

**FARKLI İNCELİKLERDEKİ MİNERAL KATKILI
ÇİMENTOLARIN BAZI FİZİKSEL VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Duygu TEKİN

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd.Doç.Dr. İlker TEKİN**

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FARKLI İNCELİKLERDEKİ MİNERAL KATKILI ÇİMENTOLARIN BAZI
FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**Duygu TEKİN
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

BAYBURT

2014

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI İNCELİKLERDEKİ MİNERAL KATKILI ÇİMENTOLARIN BAZI FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Duygu TEKİN

Bayburt Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. İlker TEKİN

Bu çalışmada 63 ve 125 µm incelikte puzolanik özellikli, öğütülmüş Bayburt Taşı (BT) ile Yatağan Termik santral Taban külü (TK) CEM I tip çimentoda % 0, 10, 20 ve % 30 oranlarında ikame edilerek kullanılmıştır. Çalışmanın amacı farklı inceliklere sahip mineral katkıların, kompoze çimentoların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkilerini araştırmaktır. İlaveten üretilen kompoze çimentoların kimyasal katkı uyumları da çalışmada konu alınmıştır. Bu kapsamda farklı iki firmanın aynı tip akışkanlaştırıcıları, üretilen kompoze çimentolu hamur ve harçlarda denenmiş; fiziksel, mekanik ve reolojik etkilerinden bazıları incelenmiştir. Bu amaçla TS EN 196-3'e göre çimento hamurları üzerinde standart kıvam, priz başlangıcı- bitişi süreleri ve hacim genleşme deneyleri ile TS EN 196-1'e göre çimento harçları üzerinde basınç mukavemeti, ASTM C 230'a göre yayılma verileri elde edilmiştir. Mekanik mukavemetler için harçlar 28 gün standart kürde bekletildikten sonra 2, 7 ve 28 günlerde basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak, mineral katkıların dane boyutuna bağlı özgül yüzey alanındaki değişiklikler, harçların fiziksel, mekanik ve reolojik özelliklerinde önemli farklılıklar oluşturmaktadır. İlaveten farklı firmalara ait aynı yapıdaki kimyasal katkı harç ve hamur davranışlarında benzer ama farklı etkiler göstermiştir. Çimento hamurunda BT ve TK ikamesi arttıkça standart kıvam ve priz bitişi süreleri artmıştır. %10-20 oranlarında BT ve TK kullanılan katkıli çimentolar 28 gün kürleme süresi sonunda kıyaslanabilir sonuçlar vermişlerdir. Çimento yüzey alanının artması ile katkıli

Çimentoların basınç dayanımı artmıştır. Ayrıca Portland imentosunun mineral katkılarla yer değiştirmesi, imento hamurunun hacim genleşmesinde kayda değer bir değişiklik oluşturmamıştır.

Anahtar sözcükler: Çimento / harç / hamur / Bayburt taşı / Taban külü / kimyasal katkılar / incelik

ABSTRACT

MS Thesis

THE DETERMINATION OF SOME PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENTS WITH DIFFERENT FINENESS AND CONTAINING MINERAL ADDITIVES

Duygu TEKİN

Bayburt University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ilker TEKİN

In this study, pozzolanic featured grinded Bayburt Stone (BT) and Bottom ash of Yatağan Thermal Power Station (TK), with 63 and 125 μm fineness respectively are used to replace CEM-I type cement at 0%, 10%, 20%, and 30% by weight. The aim of this study is to investigate the effects of mineral additives with different fineness on physical and mechanical properties of composite cements. It is also investigated whether produced composite cements are compatible with chemical admixtures. In this context, same type plasticizers belonging to two different firm are tried on mortar and paste with produced compose cement, some of physical, mechanical and rheological effects are investigated. For this purpose, standard consistency, setting time and volume expansion tests are performed on the cement pastes according to TS EN 196-3. Also, flextural strength and compression strength tests are performed on the cement mortars according to TS EN 196-1, and flow table values are obtained for relevant samples according to ASTM C230. After mortar specimens for mechanical strengths are kept in curing pool 28 days, compressive and flexural strength tests are performed on the mortar specimens at the ages of 2, 7 and 28 days.

As a result, changes in specific surface area depending on the particle size distribution of mineral additives makes significant different on the physical, mechanical and rheological properties of cement mortars. Additionally, homogeneous chemical additives belonging to different companies show similar but different effects on

behaviors of cement mortar and paste. As long as replacement values of BT and TK increase in the cement paste, standard consistency and setting final time of cement pastes increase. The blended cements containing 10%-20% BT and 10%-20% TK has shown comparable results at the end of 28 days curing time. The compressive strength of blended cements increases for increasing values of surface area of the cement. Also, the replacement of Portland Cement by mineral additives has no remarkable effect on the expansion of cement paste.

Key words: cement / mortar / paste / Bayburt Stone / bottom ash / chemical additives / fineness

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocam Yrd. Doç. Dr. İlker TEKİN'e,

Particle size analizlerinin yapılmasında yardımını esirgemeyen, Yrd. Doç. Dr. İbrahim Hakkı Karataş ve eşine,

Tez yazım sürecimde beni hep motive eden, manevi desteğini üzerimde çok hissettiğim Arş. Gör. Şule Başar'a,

Birikim ve önerilerinden sürekli destek aldığım Arş. Gör. Türkay Kotan'a,

Çalışmamda malzeme desteği sağlayan ve yönlendirmelerde bulunan Grace ve Basf Yapı Kimyasalları A.Ş çalışanlarına,

Tez yazım aşamamda yönlendirmelerde bulunan Arş. Gör. Emin Uslu'ya,

Çalışmalarında malzeme ve kimyasal analiz desteği sağlayan, Erzurum Aşkale Çimento Fabrikası'na ve Bayburt Tekinler Hazır Beton'a,

Çalışmam sürecinde, yardımlarını esirgemeyen, lisans öğrencilerim, Ertan Kargı, Resul Keskin, Ali Osman Aydın, İsmail Soykan ve Oğuzhan Küçükvar'a,

Tez çalışmam süresince desteklerini hiç esirgemeyen değerli anneme, babama özellikle ablama çok teşekkür ederim.

Duygu TEKİN
Ağustos 2014

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	i
TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER LİSTESİ	iv
ÇİZELGELER LİSTESİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kaynak taraması	4
2. KURAMSAL TEMELLER	10
2.1. Çimento	10
2.1.1. Çimento çeşitleri.....	10
2.1.1.1. CEM I: Portland çimentosu	10
2.1.1.2. CEM II: Portland kompoze çimentosu	11
2.1.1.3. CEM III: Portland yüksek fırın cürüflü çimento	11
2.1.1.4. CEM IV: Pozolanik çimento	12
2.1.1.5. CEM V: Kompoze çimento	12
2.2. Çimento üretimi.....	12
2.2.1. Mineral katkıları	16
2.2.1.1. Volkanik tüfler (VT)	17
2.2.1.2. Taban külü (TK).....	18
2.3. Kimyasal katkıları.....	21
2.3.1. Akışkanlaştırıcılar.....	21
2.3.1.1. Normal (I. Nesil) akışkanlaştırıcılar	22
2.3.1.2. Süper (II. Nesil) akışkanlaştırıcılar.....	22
2.3.1.3. Hiper (III. Nesil) akışkanlaştırıcılar	24
3. MALZEME VE YÖNTEM	25
3.1. Malzemeler.....	25
3.1.1. Çimento	25
3.1.2. Mineral katkıları	26
3.1.2.1. Bayburt taşı (BT).....	26
3.1.2.2. Taban külü (TK).....	28
3.1.3. Akışkanlaştırıcılar.....	30
3.1.4. CEN kumu ve su.....	31
3.1.5. Diğer malzemeler	32
3.2. Yöntem	32
3.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması	34
3.2.1.1. Çimentonun standart kıvam, priz başlangıç-bitiş sürelerinin tayini ve hacim sabitliği deneyleri	35
3.2.1.2. Mekanik mukavemet deneyleri	39
3.2.1.3. Yayılma tablası deneyi	41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	43

4.1. Fiziksel özellikler	43
4.1.1. Kıvam tayini deney sonuçları.....	43
4.1.2. Priz başlangıcı ve priz sonu tayini deney sonuçları.....	46
4.1.3. Hacim genleşmesi deney sonuçları	57
4.2. Mekanik özellikler.....	61
4.2.1. Basınç dayanımı deney sonuçları	61
4.2.1.1. Basınç dayanımlarının istatistiksel analizleri.....	70
4.3. Reolojik özellikler	91
4.3.1. Yayılma tablası deney sonuçları.....	91
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	92
KAYNAKLAR	94
EK1	99
EK 2	101
ÖZGEÇMİŞ	104

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Çimento hamurunun ana bileşenlerinin dayanım artışı	15
Şekil 2.2. Hidratasyon aşamasında $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oluşumu	15
Şekil 2.3. Portland- puzolan etkileşimi	16
Şekil 2.4. Taban külü ve uçucu kül oluşum şeması	19
Şekil 2.5. Polinaftalin sülfonatın kimyasal yapısı.....	22
Şekil 2.6. Polimelamin sülfonatın kimyasal yapısı.....	23
Şekil 2.7. (a) Çimento-su süspansiyonunda topaklanmış çimento tanecikleri, (b) Çimento-su süspansiyonuna süperakışkanlaştırıcı ilavesi ile çimento tanecikleri.....	23
Şekil 3.1. BT'nin mineralojik analizi.....	27
Şekil 3.2. TK'nın öğütme öncesi elek analizi	29
Şekil 3.3. BT ve TK'nın tane boyut dağılımları	29
Şekil 3.4. Le Chatelier halkası	38
Şekil 4.1. 63 µm incelikli BT ikameli, D-R tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri.....	47
Şekil 4.2. 125 µm incelikli BT ikameli, D-R tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri	48
Şekil 4.3. 63 µm incelikli TK ikameli, D-R tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri	49
Şekil 4.4. 125 µm incelikli TK ikameli, D-R tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri	50
Şekil 4.5. 63 ve 125 µm incelikli BT ikameli, D tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri	51
Şekil 4.6. 63 µm ve 125 µm incelikli BT ikameli, R tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri.....	52
Şekil 4.7. 63 ve 125 µm incelikli TK ikameli, D tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri	53
Şekil 4.8. 63 ve 125 µm incelikli TK ikameli R tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri	53
Şekil 4.9. 63 µm incelikte BT-TK ikameli, D tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri	54
Şekil 4.10. 63 µm incelikte BT-TK ikameli R tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş değerleri.....	55
Şekil 4.11. 125 µm incelikte BT-TK ikameli D tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş değerleri.....	56
Şekil 4.12. 125 µm incelikte BT-TK ikameli R tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş değerleri.....	56
Şekil 4.13. 63 µm incelikte BT ikameli D-R tipi kimyasal katkılı çimentoların basınç dayanımı sonuçları	62

Şekil 4.14. 125 µm incelikte BT ikameli D-R tipi kimyasal katkılı çimentoların basınç dayanımı sonuçları	63
Şekil 4.15. 63 µm incelikte TK ikameli D-R tipi kimyasal katkılı çimentoların basınç dayanımı sonuçları	64
Şekil 4.16. 125 µm incelikte TK ikameli D-R tipi kimyasal katkılı çimentoların basınç dayanımı sonuçları	65
Şekil 4.17. 63-125 µm incelikte BT ikameli D tipi kimyasal katkılı çimentoların basınç dayanımı sonuçları	66
Şekil 4.18. 63-125 µm incelikte BT ikameli R tipi kimyasal katkılı çimentoların basınç dayanımı sonuçları	67
Şekil 4.19. 63-125 µm incelikte TK ikameli D tipi kimyasal katkılı çimentoların basınç dayanımı sonuçları	68
Şekil 4.20. 63-125 µm incelikte TK ikameli R tipi kimyasal katkılı çimentoların basınç dayanımı sonuçları	69
Şekil 4.21. 63µm incelikli tüm numunelerin 2 günlük basınç dayanımlarının D ve R tip akışkanlaştırıcılara göre karşılaştırılması	76
Şekil 4.22. 125µm incelikli tüm numunelerin 2 günlük basınç dayanımlarının D ve R tip akışkanlaştırıcılara göre karşılaştırılması	77
Şekil 4.23. 63 µm incelikli tüm numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarının D ve R tip akışkanlaştırıcılara göre karşılaştırılması	84
Şekil 4.24. 125µm incelikli tüm numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarının D ve R tip akışkanlaştırıcılara göre karşılaştırılması	85
Şekil 4.25. 63µm incelikli tüm numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının D ve R tip akışkanlaştırıcılara göre karşılaştırılması	89
Şekil 4.26. 125µm incelikli tüm numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının D ve R tip akışkanlaştırıcılara göre karşılaştırılması	90

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve miktarları.....	14
Çizelge 2.2. % 1 sülfür içeren 100 kg kömürün termik santrallerde yakılması ile oluşan atıklar.....	20
Çizelge 3.1. PKÇ 42.5 R çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	25
Çizelge 3.2. Bayburt beyaz taşının kimyasal özellikleri.....	26
Çizelge 3.3. Bayburt beyaz taşının fiziksel ve mekanik özellikleri.....	27
Çizelge 3.4. BT ve TK'nın özgül ağırlık ve özgül yüzey deney sonuçları	28
Çizelge 3.5. Taban külünün kimyasal özellikleri.....	28
Çizelge 3.6. D tipi süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri	30
Çizelge 3.7. R tipi süperakışkanlaştırıcının özellikleri	31
Çizelge 3.8. CEN Referans Kumu'nun tane büyüklüğü dağılımı.....	31
Çizelge 3.9. Katkılı çimentoların özgül ağırlık ve özgül yüzey verileri.....	33
Çizelge 3.10. Çimentoların mineral katkı oranına ve akışkanlaştırıcı tipine göre kodlanması	34
Çizelge 3.11. Standart kıvam ve priz süresi için malzeme miktarları	36
Çizelge 3.12. Harç numunelerinin malzeme karışım miktarları	41
Çizelge 4.1. 63 ve 125 µm incelikli TK ve BT katkılı çimentolar ile kontrol çimentoların standart kıvam tayini sonuçları	43
Çizelge 4.2. Priz başlangıç ve bitiş sonuçları	47
Çizelge 4.3. Farklı incelik ve katkı tipiyle oluşturulan mineral katkılı (BT-TK) çimentoların hacim genleşmesi sonuçları	58
Çizelge 4.4. Basınç dayanımı deney sonuçları	61
Çizelge 4.5. 2 günlük basınç dayanımına ait açıklayıcı istatistikler	71
Çizelge 4.6. 2 günlük basınç dayanımına göre çoklu varyans çözümleme sonuçları.....	73
Çizelge 4.7. Mineral katkının ikame yüzdesi üzerindeki etkisi	74
Çizelge 4.8. Mineral katkının incelik değeri üzerindeki etkisi	74
Çizelge 4.9. İkame oranının incelik üzerindeki etkisi.....	74
Çizelge 4.10. Mineral katkının akışkan türü üzerindeki etkisi	75
Çizelge 4.11. İkame oranının akışkan türü üzerindeki etkisi.....	75
Çizelge 4.12. İncelik değerinin akışkan türü üzerindeki etkisi.....	75
Çizelge 4.13. 7 günlük basınç dayanımına ait açıklayıcı istatistikler	758
Çizelge 4.14. 7 günlük basınç dayanımına göre çoklu varyans çözümleme sonuçları...80	
Çizelge 4.15. Mineral katkının ikame yüzdesi üzerindeki etkisi	81
Çizelge 4.16. Mineral katkının incelik değeri üzerindeki etkisi	81
Çizelge 4.17. İkame oranının incelik değeri üzerindeki etkisi.....	81
Çizelge 4.18. Mineral katkının akışkan türü üzerindeki etkisi	82
Çizelge 4.19. İkame oranının akışkan türü üzerindeki etkisi.....	82
Çizelge 4.20. İncelik değerinin akışkan türü üzerindeki etkisi.....	82
Çizelge 4.21. 28 günlük basınç dayanımına ait açıklayıcı istatistikler	826
Çizelge 4.22. Basınç dayanımına göre çoklu varyans çözümleme sonuçları	88
Çizelge 4.23. Kimyasal katkılı ve katkısız harçlarda yayılma deneyi sonuçları	91

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler Açıklama

g	: gram
m	: metre
MPa	: Mega Paskal
µm	: Mikrometre
Hz	: Frekans Hertz

Kısaltmalar Açıklama

ASTM	:American Society for Testing and Materials (Amerikan Standardı)
TS	: Türk standardı
PC	: Portland Çimentosu
CH	: Kalsiyum Hidroksit
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
C ₃ A	: Trikalsiyum Alüminat
C ₃ S	: Trikalsiyum Silikat
C ₂ S	: Dikalsiyum Silikat
C ₄ AF	: Tetrakalsiyum Alümino Ferrit
D	: D Tip Kimyasal Katkı
NP	: Doğal puzolan
R	: R Tip Kimyasal Katkı
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
s/ç	: Su/çimento oranı
s/b	: Su/bağlayıcı oranı
η	: Viskozite

1. GİRİŞ

Çimento endüstrisi, toplam CO₂ emisyonunun % 5'ini üretmektedir. Çevre bilincinin her geçen gün artması ve küresel ısınma tehlikesinin de ortaya çıkması sebebiyle çimento üretiminde alternatif malzemelerin kullanımı gündeme gelmiştir. Böylece hem çevresel hem de ekonomik kazançlar elde etmek amacıyla mineral katkı kullanarak, klinkeri belli oranlarda azaltmak suretiyle “katkılı (kompoze) çimento” üretimine başlanmıştır.

Katkılı portland çimentolarının hızlı gelişiminin temel sebeplerinden birisi maliyet tasarrufudur; yani ürün maliyetindeki azalıştır. Asya ve Avrupa'daki birçok ülkede katkılı çimento kullanımındaki hızlı artışın bir diğer nedeni ise, klinker potansiyelini koruma isteği ve enerji tasarrufunun sağlanabilmesidir. İlaveten katkılı çimento performansının Portland çimentosunun performansından bazı açılardan daha iyi olması bu artışı hızlandırmaktadır. Son yıllarda Avrupa ve Asya'da katkılı Portland-kalker çimentosu, cürufu çimento ve puzolanlı çimentoların üretimi Portland çimentosu üretimini geçmiştir (Mehta and Monteiro 2006).

Çimento üretiminde kullanılan mineral katkılar üretim endüstrinin yan ürünlerindendir. Örneğin termik santral atıkları olan uçucu kül, taban külü; demir-çelik fabrikası atığı olan granüle edilmiş yüksek fırın cürufu ya da doğal malzemeler olarak bilinen volkanik tüfler, diatom toprağı bunlardan bazılarıdır. Bu malzemeler; puzolanik ve/veya hidrolik özelliklere ya da her iki özelliğe birden sahip mineral katkılardır (Erdoğan 1997). Bu katkılarının kullanımı taze ve sertleşmiş haldeki betonun/ harcın performansını değiştirir (Detwiler et al. 1996).

Türkiye çimento üretiminde mineral katkı olarak bilinen volkanik tuf açısından, zengin rezervlere sahiptir. Volkanik tüfler, puzolanik özelliğe sahip volkanik kökenli kayalardandır. Puzolanlar ise; kendi başlarına bağlayıcılık özelliğine sahip değildir, fakat ince öğütüldüklerinde ve nemli bir ortamda kireç ile karşılaştıklarında bağlayıcılık

özellik gösterirler. Portland klinkerinden elde edilen çimentoya mineral katkı ikame edilmesiyle üretilen puzolanlı çimentoların bazı avantaj ve dezavantajları şunlardır (Gürü ve Yalçın 2006):

- Birim ağırlıkları düşük olduğundan dolayı kolayca ince bir şekilde öğütülebilme yeteneklerine sahiptirler dolayısıyla klinkere ya da çimentoya ilave edildiklerinde mikro boşluklara kolayca yerleşebilirler ve bu sayede harcın/betonun daha dayanıklı olmasını sağlarlar.
- Puzolanik özelliğe sahip olmalarından dolayı nemli ortamda çimento hidratasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran C-S-H minerallerinin oluşumunu sağlarlar.
- Puzolanın, kalsiyum hidroksit ile kimyasal reaksiyonun yavaş olması hidratasyon ısısının azalmasına neden olur bu da rötre çatlaklarının oluşumunu engeller.
- Kalsiyum hidroksit oluşumunu azalttığından dolayı, asidik ortamda dayanıklılığı artırır.
- Reaksiyon sırasında ortaya çıkan kalsiyum-silika-hidratlarda CaO/SiO_2 oranının Portland çimentosuna göre daha düşük olmasından dolayı alkali-silika reaksiyonunu azaltmaktadır.
- Hacim genişlemesine neden olan CaO , MgO ve SO_3 gibi zararlı maddelerle tepkimeye girerek, bunların çimento hamuru içerisindeki oranlarını düşürürler (Shannag 2000; Canpolat vd. 2004).
- Puzolanların içerdikleri reaktif silis ile çimento hidratasyonu ile açığa çıkan serbest kireç arasında kimyasal reaksiyon gerçekleşerek kalsiyum silikat hidratları oluştururlar. Oldukça yavaş seyreden bu reaksiyon sonucu puzolanik etkiyle mukavemet kazanma olayı uzun sürede gerçekleşir.
- Portland çimentosu hamuru ile kıyaslandığında, puzolanlı çimento hamurlarında (çimentonun toplam özgül yüzeylerini arttırdıkları için) geçirgenlik ve su emme başlangıçta daha fazladır.

Mineral katkılardan, endüstriyel atıkların oluşturdukları malzemeler yapay puzolan sınıfında yer alırlar. Örneğin elektrik enerjisi üretimi için kurulan termik santraller, enerji üretimi esnasında uçucu kül, taban külü, kazan altı cürufu gibi atıklar oluşturur.

Uçucu kül 1930'lu yıllardan beri katkılı çimento üretiminde kullanılmaktadır. Taban külü ise, çimentoda ya da beton için mineral katkı olarak pratikte kullanılmamasına rağmen bazı özelliklerinden dolayı puzolanik özellik gösterebilmektedir. Bunlar;

- Yüksek oranda yanmamış karbon içeriğine,
- İri boyuttaki partiküllere
- Gözenekli yüzeye sahip olmasıdır (Kaya 2010) .

Özgül yüzey alanı arttırıldığında, taban külünün puzolanik özelliklerinde de artış meydana gelmektedir. Taban külü, uçucu küle benzer kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip olduğundan, çimentoda nasıl kullanılacağına dair çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Ancak taban külünün kullanılması konusunda TS EN 450 ve ASTM 458 kılavuz olarak kullanılabilir (Kaya 2010).

Beton katkı maddeleri mineral katkılar dışında organik ve inorganik kimyasal maddelerdir. Bunlar betonun sahip olduğu özellikleri; belirli ölçüde uyumlu yönde değiştirmek amacıyla, beton üretilirken veya üretildikten sonra, karışım suyu ile birlikte kullanıldığında taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini geliştirirler. Bu sebeple kullanım alanları ve çeşitleri oldukça geniştir (TS EN 934-2). Kimyasal katkı kullanımıyla çimento ve betonda şu davranışlar gerçekleşebilmektedir (Ramachandran1995);

- Priz sürelerinin düzenlenmesi (arttırmak ya da azaltmak),
- Su oranını değiştirmeden betonun/harcın işlenebilirliğinin arttırılması,
- Taze betonun birtakım özelliklerini terleme, ayırıştırma olmaksızın iyileştirilmesi,
- Hidratasyon ısısının düşürülmesi.

Bu çalışmada volkanik tüf ve taban külü, iki farklı incelik boyutunda öğütüldükten sonra, çimento hamurunun fiziksel; çimento harcının mekanik ve reolojik özellikleri incelenmiştir. İlaveten farklı firmaların kimyasal katkılarıyla üretilen çimentoların etkileşiminin araştırılması da amaçlanmıştır.

Bu amaçla yapılan çalışmada 63 ve 125 μm olmak üzere iki farklı dane boyutuna sahip toplam 24 adet mineral katkılı çimento üretilmiş ve bu çimentolar üzerinde fiziksel, mekanik ve reolojik özellikler incelenmiştir.

1.1. Kaynak taraması

Duda (1977) tarafından yapılan çalışmada; Portland çimentosunun dayanım kazanmasındaki en önemli faktörlerden birisinin çimento inceliği olduğu söylenmiş, 3 μm -30 μm inceliğin çimentonun dayanım mekanizmasını etkilediği, 3 μm altındaki inceliklerde erken dayanım kazanıldığı ve hidrasyon reaksiyonlarının ilk gün olduğu, partiküllerin 3 μm -30 μm arasında olmasıyla yaklaşık % 40-50 ortalama dayanım artışına sahip olunabileceğini belirtilmiştir (Delibaş 2012).

Kanazu ve diğerlerinin (1998) yapmış olduğu çalışmada; uçucu küllerin (UK) beton içerisinde kullanımı araştırılmış ve UK ile hazırlanmış harcın (yanmamış karbon içeriği 0,4-18 % arasında kullanılmıştır) akışkanlığının, yanmamış karbon içeriği artışına bağlı olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak yüksek oranda yanmamış karbon içeriğinin su tutma özelliği göstermesinin akışkanlığı etkileyebileceği belirtilmiştir.

Yang ve diğerlerinin (1998) yapmış olduğu çalışmada; çimento süspansiyonlarının parçacıklar arası potansiyelleri ve çökme davranışı incelenmiş ve su oranının çimentolarda kimyasal yapı, özgül yüzey ve porozite gibi değerlere bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

Hopkins ve Oates'in (1998) yapmış olduğu çalışmada, taban külü (TK) boyutunun 45 μm 'nin altına değin azaltılmasıyla, çimentonun özelliklerini arttırabileceği aynı zamanda parçacık boyutunun sınır limitinin 1-2 μm 'den daha az olmaması gerektiği aksi taktirde yüksek öğütme maliyetinin söz konusu olabileceği söylenmiştir.

Cherief ve diğerlerinin (1999) Brezilya taban külü üzerinde yapmış oldukları çalışmada, şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- % 25 TK ikameli harç çubukları hazırlanmış ve 7, 14, 28 ve 90 gün sonunda, dayanımın Avrupa standardı EN 450'ye göre uygunluğuna bakılmıştır. TK dayanım etki indeksinin 28 günde 0.88, 90 günde de 0.97'e ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu değerlerinde EN 450 de belirlenen değerlerden (28 günlük 0,75 ve 90 günlük 0,85) daha yüksek çıktığı görülmüştür. Çalışma sonunda TK'nın beton içinde kullanımının uygun olabileceği belirtilmiştir.
- TK'nın kireçle puzolanik aktivitesinin 14. güne kadar çok yavaş geliştiği, aktivitenin 28. günde başladığı ve sonraki günlerde hızlandığı, 90. günde ise %60 Ca(OH)_2 tüketiminin olduğu gözlemlenmiştir.
- Uygun öğütme işlemiyle puzolanik aktivitenin geliştiği, 28. günde TK'nın dayanım indeksinin % 27 arttığı belirtilmiştir.

Erdoğdu ve diğerlerinin (1999) yapmış olduğu çalışmada; katkılı çimento felsefesinin, belli bir miktar klinkerin, mineral katkılarla yer değiştirmesi olduğu ve böylece katkılı çimentolardan başlangıç ve son dayanımda, işlenebilirlik özelliklerinin artırılmasında veya basitçe dolgu malzemesi olarak kullanımından, yararlanılabileceği belirtilmiştir.

Hossain'in (2003) yapmış olduğu çalışmada; Papua Yeni Gine'de bulunan Tavurvur adıyla bilinen volkanik kökenli bir dağın, volkanik tuf tozu ve volkanik külü çimentoya ikame edildikten sonra üretilen çimentoların bazı özellikleri incelenmiştir. Çimento ağırlığınca, % 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 35 ve % 50 oranlarında ikame edilmiştir. Çalışmada volkanik kül ve tuf tozunun çimento hamur ve harcında kıvam, priz, basınç dayanımına etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, volkanik tuf ve tuf tozunun priz süresini uzattığı, 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarını düşürdüğü, ikame oranı arttıkça da kıvamın düştüğü gözlemlenmiştir. Aynı zamanda % 20 ikame oranlarının hidrasyon ısısını düşürdüğü görülmüştür.

Targan ve diğerleri (2003) CEM I tip çimentoda, farklı oranlarda doğal puzolan (NP), UK, TK ve kolemanit atığının (KA) ikamesinin etkileri üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada CEM I'e sabit oranda %10 TK, %10 UK, %4 KA ile %5'ten %30'a kadar NP ikame edilerek numuneler hazırlanmıştır. CEM I'e %5'ten %20'ye kadar NP'nin

ikame edilmesiyle oluşturulan hamurlarda priz başlangıcı süresinin kontrol numunesine göre uzadığı, artan ikame oranına bağlı olarak priz bitiş süresinin ise kısaldığı belirlenmiştir. (%5-30 NP)+(%10 TK) ve (%5-30 NP)+(%10 UK) ile oluşturulan numunelerde NP oranının artışına bağlı olarak priz bitiş süresinin kısaldığı, (%5-30 NP)+(%4 KA) ile oluşturulan numunelerde ise NP oranının artışına bağlı olarak priz başlangıcı ve bitiş süresinde kontrol numunesine göre uzamanın daha büyük olduğu görülmüştür. %15'e kadar NP ilavesiyle oluşturulan numunelerin 28 günlük basınç dayanımının kontrol numuneyle karşılaştırıldığında daha fazla artış değerine ulaştığı belirlenmiştir. NP+UK ve NP+TK numunelerinin erken basınç dayanımları düşük olmasına rağmen, 90 gün beklenildiğinde kademeli bir artışın söz konusu olabileceği belirlenmiştir.

Pan ve diğerlerinin (2003) yapmış olduğu çalışmada; doğal puzolanların ince öğütülmeleriyle özgül yüzey alanlarının arttırıldığı, artan toplam yüzey alanının su ihtiyacında artış oluşturabileceği; aynı zamanda ince taneciklerin küçük boşluklara girmesiyle çimentoda durabiliteyi arttırabileceği belirtilmiştir.

Lee ve diğerlerinin (2003) yapmış olduğu çalışmada; uçucu kül+çimentolu sistemlerde tane boyut dağılımının çimento hamurunun akışkanlığı üzerine etkisi araştırılmıştır. Japonya da bulunan kömür yakıtlı enerji santralinden alınan uçucu küller deney için kullanılmış, F sınıfı uçucu küller, yanma koşulları ve kömür tipi değiştirilerek 3 farklı siloda toplanmıştır.

A serisinde, aynı tip kömürün farklı sıcaklıklarda yakılmasıyla (300MW-600MW), uçucu kül elde edilmiş.

B serisinde, aynı yanma sıcaklığında (600MW), farklı tip kömür kullanılarak uçucu kül elde edilmiştir. Daha sonra uçucu küllerin kimyasal özellikleri (bileşenleri, yanmamış karbon içeriği, kızdırma kaybı) ve fiziksel özellikleri (özgül yüzey alanı, parçacık boyut dağılımı) belirlenmiştir.

3,14µm'den 28,10µm boyut dağılımına sahip küllerin, hamurun akışkanlığına etkisi olarak şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Rosin-Rammler modeli, uçucu kül-çimentolu sistemlerin boyut dağılımı için gelişim fonksiyonu olarak seçilmiş ve n değeri NLSF metodu ile bulunmuştur. Akışkanlık = $1 / \eta$ ($S^{-1} \cdot Pa^{-1}$) ile ifade edilirse, Rosin-Rammler modelinin n değeri ile akışkanlık ters bir orantıya sahiptir. 1,009 ile en düşük n değerine sahip olan B serisindeki uçucu külün en yüksek akışkanlığa sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- Akışkanlığı az da olsa değiştiren diğer etmenlerin, parçacık şekli, yüzey pürüzlülüğü olabileceği belirtilmiştir.

Jaturapitakkul ve Cheerarot (2003) çalışmalarında; Tayland'ın Mae Moh elektrik santralinden temin ettikleri taban külünü araştırmışlardır ve şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Taban külüyle hazırlanmış harcın, standart çimento ve öğütülmüş taban külüyle hazırlanan harçtan daha fazla su ihtiyacı gerektirdiğini söylemişlerdir. Bunun nedeni olarakta TK'nın poroz ve yuvarlak yapısı gösterilmiştir. Çalışmada ikame oranı arttıkça su ihtiyacının da arttığı, öğütülmüş taban külü harcının öğütülmemiş taban külünden ve çimento harcından daha az su ihtiyacına sahip olduğu belirtilmiştir.
- Ayrıca öğütülmüş TK'nın, kıvamı önemli ölçüde arttırmadığı, çimento yerine %20'ye kadar granüle TK ilavesinin kıvamı çok az da olsa geliştirdiği gözlemlenmiş, öğütülmemiş TK ikameli harçların kıvamında artış olduğu görülmüştür.
- İlaveten öğütülmüş ve öğütülmemiş TK ikameli çimento hamurunun priz başlangıcının, katkısız çimento hamuruna göre 9-23 dakika uzadığı, priz sonu süresinin öğütülmemiş taban külü ikameli hamurlarda, katkısız çimento hamuruna göre 15-30 dakika uzadığı belirlenmiştir.
- %10, %20, %30 oranında çimento yerine ikame edilen öğütülmüş TK ile hazırlanmış harç numunelerinin 28. günden itibaren basınç dayanımlarının Portland çimentosunun dayanımından daha yüksek çıktığı görülmüş, ancak orjinal TK ile aynı oranda hazırlanan ikameli çimentoların dayanım değerlerinin EN 197-1 standardındaki min değerden daha düşük çıktığı belirtilmiştir.
- Basınç dayanımı deney sonucunda öğütülmüş TK'nın, iyi bir puzolanik malzeme olarak kullanılabileceği, öğütülmemiş TK'nın ise puzolanik malzeme olarak

kullanılabilmesi için 325 nolu elek üzerinde kalan miktarının %5'ten az olması gerektiği belirtilmiştir.

Yetgin ve Çavdar (2005) tarafından yapılan çalışmada; doğal puzolan (NP) katkı oranının çimentonun dayanım, işlenebilirlik, katılaşma ve hacim genleşmesi özelliklerine etkisi araştırılmış ve şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Trasin çimentonun erken dayanımının CEM I'e göre daha düşük olduğu fakat ilerleyen yaşlarda bu farkın giderek azaldığı,
- NP oranı ilavesiyle birlikte su ihtiyacının arttığı,
- Çimento hamurunun hacim genleşmesini, 2/3 oranında düşürdüğü,
- Tras ilavesiyle birlikte priz başlangıç ve bitiş sürelerinde artış olduğu gözlemlenmiştir.

Çelik (2008) tarafından yapılan çalışmada; basınç dayanımı gelişiminde fiziksel parametrelerin etkileri araştırılmıştır. Farklı inceliklerdeki PÇ 42,5 R'nin dayanıma etkisini araştırmak için -10 μ m, -20 μ m, -30 μ m, -45 μ m, -32+ 3 μ m, -20+ 5 μ m incelikleri, Portland çimentosuna %10, %20 ,%30 ve %40 oranlarında eklenmiş ve şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- İnceliğin 2 günlük dayanımda çok etkili olduğu,
- PÇ 42,5 R örneğine %20 oranında -32+ 3 μ m ilavesinin, 28 günlük dayanımı %13 oranında arttırdığı,
- PÇ 42,5 R'ye yaklaşık % 10'dan %40'a kadar -20+5 μ m ilavesinin özgül yüzeyi azalttığı, kontrol çimentosu ile karşılaştırıldığında ise 28 günlük dayanımı %5 oranında arttırdığı gözlemlenmiştir.

Kaya'nın (2010) TK ikameli çimentolar üzerine yapmış olduğu çalışmada şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- TK katkılı çimentoların, CEM I miktarını azaltmasından dolayı daha düşük hacim genleşmesi değeri gösterdiği,

- Priz başlangıcı ve sonunun ikame edilen katkı miktarı oranınca uzadığı,
- Katkılı çimentolarda erken basınç dayanımının, Portland çimentosundan daha düşük olduğu, kütlece %10-20 ikameli çimentoların, 28 günlük dayanım sonucunun, kontrol numunesine yakın sonuçlar verdiği,
- TK katkılı çimentoların öğütülebilirliğinin (taban külünün yumuşak ve porozlu yapısından dolayı), Portland çimentosundan daha kolay olduğu görülmüştür.

Delibaş'ın (2010) yapmış olduğu çalışmada; yüksek fırın cürufu, tras ve kalker inceliğinin katkılı çimentoların özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. %6, %25 ve %35 oranında mineral katkılar, Portland çimentosu klinkerine ilave edilmiştir. Söz konusu çimentolar belirli bir inceliğe, hem ayrı hem de birlikte öğütme yöntemiyle üretilmiş ve şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Katkılı çimentoların öğütme farklılıklarının, katkılı çimento özelliklerini etkilediği,
- Çimentonun özgül yüzeyindeki artışın, katkılı çimentoların basınç dayanımını arttırdığı,
- Ayrı öğütme yöntemiyle hazırlanan trasın ikame oranı artışına bağlı olarak basınç dayanımında düşme olduğu, trasın düşük seviyelerde kullanılmasıyla birlikte dayanımının daha yüksek seviyelere çıkabileceği,
- Diğer mineral katkılarla karşılaştırıldığı zaman tras ilavesinin su miktarını daha fazla arttırdığı gözlemlenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Çimento

Çimento, su ile karıştırıldığında kimyasal reaksiyon ile priz alan, sertleşen bir hamur oluşturan ve sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımını, kararlılığını koruyan, inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcıdır. TS EN 197-1 (2002) standardı yürürlüğe girdikten sonra özel amaçlı üç çimento standardı dışındaki tüm standartlar yürürlükten kaldırılmıştır. Buna göre çimentolar TS EN 197-1’de “CEM çimentosu” olarak adlandırılırlar. CEM çimentosu, agrega ve su ile uygun şekilde harmanlanıp karıştırıldığında, yeterli süre işlenebilirliğini koruyan ve belirlenmiş periyotlarda belirli dayanım seviyelerini kazanan, uzun süre hacim sabitliği gösteren, beton veya harç üretilen çimentodur (Ünsal ve Şen 2008).

2.1.1. Çimento çeşitleri

TS EN 197-1 nolu standardın kapsamında yer alan 27 farklı genel çimento aşağıdaki gibi beş ana tipte gruplandırılmıştır. Bunlar;

- ❖ CEM I Portland çimentosu
- ❖ CEM II Portland-kompoze çimento
- ❖ CEM III Yüksek fırın cürufu çimento
- ❖ CEM IV Puzolanlı çimento
- ❖ CEM V Kompoze çimento’dur.

2.1.1.1. CEM I: Portland çimentosu

Portland çimentosu, kil ve kalkerden oluşan hammaddelerin belirli oranlarda (steokimetric olarak) karıştırılarak, 1400-1500 °C sıcaklıkta pişirilmesi sonucu oluşan klinkerin, %3-6 oranında alçıtaşı ile öğütülmesiyle elde edilir (Neville 1995). Klinker oranı %95-100 civarındadır. Bina, köprü, yol, prefabrike elemanlar, yüksek dayanımlı

beton üretimi olmak üzere her çeşit beton üretimi için uygundur. Ülkemizde en yaygın kullanılan çimento tipidir. Soğuk havada dökülen betonlarda, erken kalıp alınması gibi erken dayanımın yüksek olması gereken durumlarda (R=Hızlı priz alan) işaretli olanları, normal betonlarda ise (N=Normal priz alan) işaretli olanları kullanılmalıdır (Gürü ve Yalçın 2006).

2.1.1.2. CEM II: Portland kompoze çimentosu

Bu tip çimentolar A tipi ve B tipi olmak üzere 2 tipte üretilirler. A tipi çimento en fazla %20 oranında, B tipi çimento ise %35 oranında katkı içerir. B tipi çimentolar, yüksek fırın cürufu, puzolan, uçucu kül, pişmiş şist ve kalker ilaveli çimentolardır; A tipi çimentolar ise B tipi çimentolara ilaveten silis dumanı içerir. Bu çimentoların klinker oranının düşürülmesiyle, katkı miktarındaki artışa bağlı olarak erken dayanımı azalmaktadır. Hidratasyon ısı ve sıcaklığının düşük olmasından dolayı özellikle kütle beton uygulamalarında kullanılır. İlk erken dayanımlarının düşük olmasına rağmen ilerleyen zamanlarda puzolanik aktivite sebebiyle beton dayanımında artış meydana gelir. Erken kalıp gereken yerlerde ve soğuk havalarda kullanıma uygun değildir (Gürü ve Yalçın 2006).

2.1.1.3. CEM III: Portland yüksek fırın cürufu çimento

İçerdiği değişik oranlardaki yüksek fırın cürufu miktarına bağlı olarak 3 tiptedir. %35-65 oranında yüksek fırın cürufu içerenler CEM-III/A, %66-80 oranında yüksek fırın cürufu içerenler CEM-III/B ve %81-95 oranında yüksek fırın cürufu içerenler CEM-III/C olarak adlandırılır. CEM-III/A ve CEM-III/B tipi çimentoların hidratasyon ısılarının düşük ve dayanıklılıklarının yüksek olması sayesinde kimyasal etkilere dayanıklı beton üretimi için uygundurlar. CEM-III/C betonu ise sülfat korozyonuna dayanıklı beton üretimi için uygundur (Gürü ve Yalçın 2006).

2.1.1.4. CEM IV: Puzolanik çimento

%11-55 oranında puzolanik katkı içeren (silis dumanı, puzolan, uçucu kül gibi) bu çimentoların, hidratasyon ısılarının düşük olması nedeniyle kütle beton uygulamalarında kullanılabilir, aynı zamanda beton geçirimsizliğini azaltıcı etkileri sayesinde kimyasal etkilere maruz betonlarda kullanıma uygundur (Gürü ve Yalçın 2006).

2.1.1.5. CEM V: Kompoze çimento

Birden fazla puzolanın kullanılmasıyla oluşan puzolanik etkileri yüksek bir çimentodur. %18-50 oranında katkı içerir. Deniz içi yapılarda kullanıma ve kütle beton dökümüne uygundur (Gürü ve Yalçın 2006).

TS EN 197-1 nolu standarda göre beş ana tipte gruplandırılan çimentoların kimyasal özellikleri şu şekilde olmalıdır:

- CEM I ve CEM III sınıfına ait bütün çimento tiplerinin, kızdırma kaybı $\leq$ %5,0 olmalıdır.
- CEM I ve CEM III sınıfına dahil bütün çimento tiplerinde, çözünmeyen kalıntı $\leq$ %3,5 olmalıdır.
- CEM I sınıfına dahil çimentoların SO_3 miktarı $\leq$ %3,5 olmalıdır.
- CEM IV ve CEM V sınıfına dahil çimentoların SO_3 miktarı $\leq$ %4,3 olmalıdır.
- Bütün çimento tipleri için klor muhtevası $\leq$ %0,1 olmalıdır (Erdoğan 2004).

2.2. Çimento üretimi

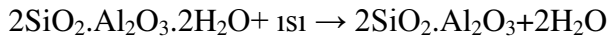
Portland çimentosunun ana bileşenlerini, uygun oranlarda karıştırılan silisyum, alüminyum oksit, kalsiyum oksit ve demir oksit oluşturur. Kalsiyum oksitin kaynağı kalkerli bileşiklerdir, örneğin kireçtaşı ve marndır. Silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksit killi malzemelerin pişirilmesi sonucunda elde edilir (kil, şeyl, şist vb.) Eğer yeterli miktarda SiO_2 ve Fe_2O_3 kilin içerisinde bulunmuyorsa kuvarz kumu ve demir cevheri ilave edilebilir (Ramachandran 1995).

Çimento üretim sürecinde en fazla enerji tüketimi klinker oluşumunda meydana gelir. Klinker oluşum sıcaklığı yaklaşık 1350°C'dir. Bu sıcaklığa ulaşmak için ortalama enerji tüketiminin neredeyse 800°C'ye kadar olan kısmı ön ısıtma yapılarak elde edilir (Hewlett 2004).

Bu sırada karbonatların ayrışması işlemleri meydana gelir. Döner fırın içerisindeki aşamalar şu şekilde oluşur:

Buharlaştırma Bölgesi: Yaklaşık 100-400°C'de farin içerisindeki serbest su uzaklaşır.

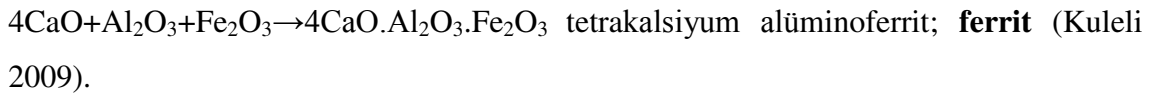
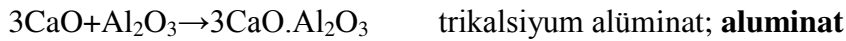
Kil Dehidratasyon Bölgesi: Yaklaşık 400-650°C'de kil mineralleri içerisindeki su buharlaşır.



Kalsinasyon Bölgesi: 900°C'de kalsiyum karbonat bileşeni ayrışarak kalsiyum oksiti oluşturur.



Sinterleşme Bölgesi: Yaklaşık 1350-1450°C temel oluşum aşamasıdır.



Çizelge 2.1. Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve miktarları (Mehta and Monteiro 2006)

Oksit	Kısaltma	Miktarı (%)	Bileşik	Kısaltma
CaO	C	60-67	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
SiO ₂	S	17-25	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Al ₂ O ₃	A	3-8	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Fe ₂ O ₃	F	0.5-6	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
MgO	M	0,1-4	4CaO.2Al ₂ O ₃ .SO ₃	C ₄ A ₃ $\bar{S}$
SO ₃	$\bar{S}$	1 3	3CaO.2SiO ₂ .3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃
H ₂ O	H		CaSO ₄ .2H ₂ O	CH ₂ $\bar{S}$

Bu dört ana bileşen gerek su ile reaksiyon hızları ve çıkardıkları ısı miktarları, gerekse çimentonun bağlayıcılık değerine katkıları yönünden birbirlerinden farklı özellik gösterirler.

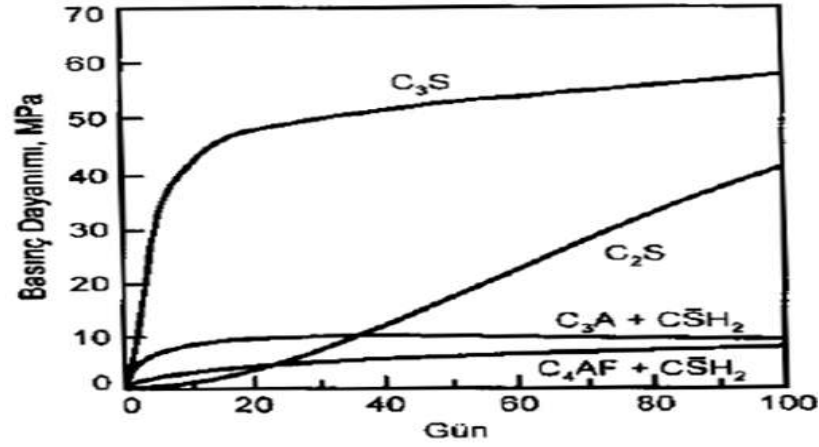
C₄AF: Su ile reaksiyonu fazla olmayıp bağlayıcılık değeri azdır. Çimento renginin oluşumunu sağlar.

C₃A: Su ile çok hızlı reaksiyona girip çok fazla ısı açığa çıkarır, çimentonun erken priz almasını sağlar, bu etkiyi azaltmak için klinkere bir miktar alçıtaşı katılır.

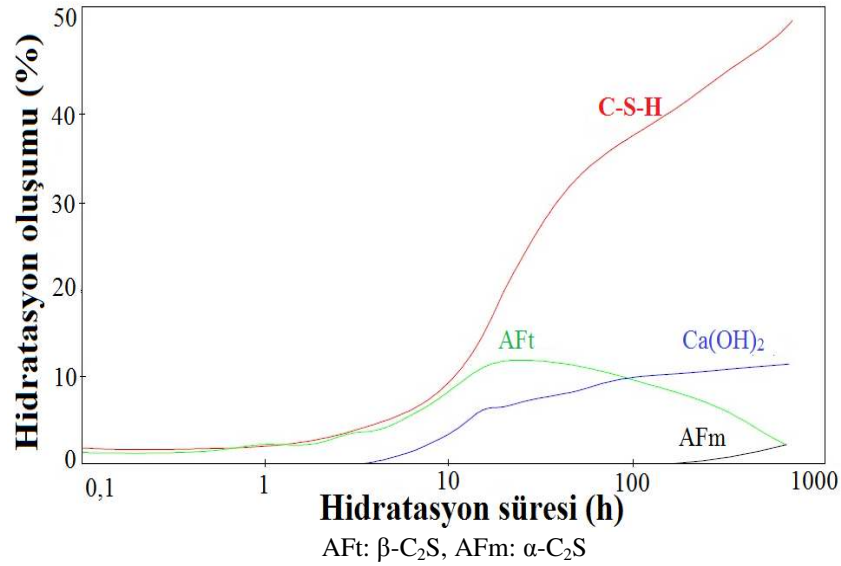
C₂S: Çimentonun nihai dayanımı üzerinde etkilidir. Su ile reaksiyonu yavaştır, az miktarda ısı açığa çıkarır. Yüksek bağlayıcılık özelliği ileriki yaşlarda kendisini gösterir.

C₃S: Su ile reaksiyonu ve ortaya çıkan ısı orta değerdedir. Çimentonun erken dayanımını sağlar (Zhang et al. 1995).

Çimento hamurunun ana bileşenlerinin dayanım artışı Şekil 2.1’de, hidrasyon aşamasında Ca(OH)₂ oluşumu Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Çimento hamurunun ana bileşenlerinin dayanım artışı (Erdoğan 2003)



Şekil 2.2. Hidratasyon aşamasında $Ca(OH)_2$ oluşumu (Odler 2004)

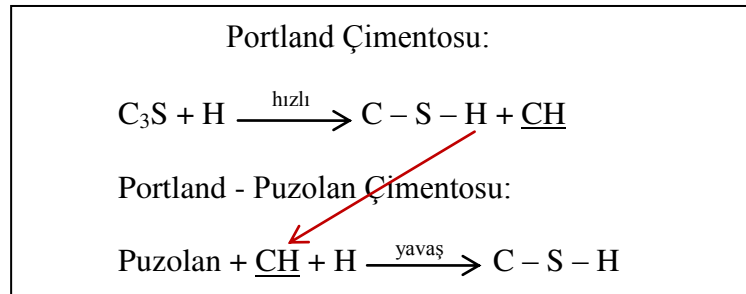
Şekil 2.2'de görüldüğü üzere, hem C_3S hem de $\beta-C_2S$ 'nin hidratasyonu devam ettiğinden dolayı $C-S-H$ fazında oluşumu devam ediyor. Belli bir süreden sonra $\beta-C_2S$ 'nin azalmasıyla, $Ca(OH)_2$ oluşum hızıda azalıyor (Rassem B et al. 1986).

Klinker oluşumundan sonra çimento üretimi malzemelerin öğütülmesiyle sonlanır. Geline bu son aşama çimentonun birçok fiziksel özelliklerinin de belirlenmesini sağlar (su ihtiyacı, başlangıç ve son basınç dayanımları, priz alma vb.). Portland çimentosunun öğütme aşamasında klinker sadece bir miktar (%3-6) alçıtaşı ile öğütülür. Katkılı çimentolarda birlikte öğütme ve ayrı ayrı öğütme olmak üzere iki şekilde öğütme işlemi

gerçekleşir. Birlikte öğütme işleminde Portland çimentosu klinkeri + mineral katkı + alçıtaşı birlikte öğütülür, ayrı öğütme işleminde ise PÇ + alçı taşı beraber öğütülür, daha sonra mineral katkı ilave edilir (Tokyay et al. 1999).

2.2.1. Mineral katkılar

Mineral katkıların çoğu puzolanik özelliktedir. Puzolanlar, tek başlarına bağlayıcılık özellikleri olmayan ancak öğütüldüklerinde ve nemli ortamda kireç ile karşılaştıklarında kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği kazanan doğal ve yapay inorganik maddelerdir (Neville 1995). Puzolanik özellik ise puzolanların bağlayıcı hidratasyon ürünlerini ortaya çıkarabilme kapasitesidir. Portland çimentosu ve Portland-puzolan çimentoları arasında yapılacak bir karşılaştırma (C-S-H oluşturma reaksiyonlarına göre), bu çimentoların davranışlarındaki farklılıkların anlaşılabilmesi açısından faydalı olacaktır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Portland- puzolan etkileşimi (Mehta and Monteiro 2006)

Şekil 2.3’de görüldüğü gibi, Portland çimentosunun hidratasyonu sırasında açığa çıkan kalsiyum hidroksitle, ince bir şekilde öğütülmüş olan puzolan, nemli ortamda kimyasal reaksiyona girerek çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran C-S-H minerallerini meydana getirir, bu olaya ‘puzolanik reaksiyon’ denir (Türkmenoğlu ve Tankut 2001).

Puzolanlı çimento ve cürufu çimentoların kullanımının tercih edilmesindeki neden, puzolanik reaksiyonun başlıca üç özelliğinden kaynaklanmaktadır. İlki, puzolanik reaksiyonun yavaş bir şekilde meydana gelmesiyle, hidratasyon sonucu ortaya çıkan ısı

miktarının ve dayanım gelişiminin kademeli bir şekilde artış göstermesidir. İkincisi, bu reaksiyonda kalsiyum hidroksit üretimi yerine tüketimi söz konusudur bu nedenle asidik ortamlarda hidrat hamurunun dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmasıdır. Sonuç olarak ince öğütülmeleri sayelerinde, meydana gelen reaksiyon ürünleri kapiler boşlukları doldurmakta bu sayede de oluşan ürünün geçirimsizliği sağlanmaktadır. Ancak puzolanlı çimentoların toplam özgül yüzey alanları normal çimentolara göre daha yüksek olduğundan, su ihtiyaçları bu nedenle artabilmektedir (Shannag2000; Mehta and Monteiro 2006).

Puzolanlar, doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere ikiye ayrılır. Volkanik tüfler, volkanik camlar, volkanik küller, ponza taşları, opalin çeşitleri, killer ve şeyller doğal puzolan grubunu; uçucu kül, taban külü, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, pişmiş şist, silis dumanı gibi minerallerde yapay puzolan grubunu oluşturur. Katkılı çimento üretiminde genel olarak tercih edilen mineral katkıları; yüksek fırın cürufu, doğal puzolanlar, uçucu kül, silis dumanı ve kalkerdir (Delibaş 2012).

2.2.1.1. Volkanik tüfler (VT)

Volkanik tüfler (VT), çimento endüstrisinde puzolanlı çimento üretimi için bir katkı maddesi olarak kullanılan piroklastik bir kayaç türüdür. VT'ler silis ve silis-alüminli birleşiklerce zengin doğal puzolanlardır. Bu puzolanlar çoğunlukla volkanik kökenlidir (Türkmenoğlu ve Tankut 2001). Volkanik püskürme sırasında silisli ve alüminli bileşiklerden oluşan eriyik durumundaki magma, yüzeye çıktığında ani soğuyarak camı faz oluşturur. Püskürme sırasında gazlarında bulunması, malzemenin gözenekli yapıya ve çok büyük yüzey alanına sahip olmasını sağlar (Erdoğan vd 2004).

Tüfler, çeşitli silikat minerallerinin kombinasyonlarıyla oluşabilirler örneğin kuvarz, feldispat, zeolit, kil mineralleri, amorf pomza v.b. Genellikle iyi bir puzolanik tuf, düşük miktarda kil mineralleri, alkali feldispat içerirken, yüksek miktarda da zeolit mineralleri ve volkanik cam içerir (Türkmenoğlu ve Tankut 2001).

Doğal puzolan katkısıyla oluşan malzemelerin ana avantajları, hidrasyon ısısının düşük olması, nihai dayanımın yüksek olması, düşük geçirimsizlik sağlaması, yüksek sülfat direnci ve düşük alkali-silika reaksiyonlarıdır (Mater 1994). Çimentoya dayalı sistemlerde puzolan kullanımı, sistemin dayanıklılık özelliklerini arttırmaktadır (Hewlet 2004).

Çimento üretiminde kullanılan volkanik tüf oranı arttıkça, çimentonun erken dayanımı düşmektedir fakat ilerleyen yaşlarda puzolanik aktivitenin de artmasıyla dayanımda artış meydana gelmektedir (Hossain 2003).

Doğal puzolan kullanımının dezavantajı ise, su gerekliliğinin fazla olması ve erken dayanımının düşük olmasıdır. Bu özellikler katkılı çimento kullanımında puzolan kullanımını % 30 oranında kısıtlamaktadır (Uzal et al. 2003).

TS-25'e göre volkanik tüflerde bulunması gereken en önemli özellik, beton katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının en az %70 olmasıdır.

2.2.1.2. Taban külü (TK)

Taban külü, termik santrallerde elektrik enerjisi üretimi sırasında, iri boyuttaki katı atıkların kazan altına birikmesiyle oluşur. Yanma sıcaklığı, fırın tipi, kömür tipi gibi bazı özellikler, açığa çıkan kül miktarlarında değişime neden olabilmektedir (Kaya 2010).

Elektrik enerjisi üretmek için kullanılan kömür 3 farklı yöntemle yakılır;

- Pulverize kömür kazanı
- Mekanik ızgaralar
- Siklonlar

Kullanılan bu 3 yöntemde de kazan da mevcut olan su ısıtılarak buhar elde edilir, sonraki aşamada üretilen buhar enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülür. Pulverize

kömür kazanı (PC), kömürün öğütülmesi ile yüzey alanının arttırılması ve kazan içinde hava akımı oluşturulması nedeniyle kömürün daha iyi yanmasını sağladığından en çok tercih edilen teknolojidir. PC, ıslak tabanlı ve kuru tabanlı olmak üzere 2'ye ayrılır. Bu kazanlarda kömürün yanmasıyla oluşan külün büyük kısmını uçucu küller oluşturur. Fırının tabanında biriken kül ise taban külüdür, kuru tabanlı kazanlarda serbest olarak bulunur ıslak tabanlı kazanlarda ise ergimiş halde oluşur ve soğuması tamamlandıktan sonra cürufa dönüşür (Yazıcı 2004).

Termik santrallerde kömürün yanması ile 4 farklı atık ortaya çıkar. Bunlar;

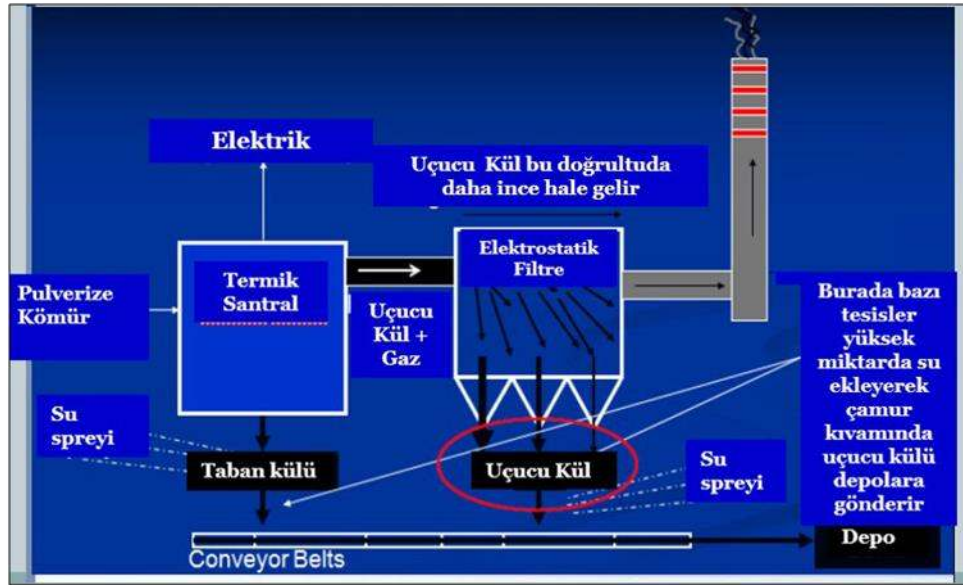
Uçucu kül; Termik santrallerin bacalarından çıkan dumanlardan, elektrostatik yöntemlerle tutulan çok ince küllere denir.

Taban külü; Kazanın altına çöken partiküllerdir.

Kazan altı cürufu; Taban külü gibi kazan altına çöker, erime sıcaklığının aşılmasından sonra oluşur.

Baca altı desülfürizasyon atıkları; Sülfür içeren gazların baca gazlarından ayrıştırılmasıyla oluşur (Yazıcı 2004).

Taban külü ve uçucu kül oluşum şeması Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Taban külü ve uçucu kül oluşum şeması

Termik santrallerde kullanılan linyit kömürün yakılmasıyla %35-40 civarında kül oluştuğu bilinmektedir. 100 gr kömürün yakılmasıyla elde edilen kül çeşitleri ve miktarları Çizelge 2.2'deki gibi ifade edilebilir (Coppolla et al. 1997).

Çizelge 2.2. % 1 sülfür içeren 100 kg kömürün termik santrallerde yakılması ile oluşan atıklar

<u>100 kg Kömür</u>	$\text{SO}_2 + \text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 = \underline{5 \text{ kg}}$ yapay alçı
	<u>8 kg</u> uçucu kül
	<u>2 kg</u> <i>taban külü</i>

TK'nın fiziksel özellikleri, kömür tipine, yanma sıcaklığına, yanma öncesi yapılan hazırlığa bağlıdır. Doğal kumla benzer fiziksel özellikler içerir, betonda doğal kum yerine taban külünün agrega olarak kullanılabileceğine dair Bai ve arkadaşlarının bir çalışması olmuştur (Bai et al. 2005). Yüksek oranda gözenekli yüzeye, büyük tanecik dağılımına, düzensiz şekle ve camsı bir dokuya sahiptir. TK parçacıkları ince bir kum tanesinden ince bir çakıl boyutuna kadar farklı tane boyut dağılımı gösterirler (Kumar et al. 2004). Bu parçacıklar 50,8 mm ve 0,0075 mm arasında değişen boyutlarda bulunurlar (Churchill and Amirkhanian 1999).

TK kimyasal olarak, uçucu külle benzer kimyasal özelliktedir, bu kül taneciklerinin özellikleri kömür kaynağına bağlıdır. Bileşiminde, 3 baskın oksit ön plana çıkmaktadır. Bunlar, silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve demir oksittir (Fe_2O_3). Kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO), sodyum oksit (Na_2O_3), potasyum oksit (K_2O), sülfür trioksit (SO_3) ve diğer küçük oksitler örneğin P_2O_3 , T_2O_3 düşük miktarda taban külü içerisinde bulunurlar. Temelde linyit veya düşük oranda bitümlü kömürden meydana gelen TK; bitümlü kömürden veya taş kömüründen meydana gelen külden daha yüksek oranda kalsiyum içeriğine sahiptir (Kaya 2010). TK ve kazan altı cürufu düşük pH ve tuz içeriklerinden dolayı aşındırıcı özellik gösterirler (Ke and Lowell 1992).

2.3. Kimyasal katkıları

Betonun birtakım özelliklerini iyileştirmek ve değıştirmek amacıyla taze veya sertleşmiş haldeki betona belli bir miktar ilave edilen organik veya inorganik katkılarıdır. Genellikle katkı miktarı çimento ağırlığına belirlenir ve karma suyuna katılır. Bu sayede su/çimento oranını azaltarak daha dayanıklı beton ve harç elde edilmesini sağlar (Baradan vd 2012).

Kimyasal katkıları TS EN 934-2 standardına göre 11 ana başlık altında sınıflandırılabilir.

- Su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkıları
- Yüksek oranda su azaltıcı/süperakışkanlaştırıcı katkıları
- Su tutucu katkıları
- Hava sürükleyici katkıları
- Priz hızlandırıcı katkıları
- Sertleşmeyi hızlandırıcı katkıları
- Priz geciktirici katkıları
- Su geçirimsizlik katkısı
- Priz geciktirici/su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkıları
- Priz geciktirici/yüksek oranda su azaltıcı/süperakışkanlaştırıcı katkıları
- Priz hızlandırıcı/su azaltıcı/ akışkanlaştırıcı katkıları

Bu sınıflandırmalar dışında *mid-range*, *hiperakışkanlaştırıcı*, *redoz* katkısı vb. isimlerle katkı türleri piyasada bulunmaktadır.

2.3.1. Akışkanlaştırıcıları

Akışkanlaştırıcıları su kesme yeteneklerine göre normal, süper ve hiper katkıları olarak sınıflandırılabilirler. Bu yapılan sınıflandırma akışkanlaştırıcının kimyasal içeriğindense, katkının performansı dikkate alınarak yapılmıştır (Ramachandran 1995).

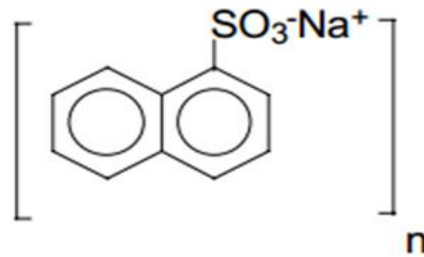
2.3.1.1. Normal (I. Nesil) akışkanlaştırıcılar

I. nesil akışkanlaştırıcılar, karışım suyuna karıştırıldıkları zaman su oranını %5-11 civarında kesintiye uğratan katkı maddeleridir. Normal miktarda su azaltan akışkanlaştırıcı diye de bilinmektedir. Genellikle liginosülfonat bazlı katkılardan oluşmaktadır (Ulaş 2009).

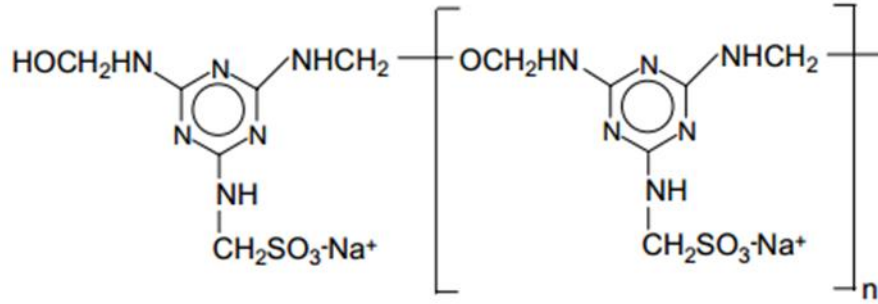
2.3.1.2. Süper (II. Nesil) akışkanlaştırıcılar

Yüksek oranda su azaltıcı katkı maddeleri olarak bilinen II. Nesil akışkanlaştırıcılar en az %12 oranında su kesme davranışı gösterirler. Süperakışkanlaştırıcı türleri, sülfonatlaştırılmış melamin formaldehit esaslı maddelerden, sülfonatlaştırılmış naftalin formaldehit esaslı maddelerden veya bazı organik bileşenlerden elde edilir. Gerek su kesme gerekse akışkanlık bakımından normal akışkanlaştırıcılara göre daha etkili oldukları bilinmektedir. Bu gruba aynı zamanda modifiye edilmiş liginosülfonat türleride dahil edilebilir ama en çok kullanılanları naftalin ve melamin içerikli katkı türleridir (Erdoğan S. ve Erdoğan T. 2007; Çil 2000).

Fazla su kesme özelliğine sahip olan süperakışkanlaştırıcılar sülfonat (SO_3^-) bazlı ve karboksilat (COO^-) bazlı olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. İlk üretilen süperakışkanlaştırıcı polinaftalin sülfonat (PNS) olmak üzere, polimelamin sülfonatta (PMS) diğer önemli sülfonat bazlı katkıdır (Ulaş 2009).

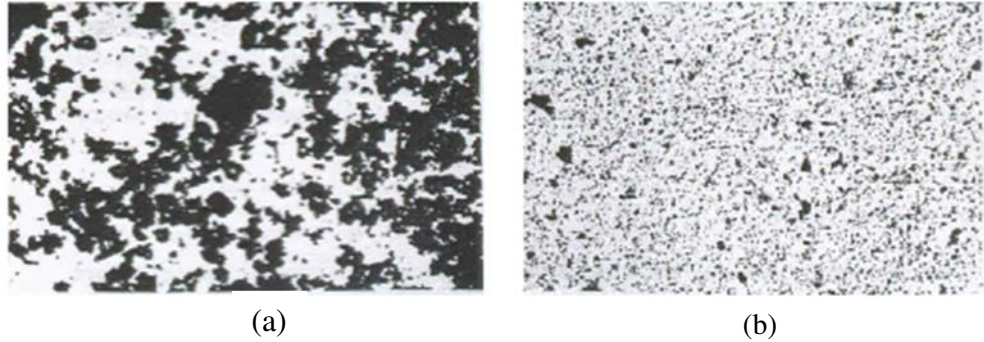


Şekil 2.5. Polinaftalin sülfonatin kimyasal yapısı



Şekil 2.6. Polimelamin sülfonatın kimyasal yapısı

Süperakışkanlaştırıcı katkıları, betonun/harcın su içeriğini azaltabilme aynı zamanda da istenen kıvam oranını da yakalayabilme özelliğine sahip olabilmeleriyle yüksek dayanımlı, işlenebilirliği yüksek malzeme oluşumu sağlarlar. Kimyasal katkının çimentoda oluşturduğu etki Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7. (a) Çimento-su süspansiyonunda topaklanmış çimento tanecikleri, (b) Çimento-su süspansiyonuna süperakışkanlaştırıcı ilavesi ile çimento tanecikleri (siyah yerler hava boşluklarını göstermektedir) (Mehta and Monteiro 1997).

II. nesil katkı kullanımıyla oluşturulan çimento hamurlarında, çimento taneciklerinin yerleşimi “elektrostatik” ve “sterik” denilen etki mekanizmasıyla açıklanır (Ramyar 2007). Melamin ve polinaftalin sülfonat esaslı II. Nesil akışkanlaştırıcılarda bulunan SO_3^- grupları negatif yük oluşturarak elektrostatik itme kuvveti oluşturmakta ve böylece çimento tanecikleri arasında topaklanma oluşmamaktadır (Felekoğlu vd 2004).

2.3.1.3. Hiper (III. Nesil) akışkanlaştırıcılar

Hiperakışkanlaştırıcı olarak bilinen bu katkı maddeleri karışım suyu oranının %30 civarında azaltılmasını sağlar. Polikarboksilat bazlı katkılardan oluşmaktadırlar. Bu katkıların özelliği yüksek oranda su kesmelerinin yanı sıra, yüksek işlenebilirliğe de sahip olmalarıdır (Çil 2000).

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzemeler

3.1.1. Çimento

Çalışmada, TS EN 197-1'e uygun Erzurum Aşkale Çimento fabrikası ürünü CEM I (PÇ 42,5 R) tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Aşkale Çimento Fabrikası tarafından belirlenmiş ve sonuçları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. PKÇ 42.5 R çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Bileşimi	%	Fiziksel Özellikler	
SiO ₂	18,21	İncelik (45µm elek üstü %)	7,17
Al ₂ O ₃	4,54	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,12
Fe ₂ O ₃	3,1	Özgül Yüzey (cm ² /g)	3616
CaO	63,5	Priz Başlangıcı (dakika)	146
MgO	2,57	Priz Sonu (dakika)	189
SO ₃	2,82	Hacim Genleşmesi (mm)	1
Kızdırma Kaybı	3,87	Su İhtiyacı %	29,5
Na ₂ O	0,22	Mekanik Özellikler	
K ₂ O	0,65		
Cl ⁻	0,0144	Basınç Dayanımı	N/mm ²
Ölçülemeyen	0,51		
Toplam	100	2 Günlük	27,72
Serbest CaO	0,49	28 Günlük	58,81

3.1.2. Mineral katkıları

3.1.2.1. Bayburt taşı (BT)

Araştırmada kullanılan mineral katkılardan biri, Bayburt yöresinde bulunan, Bayburt beyaz taşıdır. Bayburt beyaz taş (BT) volkanik malzemelerden oluşan bir matris ve matris içerisinde kuvars-plajiolaz-biyotit ve kaya parçalarından ibaret bir tuf/tüftür. Matriste; pekişmiş volkanik malzemelerin yanı sıra kuvars ve feldspat mikrolitleri ile demiroksit ve alterasyon ürünü mineral oluşumları da gözlenmektedir (MTA 2005). Bayburt Beyaz Taşın kimyasal özellikleri Aşkale Çim. Fab. (Erzurum) tarafından gerçekleştirilen XRF (oksit) analizi Çizelge 3.2’de, mineralojik analizi Şekil 3.1’de fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.3’de, özgül yüzey ve özgül ağırlık deney sonuçları Çizelge 3.4’te verilmiştir. 63 ve 125 µm boyutlarında öğütülmüş BT’nin elek analizi particle size analyser (Master Sizer 3000) ile gerçekleştirilmiş olup elek analizi Şekil 3.3’te verilmiştir.

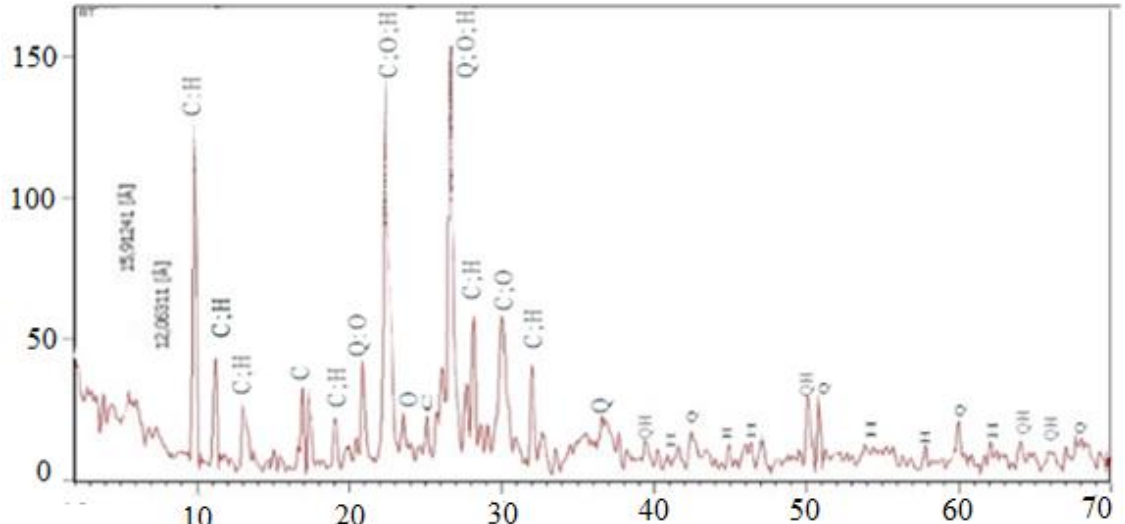
Çizelge 3.2. Bayburt beyaz taşının kimyasal özellikleri (Aşkale Çim. Fab. XRF analizi)

OKSİTLER	%
SiO ₂	68,92
Al ₂ O ₃	11,96
Fe ₂ O ₃	0,34
CaO	3,85
MgO	1,29
SO ₃	0,21
Na ₂ O	0,23
K ₂ O	2,38
Toplam Alkali	1,80
Kızdırma kaybı	10,13
Toplam	100

Çizelge 3.2’ye göre BT’nin ana bileşeni SiO₂’dir ve ağırlıkça SiO₂/Al₂O₃ oranı 5.76’ dır. Ayrıca S+A+F miktarı %81.22 olup ASTM C 618’e göre %70 üzerinde bulunmasıyla olumlu pozolanik özellik göstermektedir (ASTM 1985).

Çizelge 3.3. Bayburt beyaz taşının fiziksel ve mekanik özellikleri (MTA 2005)

Özgül ağırlık	g / cm ³	2,37
Sertlik	Mohs	4–5
Birim hacim ağırlığı	g / cm ³	1,70
Atmosfer basıncında su emme	Ağırlıkça (%)	12,2
	Hacimce (%)	20,6
Kaynar suda su emme	Ağırlıkça (%)	12,3
	Hacimce (%)	21,0
Görünür porozite	%	20,6
Basınç direnci	(kgf/ cm ²) 1	450
Don sonrası basınç direnci	(kgf/ cm ²) 1	440
Don kaybı	%	0,34
Darbe direnci	kgf.cm/cm ³	8,0
Eğilme direnci	kgf/cm ²	125
Doluluk oranı	%	71,6
Gözeneklilik derecesi	%	28,4
Ortalama aşınma direnci	cm ³ /50 cm ²	25,0



O: Orthoclase, C: Clinoptilolite, H: Heulandite, Q: Quartz

Şekil 3.1. BT'nin mineralojik analizi

Şekil 3.1'e göre BT, klinoptilolit ve heulandite mineralleri içermesinden dolayı zeolitik yapıya sahiptir. Zeolitik yapıya sahip tüfler puzolanik aktiviteye sahiptir (Tekin 2013).

Çizelge 3.4. BT ve TK'nın özgül ağırlık ve özgül yüzey deney sonuçları (Aşkale Çim. Fab.)

Mineral Katkı Adı	Özgül Ağırlık (g / cm ³)	Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)
Bayburt Taşı (63µm)	2,22	7242
Bayburt Taşı (125 µm)	2,17	4626
Taban Külü (63µm)	2,30	2362
Taban Külü (125 µm)	2,22	1665

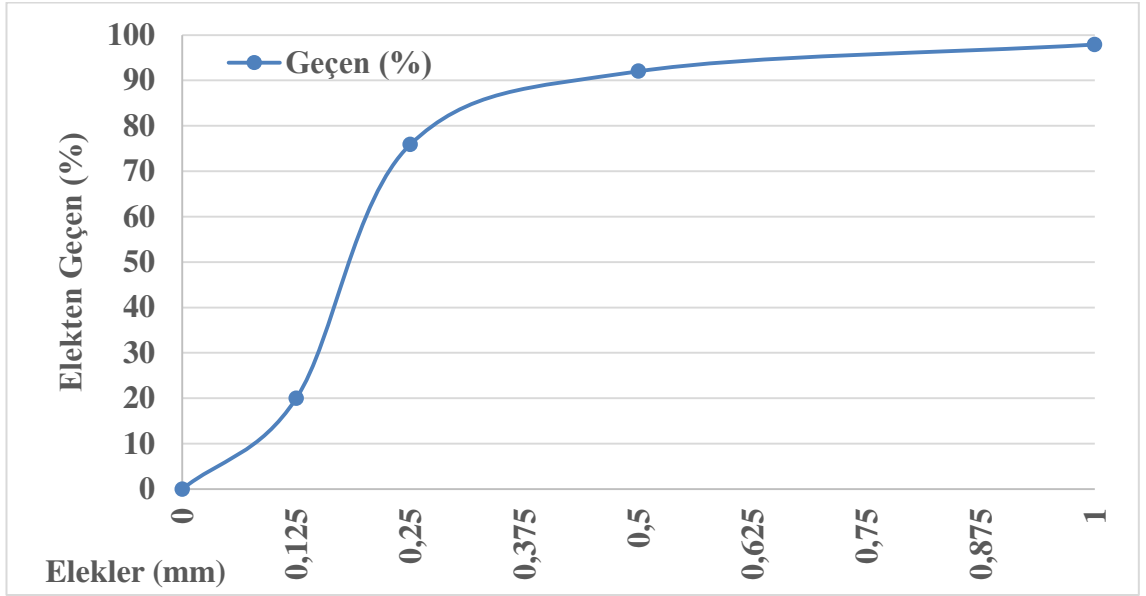
Özgül yüzey değerleri dikkate alındığında, öğütülen BT'nin TK'ya göre daha ince tane yapısına sahip olduğu görülmektedir.

3.1.2.2. Taban külü (TK)

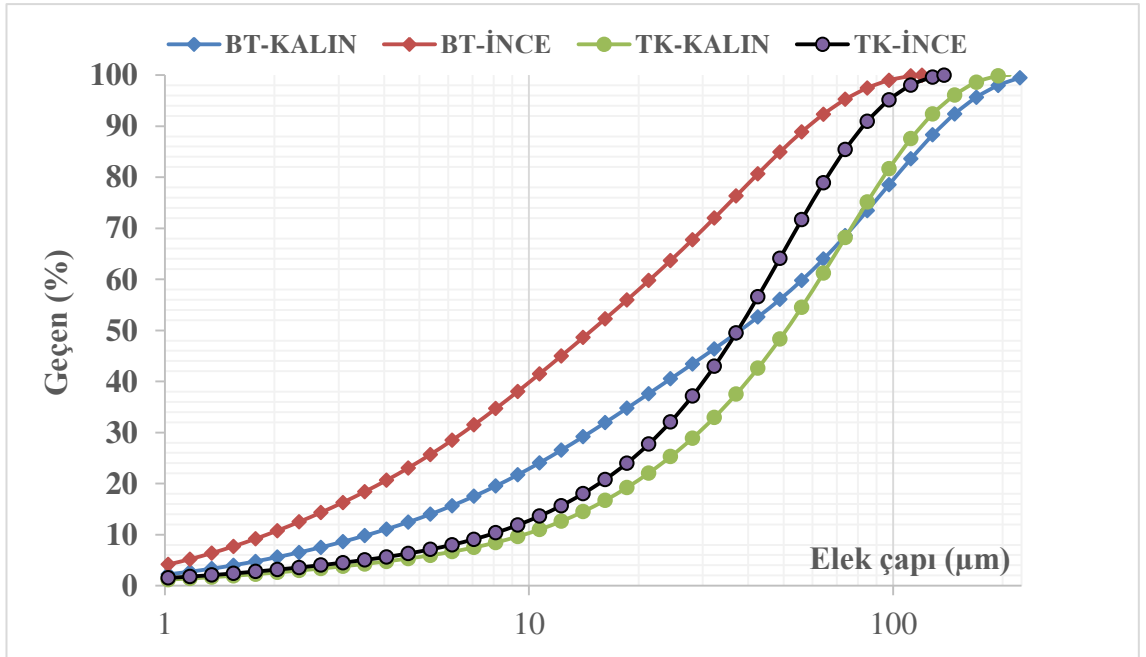
Taban külü (TK), Muğla Yatağan Termik Santralinin ilk elektro filtresinden temin edilmiştir. Mevcut TK'nın elek analizi Şekil 3.2'de, kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir. Öğütülmüş haldeki en büyük dane boyutu 63 ve 125 µm olan TK'nın elek analizi particle size analyser (Master Sizer 3000) ile gerçekleştirilmiş olup, elek analizi Şekil 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Taban külünün kimyasal özellikleri

OKSİTLER	%	ASTM C 618
SiO ₂	48,95	SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃
Al ₂ O ₃	16,97	
Fe ₂ O ₃	5,82	
CaO	15,84	> 70.0
MgO	2,04	> 10
SO ₃	1,69	Max 5.0
Na ₂ O	0,52	
K ₂ O	1,59	
Toplam Alkali	1,57	
Toplam	93,42	



Şekil 3.2. TK'nın öğütme öncesi elek analizi



Şekil 3.3. BT ve TK'nın tane boyut dağılımları

Tane boyut dağılımlarına göre %50 elek altı oranında en küçük boyutlu hammadde ince BT'dir. BT ve TK %90 elek altı oranlarına göre sırasıyla 63 ve 125 µm tane boyutlarına sahiptirler.

3.1.3. Akışkanlaştırıcılar

Üretilen çimentoların kimyasal katkılarla uyumunu incelemek amacıyla hazırlanan hamurlar ve harçlarda, iki farklı firmanın Polinaftalin Sülfonat içeriğine sahip süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri çimento ağırlığının %2 oranında kullanılmıştır. %2 oranında kullanma sebebi her iki tip üreticinin en yüksek doz olarak önerisi olmasıdır. Oluşabilecek etkileri en üst düzeyde görmeye yönelik bir yaklaşımdır. Bu amaçla GRACE Yapı Kimyasalları ürünü olan “*Daracem 200*” (D tipi) süperakışkanlaştırıcı ve BASF Yapı Kimyasalları ürünü olan “*Rheobuild 1000*” (R tipi) süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılmıştır.

- **D tipi süperakışkanlaştırıcı**

D tipi süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. D tipi süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri (GRACE)

Akışkanlaştırıcı D	
İçeriği	Naftalin sülfonat
Yapı	Homojen, sıvı
Renk	Koyu kahverengi
Yoğunluk (20 °C)	1,19 ± 0,01 g/cm ³ (TS 781 ISO 758)
pH (20°C)	9,5 ± 1,0 (TS 6365 EN 1262)
Klor İçeriği % (EN 480-10)	< 0,10 M.-% (TS 1116 EN ISO 1158)
Alkali İçeriği % (EN 480-12)	< 7,0 M.-% (TS EN 480-12)
Katı Madde Miktarı	39,1 %

- **R tipi süperakışkanlaştırıcı**

R tipi kimyasal katkının teknik özellikleri Çizelge 3.7’de verilmiştir (BASF).

Çizelge 3.7. R tipi süperakışkanlaştırıcının özellikleri (BASF)

Malzemenin Yapısı	Naftalin sülfonat esaslı
Yapı	Homojen, sıvı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,184-1,244 kg/litre
pH	7,5
Klor İçeriği % (EN 480-10)	< 0,1
Alkali İçeriği % (EN 480-12)	< 10
Katı Madde Miktarı	39,3%

3.1.4. CEN kumu ve su

Harç numunelerinin hazırlanmasında Tekirdağ Pınarbaşı yöresinin, Set Italcementi Trakya çimento A.Ş. ürünü TS EN 196-1 standardına uygun CEN standart kumu kullanılmıştır. CEN standart kumu, toplam kütlesi en az 1345±50 g olan, temsili numune kullanılarak yapılan elek analizi sonucunda tayin edilen tane büyüklüğü dağılımı Çizelge 3.8'e uygun malzemedir (TS EN 2009).

Çizelge 3.8. CEN Referans Kumu'nun tane büyüklüğü dağılımı

Kare göz açıklığı (mm)	2,0	1,6	1	0,5	0,16	0,008
Elekte kalan yığılımlı (%)	0,0	7±5	33±5	67±5	87±5	99±1

Deneylerde TS EN 196'ya göre saf su kullanılmıştır. Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi yapı laboratuvarında bulunan saf su cihazından temin edilmiştir.

3.1.5. Diğer malzemeler

Çimento harç numunelerinin küründe, kirece doygun su ortamının oluşturulması için söndürülmüş torba kireç, kalıp yağı olarak zeytinyağı kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

Deneyisel çalışma 4 aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalar aşağıda maddelendirilmiştir.

- Aşama 1: Malzeme temini
- Aşama 2: Öğütme
- Aşama 3: Kompoze çimentoların hazırlanması
- Aşama 4: Hamur deneyleri (TS EN 196-3)
- Aşama 5: Harç deneyleri (TS EN 196-1 ve ASTM C230)

Aşama 1: Bayburt ili sanayi bölgesi atık sahasından paledyen boyutlarında (50 – 300 mm atık kaplama taşı) alınan BT ile Yatağan Termik Santrali 1. siklondan temin edilen en büyük dane boyutu Şekil 3.2’de gösterildiği gibi TK laboratuvara getirilmiştir.

Aşama 2: BT laboratuvar tipi konkasörde (Bknz Ek Şekil B.1) kırıldıktan sonra, 0 – 2 mm boyut aralığına getirilmiştir. Daha sonra konkasörden alınan malzemeler 24 saat süreyle 105 ± 5 °C sıcaklıkta bekletildikten sonra diskli öğütücüde öğütülmüştür (Bknz Ek Şekil B.1). BT’yi 125 µm boyuta indirebilmek için diskli öğütücüde 3 kere her bir seferde 10 dakika, 63 µm boyuta indirebilmek için diskli öğütücüde 5 kere her bir seferde 10 dk öğütme yapılmıştır. TK’yı 125 µm boyuta indirebilmek için diskli öğütücüde 2 kere her bir seferde yaklaşık 6 dk, 63 µm boyuta indirebilmek için diskli öğütücüde 4 kere her bir seferde 6 dk öğütme yapılmıştır. Öğütülen malzemeler 63 ve 125 mikronluk eleklerden ayrı ayrı elendikten sonra hava geçirmez 10 kg’lık kaplarda

depolanmıştır. Elenen malzemelerle ilgili elek analizi Master Sizer 3000 cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Aşama 3: Hazırlanan iki farklı incelikte BT ve TK çimentoya %0, %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilmiştir. Karışım homojenliğini sağlamak için BT ve TK plastik kap içerisinde çimentoyla kuru olarak harmanlanarak yaklaşık 1 dk karıştırılmıştır. Böylece kontrol çimentosu (PC0) hariç toplam 12 tip çimento hazırlanmıştır. Bu çimentoların özgül yüzey ve özgül ağırlık verileri Çizelge 3.9’da verilmiştir. Çizelge içerisinde bulunan kısaltmalarda 1.ve 3. harf PC’sunu 2. harf mineral katkı adını 4. harf inceliği 5. rakam ikame oranını, PC0, kontrol çimentosunu ifade etmektedir.

Çizelge 3.9. Katkılı çimentoların özgül ağırlık ve özgül yüzey verileri

NO	Çimento Tipi	Özgül Ağırlık (g /cm ³)	Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)
1	PC0	3,12	3616
2	PBCi10	3,03	3979
3	PBCi20	2,94	4341
4	PBCi30	2,85	4704
5	PBCk10	3,03	3717
6	PBCk20	2,93	3818
7	PBCk30	2,84	3919
8	PTCi10	3,04	3491
9	PTCi20	2,96	3365
10	PTCi30	2,87	3240
11	PTCk10	3,03	3421
12	PTCk20	2,94	3226
13	PTCk30	2,85	3031

Aşama 4: Hazırlanan çimentolarla öncelikle hamur deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çimentonun fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla TS EN 196-3’e göre standart kıvam tayini, priz süresi ve genleşme deneyleri yapılmıştır. Deney açıklamaları bölüm 3.2.1.1’de verilmiştir.

Aşama 5: Fiziksel özellikleri belirlenen çimentoların mekanik mukavemetlerini ve reolojik davranışını belirleyebilmek amacıyla TS EN 196-1'e göre basınç dayanımı deneyleri ile ASTM C240'a göre yayılma tablası deneyi yapılmıştır. Numunelerin hazırlanışı ve deney aşamasıyla ilgili açıklamalar Bölüm 3.2.1.2'de verilmiştir.

3.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması

Çalışmada 2 farklı inceliğe sahip 2 mineral katkı ve 2 kimyasal katkı bulunmaktadır. Bu sebeple toplam 27 tip harç üretilmiştir. Üretilen harç numunelerinin referans kodları Çizelge 3.10'da verilmiştir. Çizelge 3.10'da i: 63µm elek altı malzeme, k:125 µm elek altı malzeme, B: Bayburt taşı, T: Taban külü, C0: Kontrol çimentosu, D: D tipi kimyasal katkı, R: R tipi kimyasal katkı olarak tanımlanmıştır. Referans no'ları verilirken mineral katkıların çimentoya ikame oranları % olarak kodun sonunda belirtilmiştir.

Çizelge 3.10. Çimentoların mineral katkı oranına ve akışkanlaştırıcı tipine göre kodlanması

Kontrol Çimentosu	C0							
Mineral Katkı Tipi	D				R			
B	63 µm incelikli (İ)				63 µm incelikli (İ)			
	0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	30%
	BiD0	BiD10	BiD20	BiD30	BiR0	BiR10	BiR20	BiR30
	125 µm incelikli (K)				125 µm incelikli (K)			
	0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	30%
	BkD0	BkD10	BkD20	BkD30	BkR0	BkR10	BkR20	BkR30
Mineral Katkı Tipi	D				R			
T	63 µm incelikli (İ)				63 µm incelikli (İ)			
	0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	30%
	TiD0	TiD10	TiD20	TiD30	TiR0	TiR10	TiR20	TiR30
	125 µm incelikli (K)				125 µm incelikli (K)			
	0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	30%
	TkD0	TkD10	TkD20	TkD30	TkR0	TkR10	TkR20	TkR30

3.2.1.1. Çimentonun standart kıvam, priz başlangıç-bitiş sürelerinin tayini ve hacim sabitliği deneyleri

Kıvam deneyleri:

Çalışmada üretilen çimentoların akışkanlaştırıcılar etkisinde standart kıvamını belirlemek amacıyla öncelikle çimento hamurları TS EN 196-3'e göre hazırlanmıştır. Hazırlanan her bir çimento karışımıyla çimento hamurlarının hazırlığında öncelikle karışım suyuna bağlayıcı malzeme ağırlığınca 0,02 oranında katılmış ve homojen görünüm oluşuncaya kadar karıştırılmıştır. Çözelti halindeki karışım suyu mikser konulduktan sonra her bir çimento hamuru için gerekli katı malzemeler otomatik mikserin kovalasına 10 s içerisinde konulmuş ve cihaz çalıştırılmıştır. Cihaz 90 s düşük hızla (140 rpm) çalıştırıldıktan sonra durdurulmuş ve dinlenmeye alınmıştır. Bu sırada mikser kovalasına yapışan çimento hamuru bir spatula ile toplanmıştır. Toplanan çimento hamuru tekrar 90 s yüksek hızda (280 rpm) karıştırılmıştır. Böylece toplam 180 s karışan çimento hamuru $18\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki laboratuvar ortamında, daha önceden hazırlanan cam levha üzerine konulmuş Vicat kalıbına yerleştirilmiştir (Bknz Şekil Ek B.3) Çizelge 3.11'de standart kıvam ve priz süresi için malzeme miktarları verilmiştir.

Çizelge 3.11. Standart kıvam ve priz süresi için malzeme miktarları

NO	Numune Kodu	Çimento Miktarı(g)	Bayburt Taşı (g)	Taban Külü (g)	Kimyasal Katkı
1	C0	500	0	0	-
2	CD	500	0	0	D
3	CR	500	0	0	R
4	BiD10	450	50	0	D
5	BiD20	400	100	0	D
6	BiD30	350	150	0	D
7	BkD10	450	50	0	D
8	BkD20	400	100	0	D
9	BkD30	350	150	0	D
10	BiR10	450	50	0	R
11	BiR20	400	100	0	R
12	BiR30	350	150	0	R
13	BkR10	450	50	0	R
14	BkR20	400	100	0	R
15	BkR30	350	150	0	R
16	TiD10	450	0	50	D
17	TiD20	400	0	100	D
18	TiD30	350	0	150	D
19	TkD10	450	0	50	D
20	TkD20	400	0	100	D
21	TkD30	350	0	150	D
22	TiR10	450	0	50	R
23	TiR20	400	0	100	R
24	TiR30	350	0	150	R
25	TkR10	450	0	50	R
26	TkR20	400	0	100	R
27	TkR30	350	0	150	R

Çizelge 3.11’de tanımlanan her bir karışım ,standart kıvam tayini için su miktarlarında değişimler yapılarak TS EN 196-3 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bunun için Vicat sondasına 1cm çapındaki Vicat iğnesi takılmıştır. Harç numune yerleştirilmeden önce Vicat halkası ve taban camı ince yağ ile hafifçe yağlanmıştır. Harç Vicat halkasına yerleştirildikten sonra Vicat halkası sonda altına konulmuştur. Sonda numuneyle teğet olacak şekilde hamurun üstüne getirilmiştir. Çimento hamurunun hazırlanmaya

başladığından itibaren 240 s geçmeyecek şekilde numune sonda altına yerleştirilmiştir ve sonra Vicat halkası serbest bir şekilde bırakılmıştır. Sonda ile numunenin tabanı arasındaki mesafe 30 s içinde 5 ± 2 mm mesafede olduğunda kıvam(su miktarı) belirlenmiştir. Elde edilen standart kıvam değerleri (s/b oranları) Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Priz başlangıcı ve bitişi deneyleri:

Çalışmada üretilen çimentoların akışkanlaştırıcı etkisinde priz süresini belirlemek amacıyla çimento hamurları TS EN 196-3’e göre hazırlanmıştır. Çimento hamurlarının hazırlığında öncelikle kıvam deneyi sonucunda belirlenen su miktarları, bağlayıcı malzeme ile ağırlığınca 0,02 oranında karıştırıldıktan sonra karışım suyu miksera konulmuştur. Ardından her bir çimento hamuru için gerekli katı malzemeler otomatik mikserin kovasına 10 s içerisinde yerleştirilmiş ve cihaz çalıştırılmıştır. Cihaz 90 s düşük hızla çalıştırıldıktan sonra durdurulmuş ve dinlenmeye alınmıştır. Bu sırada mikser kovasına yapışan çimento hamuru bir spatula ile toplanmıştır. Toplanan çimento hamuru tekrar 90 s yüksek hızla karıştırılmıştır. Böylece toplam 180 s karışan çimento hamuru 18 ± 2 °C sıcaklıktaki laboratuvar ortamında, daha önceden hazırlanan cam levha üzerine konulmuş Vicat kalıbına yerleştirilmiştir (Bknz Şekil Ek B.3).

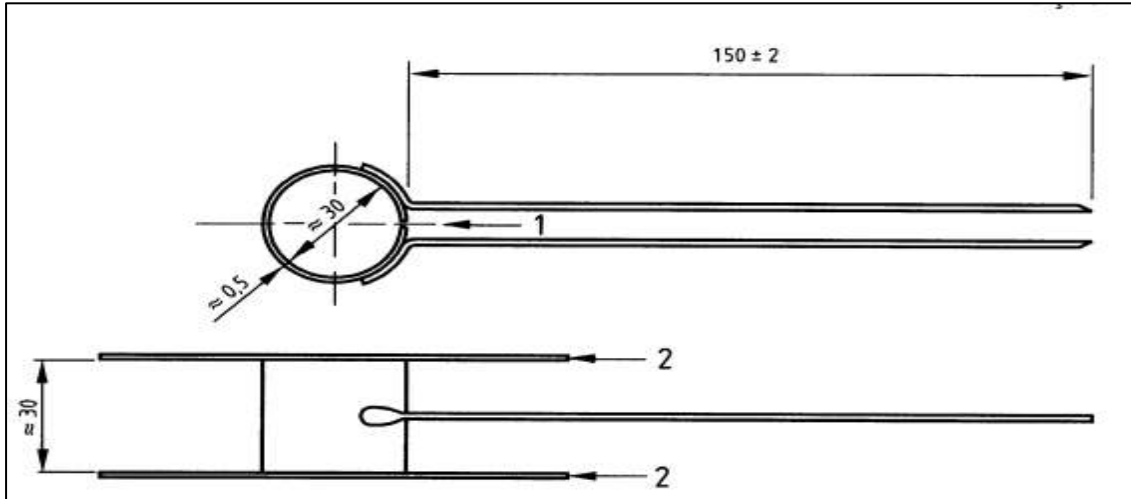
Priz süresi tayini içinde Vicat aletinin sonda olan ucu yerine uzunluğu en az 45 mm ve çapı $1,13 \pm 0,05$ mm olan iğne takılmıştır. Hazırlanan çimento hamuru numuneleri Vicat halkası içinde yüzeyi düzlenmiş Vicat aletinin altına konulmuştur. Numunelerin karışıma başladığı andan itibaren her 10 dk’da bir Vicat iğnesi numunenin üzerine serbest düşmeyle (kendi ağırlığınca) hamurun içine batması sağlanmıştır. İğnenin hamur içine batma miktarı 4 ± 1 mm oluncaya dek her 10 dk’da bir batırılmıştır. Bu mesafe sağlandığında priz başlama süresi olarak kayıt edilmiştir. Daha sonra numune Vicat halkası ile birlikte ters çevrilmiş ve 30 dk arayla okumalar yapılmıştır. Bu sırada iğne her batırılma sırasında aynı yere gelmeyecek şekilde numune çevrilerek farklı okumalar gerçekleştirilmiştir. Priz sonu süresi iğne numunenin üstünde ilk 0,05mm’ye kadar

batabildiği an olarak belirlenmiştir. Elde edilen priz başlangıç-bitişleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Hacim sabitliği deneyleri:

Hacim genleşme deneyi TS EN 196-3’ e göre yapılmıştır. Hacim genleşmesi deneyinde Çizelge 3.11’de verilen malzeme miktarları %20 oranında azaltılarak, plastik bir kabın içerisine konulmuş ve malzemeler 5 dk süreyle homojen karışım sağlamak amacıyla karıştırılmıştır. Böylece hazırlanan çimento hamurları LeChatelier aletine yerleştirilmiştir.

Bu deney için LeChatelier ve kaynatma kazanı aleti kullanılmıştır. Her bir grup için 3’er kalıp olacak şekilde kontrol çimentosu ve ikameli çimento hamurları LeChatelier aletine konulmuş (Şekil 3.4) ve 24 saat 20 ± 2 °C sıcaklıkta kür havuzu içinde bekletildikten sonra kalıbın uçlarının açıklığı ölçülmüştür. Sonra alet su dolu kaynatma kazanına konularak kaynamış suda 3 saat bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda kalıbın uçları arasındaki farklar tekrar ölçülmüş toplam genleşme (3.1) eşitliği ile tayin edilmiştir.



Şekil 3.4. Le Chatelier halkası

$$\text{Toplam hacim genleşmesi} = C-A$$

(3.1)

A = 24 saat suda bekletilen çimento hamurunun sudan çıkarıldıktan sonraki ilk genleşme miktarı.

C= 3 saat kaynatıldıktan sonraki, laboratuvar ortam sıcaklığına getirilen çimento hamurunun genleşme miktarı. Elde edilen hacim genleşmesi sonuçları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

3.2.1.2. Mekanik mukavemet deneyleri

Basınç Dayanımı Tayini Deneyi:

Basınç dayanımı deneylerinde kullanmak üzere her bir gruptan 3’er adet 40x40x160 mm boyutlarında standart harç numuneler (Bknz Şekil Ek B.5) TS EN 196-1’e göre hazırlanmıştır.

Hazırlanan harç numunelerinin malzeme karışım miktarları Çizelge 3.12’de verilmiştir. Her bir grup harç numunesi için Çizelge 3.12’de belirtilen çimento, BT ve TK miktarları 0,01gr hassasiyetindeki tartı (Bknz Şekil Ek B.2) ile tartıldıktan sonra temiz bir kaba konulmuştur. Kaptaki malzeme homojen dağılımı sağlayabilmek için 1 dk süreyle karıştırılmıştır. Çimento ve mineral katkılarla hazırlanan karışım, mikserin kovasında bulunan 225 ml su ve 9 gr kimyasal katkılı homojen karışıma 10 s içinde döküldükten sonra otomatik karıştırıcı karıştırılmıştır. 30 s düşük devirde çalışan karıştırıcıya 30 s sonunda kum eklenmeye başlanmıştır. Karıştırma sürerken 30 s içinde harca kum ilave edilmiştir. Kum ilavesinden hemen sonra 30 s süreyle yüksek hızda karıştırma işlemi sürdürülmüştür. Toplam 1,5 dk sonra mikser 15 s süreyle dinlenmeye alınmış ve bu sırada mikser kovasının kenarına yapışan harçlar spatula ile temizlenmiştir. Harç bu süre içerisinde kovada harmanlanarak homojen bir karışım sağlanmaya çalışılmıştır. Bu işlem bittikten sonra (1 dk 45 s sonra) karıştırıcı 1 dk süreyle yüksek hızda çalıştırılmıştır. Harç halindeki çimento harcı daha önceden sarsma cihazına (Bknz Şekil Ek B.8) yerleştirilmiş olan çelik kalıba %75’i daha sonra tamamı dolacak şekilde konulmuştur. Kalıpta bulunan harç dakikada 60 düşey darbe hareketi yapan sarsma makinesinde 60 s süreyle sıkıştırılmıştır. İki kademe halinde sıkışan harç numuneler sarsma cihazından alınarak 18 ± 2 °C sıcaklıktaki laboratuvar ortamında 24

saat süreyle dinlendirilmişlerdir. 24 saat sonunda kalıplar sökülerek, her numune grubundan 3 adet numune kür havuzuna (Bknz Şekil Ek B.7) konulmuştur. Hazırlanan numunelerin 2, 7, 28 günlük basınç dayanımı gelişimleri incelenmiştir.

Bu deney için Yüksel Kaya Ltd. Şti üretimi 20 ton kapasiteli hidrolik çimento presi kullanılmıştır (Bknz Şekil Ek B.6). Bu çalışmada 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler öncelikli olarak eğilme dayanımına tabi tutularak 2 eşit parçaya ayrılmıştır. Daha sonra her bir parça sabit bir yükleme hızıyla teste tabi tutulmuştur. Yükleme hızı 2,4 MPa/s olarak seçilmiştir. Farklı kür günlerine tabi tutulan 27 farklı numunenin her birini temsil eden basınç dayanımı değeri her bir seride üretilen 3 adet numunenin kırılması sonucu elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.12. Harç numunelerinin malzeme karışım miktarları

NO	Numune Kodu	Çimento Miktarı(g)	Bayburt Taşı (g)	Taban Külü (g)	Standart kum (gr)	Su (ml)	D-R (gr)
1	C0	450	0	0	1350±5	225	-
2	CD	450	0	0	1350±5	225	9
3	CR	450	0	0	1350±5	225	9
4	BiD10	405	45	0	1350±5	225	9
5	BiD20	360	90	0	1350±5	225	9
6	BiD30	315	135	0	1350±5	225	9
7	BkD10	405	45	0	1350±5	225	9
8	BkD20	360	90	0	1350±5	225	9
9	BkD30	315	135	0	1350±5	225	9
10	BiR10	405	45	0	1350±5	225	9
11	BiR20	360	90	0	1350±5	225	9
12	BiR30	315	135	0	1350±5	225	9
13	BkR10	405	45	0	1350±5	225	9
14	BkR20	360	90	0	1350±5	225	9
15	BkR30	315	135	0	1350±5	225	9
16	TiD10	405	0	45	1350±5	225	9
17	TiD20	360	0	90	1350±5	225	9
18	TiD30	315	0	135	1350±5	225	9
19	TkD10	405	0	45	1350±5	225	9
20	TkD20	360	0	90	1350±5	225	9
21	TkD30	315	0	135	1350±5	225	9
22	TiR10	405	0	45	1350±5	225	9
23	TiR20	360	0	90	1350±5	225	9
24	TiR30	315	0	135	1350±5	225	9
25	TkR10	405	0	45	1350±5	225	9
26	TkR20	360	0	90	1350±5	225	9
27	TkR30	315	0	135	1350±5	225	9

3.2.1.3. Yayılma tablası deneyi

Bu deney ASTM C240'a göre yapılmıştır. Öncelikle yağlanmış kalıp yayılma tablasının ortasına yerleştirilmiştir. Çimento harç makinesinde hazırlanan harçtan 20 dm³'lük deney numunesi alınarak, harç kalıba 2 eşit parça halinde yerleştirilmiş ve her tabaka sıkıştırma çubuğu ile 16 defa çarpma işlemi uygulanarak sıkıştırılmıştır. Kalıbın

üstünden taşan harç bir spatula yardımıyla alınıp üst yüzey düzeltildikten sonra kalıp el tutamaklarından tutularak düşey olarak yukarıya doğru çekilmiştir. Tablanın yan tarafında bulunan kol sayesinde numuneye 5 s de bir vuruş olmak üzere toplam 25 vuruş yapılarak harcın yayılması sağlanmıştır. Düşürme işlemi bittikten sonra tablaya yayılan harç numunesinin boyu bir cetvel yardımıyla ölçülerek kaydedilmiştir (Bknz. Ek Şekil B.4). Elde edilen standart yayılma deneyi sonuçları Çizelge 4.23’de verilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde çimento hamuru ve harcı için bulunan sonuçlar 3 başlık altında verilmiştir. Bunlar fiziksel özellikler, mekanik özellikler ve reolojik özelliklerdir.

4.1. Fiziksel özellikler

4.1.1. Kıvam tayini deney sonuçları

Kontrol çimentoları C0, CD, CR ile BT ve TK katkılı çimentoların standart kıvam sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. 63 ve 125 µm incelikli TK ve BT katkılı çimentolar ile kontrol çimentoların standart kıvam tayini sonuçları

Kimyasal Katkı Tipi	Numune Kodu	İkame (%)	Su %	Kimyasal Katkı Tipi	Numune Kodu	İkame (%)	Su %
Kontrol	C0	0	30,5	Kontrol	C0	0	30,5
D	CD	0	24,7	R	CR	0	22,6
	Bi	10	26,5		Bi	10	25,6
		20	28,3			20	27,6
		30	30,9			30	30,7
	Bk	10	26,0		Bk	10	25,1
		20	27,9			20	26,9
		30	30,3			30	29,1
	Ti	10	24,5		Ti	10	23,9
		20	25,2			20	24,5
		30	26,3			30	25,8
	Tk	10	23,7		Tk	10	22,7
		20	23,9			20	23,3
		30	24,2			30	23,7

B_i: 63 µm incelikli Bayburt taşı, B_k: 125 µm incelikli Bayburt taşı, T_i: 63 µm incelikli Taban külü, T_k: 125 µm incelikli Taban külü

Yapılan çalışmada bulunan sonuçlar neticesinde C0 çimento numunesine göre,

- CD kontrol çimentosu %5,8 oranında, CR kontrol çimentosu %7,9 oranında su azaltmıştır.
- BiD10, BiD20 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %4, %2,2 oranında azalmış, BiD30 kodlu numunenin %0,4 oranında artmıştır,
- BkD10, BkD20, BkD30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %4,5, %2,6, %0,2 oranında azalmıştır,
- BiR10, BiR20 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %4,9, %2,9 oranında azalmış, BiR30 kodlu numunenin %0,2 oranında artmıştır,
- BkR10, BkR20, BkR30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %5,4, %3,6, %1,4 oranında azalmıştır,
- TiD10, TiD20, TiD30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %6, %5,3, %4,2 oranında azalmıştır,
- TkD10, TkD20, TkD30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %6,8, %6,6, %6,3 oranında azalmıştır,
- TiR10, TiR20, TiR30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %6,6, %6, %4,7 oranında azalmıştır,
- TkR10, TkR20, TkR30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %7,8, %7,2, %6,8 oranında azalmıştır.

CD kontrol çimento numunesine göre,

- CR kontrol çimentosu %2,1 oranında su azaltmıştır, C0 kontrol çimentosu %5,8 oranında su arttırmıştır,
- BiD10, BiD20, BiD30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %1,8, %3,6, %6,2 oranında artmıştır,
- BkD10, BkD20, BkD30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %1,3, %3,2, %5,6 oranında artmıştır,
- BiR10, BiR20, BiR30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %0,9, %2,9, %6 oranında artmıştır,

- BkR10, BkR20, BkR30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %0,4, %2,2, %4,4 oranında artmıştır,
- TiD10, TiD20, TiD30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %0,2 oranında azalmış, %0,5, %1,6 oranında artmıştır,
- TkD10, TkD20, TkD30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %1, %0,8, %0,5 oranında azalmıştır,
- TiR10, TiR20 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %0,8, %0,2 azalmış ve TiR30 kodlu numunelerin su ihtiyacı %1,1 oranında artmıştır,
- TkR10, TkR20, TkR30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %2, %1,4, %1 oranında azalmıştır.

CR kontrol çimento numunesine göre,

- CD kontrol çimentosu %2,1 oranında, C0 kontrol çimentosu %7,9 oranında su arttırmıştır,
- BiD10, BiD20, BiD30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %3,9, %5,7, %8,3 oranında artmıştır,
- BkD10, BkD20, BkD30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %3,4, %5,3, %7,7 oranında artmıştır,
- BiR10, BiR20, BiR30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %3, %5, %8,1 oranında artmıştır,
- BkR10, BkR20, BkR30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %2,5, %4,3, %6,5 oranında artmıştır,
- TiD10, TiD20, TiD30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %1,9, %2,6, %3,7 oranında artmıştır,
- TkD10, TkD20, TkD30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %1,1, %1,3, %1,6 oranında artmıştır,
- TiR10, TiR20, TiR30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %1,3, %1,9, %3,2 oranında artmıştır,
- TkR10, TkR20, TkR30 kodlu numunelerin su ihtiyacı sırasıyla %0,1, %0,7, %1,1 oranında artmıştır.

Çimentoya katılan BT ve TK oranı artışına bağlı olarak, standart kıvamın elde edilebilmesi için gereken su miktarlarında artış olmuştur. Bu artışın en önemli sebeplerinden birisi yüksek ikame oranları içindeki gözenekli yapı olabilir. Genel olarak bakıldığında BT ikameli çimentoların, TK ikameli çimentolardan daha fazla su ihtiyacına sahip olduğu görülmüştür. Çimento süspansiyonlarının parçacıklararası potansiyelleri ve çökelme davranışlarında süperakışkanlaştırıcıların etkisi incelenmiş ve su oranının çimentolarda kimyasal yapı, özgül yüzey ve porozite gibi değerlere bağlı olarak değişebileceği belirtilmiştir (Yang et al. 1998).

D tipi katkılı çimentoların, R tipi katkılı çimentolardan %1-5 oranında daha fazla su ihtiyacına sahip olduğu görülmüştür. Böylece D ve R tip katkıların standart kıvamda hemen hemen aynı etkiyi gösterdiği gözlemlenmiştir.

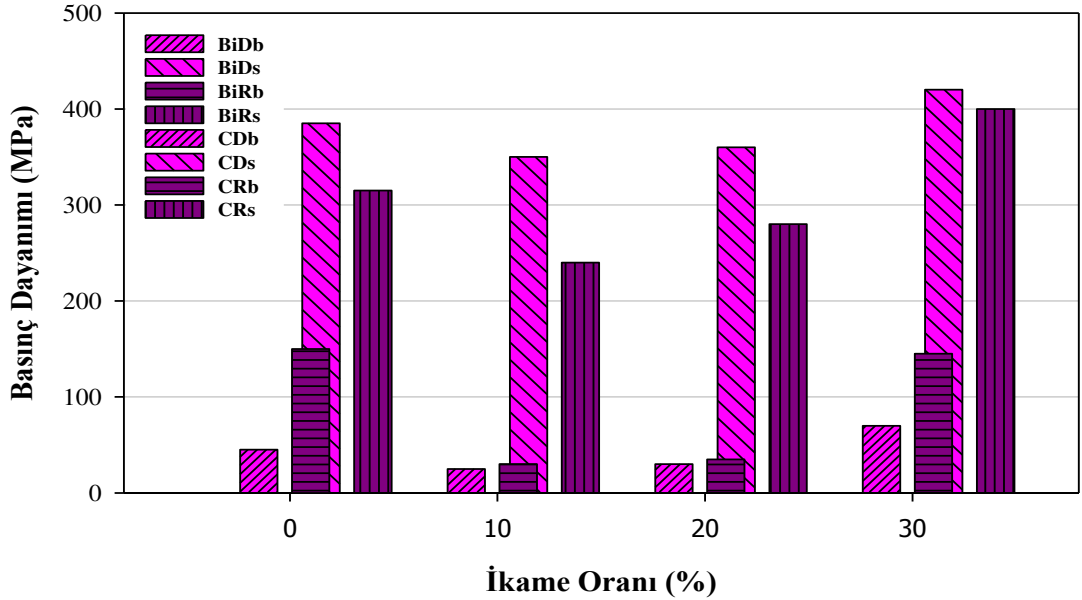
4.1.2. Priz başlangıcı ve priz sonu tayini deney sonuçları

BT, TK ve iki farklı katkı tipiyle hazırlanan çimento hamurlarının priz başlangıç ve bitiş değerleri Çizelge 4.2 ve Şekil 4.1-Şekil 4.12’de verilmiştir. Şekiller içerisinde yer alan kısaltmalarda 1. harf mineral katkıyı, 2. harf inceliği 3. harf kimyasal katkıyı, 4. harf priz başlangıç-bitiş; kontrol çimentoları ise C0, CD, CR olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 4.2. Priz başlangıç ve bitiş sonuçları

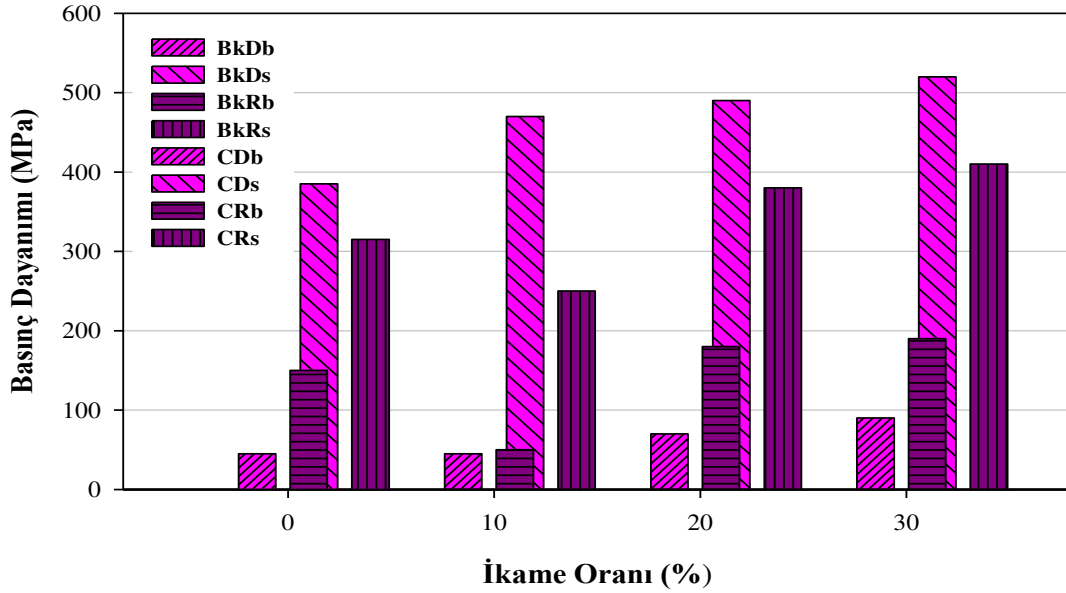
Kimyasal Katkı Tipi	Numune Kodu	İkame %	Priz Süreleri (dk)		Kimyasal Katkı Tipi	Numune Kodu	İkame %	Priz Süreleri (dk)	
			Başlangıç	Bitiş				Başlangıç	Bitiş
Kontrol	C0	0	170	310	Kontrol	C0	0	170	310
D	CD	0	45	385	R	CR	0	150	315
	Bi	10	25	350		Bi	10	30	240
		20	30	360			20	35	280
		30	70	420			30	145	400
	Bk	10	45	470		Bk	10	50	250
		20	70	490			20	180	380
		30	90	520			30	190	410
	Ti	10	45	350		Ti	10	200	330
		20	65	400			20	240	350
		30	100	450			30	265	415
	Tk	10	50	380		Tk	10	215	375
		20	115	410			20	260	400
		30	140	460			30	285	420

Bi: 63 µm incelikli Bayburt taşı, B_K: 125 µm incelikli Bayburt taşı, Ti: 63 µm incelikli Taban külü Tk: 125 µm incelikli Taban külü



Şekil 4.1. 63 µm incelikli BT ikameli, D-R tipi kimyasal katkıli çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri

- BiD10, BiD20 ve BiD30 kodlu numunelerin priz başlangıçları, BiR10, BiR20 ve BiR30 kodlu numunelerden sırasıyla 5 dk, 5 dk ve 75 dk daha erken başlarken; priz sonları ise 110 dk, 80 dk ve 20 dk daha geç bitmiştir.
- CD kontrol numunesinin priz başlangıcı, BiD10, BiD20 ve BiD30 kodlu numunelerden sırasıyla 20 dk, 15 dk daha geç, 25 dk daha erken başlarken; priz sonu 35dk, 25dk daha geç, 35 dk daha erken bitmiştir.
- CR kontrol numunesinin priz başlangıcı, BiR10, BiR20 ve BiR30 kodlu numunelerden sırasıyla 120dk, 115dk ve 5dk daha geç başlarken, priz sonu ise 75dk, 35 dk daha geç, 85 dk daha erken bitmiştir.

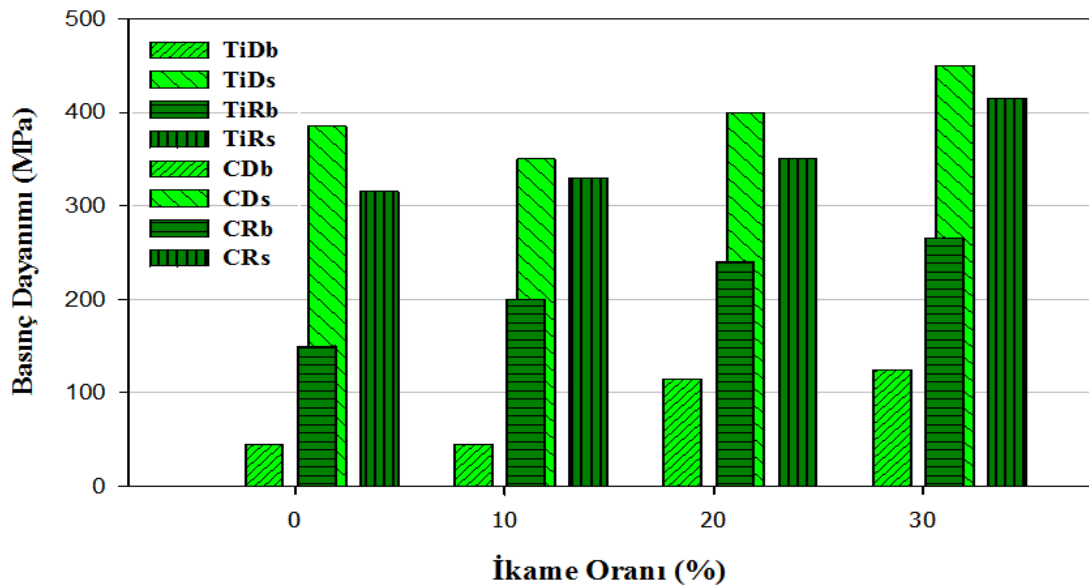


Şekil 4.2. 125 µm incelikli BT ikameli, D-R tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri

- BkD10, BkD20 ve BkD30 kodlu numunelerin priz başlangıçları, BkR10, BkR20 ve BkR30 kodlu numunelerden sırasıyla 5 dk, 110 dk ve 100 dk daha erken başlarken; priz sonları ise sırasıyla 220 dk, 110 dk ve 110 dk daha geç bitmiştir.
- CD kontrol numunesinin priz başlangıcı, BkD10, BkD20 ve BkD30 kodlu numunelerden sırasıyla, 0 dk, 25dk, 45 dk daha erken başlarken; priz sonu 85 dk, 105 dk, 135 dk daha erken bitmiştir.

- CR kontrol numunesinin priz başlangıcı, BkR10, BkR20 ve BkR30 kodlu numunelerden sırasıyla, 100 dk geç, 30 dk ve 40 dk daha erken başlarken; priz sonu 65 dk geç, 65 dk ve 95 dk daha erken bitmiştir.

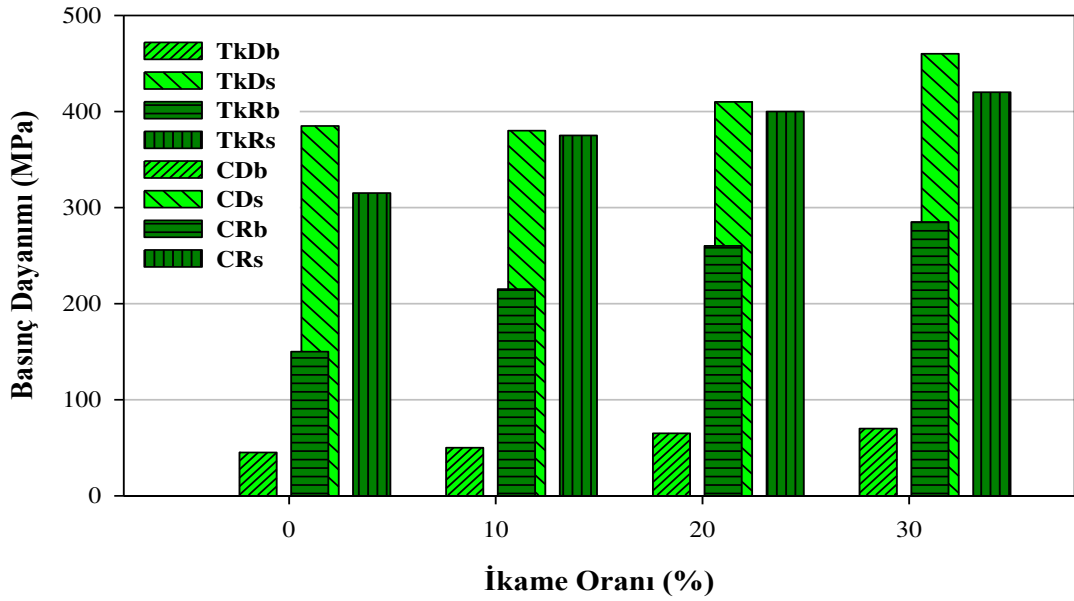
Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de görüldüğü gibi BT ikame oranı arttıkça her iki katkı tipinin, priz başlangıç ve bitiş sürelerinde artış meydana gelmiştir Bunun nedeni olarak ikame oranı artışı ile birlikte, PC miktarının azaltılması ve böylece erken dayanımı sağlayan trikalsiyum silikat oranındaki azalış gösterilebilir. Tüm BT ikameli numunelerde D tip katkıyla oluşturulan çimento hamurları, R tip katkıyla oluşturulan çimento hamurlarından daha erken priz alırken, priz bitişleri de daha geç olmuştur.



Şekil 4.3. 63 µm incelikli TK ikameli, D-R tipi kimyasal katkıli çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri

- TiD10, TiD20 ve TiD30 kodlu numunelerin priz başlangıçları, TiR10, TiR20 ve TiR30 kodlu numunelerden sırasıyla 155 dk, 175 dk ve 165 dk daha erken başlarken; priz sonları da sırasıyla 20 dk, 50 dk ve 35 dk daha geç bitmiştir.
- CD kontrol numunesinin priz başlangıcı, TiD10, TiD20 ve TiD30 kodlu numunelerden sırasıyla, 0 dk, 20 dk, 55 dk daha erken başlarken; priz sonları da 35 dk geç, 15 dk ve 65 dk daha erken bitmiştir.

- CR kontrol numunesinin priz başlangıcı, TiR10, TiR20 ve TiR30 kodlu numunelerden sırasıyla, 50 dk, 90 dk, 115 dk daha erken başlarken; priz sonları da 15dk, 35dk, 100 dk daha erken bitmiştir.

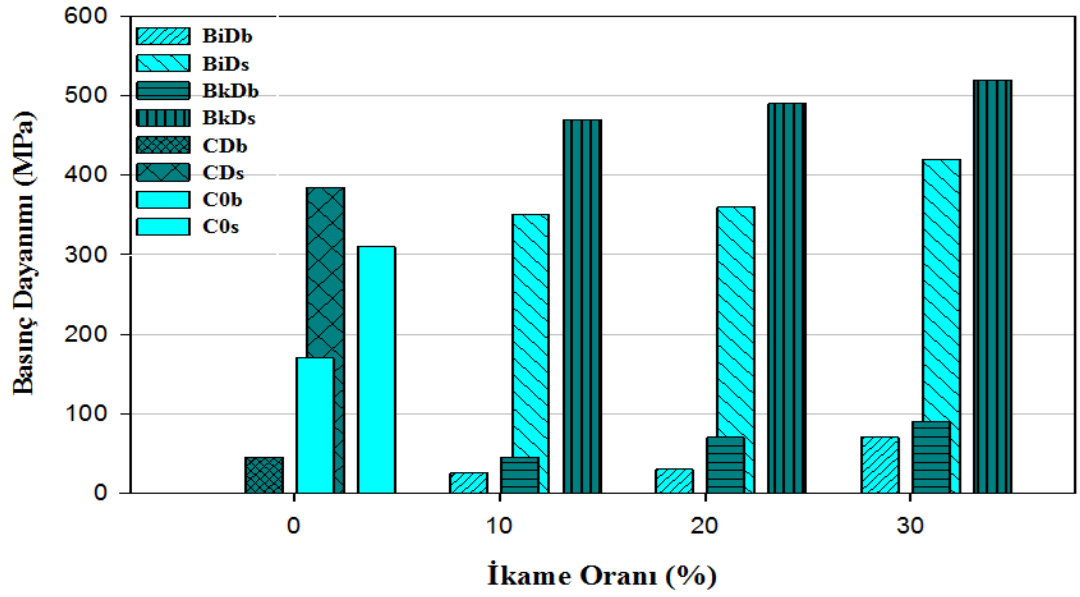


Şekil 4.4. 125 µm incelikli TK ikameli, D-R tipi kimyasal katkıli çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri

- TkD10, TkD20 ve TkD30 kodlu numunelerin priz başlangıçları, TkR10, TkR20 ve TkR30 kodlu numunelerden sırasıyla 165 dk, 145 dk ve 145 dk daha erken başlarken; priz sonları sırasıyla 5 dk, 10 dk ve 40 dk daha geç bitmiştir.
- CD kontrol numunesinin priz başlangıcı, TkD10, TkD20 ve TkD30 kodlu numunelerden sırasıyla, 5 dk, 70 dk, 95 dk daha erken başlarken; priz sonu da 5 dk daha geç, 25 dk ve 75 dk daha erken bitmiştir.
- CR kontrol numunesinin priz başlangıcı, TkR10, TkR20 ve TkR30 kodlu numunelerden sırasıyla, 65 dk, 110 dk, 135 dk daha erken başlarken; priz sonu da 60 dk, 85 dk, 105 dk daha erken bitmiştir.

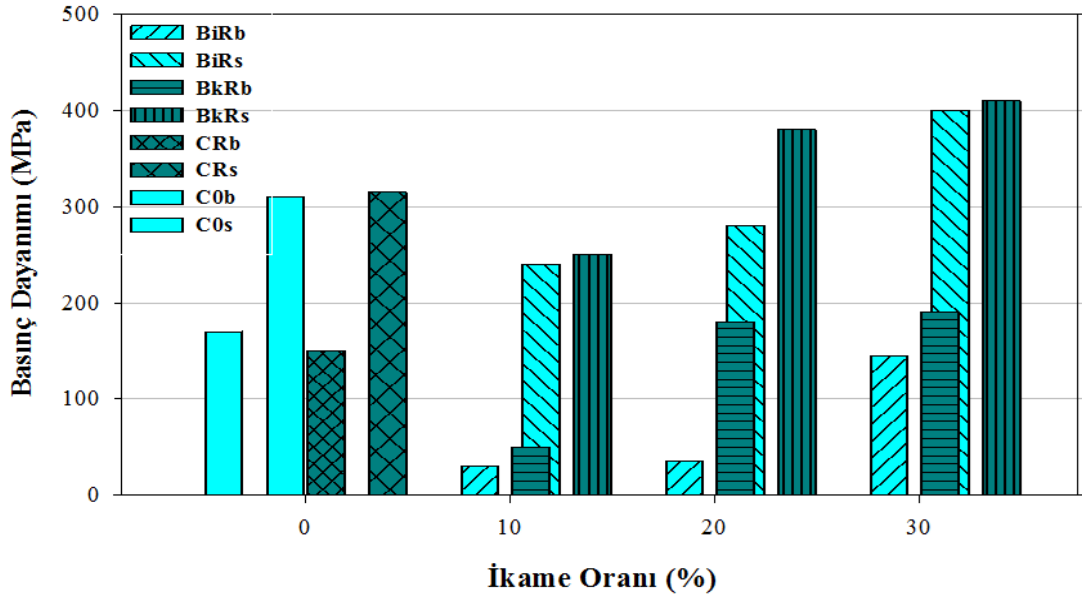
Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de görüldüğü gibi TK ikame oranı arttıkça her iki katkı tipinde de priz başlangıcı ve sonu sürelerinde artış meydana gelmiştir. Bunun nedeni olarak ikame oranı artışı ile birlikte, PC miktarının azaltılması ve böylece erken dayanımı sağlayan

trikalsiyum silikat oranındaki azalış gösterilebilir. Tüm TK ikameli numunelerde D tip katkıyla oluşturulan çimento hamurları, R tip katkıyla oluşturulan çimento hamurlarından daha erken priz alırken, priz bitişleri ise daha geç olmuştur.



Şekil 4.5. 63 ve 125 μ m incelikli BT ikameli, D tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri

- BiD10, BiD20 ve BiD30 kodlu numunelerin priz başlangıç-bitiş süreleri BkD10, BkD20 ve BkD30 kodlu numunelerden sırasıyla 20 dk, 40 dk ve 20 dk erken başlayıp, 120 dk, 130 dk ve 100 dk daha erken bitmiştir.

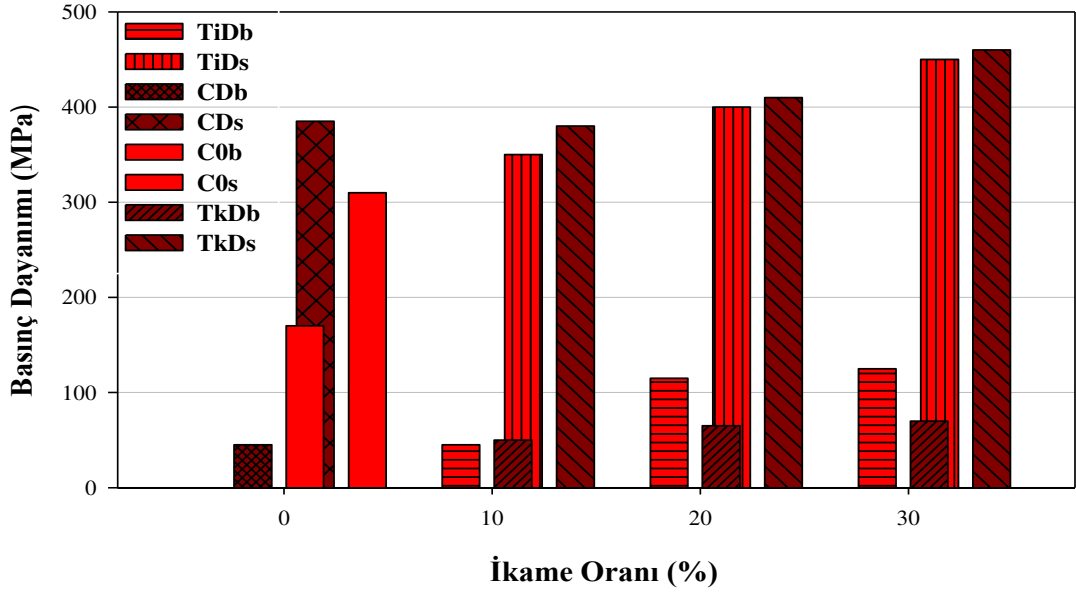


Şekil 4.6. 63 μ m ve 125 μ m incelikli BT ikameli, R tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri

- BiR10, BiR20 ve BiR30 kodlu numunelerin priz başlangıç-bitiş süreleri, BkR10, BkR20 ve BkR30 kodlu numunelerden sırasıyla 20 dk, 145 dk ve 45 dk daha erken başlayıp; 10 dk, 100 dk ve 10 dk daha erken bitmiştir.

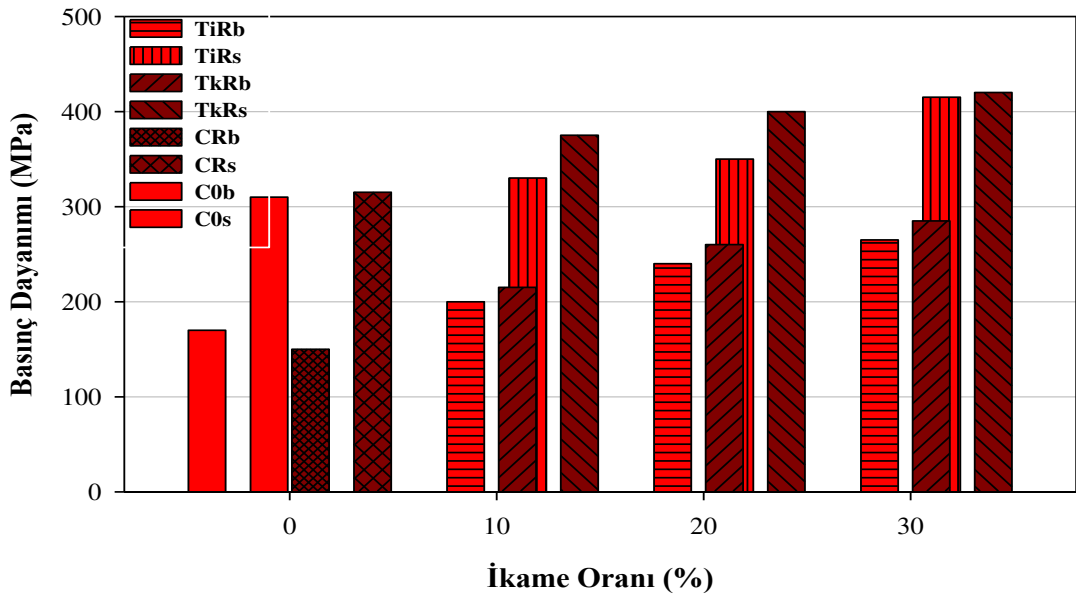
Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da görüldüğü gibi BT ikame oranı arttıkça her iki tip katkıda da priz başlangıç ve bitiş sürelerinde artış meydana gelmiştir. Bunun nedeni olarak ikame oranı artışı ile birlikte, PC miktarının azaltılması ve böylece erken dayanımı sağlayan trikalsiyum silikat oranındaki azalış gösterilebilir.

İnce ve kaba BT’nin kullanılması ile çimento hamurlarının priz başlangıç ve bitiş sürelerinde sistematik bir artışın olduğu görülmektedir. Bu artış kaba BT’de daha fazla olmuştur. Bunun nedeni olarak özgül yüzey alanı yüksek olan ince BT’nin daha erken suyla tepkimeye girerek priz alması gösterilebilir.



Şekil 4.7. 63 ve 125 μ m incelikli TK ikameli, D tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri

- TiD10, TiD20 ve TiD30 kodlu numunelerin priz başlangıç-bitiş süreleri, TkD10, TkD20 ve TkD30 kodlu numunelerden sırasıyla 5 dk, 50 dk, 40 dk erken başlayıp; 30 dk, 10 dk ve 10 dk daha erken bitmiştir.

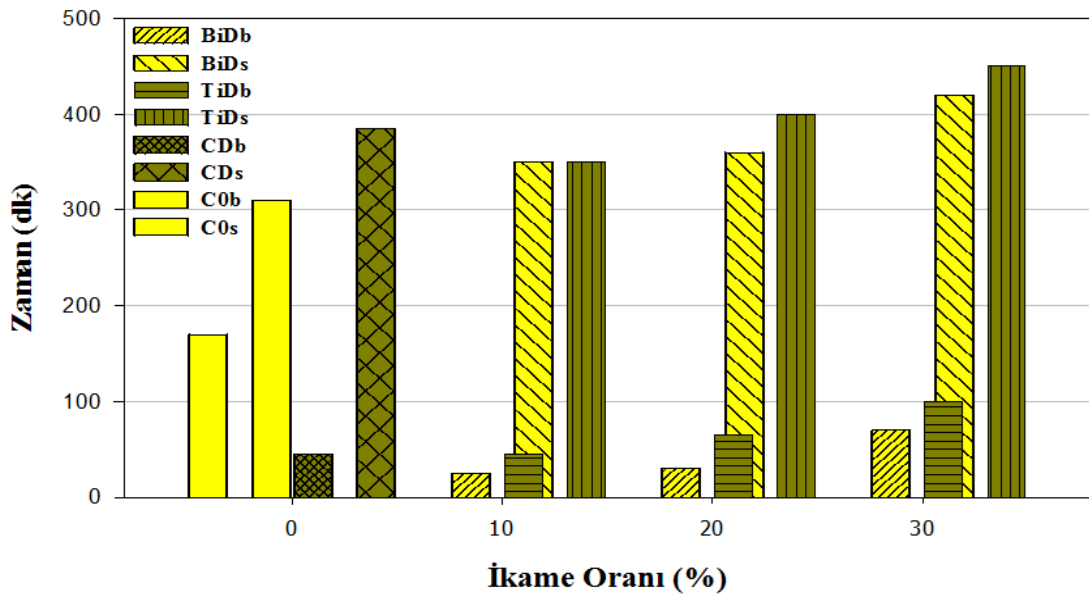


Şekil 4.8. 63 ve 125 μ m incelikli TK ikameli R tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri

- TiR10, TiR20 ve TiR30 kodlu numunelerin priz başlangıç-bitiş süreleri, TkR10, TkR20 ve TkR30 kodlu numunelerden sırasıyla 15 dk, 20 dk, 20 dk daha erken başlayıp; 45 dk, 50 dk ve 5 dk daha erken bitmiştir.

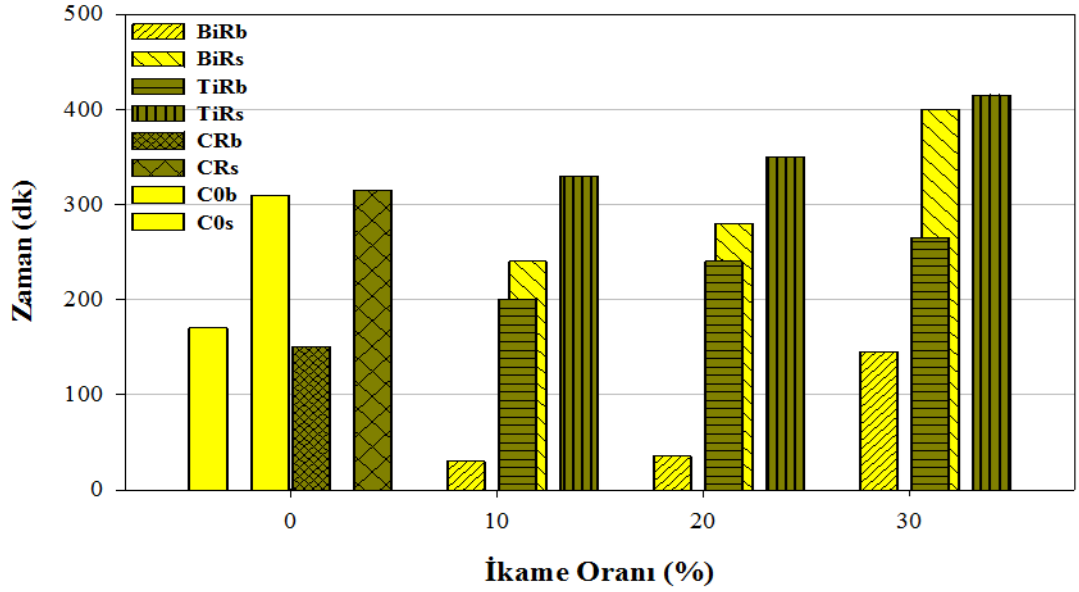
Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de görüldüğü gibi TK ikame oranı arttıkça her iki katkı tipinde de priz başlangıcı ve sonu sürelerinde artış meydana gelmiştir. Bunun nedeni olarak ikame oranı artışı ile birlikte, PC miktarının azaltılması ve böylece erken dayanımı sağlayan trikalsiyum silikat oranındaki azalış gösterilebilir.

İnce ve kaba TK’nın kullanılması ile çimento hamurunun priz başlangıç ve bitiş süresinde sistematik bir artışın olduğu görülmektedir. Bu artış kaba TK’da daha fazla olmuştur. Bunun nedeni olarak özgül yüzey alanı yüksek olan ince TK’nın daha erken suyla tepkimeye girerek priz alması gösterilebilir.



Şekil 4.9. 63 µm incelikte BT-TK ikameli, D tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri

- BiD10, BiD20 ve BiD30 kodlu numunelerin priz başlangıç-bitiş süreleri, TiD10, TiD20 ve TiD30 kodlu numunelerden sırasıyla 20 dk, 35 dk ve 30 dk daha erken başlayıp; 0 dk, 40 dk ve 30 dk daha erken bitmiştir.

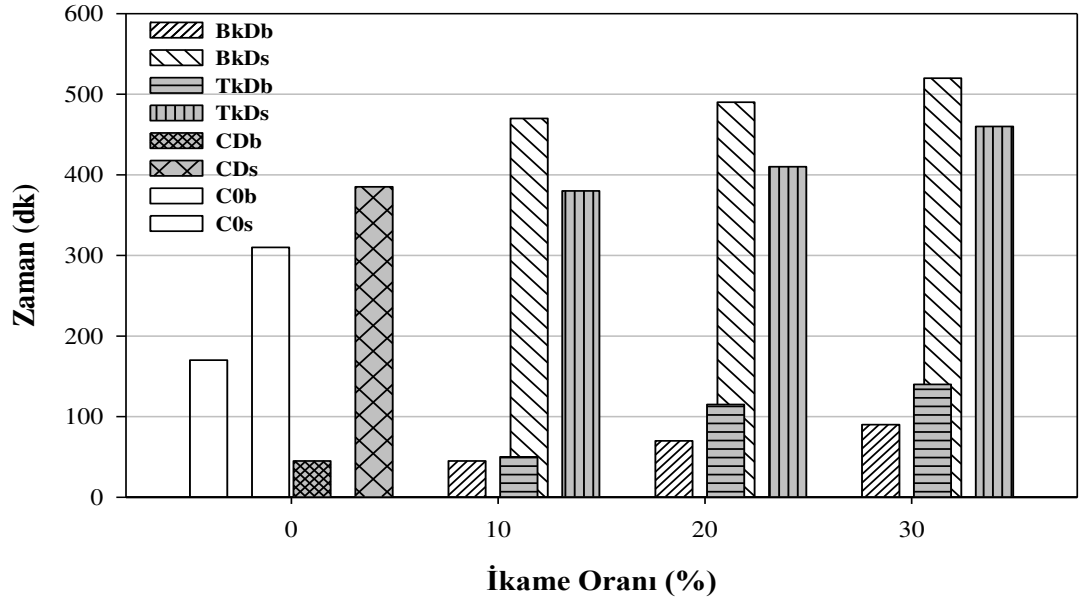


Şekil 4.10. 63 μm incelikte BT-TK ikameli R tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş değerleri

- BiR10, BiR20 ve BiR30 kodlu numunelerin priz başlangıç-bitiş süreleri, TiR10, TiR20 ve TiR30 kodlu numunelerden sırasıyla 170 dk, 205 dk ve 120 dk daha erken başlayıp; 90 dk, 70 dk ve 15 dk daha erken bitmiştir.

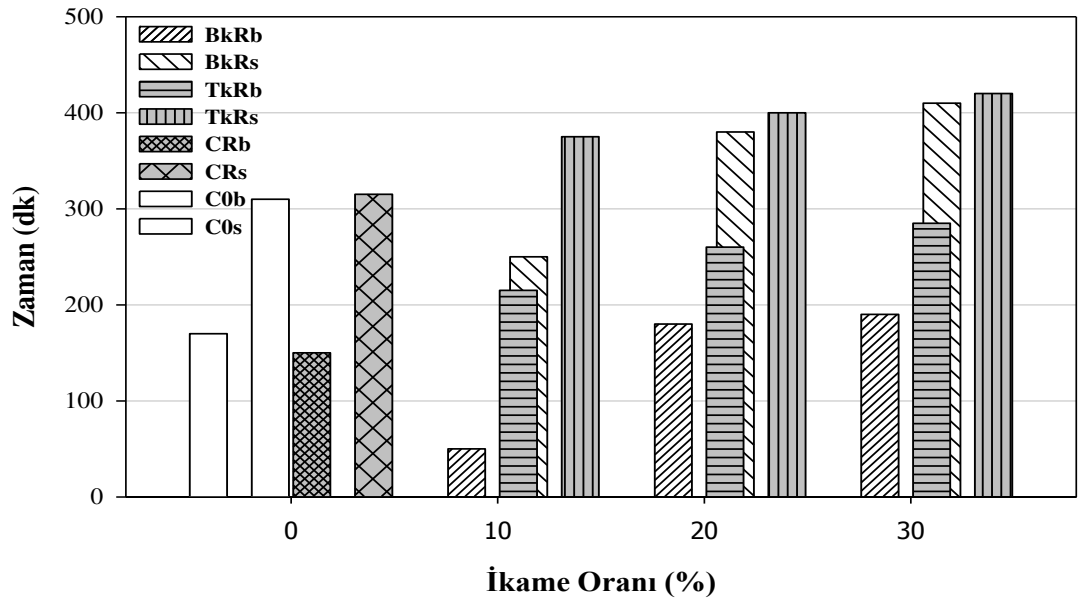
Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da görüldüğü gibi BT-TK ikame oranı arttıkça her iki katkı tipinde de priz başlangıcı ve sonu sürelerinde artış meydana gelmiştir. Bunun nedeni olarak ikame oranı artışı ile birlikte, PC miktarının azaltılması ve böylece erken dayanımı sağlayan trikalsiyum silikat oranındaki azalış gösterilebilir.

İki tip katkıda da ince BT, ince TK’dan daha erken priz almıştır. Bunun nedeni olarak özgül yüzey alanı yüksek olan ince BT’nin daha erken suyla tepkimeye girerek priz alması gösterilebilir.



Şekil 4.11. 125 µm incelikte BT-TK ikameli D tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş değerleri

- BkD10, BkD20 ve BkD30 kodlu numunelerin priz başlangıçları, TkD10, TkD20 ve TkD30 kodlu numunelerden sırasıyla 5 dk, 45 dk ve 50 dk daha erken başlayıp; priz sonlarında sırasıyla 90 dk, 80 dk ve 60 dk daha geç bitmiştir.



Şekil 4.12. 125 µm incelikte BT-TK ikameli R tipi kimyasal katkılı çimentoların priz başlangıç ve bitiş değerleri

- BkR10, BkR20 ve BkR30 kodlu numunelerin priz başlangıcı, TkR10, TkR20 ve TkR30 kodlu numunelerden sırasıyla 165 dk, 80 dk ve 95 dk daha erken başlayıp; priz sonu da sırasıyla 125 dk, 20 dk ve 10 dk daha erken bitmiştir.

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de görüldüğü gibi BT-TK ikame oranı arttıkça her iki katkı tipinde de priz başlangıcı ve sonu sürelerinde artış meydana gelmiştir. Bunun nedeni olarak ikame oranı artışı ile birlikte, PC miktarının azaltılması ve böylece erken dayanımı sağlayan trikalsiyum silikat oranındaki azalış gösterilebilir.

4.1.3. Hacim genleşmesi deney sonuçları

Portland çimentosu üretiminde hammadde olarak kalker kullanılır. Bazen kalker saf halde bulunmayıp magnezyum karbonatta içerir. Sıcaklık etkisiyle magnezyum karbonat ($MgCO_3$), MgO ve CO_2 ’e dönüşür. Aynı zamanda kalker de sıcaklık etkisiyle ayrışarak kalsiyum oksit (CaO) bileşimini oluşturur. MgO ve CaO su ile karşılaştığı zaman, magnezyum hidroksit ve kalsiyum hidroksite dönüşür. Bu kimyasal reaksiyon sırasında ısı açığa çıkarak hacim genleşmesine neden olur (Erdoğan 2004). Çizelge 4.3’de farklı incelik ve katkı türleriyle oluşturulan BT ve TK ikameli çimentoların hacim genleşmesi sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı incelik ve katkı tipiyle oluşturulan mineral katkılı (BT-TK) çimentoların hacim genleşmesi sonuçları

Kimyasal Katkı Tipi	Numune Kodu	İkame (%)	Hacim genleşmesi (mm)	Kimyasal Katkı Tipi	Numune Kodu	İkame (%)	Hacim genleşmesi (mm)
Kontrol	C0	0	1,48	Kontrol	C0	0	1,48
D	CD	0	0,44	R	CR	0	0,26
	Bi	10	1,43		Bi	10	1,33
		20	1,17			20	0,57
		30	0,49			30	0,30
	Bk	10	0,87		Bk	10	0,81
		20	0,71			20	0,55
		30	0,21			30	0,40
	Ti	10	1,45		Ti	10	1,39
		20	1,25			20	0,89
		30	1,01			30	0,53
	Tk	10	1,42		Tk	10	1,28
		20	1,19			20	1,12
		30	0,99			30	0,24

B_i: 63 µm incelikli Bayburt Taşı, B_k: 125 µm incelikli Bayburt Taşı, T_i: 63 µm incelikli Taban Külü, T_k: 125 µm incelikli Taban külü.

C0 kontrol numunesine göre,

- BiD10, BiD20 ve BiD30 kodlu numuneler sırasıyla, %3,4, %20,9 ve %66,9 oranında; BkD10, BkD20 ve BkD30 kodlu numuneler ise %41,2, %52 ve %85,8 oranında hacim genleşmesinde azalış,
- TiD10, TiD20 ve TiD30 kodlu numuneler sırasıyla, %2, %15,5 ve %31,7 oranında; TkD10, TkD20 ve TkD30 kodlu numuneler ise %4, %19,6 ve %33,1 oranında hacim genleşmesinde azalış,
- BiR10, BiR20 ve BiR30 kodlu numuneler sırasıyla, %10,1, % 61,5 ve %79,7 oranında; BkR10, BkR20 ve BkR30 kodlu numuneler ise %45,27, %62,84 ve %73 oranında hacim genleşmesinde azalış,
- TiR10, TiR20 ve TiR30 kodlu numuneler sırasıyla, %6,01, %39,9 ve %64,2 oranında; TkR10, TkR20 ve TkR30 kodlu numuneler ise %13,51, %24,32 ve %83,78 oranında hacim genleşmesinde azalış göstermiştir.

Aynı mineral katkılı numunelerde D ve R tipi akışkanlaştırıcı etkisi karşılaştırıldığında;

- BiD10, BiD20 ve BiD30 kodlu numuneler sırasıyla, BiR10, BiR20 ve BiR30 kodlu numunelerden, %7, %51,28 ve %38,8 oranında daha fazla hacim genleşmesi,
- BkD10, BkD20 ve BkD30 kodlu numuneler sırasıyla, BkR10, BkR20 ve BkR30 kodlu numunelerden, %6,9, %22,53 oranında daha fazla, %47,5 oranında daha az hacim genleşmesi,
- TiD10, TiD20 ve TiD30 kodlu numuneler sırasıyla, TiR10, TiR20 ve TiR30 kodlu numunelerden, %4,14, %28,8 ve %47,5 oranında daha fazla hacim genleşmesi,
- TkD10, TkD20 ve TkD30 kodlu numuneler sırasıyla, TkR10, TkR20 ve TkR30 kodlu numunelerden, %9,8, %5,9 ve %75,7 oranında daha fazla hacim genleşmesi göstermiştir.

D tipi ve aynı mineral katkılı numunelerde ince ve kaba etkisi karşılaştırıldığında;

- BiD10, BiD20 ve BiD30 kodlu numuneler sırasıyla, BkD10, BkD20 ve BkD30 kodlu numunelerden, %39,2, %39,3 ve %57,1 oranında daha fazla hacim genleşmesi,
- TiD10, TiD20 ve TiD30 kodlu numuneler sırasıyla, TkD10, TkD20 ve TkD30 kodlu numunelerden, %2,1, %4,8 ve %1,2 oranında daha fazla hacim genleşmesi göstermiştir.

R tipi ve aynı mineral katkılı numunelerde ince ve kaba etkisi karşılaştırıldığında;

- BiR10, BiR20 ve BiR30 kodlu numuneler sırasıyla, BkR10, BkR20 ve BkR30 kodlu numunelerden, %39,1, %3,5 oranında daha fazla ve % 25 oranında daha az hacim genleşmesi,
- TiR10, TiR20 ve TiR30 kodlu numuneler sırasıyla, TkR10, TkR20 ve TkR30 kodlu numunelerden %7,9 oranında fazla, %20,5 oranında az ve %54,7 oranında daha fazla hacim genleşmesi göstermiştir.

Farklı mineral katkılı numunelerde, D tipi akışkanlaştırıcı etkisi karşılaştırıldığında;

- TiD10, TiD20 ve TiD30 kodlu numuneler sırasıyla, BiD10, BiD20 ve BiD30 kodlu numunelerden %1,4, %6,4 ve %51,48 oranında hacim genleşmesinde artış,

- TkD10, TkD20 ve TkD30 kodlu numuneler sırasıyla, BkD10, BkD20 ve BkD30 kodlu numunelerden %38,7, %40,3 ve %21,21 oranında daha fazla hacim genleşmesi göstermiştir.

Farklı mineral katkılı numunelerde, R tipi akışkanlaştırıcı etkisi karşılaştırıldığında;

- TiR10, TiR20 ve TiR30 kodlu numuneler sırasıyla, BiR10, BiR20 ve BiR30 kodlu numunelerden, %4,3, %36 ve %43,4 oranında daha fazla hacim genleşmesi göstermiştir.
- TkR10, TkR20 ve TkR30 kodlu numuneler sırasıyla BkR10, BkR20 ve BkR30 kodlu numunelerden, %36,7, %50,9 oranında fazla ve %40 oranında az hacim genleşmesi göstermiştir.

D kontrol numunesinin hacim genleşmesi, R kontrol numunesinden, % 0,18 oranında daha fazla olmuştur. Bu sonuç neticesinde, tüm D tip katkılı numunelerin de hacim genleşmesinin, R tip katkılı numunelerden BkD30 kodlu numune hariç daha fazla olduğu görülmüştür.

TS EN 196-3'e göre belirlenen katkılı çimentolar ve Portland çimentosunun hacim genleşmesi sonucuna bakıldığında, katkılı çimentolarda (BT ve TK) ikame oranı artışıyla birlikte hacim genleşmelerinde düşüş meydana geldiği görülmüştür. Bunun nedeni olarak, yerine koyma metoduna göre, azaltılan Portland çimentosu miktarı ile birlikte Mg ve CaO bileşiklerinin oranında da azalma olması gösterilebilir.

Sonuçlara bakıldığında, hacim genleşmelerinin 0 ila 2 mm arasında değiştiği görülmektedir, bu da TS EN 196-3'te belirtilen 10 mm sınır değerinden düşük çıktığını gösterir.

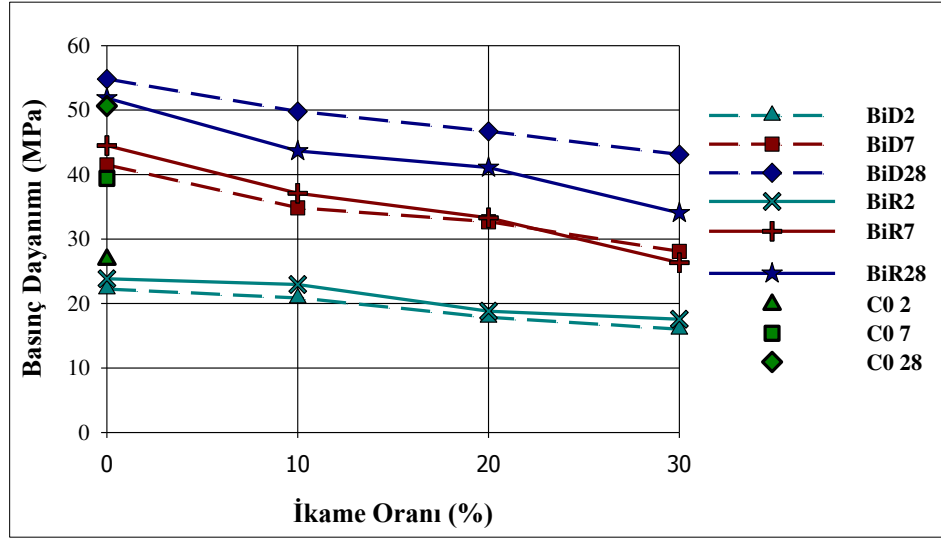
4.2. Mekanik özellikler

4.2.1. Basınç dayanımı deney sonuçları

%0, %10, %20, %30 ikame miktarlarıyla oluşturulan çimentoların, basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.4'te ve Şekil 4.13-Şekil 4.16'da verilmiştir. TS EN 196-1'e göre yapılan çalışmada su/çimento oranı (w/c=0,5) sabit tutulmuştur.

Çizelge 4.4. Basınç dayanımı deney sonuçları

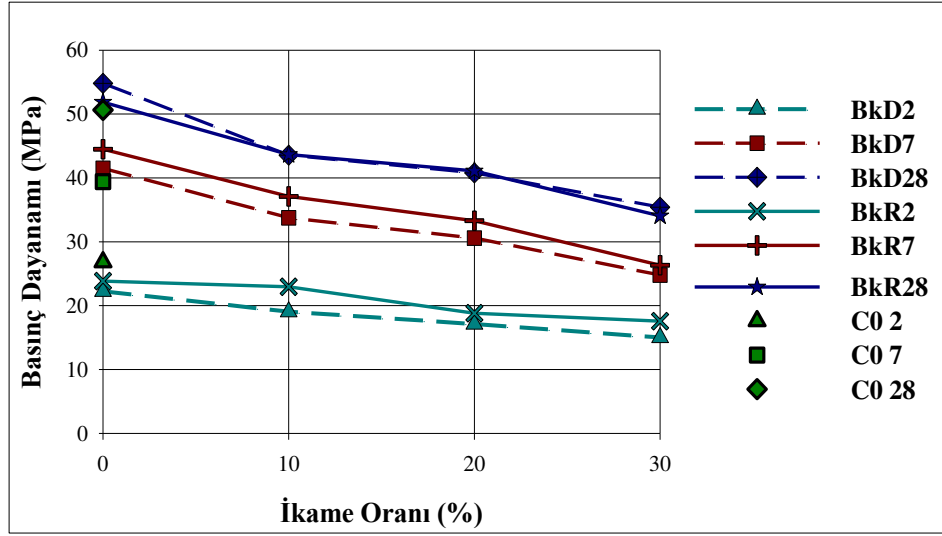
Kimyasal Katkı Tipi	Numune Kodu	İkame (%)	Basınç dayanımı (MPa)		
			2 Gün	7 Gün	28 Gün
Kontrol	C0	0	26,81	39,40	50,63
Kontrol	CD	0	22,24	41,50	54,80
D	Bi	10	20,9	34,8	49,8
		20	17,9	32,7	46,7
		30	16,9	28,1	43,1
	Bk	10	19,0	33,8	43,6
		20	17,1	30,6	40,8
		30	15,0	24,8	35,4
	Ti	10	22,6	40,8	49,9
		20	20,0	39,2	48,0
		30	15,1	31,9	40,9
	Tk	10	21,9	37,8	46,2
		20	19,5	36,1	41,9
		30	17,0	28,3	38,1
Kontrol	CR	0	23,84	44,50	51,87
R	Bi	10	23,2	38,5	47,2
		20	20,0	35,2	43,8
		30	17,8	33,1	42,3
	Bk	10	23,0	37,1	43,7
		20	18,8	33,3	41,1
		30	17,6	26,3	34,1
	Ti	10	24,6	38,1	45,9
		20	20,3	36,9	43,4
		30	16,8	26,2	36,5
	Tk	10	23,1	36,9	43,2
		20	19,9	30,7	41,7
		30	14,1	24,1	34,3



Şekil 4.13. 63 µm incelikte BT ikameli D-R tipi kimyasal katkılı çimentoların basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.13’de görüldüğü üzere ince BT’ye D ve R tipi katkı ilave edilerek oluşturulan çimento harçlarının, referans çimento harç örneğine (C0) göre basınç dayanımı sonuçları:

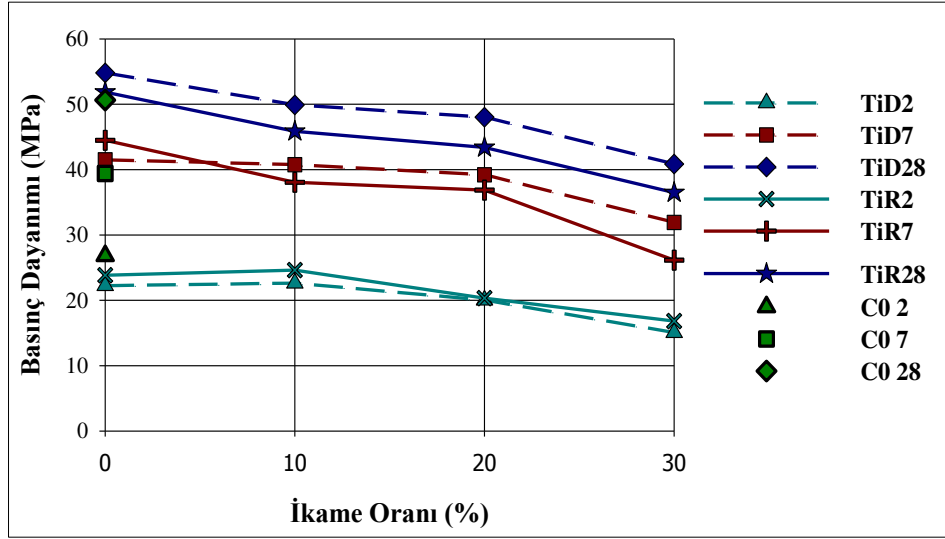
- 2 günlük basınç dayanımlarında, BiD10, BiD20, BiD30 kodlu harçlar sırasıyla %77,95, %66,76, %63,03 oranında basınç dayanımı sergilerken; BiR10, BiR20, BiR30 kodlu harçlar %86,53, %74,59, %66,39 oranında dayanım göstermektedir.
- 7 günlük basınç dayanımlarında, BiD10, BiD20, BiD30 kodlu harçlar sırasıyla %88,32, %82,99, %71,32 oranında basınç dayanımı sergilerken; BiR10, BiR20, BiR30 kodlu harçlar %97,71, %89,34, %84,01 oranında dayanım göstermektedir.
- 28 günlük basınç dayanımlarında, BiD10, BiD20, BiD30 kodlu harçlar sırasıyla %98,36, %92,23, %85,12 oranında basınç dayanımı sergilerken; BiR10, BiR20, BiR30 kodlu harçlar %93,20, %86,5, %83,54 oranında dayanım göstermektedir.



Şekil 4.14. 125 μ m incelikte BT ikameli D-R tipi kimyasal katkılı çimentoların basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.14'te görüldüğü üzere kaba BT'ye D ve R tip katkı ilave edilerek oluşturulan çimento harçlarının referans çimento harç örneğine (C0) göre basınç dayanımı sonuçları:

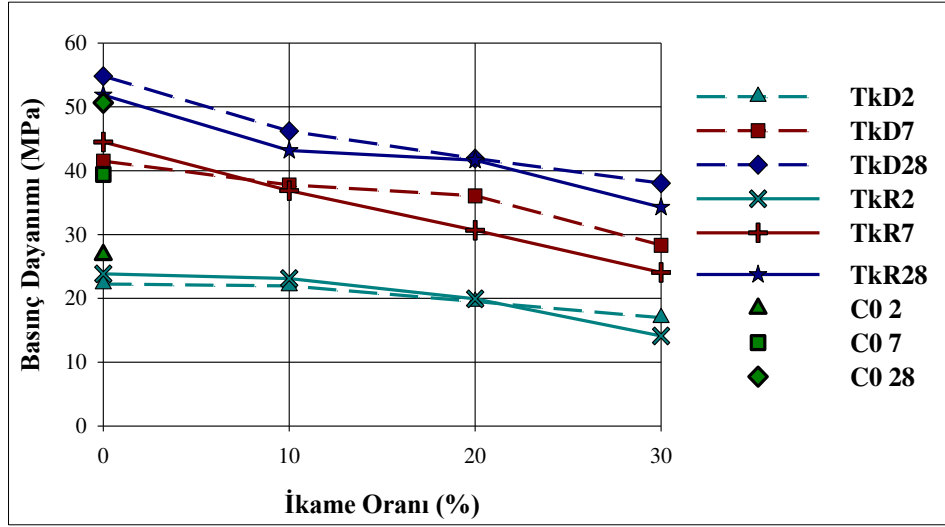
- 2 günlük basınç dayanımlarında, BkD10, BkD20, BkD30 kodlu harçlar sırasıyla %70,86, %63,78, %55,94 oranında basınç dayanımı sergilerken; BkR10, BkR20, BkR30 kodlu harçlar %85,78, %70,12, %65,64 oranında dayanım göstermektedir.
- 7 günlük basınç dayanımlarında, BkD10, BkD20, BkD30 kodlu harçlar sırasıyla %85,78, %77,66, %62,94 oranında basınç dayanımı sergilerken; BkR10, BkR20, BkR30 kodlu harçlar %94,16, %84,51, %66,75 oranında dayanım göstermektedir.
- 28 günlük basınç dayanımlarında, BkD10, BkD20, BkD30 kodlu harçlar sırasıyla %86,11, %80,58, %69,92 oranında basınç dayanımı sergilerken; BkR10, BkR20, BkR30 kodlu harçlar %86,31, %81,17, %67,35 oranında dayanım göstermektedir.



Şekil 4.15. 63 μ m incelikte TK ikameli D-R tipi kimyasal katkılı çimentoların basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.15'te görüldüğü üzere ince TK'ya D ve R tip katkı ilave edilerek oluşturulan çimento harçlarının referans çimento harç örneğine (C0) göre basınç dayanımı sonuçları:

- 2 günlük basınç dayanımlarında, TiD10, TiD20, TiD30 kodlu harçlar sırasıyla %84,30, %74,60, %56,32 oranında basınç dayanımı sergilerken; TiR10, TiR20, TiR30 kodlu harçlar %91,75, %75,71, %62,66 oranında dayanım göstermektedir.
- 7 günlük basınç dayanımlarında, TiD10, TiD20, TiD30 kodlu harçlar sırasıyla %100, %99,49, %80,96 oranında basınç dayanımı sergilerken; TiR10, TiR20, TiR30 kodlu harçlar %96,7, %93,65, %66,49 oranında dayanım göstermektedir.
- 28 günlük basınç dayanımlarında, TiD10, TiD20, TiD30 kodlu harçlar sırasıyla %98,55, %94,80, %80,78 oranında basınç dayanımı sergilerken; TiR10, TiR20, TiR30 kodlu harçlar %90,65, %85,72, %72,09 oranında dayanım göstermektedir.



Şekil 4.16. 125 µm incelikte TK ikameli D-R tipi kimyasal katkılı çimentoların basınç dayanımı sonuçları

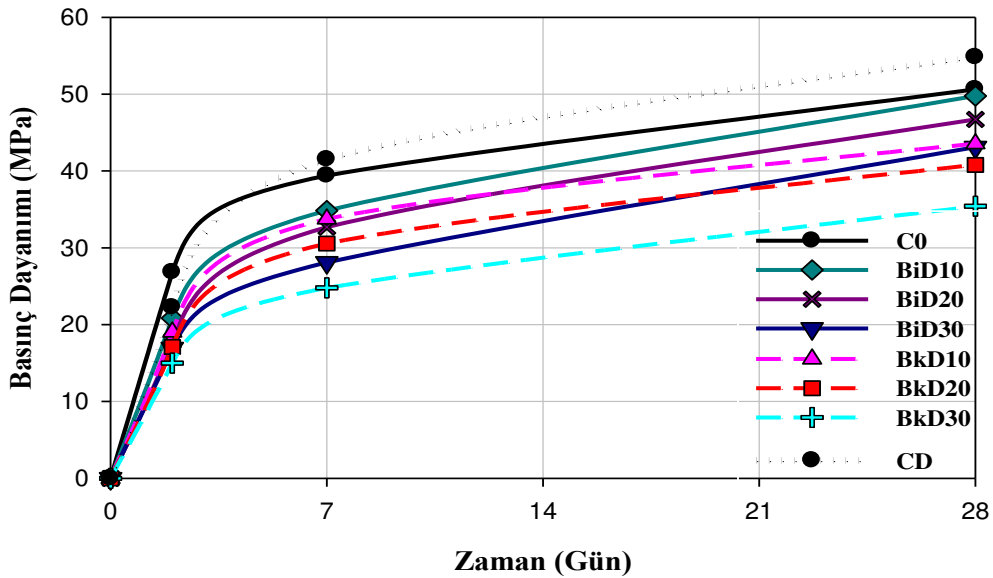
Şekil 4.16’da görüldüğü üzere kaba TK’ya D ve R tip katkı ilave edilerek oluşturulan çimento harçlarının referans çimento harç örneğine (C0) göre basınç dayanımı sonuçları:

- 2 günlük basınç dayanımlarında, TkD10, TkD20, TkD30 kodlu harçlar sırasıyla %81,68, %72,73, %63,40 oranında basınç dayanımı sergilerken; TkR10, TkR20, TkR30 kodlu harçlar % 86,16, %74,22, %52,59 oranında dayanım göstermektedir.
- 7 günlük basınç dayanımlarında, TkD10, TkD20, TkD30 kodlu harçlar sırasıyla %95,93, %91,62, %71,82 oranında basınç dayanımı sergilerken; TkR10, TkR20, TkR30 kodlu harçlar %93,65, %77,92, %61,17 oranında dayanım göstermektedir.
- 28 günlük basınç dayanımlarında, TkD10, TkD20, TkD30 kodlu harçlar sırasıyla %91,25, %82,75, %75,25 oranında basınç dayanımı sergilerken; TkR10, TkR20, TkR30 kodlu harçlar %85,32, %82,36, %67,75 oranında dayanım göstermektedir.

İkameli çimentolarda D ve R tip kimyasal katkıların dayanıma olan etkisi karşılaştırıldığında, genel olarak R tip katkının 2 günlük dayanımının D tip katkıya göre daha yüksek olduğu; 28 günlük dayanımda ise D tip katkıli harçların dayanımının R tip katkıli harçlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Tüm numunelerin basınç dayanımlarında zamanla artış olmuştur. Bu artışın 63 µm ile hazırlanan harçlarda daha

yüksek olduğu görülmüştür. Özgül yüzey alanındaki artışın ince mineral katkıli çimentolarda daha fazla olması basınç dayanımlarının kaba numunelere göre daha fazla olmasını sağlamıştır. Katkılı kontrol çimento harçlarının (CD-CR), 2 günlük dayanımları, kontrol numunesinden (C0) daha düşük olmasına karşılık, 7 ve 28 günlük dayanımları, kontrol numunesinden (C0) daha yüksek çıkmıştır.

Kimyasal katkıli ve katkısız numunelerinin 2,7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.17-Şekil 4.20’de verilmiştir.

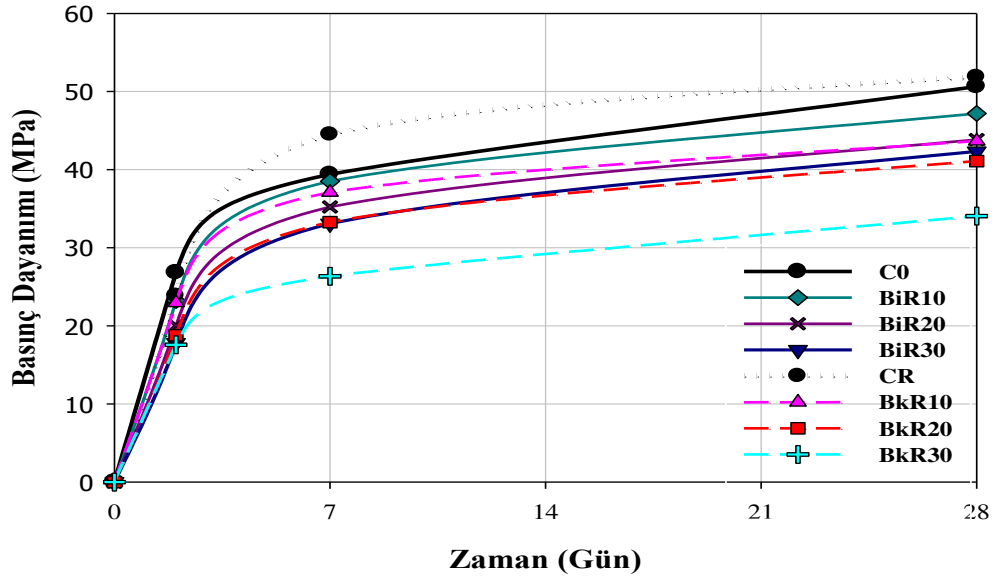


Şekil 4.17. 63-125 µm incelikte BT ikameli D tipi kimyasal katkıli çimentoların basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.17’de görüldüğü üzere ince-kaba BT ve D tip katkıyla oluşturulan çimento harçlarının, referans çimento harç örneğine (C0) göre basınç dayanımı sonuçları:

- 2 günlük basınç dayanımlarında, BiD10, BiD20, BiD30 kodlu harçlar sırasıyla %77,96, %66,77, %63,04 oranında basınç dayanımı sergilerken; BkD10, BkD20, BkD30 kodlu harçlar %70,87 %63,78, %55,95 oranında dayanım göstermektedir.
- 7 günlük basınç dayanımlarında, BiD10, BiD20, BiD30 kodlu harçlar sırasıyla %88,32, %82,99, %71,32 oranında basınç dayanımı sergilerken; BkD10, BkD20, BkD30 kodlu harçlar %85,79, %77,66, %62,94 oranında dayanım göstermektedir.

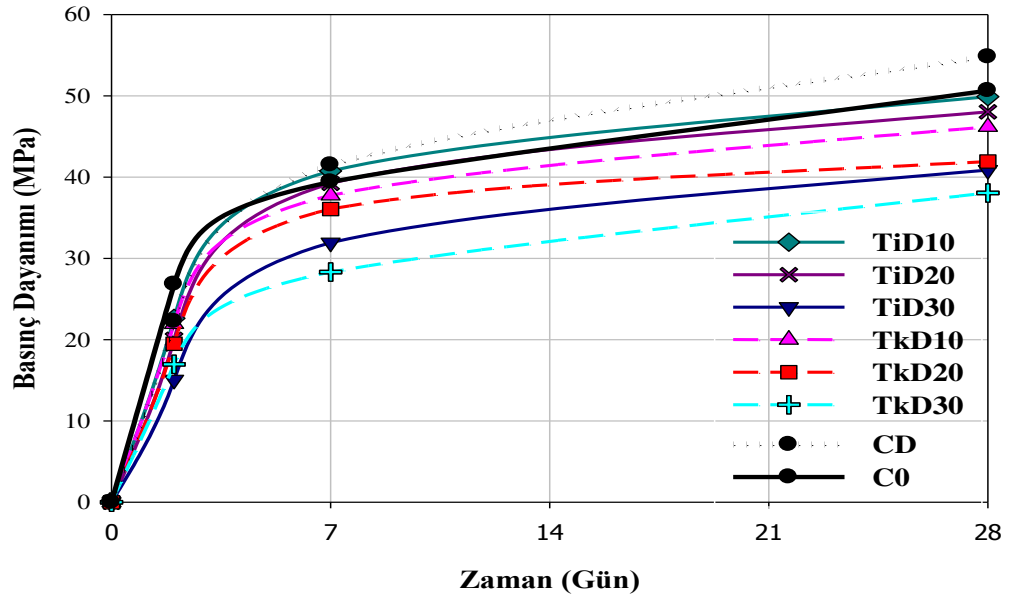
- 28 günlük basınç dayanımlarında, BiD10, BiD20, BiD30 kodlu harçlar sırasıyla %98,36, %92,24, %85,13 oranında basınç dayanımı sergilerken; BkD10, BkD20, BkD30 kodlu harçlar %86,11, %80,58, %69,92 oranında dayanım göstermektedir.



Şekil 4.18. 63-125 µm incelikte BT ikameli R tipi kimyasal katkılı çimentoların basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.18'de görüldüğü üzere ince-kaba BT ve R tip katkıyla oluşturulan çimento harçlarının, referans çimento harç örneğine (C0) göre basınç dayanımı sonuçları:

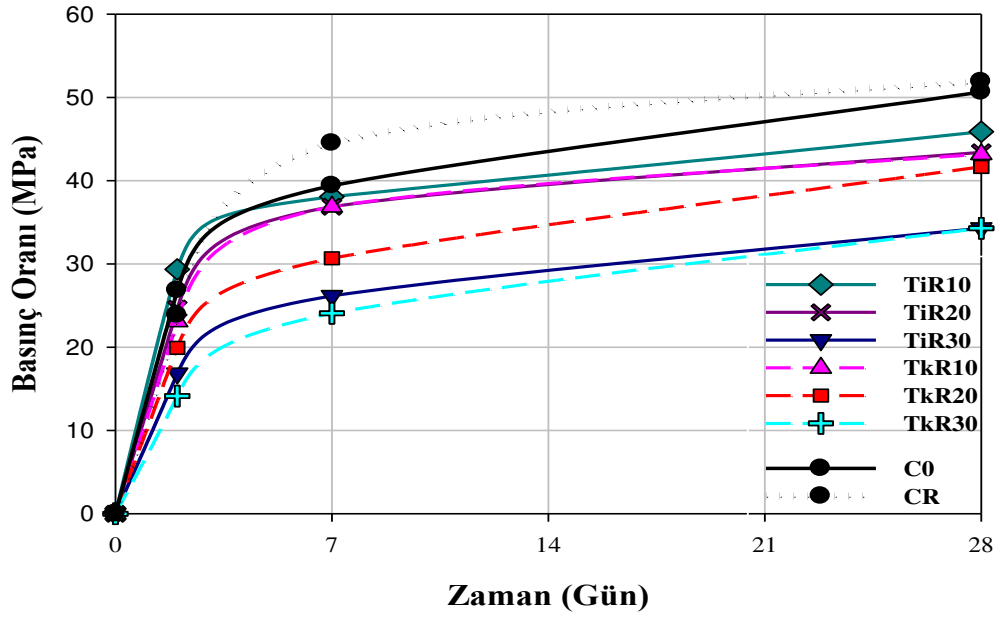
- 2 günlük basınç dayanımlarında, BiR10, BiR20, BiR30 kodlu harçlar sırasıyla %86,53, %74,60, %66,39 oranında basınç dayanımı sergilerken; BkR10, BkR20, BkR30 kodlu harçlar %85,78, %70,12, %65,64 oranında dayanım göstermektedir.
- 7 günlük basınç dayanımlarında, BiR10, BiR20, BiR30 kodlu harçlar, sırasıyla %97,72, %89,34, %84,01 oranında basınç dayanımı sergilerken; BkR10, BkR20, BkR30 kodlu harçlar %94,16, %84,52, %66,75 oranında dayanım göstermektedir.
- 28 günlük basınç dayanımlarında, BiR10, BiR20, BiR30 kodlu harçlar, sırasıyla %93,21, %86,51, %83,55 oranında basınç dayanımı sergilerken; BkR10, BkR20, BkR30 kodlu harçlar %86,31, %81,18, %67,35 oranında dayanım göstermektedir.



Şekil 4.19. 63-125 µm incelikte TK ikameli D tipi kimyasal katkılı çimentoların basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.19’da görüldüğü üzere ince-kaba TK ve D tip katkıyla oluşturulan çimento harçlarının, referans çimento harç örneğine (C0) göre basınç dayanımı sonuçları şöyledir:

- 2 günlük basınç dayanımlarında, TiD10, TiD20, TiD30 kodlu harçlar sırasıyla %84,30, %76,02, %56,32 oranında basınç dayanımı sergilerken; TkD10, TkD20, TkD30 kodlu harçlar %81,69, %72,73, %63,41 oranında dayanım göstermektedir.
- 7 günlük basınç dayanımlarında, TiD10, TiD20, TiD30 kodlu harçlar sırasıyla %103,55, %99,49, %80,96 oranında basınç dayanımı sergilerken; TkD10, TkD20, TkD30 kodlu harçlar %95,94, %91,62, %71,83 oranında dayanım göstermektedir.
- 28 günlük basınç dayanımlarında, TiD10, TiD20, TiD30 kodlu harçlar, sırasıyla %98,56, %94,81, %80,78 oranında basınç dayanımı sergilerken; TkD10, TkD20, TkD30 kodlu harçlar %91,25, %82,76, %75,25 oranında dayanım göstermektedir.



Şekil 4.20. 63-125 μm incelikte TK ikameli R tipi kimyasal katkılı çimentoların basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.20’de görüldüğü üzere ince-kaba TK ve R tip katkıyla oluşturulan çimento harçlarının, referans çimento harç örneğine (C0) göre basınç dayanımı sonuçları şöyledir:

- 2 günlük basınç dayanımlarında, TiR10, TiR20, TiR30 kodlu harçlar sırasıyla %91,76, %75,72, %62,66 oranında basınç dayanımı sergilerken; TkR10, TkR20, TkR30 kodlu harçlar %86,16, %74,23, %52,59 oranında dayanım göstermektedir.
- 7 günlük basınç dayanımlarında, TiR10, TiR20, TiR30 kodlu harçlar, sırasıyla %96,70, %93,65, %66,50 oranında basınç dayanımı sergilerken; TkR10, TkR20, TkR30 kodlu harçlar %93,65, %77,92, %61,17 oranında dayanım göstermektedir.
- 28 günlük basınç dayanımlarında, TiR10, TiR20, TiR30 kodlu harçlar, sırasıyla %90,66, %85,72, %72,09 oranında basınç dayanımı sergilerken; TkR10, TkR20, TkR30 kodlu harçlar %85,32, %82,36, %67,75 oranında dayanım göstermektedir.

İkameli çimentolarda D ve R tip kimyasal katkıların dayanıma olan etkisi karşılaştırıldığında, genel olarak R tip katkının 2 günlük dayanımının D tip katkıya göre daha yüksek olduğu; 28 günlük dayanımda ise D tip katkıli harçların

dayanımının R tip katkılı harçlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Tüm numunelerin basınç dayanımlarında zamanla artış olmuştur.

BiD30 kodlu numunenin 2,7 ve 28 günlük dayanımı BkD30 kodlu numuneden; TiD30 kodlu numunenin 7 günlük dayanımı TkD30 kodlu numuneden; TiD20 kodlu numunenin 28 günlük dayanımı TkD20 kodlu numuneden; BiR30 kodlu numunenin 7 ve 28 günlük dayanımı BkR30 kodlu numuneden; TiR30 kodlu numunenin 2 ve 7 günlük dayanımı TkR30 kodlu numuneden; TiR20 kodlu numunenin 7 günlük dayanımı TkR20 kodlu numuneden %10-15 oranında daha fazla olduğu görülmüştür. Diğer numunelerin ince ve kaba değerlerinin %10 altında olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle %10 oranının altında kalan numunelerin, fazladan öğütme işlemine tabi tutulmasının, belirgin bir farklılık oluşturmayacağı için gerekli olmadığı söylenebilir.

4.2.1.1. Basınç dayanımlarının istatistiksel analizleri

2 günlük basınç dayanım deney sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.5’de verilmiştir.

2 günlük basınç dayanımları

Çizelge 4.5. 2 günlük basınç dayanımına ait açıklayıcı istatistikler

DEĞİŞKENLER	MK	İkame (%)	İncelik (µm)	Akınlaştırıcı Türü	Örnek, Ad	2 günlük basınç dayanımı	
						Ortalama (Mpa)	Std. Sapma
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	0	63	D	3	22,112	0,409
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	0	63	R	3	23,793	0,081
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	0	125	D	3	22,112	0,409
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	0	125	R	3	23,793	0,081
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	10	63	D	3	20,809	0,87
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	10	63	R	3	23,173	0,124
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	10	125	D	3	19,088	1,721
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	10	125	R	3	22,886	0,262
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	20	63	D	3	17,913	0,102
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	20	63	R	3	20,674	0,324
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	20	125	D	3	17,019	0,65
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	20	125	R	3	18,7	0,464
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	30	63	D	3	16,917	0,072
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	30	63	R	3	17,975	0,52
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	30	125	D	3	15	0,063
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	30	125	R	3	17,608	0,101
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	0	63	D	3	22,112	0,409
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	0	63	R	3	23,793	0,081
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	0	125	D	3	22,112	0,409
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	0	125	R	3	23,793	0,081
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	10	63	D	3	22,283	1,271
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	10	63	R	3	24,502	0,328
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	10	125	D	3	21,825	0,423
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	10	125	R	3	23,046	0,661
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	20	63	D	3	20,337	0,921
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	20	63	R	3	20,329	0,365

DEĞİŞKENLER	MK	İkame (%)	İncelik (μm)	Akışkan	Örnek, Ad	2 günlük basınç dayanımı	
						Ortalama (Mpa)	Std. Sapma
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	20	125	D	3	19,533	0,827
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	20	125	R	3	19,734	1,624
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	30	63	D	3	15,008	0,326
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	30	63	R	3	16,824	0,407
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	30	125	D	3	17,02	0,565
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	30	125	R	3	14,073	0,631

MK*:Mineral katkı

2 günlük basınç dayanımı testi sonuçlarına göre mineral katkılı (BT ve TK), 63-125 μm incelikli, %0, %10, % 20 ve %30 ikame oranlarıyla ve iki farklı akışkan türünden (D ve R tipi) oluşturulan harç numuneler üzerinde tekrarlanan ölçümlü “Varyans (Factorial)” analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Bu sonuçlara göre ;

- Tüm değişkenlerin $p=0,05$ anlamlılık düzeyinde (MK*İkame*İncelik*Akışkan) anlamlı olduğu, yani değişkenler arasında istatistiksel olarak fark bulunduğu,
- İkame*İncelik*Akışkan türlerinin, MK*İncelik ve MK*İkame*İncelik birbiri üzerindeki $p=0,05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak bir fark oluşmadığı,
- Diğer bütün türlerinin birbirileri üzerine $p=0,05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak bir fark olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.6. 2 günlük basınç dayanımına göre çoklu varyans çözümleme sonuçları

DEĞİŞKENLER	Serbestlik derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	Anlamlılık düzeyi (p)
MK	1	4,28	4,28	10,39	0,001996
İkame	3	662,69	220,90	536,54	0,000000
İncelik	1	11,78	11,78	28,62	0,000001
Akışkan	1	51,77	51,77	125,75	0,000000
MK*İkame	3	27,64	9,21	22,37	0,000000
MK*İncelik	1	0,90	0,90	2,20	0,143206
İkame*İncelik	3	4,24	1,41	3,43	0,022128
MK*Akışkan	1	12,98	12,98	31,54	0,000000
İkame*Akışkan	3	10,24	3,41	8,29	0,000097
İncelik*Akışkan	1	1,25	1,25	3,03	0,086357
MK*İkame*İncelik	3	0,80	0,27	0,65	0,586429
MK*İkame*Akışkan	3	5,19	1,73	4,21	0,008868
MK*İncelik*Akışkan	1	5,21	5,21	12,66	0,000710
İkame*İncelik*Akışkan	3	2,98	0,99	2,41	0,074866
MK*İkame*İncelik*Akışkan	3	12,57	4,19	10,18	0,000014
Hata	64	26,35	0,41		

$P < 0,05$ anlamlılık düzeyinde fark bulunan gruplar;

Hangi grupların birbirinden farklı olduğunu bulabilmek için farklı gruplar içerisinde “Duncan Test” yapılmıştır. Mineral katkının ikame yüzdesi üzerindeki etkisi Çizelge 4.7’de, mineral katkının incelik değeri üzerindeki etkisi Çizelge 4.8’de, ikame oranının incelik değeri üzerindeki etkisi Çizelge 4.9’de, mineral katkının akışkan türü üzerindeki etkisi Çizelge 4.10’da, ikame oranının akışkan türü üzerindeki etkisi Çizelge 4.11’de, incelik değerinin akışkan türü üzerindeki etkileri Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 Mineral katkının ikame yüzdesi üzerindeki etkisi

MK	İkame %	Farklı olan Gruplar					
		1	2	3	4	5	6
TK	30		***				
BT	30			***			
BT	20				***		
TK	20					***	
BT	10						***
TK	10	***					
TK	0	***					
BT	0	***					

Çizelge 4.8 Mineral katkının incelik değeri üzerindeki etkisi

MK	İncelik (μm)	Farklı olan Gruplar		
		1	2	3
BT	125			***
TK	125	***		
BT	63	***	***	
TK	63		***	

Çizelge 4.9 İkame oranının incelik üzerindeki etkisi

İkame %	İncelik (μm)	Farklı olan Gruplar					
		1	2	3	4	5	6
30	125		***				
30	63			***			
20	125				***		
20	63					***	
10	125						***
10	63	***					
0	125	***					
0	63	***					

Çizelge 4.10 Mineral katkının akışkan türü üzerindeki etkisi

MK	Akışkan Türü	Farklı olan Gruplar		
		1	2	3
BT	D		***	
TK	D			***
TK	R	***		
BT	R	***		

Çizelge 4.11. İkame oranının akışkan türü üzerindeki etkisi

İkame %	Akışkan Türü	Farklı olan Gruplar						
		1	2	3	4	5	6	7
30	D		***					
30	R			***				
20	D				***			
20	R					***		
10	D						***	
0	D							***
10	R	***						
0	R	***						

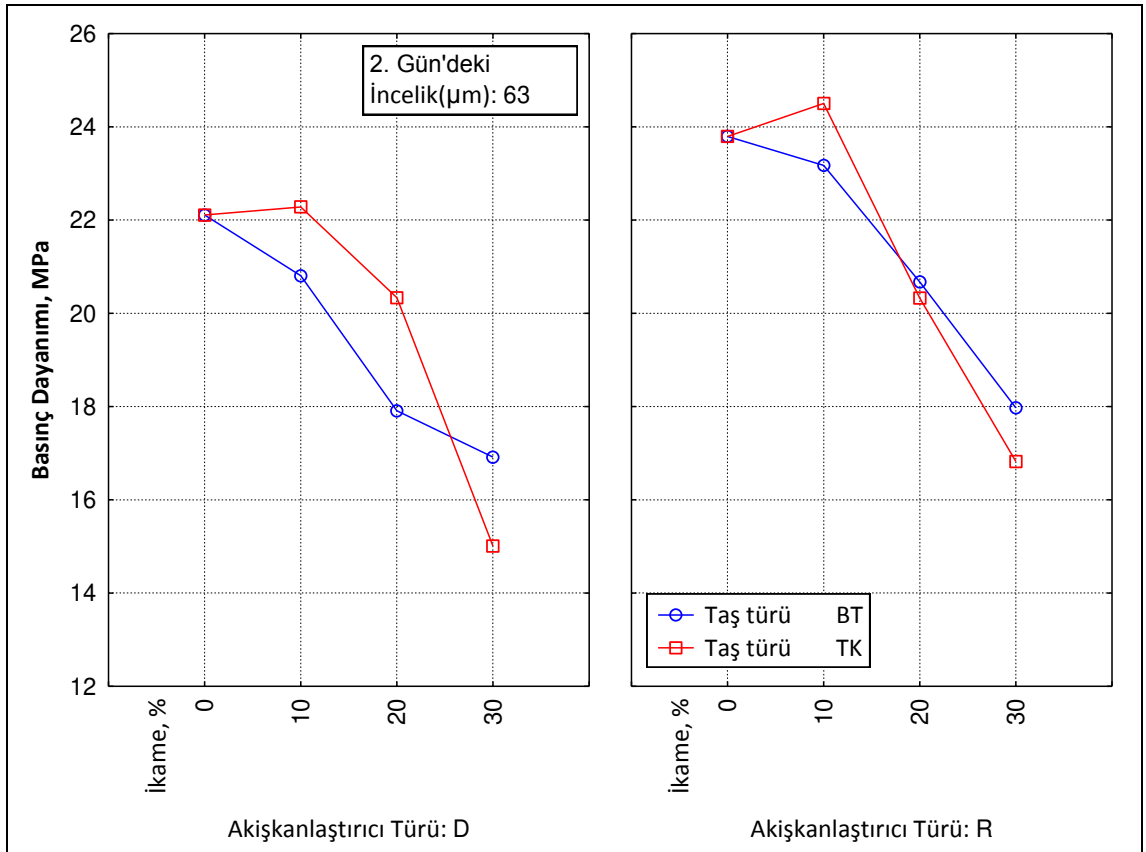
Çizelge 4.12. İncelik değerinin akışkan türü üzerindeki etkisi

İncelik (µm)	Akışkan	Farklı olan Gruplar			
		1	2	3	4
125	D	***			
63	D		***		
125	R			***	
63	R				***

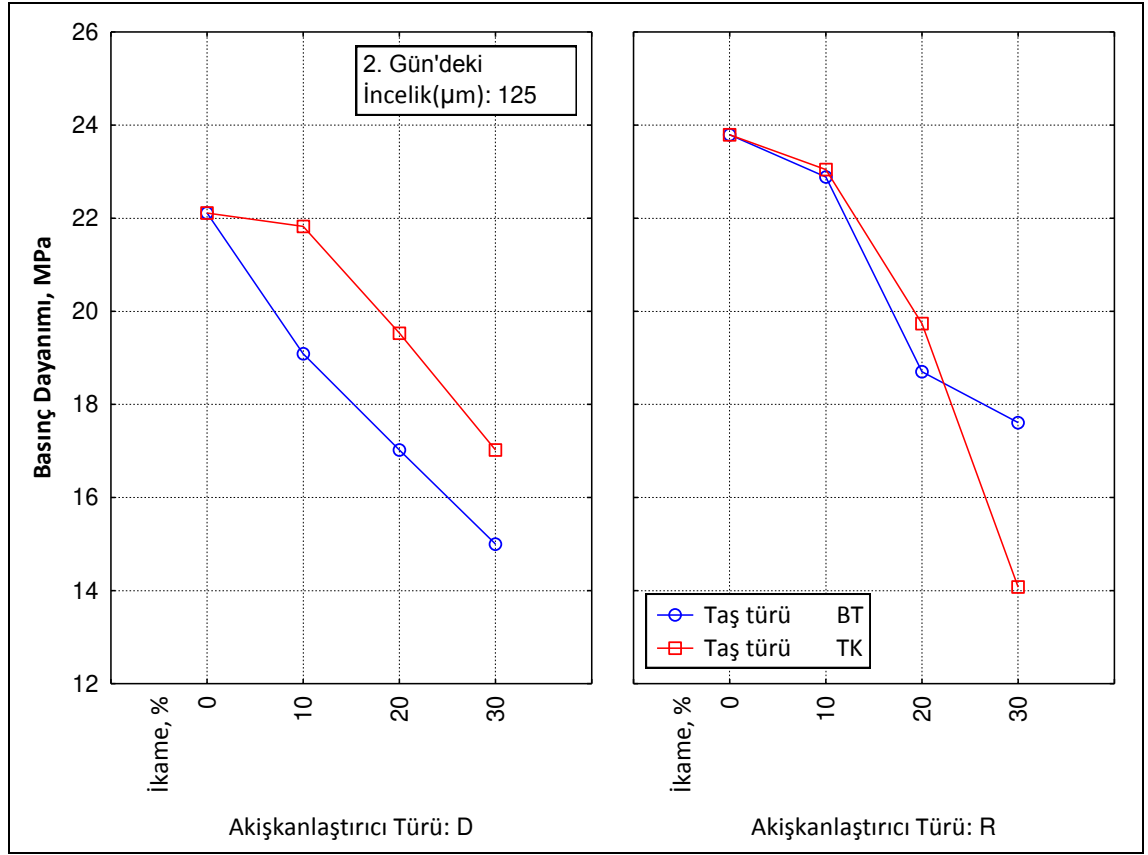
2 günlük basınç dayanımının, MK*Yüzdelik*İncelik*Akışkan seviyeleri arasındaki gerçekleştirilen “Duncan çoklu karşılaştırma testi” sonuçlarına göre;

- TK’nın %0 ve %10 ile BT’nin %0’ı arasında anlamlı bir fark oluşmazken, diğer bütün oranlarda fark bulunmuştur.

- BT'nin 63 μm inceliğindeki hem D hem de R tip akışkanlaştırıcı türü sabit kabul edildiğinde ikame yüzdelik değerlerinde fark oluştuğu,
- BT'nin 63 μm incelik değeri ile TK'nın 63 μm incelik değerinin arasında fark olmadığı, ancak kendi aralarında fark olduğu,
- BT'nin 125 μm değeri ile TK'nın 125 μm incelik değerin arasında fark olduğu,
- İkame oranlarının 63 μm ile 125 μm ve %10 ikamenin 63 μm arasında fark olmadığı,
- %20 ve %30 ikame oranının hem 63 μm hem de 125 μm arasında fark olduğu,
- R tip katkının mineral katkı üzerinde etkisi olmadığı,
- D tip katkının mineral katkı üzerinde etkisinin olduğu,



Şekil 4.21. 63 μm incelikli tüm numunelerin 2 günlük basınç dayanımlarının D ve R tip akışkanlaştırıcılara göre karşılaştırılması



Şekil 4.22. 125 μm incelikli tüm numunelerin 2 günlük basınç dayanımlarının D ve R tip akışkanlaştırıcılara göre karşılaştırılması

- 2 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre, R tipi akışkanlaştırıcılı mineral katkıların tüm dayanımlarının, D tip mineral katkılardan daha yüksek olduğu görülmüştür.
- 2 günlük 63 μm basınç dayanımı değerlerinin en iyisi R tip akışkanlaştırıcıya aittir.
- 2 günlük dayanım sonuçlarına göre, 63 μm incelikli D tipi akışkanlaştırıcı ile hazırlanan numunelerden BT'nin %20 ikame oranına kadar dayanım değerlerinin TK'dan düşük olduğu, %30 ikame de ise daha yüksek olduğu görülmüştür.
- 2 günlük dayanım sonuçlarına göre, 63 μm incelikli R tipi akışkanlaştırıcı ile hazırlanan numunelerden BT'nin yaklaşık %15 ikame oranına kadar dayanım değerlerinin TK'dan düşük olduğu, %15-30 ikame oranında ise daha yüksek olduğu görülmüştür.

- 2 günlük dayanım sonuçlarına göre, 125µm incelikli D tipi akışkanlaştırıcı ile hazırlanan numunelerden BT'nin tüm ikame oranlarının TK'dan düşük olduğu görülmüştür.
- 2 günlük dayanım sonuçlarına göre, 125µm incelikli R tipi akışkanlaştırıcı ile hazırlanan numunelerden BT'nin %20 ikame oranına kadar dayanım değerlerinin TK'dan düşük olduğu, %22-30 ikame oranında ise daha yüksek olduğu görülmüştür.

7 günlük basınç dayanımı

7 günlük basınç dayanımı deney sonuçların ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.13'de verilmiştir.

Çizelge 4.13. 7 günlük basınç dayanımına ait açıklayıcı istatistikler

DEĞİŞKENLER	MK	İkame (%)	İncelik (µm)	Akınlaştırıcı Türü	Örnek, Ad	7 günlük basınç dayanımı	
						Ortalama (Mpa)	Std. Sapma
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	0	63	D	3	41,5	1,375
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	0	63	R	3	44,646	1,688
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	0	125	D	3	41,5	1,375
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	0	125	R	3	44,644	1,688
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	10	63	D	3	34,899	0,183
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	10	63	R	3	38,338	0,55
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	10	125	D	3	33,634	0,276
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	10	125	R	3	37,167	0,668
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	20	63	D	3	32,63	0,388
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	20	63	R	3	35,192	0,651
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	20	125	D	3	30,179	2,391
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	20	125	R	3	33,221	0,14
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	30	63	D	3	28,063	1,678
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	30	63	R	3	33,25	0,563
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	30	125	D	3	24,854	0,201

DEĞİŞKENLER	MK	İkame (%)	İncelik (μm)	Akışkan	Örnek, Ad	7 günlük basınç dayanımı	
						Ortalama (Mpa)	Std. Sapma
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	30	125	R	3	26,296	0,6
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	0	63	D	3	41,5	1,375
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	0	63	R	3	44,646	1,688
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	0	125	D	3	41,5	1,375
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	0	125	R	3	44,644	1,688
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	0	125	D	3	41,5	1,375
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	0	125	R	3	44,644	1,688
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	10	63	D	3	40,863	0,292
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	10	63	R	3	37,938	1,023
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	10	125	D	3	37,532	0,422
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	10	125	R	3	36,938	0,634
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	20	63	D	3	39,146	0,367
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	20	63	R	3	36,86	0,563
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	20	125	D	3	36,188	0,768
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	20	125	R	3	34,625	0,273
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	30	63	D	3	31,925	0,813
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	30	63	R	3	26,084	0,252

MK: Mineral katkı

7 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre, iki farklı incelikte (63-125 μm), mineral katkılı (BT ve TK), %0-10-20 ve %30 ikame oranlı ve iki farklı akışkan türüyle (D ve R tipi) hazırlanan harç numuneler üzerinde tekrarlanan ölçümlü “Varyans analizi” sonucuna göre (Çizelge 4.14);

- Tüm değişkenlerin $p=0,1$ anlamlılık düzeyinde (MK*İkame*İncelik*Akışkan) anlamlı olduğu, yani değişkenler arasında istatistiksel olarak fark bulunduğu,
- İkame*İncelik*Akışkan, İncelik*Akışkan ve MK*İncelik türlerinin birbiri üzerindeki $p=0,05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak bir fark oluşmadığı,
- Diğer bütün türlerinin birbirileri üzerine $p=0,5$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak bir fark olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.14. 7 günlük basınç dayanımına göre çoklu varyans çözümleme sonuçları

DEĞİŞKENLER	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	Anlamlılık Düzeyi (p)
MK	1	49,1	49,1	44,4	0,000000
İkame	3	2847,3	949,1	858,3	0,000000
İncelik	1	96,2	96,2	87,0	0,000000
Akışkan	1	19,6	19,6	17,7	0,000081
MK*İkame	3	75,5	25,2	22,7	0,000000
MK *İncelik	1	0,4	0,4	0,3	0,561472
İkame*İncelik	3	47,5	15,8	14,3	0,000000
MK *Akışkan	1	125,0	125,0	113,1	0,000000
İkame*Akışkan	3	49,5	16,5	14,9	0,000000
İncelik*Akışkan	1	0,2	0,2	0,2	0,640953
MK *İkame*İncelik	3	9,4	3,1	2,8	0,045527
MK *İkame*Akışkan	3	52,8	17,6	15,9	0,000000
MK *İncelik*Akışkan	1	5,9	5,9	5,4	0,023707
İkame*İncelik*Akışkan	3	4,0	1,3	1,2	0,312052
MK*İkame*İncelik*Akışkan	3	7,2	2,4	2,2	0,099586
Hata	64	70,8	1,1		

MK: Mineral katkı

$P < 0,05$ anlamlılık düzeyinde fark bulunan gruplar;

7. gündeki basınç dayanım deneylerinde hangi grupların birbirinden farklı olduğunu bulabilmek için farklı gruplar içerisinde “Duncan Test” yapılmıştır. Mineral katkının ikame oranı üzerindeki etkisi Çizelge 4.15’de; mineral katkının incelik değeri üzerindeki etkisi Çizelge 4.16’da; ikame oranının incelik değeri üzerindeki etkisi Çizelge 4.17’de; mineral katkının akışkan türü üzerindeki etkisi Çizelge 4.18’de; ikame oranının akışkan türü üzerindeki etkisi Çizelge 4.19’da; incelik değerinin akışkan türü üzerindeki etkileri Çizelge 4.20’de verilmiştir.

Çizelge 4.15. Mineral katkının ikame yüzdesi üzerindeki etkisi

MK	İkame %	Farklı olan Gruplar				
		1	2	3	4	5
TK	30	***				
BT	30	***				
BT	20				***	
BT	10		***			
TK	20		***			
TK	10					***
TK	0			***		
BT	0			***		

Çizelge 4.16. Mineral katkının incelik değeri üzerindeki etkisi

MK	İncelik (µm)	Farklı olan Gruplar		
		1	2	3
BT	125		***	
TK	125	***		
BT	63	***		
TK	63			***

Çizelge 4.17. İkame oranının incelik değeri üzerindeki etkisi

İkame (%)	İncelik (µm)	Farklı olan Gruplar					
		1	2	3	4	5	6
30	125			***			
30	63				***		
20	125					***	
20	63	***					
10	125	***					
10	63						***
0	125		***				
0	63		***				

Çizelge 4.18. Mineral katkının akışkan türü üzerindeki etkisi

MK	Akışkan Türü	Farklı olan Gruplar		
		1	2	3
BT	D		***	
TK	R			***
BT	R	***		
TK	D	***		

Çizelge 4.19. İkame oranının akışkan türü üzerindeki etkisi

İkame (%)	Akışkan Türü	Farklı olan Gruplar					
		1	2	3	4	5	6
30	R	***					
30	D	***					
20	D		***				
20	R		***				
10	D			***			
10	R				***		
0	D					***	
0	R						***

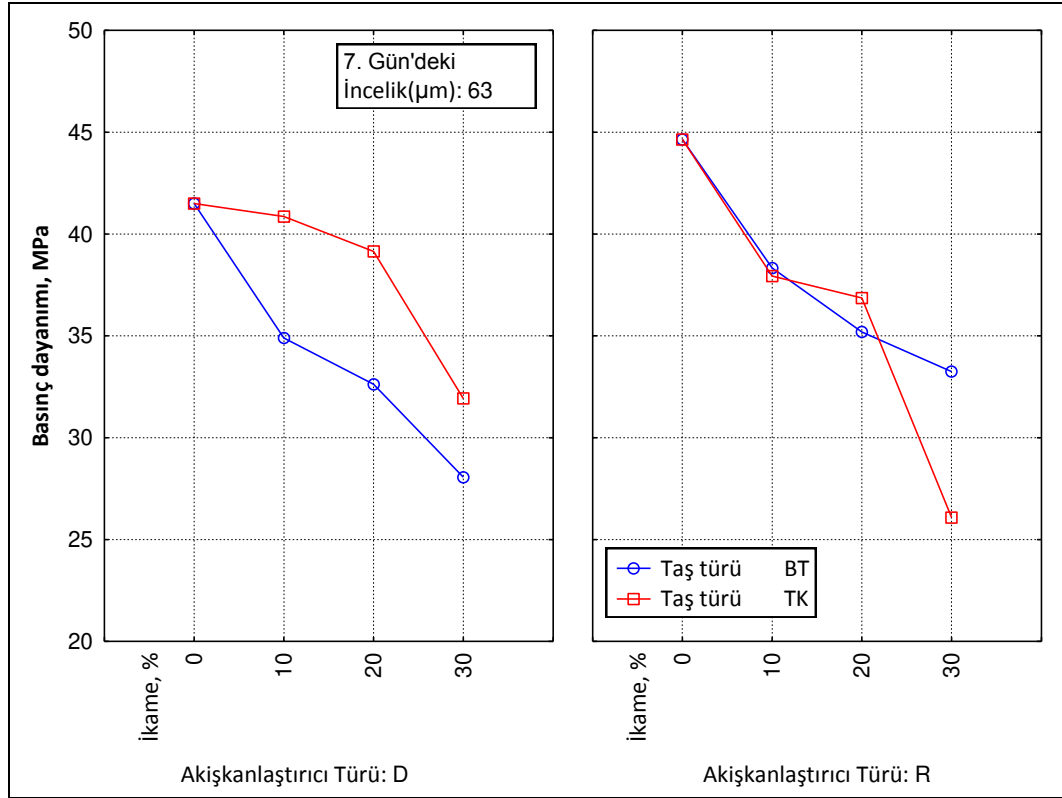
Çizelge 4.20. İncelik değerinin akışkan türü üzerindeki etkisi

İncelik (µm)	Akışkan Türü	Farklı olan Gruplar			
		1	2	3	4
125	D	***			
125	R		***		
63	D			***	
63	R				***

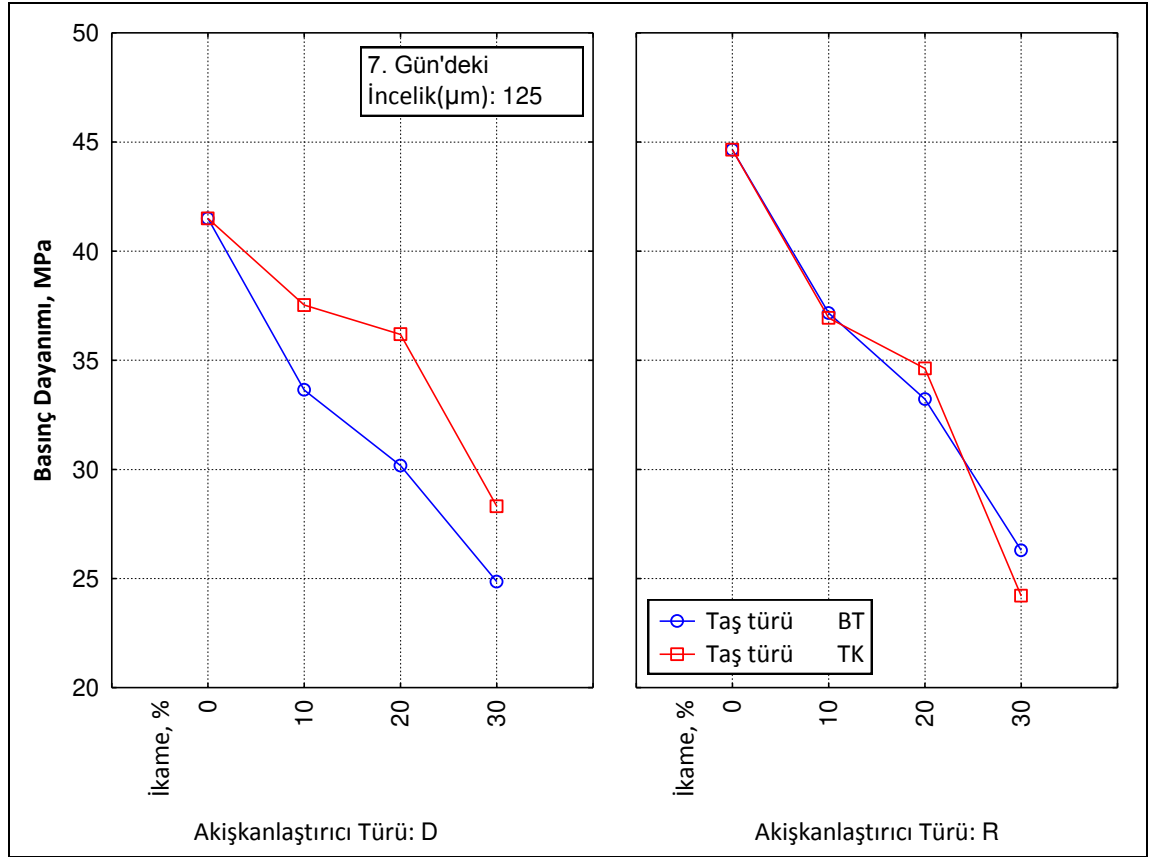
7 günlük basınç dayanımının, MK*İkame*İncelik*Akışkan seviyeleri arasındaki gerçekleştirilen “Duncan Çoklu Karşılaştırma Testi” sonuçlarına göre;

- BT’nin %0 ile TK’nın %0 arasında anlamlı bir fark olmadığı,

- TK'nın %10 değerinin diğer bütün gruplardan farklı olduğu,
- TK'nın %20'si ile BT'nin %10'u arasında kendi aralarında anlamlı bir fark olmadığı, ancak diğer değişkenlerden farklı olduğu,
- TK'nın %30 ile BT'nin %30 arasında kendi aralarında anlamlı bir fark olmadığı, ancak diğer değişkenlerden farklı olduğu,
- BT'nin %20'sinin diğer bütün değişkenlerden farklı olduğu,
- 63 μm incelikte BT'de, hem D hem de R tipi sabit kabul edildiğinde ikame yüzdelik değerlerinde fark oluştuğu,
- BT'nin 63 μm değeri ile TK'nın 63 μm incelik değeri arasında fark olduğu,
- BT'nin 125 μm değeri ile TK'nın 125 μm incelik değeri arasında fark olduğu,
- %0 ikame değerinin 63-125 μm arasında fark olmadığı,
- %10 ikame değerinin 125 μm inceliği ile %20 ikame değerinin 63 μm inceliği arasında fark olmadığı,
- Diğer bütün değerlerin birbirlerinden farklı olduğu,
- BT'nin R akışkan türü ile TK'nın D akışkan türü arasında fark olmadığı,
- BT'nin D akışkan türü ile TK'nın R akışkan türü arasında fark olduğu,
- %30 ikame oranının D ve R akışkan türü üzerinde fark olmadığı,
- %20 ikame oranının D ve R akışkan türü üzerinde fark olmadığı,
- Diğer yüzde (%) ikamelik değerlerin D ve R akışkan değerlerinin birbirinden farklı olduğu,
- Hem 125 μm hem de 63 μm incelik türünün D ve R akışkan türü üzerinde farklı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.23. 63 μ m incelikli tüm numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarının D ve R tip akışkanlaştırıcılara göre karşılaştırılması



Şekil 4.24. 125 μ m incelikli tüm numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarının D ve R tip akışkanlaştırıcılara göre karşılaştırılması

- 7 günlük dayanım sonuçlarına göre, 63 μ m incelikli D tipi akışkanlaştırıcı ile hazırlanan numunelerden BT'nin tüm ikame oranlarının TK'dan düşük olduğu görülmüştür.
- 7 günlük dayanım sonuçlarına göre, 63 μ m incelikli R tipi akışkanlaştırıcı ile hazırlanan numunelerden BT'nin %10-20 ikame oranlarında TK'dan düşük olduğu %22-30 ikamede ise daha yüksek olduğu görülmüştür.
- 7 günlük dayanım sonuçlarına göre, 125 μ m incelikli D tipi akışkanlaştırıcı ile hazırlanan numunelerden BT'nin tüm ikame oranlarının TK'dan düşük olduğu görülmüştür.
- 7 günlük dayanım sonuçlarına göre, 125 μ m incelikli R tipi akışkanlaştırıcı ile hazırlanan numunelerden BT'nin %10-20 ikame oranlarının TK'dan düşük olduğu %25-30 ikamede ise daha yüksek olduğu görülmüştür.

28 günlük basınç dayanımları

28 günlük basınç dayanımı deney sonuçların ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.21’de verilmiştir.

Çizelge 4.21. 28 günlük basınç dayanımına ait açıklayıcı istatistikler

DEĞİŞKENLER	MK	İkame (%)	İncelik (µm)	Akınlaştırıcı Türü	Örnek, Ad	28 günlük basınç dayanımı	
						Ortalama (Mpa)	Std. Sapma
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	0	63	D	3	53,712	2,629
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	0	63	R	3	52,287	3,166
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	0	125	D	3	53,712	2,629
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	0	125	R	3	52,287	3,166
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	10	63	D	3	49,832	1,174
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	10	63	R	3	47,057	0,845
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	10	125	D	3	43,76	2,135
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	10	125	R	3	42,971	1,191
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	20	63	D	3	47,414	0,132
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	20	63	R	3	43,813	0,165
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	20	125	D	3	41,351	1,333
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	20	125	R	3	41,212	0,175
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	30	63	D	3	43,248	0,943
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	30	63	R	3	42,456	1,281
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	30	125	D	3	34,582	1,279
MK*İkame*İncelik*Akışkan	BT	30	125	R	3	35,019	0,57
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	0	63	D	3	53,712	2,629
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	0	63	R	3	52,287	3,166
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	0	125	D	3	53,712	2,629
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	0	125	R	3	52,287	3,166
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	10	63	D	3	50,008	2,065
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	10	63	R	3	46,042	0,577
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	10	125	D	3	46,013	0,286
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	10	125	R	3	43,083	0,247

DEĞİŞKENLER	MK	İkame (%)	İncelik (μm)	Akışkan	Örnek, Ad	7 günlük basınç dayanımı	
						Ortalama (Mpa)	Std. Sapma
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	20	63	D	3	47,988	1,299
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	20	63	R	3	43,521	0,478
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	20	125	D	3	41,979	0,252
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	20	125	R	3	41,671	2,219
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	30	63	D	3	40,683	0,548
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	30	63	R	3	36,779	0,883
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	30	125	D	3	38,188	0,433
MK*İkame*İncelik*Akışkan	TK	30	125	R	3	34,388	0,742

28 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre, Mineral katkılı (BT ve TK) 63-125 μm incelikli, %0, %10, %20 ve %30 ikame oranlarında ve iki farklı akışkan türüyle (D ve R tipi) oluşturulan numuneler üzerinde tekrarlanan ölçümlü “Varyans Analizi” sonucuna göre (Çizelge 4.21),

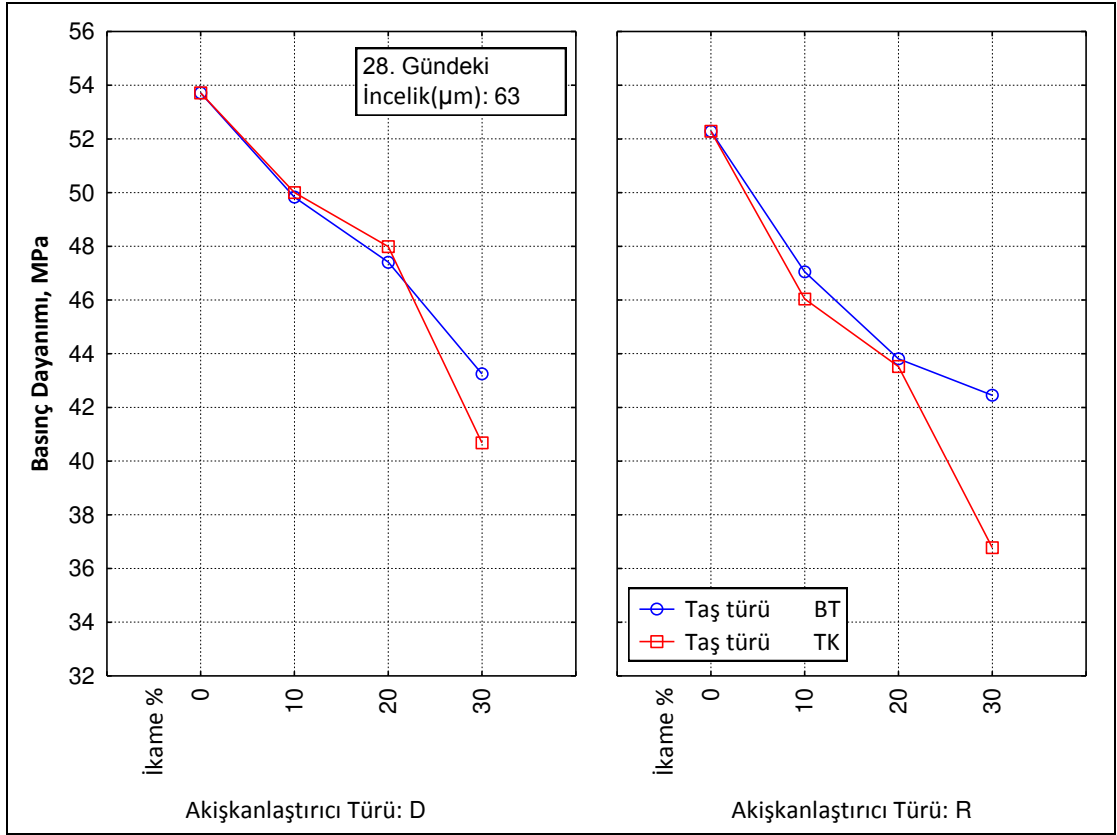
- MK*İncelik, İkame*İncelik, MK*Akışkan ve İncelik*Akışkan türlerin birbirlerine göre farklı çıkmasına rağmen istatistiksel olan bir anlam içermemektedir.
- Çünkü tüm değişkenlerin $p=0,05$ anlamlılık düzeyinde (MK*İkame*İncelik*Akışkan) anlamlı olmadığı, yani değişkenler arasında istatistiksel olarak fark bulunmadığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.22. Basınç dayanımına göre çoklu varyans çözümleme sonuçları

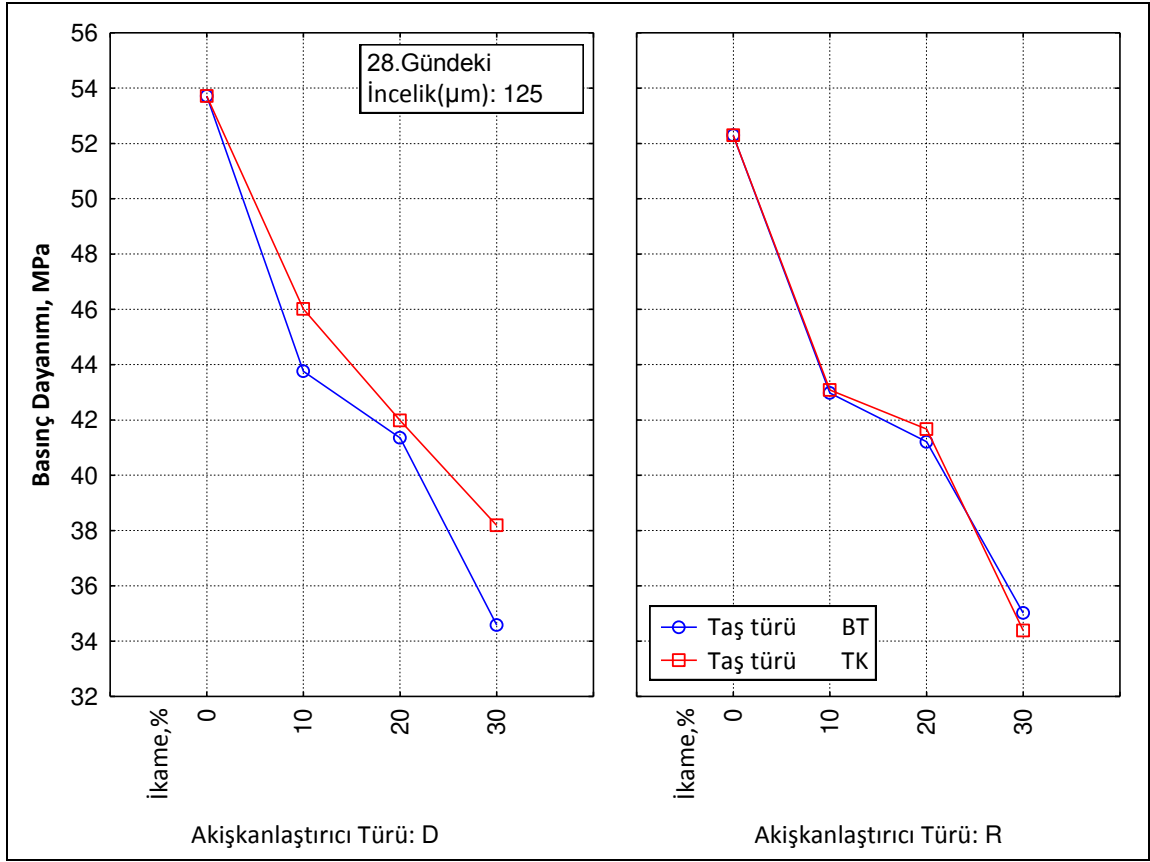
DEĞİŞKENLER	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	Anlamlılık Düzeyi (p)
MK	1	0,5	0,5	0,18	0,675805
İkame	3	2726,0	908,7	304,14	0,000000
İncelik	1	279,7	279,7	93,63	0,000000
Akışkan	1	100,5	100,5	33,63	0,000000
MK*İkame	3	11,5	3,8	1,28	0,289516
MK*İncelik	1	21,7	21,7	7,27	0,008933
İkame*İncelik	3	97,7	32,6	10,90	0,000007
MK*Akışkan	1	12,9	12,9	4,31	0,041980
İkame*Akışkan	3	4,3	1,4	0,48	0,697620
İncelik*Akışkan	1	13,4	13,4	4,50	0,037737
MK*İkame*İncelik	3	29,5	9,8	3,30	0,025990
MK*İkame*Akışkan	3	12,0	4,0	1,33	0,271326
MK*İncelik*Akışkan	1	0,2	0,2	0,06	0,807797
İkame*İncelik*Akışkan	3	12,4	4,1	1,39	0,255040
MK*İkame*İncelik*Akışkan	3	0,8	0,3	0,09	0,964713
Hata	64	191,2	3,0		

$P < 0,05$ anlamlılık düzeyinde fark bulunan gruplar

28. gündeki basınç dayanım deneylerinde en önemli grup birbirinden farklı olmadığından Duncan testine gerek yoktur.



Şekil 4.25. 63 μm incelikli tüm numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının D ve R tip akışkanlaştırıcılara göre karşılaştırılması



Şekil 4.26. 125 μm incelikli tüm numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının D ve R tip akışkanlaştırıcılara göre karşılaştırılması

- 28 günlük dayanım sonuçlarına göre, 63 μm incelikli D tipi akışkanlaştırıcı ile hazırlanan numunelerden BT'nin %10-20 ikame oranlarının TK'dan düşük olduğu %22-30 ikamede ise daha yüksek olduğu görülmüştür.
- 28 günlük dayanım sonuçlarına göre, 63 μm incelikli R tipi akışkanlaştırıcı ile hazırlanan numunelerden BT'nin tüm ikame oranlarının dayanımının TK'dan daha yüksek olduğu görülmüştür.
- 28 günlük dayanım sonuçlarına göre, 125 μm incelikli D tipi akışkanlaştırıcı ile hazırlanan numunelerden BT'nin tüm ikame oranlarının dayanımının TK'dan daha düşük olduğu görülmüştür.
- 28 günlük dayanım sonuçlarına göre, 125 μm incelikli R tipi akışkanlaştırıcı ile hazırlanan numunelerden BT'nin %10-20 ikame oranlarında TK'dan düşük olduğu %25-30 ikamede ise daha yüksek olduğu görülmüştür.

4.3. Reolojik özellikler

4.3.1. Yayılma tablası deney sonuçları

Çizelge 4.23'te görüldüğü gibi taze harçların yayılmasında, kimyasal katkılı referans numunelerin (CD-CR) yayılmasının, kimyasal katkısız referans numunenin (C0) yayılmasından yaklaşık %4 oranında daha fazla olduğu görülmüştür. Mineral katkı ilavesiyle birlikte harçların yayılmasında azalma meydana gelmiştir. BT ikameli harçlarda yayılma, TK ikameli harçların yayılmasından daha az olmuştur. En fazla yayılma referans numuneye göre, %10 ikameli R tipi katkılı ince TK'da meydana gelmiştir.

Çizelge 4.23. Kimyasal katkılı ve katkısız harçlarda yayılma deneyi sonuçları

Kimyasal Katkı Tipi	Numune Kodu	İkame (%)	Yayılma (cm)	Kimyasal Katkı Tipi	Numune Kodu	İkame (%)	Yayılma (cm)
Kontrol	C0	0	22,0	Kontrol	C0	0	22,0
D	CD	0	23,0	R	CR	0	23,5
	Bi	10	21,2		Bi	10	22,0
		20	18,5			20	20,25
		30	15,2			30	16,5
	Bk	10	20,7		Bk	10	21,5
		20	18,0			20	19,5
		30	14,0			30	16,0
	Ti	10	22,5		Ti	10	24,0
		20	22,4			20	23,2
		30	22,2			30	23,2
	Tk	10	22,2		Tk	10	23,7
		20	21,7			20	23,2
		30	21,5			30	23,0

Bi: 63 µm incelikli Bayburt Taşı, Bk: 125 µm incelikli Bayburt Taşı, Ti: 63 µm incelikli Taban Külü, Tk: 125 µm incelikli Taban külü

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneyssel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- C0 kontrol numunesine göre D tipi akışkanlaştırıcı %5,8 oranında, R tipi akışkanlaştırıcı %7,9 oranında su kesmiştir. Böylece iki farklı firmanın aynı tip katkı maddelerinin farklı miktarlarda su kestiği belirlenmiştir.
- BT ve TK ikamesi hamurlarda standart kıvam için gerekli su ihtiyacını artmıştır. Bu artışın BT ikameli hamurlarda özgül yüzeyden dolayı daha fazla olduğu görülmüştür.
- D tip katkılı çimento hamurlarının, R tip katkılı çimento hamurlarından %1-5 oranında daha fazla su ihtiyacı olduğu belirlenmiştir.
- En fazla su ihtiyacı %30,9 ve %30,7 oranıyla BiD30 ve BiR30 kodlu numunelerde görülmüştür. Böylece %30 ikame oranı ile üretilen çimentolarda kıvam değerinin ancak katkılarla katkısız çimentoya ulaşabileceği belirlenmiştir.
- Kimyasal katkıların ikame edilen puzolanların inceliğine bağlı olarak standart kıvama etkileri %5'ten daha azdır. Puzolanların inceliği üretilen çimentoların standart kıvamını kimyasal katkıya bağlı olarak anlamlı oranda etkilememiştir. Bu sebeple BT ve TK ikameli çimentolarda su ihtiyacını azaltmak için kimyasal katkı tipine bakılmaksızın kaba taneli (125 mikron) puzolanlar da kullanılabilir.
- Özgül yüzeyi fazla olan mineral katkılarda daha erken priz başlangıç ve bitiş değerine ulaşılmıştır.
- D ve R tip katkı ilavesinde, D tip katkı R tip katkıya göre daha erken priz almasına karşılık, priz bitiş sürelerine bakıldığında R tip katkının daha erken priz bitiş süresine ulaştığı görülmüştür.
- BiD30, BkD20, BkD30, TiD20, TiD30, TkD20, TkD30, BiR30, BkR20, BkR30, TiR10, TiR20, TiR30, TkR10, TkR20, TkR30 kodlu numunelerde TS EN 196-3'e göre minimum priz başlama süresinin 60 dk'nın üzerinde sağlandığı ve maksimum priz sonu süresinin 600 dk'nın altında olduğu görülmüştür.

- PÇ'na ağırlıkça %10 oranında ilave edilen BiD, BkD, TiD, BiR, TiR, TkR; %20 oranında ilave edilen BiD, TiD, BiR, TiR; %30 oranında ilave edilen BiD, mineral katkıların 28 günlük dayanımları 42,5 MPa'nın üzerinde olmuştur. Böylece standart dayanım sağlanarak, %10-20-30 ikame oranlarında belirtilen numunelerin çimento üretiminde kullanılabileceği belirlenmiştir.
- Özgül yüzey artışı, harçlarda belirgin bir özellik oluşturmıştır. En yüksek dayanımlar 63 μ m incelikli BT ve TK ikameli D tipi katkılı harçlarda görülmüştür. En yüksek dayanımlar en yüksek özgül yüzeye sahip harçlarda olmuştur.

KAYNAKLAR

- ASTM, 1985. Standard specifications for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in portland cement concrete. ASTM C 618-85, Philadelphia, USA.
- Basf Yapı kimyasalları ürün kataloğu (2006) katkı_sistemleri/beton-katkilari/1254312799_rheobuild1000.pdf (21.07.2014).
- Bai, Y., Darcy, F., Basheer, P. A. M., 2005. Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 19, 691-697.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S., 2012. Beton. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No:334.
- Coppola, L., Belz, G., Dineli, G., Collepardi, M., 1996. Prefabricated building elements based on FGD gypsum and ashes from coal-fired electric generating plants. *Materials and Structures*, 29, 305-315.
- Neubauer, C.M., Yang, M., Jennings, H.M., 1998. Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspensions: effects of admixtures. *Materials Science and Civil Engineering*. 8, 17-27.
- Churchill, E.V., Amirkhanian, S. N., 1999. Coal ash utilization in asphalt concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(4), 295-301.
- Canpolat, F., Yılmaz, K., Kose, M.M., Sümer, M., Yurdusev, M.A., 2004. Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. *Cement & Concrete Composites*, 34, 731-735.
- Cheriaf, M., Cavalcante Rocha, J., Péra, J., 1999. Pozolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash. *Cement and Concrete Research*, 29, 1387-1391.
- Çil, İ., 2000. Yeni kuşak hiperakışkanlaştırıcı beton katkıları. *YKS Vizyon Dergisi SKW-MBT Sayı: 2*, s: 32-35.
- Çelik, I.B., 2009. The effects of particle size distribution and surface area upon cement strength development. *Powder Technology*, 188, 272-276.
- Çavdar, A. ve Yetkin Ş., 2007. Availability of tuffs from northeast of Turkey as natural pozzolan on cement, some chemical and mechanical relationships. *Construction and Building Materials*, 21, pp. 187-195.
- Erdoğan, T.Y., 1997. *Admixtures of Concrete*. Metu Press, Ankara.

- Erdoğan, T.Y., 2003. Beton, METU Press, Ankara, 11-61
- Erdoğan, K., Tokyay, M., Türker, P., 2003. Traslar ve traslı çimentolar. TÇMB/ARGE/Y99-2, Ankara.
- Erdoğan, T.Y., 2004. Beton malzemeleri. Odtü Yayıncılık, Ankara.
- Erdoğan, T.Y., 2007. Portland çimentoları ve diğer çimento türleri. Beton. Metu Press, 11-61, 634-639, Ankara.
- Erdoğan, S.T. ve Erdoğan T.Y., 2007. Bağlayıcı malzemelerin ve betonun onbin yıllık tarihi. Odtü Yayıncılık, 219 s, Ankara.
- Gürü, M. ve Yalçın H., 2006. Çimento üretimi. Çimento ve Beton, Bölüm 2. Palme Yayıncılık, 15-19.
- GRACE Yapı Kimyasalları (2011) Ürün Kataloğu, s31.
- Hopkins, D. S., Oates, D.B., 1998. U.S Patent No. 5,849,075. Washington, D.C.: U.S. Patent and Trademark Office.
- Tekin, İ., Birgül, R., Aruntaş, H.Y., 2013.Yüksek oranlı akışkanlaştırıcı kullanılan bayburt Taşı ile üretilmiş hafif betonların mekanik özellikleri üzerine bir araştırma. Yapılarda Kimyasal Katkılar 4. Sempozyum ve Sergisi, Ankara.
- Mehta, P.K. and Monteiro P.J.M ., 1997. Hydraulic cements. Concrete Microstructure, Properties and Materials, Chapter 6 . Indian Concrete Institute, Chennai, 203-210.
- Mehta, P.K., 1997. Concrete microstructure. Properties and Materials, Chapter 8, Admixtures, Ed. Monteiro P.J.M. Indian Concrete Institute, 256-271, Chennai.
- MTA, 2005. Bayburt doğal taş potansiyeli maden jeolojisi raporu.
- Hossain, K.M.A., 2003. Blended cement using volcanic ash and pumice. Cement and Concrete Research, 33, 1601-1605.
- Hewlett, P., 2004 Portland cement. Classification and Manufacture Lea's Chemistry of Cement and Concrete-, Part 2, Ed: Peter C. Hewlett. Elsevier Science & Technology Books, 24-33.
- Jaturapitakkul, C., Cheerarot, R., 2003. Development of bottom ash as pozzolanic material. Journal of Materials in Civil Engineering, 15, 48-53.

- Ke, T.C., Lovell, C. W., 1992 . Corrosivity of indian bottom ash. National Research Council (U.S.). Geoenvironmental and engineering properties of rock, soil, and aggregate pp. 113-117. Washington, D.C: Transportation Research Board.
- Kumar, S., Stewart, J., Mishra, S., 2004. Strength characteristics of illinois coal combustion by-product: PCC dry bottom ash. International Journal of Environmental Studies, 61 (5) , 551-562.
- Kuleli, Ö., 2009. Çimento mühendisliği el kitabı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- Kaya, A.İ., 2010. A study on blended bottom ash cements . MS Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Odtü.
- Kanazu, T., Ito, K., Takahasi, M., 1998. Fly ash for use in concrete. Electric Power Civil Engineering, 274, 50-55.
- Lee, S.H., Kim, H.J., Sakai, E., Daimon, M., 2003. Effect of particle size distribution of fly ash – cement system on the fluidity of cement pastes. Cement and Concrete Research, 33, 763-768.
- Neville, A.M., 1995. Properties of the concrete. Longman Group Limited, 844 p, England.
- Odler, I., 2004. Hydration, setting and hardening of portland cement. Lea's Chemistry of Cement and Concrete, fourth edition s267.
- Pan, S.C., Tseng, D.H., Lee C.C., Lee, C., 2003. Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties. Cement Concrete Research, 33, 1749-1754.
- Rassem, B., et al. 1986. Proceedings of the 8th International congress on the chemistry of cement rio de janerio, 3;234.
- Ramachandran, V.S., 1995. Superplasticizers. Concrete Admixtures Handbook, Part 4. Noyes Publications, 138-140, U.S.A.
- Ramachandran, V.S., 1995. Formation of portland cement. Concrete Admixtures Handbook, Part 1. Noyes Publications, 1-4, U.S.A.
- Shannag, M. J., 2000. High strenght concrete containing natural pozzolan and silica fume. Cement and Concrete Composites, 22, 399-406.
- Tokyay, M., Erdogdu, K., Türker, P., 1999. Comparison of intergrinding and separate grinding for the production of natural pozzolan and GBFS-incorporated blended cements. Cement and Concrete Research ,29 , 743-748.

- Türkmenoğlu, A.G. and Tankut A., 2001. Use of tuffs from central turkey as admixture in pozzolanic cements assessment of their petrographical properties. Cement and Concrete Research, 32, 629-637.
- Taş Madencilik Ltd.Şti, http://www.bayburttasi.com/bayburt_tasi.html (05/08/2014).
- TS EN 934-2 2002. Kimyasal katkıları. Beton, harç ve şerbet için, Bölüm 2, Beton katkıları .TSE, Ankara.
- TS EN 196-2, 2002. Çimento Deney Metotları – Bölüm 1: Dayanım Tayini, TSE, Mart.
- TS EN 196-1, 2002. Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini, TSE, Mart.
- TS EN 196-3, 2002. Çimento Deney Metotları – Bölüm 3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini, TSE, Mart.
- Turanlı, L., Uzal, B., Bektaş, F., 2004. Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans. Cement and Concrete Research 34, 2277-2282.
- Targan, Ş., Olgun, A., Erdoğan, Y., Sevinç, V., 2003. Influence of natural pozzolan, colemanite ore waste, bottom ash and fly ash on the properties of portland cement. Cement and Concrete Research, 33, 1175-1182.
- Türkel, S., Felekoğlu, B., 2004. Aşırı dozda akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımının taze ve sertleşmiş betonun bazı özellikleri üzerine etkileri. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 6(1), 77-89.
- Delibaş, T., 2012. Effects of granulated blast furnace slag, trass and limestone fineness on the properties of blended cements. MS Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Odtü, Ankara.
- Uzal, B., Turanlı, L., 2003. Studies on blended cements containing a high volume of natural pozzolans. Cement and Concrete Research, 33, 1777-1781.
- Ulaş, A., 2009. Uçucu küllü harçlarda yeni nesil akışkanlaştırıcıların kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi.
- Ünsal, A. ve Şen H., 2008. Beton ve beton malzemeleri laboratuvar deneyleri, bölüm 3, Çimentolar (TS EN 197-1). Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Malzeme Lab. Şubesi Müdürlüğü, 237s, Ankara.
- Yazıcı, H., 2003. Termik santral atığı yapay alçı-taban külü-uçucu kül esaslı yapı malzemesi geliştirilmesi. Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi.

- Yetgin, Ş. ve Çavdar. A., 2005. Doğal puzolan katkı oranının çimentonun dayanım, işlenebilirlik, katılaşma ve hacim genleşmesi özelliklerine etkisi. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17(4), 687-692.
- Zhang, Y.M. and Napier-Munn T. J., 1994. Effects of particle size distribution, surface area and chemical composition on portland cement strength, Powder Technology, 83, 245-252.

EK1

Numune Kodu	Kıvam (s / b) (%)	Hacim Genleşmesi (mm)	Priz Süresi	
			Başlangıç (dk)	Bitiş (dk)
C0	30,5	1,48	170	310
<u>BiD0</u>	24,7	0,44	45	385
BiD10	26,5	1,43	25	350
BiD20	28,3	1,17	30	360
BiD30	30,9	0,49	70	420
BkD10	26,0	0,87	45	470
BkD20	27,9	0,71	70	490
BkD30	30,3	0,21	90	520
<u>BiR0</u>	22,6	0,26	150	315
BiR10	25,6	1,33	30	240
BiR20	27,6	0,57	35	280
BiR30	30,7	0,30	145	400
BkR10	25,1	0,81	50	250
BkR20	26,9	0,55	180	380
BkR30	29,1	0,40	190	410
<u>TiD0</u>	24,7	0,44	45	385
TiD10	24,5	1,45	45	350
TiD20	25,2	1,25	65	400
TiD30	26,3	1,01	100	450
TkD10	23,7	1,42	50	380
TkD20	23,9	1,19	115	410
TkD30	24,2	0,99	140	460
<u>TiR0</u>	22,6	0,26	150	315
TiR10	23,9	1,39	200	330
TiR20	24,5	0,89	240	350
TiR30	25,8	0,53	265	415
TkR10	22,7	1,28	215	375
TkR20	23,3	1,12	260	400
TkR30	23,7	0,24	285	420

Numune Kodu	Yayılma (cm)			Basınç Dayanımı (MPa)		
	5	15	25	2	7	28
C0	15	19	22	26,8	39,4	50,6
<u>BiD0</u>	15,5	20,5	23	22,2	41,5	54,8
BiD10	14,25	18,5	21,25	20,9	34,8	49,8
BiD20	12,75	16,25	18,5	17,9	32,7	46,7
BiD30	10,75	13,25	15,25	16,9	28,1	43,1
BkD10	13,75	18	20,75	19	33,8	43,6
BkD20	12	15,75	18	17,1	30,6	40,8
BkD30	9,5	12	14	15	24,8	35,4
<u>BiR0</u>	16,5	21	23,25	23,8	44,5	51,9
BiR10	14,75	19,5	22	23,2	38,5	47,2
BiR20	13	17,5	20,25	20	35,2	43,8
BiR30	11,5	14	16,5	17,8	33,1	42,3
BkR10	15	19,25	21,5	23	37,1	43,7
BkR20	13,75	18	19,5	18,8	33,3	41,1
BkR30	12,5	15,75	16	17,6	26,3	34,1
<u>TiD0</u>	15,5	20,5	23	22,2	41,5	54,8
TiD10	15,25	19,75	22,5	22,6	40,8	49,9
TiD20	15,25	20,25	22,45	20	39,2	48
TiD30	15	19,75	22,25	15,1	31,9	40,9
TkD10	14,5	19,5	22,25	21,9	37,8	46,2
TkD20	13,75	18,75	21,75	19,5	36,1	41,9
TkD30	13,25	18,5	21,5	17	28,3	38,1
<u>TiR0</u>	16,5	21	23,25	23,8	44,5	51,9
TiR10	16,75	21	24	24,6	38,1	45,9
TiR20	16,25	20,75	23,25	20,3	36,9	43,4
TiR30	15,5	20,75	23,25	16,8	26,2	36,5
TkR10	16,5	21	23,75	23,1	36,9	43,2
TkR20	15,75	20	23,25	19,9	30,7	41,7
TkR30	15,25	19,75	23	14,1	24,1	34,3

EK 2



Şekil B.1 Diskli öğütücü ve taş kırma makinesi



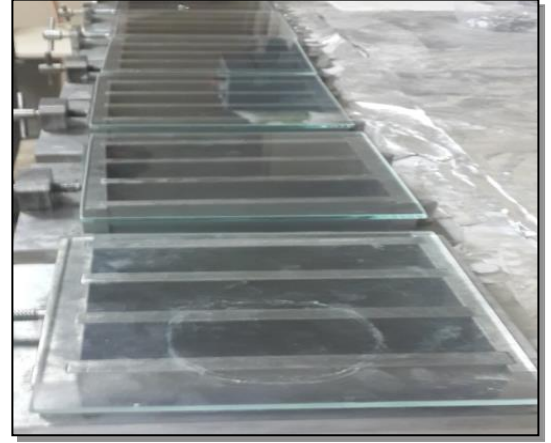
Şekil B.2 Karıştırma makinesi ve hassas terazi



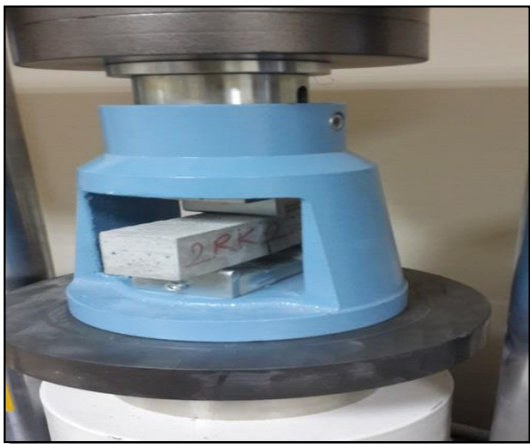
Şekil B.3 Vicat cihazı (sondalı ve iğneli)



Şekil B.4 Yayılma tablası



Şekil B.5 40x40x160 mm boyutlu kalıplar



Şekil B.6 Çimento pres makinasının eğilme ve basınç aparatı



Şekil B.7 Kür havuzu



Şekil B.8 Sarsma cihazı



Şekil B.9 Eleme cihazı

ÖZGEÇMİŞ

2008 yılında girdiğim Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 2012 yılında birincilikle mezun oldum. Aynı yıl Bayburt Üniversitesi'nde yüksek lisansa başladım. 2013 yılında Bayburt Üniversitesi'nin araştırma görevlisi kadrosunu ÖYP'li olarak kazandım ve halen bu görevimi devam ettirmekteyim.