompozisyonlar

Çizelge 2.3'de Türkiye'de çeşitli bölgelerden elde edilen uçucu küllerin kimyasal bileşimleri görülmektedir.

Çizelge 2.3: Türkiye’deki uçucu küllerin kimyasal özellikleri [32].

Bileşim (%)	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan
SiO ₂	27,4	56,8	58,6	49,1
Al ₂ O ₃	12,8	24,1	21,9	15,1
Fe ₂ O ₃	5,5	6,8	9,3	8,3
S+A+F	45,7	87,7	89,8	72,4
CaO	47,0	1,4	4,4	13,2
MgO	2,5	2,4	1,4	4,8
Na ₂ O	(N+K) 0,3	(N+K) 0,3	0,2	2,2
K ₂ O	-	-	1,8	1,8
SO ₃	6,2	2,9	0,4	3,8
K.K.	2,4	0,6	1,4	0,7

Uçucu küllerin puzolanik özellikleri, kimyasal bileşiminden daha çok mineralojik yapıları ile ilişkilidir. Düşük kireçli uçucu küllerin ana aktif bileşeni, silis ve aluminadan oluşan amorf ya da camsı fazdır. Bu tip uçucu küller, rutubetli ortamda sönmüş kireç (Ca(OH)₂) ile reaksiyona girdikleri için puzolanik özelliğe sahiptirler. Yüksek kireçli uçucu küller ise, hem puzolanik özellik gösterirler hem de sahip oldukları serbest kireç, trikalsiyum aluminat, amorf silis ve alumina vb. sebebiyle kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip olabilirler [32]. **Çizelge 2.4**’te Türkiye de ki santrallerden elde edilen uçucu küllerin mineralojik bileşimleri görülmektedir.

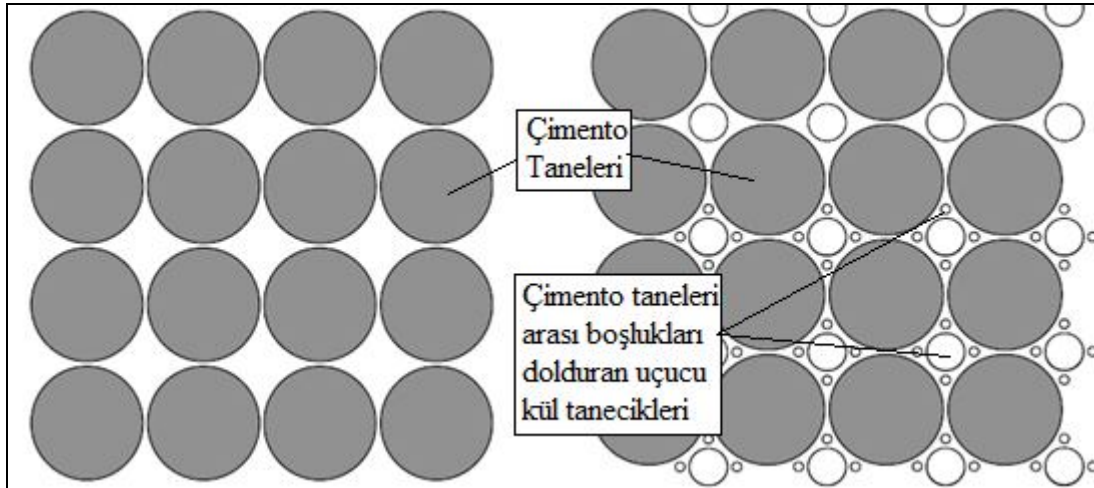
Çizelge 2.4: Türkiye de ki santrallerden elde edilen uçucu külün mineralojik özellikleri [32].

Mineral (%)	Uçucu Kül					
	Afşin- Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma	Tunçbilek	Yatağan
Mullit	1,0	18,1	1,2	4,3	8,8	6,0
Kuvartz	4,5	10,9	5,6	5,1	13,9	22,4
Manyetit	0,8	0,2	2,5	0,6	4,1	2,0
Hematit	4,0	0,1	6,0	2,0	3,0	7,0
Anhidrit	12,2	-	9,3	7,4	-	-
Serbest CaO	18,6	0,7	5,5	9,8	0,9	1,0
Plajiyoklaz	~28	-	~15	~20	-	~25
Camsı ve Amorf faz	~30	~70	~50	~50	~70	~35

Uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri incelendiğinde, bunların inşaat sektöründe rahatlıkla kullanılabileceği ve dolayısıyla bir yandan malzeme ve enerji üretiminde ekonomi sağlanırken, diğer taraftan çevre kirliliğinin önlenmesi ile ekolojik dengenin korunmasının da mümkün olduğu görülmektedir [32].

2.2.6.3 Uçucu kül kullanımının beton özelliklerine etkisi

Betonda uçucu kül kullanımının iki ana nedeni vardır. Beton maliyetlerini düşürmek, taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini iyileştirmek. Uçucu küllerin ekonomik olarak değerlendirilmesi, kullanılabilir miktarda, gerekli nakliye miktarına ve istenilen tasarıma bağlıdır. Uçucu kül, hidratasyon ısını düşürür ve tanelerin küreselliği sayesinde taze betonun kararlılığını, kolay yerleşmesini ve kolay sıkıştırılmasını sağlar. Uçucu külün kimyasal bileşimi ,tane boyut dağılımı, inceliği, pozolanik aktivitesi ve betonun kür koşulları,uçucu küllü betonun mekanik özelliklerini etkileyen önemli etkenlerdir [33]. UK ler küresel biçimde olup, kül parçacıklarının tane boyları 0,5-200 mikron arasında değişmektedir ve %35 ila % 40 arasında değişen oranlarda SiO_2 ihtiva ederler . Çimento dan daha ince oluğunda **Şekil 2.5**'te ki gibi çimento taneleri arası boşlukları doldurabilmektedirler.



Şekil 2.5: Çimento taneleri arasındaki boşlukları dolduran uçucu kül taneleri.

UK ler amorf veya camsı fazdadırlar, rutubetli ortamda sönmüş kireç ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ile reaksiyona girdikleri için pozolanik yapıdadırlar. Uçucu küller betonun taze ve sertleşmiş haldeki birçok özelliğine ve sertleşmiş betonun durabilitesine etki etmektedir. Uçucu küller, diğer pozolanların tersine genelde taze betonda su

ihtiyacını azaltmaktadır ve işlenebilmeyi iyileştirmektedir. Bu özellikleri etkileyici faktör, uçucu külün miktarı, külün inceliği ve karbon içeriğidir. Uçucu kül içeren betonların mukavemet kazanma hızı kül içermeyenlere göre daha yavaştır. Uçucu küllerin betonun çekme ve eğilme dayanımlarına olan etkileri, basınç mukavemetlerine paraleldir. Uçucu küllü betonlarda en iyi sonuçların genellikle % 15-25 arası uçucu kül oranlarında alındığı bilinmektedir. C sınıfı uçucu küllerde bu oran % 35'e kadar çıkabilmektedir [34].

Ancak UK pozolanik reaksiyonu yavaş bir süreç olduğu için beton dayanımına olumlu etkileri geç yaşlarda oluşmaya başlar. Yüksek oranlarda UK kullanımı erken yaşlarda dayanım düşüklüğüne sebebiyet vermektedir. Bu sebepten yüksek dozlarda UK kullanımı sınırlı tutulur. Bu sorunu aşmak için pozolanik reaksiyonu artırarak erken yaşlarda dayanımı artırım fikri benimsenmiştir. Bu reaksiyonları hızlandırmak, mekanik iyileştirme, kür süresini hızlandırma ve kimyasal maddelerin eklenmesi ile mümkündür. Kimyasal aktivasyon yöntemlerinden alkali aktivasyonu beton içerisinde kullanıldığında alkali-silika reaksiyonlarına neden olmakta ve sülfat aktivasyonu da betonun durabilitesini düşürmektedir [35].

2.2.7 Silis dumanı

Silis dumanı (SD), silisyum ve ferrosilisyum alaşımları üretimi sırasında yüksek saflıkta kuvarsın kömürle birlikte elektrik ark fırınlarında indirgenmesinden oluşur ve kütlece en az % 85 amorf silisyum dioksit içeren çok ince küresel taneciklerden ibarettir [36].

Aşağıda yüzey alanlarının karşılaştırması, taneciklerin inceliği konusunda daha iyi bir fikir verebilir.

- Silis dumanı 20000 m²/kg
- Uçucu kül 400-700 m²/kg
- Portland çimentosu 300-400 m²/kg

Silis dumanı, sahip olduğu yüzey alanının büyüklüğünden dolayı, betonda su ihtiyacını artırır. Su ihtiyacını kontrol altında tutmak için su azaltıcı ve akışkanlaştırıcı katkı kullanılmalıdır. SD' nin rengi açık griye koyu griye değişen

tonlardadır. Akışkanlaştırılmış, yoğunlaştırılmış ve çimentoyla harmanlanmış çeşitleri mevcuttur. Ancak yoğunlaştırılmış silis dumanının verimliliği ile ilgili çelişkiler mevcuttur. Bazı araştırmacılar yoğunlaştırılmış SD taneciklerinin karışım içerisindeki dağılımının yoğunlaştırılmamışlar kadar etkili olamayacağı, dolayısıyla aynı oranda verim alınamayacağı düşüncesindedirler [37].

Silis dumanı hazır betonlarda ve harçlarda, refrakter endüstrisinde, deniz yapılarında, baraj, tünel, köprü ve yollarda, endüstriyel zeminlerde, püskürtme beton uygulamalarında, beton borularda ve prefabrike endüstrisinde kullanılır. Silis dumanının betona sağladığı yararlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Yüksek performanslı betonların basınç dayanımlarını önemli ölçüde artırır.
- Betona mükemmel aşınma ve sürtünme mukavemeti kazandırarak çok yoğun trafik bölgelerindeki yüzeylerin kalıcılığını ciddi olarak artırır.
- Geçirimsizliği 100 kata kadar artırarak, özellikle kimyasal maddelere maruz kalan alanlar için idealdir.
- Sülfat ve klordan kaynaklanan korozyon etkisini önemli düzeyde azaltır.
- Püskürtme beton uygulamalarında yapışmayı artırarak geri tepme oranını %50 azaltır [8].

Silis dumanının betonun mikro yapısına iki şekilde etkisi vardır. Bunlardan birincisi çimento ve diğer agrega tanelerinden çok daha küçük boyutlarda olması sebebiyle çok küçük boşlukları bile doldurarak yoğun ve yüksek dayanımlı bir matris oluşmasını sağlamasıdır.

De Larrad, küçük çimento taneleriyle taze betonun yoğunluğunu artırmaya çalıştığı bir çalışmada silis dumanı kullanılması durumunda su ile dolacak çimento taneleri arası boşluğun küçük silis dumanı tanecikleriyle dolduğunu göstermiştir [37].

Silis dumanının ikinci önemli etkisi ise portland çimentosunun içerisindeki kalsiyum silikatların hidratasyonu sonucu açığa çıkan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek C-S-H oluşturur. Sonuçta malzeme daha yoğun ve daha mukavemetli olur. Silis dumanının bu özelliğine puzolanik özellik denir.

Ezeldin ve Balaguru betonda, çimento yerine % 20 oranına kadar SD kullanımının betonun çelikle olan aderansını artırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca SD, çimento hamurundaki gözeneklerin azalmasını sağlamakta, yapışma özelliğini artırmakta ve daha geçirimsiz bir yapı sağlamaktadır. SD, betonun kuruma hızını ve difüzyon katsayısını da azaltmaktadır. Hem filler hem de puzolan rolü üstlenen SD tanecikleri çimento hamuru ve agregayı yoğun bir yapıya kavuşturmaktadır. SD, fazla su moleküllerini absorbe ettiği için çimento hamuru agregası arasındaki aderansı kuvvetlendirmekte ve donatının korozyonunu sınırlamaktadır [8].

2.2.8 Kolloid silika

İler, kolloid silikayı düzenleyici bir çözelti veya suyun içerisinde amorf haldeki silisin ayrıklı parçalarının aquosol veya hidrosol diye adlandırılan kolloid hali olarak açıklamıştır. Organik bir solventin içerisinde ise organosol olarak adlandırılır. Suda çözünmeyen amorf yapısı ve kolloid özelliği sayesinde solventin içerisinde çökmeden kalabilmektedir [4].

2.2.8.1 Kimyasal yapısı ve üretim şekli

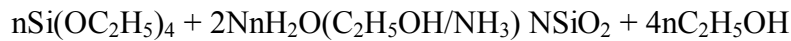
Nano malzemeleri üretebilmek için değişik üretim yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemler

- 1- Çözelti yaklaşımı
- 2- In-Situpolimerizasyonu
- 3- Eriyikten hazırlama yaklaşımı
- 4- Sol-Gel medtodu dur [38].

Kimyasal teknolojilerin gelişimi ışığında kolloid silika gibi nano malzemelerin üretimi için bu yöntemlerden en çok kullanılanı sol-gel metodudur. Yöntem, kolloid süspansiyonu oluşumu (sol) ve devamlı sıvı faz (gel) içerisinde bir ağ oluşturmak için sol jelleşmesi içerir. Kolloid silika sentezinde genelde prekürsor olarak trimethilethoksilan ve tetraethoksilan (TMOS/TEOS) uygulanır. Sol-gel oluşum süreci basitçe şu bölümlerden oluşur.

- Prekürsor hidrolizi
- Tanecik oluşumu için monomerlerin yoğunlaşması ve polimerizasyonu
- Tanecik gelişimi
- Taneciklerin bir araya gelerek topak oluşturması, ağların kurulumu ve akabinde gel yapısı oluşması
- Çözültiden ayırmak için kurutma (opsiyonel)
- Yüzey fonksiyon gruplarını uzaklaştırmak için termal iyileştirme yapılır ve istenilen kristal yapı elde edilir.

Sentezlenen kolloid silikanın kimyasal reaksiyonu aşağıdaki gibi özetlenebilir.



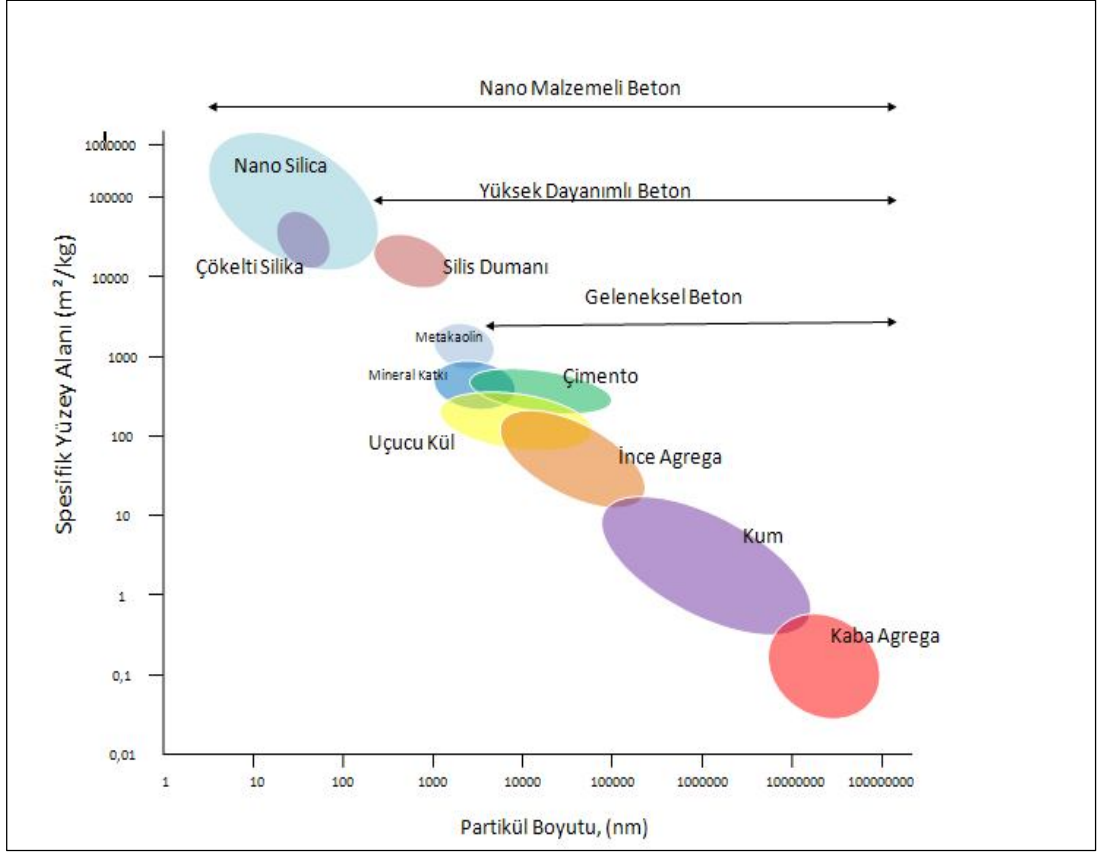
İşleyişi etkileyen pH, sıcaklık, tepkime hızı, H_2O / Si molar oranı katalizörün tipi vb. gibi etkenler vardır. Süreç kesin olarak bittiğinde, SiO_2 nano tanecikleri neredeyse kusursuz küresel biçimli 1-100 nm tane boyutları arasında oluşmuş olur [3].

2.2.8.2 Tane boyutu

Kolloid silika yayılmış tanecikleri ve yoğun olarak 5- 100 nm arasında değişen ayrık küresel şekillidir. Maksimum konsantrasyonu tanecik ebatlarına bağlıdır. 5 nm ağırlıkça %15 ini, 8 nm tanecikler ağırlıkça %30 unu, ve son olarak 100 nm lik tanecikler %50 sini oluşturur. Ticari kolloidler kısıtlı olarak dağılmış vaziyette olarak yapırlar veya tanecikleri ayrık kürelerden değil de zincir şeklinde birbirine bağlı kürelerden oluşur. Kolloid silikanın görünümü de tanelerin ebatlarına ve konsantrasyonuna bağlıdır. Eğer tanecik ebadı büyükse ve konsantrasyonu yüksekse süt renginde, eğer tanecikler orta büyüklükte ise opak, ve tanecikler en küçük halde ise renksiz bir görünümleri vardır [4].

Kolloid silikanın nano büyüklükteki küresel taneciklerinin çimento harcı içerisinde oluşan nano boyutlu çatlaklarda mükemmel bir şekilde filler özelliği gösterir. Tanecik boyutları nano seviyede olmasıyla birlikte özgül yüzey alanı, beton içerisinde kullanılan diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında, daha fazladır. Bu

özelliği sayesinde yüksek dayanımlı beton üretimine olanak vermektedir [4]. Kolloid silika ve diğer malzemelerin özgül yüzey alanları, şematik olarak Şekil 2.6'da gösterilmektedir [3].



Şekil 2.6: Yüzey alanı ve tane boyutu ilişkisi [3].

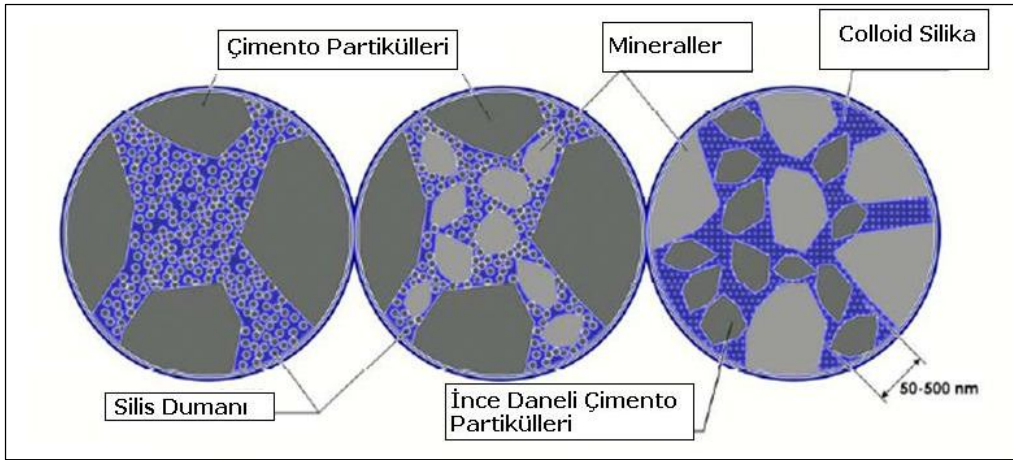
2.2.8.3 Silis dumanına göre karşılaştırılması

Silis dumanının tersine kolloid silika'nın yüzeyi tamamen hidroksillenmiştir ve nm^2 'ye 4.6 OH silarol grubu ihtiva eder. Bu özellik yüksek özgül yüzey alanı ile birleşince koloid silikanın puzolanik aktivitesini silis dumanına göre daha yüksek yapar. Wesner ve Hauk, 15 nm sabit tane boyutuna sahip kolloid silika içeren çimento hamuru ile kolloid silika içermeyen çimento hamurunun basınç dayanımlarını karşılaştırmışlardır. Kolloid silika içermeyen numunelere göre 1. ve 7. günlerdeki erken yaş basınç dayanımları, kolloid silika içeren numunelerde %36 oranında artış göstermiştir. Nitekim Skarp ve Sarkar'ın yapmış olduğu çalışmalarda ultra incelikteki silika tanecikleri, erken dönemdeki jel oluşumu sırasında suyun büyük bölümünü tükettiği için, hızlı bir şekilde çimento hamurunun prizini almasına yol açmaktadır. Bu olayı da kolloid silikanın yüksek puzolanik aktivitesine

bağlamaktadırlar. Ancak kolloid silikanın, çimento hamuruna kazandırmış olduğu yüksek erken dayanım, nihai dayanımda düşüşlere sebep olmaktadır [4]. Bu dayanım azalmasının sebebi olarak çok hızlı jel oluşumu sırasında ortaya çıkan boşluklu yapılar olarak gösterilmektedir.

Diğer bir yandan koloid silikanın yüksek puzolanik aktivitesinin neden olduğu bu dayanım düşüklüğünü kolloid silika miktarını düşürerek giderilebileceğini söylemişlerdir. Beton karışımının ağırlıkça %0,15 ve % 0,20'si arasında kolloid silika kullanımı nihai dayanımda artışa ve betonun sülfat dayanımının artmasına imkan vermektedir.

Silis dumanına göre daha küçük taneciklere sahip olduğu için daha iyi filler olarak gösterilir [4]. İnce daneli çimento taneleri arasın da daha kolay yer bulabilmektedir. Bu sebeple agrega bağlayıcı hamur arasında ki aderans daha yüksek düzeyde gerçekleşir. **Şekil 2.7** de kolloid silikanın filler özelliğinin silis dumanına göre karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 2.7: Silis Dumanı ve Kolloid Silikanın boşluk doldurma kabiliyetleri [3].

Kolloid silikanın silis dumanından daha etkin olduğu belirtilmektedir. Kolloid silikanın bazı puzolanlarla kullanımının araştırıldığı bazı çalışmalar yapılmıştır. Ancak uçucu kül ile kullanımı durumunda su/çimento oranının etkisi hala araştırılmamıştır. Silis dumanından daha fazla silis içeriğine sahip ($< \%99$) ve daha ince küresel tanecikleri sayesinde daha fazla boşluk doldurabilmesi, özgül yüzey alanı sayesinde puzolanik aktivitesi daha fazla olan kolloid silikanın çimento harcının mekanik özelliklerine etkileri ve harcın erken yaşlardaki dayanım düşüklüğünün engellenmesine katkılarının incelenmesi amaçlanmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Üretilen Harçların Özellikleri

İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılan çalışmada 144 seri harç üretilmiştir. Karışımın oranları belirlenirken, 350 kg/m^3 dozlu bir betonun harç fazı esas alınarak, hamur hacminin kum hacmine oranı hesaplanmıştır. Elde edilen bu oran 0,68 olarak bulunmuştur. Üretilen tüm harçlarda hamur hacminin kum hacmine oranı 0,68 olarak alınmış ve karışımlar buna bağlı olarak hesaplanmıştır. İlk olarak 0,33, 0,38, 0,43 ve 0,48 su/çimento oranlarının her biri için çimentodan ağırlıkça 0,20, 0,40, 0,60 oranlarında çimento ile yer değiştirecek şekilde uçucu kül eklenerek kontrol numuneleri üretimi yapılmıştır. Bir sonra ki aşamada aynı oranlar kullanılarak oluşturulan uçucu kül katkılı numunelere %5, %10, %15 katkı oranlarında bağlayıcı malzeme ile yer değiştirecek biçimde kolloid silika eklenmiştir. Üretilen numunelerin kodları **Çizelge 3.1**'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1: Üretilen harçların isimlendirilmesi.

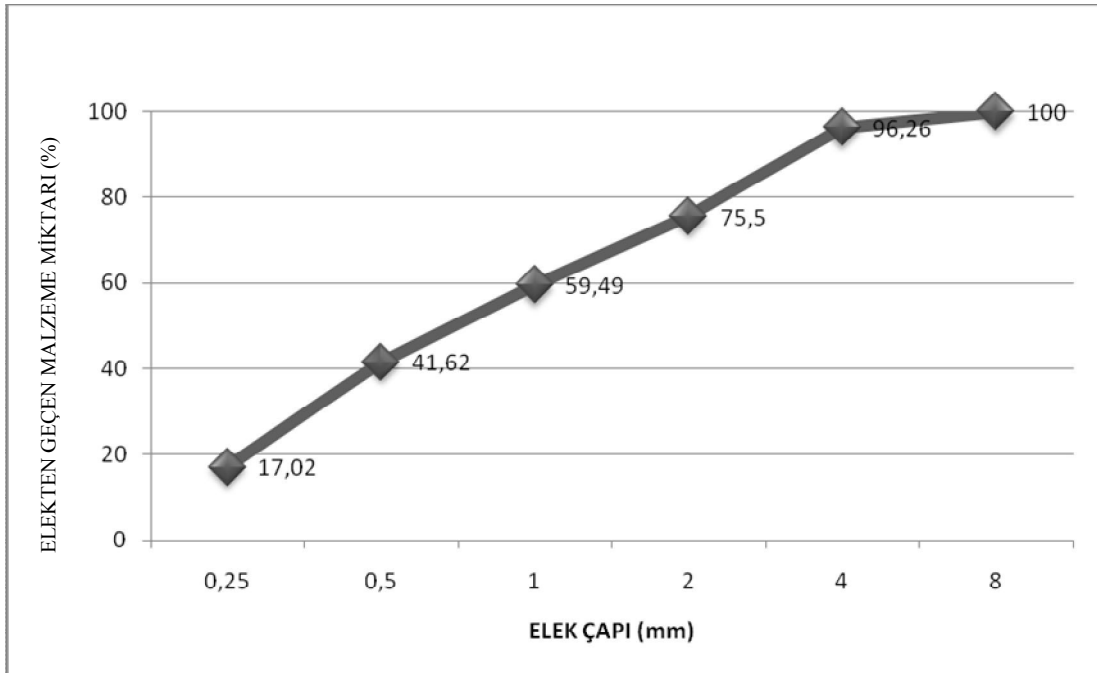
Su/Bağlayıcı Madde Oranı	Uçucu Kül Yerleştirme Yüzdesi (%)	Uçucu Kül Üretim Grupları	Kolloid Silika Yerleştirme Yüzdesi (%)	Uçucu kül + Kolloid Silika Üretim Grupları
0,33	20	33K20	5	33K20KS5
			10	33K20KS10
			15	33K20KS15
	40	33K40	5	33K40KS5
			10	33K40KS10
			15	33K40KS15
	60	33K60	5	33K60KS5
			10	33K60KS10
			15	33K60KS15
0,38	20	38K20	5	38K20KS5
			10	38K20KS10
			15	38K20KS15
	40	38K40	5	38K40KS5
			10	38K40KS10
			15	38K40KS15
	60	38K60	5	38K60KS5
			10	38K60KS10
			15	38K60KS15
0,43	20	43K20	5	43K20KS5
			10	43K20KS10
			15	43K20KS15
	40	43K40	5	43K40KS5
			10	43K40KS10
			15	43K40KS15
	60	43K60	5	43K60KS5
			10	43K60KS10
			15	43K60KS15
0,48	20	48K20	5	48K20KS5
			10	48K20KS10
			15	48K20KS15
	40	48K40	5	48K40KS5
			10	48K40KS10
			15	48K40KS15
	60	48K60	5	48K60KS5
			10	48K60KS10
			15	48K60KS15

3.1.1 Kum

Üretilen harç numunelerinde T.S. 3529' a göre birim hacim ağırlığı ve T.S. 3526' ya göre özgül ağırlık deneyi yapılmış ve elde edilen sonuçlar **Çizelge 3.2'**de verilmiştir. Granülometri deneyi T.S 3530 'a göre gerçekleştirilmiş ve **Çizelge 3.3'** te verilmiştir. T.S. 3527' ye göre ince madde 3 cc olarak tespit edilmiştir. T.S. 3673' e göre organik madde deneyi gerçekleştirilmiştir. Ve organik madde içermediği gözlemlenmiştir. **Çizelge 3.2'**de kumun özgül ağırlık ve birim hacim ağırlığı değerleri, **Şekil 3.1:** Kumun granülometri eğrisi.

Çizelge 3.2: Kumun fiziksel özellikleri.

Malzeme	Özgöl Ağırlık (kg/dm ³)	Birim Hacim Ağırlık (kg/dm ³)
Kum	2,65	1,54



Şekil 3.1: Kumun granülometri eğrisi.

3.1.2 Çimento

Çalışmada Akçansa fabrikasında üretilmiş olan PÇ 42,5 tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerini gösteren deneyler Akçansa

Çimento fabrikasında yapılmıştır. Bu deneylerin sonuçları sırasıyla **Çizelge 3.3**, **Çizelge 3.4** ve **Çizelge 3.5**'te verilmektedir.

Çizelge 3.3: PÇ 42,5 Portland Çimentosu fiziksel özellikleri.

FİZİKSEL DENEMELER		Standardlar	Analiz Sonuçları Test
TEST METODU : TS EN 196-3 ve TS EN 196-6			
Özgül Ağırlık (gr/cm³)			3.14
Priz Süresi	Başlama (dak.)	≥ 60	140
	Bitiş (dak.)		192
Hacim Genleşmesi		≤ 10	1
Özgül Yüzey - Blaine (cm²/gr)			3754
45 µm elek kalıntısı (%)			8.2
90 µm elek kalıntısı (%)			0.6

Çizelge 3.4: PÇ 42,5 Portland çimentosu mekanik özellikleri.

DAYANIM DENEMELERİ

TEST METODU : TS EN 196-1

40x40x160 mm kalıplar

Karışım: 1 kısım çimento, 3 kısım CEN ref. kumu, 0.50 su/çimento

Basınç Dayanımı (Mpa)

Mekanik Özellik / Gün	Standartlar	Deney Sonuçları
Erken Dayanım 2 gün	≥ 20,0 Mpa	28.5
Erken Dayanım 7 gün	-----	42.0
Standard Dayanım 28 gün	≥ 42,5 Mpa ≤ 62,5 Mpa	55.6

Çizelge 3.5: PÇ 42,5 Portland çimentosu kimyasal özellikleri.

KİMYASAL ANALİZ		
	Standardlar	Analiz Sonuçları
TEST METODU : TS EN 196-2		
Si O ₂ Çözünen (%)	(%)	20.63
Çözünmez Kalıntı (%)	≤ 5,0	1.22
Al ₂ O ₃ (%)		4.82
Fe ₂ O ₃ (%)		3.39
Ca O (%)		63.57
Mg O (%)	-	1.20
S O ₃ (%)	≤ 4,0	3.02
Kızdırma Kaybı (%)	≤ 5,0	1.22
Cl (%)	≤ 0,10	0.0405
Na ₂ O / K ₂ O (%)		0.24/0.89
Tayin Edilemeyen (%)		0.98
S.CaO (%)		1.25
C3 S		51.01
C2 S		20.75
C3 A		7.04
C4 AF		10.32
LSF		0.94

3.1.3 Su

Deneylerde şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.4 Uçucu kül

Çalışmalarda kullanılan uçucu kül Tunçbilek Termik Santralinden temin edilmiştir. C tipi uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri **Çizelge 3.6** da verilmiştir.

Çizelge 3.6: Tunçbilek Uçucu Külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri.

	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	K.Kaybı (%)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Özgül yüzey (cm ² /g)
TUNÇBİLEK UÇUCU KÜLÜ	58,82	2,18	19,65	10,67	3,92	0,48	1,9	0,9	2,08	3812

3.1.5 Süperakışkanlaştırıcı

Süper akışkanlaştırıcı, modifiye polikarboksilik eter bazlı yeni kuşak yüksek performanslı hiper akışkanlaştırıcıdır. Bu çalışma kapsamında, BASF firmasının glenium 51 ürünü kullanılmıştır.

3.1.6 Kolloid silika

Deneylerde, kolloid silika EKA Chemmicals tarafından üretilen CEMBINDER® 8. Aktif bileşeni kullanılmıştır. inorganik, yüksek reaktiviteli, su bazlıdır. 220 lt'lik bidonda saklanmaktadır. **Çizelge 3.7'**de malzemenin teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.7: Kolloid silika teknik özellikleri.

Yoğunluk (gr/cm³)	1,4
Kuru Yoğunluğu (gr/cm³)	2,33
pH	9,5
Viskozite (cPS)	<15
Katı Muhtevası (su %)	50

3.2 Numunelerin Hazırlanması

Karışım oranları belirlenirken, dozajı 350 kg/m³ bir betonun harç fazı esas alınarak, hamur hacminin kum hacmine oranı hesaplanmıştır. Elde edilen bu oran 0,68 olarak bulunmuştur. Karışımında kontrol numunelerini üretmek için %20, %40, %60 oranlarında çimento karışımdan çıkartılmış yerine ağırlıkça aynı miktarlarda uçucu kül eklenmiştir ve 0,33, 0,38, 0,43, 0,48 su/ bağlayıcı oranlarında harçlar üretilmiştir. Daha sonra kolloid silika içeren uçucu küllü numuneleri üretmek için %5, %10, %15 oranlarında bağlayıcı madde karışımdan çıkartılmış yerine aynı miktarda kolloid silis eklenmiştir. Tüm karışım miktarına 100 birim değer verilmiştir ve bileşimi oluşturan malzeme miktarları kütlece tüm malzeme miktarının yüzdesi cinsinden verilmiştir. Örnek olarak **Çizelge 3.8'**de bazı numunelerin karışım miktarları verilmiştir. Tüm

karışımlara ait bileşimler **EK-A'** da gösterilmektedir. Malzemenin kullanılabilirliği hakkında fikir vermesi açısından **EK-B'**de birim fiyat analizi yapılmıştır.

Çizelge 3.8: Örnek karışım Bileşimleri

	Su/Çim	Su	Çim	Uçucu kül	Kum	KS		
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	v_{hamur}	v_{hamur}/v_{kum}
33K20CS5	0,33	7,4	19,9	5	66,5	1,2	402,57	0,68
33K40CS5	0,33	7,3	14,4	9,6	67,4	1,2	420,10	0,68
33K60CS5	0,33	7,1	9,4	14,0	68,3	1,2	437,63	0,68
38K20CS5	0,38	8,3	18,7	4,7	67,2	1,2	431,82	0,68
38K40CS10	0,38	7,4	13,4	9	68,0	2,2	455,63	0,68
43K20CS10	0,38	7,2	8,7	13,1	68,8	2,2	473,16	0,68
43K40CS10	0,43	8,3	17,4	4,4	67,8	2,2	467,35	0,68
43K60KS10	0,43	8,1	12,7	8,5	68,6	2,2	484,88	0,68
43K60CS15	0,43	7,2	8,2	12,2	69,3	3,1	508,68	0,68
48K20CS15	0,48	8,2	16,3	4,1	68,3	3,1	502,87	0,68
48K40CS15	0,48	8,1	11,8	8,0	69,1	3,1	520,40	0,68
48K60CS15	0,48	7,9	7,8	11,5	69,8	3,1	537,93	0,68

3.3 Harç Üretimi, Karıştırma, yerleştirme, Saklama, Numune Boyutları

Harç üretimi düşey eksenli, 3 lt hacim kapasiteli karıştırıcı makinede gerçekleştirilmiştir. Kontrol harçlarının hazırlanmasında çimento, uçucu kül, su, akışkanlaştırıcı 30 saniye düşük hızda karıştırılmıştır. 30 saniye sonunda karıştırma işlemi devam ederken 30 saniye boyunca düşük hızda karışıma kum eklenmiştir. Kum ekleme bittikten sonra 1 dakika yüksek hızda karıştırma işlemi yapılmıştır.

Karıştırma işlemi bittikten sonra kapatılmış 15sn boyunca kaşık ile cidarı temizlendikten sonra 75 sn ağız kapalı şekilde dinlendirilmeye bırakılmıştır. Daha sonra kap tekrar makineye yerleştirilip 1 dakika boyunca yüksek hızda karıştırma işlemi uygulanmıştır. Harcın karışımı bittikten sonra sarsma tablasında 15 ± 2 cm olacak şekilde yayılması kontrol edilmiştir. Uygunluğu tespit edildikten sonra $40 \times 40 \times 160$ mm ebatlarında her birinde 3 adet numune yer alan kalıplara 2 kademeli olarak yerleştirilmiştir. Her bir kademe yerleşiminden sonra elektrikli sarsma tablalarında harcın yerleşmesi sağlanmıştır. Kalıpların yüzeyi mala yardımı ile düzeltildikten sonra üzerleri kapatılmıştır. Numunelere 3, 7, 28 ve 90 gün süresince $23 \pm 2^\circ\text{C}$ su içerisinde kür uygulanmıştır.

3.4 Uygulanan Deneyler

3.4.1 Taze harç deneyleri

Harçların işlenebilirliğini belirlemek amacıyla ASTM C 1437 “Standart Test Method For Flow Of Hydraulic Cement Mortar” esaslarına göre sarsma tablalarında yayılma deneyleri uygulanmıştır. **Şekil 3.2**'de ASTM C 230 standartına göre sarsma tablası görülmektedir. Tablanın ortasına denk gelecek şekilde yerleştirilen $50 \pm 0,5$ mm yüksekliğinde, $70 \pm 0,5$ mm üst ağız genişliği ve $100 \pm 0,5$ mm alt ağız genişliği bulunan konik şekilli levha içerisine 2 kademeli sıkıştırma yapılarak harç yerleştirilir. Harç yerleştirildikten sonra mala yardımı ile üzeri düzlenir. Daha sonra koni çekilerek dairesel kolu çevirmek sureti ile $12,7 \pm 0,13$ mm yükseklikten 15 saniyede 25 defa olacak düşecek şekilde deney yapılır. Yayılma bir cetvel yardımı ile ölçülür. Deneylerde yayılma miktarını 150 ± 20 mm olarak tutuldu.



Şekil 3.2: Sarsma tablası

3.4.2 Sertleşmiş harç deneyleri

23°C ± 2 su içerisinde kür süresi sonuna kadar ayrı ayrı saklanmış numuneler üzerinde eğilme deneyleri 3., 7., 28. ve 90. günler sonunda, olarak üniversal test cihazında yapılmıştır. Mesnet açıklığı 100 mm alınmıştır. Deney parçasının uzunluk eksenini, mesnetlerin eksenlerine dik ve deney numunesinin ortası mesnet açıklığının ortasına gelecek şekilde makineye yerleştirilmiştir. Deneylerin yapılmasında TS EN 310 standardı esas alınmıştır.

Eğilme dayanımı (3.1)'deki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Statik eğilme direnci: } \sigma_e = 3.P.L / 2.b.h^2 \quad (3.1)$$

Burada;

σ_e : Eğilme direnci (N/ mm²)

P : Kırılma anındaki maksimum yük (N)

L : Dayanak noktaları arasındaki açıklık (mm)

b : Deney parçasının genişliği (mm)

h : Deney parçasının kalınlığı (mm) olarak alınmıştır.

23±2 °C su içerisinde ayrı ayrı saklanmış numuneler 3, 7, 28 ve 90 günler sonunda, önce 3 noktalı eğilme dayanımı deneyine tabi tutulup daha sonra artan parçalar ile EIE marka 300 ton kapasiteli hidrolik presle basınç uygulanmıştır. Numunelerin pres tablasına gelecek yüzü 40x40 mm ebatlarındadır. Deneyde yükleme hızı sabit tutulmuştur. Basınç mukavemeti deneylerinin değerlendirilmesinde mukavemetten bilinen basit gerilme formülü kullanılarak sonuçlar (N/mm²) cinsinden hesaplanmıştır.

$$\sigma_b = P_k / a^2 \quad (3.2)$$

σ_b : Basınç mukavemeti (N/mm²)

P_k : Numunenin kırılma kuvveti (N)

a : Prizma kesitinin boyutu (mm)

4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Taze Harç Deney Sonuçları

Üretimlerde taze haldeki harcın yayılma miktarı sabit tutulmaya çalışılmıştır. Bunun için sarsma tablasında ASTM 1437 ye göre yayılma deneyi yapılarak 25 düşüş sonunda yayılmanın 150 ± 20 mm olması hedeflenmiştir. Bunu sağlamak için karışımların süperakışkanlaştırıcı oranları bağlayıcının ağırlıkça %3'ünü geçmeyecek şekilde değiştirilmiştir. Süper akışkanlaştırıcı miktarları **Çizelge 4.1**'de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Kullanılan süperakışkanlaştırıcı miktarları.

Su/Bağlayıcı oranı				%20 UK + %5 KS	%40 UK + %5 KS	%60 UK + %5 KS	%20 UK + %10 KS	%40 UK + %10 KS	%60 UK + %10 KS	%20 UK + %15 KS	%40 UK + %15 KS	%60 UK + %15 KS
	%20 UK	%40 UK	%60 UK									
0,33	1,41	1,41	1,41	1,60	1,50	2,26	1,97	1,88	2,82	2,26	2,44	3,01
0,38	0,94	0,94	0,94	0,94	1,13	1,60	1,32	1,50	1,97	1,69	1,88	2,26
0,43	0,75	0,75	0,75	0,94	0,94	1,32	1,13	1,32	1,41	1,50	1,69	1,69
0,48	0,56	0,56	0,56	0,75	0,94	0,94	1,03	1,13	1,32	1,32	1,41	1,69

4.2 Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları

4.2.1 Eğilme mukavemeti deney sonuçları

$23^{\circ}\text{C} \pm 2$ su içerisinde kür süresi sonuna kadar ayrı ayrı saklanmış numuneler üzerinde eğilme deneyleri 3., 7., 28. ve 90. günler sonunda, olarak universal test cihazında yapılmıştır. Mesnet açıklığı 100 mm alınmıştır. Deney parçasının uzunluk eksenine, mesnetlerin eksenlerine dik ve deney numunesinin ortası mesnet açıklığının ortasına gelecek şekilde makineye yerleştirilmiştir. Deneylerin yapılmasında TS EN

310 standardı esas alınmıştır. Eğilme dayanımı (4.1)'de ki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Statik eğilme direnci: } \sigma_e = 3.P.L / 2. b. h^2 \quad (4.1)$$

Burada;

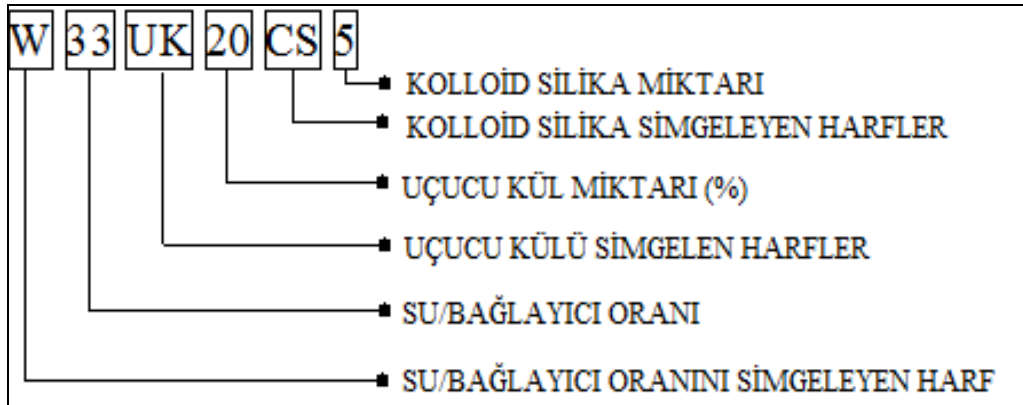
σ_e : Eğilme direnci (N/ mm²)

P : Kırılma anındaki maksimum yük (N)

L : Dayanak noktaları arasındaki açıklık (mm)

b : Deney parçasının genişliği (mm)

h : Deney parçasının kalınlığı (mm) olarak alınmıştır.



Şekil 4.1: Numune kodlama sistemi.

Şekil 4.1'de W33UK20CS5 numunesi üzerinden deneylerde numuneleri sıralamakta ve ayırt etmekte kullanılan kodlama sisteminin açıklaması yapılmıştır. Başka bir örnek verecek olursak 0,43 su/bağlayıcı oranı, %60 uçucu kül içeren ve %15 kolloid silika içeren numunenin kodu W43UK60CS15 olarak adlandırılır.

0,33, 0,38, 0,43 ve 0,48 Su/Çimento oranı ve bağlayıcı madde miktarı içerisinde küttelece %20, %40 ve %60 uçucu kül içeren ve kolloid silika içermeyen kontrol numunelerin eğilme dayanımı deney sonuçları **Çizelge 4.2**'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2: Uçucu kül içeren kontrol numuneleri 3 noktalı eğilme dayanımları.

3 NOKTALI EĞİLME DAYANIMI (N/mm ²)				
	3 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	90 GÜN
W33UK20	8,6	9,9	10,9	13,9
W38UK20	7,8	9,6	10,7	13,5
W43UK20	7,4	7,9	10,4	13,0
W48UK20	6,3	7,1	8,7	11,4
W33UK40	6,1	7,3	10,0	11,2
W38UK40	5,1	6,7	9,2	12,0
W43UK40	5,7	6,5	8,5	12,4
W48UK40	5,0	5,6	7,4	10,7
W33UK60	3,0	5,4	8,2	11,7
W38UK60	2,6	4,6	7,4	10,8
W43UK60	3,0	3,6	7,6	10,5
W48UK60	2,6	3,5	6,3	9,8

0,33, 0,38, 0,43 ve 0,48 Su/Çimento oranı ve bağlayıcı madde miktarı içersinde kütlece %20 uçucu kül ve sırasıyla %5, %10, %15 oranlarında kolloid silika içeren numunelerin eğilme dayanımı deney sonuçları **Çizelge 4.3**'te verilmiştir.

Çizelge 4.3: %20 oranında Uçucu kül içeren numunelerin 3 noktalı eğilme dayanımları.

3 NOKTALI EĞİLME DAYANIMI (N/mm ²)				
	3 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	90 GÜN
W33UK20CS5	9,0	14,9	12,0	15,6
W38UK20CS5	8,4	14,0	11,9	13,6
W43UK20CS5	7,6	11,5	10,4	13,5
W48UK20CS5	6,6	11,4	9,6	11,2
W33UK20CS10	9,2	12,0	12,6	14,9
W38UK20CS10	9,0	10,6	12,7	14,0
W43UK20CS10	7,7	8,7	10,5	11,5
W48UK20CS10	6,7	7,5	10,6	11,4
W33UK20CS15	8,8	11,3	13,1	15,8
W38UK20CS15	9,2	10,8	13,4	13,1
W43UK20CS15	7,2	9,7	11,2	12,8
W48UK20CS15	7,0	8,4	11,5	11,7

0,33, 0,38, 0,43 ve 0,48 Su/Çimento oranı ve bağlayıcı madde miktarı içerisinde kütlece %40 uçucu kül ve sırasıyla %5, %10, %15 oranlarında kolloid silika içeren numunelerin eğilme dayanımı deney sonuçları **Çizelge 4.4**'te verilmiştir.

Çizelge 4.4: %40 oranında UK içeren numunelerin 3 noktalı eğilme dayanımları.

3 NOKTALI EĞİLME DAYANIMI (N/mm ²)				
	3 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	90 GÜN
W33UK40CS5	7,8	8,0	8,3	12,7
W38UK40CS5	6,6	8,1	9,8	12,4
W43UK40CS5	6,5	7,3	9,9	12,1
W48UK40CS5	4,8	5,5	8,6	9,2
W33UK40CS10	8,5	9,0	10,9	15,6
W38UK40CS10	6,6	8,5	11,5	14,1
W43UK40CS10	6,5	7,8	9,7	12,1
W48UK40CS10	4,6	7,0	9,4	10,4
W33UK40CS15	8,1	10,0	11,3	15,5
W38UK40CS15	7,4	9,2	11,9	14,3
W43UK40CS15	6,5	6,8	10,9	13,1
W48UK40CS15	5,8	7,4	10,1	10,7

0,33, 0,38, 0,43 ve 0,48 Su/Çimento oranı ve bağlayıcı madde miktarı içerisinde kütlece %60 uçucu kül ve sırasıyla %5, %10, %15 oranlarında kolloid silika içeren numunelerin eğilme dayanımı deney sonuçları **Çizelge 4.5**'te verilmiştir.

Çizelge 4.5: %60 oranında Uçucu kül numunelerin 3 noktalı eğilme dayanımları.

	3 NOKTALI EĞİLME DAYANIMI (N/mm ²)			
	3 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	90 GÜN
W33UK60CS5	5,1	6,8	9,9	12,0
W38UK60CS5	4,2	5,7	8,4	11,2
W43UK60CS5	3,3	5,3	7,5	11,3
W48UK60CS5	3,1	4,3	7,3	9,2
W33UK60CS10	5,9	6,6	10,2	12,1
W38UK60CS10	4,9	6,4	9,2	11,
W43UK60CS10	3,9	5,8	8,4	12,1
W48UK60CS10	3,8	5,0	8,6	9,6
W33UK60CS15	5,5	7,2	10,5	12,4
W38UK60CS15	4,6	7,1	10,4	11,9
W43UK60CS15	4,6	6,5	8,9	12,5
W48UK60CS15	3,6	5,6	8,7	10,9

4.2.2 Basınç mukavemeti deney sonuçları

23±2 °C su içerisinde ayrı ayrı saklanmış numuneler 3, 7, 28 ve 90 günler sonunda, önce 3 noktalı eğilme dayanımı deneyine tabi tutulup daha sonra artan parçalar ile basınç dayanımı uygulanmıştır. Numunelerin pres tablasına gelecek yüzü 40x40 mm ebatlarındadır. Deneyde yükleme hızı sabit tutulmuştur.

Basınç mukavemeti deneylerinin değerlendirilmesinde mukavemetten bilinen basit gerilme formülü kullanılarak sonuçlar (N/mm²) cinsinden hesaplanmıştır.

$$\sigma_b = P_k / a^2 \quad (4.2)$$

σ_b : Basınç mukavemeti (N/mm²)

P_k : Numunenin kırılma kuvveti (N)

a : Prizma kesiti'nin boyutu (mm)

0,33, 0,38, 0,43 ve 0,48 Su/Çimento oranı ve bağlayıcı madde miktarı içerisinde kütlece %20, %40 ve %60 uçucu kül içeren kontrol numunelerin basınç dayanımı deney sonuçları **Çizelge 4.6**'te verilmiştir.

Çizelge 4.6: Uçucu kül içeren kontrol numuneleri basınç dayanımları.

	BASINÇ DAYANIMI (N/mm²)			
	3 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	90 GÜN
W33K20	40,8	55,8	58,2	84,4
W38K20	39,7	50,3	56,4	72,2
W43K20	37,9	38,5	48,3	67,1
W48K20	27,8	37,9	46,7	62,3
W33K40	24,5	38,0	62,5	69,1
W38K40	24,5	34,9	59,2	65,8
W43K40	26,9	30,9	57,2	64,4
W48K40	19,8	26,8	41,5	51,7
W33K60	11,4	25,4	44,4	51,9
W38K60	12,3	21,9	41,1	52,2
W43K60	13,0	18,4	32,0	48,1
W48K60	9,4	13,6	31,1	37,5

0,33, 0,38, 0,43 ve 0,48 Su/Çimento oranı ve bağlayıcı madde miktarı içerisinde kütlece %20 uçucu kül ve sırasıyla %5, %10, %15 oranlarında kolloid silika içeren numunelerin basınç dayanımı deney sonuçları **Çizelge 4.7**'de verilmiştir.

Çizelge 4.7: %20 oranında Uçucu kül içeren numunelerin basınç dayanımları.

	BASINÇ DAYANIMI (N/mm ²)			
	3 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	90 GÜN
W33UK20CS5	46,7	72,3	78,9	85,3
W38UK20CS5	36,2	52,3	64,2	71,2
W43UK20CS5	35,9	47,7	56,3	60,0
W48UK20CS5	31,3	34,8	54,9	54,9
W33UK20CS10	51,1	62,1	89,9	89,9
W38UK20CS10	42,8	52,6	67,1	63,2
W43UK20CS10	34,7	47,8	60,7	62,8
W48UK20CS10	30,8	34,1	58,5	60,8
W33UK20CS15	46,9	62,8	73,7	73,8
W38UK20CS15	36,4	58,4	69,5	70,3
W43UK20CS15	33,5	55,9	62,9	65,7
W48UK20CS15	30,0	43,0	61,5	61,6

0,33, 0,38, 0,43 ve 0,48 Su/Çimento oranı ve bağlayıcı madde miktarı içersinde kütlece %40 uçucu kül ve sırasıyla %5, %10, %15 oranlarında kolloid silika içeren numunelerin basınç dayanımı deney sonuçları **Çizelge 4.8**'te verilmiştir.

Çizelge 4.8: %40 oranında Uçucu kül numunelerin basınç dayanımları.

	BASINÇ DAYANIMI (N/mm ²)			
	3 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	90 GÜN
W33UK40CS5	33,3	46,8	66,7	68,2
W38UK40CS5	32,9	37,1	53,1	64,2
W43UK40CS5	27,5	35,3	52,2	50,5
W48UK40CS5	19,3	24,7	24,7	47,8
W33UK40CS10	35,5	59,4	79,1	75,1
W38UK40CS10	32,7	39,8	66,0	70,7
W43UK40CS10	27,6	36,1	52,1	63,2
W48UK40CS10	21,7	25,1	42,4	59,1
W33UK40CS15	43,8	68,8	80,8	65,5
W38UK40CS15	32,1	43,8	70,3	50,9
W43UK40CS15	25,2	38,1	56,4	56,7
W48UK40CS15	24,8	33,7	48,3	59,8

0,33, 0,38, 0,43 ve 0,48 Su/Çimento oranı ve bağlayıcı madde miktarı içerisinde kütlece %60 uçucu kül ve sırasıyla %5, %10, %15 oranlarında kolloid silika içeren numunelerin basınç dayanımı deney sonuçları **Çizelge 4.9**'te verilmiştir.

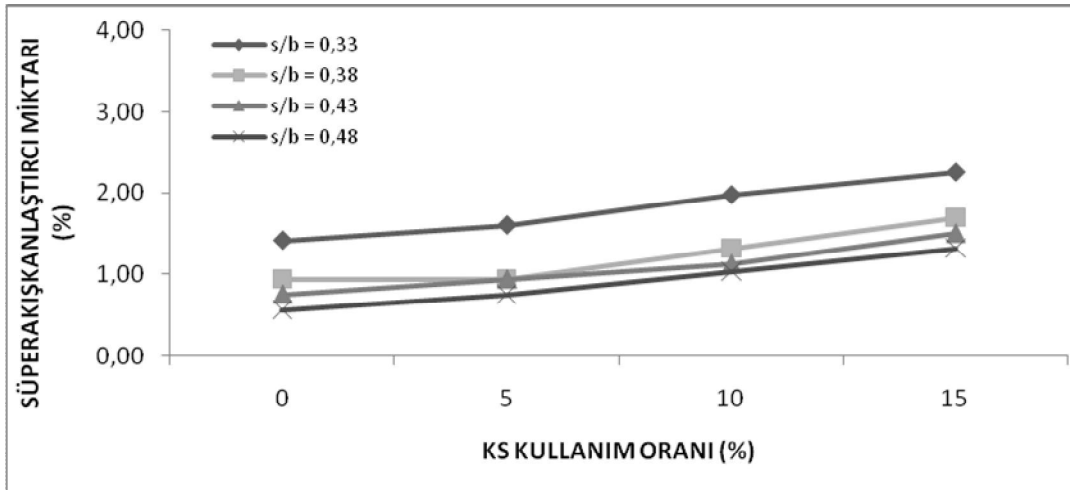
Çizelge 4.9: %60 oranında Uçucu kül içeren numunelerin basınç dayanımları.

	BASINÇ DAYANIMI (N/mm ²)			
	3 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	90 GÜN
W33UK60S5	19,3	33,3	53,6	56,5
W38UK60CS5	17,1	20,9	39,4	49,1
W43UK60CS5	13,1	19,6	33,8	44,7
W48UK60CS5	10,1	14,8	28,9	45,3
W33UK60CS10	23,7	30,6	53,9	55,2
W38UK60CS10	15,1	25,9	46,5	46,5
W43UK60CS10	13,3	21,0	42,6	44,4
W48UK60CS10	11,6	16,9	35,8	42,1
W33UK60CS15	20,9	35,6	54,1	60,6
W38UK60CS15	17,9	31,2	52,9	57,4
W43UK60CS15	15,5	25,1	40,2	54,8
W48UK60CS15	13,8	17,2	40,1	51,6

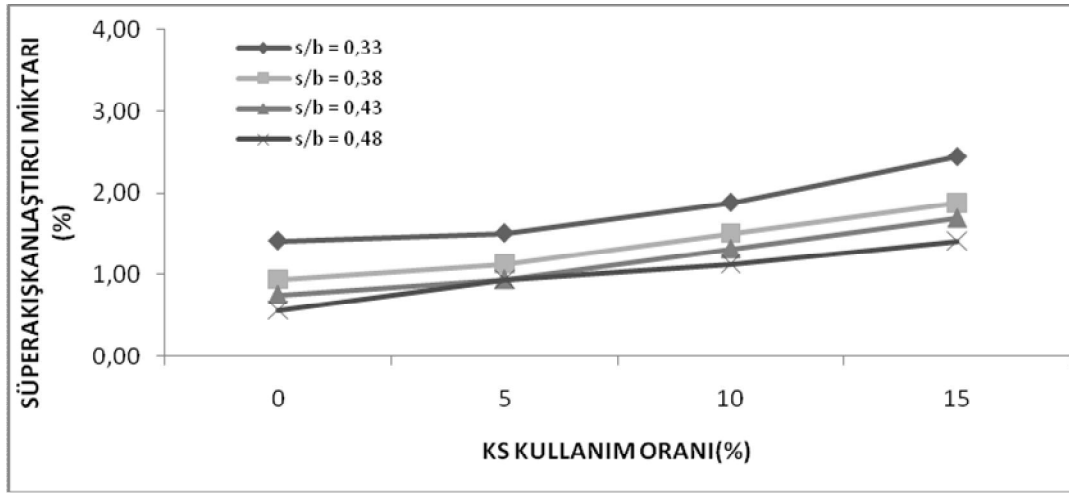
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Taze Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

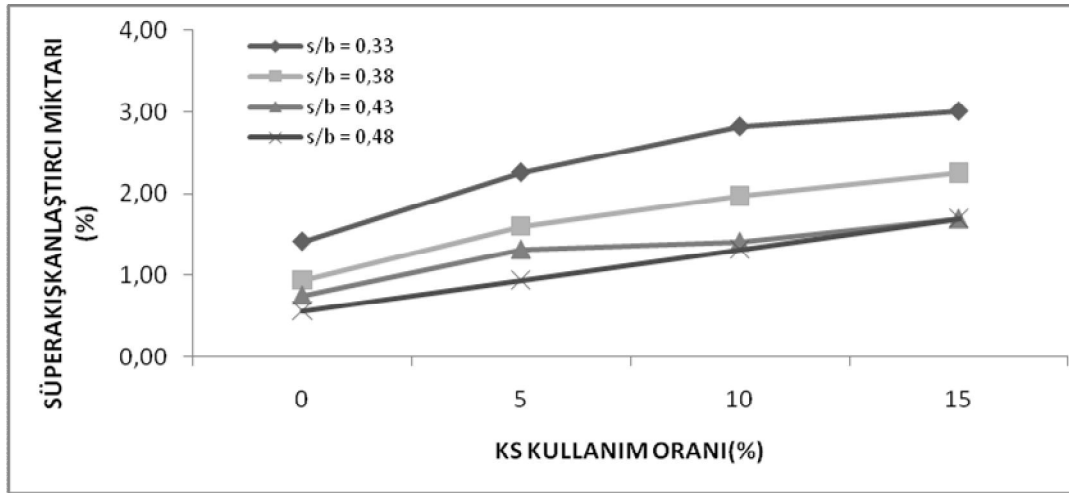
Üretimlerde taze haldeki harcın yayılma miktarı sabit tutulmaya çalışılmıştır. Bunun için sarsma tablasında yayılma deneyi yapılarak 25 düşüş sonunda yayılmanın 150 ± 20 mm olması hedeflenmiştir. Bunu sağlamak için karışımların süperakışkanlaştırıcı oranları çimentonun ağırlıkça %3'ünü geçmeyecek şekilde değiştirilmiştir. Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te harçlarda kolloid silika oranı ile sabit işlenebilirlik için kullanılan süperakışkanlaştırıcı oranı ilişkisi görülmektedir.



Şekil 5.1: %20 uçucu kül içeren harçlarda kolloid silika oranı ile sabit işlenebilirlik için kullanılan süperakışkanlaştırıcı oranı ilişkisi.



Şekil 5.2: %40 uçucu kül içeren harçlarda kolloid silika oranı ile sabit işlenebilirlik için kullanılan süperakışkanlaştırıcı oranı ilişkisi.



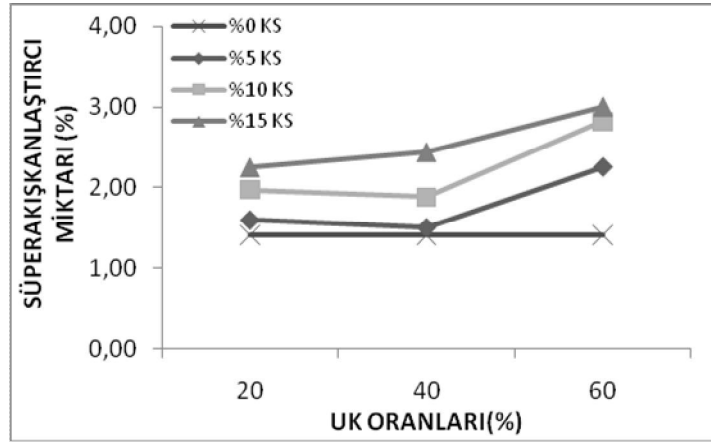
Şekil 5.3: %60 uçucu kül içeren harçlarda kolloid silika oranı ile sabit işlenebilirlik için kullanılan süperakışkanlaştırıcı oranı ilişkisi.

Şekiller incelendiğinde her bir su/bağlayıcı oranı için kolloid silika oranı arttığında sabit işlenebilmeyi elde etmek için kullanılan süperakışkanlaştırıcı miktarının arttığı görülmektedir. Çok ince tanelerin işlenebilmeyi olumsuz yönde etkilediği ve karışımların su ihtiyacını arttırdığı bilinmektedir. Kolloid silikanın tanecik boyutunun betonda geleneksel olarak kullanılan tüm malzemelerden daha küçük olduğu göz önüne alındığında yüksek özgül yüzey alanı sayesinde karışım suyunu tutarak su ihtiyacını artırması beklenen bir olaydır.

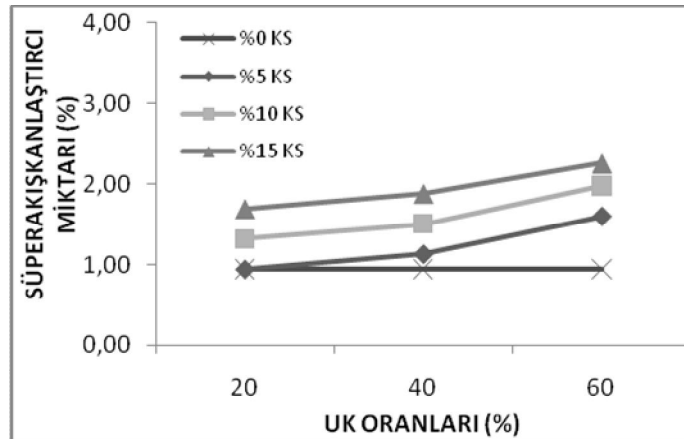
Kullanılan süperakışkanlaştırıcı miktarının her uçucu kül yer değiştirme oranı için su/bağlayıcı oranı azaldıkça artması, suyun yokluğundan dolayı meydana gelen işlenebilirlik için daha az suyla yapılan harçlarda daha yüksek miktarda

süperakışkanlaştırıcı kullanılması bugüne kadar yapılan çalışmalarda defalarca kanıtlanmış ve yaygın olarak bilinen bir bilgidir.

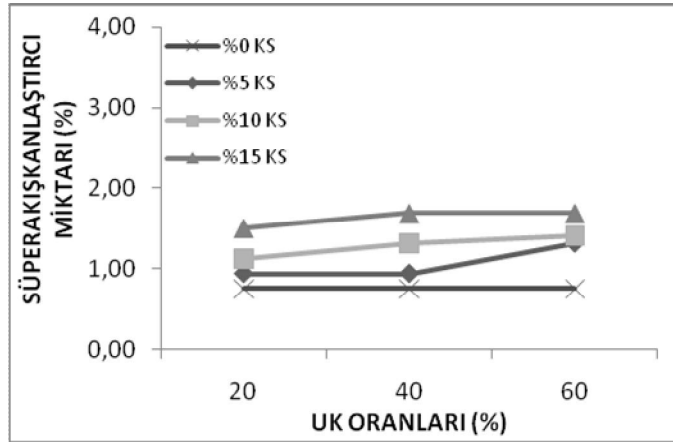
Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 de sabit su/bağlayıcı oranında sabit işlenebilirlik için uçucu kül oranına göre süperakışkanlaştırıcı kullanım oranının değişimi görülmektedir. Şekiller incelendiğinde her bir su/bağlayıcı oranında uçucu kül oranı arttıkça, uçucu külün kolloid silika ile birlikte kullanılması durumunda kullanılan süperakışkanlaştırıcı miktarının da arttığı açıkça görülmektedir. Bu artış yüksek oranda uçucu kül kullanılan harçlarda daha fazladır. % 0 kolloid silika kullanılan numunelerde uçucu kül oranına göre kullanılması gerekli süperakışkanlaştırıcı miktarında dikkate değer bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Uçucu kül yer değiştirmesi ağırlıkça yapılığı için harç içerisine giren ince malzeme hacminde uçucu kül oranının artışıyla birlikte bir artış meydana gelmektedir.



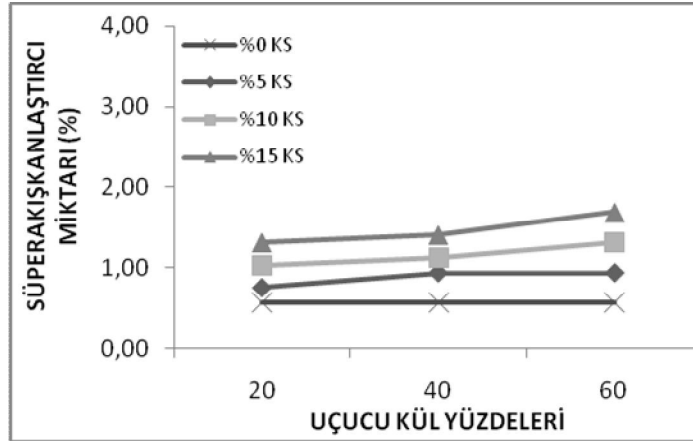
Şekil 5.4: 0,33 su/bağlayıcı oranında uçucu kül oranına göre süperakışkanlaştırıcı kullanım oranının değişimi.



Şekil 5.5: 0,38 su/bağlayıcı oranında uçucu kül oranına göre süperakışkanlaştırıcı kullanım oranının değişimi.



Şekil 5.6: 0,43 su/bağlayıcı oranında uçucu kül oranına göre süperakışkanlaştırıcı kullanım oranının değişimi.



Şekil 5.7: 0,48 su/bağlayıcı oranında uçucu kül oranına göre süperakışkanlaştırıcı kullanım oranının değişimi.

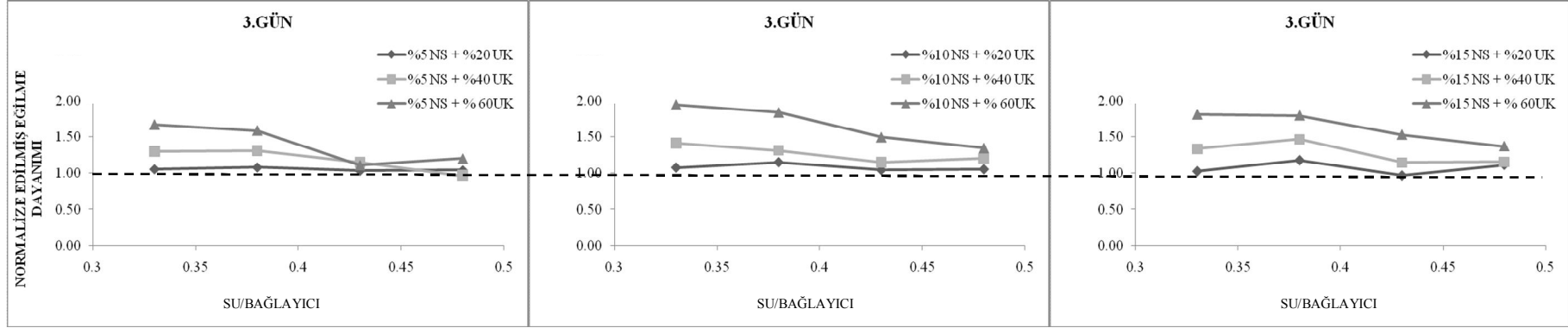
Uçucu külün harç çimento harcı içinde bulunması, karışımda ki su ihtiyacı artırmaktadır. Bu davranış yüksek özgül yüzeyine sahip mineral katkı taneciklerinin, karışıma katılması sonucu, işlenebilirliği sabit tutabilmek için daha fazla oranda su veya kimyasal katkıların gereksinimini yol açmaktadır [40, 41, 42]. Karışıma kolloid silika katılmasına rağmen su oranı sabit tutulur ise kollid silika, karışımdaki partiküllerin aralarındaki hacim azalması ve serbest suyun azalması sonucu, birbirlerine daha yaklaşmalarına neden olur. Böylece torkun artmasına katkı sağlayarak, tanecikleri arasında yüzey sürtünmesi yükselmiş olur [42].

5.2 Sertleşmiş Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

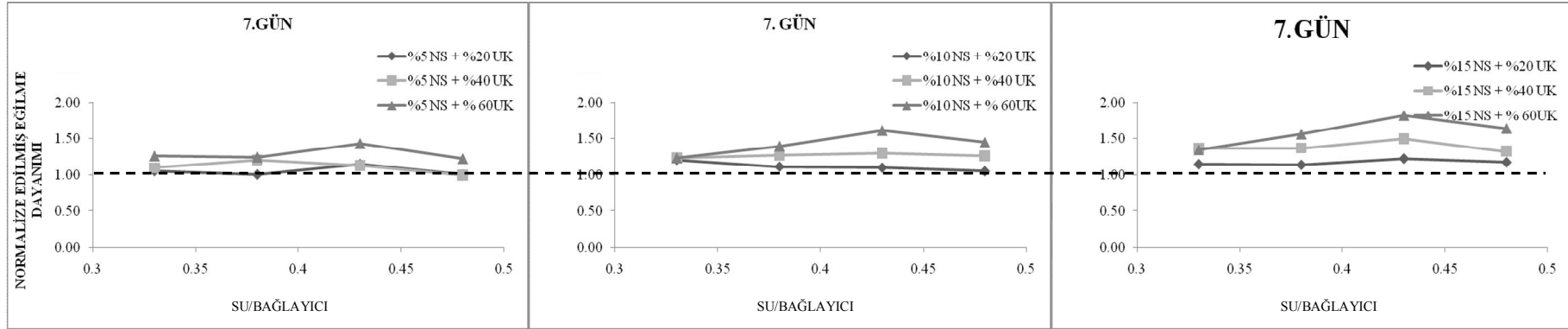
Sertleşmiş harç deney sonuçlarının değerlendirilmesinde Bölüm 4'te verilen ilgili çizelgelerden faydalanıldı ve çizilen şekiller birlikte irdelenmesi yapıldı.

5.2.1 Eğilme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Eğilme sonuçlarının değerlendirilmesinde; Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilen ve kolloid silika içeren numunelerin mukavemetlerinin kontrol numunelerinin mukavemetlerine oranlanması ile elde edilen normalize edilmiş mukavemet değerlerinden faydalanılmıştır. Bunun için farklı oranda uçucu kül içeren numunelerin su/bağlayıcı oranı normalize edilirken, dayanım grafikleri kür sürelerine göre farklı oranda kolloid silika içeren numuneler için bir arada değerlendirilmiştir. Şekil 5.8'te 3 günlük aynı oranlarda kolloid silika ve farklı oranlarda uçucu kül içeren karışımların normalize edilmiş dayanımlarının değişimi gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde kolloid silikanın tüm kullanım oranlarında %60 uçucu kül içeren harçların normalize edilmiş dayanımları üzerindeki etkinliğinin daha fazla olduğu görülmektedir. Uçucu külün fazla kullanımının 3 günlük eğilme dayanımında düşük sonuçlar vermesi ve kolloid silika eklendiğinde bu sonuçların neredeyse 2 katına çıkmasına neden olmuştur. Bunun en önemli sebebi, uçucu külün, çok erken yaşlarda yeterli puzolanik reaksiyonu gerçekleştirememesinden dolayı, kontrol numunelerinin dayanımlarının çok düşük değerlerde olması olarak gösterilebilir. Çalışmanın en önemli amacının da yüksek oranda uçucu kül kullanılan harçlarda ki erken yaşlarda meydana gelen dayanım düşüşlerinin kolloid silika kullanılarak giderilmesi olduğu daha önce açıklanmıştı. Kolloid silikanın puzolanik aktivitesinin çok yüksek olmasının yanında, çok ince yapısından kaynaklanan üstün filler etkisi de rol oynamaktadır.

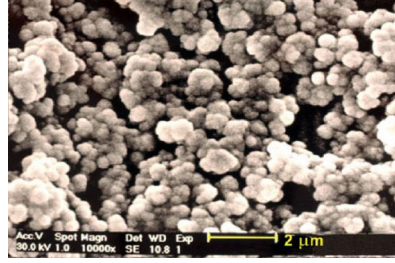


Şekil 5.8: 3 günlük eğilme deneyi sonuçlarının normalize edilmiş değerleri.

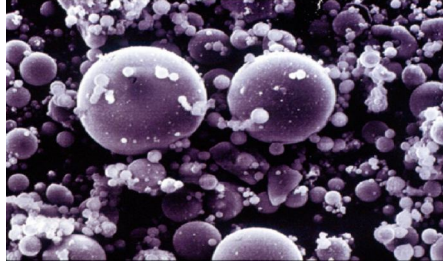


Şekil 5.9: 7 günlük eğilme deneyi sonuçlarının normalize edilmiş değerleri.

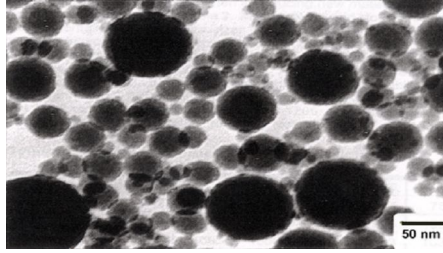
Şekil 5.10'da silis dumanı, uçucu kül ve kolloid silikanın elektron mikroskobu altında çekilmiş fotoğrafları görülmektedir. Fotoğraflar incelendiğinde kolloid silikanın uçucu kül ve silis dumanına göre çok yüksek inceliğe sahip olduğu açıkça görülmektedir.



(a)



(b)



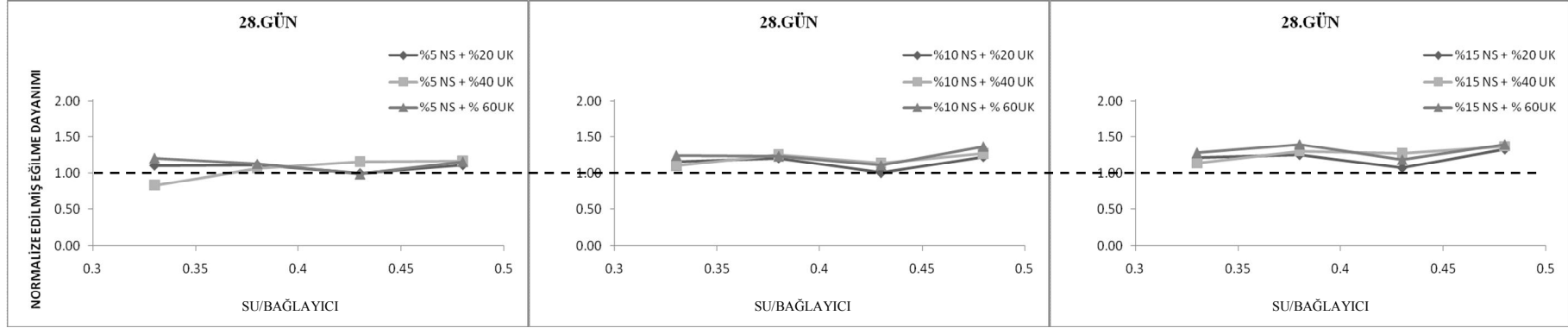
(c)

Şekil 5.10: (a) silis dumanı (b) uçucu kül ve (c) kolloid silika tanelerinin elektron mikroskobu ile çekilmiş fotoğrafları [5].

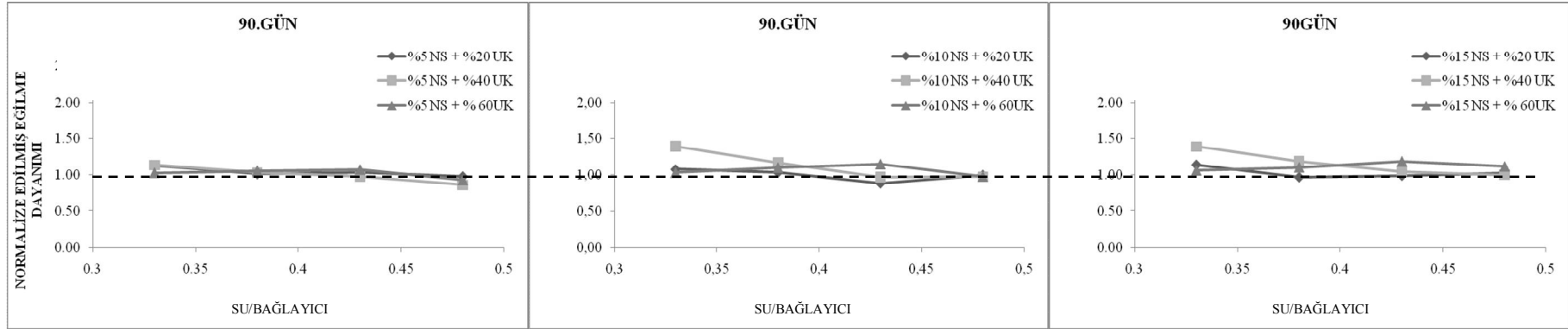
Şekil 5.9'da ki 7 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımı değerleri, **Şekil 5.8** 3 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımı ile aynı karakteristikleri göstermektedir. 7 günlük eğilme dayanımı sonuçlarında kontrol numunelerinden yüksek eğilme mukavemetine sahip kolloid silikalı numuneler görülmektedir. Kolloid silika miktarı arttıkça eğilme dayanımı değerlerinin arttığı görülmektedir. Aynı zamanda kolloid silika etkinliği uçucu kül miktarının artması ile artmaktadır, yani yüksek oranda yüksek oranda uçucu kül kullanımı durumunda kolloid silikanın 7. Günde dayanım düşüşünü tolere eden etkisi daha fazla olmaktadır. Uçucu külün % 60 olduğu durum da normalize değerinin kontrol numunesine göre neredeyse 2 katına çıktığı görülmektedir.

Şekil 5.11'de ki 28 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımlarının 3.gün ve 7. Gündeki normalize eğilme dayanımlarından daha düşük olduğu söylenebilir. Özellikle kolloid silika oranı %5 olan numunelerde normalize 1 değerine daha fazla yaklaştığı söylenebilir 28. gündeki eğilme dayanımında kolloid silika miktarındaki artışın eğilme mukavemetine olumlu katkısı olduğu söylenebilir. Kolloid silikalı numunelerin kontrol numuneleri ile kıyaslandığında eğilme mukavemetindeki artış devam etmektedir. 28. gündeki eğilme mukavemeti deneyi sonuçları **Şekil 5.8** ve **Şekil 5.9**'da gösterilen 3. ve 7. günlerdeki mukavemetlerle paralellik göstermektedir.

Şekil 5.12'de ki 90 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımlarının 3., 7., ve 28. günlük normalize eğilme değerlerine nazaran 90. günde bir artış değil düşüş dahi yaşanmaktadır. Erken yaşlarda kazanılan mukavemet artışı geç yaşlarda yok olmaktadır. Bunun nedeni olarak Skarp ve Sarkar'ın yapmış olduğu çalışmalarda ultra incelikteki silika tanecikleri, erken dönemdeki jel oluşumu sırasında suyun büyük bölümünü tükettiği için, hızlı bir şekilde çimento hamurunun prizini almasına yol açmaktadır. Bu olayı da kolloid silikanın yüksek puzolanik aktivitesine bağlamaktadırlar. Ancak kolloid silikanın, çimento hamuruna kazandırmış olduğu yüksek erken dayanım, nihai dayanımda düşüşlere sebep olmaktadır [4]. Bu dayanım azalmasının sebebi olarak çok hızlı jel oluşumu sırasında ortaya çıkan boşluklu yapılar olarak gösterilmektedir. Diğer bir yandan Skarp ve Sarkar koloid silikanın yüksek puzolanik aktivitesinin neden olduğu bu dayanım düşüklüğünü kolloid silika miktarını düşürerek giderilebileceğini söylemişlerdir.



Şekil 5.11: 28 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımları.



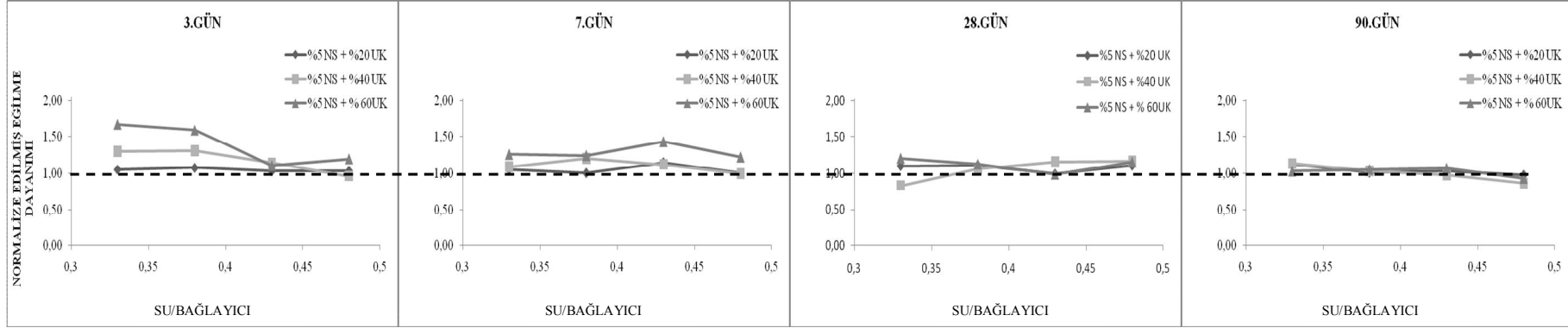
Şekil 5.12: 90 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımları.

Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'de sırasıyla %5, %10, %15 oranında kolloid silika içeren harç numunelerinin normalize edilmiş eğilme dayanımlarının zamana göre değişimleri verilmektedir. Yukarıda da bahsedildiği gibi her kolloid silika kullanım oranında numune yaşı ilerledikçe normalize edilmiş dayanım değerleri 1 değerine yaklaşmakta, hatta bu değer altına düşmektedir. Normalize edilmiş değer (1) seviyesinde olması kullanılan kolloid silikanın uçucu küllü harçlarda herhangi bir olumlu ya da olumsuz etkisinin olmadığını göstermektedir.

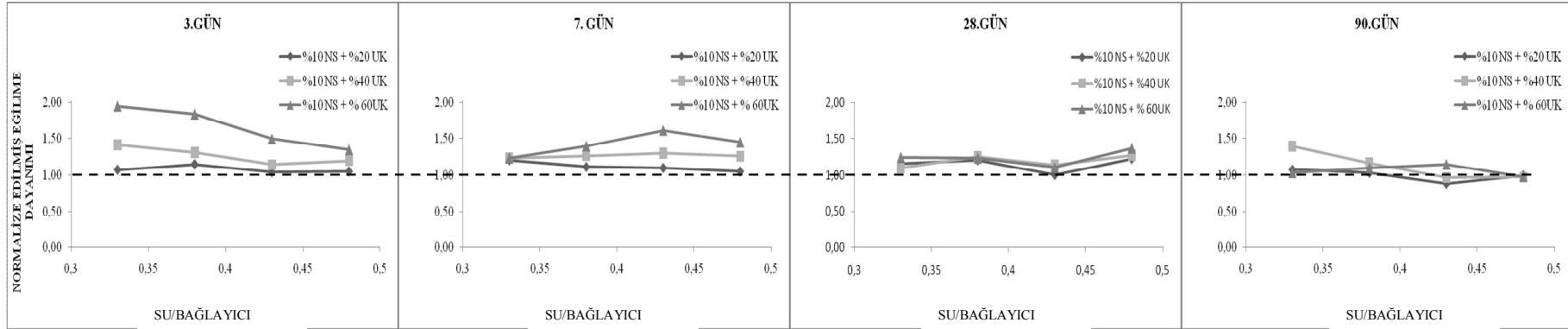
Kolloid silika içeren uçucu küllü numunelerin erken yaşlardaki dayanımını artırmasının bir sebebi olarak nm^2 ye 4,6 OH silarol grubu ihtiva eden bir yüzeye sahip olması söylenebilir. Silarol grubunun bu değeri, özgül yüzey alanının etkinliği üzerinde belirleyicidir. Bu değer kolloid silikanın sentez şekline göre değişmektedir. Ancak diğer minerallere göre daha fazla özgül yüzey alanına sahip olmasının nedeni tamamen hidrosillenmiş ve nm^2 ye 4,6 OH silarol grubu olmasıdır. Bu özelliği sayesinde serbest suyu ve Ca(OH)_2 bağlayıcılık özelliği diğer minerallere göre daha fazladır. Kolloid silikalı çimento harçlarında erken yaşlarda dayanım kayıplarının giderilmesi ortaya çıkan Ca(OH)_2 bağlayıcılığı ve hızlı bir şekilde C-S-H oluşumu ile oluşmaktadır.

Bu grafikler kolloid silika kullanım oranı dikkate alınarak değerlendirildiğinde, kolloid silika oranı arttıkça 90. gün normalize edilmiş dayanımlarda (1) değerinin altına düşüşlerin daha fazla olduğu görülmektedir.

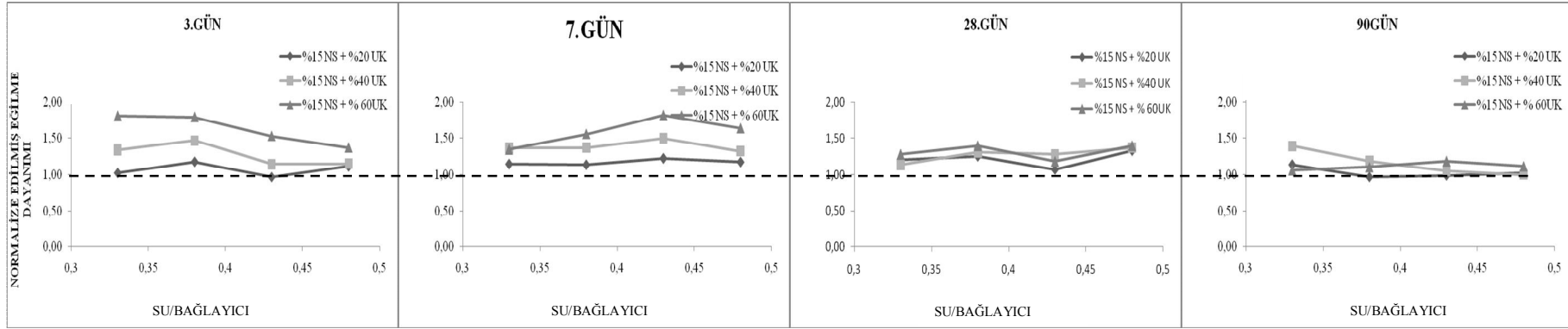
Bunun sebebi olarak Sarkar ve Skarp'ın bahsettiği gibi ultra incelikteki silika tanecikleri, erken dönemdeki jel oluşumu sırasında suyun büyük bölümünü tükettiği için, hızlı bir şekilde çimento hamurunun prizini almasına yol açmaktadır. Bu olayı da kolloid silikanın yüksek puzolanik aktivitesine bağlamaktadırlar. Ancak kolloid silikanın, çimento hamuruna kazandırmış olduğu yüksek erken dayanım, nihai dayanımda düşüşlere sebep olmaktadır [4]. Bu dayanım azalmasının sebebi olarak çok hızlı jel oluşumu sırasında ortaya çıkan boşluklu yapılar olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.13: %5 kolloid silika içeren numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımları karşılaştırması.



Şekil 5.14: %10 kolloid silika içeren numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımları karşılaştırması.

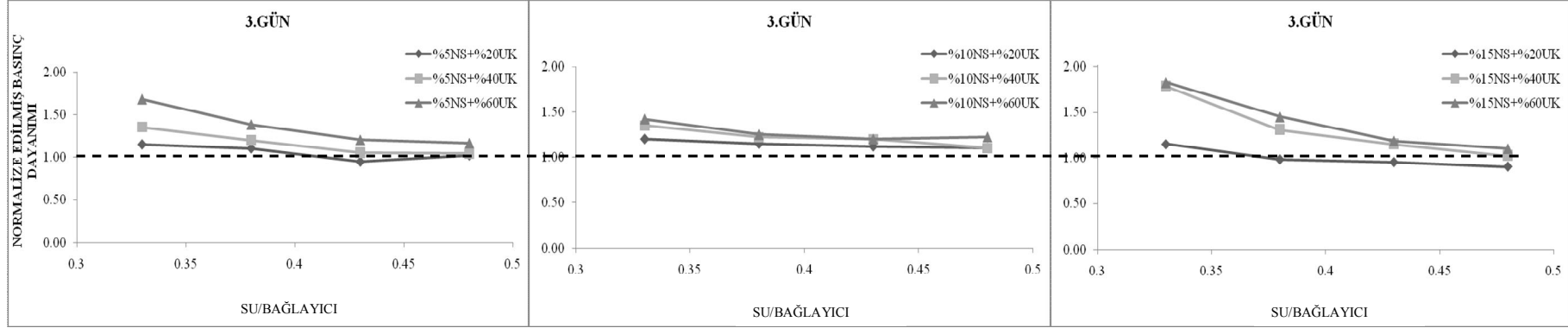


Şekil 5.15: %15 kolloid silika içeren numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımları karşılaştırması.

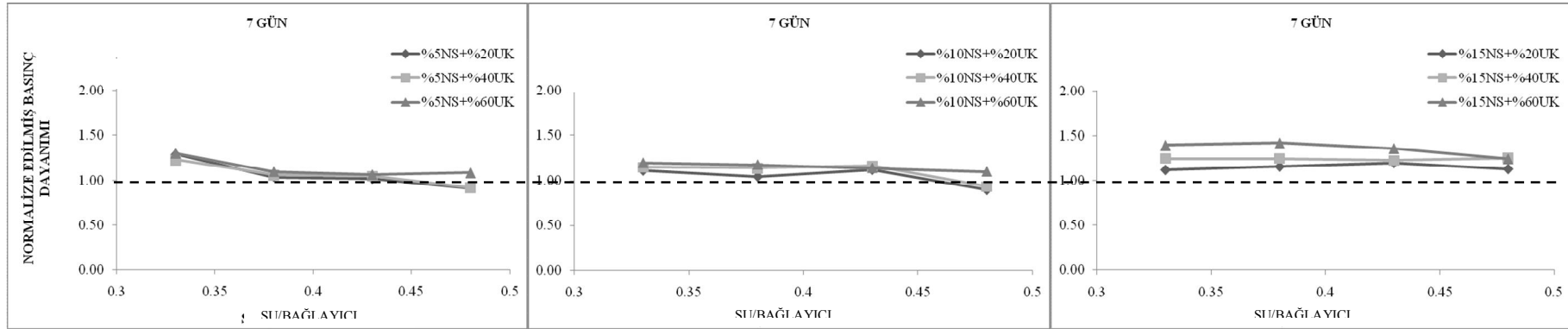
5.2.2 Basınç deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Basınç deneyi sonuçlarının değerlendirilmesinde; **Çizelge 4.5**, **Çizelge 4.6**, **Çizelge 4.7** ve **Çizelge 4.8**'te verilen ve kolloid silika içeren numunelerin mukavemetlerinin kontrol numunelerinin mukavemetlerine oranlanması ile elde edilen normalize edilmiş mukavemet değerlerinden faydalanılmıştır. Bunun için farklı oranda uçucu kül içeren numunelerin su/bağlayıcı oranı normalize edilirken, dayanım grafikleri kür sürelerine göre farklı oranda kolloid silika içeren numuneler için bir arada değerlendirilmiştir.

Şekil 5.16'da 3 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımları aynı oranlarda kolloid silika ve farklı oranlarda uçucu kül içeren karışımların normalize edilmiş dayanımlarının değişimi gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde kolloid silikanın tüm kullanım oranlarında %60 uçucu kül içeren harçların normalize edilmiş dayanımları üzerindeki etkinliğinin daha fazla olduğu görülmektedir. Eğilme mukavemeti değerlerine paralel olarak, normalize edilmiş basınç mukavemeti değerlerinde de, özellikle %15 kolloid silika içeren %60 uçucu küllü numunelerde neredeyse 2 katına varan mukavemet artışları olmuştur. Bilindiği üzere yüksek oranda uçucu kül içeren harçların ilk yaşlardaki basınç mukavemeti dayanımları düşüktür. Bunun en önemli sebebi, uçucu külün, çok erken yaşlarda yeterli pozolanik reaksiyonu gerçekleştirememesinden dolayı, kontrol numunelerinin dayanımlarının çok düşük değerlerde olması olarak gösterilebilir. Çalışmanın en önemli amacının da yüksek oranda uçucu kül kullanılan harçlarda ki erken yaşlarda meydana gelen dayanım düşüşlerinin kolloid silika kullanılarak giderilmesi olduğu daha önce açıklanmıştı. Kolloid silikanın pozolanik aktivitesinin çok yüksek olmasının yanında, çok ince yapısından kaynaklanan üstün filler etkisi de rol oynamaktadır. Uçucu külün pozolanik etkisinin yanında çimento taneciklerine göre daha ince tanecikli yapısı sayesinde çimento tanecikleri arası boşlukları doldurarak filler etkisi yapmaktadır. Uçucu külün bu özelliği daha önceden biline gelmiştir. Sentetik şekilde üretilen bu sayede tane boyutu büyüklüğü üretim şekline bağlı olarak ayarlanabilen kolloid silika, uçucu külden daha ince tanelere sahiptir (5-100 nm). Uçucu kül ve çimento tanecikleri arasındaki nanometre bazında oluşan boşlukları da kolloid silikanın küresel tanecikleri ile doldurarak mükemmel bir filler etkisi yaratmaktadır. Bununda basınç mukavemetine etkisinin olumlu yönde olduğu tartışma götürmez bir gerçektir.



Şekil 5.16: 3 günlük normalize edilmiş basınç dayanımları.

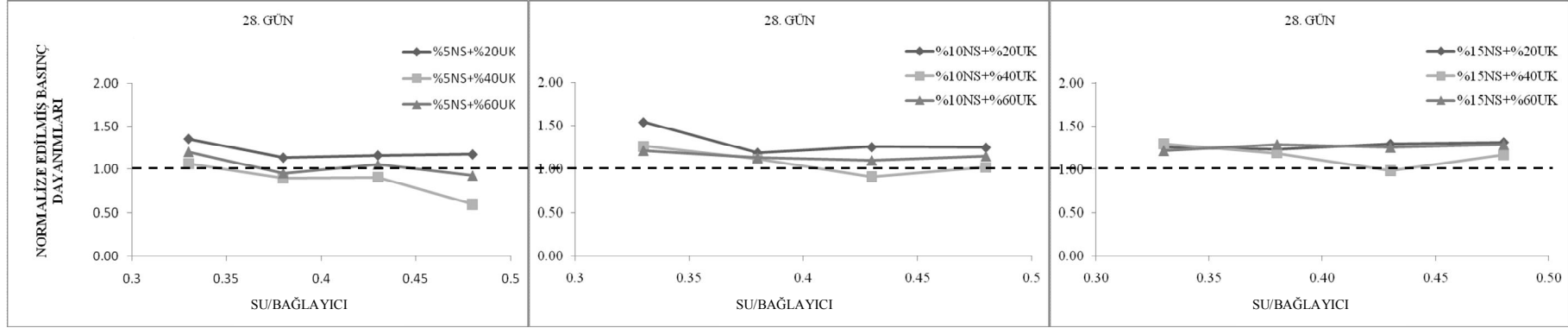


Şekil 5.17: 7 günlük normalize edilmiş basınç dayanımları.

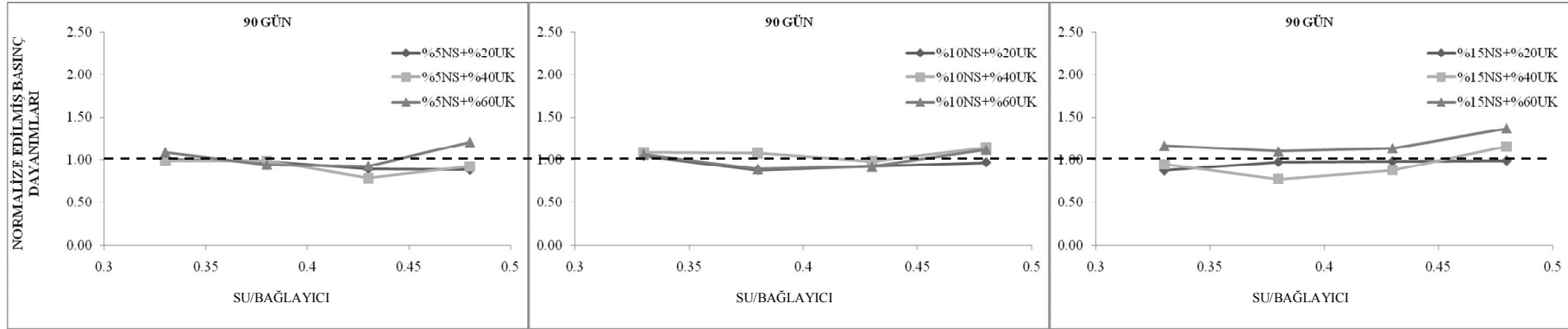
Şekil 5.17'de 7 günlük basınç deneyi sonuçlarının normlize edilmiş değerleri **Şekil 5.16**'da 3 günlük değerler ile aynı karakteristikleri göstermektedir. 7 günlük basınç dayanımı sonuçlarında kontrol numunelerinden yüksek eğilme mukavemetine sahip kolloid silikalı numuneler görülmektedir. Kolloid silika miktarı arttıkça normalize edilmiş basınç dayanımı değerlerinin arttığı görülmektedir. Aynı zamanda kolloid silika etkinliği uçucu kül miktarının artması ile artmaktadır, yani yüksek oranda yüksek oranda uçucu kül kullanımı durumunda kolloid silikanın 7. günde dayanım düşüşünü tolere eden etkisi daha fazla olmaktadır. Bu etkinlik 7. gün değerlerinde eğilme dayanımına nazaran daha az gerçekleşmiştir.

Şekil 5.18'de ki 28 günlük normalize edilmiş basınç dayanımlarının 3.gün ve 7. gündeki eğilme dayanımlarından daha düşük olduğu söylenebilir. Özellikle kolloid silika oranı %5 olan numunelerde normalize dayanım 1 değerine daha fazla yaklaştığı ve altında olduğu söylenebilir. 28.gündeki eğilme dayanımında kolloid silika miktarındaki artışın uçucu külün düşük olduğu durumlarda basınç mukavemetine olumlu katkısı olduğu söylenebilir. Kolloid silikalı numunelerin kontrol numuneleri ile kıyaslandığında basınç mukavemetindeki artış devam etmektedir. 28. gündeki basınç mukavemeti deneyi sonuçları **Şekil 5.16** ve **Şekil 5.17**'de gösterilen 3. ve 7. günlerdeki mukavemetlerle paralellik göstermektedir.

Şekil 5.19'da 3., 7., ve 28. günlük normalize basınç değerlerine nazaran 90. günde bir artış değil düşüş dahi yaşanmaktadır. %15 kolloid silika kullanılan numunelerin 1 değerinin altında olduğu yani kontrol numunelerin basınç mukavemetlerinin bile altında olduğu görülmektedir. Erken yaşlarda kazanılan mukavemet artışı geç yaşlarda yok olmakta olduğu söylenebilir. Bunun nedeni olarak Skarp ve Sarkar'ın yapmış olduğu çalışmalarda ultra incelikteki silika tanecikleri, erken dönemdeki jel oluşumu sırasında suyun büyük bölümünü tükettiği için, hızlı bir şekilde çimento hamurunun prizini almasına yol açmaktadır. Bu olayı da kolloid silikanın yüksek puzolanik aktivitesine bağlamaktadırlar. Ancak kolloid silikanın, çimento hamuruna kazandırmış olduğu yüksek erken dayanım, nihai dayanımda düşüşlere sebep olmaktadır [4]. Bu dayanım azalmasının sebebi olarak çok hızlı jel oluşumu sırasında ortaya çıkan boşluklu yapılar olarak gösterilmektedir. Diğer bir yandan Skarp ve Sarkar koloid silikanın yüksek puzolanik aktivitesinin neden olduğu bu dayanım düşüklüğünü kolloid silika miktarını düşürerek giderilebileceğini söylemişlerdir.



Şekil 5.18: 28 günlük normalize edilmiş basınç dayanımları.



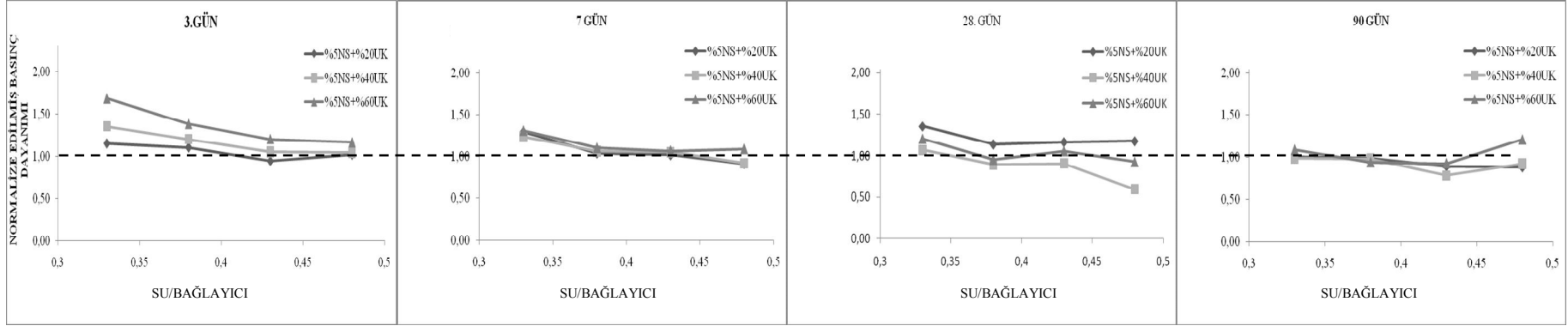
Şekil 5.19: 90 günlük normalize edilmiş basınç dayanımları.

Şekil 5.20, Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'de sırasıyla %5, %10, %15 oranında kolloid silika içeren harç numunelerinin normalize edilmiş basınç dayanımlarının zamana göre değişimleri verilmektedir. Yukarıda da bahsedildiği gibi her kolloid silika kullanım oranında numune yaşı ilerledikçe normalize edilmiş dayanım değerleri 1 değerine yaklaşmakta, hatta bu değer altına düşmektedir. Normalize edilmiş değer (1) seviyesinde olması kullanılan kolloid silikanın uçucu küllü harçlarda herhangi bir olumlu ya da olumsuz etkisinin olmadığını göstermektedir.

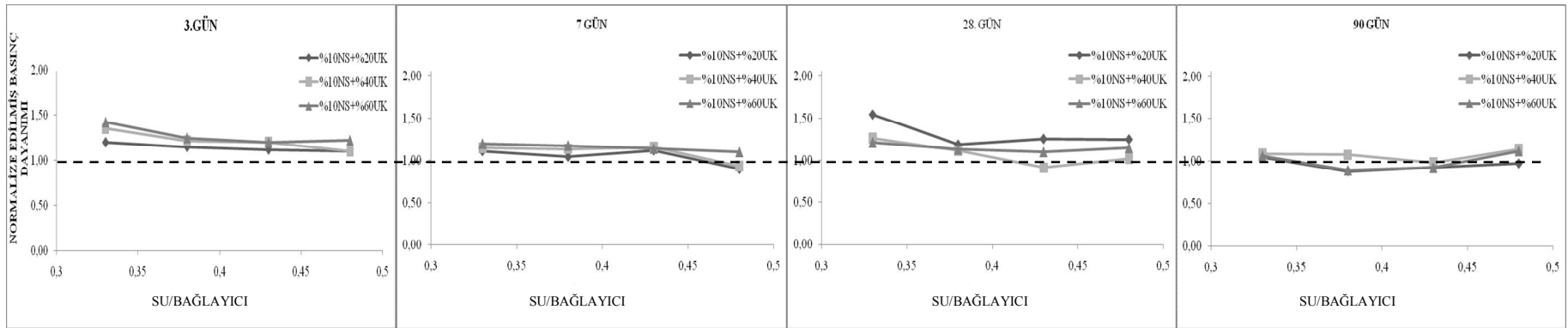
Kolloid silika içeren uçucu küllü numunelerin erken yaşlardaki basınç dayanımını artırmasının bir sebebi olarak nm^2 ye 4,6 OH silarol grubu ihtiva eden bir yüzeye sahip olması gösterilebilir. Silarol grubunun bu değeri, özgül yüzey alanının etkinliğinin belirleyici değeridir. Bu değer kolloid silikanın sentez şekline göre değişmektedir. Ancak diğer minerallere göre daha fazla özgül yüzey alanına sahip olmasının nedeni tamamen hidrosillenmiş ve nm^2 ye 4,6 OH silarol grubu olmasıdır. Bu özelliği sayesinde serbest suyu ve Ca(OH)_2 bağlayıcılık özelliği diğer minerallere göre daha fazladır. Kolloid silikalı çimento harçlarında erken yaşlarda dayanım kayıplarının giderilmesi ortaya çıkan Ca(OH)_2 bağlayıcılığı ve hızlı bir şekilde C-S-H oluşumu sebebi ile oluşmaktadır.

Bu grafikler kolloid silika kullanım oranı dikkate alınarak değerlendirildiğinde, kolloid silika oranı arttıkça 90 gün normalize edilmiş dayanımlarda (1) değerinin altına düşüşlerin daha fazla olduğu görülmektedir.

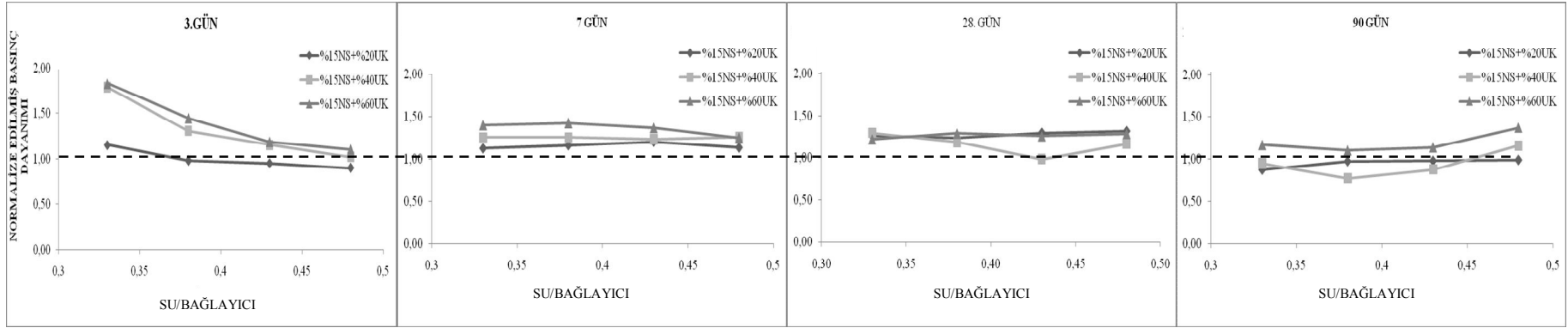
Bunun sebebi olarak Sarkar ve Skarp'ın bahsettiği gibi ultra incelikteki silika tanecikleri, erken dönemdeki jel oluşumu sırasında suyun büyük bölümünü tükettiği için, hızlı bir şekilde çimento hamurunun prizini almasına yol açmaktadır. Bu olayı da kolloid silikanın yüksek puzolanik aktivitesine bağlamaktadırlar. Ancak kolloid silikanın, çimento hamuruna kazandırmış olduğu yüksek erken dayanım, nihai dayanımda düşüşlere sebep olmaktadır [4]. Bu dayanım azalmasının sebebi olarak çok hızlı jel oluşumu sırasında ortaya çıkan boşluklu yapılar olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.20: %5 kolloid silika içeren numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük normalize edilmiş eğilme dayanımları karşılaştırması.



Şekil 5.21: %10 kolloid silika içeren numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük normalize edilmiş basınç dayanımları karşılaştırması.



Şekil 5.22: %15 kolloid silika içeren numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük normalize edilmiş basınç dayanımları karşılaştırması.

6. SONUÇLAR

6.1 Sonuçlar

Bu çalışmada uçucu küllü çimento harçlarında kolloid silikanın karışımın mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmada çimento ile ağırlıkça yer değiştiren uçucu küllü kontrol numuneleri üretilmiştir. Bir sonraki aşamada kolloid silikalı numuneler hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde taze harç deneyleri, 3 noktalı eğilme deneyleri ve basınç deneyleri yapılmıştır. Bu sonuçlar zamana, uçucu kül yerleştirme yüzdesine, kolloid silika yerleştirme yüzdesine ve su/bağlayıcı oranlarına göre irdelenmiştir. Çalışmadan elde edilen genel sonuçlar aşağıda sırayla verilmektedir.

1. Uçucu kül ve kolloid silika içeren taze çimento harçlarında kolloid silika oranı arttıkça süperakışkanlaştırıcı kullanımı artmaktadır. Bu durum kolloid silikanın karışım içerisindeki serbest suyu tüketerek su ihtiyacını artırdığını göstermektedir. Böylece işlenebilirliği sabit tutmak için süper akışkanlaştırıcı miktarını artırmak gerektiği ortaya çıkmıştır. Uçucu kül tanelerinin ince olması ve kolloid silika tanelerinin ise ultra incelikte olması çimento taneleri arasında ki boşluk hacminin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca kolloid silikanın özgül yüzey alanı sayesinde bu boşluklarda bulunan serbest suyu tüketmesi de bu boşluk hacminin azalmasına sebebiyet olmaktadır. Boşluk hacminin azalması çimento tanelerinin bir birlerine yaklaşmalarını ve aralarındaki sürtünmenin artışı söylenebilir. Bu nedendir ki kolloid silika içeren harçların su veya kimyasal katkı ihtiyacını artırdığı görülmüştür.

2. Yapılan eğilme ve basınç dayanımı deneylerinin sonuçlarına bakıldığında, harç karışımlarında kolloid silika kullanımının yüksek miktarda uçucu kül kullanımına olanak sağladığı görülmektedir. Yüksek oranda uçucu kül kullanımının erken yaşlarda dayanım düşüklüğüne sebep olduğu önceden beri bilinmektedir. Kolloid silikanın Ca(OH)_2 bağlayıcılık özelliği ve yüksek pozolanik aktivitesi sayesinde erken yaşlarda dayanım kaybını azaltmaktadır. Özellikle normalize edilmiş değerler dikkate alındığında, uçucu kül oranı fazla olan numunelerde erken yaşlardaki dayanım kazancının 2 katına kadar çıktığı görülmüştür.

3. Eğilme ve basınç deney sonuçlarının normalize edilmiş değerlerine göre gibi kolloid silikalı harçların 90. gündeki değerleri kontrol numuneleri değerlerine yaklaşımaktadır. Kolloid silika kullanımına bağlı erken yaşlarda elde edilen normalize dayanım artışı hızlı priz alma sonucu ortaya çıkan boşluklu yapılara bağlı olarak ileri yaşlarda sifıra inmekte hatta negatif değerlere bile düşebilmektedir.

4. Eğilme ve basınç deney sonuçlarından yola çıkarak su/bağlayıcı oranlarının kolloid silikanın etkinliğinde önemli rol oynamaktadır. Kolloid silika kullanılan uçucu küllü harçlarda düşük s/b oranında kolloid silikanın daha etkin olduğu ve dayanımların daha yüksek olmaktadır. Özellikle 0,33 s/b oranında en etkin seviyesine ulaşmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Ye Qing, Zhang Zenan, Kong Deyu, Chen Rongshen**, 2007. Infulence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume, *Construction and Building Materials* **21**, 539-545
- [2] **Pekmezci, B.**, 2006. Yüksek performanslı Çimentolu Ürünlerin Otojen Rötire Özellikleri, *Doktora Tezi*, İstanbul.
- [3] **Sobolev, K., Flores I., Hermosillo, R., Leticia, M., Martinez, T.**. Nano Materials and Nanotechnology for High Performance Cement Composites.
- [4] **Ottersted, J.E., Greenwood, P.**. Some Important, Fairly New Uses of Colloidal Silica/Silica Sol, Colloidal Silica Cement and Concrete, *Colloidal Silica Fundamentals and Applications*, pg.738-741.
- [5] **Colloparadi, M., Ogouman, U.J., Toji, R., Simonelli, F., Colleparadi, S.**. Combination of Silica Fume, Fly Ash and Amorphus Nanosilica in Superplasticized High Performance Concrete, *Enco Engineering Concrete*, Ponzaro Vereto (TV), Italy
- [6] **Kula, İ.**, 2000. Bor Endüstri Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [7] **Erdoğan, T.Y.**, 2003. Beton, *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.Yayını*, Ankara
- [8] **Erdoğan, E.**, 2006. Çimentoya Bor Katkısı, Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu İlavesiyle Özelliklerinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [9] **Postacıoğlu, B.**, 1986. Beton (Bağlayıcı maddeler), *Cilt I*, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul
- [10] **Ölmez, H.**, 1978. Soma Garp Linyitleri İşletmesi , Dekabaj Kütlesi İle Soma Termik Santrali Uçucu Külü'nün Endüstriyel Değerlendirilmesi, *E.Ü. Kimya Fakültesi Fen Doktora Tezi*, Trabzon.
- [11] **Özmal, F.**, 2005. Bor Endüstri Atıkları , Uçucu Kül, Taban Külü ve Alünit Mineralinin Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, *D.P.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Kütahya.

- [12] **Erdoğan, T.Y.**, 1995. Türkiye’de Üretilen Çimentolar , Özellikleri ve Kullanımları, *Çimento Sempozyumu, TMMOB İnşaat ve Kimya Mühendisleri Odası*, 67-80, Ankara.
- [13] **Gouda, G.R.**, 1983. Başarılı ve Karlı Bir Çimento Fabrikasının Altın Anahtarı, Hammadde Karışımı, *TÇMB Bülteni* , 19 (178) : 3-9.
- [14] **Baradan, B.**, 1994. Yapı Malzemesi-II Ders Notu, *Dokuz Eylül Üniversitesi Müh. Fak. Yayınları*, No: 207, İzmir.
- [15] **Zeybek, M.S.**, 2000. Borlu çimentoların Üretilmesi ve Nötron tutma Kapasitelerinin Araştırılması, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi.
- [16] **Brown, A.W.**, 1989. Çimento Teknolojisi, *Çimhol A.Ş. Yayınları*, No: 2, Volume : 1, Temmuz, Ankara.
- [17] **Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyaylı, M., Uyan, M.**, 1999. Meslek Liseleri İçin Her Yönüyle Beton, *Türkiye Hazır Beton Birliği*, Aralık 1999, İstanbul.
- [18] **Targan, Ş.**, 2001. Kula Cürufu ve Bentonit ile Termik Santral ve Kolemanit Konsantratör Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*.
- [19] **Tonak, T., Sipahi, F., Atay, Y.**, 2000. Al₂O₃ atıklarının Puzolanik Çimentoda Kullanımı, *TÇMB, Çimento ve Beton Dünyası* , 28: 38-48, Ankara.
- [20] **Özturan, T.**, 1991. Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral katkı Maddelerinin Etkinliği, *II. Ulusal beton Kongresi* , 280-290, İstanbul.
- [21] **Korkmaz, Y.**, 2002. Uçucu Kül İkameli Betonlarda Deniz Suyunun Etkisi, *Gazi Üniversitesi, F.B.E Yüksek Lisans Tezi*, Ankara.
- [22] **Onat, O.B.**, 1998. Türkiye’ de Üretilen Yüksek Fırın Cüruflarının Çimento Özelliklerine Etkisi, *İ.T.Ü. Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- [23] **Lilkov, V., Stoichlov, V.**, 1996. Pozzolit Aktif Mineral Katkısının Çimento Harçları ve Betonların Özellikleri Üzerine Etkisi, *Cement and Research*, Vol. 26, 7: 1-8.
- [24] **Saygılı, H.**, 2000. Puzolan İçeren Çimentolar, *Elazığ Çimento Dergisi Aralık sayısı*, 8:23-27.
- [25] **Ün, H.**, 2007. Yapay Puzolanlar, *Yapı Malzemesi Ders Notları*, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bölüm 3, s. 9-10.
- [26] **T.S. EN 450-1**, Ocak 2008. Uçucu Kül – Betonda Kullanılan-Bölüm 1: Tarif, Özellikler ve Uygunluk Kriteri” s.3, s.12.

- [27] **ASTM C 618**. 1985. Standart Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozolan for Use as Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, *ASTM*, Philadelphia.
- [28] **T.S. EN 197-1**, Mart 2002. Genel Çimentolar-Bileşim Özellikleri ve Uygunluk Kriteri, s.4, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [29] **T.S. EN 196-1**, Çimento Deney Metodları-Bölüm 1: Dayanım Tayini, s.11, s.14, s.15, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [30] **T.S. EN 206-1**, Nisan 2002. Beton – Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve uygunluk, s.5, s.6, s.13, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [31] **Ünal, O. ve Uygunoğlu, T.**, 2004. Soma Termik Santral Atığı Uçucu Külün İnşaat Sektöründe Değerlendirilmesi, *Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*, Zonguldak, s.312.
- [32] **Aruntaş, Y.H.**, 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Mühendisliğinde Kullanım Alanları, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 21, No.1, s.193-203.
- [33] **Taşdemir, M.A.**, 2002. ACE 2002 Sempozyumu, Jeoloji Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi.
- [34] **Özturan, T.**, Beton Üretiminde Uçucu Kül Kullanımının İrdelenmesi, *Boğaziçi Üniversitesi*, s.60, 37-57.
- [35] **Li, G.**, 2004 Properties of High Volume Fly Ash Concrete Incorporating Nano-SiO₂, *Cement and Concrete Research*, 34, 1043-1049.
- [36] **Url-1** <<http://www.antepcimento.com/urunler.asp>>, alındığı tarih 28.06.2006.
- [37] **Özyurt, N.**, 2000. Ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit malzemelerin mekanik davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [38] **Çamkerten, R.**, 2008. Polimer Reaktörlerinde Sıcaklık Kontrolü ile Elde Edilen Polistirenin Nanosilika ile Oluşturduğu Kompozit Kalitesinin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, Ankara
- [39] **D.F. Lin.**, 2008. Improvements of nano-SiO₂ on sludge/fly ash mortar, *waste management* 28 (2008), 1081-1087
- [40] **Older, I.**, 1998. Lea's chemistry of cement and concrete. 4th ed. London
- [41] **Neville, A.M.**, 1996. Properties of concrete. 4th ed., *ELBS with Addison Wesley Longman*
- [42] **Senff, L.**, 2009. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars, *Construction and Building Materials*, 2487-2491

EK A

Çizelge A.1: Kontrol numunelerinin malzeme miktarları.

	Su/Bağlayıcı Oranı	SU (%)	ÇİM. (%)	U.K. (%)	KUM (%)	V_{hamur}	$V_{\text{hamur}}/V_{\text{kum}}$
W33UK20	0,33	8,3	20,1	5,1	66,5	396,3	0,68
W33UK40	0,33	8,1	14,7	9,8	67,5	413,8	0,68
W33UK60	0,33	7,8	9,5	14,3	68,4	431,4	0,68

Çizelge A.2: Kolloid silika içeren uçucu küllü numunelerin malzeme miktarları

	Su/Bağlayıcı Oranı	SU (%)	ÇİM. (%)	U.K. (%)	KUM (%)	KS (%)	Vhamur	Vhamur/Vkum
W33UK20CS5	0,33	7,5	19,8	4,9	66,5	1,2	402,6	0,68
W33UK20CS10	0,33	6,8	19,5	4,9	66,4	2,4	408,8	0,68
W33UK20CS15	0,33	6,1	19,2	4,8	66,3	3,6	415,1	0,68
W33UK40CS5	0,33	7,3	14,4	9,6	67,4	1,2	420,1	0,68
W33UK40CS10	0,33	6,6	14,2	9,5	67,3	2,4	426,4	0,68
W33UK40CS15	0,33	5,9	14,0	9,3	67,3	3,5	432,7	0,68
W33UK60CS5	0,33	7,1	9,4	14,0	68,3	1,2	437,6	0,68
W33UK60CS10	0,33	6,4	9,2	13,8	68,2	2,3	443,9	0,68
W33UK60CS15	0,33	5,8	9,1	13,6	68,1	3,4	450,2	0,68
							0,0	
W38UK20CS5	0,38	8,3	18,7	4,7	67,2	1,2	431,8	0,68
W38UK20CS10	0,38	7,6	18,4	4,6	67,1	2,3	438,1	0,68
W38UK20CS15	0,38	6,9	18,1	4,5	67,1	3,4	444,4	0,68
W38UK40CS5	0,38	8,1	13,6	9,1	68,1	1,1	449,4	0,68
W38UK40CS10	0,38	7,4	13,4	8,9	68,0	2,2	455,6	0,68
W38UK40CS15	0,38	6,7	13,2	8,8	67,9	3,3	461,9	0,68
W38UK60CS5	0,38	7,9	8,8	13,3	68,9	1,1	466,9	0,68
W38UK60CS10	0,38	7,2	8,7	13,1	68,8	2,2	473,2	0,68
W38UK60CS15	0,38	6,6	8,6	12,9	68,7	3,2	479,4	0,68
							0,0	
W43UK20CS5	0,43	8,9	17,7	4,4	67,9	1,1	461,1	0,68
W43UK20CS10	0,43	8,3	17,4	4,3	67,8	2,2	467,3	0,68
W43UK20CS15	0,43	7,6	17,1	4,3	67,7	3,2	473,6	0,68
W43UK40CS5	0,43	8,7	12,9	8,6	68,7	1,1	478,6	0,68
W43UK40CS10	0,43	8,1	12,7	8,5	68,6	2,1	484,9	0,68
W43UK40CS15	0,43	7,4	12,5	8,4	68,5	3,1	491,2	0,68
W43UK60CS5	0,43	8,5	8,4	12,6	69,5	1,0	496,1	0,68
W43UK60CS10	0,43	7,9	8,3	12,4	69,4	2,1	502,4	0,68
W43UK60CS15	0,43	7,2	8,2	12,2	69,3	3,1	508,7	0,68
							0,0	
W48UK20CS5	0,48	9,5	16,7	4,2	68,5	1,0	490,3	0,68
W48UK20CS10	0,48	8,9	16,5	4,1	68,4	2,1	496,6	0,68
W48UK20CS15	0,48	8,2	16,3	4,1	68,3	3,1	502,9	0,68
W48UK40CS5	0,48	9,3	12,3	8,2	69,2	1,0	507,9	0,68
W48UK40CS10	0,48	8,7	12,1	8,1	69,2	2,0	514,1	0,68
W48UK40CS15	0,48	8,1	11,9	8,0	69,1	3,0	520,4	0,68
W48UK60CS5	0,48	9,1	8,0	12,0	70,0	1,0	525,4	0,68
W48UK60CS10	0,48	8,5	7,9	11,8	69,9	2,0	531,7	0,68
W48UK60CS15	0,48	7,9	7,8	11,7	69,8	2,9	537,9	0,68

EK-B**Çizelge B.1: Malzeme birim fiyatları**

Açıklama	Birim	Miktar	Birim Fiyat
T.C. Bayındırlık bakanlığı 16.005 poz nolu 1 m³ 350 dozlu Demirsiz Beton	m³	1	110 TL
Eka Chemicals Cembinder™ 8 Kolloid Silika	lt	1	1,5 €

Çizelge B.2: 1 m³ 350 dozlu beton içerisindeki kolloid silikanın fiyat analizi

Açıklama	Birim	Miktar
Toplam Bağlayıcı Miktarı	kg	350
Kolloid silika oranları	%	5
		10
		15
Kolloid silika miktarları	kg	17,5
		35
		52,5
Kolloid Silika Fiyatları	TL	55
		110
		165

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Doğan GÜNDOĞDU

Doğum Yeri ve Tarihi: Simav/ KÜTAHYA, 1981

Adres:

Lisans Üniversite: T.C. Celal Bayar Üniversitesi

Doğan GÜNDOĞDU İlköğretimini Tokat Namık Kemal İlkokulunda, orta ve lise öğretimini Tokat Anadolu Lisesinde yaptı. 1999 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Fakültesinde Fizik öğrenimine başladı. Fizik öğrenimini 2000 yılında bırakarak, 2001 de celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat mühendisliği Bölümünden 2006 yılında mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı kendisi halen Yapı Malzemesi Anabilim Dalında öğrenim görmektedir.