



**MİNERAL KATKILI ÇİMENTONUN
HİDRATASYON ISISI, FİZİKSEL VE
MEKANİKSEL ÖZELLİKLERİNE BOKSİT
VE DEMİR CEVHERİNİN ETKİSİ**

Beldehan ŞEKER

Yüksek Lisans Tezi

Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Doç. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ

2021

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**MİNERAL KATKILI ÇİMENTONUN HİDRATASYON ISISI, FİZİKSEL VE
MEKANİKSEL ÖZELLİKLERİNE BOKSİT VE DEMİR CEVHERİNİN ETKİSİ**

(Effect of Boxite and Iron ore on Hydration Heating, Physical and Mechanical Properties of
Mineral Additive Cement)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Beldehan ŞEKER

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ

Erzurum
Eylül, 2021

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Beldehan Şeker tarafından hazırlanan “Mineral Katkılı Çimentonun Hidratasyon Isısı, Fiziksel ve Mekaniksel Özelliklerine Boksit ve Demir Cevherinin Etkisi” başlıklı çalışması 12/ 10 / 2021 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Temel İşlemler ve Termodinamik Bilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Ömer Laçın
Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır.

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Emin Arzutuğ
Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır.

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Jülide Erkmen
Kafkas Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan Ceyhun
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç.Dr. Mehmet Emin Arzutuğ danışmanlığında sunulan “Mineral Katkılı Çimentonun Hidratasyon Isısı, Fiziksel ve Mekaniksel Özelliklerine Boksit ve Demir Cevherinin Etkisi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	5	30
Kuramsal Temeller	18	30
Materyal ve Yöntem	3	35
Bulgular	8	20
Tartışma	8	20
Tezin Geneli	13	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Beldehan Şeker	Doç.Dr. Mehmet Emin Arzutuğ
12.10.2021	12.10.2021
İmza: Aslı Islak İmzalıdır.	İmza: Aslı Islak İmzalıdır.

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübeleriyle, her konuda bana destek olan, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, çalışmalarım boyunca bana sabır ve anlayış gösteren, öğrencisi olduğum için gurur duyduğum çok değerli Sayın Doç. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ'a,

Deneysel çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan Aşkale Çimento Sanayi T.A.Ş. yöneticileri ve laboratuvar çalışanlarına, Atatürk Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümüne ve laboratuvar çalışanlarına,

Bugüne kadar maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan, çalışmamda da bilgi ve tecrübeleriyle bana destek olan babam Keramettin ŞEKER, annem Mehtap ŞEKER, kardeşlerim ve çok değerli çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Beldehan ŞEKER

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİNERAL KATKILI ÇİMENTONUN HİDRATASYON ISISI, FİZİKSEL VE MEKANİKSEL ÖZELLİKLERİNE BOKSİT VE DEMİR CEVHERİNİN ETKİSİ

Beldehan ŞEKER

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ

Amaç: Bu çalışmada ana çimento tipi olan CEM I 42,5R ürünü ile bu ürüne %15 ve %30 oranlarında katılan tras ve uçucu külden elde edilen karışımların fiziksel ve mekaniksel özellikleri ile hidratasyon ısılarının değişimi incelenmiştir.

Yöntem: Yapılan tüm deneyler, çimentonun kimyasal ve fiziksel testlerinin tarif ve gerekliliklerini anlatan TS EN 196 standartlarına uygun olarak analiz edilmiştir. Çimentonun su ile kimyasal reaksiyonu sonucu açığa çıkan ısı, TS EN 196-8 Hidratasyon ısısı: Çözelti yöntemine göre tayin edilmiştir.

Bulgular: Denemelerde kullanılan çimento karışımlarına farklı katkı yüzdelerinde (%1, %2 ve %4) boksit ve demir cevheri katılmasının, saf çimentonun hidratasyon ısısı, dayanım, priz süreleri ve su ihtiyaçlarında değişikliğe neden olduğu elde edilen analiz sonuçları ile görülmüştür.

Sonuç: Çimentoya boksit ve demir cevheri katılması sonucunda saf çimento referans kabul edildiğinde, demir katkısının hidratasyon ısısında düşüş, boksit katkısının ise artış sağladığı, her iki katkının da dayanımları düşürdüğü, priz sürelerinde gecikmeye sebep olduğu, su ihtiyaçlarında ise yükselişe neden olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu farklı özellikteki çimentolar, kullanım yeri ve amacına göre farklı yerlerde kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Baraj inşaatlarında kütle betonu dökümlerinde geç priz yapan katkılı çimentonun kullanımı uygun iken, soğuk iklimlerdeki uygulamalarda daha fazla hidratasyon ısısı veren çimentonun kullanımı daha uygundur. Özellikle kütle betonu uygulamaları dikkate alındığında, priz sırasında su ihtiyacındaki artış, istenmeyen bir durumdur.

Anahtar Kelimeler: Çimento, Hidratasyon ısısı, Priz Süresi, Tras, Uçucu kül, Boksit cevheri, Demir cevheri.

Eylül 2021, 89 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

EFFECT OF BOXITE AND IRON ORE ON HYDRATION HEATING, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MINERAL ADDITIVE CEMENT

Beldehan ŞEKER

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ

Purpose: In this study, the physical and mechanical properties of the mixtures obtained from the main cement type, CEM I 42,5R, and the mixtures obtained from 15% and 30% of trass and fly ash added to this product, and the variation of hydration temperatures were investigated.

Method: All experiments were analyzed in accordance with TS EN 196 standards, which describe the definitions and requirements of chemical and physical tests of cement. The heat released as a result of the chemical reaction of cement with water was determined according to the TS EN 196-8 Hydration heat: Solution method.

Finding: It has been seen by the analysis results that the addition of bauxite and iron ore at different admixture percentages (1%, 2% and 4%) to the cement mixtures used in the trials caused changes in the heat of hydration, strength, setting times and water requirements of the pure cement.

Results: When pure cement is accepted as a reference as a result of adding bauxite and iron ore to cement, it has been determined that iron additive provides a decrease in hydration heat and an increase in bauxite additive, both additives decrease strengths, delay setting times, and increase water needs. These cements with different properties have the potential to be used in different places depending on the place and purpose of use. While it is appropriate to use late-setting admixture cement in mass concrete castings in dam constructions, it is more appropriate to use cement that gives more hydration heat in applications in cold climates. Especially considering mass concrete applications, an increase in water requirement during setting is an undesirable situation.

Keywords: Cement, Heat of hydration, Setting Time, Trass, Ash, Bauxite, Iron.

September, 2021, 89 Pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	1
Çimento Bileşim, Özellikler.....	1
Puzolanik Malzemeler.....	3
Genel	3
Doğal Puzolan (P)	4
Uçucu Kül (V,W).....	4
Silisli Uçucu Kül (V)	5
Çimentonun Hidratasyonu	5
İnce Taneli Puzolanik Katkı Maddelerinin Beton Özelliklerine Etkisi	9
MATERYAL VE YÖNTEM	12
Materyallerin Temini ve Hazırlanması	12
Çimento.....	12
Doğal Puzolan (Tras)	12
Uçucu Kül	13
Demir Cevheri.....	14
Boksit	14
Standart Kum	15
Karışım Suyu.....	15
Çalışmada Kullanılan Alet, Ekipman ve Cihazlar	16
Numune Kalıpları.....	16
Karıştırıcı (Mikser).....	16
Sarsma Cihazı (Şok Tablası)	17
Kür Dolabı ve Kür Havuzları.....	17

Basınç Dayanım Cihazı.....	17
Vicat Cihazı.....	18
Le Chatelier Cihazı	18
Elek Cihazı ve Elek.....	19
Blaine Cihazı.....	19
X ışını Floresans Cihazı	19
Hidratasyon Isısı Cihaz ve Ekipmanları.....	20
Kalorimetre	20
Termostatik kontrollü banyo	21
Harç veya elektrikli öğütücü	21
Plastik veya cam vialler	21
Hidratasyon Isısı Çözelti Analiz Yöntemi	22
Kalorimetre Kalibrasyonu.....	22
İşlem.....	22
Kalibrasyon Karakteristiklerinin Hesaplanması	23
Çözünme Isısının Tayini	24
Hidrate olmamış çimentonun çözünme ısısı	24
Tüm çimentolara (hidrolik bağlayıcılara) uygulanan işlem	24
Portland çimentoya uygulanan işlem	25
Hesaplama	25
Sıcaklık artışı düzeltmesi	25
Çözünme ısısı.....	25
Hidrate olmuş çimentonun çözünme ısısı	26
Bağlı su için düzeltme	26
Hesaplama	26
Çözünme ısısı.....	26
Hidratasyon Isısı	27
Yapılan Fiziksel ve Mekaniksel Testler ile Analiz Yöntemleri	27
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	29
Hidratasyon Isısı	30
Basınç Dayanımı	35
İncelik, Özgül ağırlık ve Blaine	47
Priz Süreleri, Su ihtiyacı ve Le Chatelier.....	49
TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME	57
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65

KAYNAKÇA	68
ÖZGEÇMİŞ.....	70



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Genel Çimento Ailesindeki 27 Ürün	2
Tablo 2. Çimento Ana Bileşenlerin Özellikleri	9
Tablo 3. Portland Çimentonun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	12
Tablo 4. Tras ve Uçucu Külün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	14
Tablo 5. Demir Cevheri ve Boksitin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	15
Tablo 6. Yapılan Fiziksel ve Mekaniksel Testler	28
Tablo 7. Karışım Hesap Tablosu	29
Tablo 8. Çimentoların Katkı Oranlarının Yüzdesel Değişimine Göre 7 Günlük Hidratasyon Isıları	30
Tablo 9. Çimentoların Katkı Oranlarının Yüzdesel Değişimine Göre Basınç Dayanımları....	35
Tablo 10. Çimentoların Katkı Oranlarının Yüzdesel Değişimine Göre İncelik, Özgül Ağırlık ve Blaine değerleri	48
Tablo 11. Çimentoların Katkı Oranlarının Yüzdesel Değişimine Göre Priz Başlangıç Süreleri, Su İhtiyaçları ve Le Chatelier (hacimsel genleşme) değerleri.....	49

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Çimento anabileşenleri.....	5
Şekil 2. Su/Çimento oranı ile dayanımın değişimi.....	8
Şekil 3. Günlere göre çimento bileşiklerinin mukavemet kazancı.	9
Şekil 4. Öğütülmüş tras (Doğal Pozolan).....	13
Şekil 5. Uçucu kül	13
Şekil 6. Demir Cevheri.....	14
Şekil 7. Boksit	15
Şekil 8. Numune Kalıbı.....	16
Şekil 9. Karıştırıcı (Mikser)	17
Şekil 10. Sarsma Cihazı (Şok Tablası).....	17
Şekil 11. Basınç Dayanım Cihazı.....	18
Şekil 12. Vicat Cihazı.....	18
Şekil 13. Le Chatelier Cihazı	19
Şekil 14. Elek	19
Şekil 15. X Işını Floresans Cihazı	20
Şekil 16. Kalorimetre Cihazı.....	21
Şekil 17. Öğütücü	21
Şekil 18. Plastik Kap	22
Şekil 19. Saf Çimento ile kül/tras katkılı çimentoların hidrasyon ısılarının değişimi.....	31
Şekil 20. Saf Çimento ile demir/boksit katkılı çimentoların hidrasyon ısılarının değişimi ..	31
Şekil 21. %15 kül katkılı çimento ile demir/boksit katkılı çimentoların hidrasyon ısılarının değişimi.....	32
Şekil 22. %30 kül katkılı çimento ile demir/boksit katkılı çimentoların hidrasyon ısılarının değişimi.....	33
Şekil 23. %15 tras katkılı çimento ile demir/boksit katkılı çimentoların hidrasyon ısılarının değişimi.....	33
Şekil 24. %30 tras katkılı çimento ile demir/boksit katkılı çimentoların hidrasyon ısılarının değişimi.....	34
Şekil 25. Saf Çimento ile kül/tras katkılı çimentoların basınç dayanımlarının değişimi	36
Şekil 26. Saf Çimento ile demir cevheri katkılı çimentoların basınç dayanımlarının değişimi.....	37
Şekil 27. Saf Çimento ile boksit katkılı çimentoların basınç dayanımlarının değişimi	37

Şekil 28. %15 kül katkılı çimentolara katılan demir katkısının saf çimentonun basınç dayanımına etkisi	38
Şekil 29. %15 kül katkılı çimentolara katılan boksit katkısının saf çimentonun basınç dayanımına etkisi	38
Şekil 30. %30 kül katkılı çimentolara katılan demir katkısının saf çimentonun basınç dayanımına etkisi	39
Şekil 31. %30 kül katkılı çimentolara katılan boksit katkısının saf çimentonun basınç dayanımına etkisi	39
Şekil 32. %15 tras katkılı çimentolara katılan demir katkısının saf çimentonun basınç dayanımına etkisi	40
Şekil 33. %15 tras katkılı çimentolara katılan boksit katkısının saf çimentonun basınç dayanımına etkisi	41
Şekil 34. %30 tras katkılı çimentolara katılan demir katkısının saf çimentonun basınç dayanımına etkisi	41
Şekil 35. %30 tras katkılı çimentolara katılan boksit katkısının saf çimentonun basınç dayanımına etkisi	42
Şekil 36. Saf çimento ve kül/tras karışımı çimentolara eklenen %1 demir cevherinin basınca etkisi	42
Şekil 37. Saf çimento ve kül/tras karışımı çimentolara eklenen %2 demir cevherinin basınca etkisi	43
Şekil 38. Saf çimento ve kül/tras karışımı çimentolara eklenen %4 demir cevherinin basınca etkisi	44
Şekil 39. Saf çimento ve kül/tras karışımı çimentolara eklenen %1 boksitin basınca etkisi ..	45
Şekil 40. Saf çimento ve kül/tras karışımı çimentolara eklenen %2 boksitin basınca etkisi ..	46
Şekil 41. Saf çimento ve kül/tras karışımı çimentolara eklenen %4 boksitin basınca etkisi ..	47
Şekil 42. Saf Çimento ile kül/tras katkılı çimentoların priz sürelerinin değişimi	50
Şekil 43. Saf Çimento ile demir/boksit katkılı çimentoların priz sürelerinin değişimi	51
Şekil 44. Saf Çimento ile %15 kül katkılı çimentonun demir/boksit katkılı çimentolarının priz sürelerinin değişimi	51
Şekil 45. Saf Çimento ile %30 kül katkılı çimentonun demir/boksit katkılı çimentolarının priz sürelerinin değişimi	52
Şekil 46. Saf Çimento ile %15 tras katkısından (karışımından) oluşan çimentonun priz süresi üzerine (demir/boksit) katkısının etkisi.	52
Şekil 47. Saf Çimento ile %30 tras karışımından oluşan çimentoya eklenen (demir/boksit) katkısının priz süresi üzerine etkisi.	53

Şekil 48. Saf çimentoya eklenen (kül/tras) katkısının su ihtiyacı üzerine etkisi.....	53
Şekil 49. Saf çimentoya eklenen (demir/boksit) katkısının su ihtiyacı üzerine etkisi.....	54
Şekil 50. Saf Çimento ile %15 kül karışımından oluşan çimentoya eklenen (demir/boksit) katkısının su ihtiyacı üzerine etkisi.....	54
Şekil 51. Saf Çimento ile %30 kül karışımından oluşan çimentoya eklenen (demir/boksit) katkısının su ihtiyacı üzerine etkisi.....	55
Şekil 52. Saf Çimento ile %15 tras karışımından oluşan çimentoya eklenen (demir/boksit) katkısının su ihtiyacı üzerine etkisi.....	55
Şekil 53. Saf Çimento ile %30 tras karışımından oluşan çimentoya eklenen (demir/boksit) katkısının su ihtiyacı üzerine etkisi.....	56
Şekil 54. Mevcut çalışma ile Trasin çimento yüzey özelliğine, hidratasyona ve basınç dayanımına etkisi üzerine yazılan makaledeki priz sürelerinin karşılaştırılması.....	58
Şekil 55. Mevcut çalışma ile Trasin çimento yüzey özelliğine, hidratasyona ve basınç dayanımına etkisi üzerine yazılan makaledeki su ihtiyaçlarının karşılaştırılması ...	59
Şekil 56. Mevcut çalışma basınç dayanım verileri.....	59
Şekil 57. Trasin çimento yüzey özelliğine, hidratasyona ve basınç dayanımına etkisi üzerine yazılan makaledeki basınç dayanım verileri	59
Şekil 58. Mevcut çalışma ile ince öğütülmüş atık camın priz süresi ve basınç dayanımına etkisinin incelendiği araştırmanın karşılaştırılması	60
Şekil 59. Mevcut çalışma basınç dayanım verileri.....	61
Şekil 60. İnce öğütülmüş atık camın priz süresi ve basınç dayanımına etkisinin incelendiği araştırmanın basınç dayanım verilerinin karşılaştırılması	61
Şekil 61. Mevcut çalışma basınç dayanım değerleri	62
Şekil 62. Farklı inceliklerdeki tras ve uçucu külün çimento dayanımlarına etkisinin incelendiği çalışma verileri	62
Şekil 63. Mevcut çalışma ile termik santral atığı uçucu külün portland çimentosu özelliklerine etkisinin incelendiği araştırmanın priz sürelerinin karşılaştırılması	63
Şekil 64. Mevcut çalışma basınç dayanım değerleri	63
Şekil 65. Termik santral atığı uçucu külün portland çimentosu özelliklerine etkisinin incelendiği araştırmanın basınç dayanımları üzerine etkisi	64
Şekil 66. Mevcut çalışma ile Seyitömer ve Çayırhan uçucu küllerinin portland çimentosu - uçucu kül hamurunun priz başlama ve sonu sürelerine etkisinin incelendiği araştırma verileri	64

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

%	Yüzde
cal	Kalori
dk	Dakika
g	Gram
J	Joule
K	Kelvin
MPa	Mega Pascal
N	Newton
μ	Mikron
s	Saniye

Kısaltmalar

CEM	Cement (Çimento)
CEN	The European Committee for Standardization
K	Kontrol referans numunesi (CEM I 42,5R)
KD1	%1 Demir cevheri + %99 K çimentosu
KD2	%2 Demir cevheri + %98 K çimentosu
KD4	%4 Demir cevheri + %96 K çimentosu
KB1	%1 Boksit + %99 K çimentosu
KB2	%2 Boksit + %98 K çimentosu
KB4	%4 Boksit + %96 K çimentosu
PÇ	Portland çimentosu
TS	Türk Standartları
TS EN	Türk Standartları Avrupa Normları
T15	%15 Tras + %85 CEM I 42,5R
T15D1	%1 Demir cevheri + %99 T15 çimentosu
T15D2	%2 Demir cevheri + %98 T15 çimentosu
T15D4	%4 Demir cevheri + %96 T15 çimentosu
T15B1	%1 Boksit + %99 T15 çimentosu
T15B2	%2 Boksit + %98 T15 çimentosu
T15B4	%4 Boksit + %96 T15 çimentosu
T30	%30 Tras + %70 CEM I 42,5R

T30D1	%1 Demir cevheri + %99 T30 imentosu
T30D2	%2 Demir cevheri + %98 T30 imentosu
T30D4	%4 Demir cevheri + %96 T30 imentosu
T30B1	%1 Boksit + %99 T30 imentosu
T30B2	%2 Boksit + %98 T30 imentosu
T30B4	%4 Boksit + %96 T30 imentosu
V15	% 15 Kl + % 85 CEM I 42,5R
V15D1	%1 Demir cevheri + %99 V15 imentosu
V15D2	%2 Demir cevheri + %98 V15 imentosu
V15D4	%4 Demir cevheri + %96 V15 imentosu
V15B1	%1 Boksit + %99 V15 imentosu
V15B2	%2 Boksit + %98 V15 imentosu
V15B4	%4 Boksit + %96 V15 imentosu
V30	% 30 Kl + % 70 CEM I 42,5R
V30D1	%1 Demir cevheri + %99 V30 imentosu
V30D2	%2 Demir cevheri + %98 V30 imentosu
V30D4	%4 Demir cevheri + %96 V30 imentosu
V30B1	%1 Boksit + %99 V30 imentosu
V30B2	%2 Boksit + %98 V30 imentosu
V30B4	%4 Boksit + %96 V30 imentosu
XRF	X Işını Floresans cihazı

GİRİŞ

Çimento tüm dünyada kullanılan en önemli insan yapısı malzemelerden birisidir. Kullanım alanının fazlalığı ve uzun süre dayanıklılığının olması nedeniyle dünyanın her yerinde kullanılmaktadır. Ülkelerin ekonomik gelir düzeyi arttıkça ve dünya nüfusu artmaya devam ettikçe çimentoya olan ihtiyaçta artmıştır. Yeni tip çimentoların üretimiyle yeni yapılar tasarlama ve inşa etme merakı insanları araştırmaya sevk etmiştir.

Bu günün ekonomik koşulları ve hızlı kentleşme sonucu yapı talebinin artması, bu alanda sanayileşmenin doğmasına ve prefabrikasyonun gelişmesine neden olmuştur. Bu sayede, hem binalar kısa sürede inşa edilmekte, hem de ekonomi sağlanmaktadır (Ozman 1985).

Ana çimento olarak adlandırılan ilk portland çimentosunu İngiltere' nin Leeds kentinde duvarcılık yapmakta olan Joseph Aspdin 1824 yılında icat etmiş ve patent almıştır (Erdoğan ve Erdoğan 2007). Çimentonun üretimi, doğada bulunan kalker yani kireçtaşı ile silis içeriği yüksek olan kilin çimento oluşumu için gereken kimyasal reaksiyonları gerçekleştirebilmesi için karıştırılması ve yüksek ısı ile pişirilmesi, sonrasında ince taneli hale gelecek şekilde öğütülmesi sonucunda üretilmiştir (Kapkaç 2013).

Çimento ve betonun tüm dünyada geniş bir kullanım alanı vardır. Kullanım yeri ve amacına göre de çimento tipleri ve beton sınıfları farklılık gösterir. Betonarme yapılarda çimento ile birlikte kullanılan agrega, su, kimyasal katkı maddeleri ve bu malzemelerin kendi içerisindeki oranlarının doğru belirlenmesinin kaliteli beton oluşmasında önemli rolleri vardır. Belirlenen reçetelere göre çimento ve suyun bir araya getirilmesi ile oluşan çimento pastası, ilk başlarda plastik özelliğe sahiptir. Çimento ve suyun karıştırılması itibari ile aralarında kimyasal reaksiyonlar başlar ve hidrasyon dediğimiz olay meydana gelir. Hidrasyon olayı ekzotermik bir tepkime olduğundan, reaksiyonlar sonucunda ısı açığa çıkmaktadır. Hidrasyonun devamında, plastik özellikte olan çimento pastası zamanla bu özelliğini kaybetmeye başlar ve katılaşarak priz alma dediğimiz katılaşma süreci başlar. Priz süresinin başlangıcı minimum 60 dakika olmalıdır.

Hidrasyon süreci, çimento pastasının bağlayıcılık kazanma miktarı ve hızıyla doğru orantılı olarak ilerler. Hidrasyon ürünlerinin artmasıyla birlikte çimentonun içerisindeki boşluklu yapının azalması da sağlandığından hem çimento pastasının hem de betonun dayanım özelliklerinin oluşmasında büyük etkisi vardır. Beton içerisinde ki bu boşluklu yapının

azaltılması, dayanıklılığın artırılması aynı zamanda maliyetlerin düşürülmesi amacıyla çimento üretiminde bazı katkı maddeleri kullanılmaktadır.

Günümüzde modern beton teknolojisinde neredeyse kimyasal ve mineral katkısız bir beton üretilmez hale gelmiştir (Uygunoğlu vd 2012). Beton yapımında bağlayıcı malzeme olarak, genellikle değişik tiplerdeki portland çimentoları veya puzolanik özellikli malzemelerden oluşan portland-puzolan tipi çimentolar ve cüruflu çimentolar kullanılmaktadır. Özel karakteristikli betonlar için bazı durumlarda özel çimentolar da kullanılmaktadır. İstenen kalitede beton elde edebilmek için çimento tiplerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir (Erdoğan 1995).

Beton, yapısında çimento, agrega ve hidrat suyu bulunan bir malzemedir. Ayrıca beton içerisine katılan doğal ve dere kumu, ince ve kalın taşlar, genellikle silis içerikli atık malzemeler vb. agregaların yapısından dolayı boşluklu malzemelerdir. Su yeryüzü ve yeraltında bulunan bir su kaynağı olmasıyla birlikte aynı zamanda atmosferde ki ortamda da bulunan bir maddedir (Şimşek 2005). Beton kullanılarak üretilen yapı sistemleri genelde su kaynaklarından birisi ile temasta olup sudan etkilenir. Yapılarda kullanılan bu boşluklu malzemelerin suyla temas etmesi sonucunda ortaya çıkabilecek olumsuz durumların etkisinin azaltılması amacıyla da, su basıncı kontrolü için yalıtım malzemeleri kullanılır (Biricik 1999). Beton yapının içerisinde zamanla oluşan çatlaklara nüfuz eden CO_2 , rutubet, endüstriyel alanlarda havada bulunan kimyasallar ve korozyon maddeleri çelik donanımda korozyon oluşumuna neden olur. Korozyona uğrayan bu donanımlar paslanıp dayanımını yitirmeye ve beton performansını kaybetmeye başlar.

Betonarme yapılar günümüzde yapı sistemlerinin önemli kısmını oluştururlar. Bu yapıların kullanım yerleri ve konumlarına göre havadan etkilenme, zeminden ve su altındaki yapılarda ise sudan etkilenme durumları olabilir. Betonun boşluklu yapısı baraj inşaatı, su kanalları, su depoları gibi yapılarda geçirgenlik açısından çok önemli bir rol oynar.

Beton, üretim ve hidratasyon sürecinde farklı çevre koşullarına tabi tutulur. Sıcak hava, termal büzölmeye ve ayrıca betonun hızlı hidratasyonuna neden olur. Özellikle termal büzölme, beton yüzeyinde rötne çatlağına neden olur. Bu çatlaklar bazı dayanıklılık sorunlarına neden olabilir. Hızlı hidratasyon, priz süresinin kısılmasına neden olabilir. Priz süresinin kısılması, işlenebilirlik için daha kısa bir süreye neden olur. Ayrıca hızlı hidratasyon işlemine tabi tutulan betonlar daha gözenekli ve düzensiz mikroyapıya sahip olabilir (Öztürk 2007). Beton üretiminde ki en önemli adımlardan biri betonun suyla reaksiyonunun doğru şartlarda yapılmış olması (betonun bakım (kür) süresi) ve hidratasyon takibidir. Betonun hızlandırılmış kür yöntemleri uygulanarak erken dayanım kazanması bazı inşaat uygulamalarında büyük önem taşımaktadır (Türkel ve Alabaş 2002).

Elektron mikroskop yöntemiyle elde edilen çalışmalarda betonun içyapısının incelenmesi, sürüklenmiş hava boşluklarının yüzeylerinde farklı tabakaların oluştuğunu göstermektedir (Pekmezci ve Atahan 2014). Bu oluşan tabakaların geçirimsizliği çevresel etkilerle birlikte betonun dayanıklılığının azalmasına da neden olmaktadır. Hava sıcaklıklarındaki değişimlerle; betonda donma-çözülme, korozyon, kullanım yerine bağlı olarak deniz tuzlarının sülfat etkisi, çimento agrega arasında oluşan alkali silika reaksiyonları da bu süreci etkilemektedir. Betonda kullanılan suyun, beton içerisinde oluşan küçük hava boşluklarını doldurmasını sağlamak gerekir. Bunun için kullanılacak hava sürükleyici kimyasalın kullanım miktarının, beton içerisindeki dağılımının ve taneciklere etkisinin doğru belirlenmesi gerekmektedir (Özyıldırım 2007). Betonun girdilerinden biri olan agregaların boyutsal farklılıkları da beton içerisinde hava boşlukları yaratır. Normalde betonda bu hava boşlukları istenmez. Özellikle baraj ve havalimanı inşaatlarında bu durumun yaşanmaması adına katkının daha stabil ve kontrol edilebilir olması istenir.

Bu çalışma, mineral katkı olarak kullanılan tras ve uçucu külün, hidratasyon ısını ne ölçüde değiştirdiği, minör olarak katılan demir ve boksit katkısının ise bu mineral katkıları ile nasıl çalıştığını, çimentonun hidratasyon ısı, fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerine ne ölçüde etki ettiğini incelemek amacıyla yapılmıştır. Literatürde tras ve uçucu kül ile ilgili çalışmalar mevcut olup demir ve boksit gibi minerallerin etkisi incelenmemiş olduğundan, minör olarak katılan bu katkıların çimentodaki etkileri incelenmek istenmiştir.

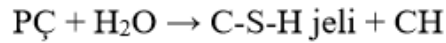
KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Çimento Bileşim, Özellikler

Çimento, betonun temel girdisidir. Beton yapılırken çimentonun işlevi, su ile kimyasal reaksiyona girerek hidrate olması böylece çimento pastasını oluşturması ve bu karışıma reçetede belirlenen oran/miktarda katılan agregaların etrafını sararak bir arada durmalarını sağlamasıdır. Başka bir deyişle çimento, betondaki agregaların bağlayıcı malzemesidir.

Hidratasyon ısısı, çimento ile su arasındaki etkileşim nedeniyle meydana gelir ve zamanla bu ekzotermik reaksiyonlardan çıkan ürünler çimentoya ve dolayısıyla betona bağlanma özelliği verir (Ardoğa 2014).

Portland çimentosunda meydana gelen hidratasyon reaksiyonu kabaca aşağıdaki şekilde temsil edilebilir (Kuleli 2010).



Çimentolar, TS EN 197-1 standardına göre isimlendirilirler. Bu standartta genel çimentolara ait bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri açık ifadelerle belirtilmiştir.

Bu standart, 27 farklı genel çimento ürününün, bileşenlerinin tarifini ve özelliklerini kapsar. Her çimentonun tarifini, 9 dayanım sınıfının bulunduğu aralık içinde, ilgili çimentonun üretimi için bileşenlerin katılma oranını ihtiva eder. Tanımlama bileşenlerin karşılayacağı gerekleri de kapsar. Tanımlama aynı zamanda 27 farklı çimentonun ve dayanım sınıflarının gerekli mekanik, fiziksel ve kimyasal gereklerini belirtir. Ayrıca bu standart ilgili kuralları ve uygunluk kriterlerini tarif eder. Dayanıklılık için ilgili gerekler de verilmiştir (TSE 2012).

Genel çimento ailesindeki 27 ürün Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Genel Çimento Ailesindeki 27 Ürün

Ana Tipler	27 ürüne ait işaret (Genel Çimento Tipleri)	Bileşim (kütleye a % olarak)											
		Ana bileşenler											
		Klinker	Yüksek fırın cürufu	Silis dumanı	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş Şist	Kalker		Minör ilave bileşen	
					Doğal	Doğal kalsine edilmiş	Silissi	Kalkersi		L	LL		
CEM I	Portland çimento	CEM I	S	D b)	P	Q	V	W	T	-	-	-	0-5
CEM II	Portland çimento	CEM II/A-S	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland çürüflü çimento	CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland silis dumanlı çimento	CEM II/A-D	90-94	-	6 - 10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland silis dumanlı çimento	CEM II/A-P	80-94	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland puzolanlı çimento	CEM II/B-P	65-79	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland puzolanlı çimento	CEM II/A-Q	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland puzolanlı çimento	CEM II/B-Q	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland puzolanlı çimento	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	0-5
	Portland puzolanlı çimento	CEM II/B-V	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Portland puzolanlı çimento	CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	Portland puzolanlı çimento	CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Portland puzolanlı çimento	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
Portland puzolanlı çimento	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5	
CEM III	Portland çimento	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	Portland çimento	CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Portland çimento	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	Portland çimento	CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	Portland çimento	CEM II/A-M	80-88	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portland çimento	CEM II/B-M	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Yüksek çimento	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Yüksek çimento	CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Yüksek çimento	CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Yüksek çimento	CEM IV/A	65-89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM V	Puzolanlı çimento	CEM IV/B	45-64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Puzolanlı çimento	CEM V/A	40-64	18-30	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Puzolanlı çimento	CEM V/B	20-38	31-49	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
a Gizeledeki değerler ana ve minör ilave bileşenlerin toplamı ile ilgilirdir.													
b Silis dumanının oranı % 10'la sınırlanmıştır.													
c Portland kompozite çimento CEM II/A-M ve CEM II/B-M'de, Puzolanlı çimento CEM IV/A ve CEM IV/B'de, Kompozite çimento CEM V/A ve CEM V/B'de klinkerin dışındaki diğer ana bileşenler çimento'ya ait işaretle bevan edilmelidir (Örneğin, Madde 8'e bakılmalıdır)													

^a Çizelgedeki değerler ana ve minör ilave bileşenlerin toplamı ile ilgilidir.

^b Silis dumanının oranı % 10'la sınırlanmıştır.

^c Portland kompozit çimento CEM II/A-M ve CEM II/B-M'de, Puzolanlı çimento CEM IV/A ve CEM IV/B'de, Kompozit çimento CEM V/A ve CEM V/B'de klinkerin dışındaki diğer ana bileşenler çimentoya alt işaretlerle beyan edilmelidir (Örneğin, Madde 8'e bakılmalıdır).

Bu standarda göre 5 ana tipte çimento vardır;

- CEM I Portland çimentosu
- CEM II Portland-kompozit çimento
- CEM III Yüksek fırın cürufu çimento

- CEM IV Puzolanik çimento
- CEM V Kompoze çimento

Çimento, dört temel oksit (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3) ve bunun dışında minör olarak MgO içeren hammaddelerin, belirli oranlarda karıştırılarak öğütülmesi ve ~ 1450 °C derecede kimyasal olarak pişirilmesi ile ani olarak soğutulan ve yarı mamul olarak bilinen klinkerin alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi ile üretilmiş olur. Çimentolar, içlerine katılan yapay (uçucu kül, curüf) veya doğal (kalker, tras (puzolan)) katkılarına göre isimlendirilirler.

TS EN 197-1:2012 standardında, çimentoların suyla reaksiyona girerek hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanmalarının kalsiyum-silikat fazlarının (C-S) oluşmasıyla başladığı ifade edilmiştir. TS EN 196-2 standardına göre tespit edilen kimyasal analiz sonuçlarında ise tepkimeye girecek kalsiyum oksit (CaO) ve silisyum dioksit (SiO_2) oranının minimum kütlece %50 olması gerektiği vurgulanmıştır.

Aynı standard da klinker için de tanımlama yapılmıştır. Çimentonun yarı mamülü olan klinkerin, kütlece en az 2/3 oranında kalsiyum silikatlardan ($3CaO.SiO_2$ ve $2CaO.SiO_2$), geri kalan kısmının ise alüminyum ve demir içeren trikalsiyum alüminat ve tetrakalsiyum alümina ferrit fazlarından oluştuğu, minör olarak ta sodyum, potasyum ve klor alkali bileşiklerinden meydana geldiği bilinmektedir. Ayrıca TS EN 197-1 standartında “ (CaO/SiO_2) oranı kütlece 2,0'dan daha az olmamalıdır. MgO muhtevası ise kütlece % 5'ten fazla olmamalıdır” şeklinde bir açıklama da yer almaktadır (TSE 2012).

Puzolanik Malzemeler

Genel

Çimento ve beton üretiminde kullanılan mineral katkı malzemelerinin çoğu puzolanik özelliklidir.

Ülkemiz, doğal mineral katkı malzemesi olarak bilinen, çimento sanayinde de çokça kullanılan puzolan (tras) adı verilen kaynaklara sahiptir (Koçak vd 2010).

Puzolanik malzemeler tek başlarına kullanıldıklarında bağlayıcılık değeri olmayan veya bağlayıcılık değeri çok az olan, ancak ince öğütüldüklerinde sulu ortamda çözünmüş kalsiyum hidroksitle ($Ca(OH)_2$) tepkimeye girdiğinde çimento gibi hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanan silisli veya alüminyum silikatlı veya bunların bileşiminden oluşan doğal malzemelerdir.

Puzolanlar kendi içlerinde doğal ve yapay puzolanlar olarak ayrılmaktadır.

Volkanik kül ve tüfler, doğal içerikli toprak ve kil madeni, doğal puzolanları oluşturur. Endüstriyel üretimin yan ürünü olarak çıkan uçucu kül, cüruf, silis dumanı gibi malzemeler yapay puzolan olarak değerlendirilmektedir.

Doğal Puzolan (P)

Doğal puzolanlar, genellikle uygun kimyasal ve mineralojik bileşimli esasen reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)' den oluşmuştur. Geri kalan kısım demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer oksitleri ihtiva eder. Sertleşme için reaktif kalsiyum oksit oranı ihmal edilebilir. Reaktif silisyum dioksit miktarı kütlece % 25,0 'den daha az olmamalıdır (TSE 2012).

Volkanik, sedimanter ve diyajenetik malzemeler doğal puzolanlardır. Mehmet Serkan Kırgız (Kırgız 2008) tarafından mineralojik katkıların çeşitli tanımları, sınıfları, özellikleri ve kullanım alanları ile ilgili yapılan derlemede puzolanlarla ilgili “ Bağlayıcı olmadığı halde çimento gibi bir bağlayıcı ile birlikte harç veya betona katıldığında, beton ve harcın kimyasal ve fiziksel özelliklerini olumlu yönde geliştiren doğal ve doğal olmayan malzemelere puzolan denmektedir” şeklinde bir tanım yapılmıştır. Aynı derlemede “Doğal puzolanların kimyasal yapısı silisyum oksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) bakımından zengindir. Killerde, bu oksitlerin yanı sıra, % 20 civarında kalsit ($CaCO_3$) de yer almaktadır. ” şeklinde bir açıklama da bulunmaktadır (Kırgız 2008).

Uçucu Küller (V,W)

Uçucu kül, termik santrallerinde enerji üretimi için kullanılan pulverize kömürün yakılması sonucu fırınlardan atılan baca gazındaki toz taneciklerinin elektrostatik veya mekanik olarak çöktürülmesi ile elde edilmektedir.

Uçucu küller beton teknolojisinde ya çimento ile birlikte doğrudan betona katılarak, ya da betonda kum yerine kullanılabilirler. Çimento üretimi sırasında klinkere katılıp öğütülerek uçucu küllü çimento olarak da değerlendirilebilirler. Kum yerine kullanıldığında özgül yüzey olması çimento ile ikame edilebilmelerini sağlamaktadır. Puzolanlarda olduğu gibi uçucu küllerde de özgül yüzey ve incelik değerleri yüksek olduğundan bağlayıcılık özellikleri de yüksek olmaktadır. Bu malzemelerin kullanımı ise ekonomik açıdan fayda sağlamaktadır (Topçu ve Canbaz 2001).

Uçucu küller silisli veya kalkersi yapıda olabilir. Silisli uçucu külün puzolanik özellikleri vardır. Kalkerli uçucu külün ise puzolanik özelliklerine ilaveten hidrolik özellikleri olabilir (TSE 2012).

Silisli Uçucu Kül (V)

Silisli uçucu kül çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel partiküllerden ibaret ince bir toz olup, esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)' den oluşur. Geri kalan kısmı ise demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşikler ihtiva eder. Reaktif kalsiyum oksit (CaO) oranı kütleye % 10,0 'dan az olmalıdır. Reaktif silisyum dioksit (SiO_2) muhtevası kütleye % 25,0 'dan daha az olmamalıdır (TSE 2012).

Çimentonun Hidratasyonu

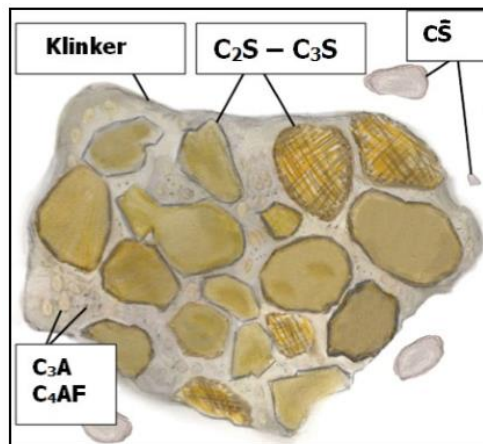
Hidratasyon olayı, çimentonun su ile kimyasal reaksiyonu olarak tanımlanabilir. Hidratasyonda çimento tanecikleri kısmi olarak su içinde çözünürler ve bu çözünen tanecikler çimentonun kimyasal kompozisyonuna göre farklı hızlarda farklı oranlarda reaksiyona girerler. Bu reaksiyonlar sırasında ısı açığa çıkar ve yeni ürünler meydana gelir. Bu yeni ürünler çimento pastasının sertleşmesine ve agregaların çimento hamuru ile bağlanmasına neden olur.

Çimentonun kimyasal kompozisyonuna ve fiziksel özelliklerine göre açığa çıkan ısı çimentonun içindeki fazların bazılarında yüksek, bazılarında ise daha düşüktür. Bu nedenle hidratasyon ısı, her çimento tipinde farklı sonuç verir.

Portland çimentosu, kireçtaşı ve kilin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ve bu işlem sonucu oluşan klinkerin alçıtaşıyla birlikte öğütülmesiyle meydana gelir. Pişirme sonucu klinker yapısında oluşan iki ana bileşen grubu (silikatlar - aluminatlar) ile sonradan ilave edilen alçı hidratasyon reaksiyonu sürecini doğrudan etkiler.

Şekil 1 'de de gösterildiği gibi çimento ana bileşenleri;

- Kalsiyum silikatlar ($C_3S - C_2S$)
- Kalsiyum aluminatlar ($C_3A - C_4AF$)
- Kalsiyum sülfatlar ($C\bar{S}.2H$)



Şekil 1. Çimento anabileşenleri (Akçansa 2006).

Silikatlar;

Silikatlar, yarı mamul klinkerin toplamda %70-80'ini oluşturur. Bu oranın yaklaşık %20'sini silisyum dioksit (SiO_2) geri kalan %60-65'ini ise kalsiyum oksit (CaO) bileşikleri meydana getirir. Bu oksitlerin bir araya gelerek kimyasal reaksiyon oluşturmasıyla silikatlar elde edilir.

Alit olarak isimlendirilen, kimyasal tanımı trikalsiyum silikat olan faz (C_3S) çimentonun yaklaşık %55-65'ini oluşturur. Hem erken hem de nihai dayanımlara etkisi vardır.

Belit olarak isimlendirilen, kimyasal tanımı dikalsiyum silikat olan faz (C_2S) çimentonun yaklaşık %15-20'sini oluşturur. Özellikle çimentonun geç dayanımlarında etkin rolü vardır. Erken dayanımlara etkisi düşüktür.

Alüminatlar;

Silis içerikli kil olarak bilinen hammaddeden gelen alüminyum oksitlerin, kalkerden gelen kalsiyum oksitle birleşmesi sonucu trikalsiyum alüminat (C_3A) dediğimiz faz meydana gelir. Kalsiyum, alüminyum ve demir oksitlerde birleşerek tetrakalsiyum alüminoferrite (C_4AF) dönüşür. Alüminatlar çimentonun yaklaşık olarak %18-20'sini oluştururlar. C_3A fazının bağlayıcılık değeri ilk ve son zamanlar için düşüktür, bu fazın suyla tepkimeye girme hızı çok yüksektir. Yüksek hidrasyon ıslısına sahiptir.

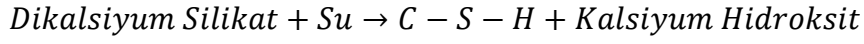
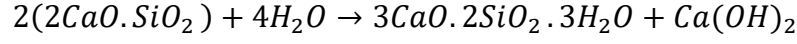
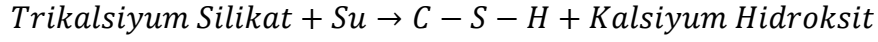
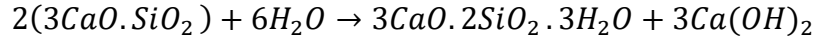
Alçıtaşı;

Klinkerin çimentoya dönüşebilmesi için, değirmende yaklaşık olarak kütlece %3-5 arası alçıtaşı ($C\bar{S}.2H$) katılarak klinker ile birlikte öğütme işlemi yapılır. Katılacak bu oran kullanılan alçıtaşının kalitesine göre farklılık gösterebilir. Alçıtaşının eklenmesinde ki amaç hızlı reaksiyona giren C_3A fazının kontrollü olarak tepkimeye girmesini sağlamaktır. Alçıtaşı her bir çimento taneciğinin etrafını sararak suyla tepkimeye girme süresini uzatır, çimentonun işlenebilirliğine olanak sağlar.

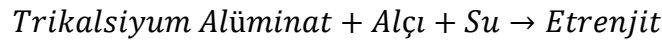
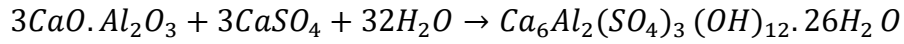
Alçıdan gelen sülfat miktarının çimentoya etkileri doğru belirlenmelidir. Kullanılan oran bu nedenle önemlidir. Bu oranın belirlenmesi için alçı optimizasyonu yapılmaktadır.

Çimentoya katılan alçıtaşından gelen sülfat ile beton içerisine çimentonun kullanım yerinden kaynaklı, yeraltı veya deniz sularından gelen sülfat aynı etkiyi yapmaz. Deniz sularından gelen sülfatın betonda hacimsel genleşmeye sebep olmaması için sülfata dayanıklı çimento üretilir ve bu çimento tiplerinde C_3A oranının düşük tutulmasına dikkat edilir. SR5 tipi çimentolarda bu oran %5'den az, SR tipi çimentolarda ise %9'dan az olacak şekilde üretim yapılır (Akçansa 2006).

C_3S ve C_2S bileşenlerinin hidrasyon tepkimesi ise şu şekilde gösterilebilir (Gopalakrishnan and Govindarajan 2011).



C_3A fazının alçı taşı ile tepkimesi ise aşağıdaki gibidir;

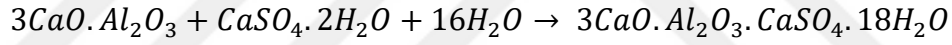


Sülfat etkisinin oluşumundaki kimyasal reaksiyonları ayrıntılı gösterecek olursak;

1.ci aşama herhangi bir sülfatın (örneğin Na_2SO_4) kalsiyum sülfat dihidrata dönüşümü:

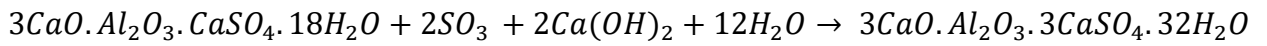


2.ci aşama kalsiyum monosülfo alüminat oluşumu:

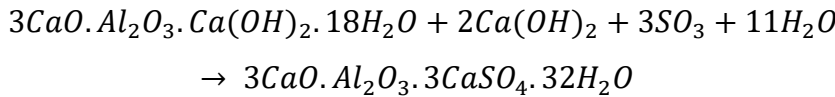


(Çimentoda $3CaOAl_2O_3$ %6'dan daha fazla olması durumunda $CaSO_4$ 'ün yerini $Ca(OH)_2$ alır ve ikincil bir ürün daha oluşabilir: $3CaOAl_2O_3.Ca(OH)_2.18H_2O$)

3.aşama etrenjitin oluşumu reaksiyonu:



şeklinde veya aşağıdaki şekilde yazılabilir:



Bu reaksiyonlarda ve özellikle üçüncü aşamada $Ca(OH)_2$ 'in gerekliliği göze çarpmaktadır. Sertleşmiş betonun sülfatlı sularla etkilenmesi sonucunda oluşan etrenjit, taze betonların prizi sırasında da teşekkül eder ve prizin ayarlanması bakımından gerekli bir üründür. Çimentonun kontrollü bir biçimde priz yapması için üretim sırasında klinkere alçı katılması zorunludur ve burada amaç çimento hamurunda çok hızlı priz yapan $3CaO.Al_2O_3$ 'ün yüzeyine çökecek etrenjitin oluşmasını sağlamaktır. Priz sırasında sıvı kıvamda olan beton, bu etrenjitten zarar görmez (Akman 2003).

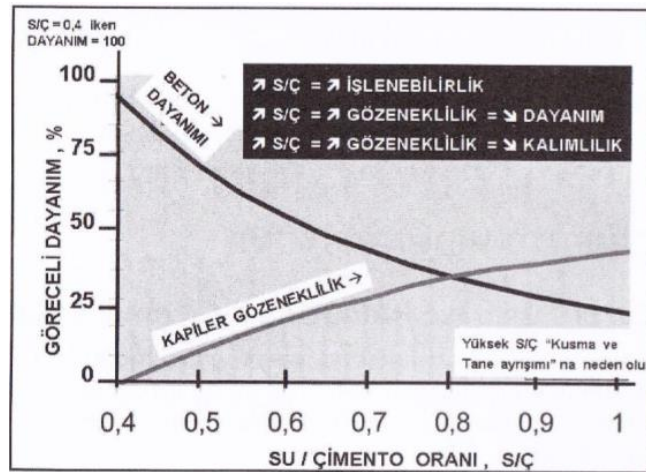
Çimentonun suyla tepkimesi sonucu betonun dayanım, dayanıklılık gibi özelliklerini sağlayan ve hidrate olan ürünler meydana gelir. Bunlardan en önemlisi olan kalsiyum silikat hidrat dediğimiz C-S-H jeli çimento hamurunun %70'lik bölümünü oluşturur ve betonda agrega ile bağ yaparak dayanımı sağlar.

Diğer ürün ise kalsiyum hidroksit dediğimiz CH kristali (Portlandit) hidrate olan ürünlerin yaklaşık %20' sini oluşturur ve betonda dayanıklılığı etkiler. Çimento hamurunda C-S-H jeli istenen, CH ise istenmeyen fazdır. CH fazı, çimentodaki boşluklu yapının nedenidir. Bu boşluklu yapının giderilmesinin tek yolu CH kristallerinin, uzun vadede mineral katkılarda bulunan silikatlar ile reaksiyona girerek C-S-H meydana getirmeleridir. Bu nedenle katkılı çimentolarla yapılan betonlarda CH fazı düşüktür. Dayanım kazanması yavaş ilerlese de betonun ilerleyen yaşlarında bu etki artmaktadır.

Çimento içinde ince öğütülmüş olarak bulunan puzolanik maddeler (silisli ve alüminli puzolan ve uçucu küller) sulu ortamda bulunan CH ile reaksiyona girerek yeni C-S-H ürününün oluşumunu sağlarlar. Böylece çimento hamurunun dayanımına katkıda bulunurlar.

Son ürün ise C_3A nın alçıtaşı ile reaksiyonu sonucu ortaya çıkan etrenjit dediğimiz yapıdır. Alçının miktarına göre değişiklik gösterir ve çimentonun priz almasında yani donmasında etkili fazdır. Çimentonun dayanımına etkisi ilk ve son zamanlarda düşüktür.

Çimentoya eklenen su hidrasyon suyu ya da hidroksit olarak birleşir, miktarı çimentonun ağırlığının %30 u kadardır. Uygulamada Su: Çimento oranının 0,3 – 0,4 olması istenirse de genellikle daha yüksektir. Su: Çimento oranı arttıkça dayanım azalır, harcın/betonun işlenmesi kolaylaşır. Düşük "(Su/Çimento)" oranının anlamı harcın yüksek dayanımı ve düşük işlenebilirliğidir. Beton yapımında ve uygulanmasında bu oran önemlidir, etkileri aşağıda gösterilmiştir: (Kuleli 2010).



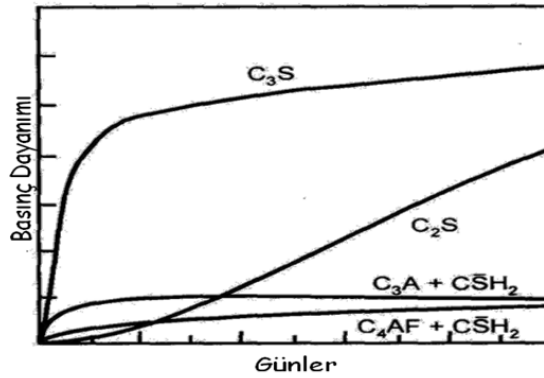
Şekil 2. Su/Çimento oranı ile dayanımın değişimi (Kuleli 2010).

Çimentonun ana bileşenlerinin özelliklerini gösteren Tablo 2 de aşağıdaki gibidir; (Akçansa 2006).

Tablo 2. Çimento Ana Bileşenlerin Özellikleri

	Çimento Anabileşenlerin Özellikleri			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Reaksiyon Hızı	orta	yavaş	hızlı	orta
Hidratasyon Isısı	orta 120 kal/g	az 62 kal/g	çok 207 kal/g	orta 100 kal/g
Bağlayıcılık Değeri				
ilk zamanlarda	yüksek	düşük	düşük	düşük
sonunda	yüksek	yüksek	düşük	düşük
(1) Bileşen özellikleri göreceli olarak verilmiştir; C ₃ A ve C ₄ AF'nin özellikleri yukarıdaki tabloya yansıtılırken, bu anabileşenlerin hidratasyonunda alçıtısının etkisi de gözönünde tutulmuştur.				
(2) İlk zamanlarda (ilk bir kaç saat veya bir gün alındığında), C ₃ A'nın katkısı "yüksek"tir. Daha sonraki zamanlar gözönüne alınacak olursa, bu katkı "düşük"tür.				

Çimento bileşiklerinin mukavemet kazancı Şekil 3'de ki grafikte gösterilebilir; (Koca 2013).



Şekil 3. Günlere göre çimento bileşiklerinin mukavemet kazancı (Koca 2013).

İnce Taneli Puzolanik Katkı Maddelerinin Beton Özelliklerine Etkisi

Çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılan trasın, çimento tanecikleri ile etkileşiminin, trasın tane dağılımının ve bu dağılımın çimentoya etkilerinin belirlenmesi vb. çalışmaların yetersiz kaldığı bilinmektedir. Çimento ve özellikle trasın ince öğütülmesi sonucunda değişen özgül yüzey değerlerinin betondaki etkisinin iyi bilinmesi ve yorumlanması gerekmektedir. Traslı çimentonun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanında, kimyasal olayları fiziksel yöntemlerle de birleştirerek yorumlamak gerekmektedir. Özellikle trasın hidratasyon sürecini etkileyen parametrelerin analizlerinin incelenmesi, çimento ve betonda olumlu sonuçlar verecektir (Koçak vd 2010).

Traslı çimento, portland çimentosunun kullanıldığı her yerde rahatlıkla kullanılabilir. Özellikle priz sürecinde ısı açığa çıkması sonucu, çimentonun içerisinde mevcut olan ve zamanla artan serbest kirecin tras içindeki reaktif silis ve alüminle birleşerek daha dayanıklı beton elde edilmesi, çekme mukavemetinin normal çimentoya göre daha yüksek

olması, asitli, karbonatlı, sülfatlı suların korozyon tesirlerine karşı dayanıklı olması sebebiyle köprü ve baraj inşaatlarında kullanılabilmektedir (Kaplan ve Binici 1995).

Portland çimento ile puzolanik özelliğe sahip katkı malzemesi karıştırıldıktan sonra suyla reaksiyon süreci başlamaktadır. Hidratasyon olarak bilinen bu süreci çimentonun içerisinde bulunan dört temel faz tepkimeleri oluşturur. Alit ve Belit olarak bahsettiğimiz çimentonun ana dayanımını sağlayan fazların reaksiyonu sonucunda kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jelleri oluşur. Diğer bir oluşan ürün ise puzolanik özellik gösteren katkı malzemesi ile tepkimeye girecek kalsiyum hidroksit (C-H) jelidir.

Puzolan katkılı çimento üretiminde eklenen katkının çok ince öğütülmesi ile çimento içerisindeki boşluklar dolmaktadır. Bu durum, çimentonun işlenebilirliğini artırır, hidratasyon ısını düşürür ve geçirimsizliği azaltır. Aynı zamanda puzolanlar ince öğütüldüklerinde, çimentoda hacimsel genleşmeye neden olan magnezyum ve kükürt elementleri ile reaksiyona girerek çimentodaki bu olumsuz etkinin azalmasına yardımcı olurlar.

Katkılı çimentolarda, portland çimentosunun kullanım oranı azaldığından, beton içerisindeki alkali oranı da doğal olarak düşecektir. Çimentodan gelen alkalilerle, kullanılan agregalardan gelen silisin reaksiyona (ASR) uğraması ve bunun bir sonucu olan hacimsel genleşmenin artma ihtimalide göz önüne alındığında portland çimento oranının azaltılmasının olumlu getirisi olacaktır. Aynı zamanda katkı oranı arttıkça, hidratasyon ısı düşecek ve açığa çıkan ısı miktarı azalacağından betondaki büzülme ortadan kalkacaktır.

Hidratasyon ısı; baraj betonları ve temel ayakları gibi kütle betonu bulunan yapılarda termik rötreye neden olur. Betonun su kaybederek veya sıcaklık farklılıklarından dolayı çatlaması sonucu beton üzerinde meydana gelen büzümeye rötreye denilmektedir. Bu nedenle hidratasyon ısını arttıran nedenler ve hidratasyon ısını düşürmek için alınacak önlemler betonun dayanıklılığı yönünden önemlidir (Kılınçkale ve Akyazı 2015).

Puzolan katkılı betonlarda katkısız betona göre ön dayanımın gelişimi daha yavaş olmaktadır. Bunun nedeni, puzolanik malzemelerin hidratasyon hızını yavaşlatması ve betonun nihai dayanım üzerine etkisinin daha yüksek olmasından kaynaklıdır.

Puzolanik aktivite, puzolandan gelen SiO_2 'nin çözelti içindeki CaO ile reaksiyona girmesiyle oluşur. Hidratlı çimento ile temas halindeki çözeltilerde her zaman serbest CaO bulunacağından, puzolanik reaksiyonlar puzolanik betondaki çatlakların kendi kendine dayanım kazanmasını sağlar (Alsop et al. 2001).

Portland çimentonun içeriğindeki klinker oranı katkılı çimentolara göre daha yüksek olduğundan üretim maliyeti daha yüksektir. Bu nedenle, katkılı çimento üretimi ve kullanımının

ekonomik açıdan avantajı büyüktür. Puzolanik katkılı çimentoların özellikle ilerleyen yaşlarında, beton performansının katkısız çimentoya yakın olması, hem teknik hem de ekonomik açıdan kullanımının faydalı olduğunu göstermektedir (Erdoğan ve Erdoğan 2007).

Mineral katkı olarak doğal puzolanların yanı sıra, uçucu kül, cüruf ve silis dumanı da çimento ve beton üretiminde sıkça kullanılmaktadır. Mineral katkılar, çimentonun suyla tepkimeye girmesi sonucu açığa çıkan hidrasyon ısını düşürürler. Özellikle ilerleyen yaşlarda dayanımı artırıp işlenebilirliğe de faydası oldukça fazladır (Doğan ve Özkul 2009).

Kömürün yakılması sonucu ortaya çıkan uçucu kül ile çelik üretimi sonucunda oluşan atık cüruf da, ekonomik açıdan değerli puzolanik katkılardır. Özellikle cürufun yeraltı sularından etkilenmediği ve kireç ile birlikte yapılarda kullanılabilirliğinin olduğu bilinmektedir (Yılmaz 2014).



MATERYAL VE YÖNTEM

Materyallerin Temini ve Hazırlanması

Bu tez çalışması, Atatürk Üniversitesi Kimya Mühendisliği ve Erzurum Aşkale Çimento Sanayi T.A.Ş.'nin laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Çimento

Bu çalışmada bağlayıcı olarak geleneksel Portland Çimento (CEM I 42,5 R) kullanılmıştır.

Tablo 3.'de bu çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özellikler gösterilmektedir:

Tablo 3. Portland Çimentonun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Ürün Adı	CEM I 42,5R (Portland Çimento)
Toplam SiO_2 (%)	19,26
Al_2O_3 (%)	4,47
Fe_2O_3 (%)	3,61
Toplam $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ (%)	27,34
CaO (%)	63,41
MgO (%)	1,42
SO_3 (%)	3,03
K_2O (%)	0,80
Na_2O (%)	0,19
Kızdırma Kaybı (%)	3,19
s. CaO (%)	1,83
32 μ elek üzeri (%)	9,9
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,09
Blaine (cm ² /g)	3423

Doğal Puzolan (Tras)

Deneylerde, Şekil 4'de görülen Bayburt ili tras ocağından temin edilen doğal puzolan kullanılmıştır. Hazırlanan karışımlarda portland çimentoya %15 ve %30 oranlarında öğütülmüş tras karıştırılmıştır.



Şekil 4. Öğütülmüş tras (Doğal Pozolan)

Uçucu Kül

Deneylerde mineral katkı malzemesi olarak Çatalağzı termik santralinden temin edilen (Şekil 5) uçucu kül kullanılmıştır. Tablo 4’de öğütülmüş tras ve uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler gösterilmektedir.



Şekil 5. Uçucu kül

Tablo 4. Tras ve Uçucu Külün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Ürün Adı	Tras (Doğal Pozolan)	Uçucu Kül
Toplam SiO_2 (%)	61,84	56,22
Al_2O_3 (%)	12,99	22,04
Fe_2O_3 (%)	3,60	8,81
Toplam $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ (%)	78,43	87,07
CaO (%)	7,81	4,00
MgO (%)	1,66	2,11
SO_3 (%)	0,06	0,06
K_2O (%)	2,23	1,88
Na_2O (%)	2,25	1,16
Kızdırma Kaybı (%)	7,02	2,32
32 μ elek üzeri (%)	30,0	28,0
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	2,38	2,28

Demir Cevheri

Deneysel çalışmamızda tras ve uçucu kül katılmış çimento karışımlarına minör olarak %1 , %2 ve %4 oranlarında demir cevheri (Şekil 6) katılarak deney yapılmıştır. Kullanılan demir cevheri Eskişehir iline bağlı Mihalicçık ilçesinden temin edilmiştir.

Tablo 5.'de demir cevherine ait kimyasal ve fiziksel özellikler gösterilmektedir.

**Şekil 6.** Demir Cevheri**Boksit**

Deneysel çalışmamızda tras ve uçucu kül katılmış çimento karışımlarına, minör olarak %1 , %2 ve %4 oranlarında boksit cevheri (Şekil 7) katılarak deney yapılmıştır.

Kullanılan boksit Isparta iline bağlı Şarkikaraağaç ilçesinden alınmıştır.

Tablo 5'de boksite ait kimyasal ve fiziksel özellikler gösterilmektedir.



Şekil 7. Boksit

Tablo 5. Demir Cevheri ve Boksitin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Ürün Adı	Demir Cevheri	Boksit
Toplam SiO_2 (%)	21,43	4,21
Al_2O_3 (%)	9,28	48,09
Fe_2O_3 (%)	52,46	28,36
Toplam $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ (%)	83,17	80,66
CaO (%)	0,78	1,40
MgO (%)	0,61	0,44
SO_3 (%)	0,26	0,11
K_2O (%)	0,03	0,08
Na_2O (%)	0,05	0,06
Kızdırma Kaybı (%)	11,92	10,84
32 μ elek üzeri (%)	38,2	32,0
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,10	3,00

Standart Kum

Bu çalışmada kullanılan kum, TS EN 196-1 standardına uygun olarak üretilmiş Limak CEN Standart kumudur. Deneylerde kullanılacak standart kum malzemesi; üreticisi tarafından, doğrulama deneyleri belgelendirme kuruluşu tarafından yapılmış olmalıdır.

Karışım Suyu

TS EN 196-1 standardında geçerli kılma deneyleri hariç diğer deneylerde içme suyu kullanılabileceği açıklanmıştır. İçilebilir suyun kullanımının uygun olduğu belirlendiğinden deneysel çalışmalarda sağlık bakanlığı tarafından yayınlanan insani tüketim amaçlı sular hakkında yönetmeliğe uygun şebeke suyu kullanılmıştır.

Karışım suyu çimentonun hidratasyonunu sağlamada kullanılan önemli bir hammaddedir. Bu nedenle kullanılan suyun içerisinde çimento ve betonun hidratasyon sürecine olumsuz etki edecek herhangi bir yabancı maddenin (iyonlar ve çözünmüş maddeler) bulunmaması çok önemlidir.

Çalışmada Kullanılan Alet, Ekipman ve Cihazlar

Numune Kalıpları

Çalışmada, Şekil 8’de ki gibi en kesitleri 40 mm x 40 mm ve uzunlukları 160 mm olan üç adet prizma şekilli numunenin aynı anda hazırlanabilmesi için üç adet yatay bölmeden oluşan kaplar kullanılmıştır.



Şekil 8. Numune Kalıbı

Karıştırıcı (Mikser)

Harcın karıştırılması için yaklaşık 5 L kapasiteli ve paslanmaz çelikten yapılmış, standarda uygun karıştırıcı paleti olan cihaz kullanılmıştır.



Şekil 9. Karıştırıcı (Mikser)

Sarsma Cihazı (Şok Tablası)

Karıştırılan harcın numune kalıplarına yerleşmesini sağlayan dakikada 60 vuruş yapabilen sarsma cihazı kullanılmıştır.



Şekil 10. Sarsma Cihazı (Şok Tablası)

Kür Dolabı ve Kür Havuzları

Betonu dökülmüş numune, 24 saatlik dayanım kazanması için $(20,0 \pm 1,0)^{\circ}\text{C}$ sıcaklığını sağlayan kür dolabında bekletilmiştir.

24 saat üzeri dayanım değerleri için deneye tabi tutulan numuneler ise $(20,0 \pm 1,0)^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta su bulunan kür havuzlarında bekletilmiştir.

Basınç Dayanım Cihazı

Basınç dayanım testlerinde TS EN 196-1 standardında belirtilen (2400 ± 200) (N/s)'lik yükleme hızını sağlayan Atom Teknik marka pres cihazı kullanılmıştır.



Şekil 11. Basınç Dayanım Cihazı

Vicat Cihazı

Priz başlangıç süresi testlerinin yapılması için otomatik Vicat cihazı kullanılmıştır.



Şekil 12. Vicat Cihazı

Le Chatelier Cihazı

Çimentoda hacim genişmesinin tayini için kullanılan cihazdır. Çoğunlukla çimentonun kimyasal analizine göre bu oran değişmektedir. Çalışmada Le Chatelier kalıbı ve su banyosundan oluşan bu cihaz kullanılmıştır.



Şekil 13. Le Chatelier Cihazı

Elek Cihazı ve Elek

Elek üstü kalan bakiyeyi tespit etmek amacıyla bu çalışmada Astek marka otomatik Alpine elek cihazı kullanılmıştır. Karışım numunelerinde 32 μ elek bakiyesi test edilmiştir.

Hidratasyon ısısı test aşamalarında göz açıklığı 125 μ m ve 600 μ m olan elekler kullanılmıştır.



Şekil 14. Elek

Blaine Cihazı

Hava geçirgenlik yöntemi ile çimentonun 1 gramının kapladığı cm² cinsinden yüzey alanının tespiti için çalışmada Atom Teknik marka otomatik Blaine cihazı kullanılmıştır.

X ışını Floresans Cihazı

Hazırlanan numunelerin, Panalytical marka x ışını floresans cihazında kimyasal analizleri yapılmıştır.



Şekil 15. X Işını Floresans Cihazı

Hidratasyon Isısı Cihaz ve Ekipmanları

Kalorimetre

Kalorimetre; çözünme kabı, termometre, huni ve karıştırıcıdan oluşan hidratasyon ısını belirleyen en önemli ekipmanlardan biridir.

Çözünme Kabı; yalıtılmış malzemeden yapılmış, kutu içerisinde tutulan, içerisinde sıcaklık takibi için daldırılmış termometre bulunan ve yalıtımlı bir tıpadan oluşan kaptır. Çözünme kabı asit karışımına dayanıklı olmalıdır. Kalorimetrenin yalıtımı, ısı kaybı katsayısının TS EN 196-8 standardında verilen değerin altında gelmesini sağlayacak şekilde yapılmalıdır.

Termometre; Beckmann termometresi veya platin dirençli dijital ölçüm yapan termometre kullanılmalıdır.

Deneylerde kullanılan huni ve karıştırıcı asit karışımına dayanıklı plastikten yapılmıştır. Karıştırıcı pervanesi kabın dibine mümkün olduğunca yakın, ısı yayılımını önlemek için düşük güçte bir motor tarafından döndürülmektedir.



Şekil 16. Kalorimetre Cihazı

Termostatik kontrollü banyo

Hidrate olmuş çimento numunelerini 7 gün boyunca $20,0 (\pm 0,2)^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta bekletmek için yapılan çalışmalarda termostat kontrollü su banyosu kullanılmıştır.

Harç veya elektrikli öğütücü

7 gün sonunda hidrate olmuş çimento numunelerini öğütmek için Şekil 17’de görülen Herzog marka öğütme cihazı kullanılmıştır.



Şekil 17. Öğütücü

Plastik veya cam vialler

Hidrate olmuş çimentoyu su banyosunda bekletmek için Şekil 18’de ki gibi yaklaşık 20 mL’lik plastik kap kullanılmıştır.



Şekil 18. Plastik Kap

Deneylerde sıcaklık okumalarındaki süreleri ölçmek için stopwatch marka kronometre, numunelerin kızdırma kaybının tayininde $950 (\pm 25)^\circ\text{C}$ 'de çalışabilen kül fırını, $\pm 0,0001$ g hassasiyetle tartım yapabilen bir hassas terazi ve 20 mL kapasiteli krozeler kullanılmıştır.

Hidratasyon Isısı Çözelti Analiz Yöntemi

Kalorimetre Kalibrasyonu

Hesaplamalarda kullanılmak üzere ilk olarak ısı kapasite ve ısı kaybı katsayısının tayini için kalorimetrenin kalibrasyonundan emin olmamız gerekmektedir.

Kalibrasyonda, asit karışımında ihtiyaç duyulan miktara göre; 100,0 mL 2,00 ($\pm 0,01$) mol/L' lik nitrik asit (HNO_3) için 2,60 mL % 40'lık hidroflorik asit (HF) ilave edilmiştir.

Kalorimetrenin ısı kapasite tayini için çinko oksit kullanılmıştır. Çinko oksit ilk olarak $950 (\pm 25)^\circ\text{C}$ 'de kızdırılıp, soğutuldu ve 125 μm elekten geçene kadar öğütülmüştür. Numune deney sırasında kullanılmak üzere havanın neminden etkilenmemesi için desikatörde saklanmıştır.

İşlem

Asit karışımının miktarı, sıvı seviyesinin kalorimetre tıpasından 2 cm aşağısında olacak şekilde $\pm \% 0,2$ doğrulukla ayarlanarak cam kap içerisine konur. Isıl kapasitenin tayininden hemen önce çinko oksit $950 (\pm 25)^\circ\text{C}$ 'de en fazla 5 dakika kızdırılır ve bir desikatör içerisinde oda sıcaklığına kadar soğutulur. Eşitlik 1'de belirtilen oran sağlanacak şekilde, kullanılacak çinko oksit miktarı $\pm 0,0001$ g doğrulukla tartılır.

Eşitlik 1;

$$\frac{\text{Asit karışımının kütlesi}}{\text{Çinko oksitin kütlesi}} = 60 \pm 1$$

Sonraki işlemler aşağıdaki gibi gerçekleştirilmelidir:

a) Ön hazırlık aşaması,

Asit karışımı 40-50 dakika aralığında karıştırılır.

- b) Başlangıç aşaması,
sıcaklık artış hızı sabit olduğunda kronometre kullanılarak süre başlatılır ve ilk sıcaklık ($\bar{T}_{-15}$) kaydedilir.
- c) Numune girişi,
15 dakika sonundaki sıcaklık (T_0) kaydedilir ve hemen çinko oksit numunesi asit karışımına ilave edilir.
- d) Çözünme aşaması,
karışım 30 dakika karıştırıldıktan sonra çözünme tamamlanmış olarak kabul edilir ve sıcaklık ($\bar{T}_{30}$) kaydedilir. Ayrıca ortam sıcaklığı da (T_a) bilinmelidir. (T_a) ve ($\bar{T}_{30}$) arasındaki fark 0,5 °C'den daha az ise, deney tekrarlanır.
- e) Son aşama,
15 dakika daha bekletilerek son sıcaklık ($\bar{T}_{45}$) kaydedilir.

Okuma hatalarını azaltmak için tayin edilen sürenin (T_i) (örneğin, (T_{i-2}), (T_{i-1}), (T_i), (T_{i+1}), (T_{i+2})) 2 dakika öncesi ve sonrası, 1 dakika aralıklarla kaydedilip 5 farklı okumanın ortalaması olarak, ($\bar{T}_{-15}$), ($\bar{T}_{30}$) ve ($\bar{T}_{45}$) sıcaklıkları tayin edilir. (T_0)'ın değeri T_{-4} ile T_{-1} süresindeki zamana karşı sıcaklık fonksiyonunun dış kestirimi ile tayin edilir. Dış kestirim yapılmış değer, $\pm 0,002$ °C' tan daha fazla olarak okunan (T_0)'dan farklıysa, bu durumda (T_0) yerine dış kestirim yapılmış değer geçer. Çinko oksit kalıntısı fazlaysa kalorimetre açıldığında huninin ucuna veya tıpayaya yapışmış olarak bulunur, bu durumda kalibrasyon tekrarlanır.

Ölçümlerde sıcaklık okumaları, çinko oksit numunesi girişinden 17 dakika önce başlar ve son okuma çinko oksit girişinden 47 dakika sonra alınır. Kalibrasyonun toplam süresi 64 dakikadır (TSE 2011).

Kalibrasyon Karakteristiklerinin Hesaplanması

Sıcaklık artışı düzeltilmesi ΔT_c , aşağıdaki formülden hesaplanır:

$$\Delta T_c = (\bar{T}_{30} - T_0) - 2(\bar{T}_{45} - \bar{T}_{30})$$

Burada ΔT_c ; ($\bar{T}_{30}$) ve ($\bar{T}_{45}$) için, bir dakika aralıklarla alınan beş ölçümün ortalama değeridir.

Isı kaybı katsayısı (K), her 15 dakikadaki her bir Kelvin sıcaklık farkı, (K/15 min.K⁻¹) Kelvin cinsinden aşağıdaki formülden hesaplanır:

$$K = \frac{(T_0 - \bar{T}_{-15}) - (\bar{T}_{45} - \bar{T}_{30})}{(\bar{T}_{30} - T_0)}$$

Isıl kapasite (C), her Kelvin için joule olarak aşağıdaki formülden hesaplanır:

$$C = \frac{P}{\Delta T_c} [1077,43 + 0,364(30 - T_f) + 0,50(T_a - T_f)]$$

Burada;

P	Çinko oksitin kütlesi, gram (g)
T _f	Çözülme aşamasının sonundaki sıcaklık, derece Celsius (°C), (örneğin, ($\bar{T}_{30}$) + Beckmann termometresinde sıfıra karşılık gelen Celsius olarak sıcaklık)
T _a	Kalorimetre içerisine konulan çinko oksitin sıcaklığıdır (örneğin, ortam sıcaklığı), derece Celsius (°C),
1077,43	30 °C' ta çinko oksitin çözünme ısısı (J.g ⁻¹),
-0,364	Çinko oksitin çözünme ısısının sıcaklık katsayısı (J.g ⁻¹ .K ⁻¹),
0,50	Çinko oksitin özgül ısısı (J.g ⁻¹ .K ⁻¹)

Virgülden sonra iki hane olarak ifade edilen ısıl kapasite C ve virgülden sonra dört hane olarak ifade edilen ısı kaybı katsayısı K, kalorimetrede okunan 5 kalibrasyon değerinin ortalaması alınarak hesaplanır. Her 15 dakikadaki her bir Kelvin sıcaklık farkı için K, 0,06 K'den daha az değilse kalorimetre gerekleri karşılamaz.

Çözünme Isısının Tayini

Hidrate olmamış çimentonun çözünme ısısı

Kullanılacak asit karışımı aşağıda ki bağıntıda belirtildiği şekilde hazırlanır, analizi yapılacak hidrate olmamış çimentonun kütlesi $\pm 0,0001$ g doğrulukla aşağıdaki bağıntıya göre tartılır;

$$\frac{\text{Asit karışımının kütlesi}}{\text{Hidrate olmamış çimentonun kütlesi}} = 140 \pm 2$$

Asit karışımının ön hazırlığından sonra Portland çimentosuna ve tüm çimentolara (hidrolik bağlayıcılara) uygulanacak işlem aşağıdaki gibi tanımlanır;

Tüm çimentolara (hidrolik bağlayıcılara) uygulanan işlem

Sıcaklık ($\bar{T}_{-15}$) kaydedilir ve kronometre çalıştırılır. 15 dakika sonrasındaki sıcaklık (T_0) kaydedilir ve hemen numune girişi yapılır. 30 dakikalık çözünme aşamasından sonraki sıcaklık ($\bar{T}_{30}$) kaydedilir.

Portland çimentoya uygulanan işlem

Sıcaklık (T_0) kaydedilir, kronometre çalıştırılır ve hemen numune girişi yapılır. 30 dakikalık çözünme aşamasından sonraki sıcaklık ($\bar{T}_{30}$) ve son olarak 15 dakikalık aşamadan sonraki sıcaklık ($\bar{T}_{45}$) kaydedilir.

Hesaplama

Sıcaklık artışı düzeltmesi

Sıcaklık okumaları esas alınarak ΔT_c tüm çimentolar veya portland çimentosu için aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanır;

Tüm çimentolar (hidrolik bağlayıcılar) için;

$$\Delta T_c = (\bar{T}_{30} - T_0) - 2[(T_0 - \bar{T} - 15) - K(\bar{T}_{30} - T_0)]$$

K: Isı kaybı katsayısı, her 15 dakikadaki her bir Kelvin için Kelvin olarak ölçülen sıcaklık farkıdır. (K/15 min.K⁻¹)

Portland çimentosu (CEM I) için;

$$\Delta T_c = (\bar{T}_{30} - T_0) - 2(\bar{T}_{45} - \bar{T}_{30})$$

Çözünme ısısı

Hidrate olmamış çimentonun çözünme ısısı ($\bar{Q}_a$), (J.g⁻¹) olarak aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır:

$$\bar{Q}_a = \frac{C \times \Delta T_c}{P} + 0,8(T_f - T_a) + 0,8(T_f - 20)$$

Burada;

ΔT_c	Sıcaklık artışı düzeltmesi, Kelvin (K),
C	Kalorimetrenin ısı kapasitesi, (J.K ⁻¹),
P	Hidrate olmamış çimentonun kütlesi, gram(g),
T_f	Hidrate olmamış çimentonun çözünme aşaması sonundaki sıcaklığı, (°C),
T_a	Hidrate olmamış çimentonun kalorimetre cihazına yerleştirildiğindeki sıcaklığı, (örneğin, ortam sıcaklığı), (°C),
0,8	Hidrate olmamış çimentonun özgül ısısı, (J.g ⁻¹ .K ⁻¹),
-0,8	Hidrate olmamış çimentonun çözünme ısısının sıcaklık katsayısı, (J.g ⁻¹ .K ⁻¹)

Hidrate olmamış çimentonun çözünme ısısı, virgülden sonra tek hane olarak gösterilen iki ölçümün ortalaması olarak ifade edilir. İki ölçüm arasındaki fark, 14 (J.g⁻¹)’den daha

büyükse üçüncü bir deney yapılır. Bu üç değerin ortalamasından ± 7 (J.g⁻¹)’den daha fazla farklı olan sonuç atılır. Sonuçların biri atılırsa, kalan iki değerin ortalaması hesaplanır.

Hidrate olmuş çimentonun çözünme ısısı

Plastik kapta 7 gün boyunca bekletilen, hidrate olmuş çimento numunesi çıkarılır ve numunenin tamamı 600 µm elekten geçene kadar hızlı bir şekilde ezilir. Öğütücüde 45(±15 s) saniye öğütme işlemi yapılır. Hava ile temas mümkün olduğunca az olmalıdır, numunenin havadan nem kapma durumu engellenecek şekilde 15 dakikadan az sürede bu işlem tamamlanmalıdır. Çözünme ısısı tayini için kullanılacak olan hidrate olmuş numunenin miktarı, hidrate olmamış numune deneyinde kullanılan çimentodan %40 arttırılarak elde edilen miktardır. Yine çimento miktarı $\pm 0,0001$ g doğrulukla tartılır.

7 günlük hidratasyon ısısı tayini için ± 2 saat içinde çözünme ısısı deneyine başlanmalıdır.

Bağlı su için düzeltme

Hidrate olmuş ve hidrate olmamış çimento numunelerinden 2 şer gram numune $\pm 0,0001$ g doğrulukla tartılır. Krozeler kullanılarak numuneler 1 saat boyunca 950 (± 25) °C’ de kızdırıldıktan sonra desikatör içerisinde ortam sıcaklığına kadar soğutulur ve hemen tartılır.

Bağlı su için düzeltme faktörü aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır:

$$F = \frac{100 - m_h}{100 - m_a}$$

Burada;

m _h	Hidrate olmuş numunenin kızdırmadaki kütle değişimi, kütlece yüzde (%),
m _a	Hidrate olmamış numunenin kızdırmadaki kütle değişimi, kütlece yüzde (%)

Hesaplama

Burada sıcaklık artışı düzeltmesi Portland çimentosu için sıcaklık artışı düzeltmesini veren formül kullanılarak hesaplanır.

Çözünme ısısı

Hidrate olmuş çimentonun çözünme ısısı ($\bar{Q}_i$) aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır:

$$\bar{Q}_i = \frac{C \times \Delta T_c}{P \times F} + 1,7(T_f - T_a) + 1,3(T_f - 20)$$

Burada;

P	Hidrate olmuş çimentonun kütlesi, (g)
T _f	Hidrate olmuş çimentonun çözünme aşaması sonundaki sıcaklığı, (°C)
T _a	Hidrate olmuş çimentonun kalorimetre cihazına yerleştirildiğindeki sıcaklığı, (örneğin, ortam sıcaklığı) (°C)
F	Bağlı su için düzeltme faktörü,
1,7	Hidrate olmuş çimentonun özgül ısısı (J.g ⁻¹ .K ⁻¹),
-1,3	Hidrate olmuş çimentonun çözünme ısısının sıcaklık katsayısı (J.g ⁻¹ .K ⁻¹)

Hidrate olmuş çimentonun çözünme ısısı, virgülden sonra tek hane olarak gösterilen iki ölçümün ortalaması olarak ifade edilir. İki ölçüm arasındaki fark, 14 J.g⁻¹'den daha büyükse üçüncü bir deney yapılır. Bu üç değerın ortalamasından $\pm 7 \text{ J.g}^{-1}$ den daha fazla farklı olan sonuç atılır. Sonuçların biri atılırsa, kalan iki değerin ortalaması hesaplanır (TSE 2011).

Hidratasyon Isısı

Hidratasyon ısısı (H_i), her bir gram için Joule olarak ifade edilir ve 20 °C referans sıcaklıkta, elde edilen hidrate olmamış ve hidrate olmuş çimento çözünme ısıları arasındaki fark olarak aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır:

$$H_i = \bar{Q}_a - \bar{Q}_i$$

Yapılan Fiziksel ve Mekaniksel Testler ile Analiz Yöntemleri

Bu çalışmada hazırlanan tüm çimento karışımlarına Tablo 6'da yer alan fiziksel ve mekaniksel testler uygulanmıştır.

Çalışmada kullanılan uçucu kül, tras, demir cevheri ve boksit ayrı ayrı laboratuvar minyatür değirmeninde öğütülerek hazırlanmıştır. Tablo 7'de belirtilen oranlarda, öğütülmüş hazır çimento ile karışımlar hazırlanarak mikserde homojene edilmiştir.

Bu karışımların TS EN 196-1 dayanım tayini yöntemine göre harçları hazırlanmış, kütleme işlemleri yapılmış ve 1, 2, 7, 28, 60 günlük kırılmaları basınç dayanım test cihazı ile tespit edilmiştir.

Priz süreleri, su ihtiyaçları ve le chatelier hacimsel genleşmeler TS EN 196-3 standardında belirtilen analiz yöntemi ile belirlenmiştir.

7 günlük hidratasyon ısıları TS EN 196-8 çözelti yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Yönteme ait ayrıntılı bilgi tezde açıklanmıştır.

Fiziksel testlerden 32 mikron incelik, özgül ağırlık ve blaine cihazda tespit edilmiştir.

Tablo 6. Yapılan Fiziksel ve Mekaniksel Testler

Testin Adı
32 µ elek üzeri (%)
Özgül Ağırlık (g/cm^3)
Blaine (cm^2/g)
Priz başı (dk)
Priz sonu (dk)
Su / Çimento (%)
Le Chatelier (mm)
1 Günlük Dayanım (MPa)
2 Günlük Dayanım (MPa)
7 Günlük Dayanım (MPa)
28 Günlük Dayanım (MPa)
60 Günlük Dayanım (MPa)
Hidratasyon Isısı(cal/g)

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, Tablo 7’de hesaplanan karışımlara ait yapılan kimyasal (Hidratasyon Isısı/TS EN 196-8), fiziksel ve mekaniksel test sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar analiz, tablo ve grafiklerle desteklenerek açıklanmaya çalışılmıştır.

Tablo 7. Karışım Hesap Tablosu

Karışımlar	Çimento %	Tras %	Kül %	Demir Cevheri %	Boksit %
K	100	0	0	0	0
KD1	99	0	0	1	0
KD2	98	0	0	2	0
KD4	96	0	0	4	0
KB1	99	0	0	0	1
KB2	98	0	0	0	2
KB4	96	0	0	0	4
V15	85	0	15	0	0
V15D1	99 (V15)	0	0	1	0
V15D2	98 (V15)	0	0	2	0
V15D4	96 (V15)	0	0	4	0
V15B1	99 (V15)	0	0	0	1
V15B2	98 (V15)	0	0	0	2
V15B4	96 (V15)	0	0	0	4
V30	70	0	30	0	0
V30D1	99 (V30)	0	0	1	0
V30D2	98 (V30)	0	0	2	0
V30D4	96 (V30)	0	0	4	0
V30B1	99 (V30)	0	0	0	1
V30B2	98 (V30)	0	0	0	2
V30B4	96 (V30)	0	0	0	4
T15	85	15	0	0	0
T15D1	99 (T15)	0	0	1	0
T15D2	98 (T15)	0	0	2	0
T15D4	96 (T15)	0	0	4	0
T15B1	99 (T15)	0	0	0	1
T15B2	98 (T15)	0	0	0	2
T15B4	96 (T15)	0	0	0	4
T30	70	30	0	0	0
T30D1	99 (T30)	0	0	1	0
T30D2	98 (T30)	0	0	2	0
T30D4	96 (T30)	0	0	4	0
T30B1	99 (T30)	0	0	0	1
T30B2	98 (T30)	0	0	0	2
T30B4	96 (T30)	0	0	0	4

Hidratasyon Isısı

Materyal ve yöntem kısmında ayrıntılı olarak anlatıldığı gibi TS EN 196-8 de belirtilen çözelti yöntemine uygun olarak yapılan deneylerle karışımların hidratasyon ısıları belirlenmiştir. Karışımlara ait test sonuçları Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 8. Çimentoların Katkı Oranlarının Yüzdesel Değişimine Göre 7 Günlük Hidratasyon Isıları

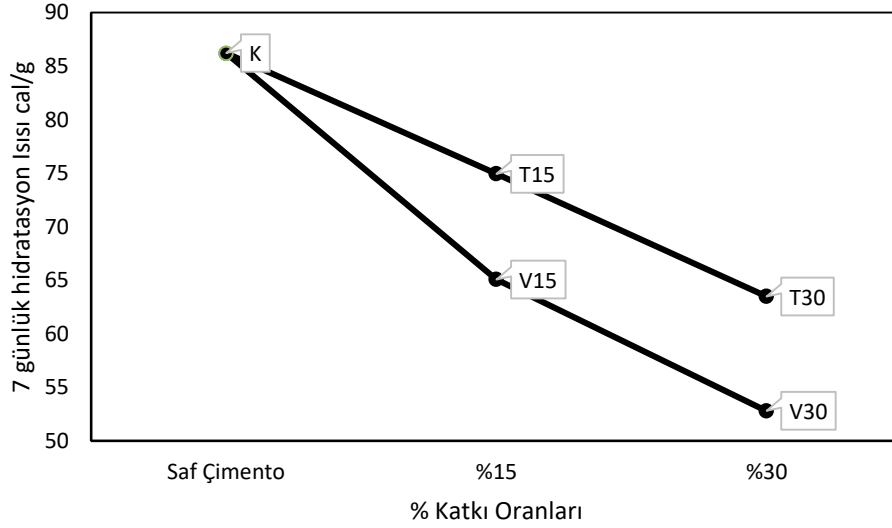
Saf Çimento	Hidratasyon Isısı (cal/g)	%15 Kül Karışımı Denemeler	Hidratasyon Isısı (cal/g)	%30 Kül Karışımı Denemeler	Hidratasyon Isısı (cal/g)	%15 Tras Karışımı Denemeler	Hidratasyon Isısı (cal/g)	%30 Tras Karışımı Denemeler	Hidratasyon Isısı (cal/g)
K	86,22	V15	65,08	V30	52,82	T15	74,95	T30	63,50
KD1	84,30	V15D1	64,88	V30D1	52,91	T15D1	74,82	T30D1	63,20
KD2	82,91	V15D2	64,70	V30D2	51,83	T15D2	74,50	T30D2	63,08
KD4	82,30	V15D4	62,50	V30D4	51,70	T15D4	73,20	T30D4	61,97
KB1	86,50	V15B1	65,21	V30B1	53,50	T15B1	75,04	T30B1	64,01
KB2	87,10	V15B2	65,12	V30B2	55,20	T15B2	75,30	T30B2	65,20
KB4	87,33	V15B4	66,05	V30B4	53,93	T15B4	77,00	T30B4	66,70

Sonuçlar incelendiği zaman kül ve tras katkısının, saf çimentonun hidratasyon ısını düşürdüğü görüldü. Literatürde özellikle hidratasyon ısının düşürülmesi için mineral katkılardan faydalanılması gerektiği, bu puzolanik katkıların hidratasyon ısını düşürmede kullanımının kaçınılmaz olduğu açıklanmıştır (Sağlık vd 2007). Hidratasyon ısını düşürmede külün etkisinin trasa göre daha yüksek olduğu, minör bileşen olarak katılan demir katkısının ise boksite göre daha fazla düşüş sağladığı tespit edildi.

Çalışmada hazırlanan karışımların içinde en düşük hidratasyon ısını %30 kül katkılı çimentoya katılan %4 demir cevherli karışımın verdiği görüldü. Bunun nedeni kül katkısının hidratasyon ısını düşürmede daha etkili olduğudur. Ayrıca karışıma eklenen %4 demir cevherinin de hidratasyon ısını arttıran C_3A fazını düşürdüğü bilinmektedir. Çimentoyu oluşturan fazlardan hidratasyon ısı en yüksek olan faz aşağıda formülü verilen C_3A fazıdır. Kimyasal formülü göz önüne alındığında Al_2O_3 (boksit katkısından gelen) değeri arttıkça C_3A fazı artacağından buna bağlı olarak da hidratasyon ısı artacaktır. Fe_2O_3 (demir cevherinden gelen) değeri arttıkça ise C_3A fazı azalacağından hidratasyon ısı da azalacaktır. Bu nedenle minör bileşen olarak katılan demir katkısı boksite göre hidratasyon ısında daha fazla düşüşe neden olmuştur.

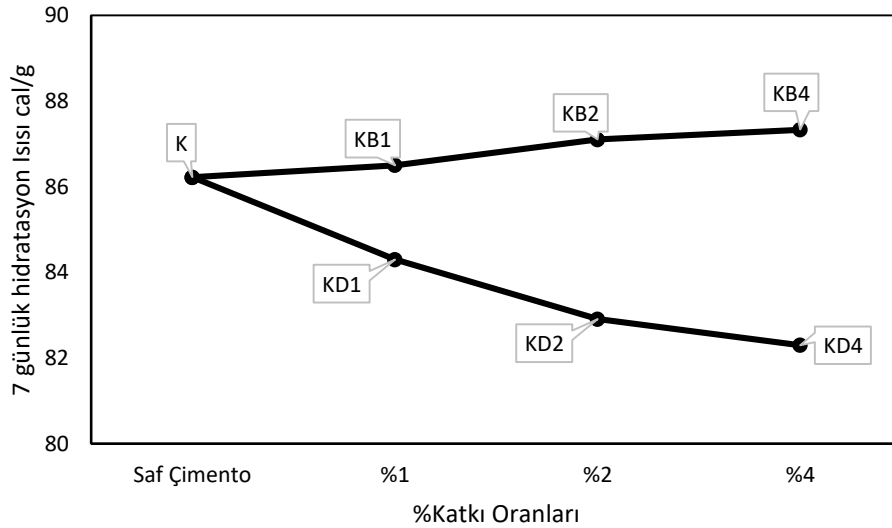
$$C_3A = 2,65 * Al_2O_3 - 1,692 * Fe_2O_3$$

Kül, Tras, Demir ve Boksit cevherinin etkisini daha net görebilmek için aşağıdaki grafikler eklenmiştir.



Şekil 19. Saf Çimento ile kül/tras katkılı çimentoların hidratasyon ısılarının değişimi

Şekil 19'a göre, Kül ve Tras katkısı hidratasyon ısını düşürmüştür. Saf çimentoya eklenen %15 tras katkısı 11,27 cal/g , %15 kül katkısı ise 21,14 cal/g hidratasyon ısının düşüşüne neden olmuştur. Külün hidratasyon ısını düşürmede daha etkili olduğu görülmüştür. Kül oranı arttıkça hidratasyon ısısındaki düşüş oranı da artarak toplamda 33,4 cal/g değerine ulaşmıştır. Katkılı çimentoların hidratasyon ısılarının katkısız çimentolara oranla daha düşük olduğu bilinmektedir ve elde edilen sonuçlarda da bu görülmektedir.



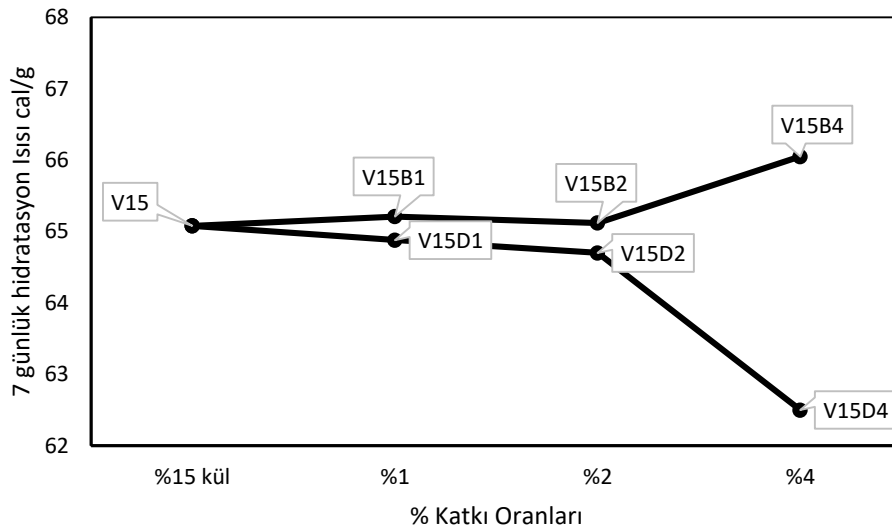
Şekil 20. Saf Çimento ile demir/boksit katkılı çimentoların hidratasyon ısılarının değişimi

Şekil 20'ye göre boksit katkılı karışım çimentolarının, demir katkılı karışımlara göre daha yüksek hidratasyon ısı verdiğini görülmektedir. Literatürde çimentodaki C_3A fazının artmasının hidratasyon ısını yükselttiği bilinmektedir. C_3A fazı 207 cal/g ısı verir. Boksit katkılı karışımların C_3A fazlarının yükselmesi hidratasyon ısılarının da yüksek çıkmasına sebep

olmuştur. Boksit katkısının kimyasal içeriğinde Al_2O_3 yüzdesi fazla olduğundan, C_3A fazının yükselmesine neden olmuştur. C_3A fazının formülü;

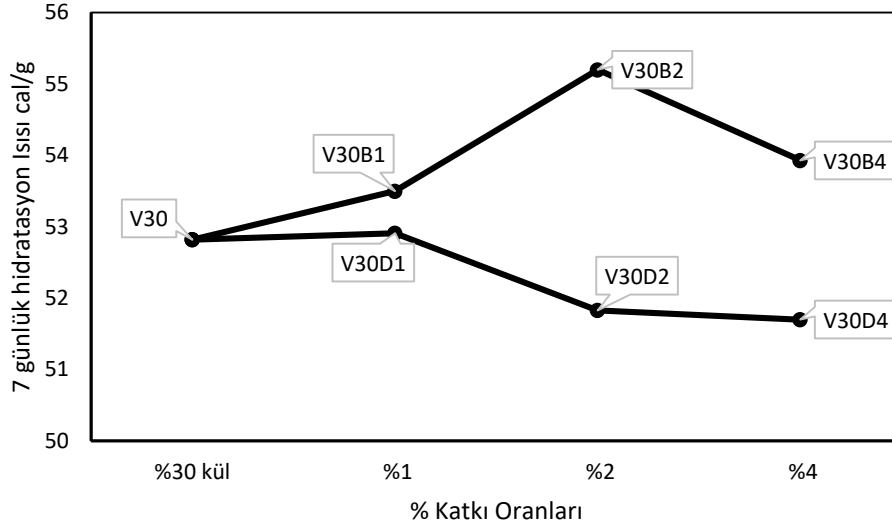
$$C_3A = 2,65 * Al_2O_3 - 1,692 * Fe_2O_3$$

%1 boksit artışı saf çimentonun hidratasyon ısısını %0,324, %2 boksit artışı %1,01, %4 boksit artışı ise %1,27 artırmıştır. Boksit yüzdesi arttıkça saf çimentoya göre karışım çimentolarının hidratasyon ısıları da yükselmiştir. Demir katkısının artışı hidratasyon ısısını düşürmüştür. %1 demir artışı %2,23, %2 demir artışı %3,84, %4 demir artışı ise %4,55 oranında hidratasyon ısısını düşürmüştür.



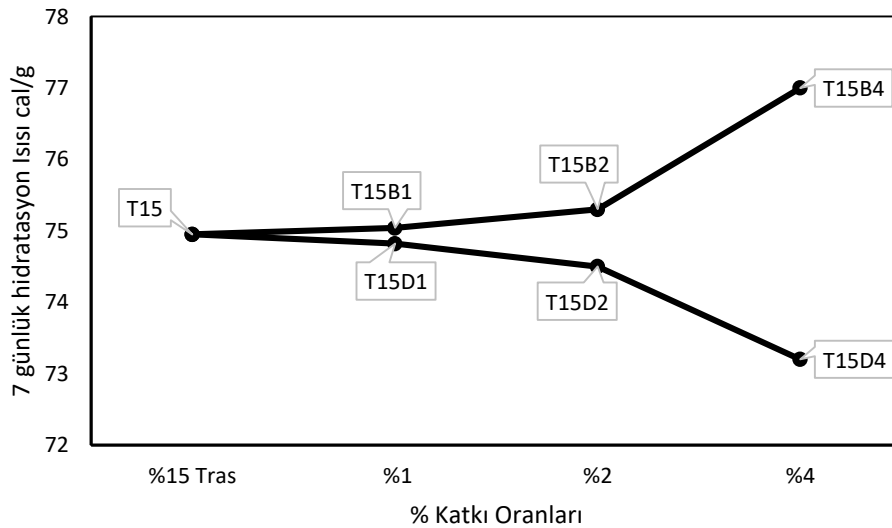
Şekil 21. %15 kül katkılı çimento ile demir/boksit katkılı çimentoların hidratasyon ısılarının değişimi

Şekil 21'e göre, En yüksek hidratasyon ısısının %15 kül + %4 Boksit katkılı çimentoda, en düşük hidratasyon ısısının ise %15 kül + %4 Demir katkılı çimentoda olduğu görülmektedir. Demir ve Boksit katkılarının %1 ve %2 kullanımı mevcut referans çimentonun hidratasyon ısısına düşük etki etmiş, ancak katkı oranı arttıkça referansa göre %4 boksit katkısı %1,47'lik artış, %4 demir katkısı ise %3,96'lık azalış sağlamıştır. Demir cevheri katkısının artması, hidratasyon sürecinde yüksek ısı yayan C_3A fazının düşmesine neden olduğundan, toplamda açığa çıkan ısısın düşmesine neden olmuştur.



Şekil 22. %30 kül katkılı çimento ile demir/boksit katkılı çimentoların hidrasyon ısılarının değişimi

Şekil 22'ye göre, En yüksek hidrasyon ısısının %30 kül + %2 Boksit katkılı çimentoda, en düşük hidrasyon ısısının ise %30 kül + %4 Demir katkılı çimentoda olduğu görülmektedir. Boksit katkısından Al_2O_3 , demir katkısından ise Fe_2O_3 gelmektedir. Hidrasyon ısısını yükselten C_3A fazının kimyasal formülüne göre; Al_2O_3 katkısı C_3A 'nın artışına sebep olduğundan dolayı hidrasyon ısısını yükseltir, Fe_2O_3 katkısı ise C_3A 'nın düşmesine etki ettiğinden dolayı hidrasyon ısısını düşürür diyebiliriz. %4 boksit katkılı deneme sonucunu istisna kabul edersek, deney sonuçları bu bilgiyi doğrulamaktadır.

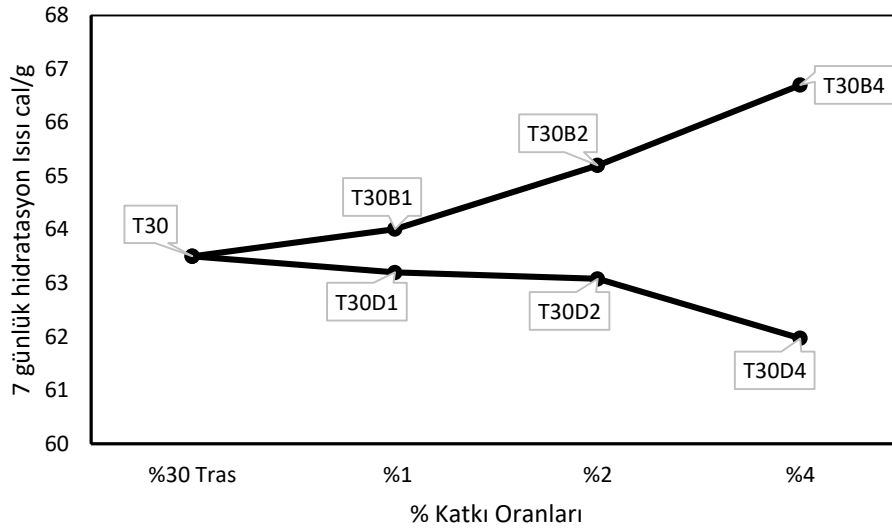


Şekil 23. %15 tras katkılı çimento ile demir/boksit katkılı çimentoların hidrasyon ısılarının değişimi.

Şekil 23'e göre, En yüksek hidrasyon ısısının %15 tras + %4 Boksit katkılı çimentoda, en düşük hidrasyon ısısının ise %15 tras + %4 Demir katkılı çimentoda olduğu görülmektedir. Minör katkı oranı arttıkça referansa göre hidrasyon ısısındaki değişim artmaktadır. %4 boksit

katkısı mevcuta göre hidrasyon ısısında %2,66'lık bir artışa, %4 demir katkısı ise %2,33'lük bir azalışa neden olmuştur.

Çimentoyu oluşturan 4 anabileşen C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF fazlarıdır. Bu fazların suyla tepkimeye girmeleri sonucunda açığa çıkan hidrasyon ısıları sırasıyla 120 cal/g, 62 cal/g, 207 cal/g ve 100 cal/g şeklindedir. En yüksek ısıyı C_3A fazı vermektedir. C_3A fazının kimyasal formülüne baktığımızda demir katkısı C_3A fazını düşürür, boksit katkısı ise yükseltir. Bu bilgi çıkan analiz sonuçlarımızı doğrulamaktadır.



Şekil 24. %30 tras katkılı çimento ile demir/boksit katkılı çimentoların hidrasyon ısılarının değişimi

Şekil 24'e göre, En yüksek hidrasyon ısısının (%30 tras + %4 Boksit) katkılı çimentoda, en düşük hidrasyon ısısının ise (%30 tras + %4 Demir) katkılı çimentoda olduğu görülmektedir. Minör katkı oranı arttıkça referansa göre hidrasyon ısısındaki değişim artmaktadır. %4 boksit katkısı mevcuta göre hidrasyon ısısında %4,80'lik bir artışa, %4 demir katkısı ise %2,41'lik bir azalışa neden olmuştur.

Şekil 21, 22, 23 ve 24'deki boksit ve demir cevherinin hidrasyon ısısına etkisini aşağıdaki gibi açıklayabiliriz;

Boksit katkısından Al_2O_3 , demir katkısından ise Fe_2O_3 gelmektedir. Hidrasyon ısısını yükselten C_3A fazının kimyasal formülüne göre; Al_2O_3 katkısı C_3A 'nın artışına sebep olduğundan dolayı hidrasyon ısısını yükseltir, Fe_2O_3 katkısı ise C_3A 'nın düşmesine etki ettiğinden dolayı hidrasyon ısısını düşürür diyebiliriz.

Basınç Dayanımı

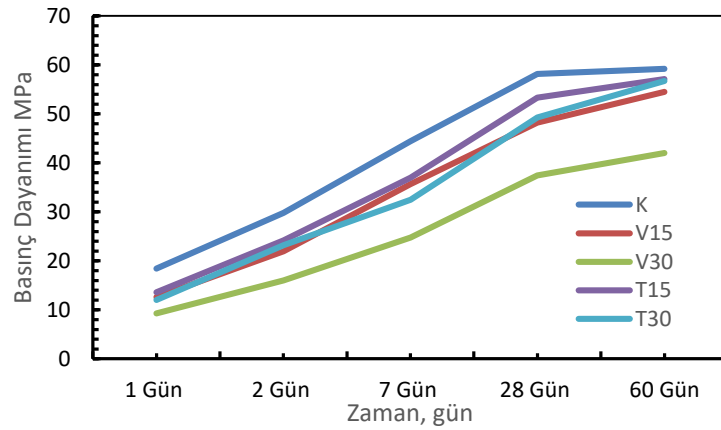
TS EN 196-1 Çimento deney metotlarında tarif edilen dayanım tayinine göre hazırlanan harçların basınç dayanımları belirlenmiştir. Karışımlara ait test sonuçları Tablo 9 'da gösterilmiştir.

Tablo 9. Çimentoların Katkı Oranlarının Yüzdesel Değişimine Göre Basınç Dayanımları.

Kısaltmalar	Basınç Dayanımı (MPa)				
	1 gün	2 gün	7 gün	28 gün	60 gün
K	18,40	29,82	44,47	58,15	59,20
KD1	18,20	28,85	44,60	56,50	57,10
KD2	17,90	28,65	42,90	57,20	57,60
KD4	17,30	28,55	42,00	56,70	57,00
KB1	18,00	28,90	43,40	56,25	56,90
KB2	17,20	28,90	43,20	57,10	57,65
KB4	17,80	28,50	42,30	57,00	57,30
V15	12,60	21,95	35,70	48,25	54,50
V15D1	13,70	23,70	35,20	50,00	55,90
V15D2	12,60	22,20	33,20	46,40	52,00
V15D4	14,50	23,95	35,50	49,35	54,50
V15B1	11,10	20,55	31,50	43,40	49,10
V15B2	12,60	20,60	32,00	45,50	50,20
V15B4	13,60	22,70	36,70	48,25	52,55
V30	9,30	16,00	24,80	37,45	42,00
V30D1	9,30	16,95	25,30	36,65	40,80
V30D2	8,80	15,95	25,90	37,60	41,65
V30D4	8,40	16,15	26,10	36,95	41,10
V30B1	8,50	15,80	25,10	36,00	40,20
V30B2	8,30	15,50	25,20	36,10	40,05
V30B4	8,30	15,60	24,70	35,80	39,60
T15	13,60	24,20	37,00	53,30	57,10
T15D1	13,20	23,55	38,60	53,35	56,80
T15D2	13,80	23,30	39,00	54,05	57,40
T15D4	14,10	22,95	37,90	53,85	56,90
T15B1	15,40	18,05	39,90	53,10	56,25
T15B2	13,30	25,00	36,70	49,95	52,75
T15B4	13,00	24,00	36,00	51,00	53,95
T30	12,00	23,20	32,50	49,25	56,75
T30D1	10,80	19,40	31,90	48,20	54,25
T30D2	10,20	17,85	30,10	46,35	52,35
T30D4	9,90	17,75	30,80	44,85	50,70
T30B1	10,30	18,35	33,30	49,10	55,30
T30B2	10,70	18,70	31,70	49,90	56,00
T30B4	10,30	18,10	31,20	49,70	55,50

Sonuçlara göre, saf çimentoya kül ve tras katkı malzemeleri katıldıkça tüm dayanım günlerinde düşme görülmüştür. Tras katkısı kül katkısına oranla tüm kırım günlerinde daha yüksek dayanım sağlamıştır. Boksit katkısı, demir cevheri katkısına göre tüm kırım günlerinde dayanımın daha çok düşmesine sebep olmuştur (%30 Tras katkılı deneme hariç).

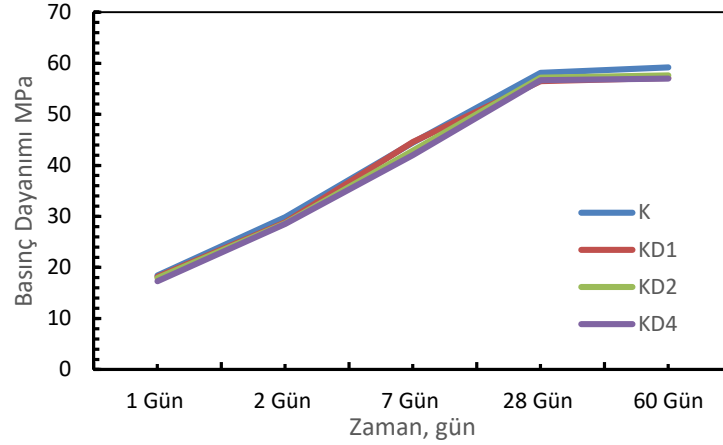
Kül, Tras, Demir ve Boksit cevherinin etkisini daha net görebilmek ve kıyaslayabilmek için aşağıdaki grafikler eklenmiştir.



Şekil 25. Saf Çimento ile kül/tras katkılı çimentoların basınç dayanımlarının değişimi

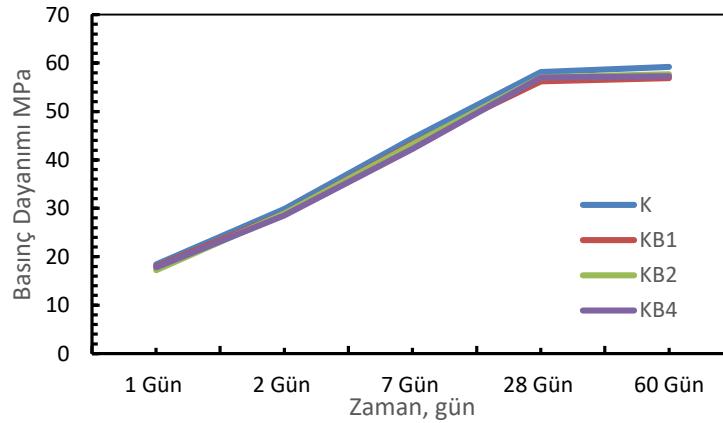
Şekil 25'e göre saf çimentoya kül ve tras katkı malzemeleri katıldıkça tüm dayanım günlerinde düşme görülmüştür. Tras katkısı küle göre tüm kırım günlerinde daha yüksek dayanım almıştır. En büyük düşüşler 1-2 günlük erken dayanım sonuçlarında olmuştur. 28 ve 60 günlük dayanım sonuçlarında %30 kül katkılı çimento dışında, diğer denemelerde, dayanımlar saf çimentonun değerine yaklaşmıştır. V30 en yüksek miktarda kül katkısını içerir ve her yaşta en düşük basınç dayanımını vermiştir. K tüm dayanım günleri için referans numune olarak seçilmiştir ve basınç dayanım değerleri %100 olarak kabul edilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi mukavemetlerdeki azalma şu şekilde ifade edilebilir: saf çimentoya göre 28 günlük dayanımda %15 kül katkısı %17 oranında mukavemet azalmasına neden olmuştur, %30 kül katkısı %35,6'lık azalmaya, %15 tras katkısı %8,3'lük azalmaya ve %30 tras katkısı %15,3 oranında mukavemet azalmasına neden olmuştur.

Literatürdeki bir çalışmada tras ve uçucu kül katkısının saf çimentonun ilk dayanım değerlerini düşürdüğü ancak bu pozolanik katkıların ileriki yaşlarda hemen hemen saf çimentonun dayanımına yakın değerler verdiği açıklanmıştır. Çalışmada saf çimentoya aynı inceliklere sahip %40 tras ve %40 Uçucu kül katılarak karışımlar hazırlanmış. Saf çimentoya göre 2 günlük dayanım deneylerinde yaklaşık % 43-45 oranında dayanım kaybı, 7 günlüklerde %35-42 oranında, 28 günlüklerde %16-23 oranında ve 60 günlüklerde ise %13-19 oranında dayanım kaybı olduğu tespit edilmiştir (Çelik 2004).



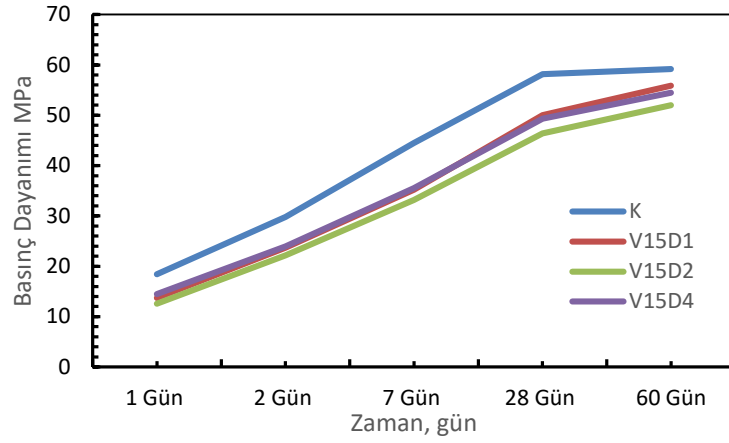
Şekil 26. Saf Çimento ile demir cevheri katkılı çimentoların basınç dayanımlarının değişimi.

Demir kullanımı arttıkça, saf çimentoya kıyasla dayanımda düşüş görülmüştür. Bu dayanım düşüşü erken dayanım olarak bilinen 1 ve 2 günlük dayanımlarda maksimum %6'yı (KD4 numunesinde) görürken, 7-28-60 günlük nihai dayanımlarda maksimum %5,6'yı (KD4 numunesinde) görmüştür. Demir kullanımının artması nihai dayanımlara göre, erken dayanımların düşmesinde daha etkili olmuştur (Şekil 26).



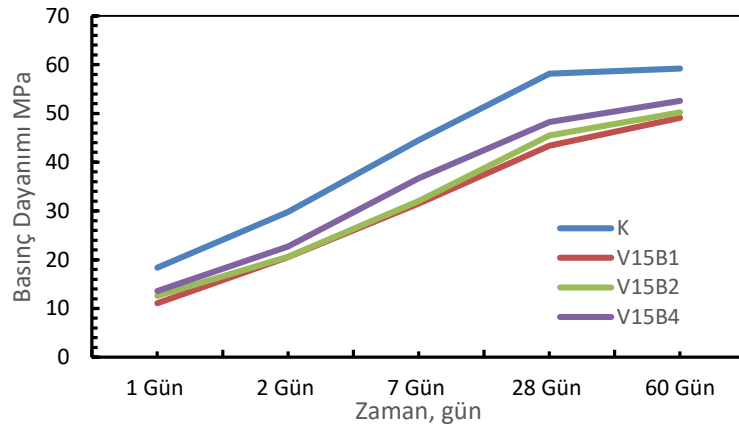
Şekil 27. Saf Çimento ile boksit katkılı çimentoların basınç dayanımlarının değişimi

Boksit kullanımı arttıkça saf çimentoya kıyasla dayanım düşüşü görülmüştür. Bu dayanım düşüşü erken dayanım olarak bilinen 1 ve 2 günlük dayanımlarda maksimum %6,5 değerine (KB2 numunesinde) ulaşırken, 7-28-60 günlük nihai dayanımlarda maksimum %4,9 değerine (KB4 numunesinde) ulaşmıştır. Boksit kullanımının artması nihai dayanımlara göre, erken dayanımların düşmesinde daha etkili olmuştur. Boksit, demir cevheri katkısına göre özellikle erken dayanımlar olarak bilinen 1 ve 2 günlük dayanımlarda daha fazla düşüşe neden olmuştur (Şekil 27).



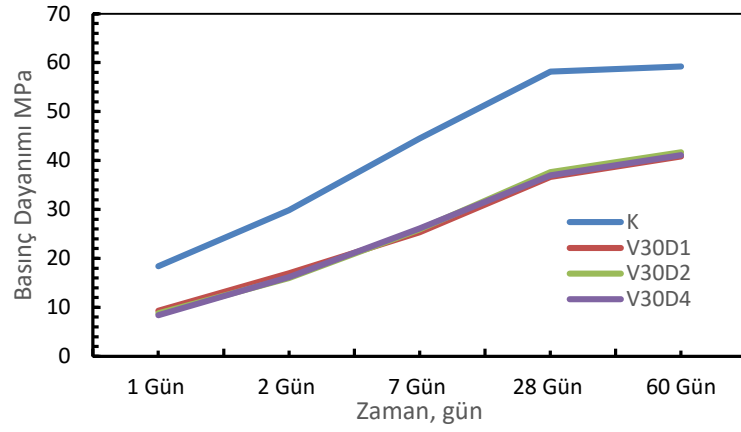
Şekil 28. %15 kül katkılı çimentolara katılan demir katkısının saf çimentonun basınç dayanımına etkisi

%15 Kül ile demir cevherinin birlikte kullanımı saf çimentonun dayanım değerlerini düşürmüştür. En çok düşüşün olduğu karışım %2 demir cevheri katılan karışımdır. 1 günlük dayanımda bu düşüş %31,5 değerini verirken, 2 günlük dayanımda %25,6 değerini, 7 günlük dayanımda %25,3 değerini, 28 günlük dayanımda %20,2 değerini verirken, 60 günlük dayanımda ise %12,2 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 28).



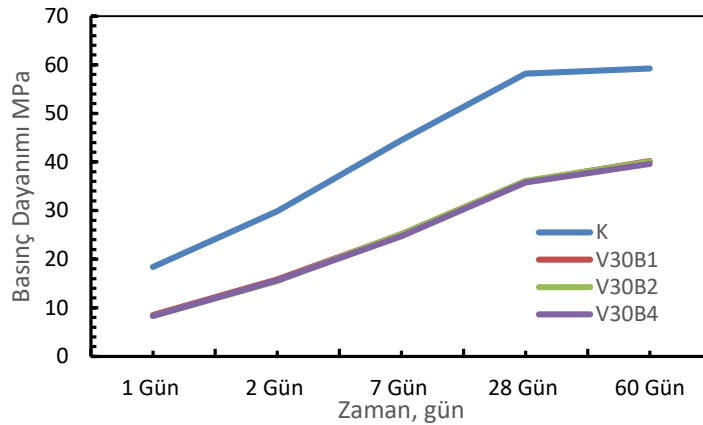
Şekil 29. %15 kül katkılı çimentolara katılan boksit katkısının saf çimentonun basınç dayanımına etkisi

%15 Kül ile boksit kullanımı saf çimentonun dayanım değerlerini düşürmüştür. En çok düşüşün olduğu karışım %1 boksit katılan karışımdır. 1 günlük dayanımda bu düşüş %39,7, 2 günlük dayanımda %31,1, 7 günlük dayanımda %29,2, 28 günlük dayanımda %25,4, 60 günlük dayanımda ise %17,1 olarak gerçekleşmiştir. Boksit kullanımı demir cevheri kullanımına göre her yaşta daha düşük dayanım sonuçları vermiştir (Şekil 29).



Şekil 30. %30 kül katkılı çimentolara katılan demir katkısının saf çimentonun basınç dayanımına etkisi

%30 Kül ile demir cevheri kullanımı saf çimentonun dayanım değerlerini düşürmüştür. İlk dayanımlarda düşüş oranı daha yüksek gözükmemektedir. %15 kül kullanımında %1-%2-%4 demir cevheri kullanımları kendi içerisinde ilk ve son dayanımlarda farklılıklar göstermişti. %30 kül kullanımında ise demir cevherinin etkisi çok az gözükmemektedir. %1-%2 ve %4 demir karışımli denemeler birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Dayanım düşüşlerinin aritmetik ortalamasına bakarsak referans çimentoya göre 1 gñnlükte %52, 2 gñnlükte %45,2, 7 gñnlükte %42,1, 28 gñnlükte %36,3 ve 60 gñnlükte %30,4'lük bir düşüş görñlmñştür (Şekil 30).



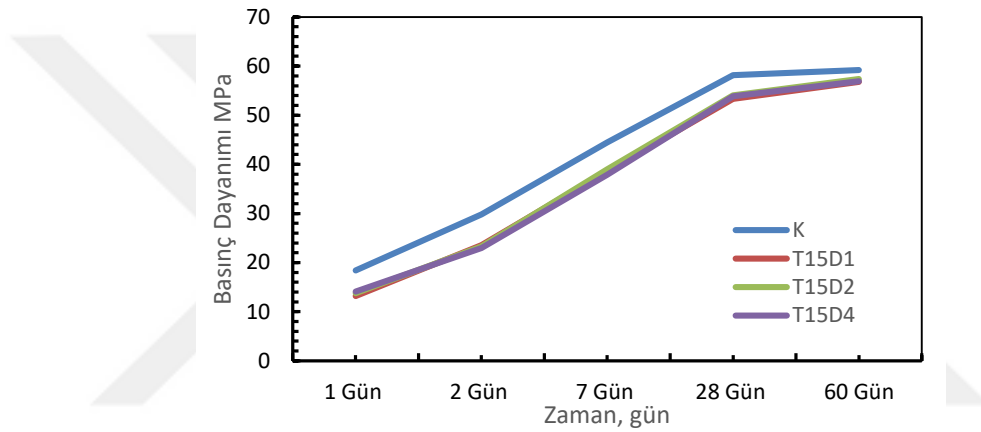
Şekil 31. %30 kül katkılı çimentolara katılan boksit katkısının saf çimentonun basınç dayanımına etkisi

%30 Kül ile boksit kullanımı saf çimentonun dayanım değerlerini düşürmüştür. İlk dayanımlarda düşüş daha yüksek gözükmemektedir. %15 kül kullanımında %1-%2-%4 boksit kullanımları dayanımlarda farklılıklar göstermişti. %30 kül kullanımında ise boksitin etkisi az gözükmemektedir. %1-%2 ve %4 boksit karışımli denemeler birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Boksit kullanımı demir cevheri kullanımına göre her yaşta daha düşük dayanım sonuçları vermiştir. Dayanım düşüşlerinin aritmetik ortalamasına bakarsak referans çimentoya göre 1

günlükte %54,5, 2 günlükte %47,6, 7 günlükte %43,8, 28 günlükte %38,1 ve 60 günlükte %32,5'luk bir düşüş görülmüştür (Şekil 31).

Uğurlu (Uğurlu 2009) tarafından yapılan bir çalışmaya göre, uçucu küllerin çimentoya katılarak kullanılmaları halinde beton dayanımına katkılarının ilk günlerde düşük olduğu, ancak 3-4 hafta sonunda beton dayanımında normalin üstünde bir artış gözlemlendiği, özellikle 56. gün civarında bu artışın iyice belirginleştiği açıklanmıştır

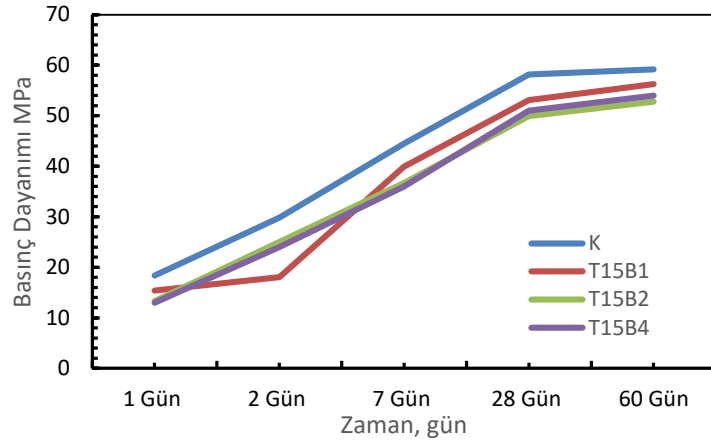
Şekil 28, 29, 30 ve 31'e baktığımızda saf çimentonun dayanımına en yakın değerler karışım çimentolarının 60. günlük kırım sonuçlarıdır. Şekil 25'de kül katkılı denemeler dikkate alındığında özellikle %15 kül katkılı karışımın 60 günlükte saf çimentoya yakın değer aldığı gözükmemektedir.



Şekil 32. %15 tras katkılı çimentolara katılan demir katkısının saf çimentonun basınç dayanımına etkisi

%15 Tras ile demir cevherinin birlikte kullanımı saf çimentonun dayanım değerlerini düşürmüştür. İlk dayanımlarda düşüş son dayanımlara göre daha yüksek gözükmemektedir.

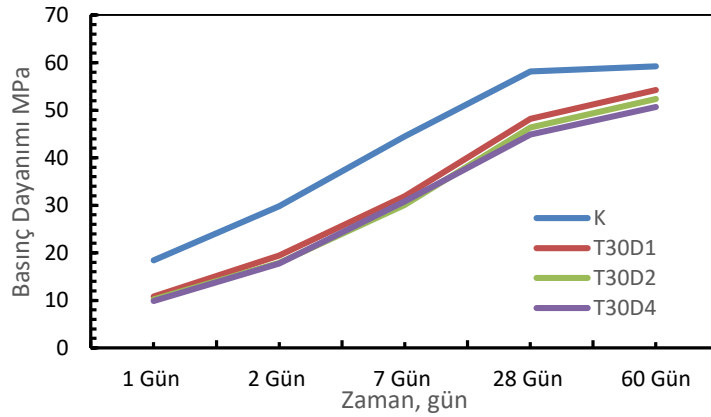
60 günlük dayanımlarda %1-%2-%4 demir karışımı denemeler saf çimentonun dayanımına yaklaşmıştır. Ortalamada saf çimentonun 60 günlükte aldığı dayanımın %96,3'lük kısmını sağlamıştır (Şekil 32).



Şekil 33. %15 tras katkılı çimentolara katılan boksit katkısının saf çimentonun basınç dayanımına etkisi

%15 Tras ile boksitin birlikte kullanımı saf çimentonun dayanım değerlerini düşürmüştür.

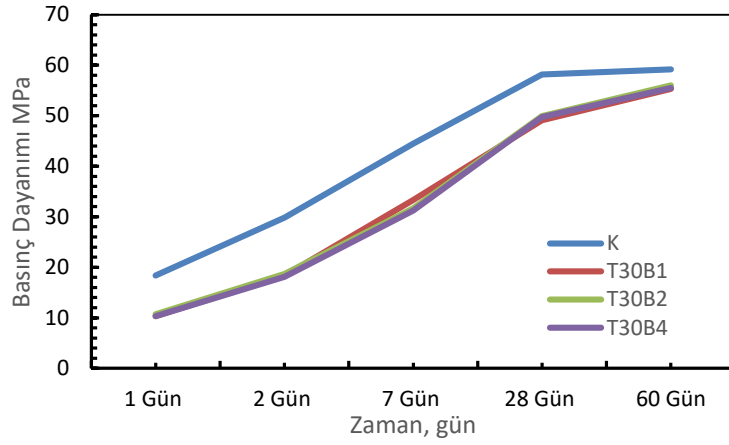
İlk dayanımlarda düşüş son dayanımlara göre daha yüksek gözükmemektedir. %15 Tras katkılı denemelerde boksit katkısı, demir cevherli karışımlara göre özellikle son dayanımlarda daha fazla dayanım düşüşüne neden olmuştur. 28 ve 60 günlük kırımelerde %2 boksit katkılı karışım çimentoları en düşük dayanım değerlerini vermiştir (Şekil 33).



Şekil 34. %30 tras katkılı çimentolara katılan demir katkısının saf çimentonun basınç dayanımına etkisi

%30 Tras ile demir cevherinin birlikte kullanımı saf çimentonun dayanım değerlerini düşürmüştür. İlk dayanımlarda düşüş son dayanımlara göre daha yüksek gözükmemektedir.

Özellikle 60 günlük dayanımlarda %1-%2-%4 demir karışımı denemeler saf çimentonun dayanımına yaklaşmıştır. %1 demir karışımı çimento, saf çimentonun 60 günlükte aldığı dayanımın %91,6'lık kısmını sağlamıştır. Karışımda demir cevheri oranının artışıyla dayanım düşüşlerinin arttığı gözükmemektedir (Şekil 34).

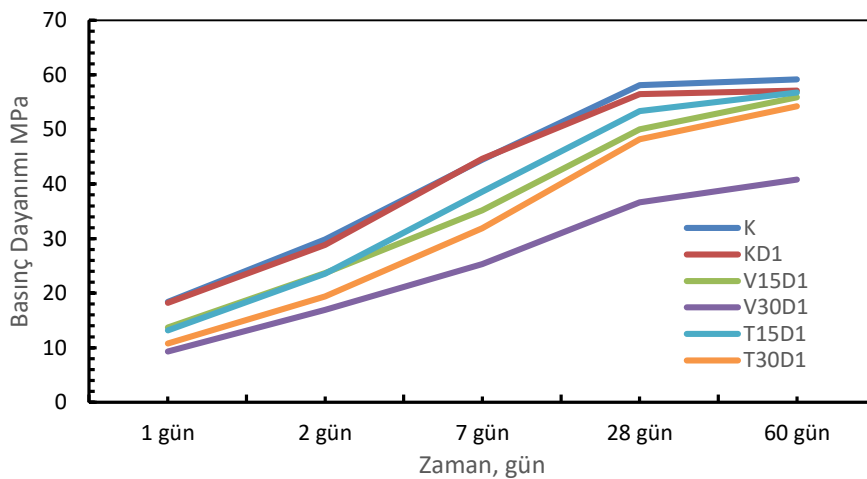


Şekil 35. %30 tras katkılı çimentolara katılan boksit katkısının saf çimentonun basınç dayanımına etkisi

%30 Tras ile boksitin birlikte kullanımı saf çimentonun dayanım değerlerini düşürmüştür.

İlk dayanımlarda düşüş son dayanımlara göre daha yüksek gözükmemektedir. %15 tras katkılı denemelerde boksit denemeleri demire göre daha düşük dayanım göstermişti, ancak %30 tras katkılı denemelerde özellikle son dayanımlarda boksit denemelerinde demire göre daha yüksek dayanım değerleri alınmıştır. Özellikle 60 günlük dayanımlarda %1 - %2 - %4 boksit karışımli denemeler saf çimentonun dayanımına yaklaşmıştır. Ortalamada saf çimentonun 60 günde aldığı dayanımın %93,9'luk kısmını sağlamıştır (Şekil 35).

Demir cevherinin basınç dayanımı üzerindeki etkisini daha net görebilmek için aşağıdaki grafikler eklenmiştir.



Şekil 36. Saf çimento ve kül/tras karışımli çimentolara eklenen %1 demir cevherinin basınç dayanımına etkisi

1 günlük dayanımlarda; Saf çimento ile %1 demir katılmış deneme yakın sonuç vermiştir. %15 Kül+%1 Demir ile %15 Tras+%1 Demir karışımları da yakın sonuç

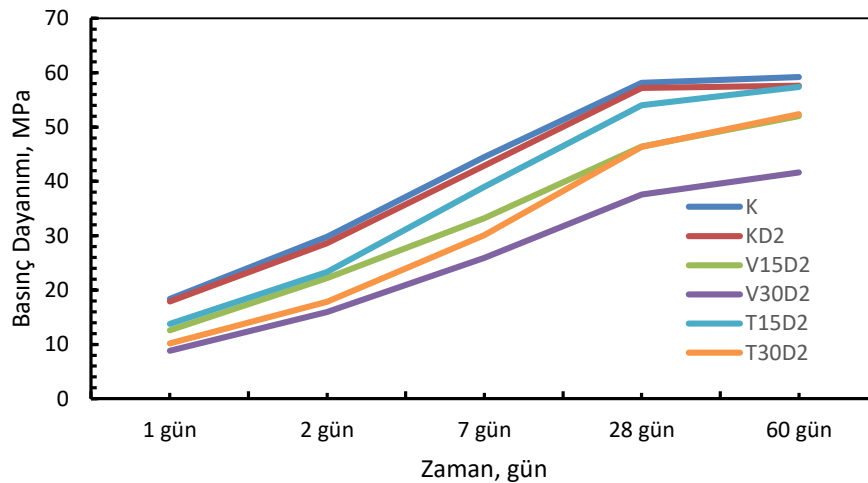
gözükmektedir. %30 Tras+%1 Demir karışımı %30 Kül + %1 Demir katılan karışıma göre daha yüksek dayanım almıştır.

2 günlük dayanımlarda; Saf çimento ile %1 demir katılmış deneme arasında fark oluşmaya başlamıştır. Tras katkılı denemeler kül katkılı denemelere göre daha yüksek dayanım vermiştir.

7 günlük dayanımlarda; Tras katkısının dayanıma olumlu etkisi daha net gözükmektedir.

28 günlük dayanımlarda; %1 demir katkılı denemeyi göz ardı edersek, %15 Tras + %1 Demir katkılı deneme saf çimentonun dayanımına en yakın sonucu veren karışımdır. Saf çimentonun %91' lik dayanımını sağlamıştır.

60 günlük dayanımlarda; %30 kül katkılı deneme dışındaki çimento karışımları saf çimentoya yaklaşmıştır. %1 demir katkılı karışım ile %15 tras + %1 demir katkılı karışım en yakın sonuçları veren denemelerdir.



Şekil 37. Saf çimento ve kül/tras karışimli çimentolara eklenen %2 demir cevherinin basınç etkisi

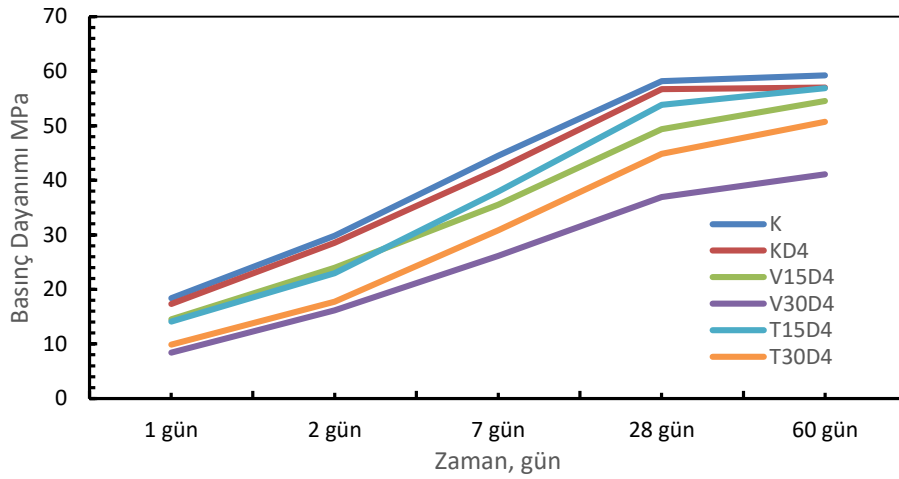
1 günlük dayanımlarda; Saf çimento ile %2 demir katılmış deneme yakın sonuç vermiştir. %15 Tras + %2 Demir karışımı %15 Kül + %2 Demir katılan karışıma göre daha yüksek dayanım almıştır. %30 Tras + %2 Demir karışımı %30 Kül + %2 Demir katılan karışıma göre daha yüksek dayanım almıştır.

2 günlük dayanımlarda; Saf çimento ile %2 demir katılmış deneme arasında fark oluşmaya başlamıştır. Tras katkılı denemeler kül katkılı denemelere göre daha yüksek dayanım vermiştir.

7 günlük dayanımlarda; Tras katkısının dayanıma olumlu etkisi daha net gözükmemektedir.

28 günlük dayanımlarda; %2 demir katkılı denemeyi göz ardı edersek, %15 Tras + %2 Demir katkılı deneme saf çimentonun dayanımına en yakın sonucu veren karışımdır. Saf çimentonun %93'lük dayanımını sağlamıştır. %15 Kül + %2 Demir katkılı çimento ile %30 Tras + %2 Demir katkılı çimentonun dayanımları eşitlenmiştir.

60 günlük dayanımlarda; %30 kül katkılı deneme dışındaki çimento karışımları saf çimentoya yaklaşmıştır. %2 demir katkılı karışım ile %15 tras + %2 demir katkılı karışım eşitlenmiştir. Aynı şekilde %15 Kül + %2 Demir katkılı çimento ile %30 Tras + %2 Demir katkılı çimentonun dayanımları da eşitlenmiştir. %30 kül katkılı deneme en düşük sonuçları veren karışımdır.



Şekil 38. Saf çimento ve kül/tras karışıklı çimentolara eklenen %4 demir cevherinin basınca etkisi

1 günlük dayanımlarda; %15 Tras + %4 Demir karışımı %15 Kül + %4 Demir katılan karışımla yakın dayanım almıştır. %30 Tras + %4 Demir karışımı %30 Kül + %4 Demir katılan karışıma göre daha yüksek dayanım almıştır.

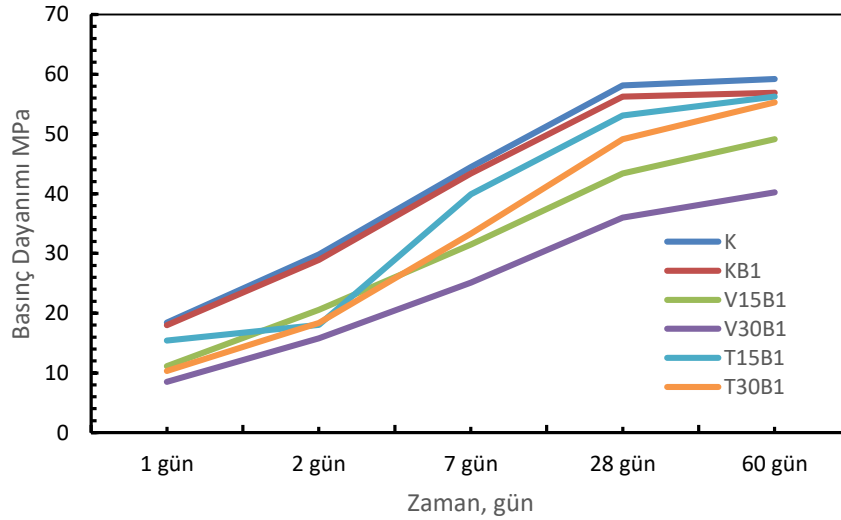
2 günlük dayanımlarda; Saf çimento ile %4 demir katılmış deneme arasında fark oluşmaya başlamıştır.

7 günlük dayanımlarda; Özellikle %15 Tras + %4 Demir karışıklı denemenin saf çimentoya daha da yaklaştığı gözükmemektedir.

28 günlük dayanımlarda; %4 demir katkılı denemeyi göz ardı edersek, %15 Tras + %4 Demir katkılı deneme saf çimentonun dayanımına en yakın sonucu veren karışımdır. Saf çimentonun %92,5'lük dayanımını sağlamıştır.

60 günlük dayanımlarda; %30 kül katkılı deneme dışındaki çimento karışımları saf çimentoya yaklaşmıştır. %4 demir katkılı karışım ile %15 tras + %4 demir katkılı karışım eşitlenmiştir. %30 kül katkılı deneme en düşük sonuçları veren karışımdır.

Boksitin basınç dayanımı üzerindeki etkisini daha net görebilmek için aşağıdaki grafikler eklenmiştir.



Şekil 39. Saf çimento ve kül/tras karışımli çimentolara eklenen %1 boksitin basınca etkisi

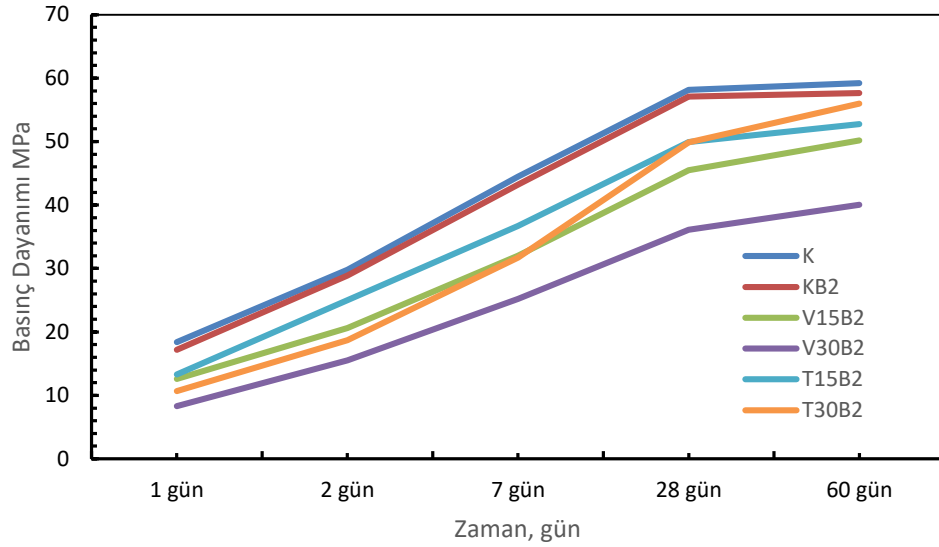
1 günlük dayanımlarda; Saf çimento ile %1 boksit katılmış deneme yakın sonuç vermiştir.

2 günlük dayanımlarda; Saf çimento ile %1 boksit katılmış deneme arasında fark oluşmaya başlamıştır.

7 günlük dayanımlarda; Tras katkılı denemeler küle göre daha yüksek dayanım vermiştir.

28 günlük dayanımlarda; %1 boksit katkılı denemeyi göz ardı edersek, %15 Tras + %1 Boksit katkılı deneme saf çimentonun dayanımına en yakın sonucu veren karışımdır. Saf çimentonun %91,3'lük dayanımını sağlamıştır.

60 günlük dayanımlarda; Kül katkılı deneme dışındaki çimento karışımları saf çimentoya yaklaşmıştır. %1 boksit katkılı karışım ile %15 tras + %1 boksit katkılı karışım en yakın sonuçları veren denemelerdir.



Şekil 40. Saf çimento ve kül/tras karışımlı çimentolara eklenen %2 boksitin basınca etkisi

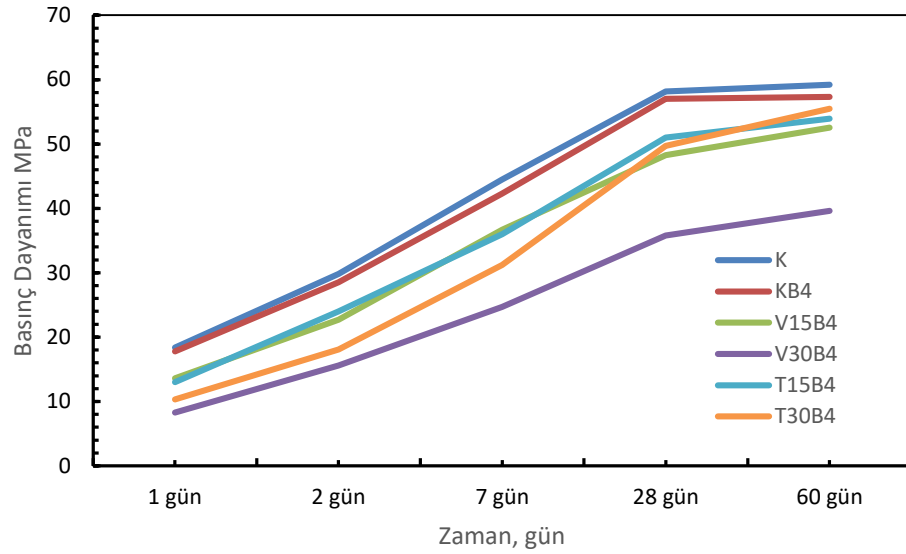
1 günlük dayanımlarda; Saf çimento ile %2 boksit katılmış deneme yakın sonuç vermiştir.

2 günlük dayanımlarda; %15 Tras + %2 Boksit karışımlı çimentonun dayanımı; Saf çimento ile %2 boksit katılmış denemeye yaklaşmıştır.

7 günlük dayanımlarda; %15 Küllü karışımla %30 Tras katkılı karışımın dayanımları yakın sonuç vermiştir.

28 günlük dayanımlarda; Tras katkılı çimento denemelerinin dayanımları eşitlenmiştir. Saf çimentoya en yakın sonuçları tras katkılı karışımlar vermiştir.

60 günlük dayanımlarda; %30 tras katkılı çimento, %15 tras katkılı karışıma göre daha yüksek dayanım vermiştir. %2 boksitli karışımla, %30 tras katkılı çimentoların dayanımı saf çimentoya en yakın sonuçlardır.



Şekil 41. Saf çimento ve kül/tras karışımı çimentolara eklenen %4 boksitin basınca etkisi

1 günlük dayanımlarda; Saf çimento ile %4 boksit katılmış deneme yakın sonuç vermiştir.

2 günlük dayanımlarda; %15 Tras + %4 Boksit karışımı çimentonun dayanımı; %15 Kül+%4 Boksit karışımı çimentonun dayanımını geçmiştir.

7 günlük dayanımlarda; %15 Küllü karışım ile %15 Tras katkılı karışımın dayanımları yakın sonuç vermiştir.

28 günlük dayanımlarda; %30 Tras katkılı çimentonun özellikle 28 ve 60 günlükte, %15 Tras katkılı çimentoya yakın dayanım aldığı görülmektedir.

60 günlük dayanımlarda; %30 tras katkılı çimento, %15 tras katkılı karışıma göre daha yüksek dayanım vermiştir. %4 boksitli karışımla, %30 tras katkılı çimentoların dayanımı saf çimentoya en yakın sonuçlardır.

İncelik, Özgül ağırlık ve Blaine

İncelik, özgül ağırlık ve blaine analizleri cihazlarda tespit edilmiştir. Karışımlara ait test sonuçları Tablo 10'da gösterilmiştir.

Tablo 10. Çimentoların Katkı Oranlarının Yüzdesel Değişimine Göre İncelik, Özgül Ağırlık ve Blaine değerleri

	32 mikron elek üstü	Özgül ağırlık	Blaine
Kısaltmalar	%	g/cm ³	cm ² /g
K	9,9	3,09	3423
KD1	10,1	3,08	3384
KD2	11,3	3,08	3376
KD4	12,4	3,07	3464
KB1	10,0	3,09	3238
KB2	10,6	3,09	3260
KB4	11,0	3,08	3340
V15	12,0	2,98	3325
V15D1	12,1	2,98	3216
V15D2	12,3	2,98	3246
V15D4	12,7	2,97	3366
V15B1	12,1	2,98	3169
V15B2	12,2	2,97	3285
V15B4	12,8	2,97	3315
V30	14,0	2,86	3280
V30D1	14,1	2,86	3161
V30D2	14,2	2,85	3200
V30D4	14,6	2,84	3292
V30B1	14,1	2,86	3180
V30B2	14,1	2,86	3125
V30B4	14,3	2,85	3194
T15	12,6	2,98	3599
T15D1	12,8	2,98	3713
T15D2	13,0	2,98	3686
T15D4	13,3	2,98	3597
T15B1	12,5	2,98	3517
T15B2	12,6	2,97	3552
T15B4	13,0	2,97	3600
T30	15,1	2,90	4089
T30D1	15,7	2,90	4125
T30D2	15,9	2,90	4082
T30D4	16,0	2,90	4214
T30B1	15,5	2,88	3870
T30B2	15,6	2,88	3924
T30B4	15,8	2,88	3950

Priz Süreleri, Su ihtiyacı ve Le Chatelier

TS EN 196-3 Çimento deney metodlarında tarif edilen standart kıvam ve priz sürelerinin tayinine göre belirlenmiştir. Karışımlara ait test sonuçları Tablo 11’de gösterilmiştir.

Tablo 11. Çimentoların Katkı Oranlarının Yüzdesel Değişimine Göre Priz Başlangıç Süreleri, Su İhtiyaçları ve Le Chatelier (hacimsel genleşme) değerleri

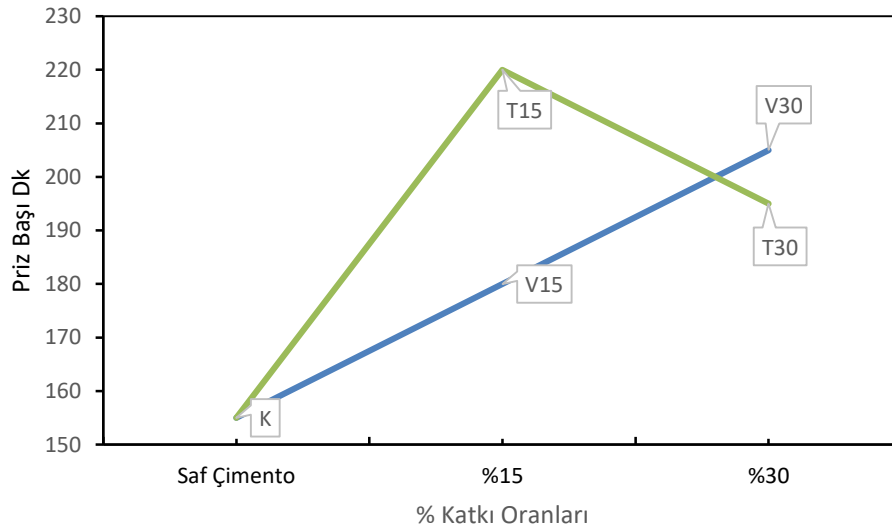
Priz Başlangıç Süresi		Su İhtiyacı	Le Chatelier
Kısaltmalar	dk	%	mm
K	155	30,0	1
KD1	195	30,4	1
KD2	185	30,6	1
KD4	185	30,8	1
KB1	190	30,6	1
KB2	195	31,0	1
KB4	190	31,0	1
V15	180	29,9	0
V15D1	190	30,0	0
V15D2	190	30,1	0
V15D4	185	30,1	0
V15B1	195	30,2	0
V15B2	200	30,2	0
V15B4	220	30,2	0
V30	205	29,8	0
V30D1	225	29,8	0
V30D2	220	29,9	0
V30D4	210	29,9	0
V30B1	220	30,0	0
V30B2	225	30,0	0
V30B4	220	30,0	0
T15	220	31,5	0
T15D1	225	31,6	0
T15D2	200	31,5	0
T15D4	210	31,5	0
T15B1	210	31,8	0
T15B2	200	32,0	0
T15B4	210	32,0	0
T30	195	32,4	0
T30D1	190	32,4	0
T30D2	180	32,5	0
T30D4	185	32,6	0
T30B1	190	32,4	0
T30B2	195	32,6	0
T30B4	195	32,7	0

Tablo 11’de ki sonuçlara göre, Kül ve Tras katkısı, saf çimentonun priz süresini uzatmıştır. İstisna sonuçları çıkarırsak boksit katkısının demir katkısına göre priz süresini uzattığı görülmüştür. Aynı kül ve tras katkı oranları ile kıyaslama yapılacak olursa; demir ve boksitin priz sürelerine etkisi azdır diyebiliriz. Priz sürelerinde asıl fark yaratan katkılar kül ve tras katkılarıdır.

Saf çimentonun su ihtiyacını kül katkısının düşürdüğü, tras katkısının arttırdığı görülmüştür. Aynı zamanda demir ve boksit katkılarının da su ihtiyacını arttırmaya sebep olduğu görülmüştür. Bu iki katkıdan ise boksitin daha çok su ihtiyacını arttırdığı tespit edilmiştir.

Le Chatelier hacimsel genleşme test sonuçlarında bir fark olmadığı görülmüştür.

Aşağıdaki grafiklerde kül, tras, demir ve boksit cevherinin priz başı süresi üzerindeki etkileri görülmektedir:



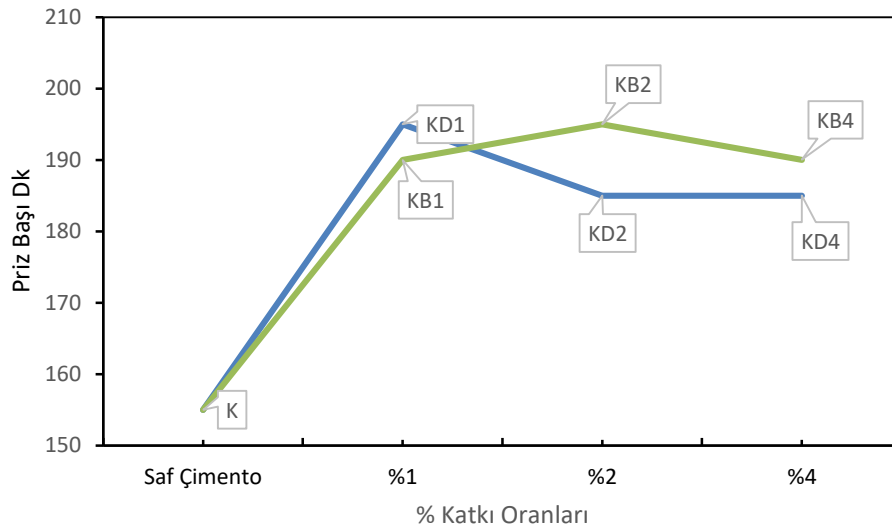
Şekil 42. Saf Çimento ile kül/tras katkılı çimentoların priz sürelerinin değişimi

Kül ve Tras katkısının priz süresini uzattığı şekil 42’de görülmektedir. En yüksek priz süresi %15 Tras katkısı katılan çimentoda gelmiştir.

Tras ve Kül katkısı çimentoların hidrasyon ısını düşürür. Bu nedenle bu katkıların çimento hamurlarının priz süresini uzattığını söyleyebiliriz. Tras ve Kül katkısının çimento inceliklerini arttırdığı da düşünülürse çimento taneciklerinin tamamen reaksiyona girme süreside artmış olur.

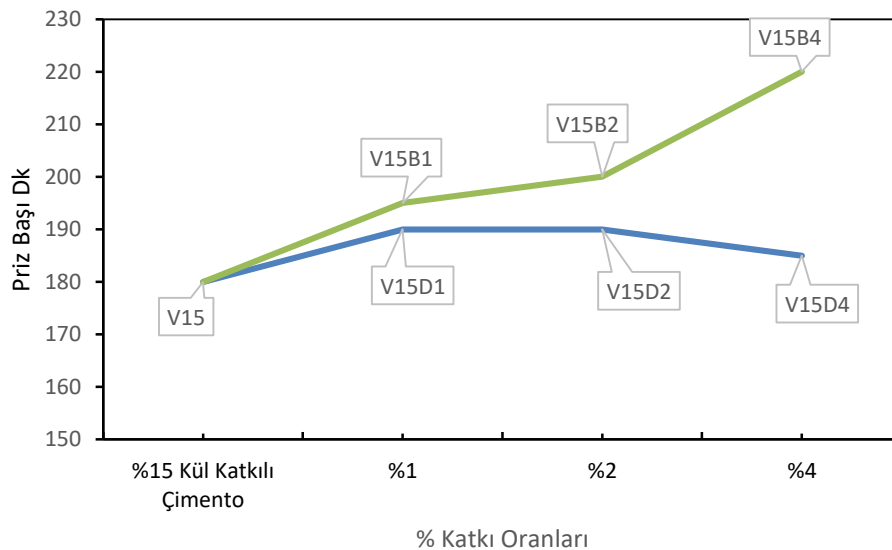
Saf çimentoların katkılı çimentolara göre prize daha erken başladığı görülmüştür. Bunun diğer bir nedeni saf çimentonun C_3A içeriğinin katkılı çimentolara göre daha yüksek

olmasından kaynaklanmaktadır. C_3A fazının reaksiyona girme hızı diğer fazlara oranla daha yüksektir.



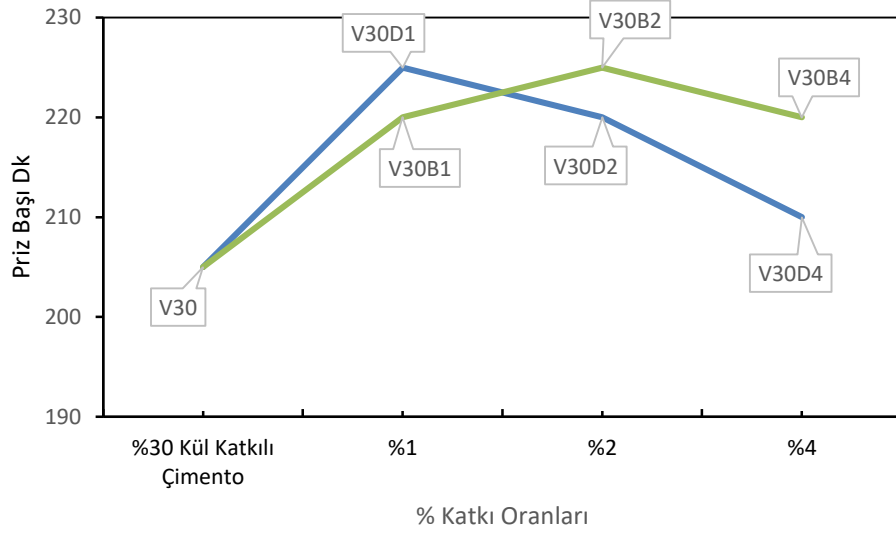
Şekil 43. Saf Çimento ile demir/boksit katkılı çimentoların priz sürelerinin değişimi

Şekil 43'e göre boksit katkısı, demir katkısına göre %1'lik katkı oranı hariç priz süresini uzatmıştır. Literatür bilgisine göre boksit katkısının C_3A fazını yükselttiği, bunun ise hidrasyon ısısını yükselttiği ve priz süresini kısalttığı bilinmektedir. Priz sürelerindeki testlerde 5 dakikalık farklılık deneyin yapılışı sırasında en yakın süreye yuvarlama yapıldığından dolayı değerlendirmelerde büyük bir fark oluşturmamaktadır. Katkı oranlarının minör olması priz sürelerinde çok büyük farklılık getirmemiştir.



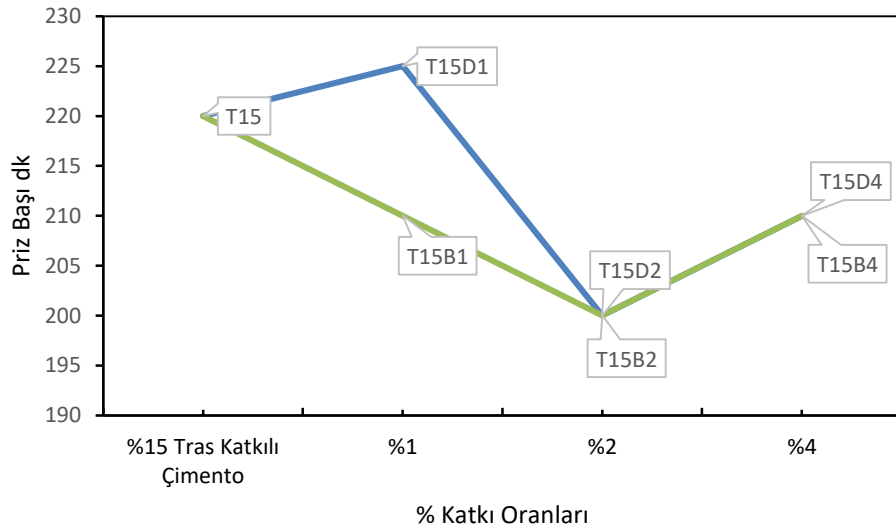
Şekil 44. Saf Çimento ile %15 kül katkılı çimentonun demir/boksit katkılı çimentolarının priz sürelerinin değişimi

Priz sürelerinde ki en büyük fark %4 Boksit ve %4 Demir katkılı çimentolarda görülmektedir (Şekil 44).



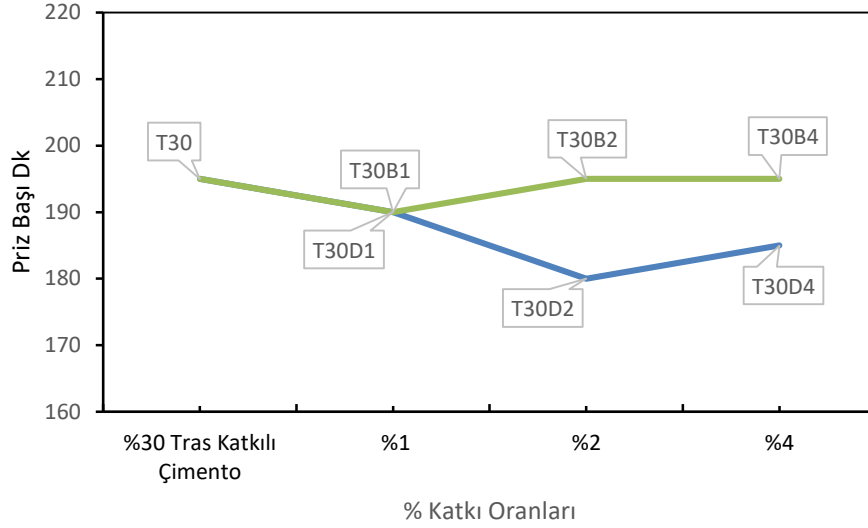
Şekil 45. Saf Çimento ile %30 kül katkılı çimentonun demir/boksit katkılı çimentolarının priz sürelerinin değişimi

%2 ve %4 Boksit katkılı karışımlar, demir karışımlarına göre priz süresini uzatmıştır. %1 Boksit katkısında ise, boksit katkılı denemenin priz süresi daha kısadır (Şekil 45.)



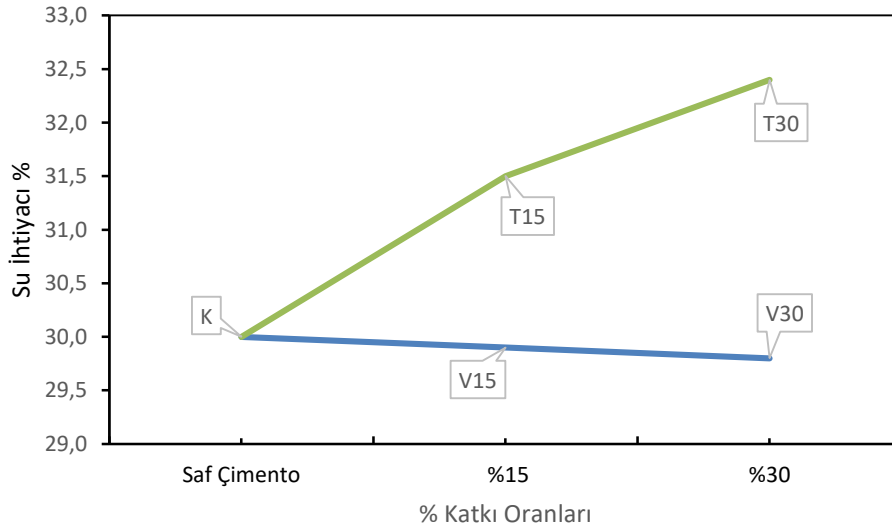
Şekil 46. Saf Çimento ile %15 tras katkısından (karışımından) oluşan çimentonun priz süresi üzerine (demir/boksit) katkısının etkisi.

Şekil 46'ya göre %15 tras katkılı denemelerde boksit katkılı çimentoların priz süresi demire göre daha kısa gerçekleşmiştir. Fakat %2 ve %4 katkı denemelerinde priz sürelerinin aynı olduğu gözlenmiştir.



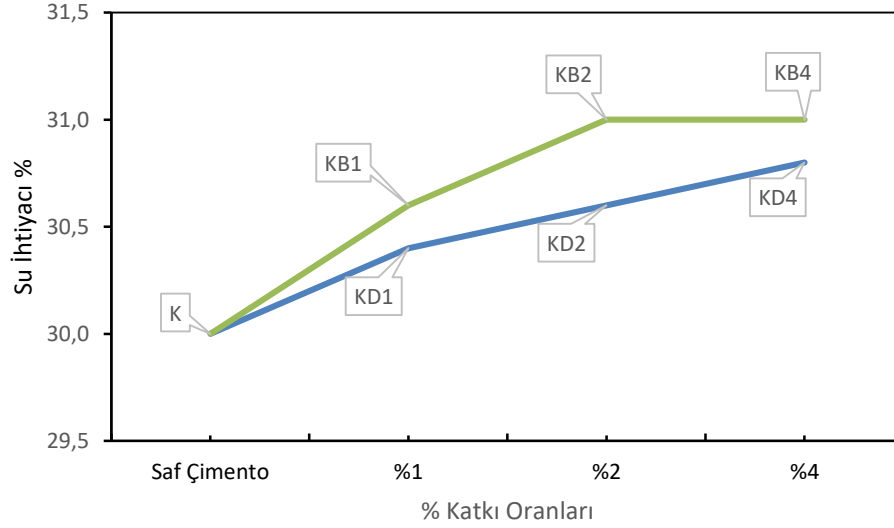
Şekil 47. Saf Çimento ile %30 tras karışımından oluşan çimentoya eklenen (demir/boksit) katkısının priz süresi üzerine etkisi.

%30 tras katkılı denemelerde %2 ve %4 boksit katkılı çimentoların priz süresi demir katkılarının göre daha yüksektir. %1 boksit ve %1 demir katkılı çimentoların priz süreleri aynı bulunmuştur (Şekil 47).



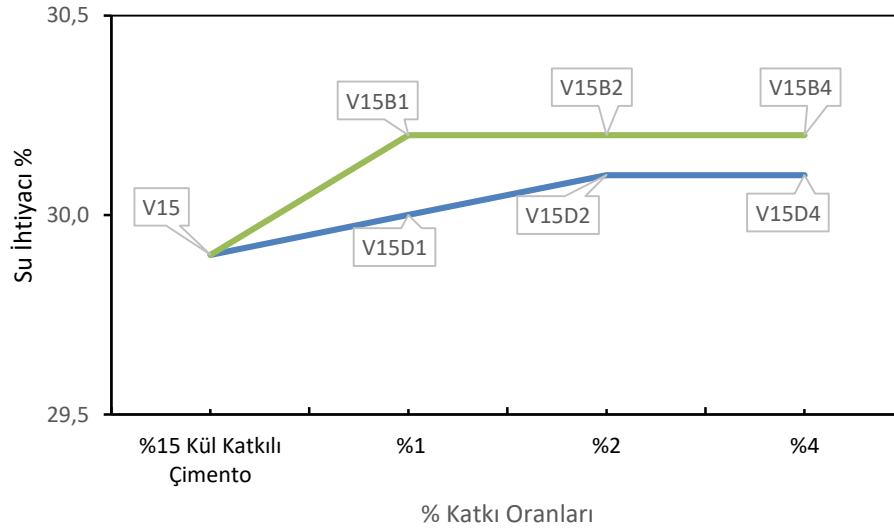
Şekil 48. Saf çimentoya eklenen (kül/tras) katkısının su ihtiyacı üzerine etkisi

Çimentoda su ihtiyacının düşük olması istenir. Saf çimentonun su ihtiyacını kül katkısının düşürdüğü, tras katkısının arttırdığı görülmektedir. Katkı oranı arttıkça bu etki daha da artmıştır (Şekil 48.)



Şekil 49. Saf çimentoya eklenen (demir/boksit) katkısının su ihtiyacı üzerine etkisi

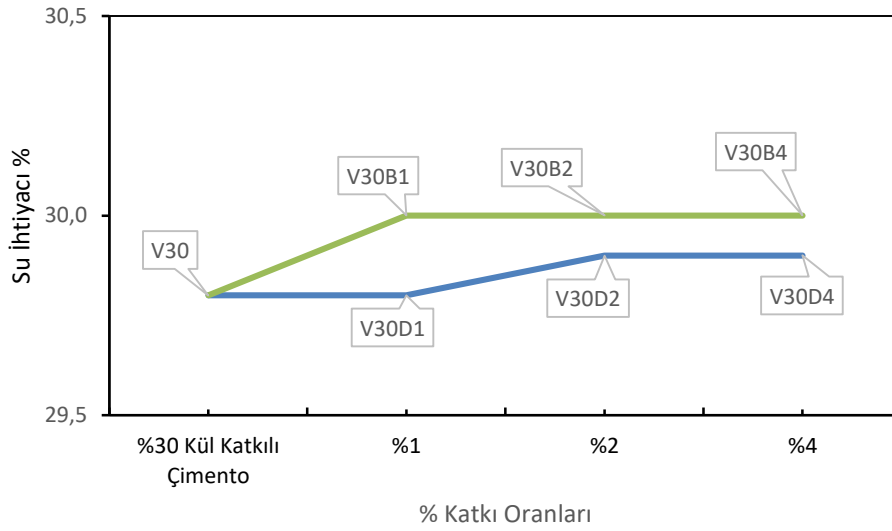
Şekil 49'a göre saf çimentonun su ihtiyacını demir ve boksit katkısı arttırmıştır. Boksit katkısı demire göre daha çok su ihtiyacının artmasına sebep olmuştur. Katkı oranı arttıkça bu etki daha da artmıştır. Boksitin artışı çimentonun C_3A fazını arttırmıştır. Faz artışı ise hidrasyon ısısının artmasına neden olmuş ve ayrıca su ihtiyacının yükselmesine sebep olmuştur. Literatürde klinker ve çimento bileşiminde ki C_3A fazının artmasının su ihtiyacını yükselttiğine dair bilgi mevcuttur (Holcim 2004).



Şekil 50. Saf Çimento ile %15 kül karışımından oluşan çimentoya eklenen (demir/boksit) katkısının su ihtiyacı üzerine etkisi

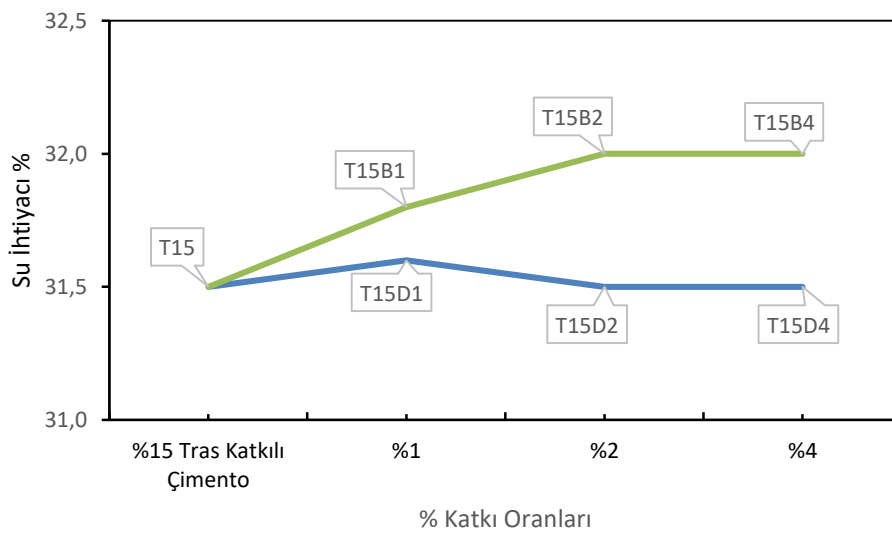
Kül katkısı tek başına saf çimentonun su ihtiyacını düşürmüştü. Grafikten de görüldüğü gibi, (boksit/demir) katkısındaki artış su ihtiyacını arttırmıştır. Ancak su ihtiyacı üzerinde boksitin etkisi demire göre daha çok olup %1'den sonra sabit kalmıştır. Benzer olarak su

ihtiyacı üzerinde demirin etkisi %2'den sonra sabit kalmıştır. Yani %2'den sonra demir katkısının bir etkisi yoktur (Şekil 50).



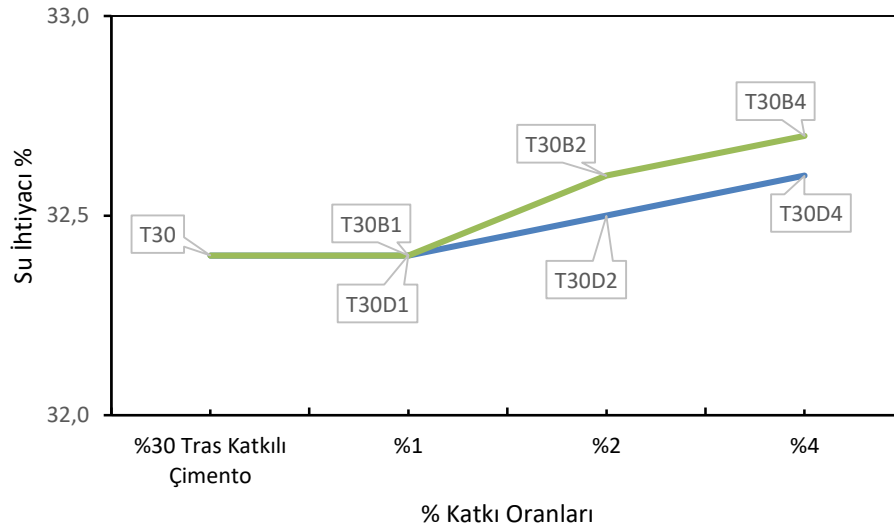
Şekil 51. Saf Çimento ile %30 kül karışımından oluşan çimentoya eklenen (demir/boksit) katkısının su ihtiyacı üzerine etkisi

Kül katkısı tek başına saf çimentonun su ihtiyacını düşürmüştü. Fakat şekil 51'den görüldüğü üzere %30 kül katkılı karışım çimentoya eklenen %1 boksit katkısı su ihtiyacını 29,8'den 30'a arttırmış olup saf çimentonun su ihtiyacı ile aynı değere ulaşmıştır. %1'den sonra eklenen boksit katkısı su ihtiyacını değiştirmemiştir. Külün saf çimentonun su ihtiyacındaki azaltıcı etkisini, boksit katkısı ortadan kaldırmıştır. Genel olarak bakarsak demir ve boksit katkılarının minör kullanımları çimento karışımlarının su ihtiyaçlarında çok büyük farklar oluşturmamıştır.



Şekil 52. Saf Çimento ile %15 tras karışımından oluşan çimentoya eklenen (demir/boksit) katkısının su ihtiyacı üzerine etkisi

%15 tras katkısı saf çimentonun su ihtiyacını %5 oranında arttırmıştır, %2-%4 boksit katkısı bu oranın %6,6'ya yükselmesine sebep olmuştur (Şekil 52.)



Şekil 53. Saf Çimento ile %30 tras karışımından oluşan çimentoya eklenen (demir/boksit) katkısının su ihtiyacı üzerine etkisi

%30 tras katkısı saf çimentonun su ihtiyacını %8 oranında arttırmıştır, %4 boksit katkısı bu oranın %9'a yükselmesine sebep olmuştur (Şekil 53).

TARTIşMA VE DEğERLENDİRME

Bu çalışmada, ana imento tipi olan CEM I 42,5R ürününe tras ve uçucu külden belirli yüzdelerde karıştırılarak elde edilen karışımlara katılan demir ve boksit katkılarının çimentonun hidratasyon ısısını ne kadar değiştirdiği, fiziksel ve mekaniksel özelliklerine nasıl etki ettiği ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

Hidratasyon ısısına göre değerlendirildiğinde, saf çimentonun hidratasyon esnasında açığa çıkan ısısının kl ve tras katkılı karışımlara göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Hidratasyon ısısını düşürmede külün etkisinin trasa göre daha yüksek olduğu, minör katkı olarak katılan demir katkısının ise boksite göre daha fazla düşüş sağladığı analiz sonuçlarıyla tespit edilmiştir.

Saf çimentoya kl ve tras katkı malzemeleri katıldıkça özellikle erken dayanımlarda düşme, nihai dayanımlarda ise saf çimentodan düşük fakat yakın sonuçlar alınmıştır. Tras katkısı kl katkısına oranla tüm kırım günlerinde daha yüksek dayanım vermiştir. Boksit katkısı demir cevherine göre dayanımın daha çok düşmesine neden olmuştur.

Literatürde de ifade edildiği gibi, portland imentosu ile karşılaştırıldıknda puzolanik çimentolar şu özellikleri gösterir;

- Daha düşük erken dayanımlar,
- Daha yüksek veya yakın nihai dayanımlar,
- Daha düşük hidratasyon ısısı,
- Daha fazla gözeneklilik,
- Daha düşük geçirgenlik,
- Sülfata ve deniz suyu genleşmesine karşı daha fazla direnç.

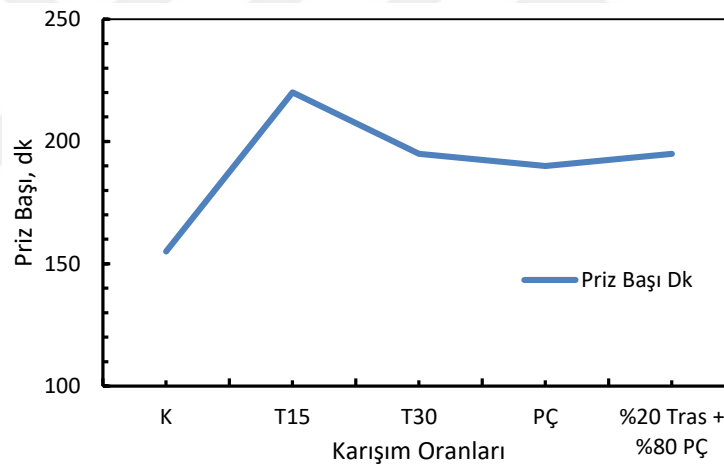
Tüm bu özellikler, çimentonun kimyasal ve mineralojik bileşimini, hidratasyon mekanizmasını, harcın bileşimini ve mikro yapısını içeren farklılıklarla bağlantılıdır (Massazza 1993).

Priz süreleri açısından sonuçlara baktıkımızda tras ve kl katkısının saf çimentonun donmaya başlama süresini geciktirdiği grlmştir. Minör olarak katılan boksit ve demir katkısının priz sürelerine etkisi azdır diyebiliriz. Çimentonun donmaya başlama süresinde asıl fark yaratan katkılar kl ve tras katkılarıdır.

Su ihtiyacı ile ilgili alınan sonuçlara baktığımızda kül katkısının çimentonun su ihtiyacını düşürmede, tras katkısının ise yükseltmede etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca boksit ve demir katkılarının da su ihtiyacında artışa neden olduğu görülmüştür. Tras, içeriğinde ki yüksek silis kaynağı nedeniyle yapısı gereği su emme kapasitesi yüksek bir hammaddedir, bu nedenle karışımlarda çimentonun su ihtiyacının yükselmesine sebep olmuştur. Ayrıca tras katkısı arttıkça karışım çimentolarının özgül yüzey dediğimiz blaine değerlerinin artması da beraberinde su ihtiyacı artışını getirmiştir.

Doğal puzolanların, çimentonun toplam özgül yüzeyini artırdıkları için su ihtiyacını artırmak ve erken mukavemeti düşürmek gibi dezavantajlarının olduğu da bilinmektedir (Koçak vd 2010).

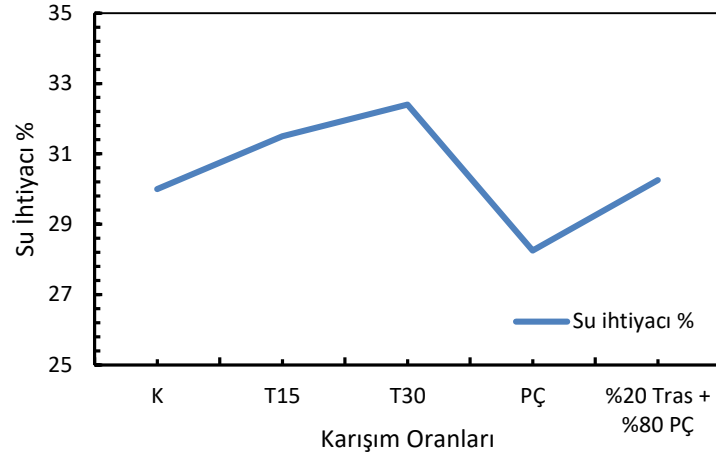
Trasın çimento yüzey özelliğine, hidrasyona ve basınç dayanımına etkisi ile ilgili yazılmış bir makaledeki test sonuçları; tras katkısının priz sürelerinde beklenildiği gibi bir artışa sebep olduğunu, bu sayede de trasın hidrasyon hızını yavaşlattığını, hidrasyon ısı ve sıcaklığını düşürerek büzülme tehlikesine karşı etkili olduğunu göstermiştir (Koçak vd 2010).



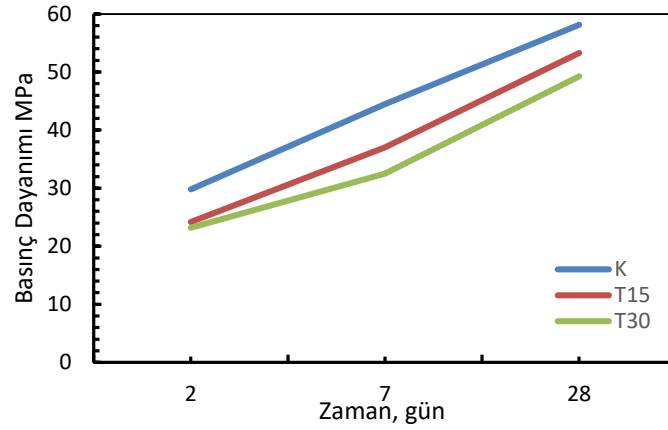
Şekil 54. Mevcut çalışma ile Trasın çimento yüzey özelliğine, hidrasyona ve basınç dayanımına etkisi üzerine yazılan makaledeki priz sürelerinin karşılaştırılması (Koçak vd 2010).

Çalışmada; PÇ (Portland çimento) ‘nun içerisine %20 oranında tras katılarak elde edilen karışımın priz süresine bakılmıştır. Şekil 54’de görüldüğü gibi deney sonucu trasın priz süresini geciktirdiği yönündedir. Mevcut çalışmamızda da K, kontrol çimentomuza katılan tras katkısı priz süresini uzatmıştı.

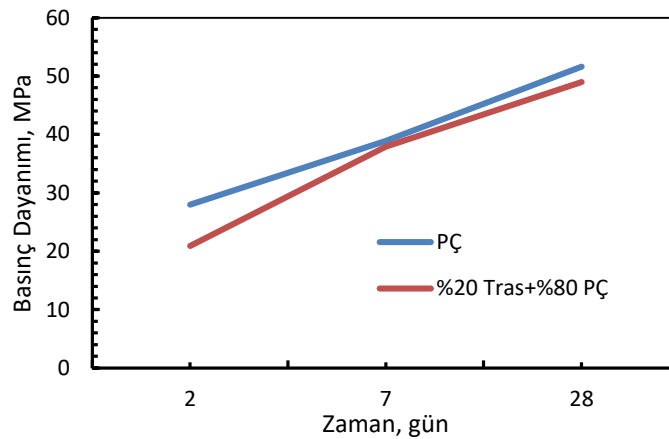
Aynı deneysel çalışmada trasın basınç dayanımı ve su ihtiyacına olan etkisi de araştırılmıştır (Şekil 55,57). Ayrıca şekil 56’da mevcut çalışmamızdan elde ettiğimiz basınç dayanım değerleri de karşılaştırma için eklenmiştir.



Şekil 55. Mevcut çalışma ile Trasın çimento yüzey özelliğine, hidrasyona ve basınç dayanımına etkisi üzerine yazılan makaledeki su ihtiyaçlarının karşılaştırılması (Koçak vd 2010).



Şekil 56. Mevcut çalışma basınç dayanım verileri

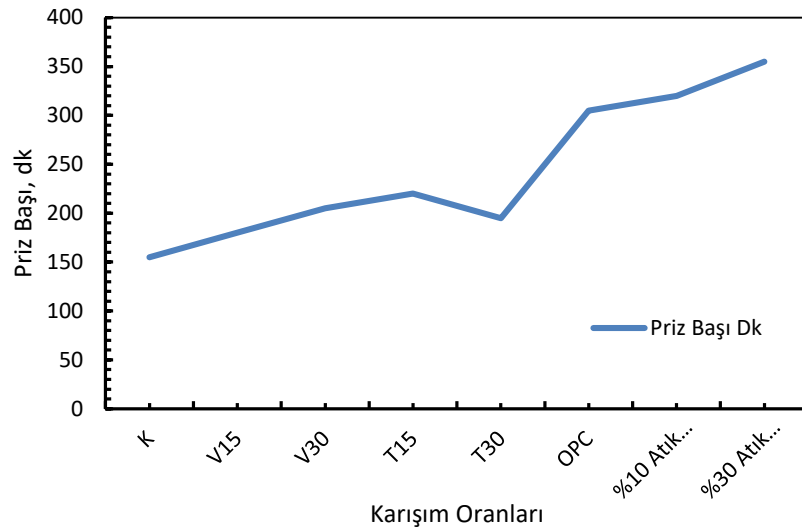


Şekil 57. Trasın çimento yüzey özelliğine, hidrasyona ve basınç dayanımına etkisi üzerine yazılan makaledeki basınç dayanım verileri (Koçak vd 2010).

Bir başka kaynakta; Koçak, süper akışkanlaştırıcı ve trasın çimento hidrasyonuna etkilerini incelemiştir. Araştırmacı saf çimentoya %20 oranında tras katkısı ekleyerek karışım hazırlamış, basınç dayanımları, su ihtiyacı ve priz sürelerini analiz etmiş, sonuçlarda; trasın su

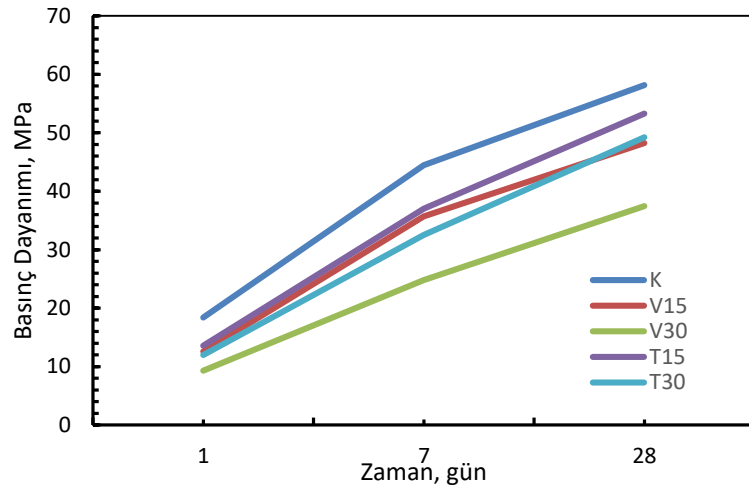
ihtiyacını arttırdığı, priz süresini uzattığı, basınç dayanımını düşürdüğünü görmüştür (Koçak 2017).

Çimentoda mineral katkı olarak kullanılan, puzolanik özellik gösteren, ince öğütülmüş atık camın priz süresi ve basınç dayanımına etkisinin incelendiği bir araştırmanın test sonuçları; portland çimentosunun hidratasyonun da atık camın geciktirici etkisinin olduğunu göstermiştir. Şekil 60'da görüldüğü gibi denemelerde atık cam kullanımının artmasıyla basınç dayanımları düşmektedir, bunun nedeni ise çimento içeriğinin azalması ve gözenekliliğin artmasına bağlanmıştır (Gopalakrishnan and Govindarajan 2011).

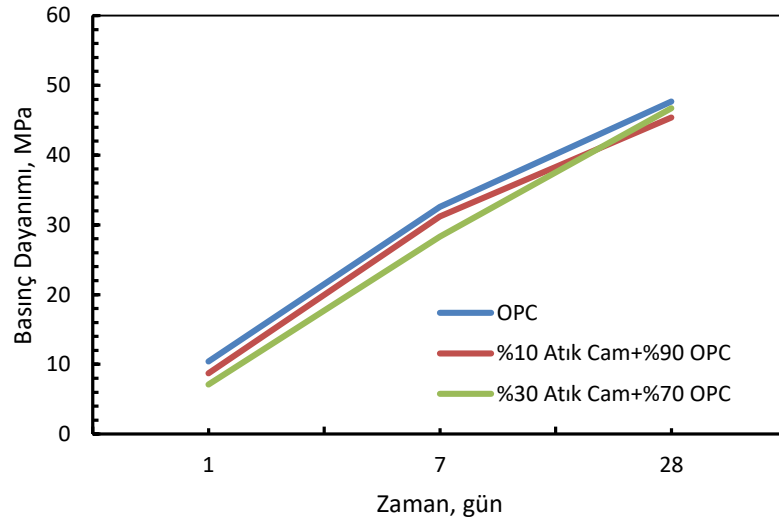


Şekil 58. Mevcut çalışma ile ince öğütülmüş atık camın priz süresi ve basınç dayanımına etkisinin incelendiği araştırmanın (Gopalakrishnan and Govindarajan 2011) karşılaştırılması

Şekil 58'de görüldüğü gibi çalışmada 305 dk priz başlangıcı olan OPC çimentosunun, %10 Atık cam katkısından oluşan karışımında bu süre 320 dk, %30 Atık cam katkısından oluşan karışımında ise 355 dk'dır. Bu sonuçlar puzolanik malzemelerin priz süresini geciktirdiğini ve hidratasyon hızını yavaşlattığını kanıtlamaktadır. Mevcut çalışmamızda da %15 ve %30 tras ve kül katkılarında oluşan karışımlarda priz süreleri kontrol çimentosu CEM I 42,5R'ye (K) göre uzamıştı. Bu durumu şekil 59'da görülen K, V15, V30, T15 ve T30 karışım çimentolarının sonuçları göstermektedir.



Şekil 59. Mevcut çalışma basınç dayanım verileri

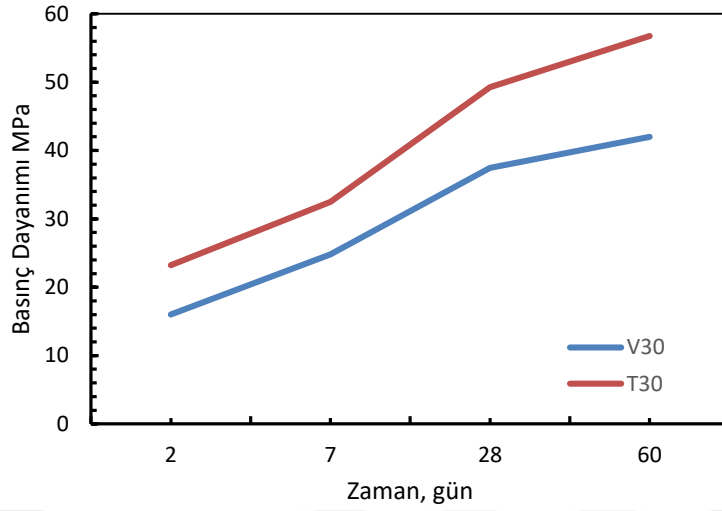


Şekil 60. İnce öğütülmüş atık camın priz süresi ve basınç dayanımına etkisinin incelendiği araştırmanın (Gopalakrishnan and Govindarajan 2011) basınç dayanım verilerinin karşılaştırılması

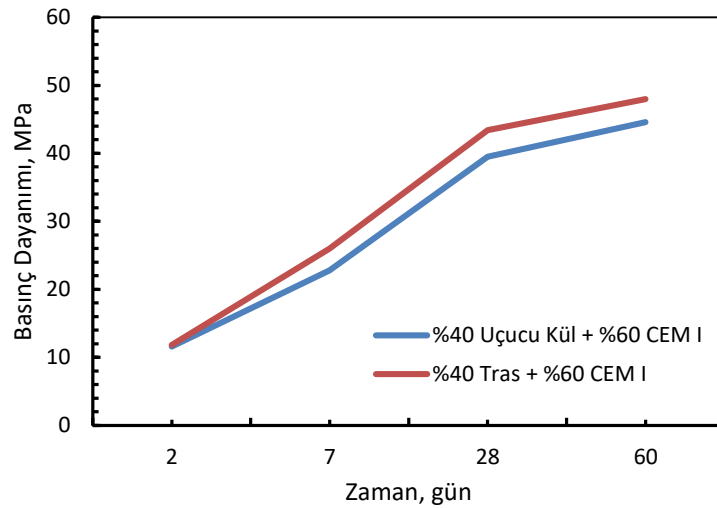
Şekil 59 ve 60'a göre mevcut çalışma ile literatür verileri karşılaştırıldığında; puzolanik malzemelerin saf çimentonun dayanımını tüm dayanım günlerinde düşürdüğü, fakat ilerleyen dayanım günlerinde bu farkın azaldığı da görülmektedir. %30 atık cam katkılı karışım 28 günlük dayanımda saf OPC'nin aldığı dayanımın %98'ini karşılamıştır. Mevcut çalışmada %30 tras katkılı karışım T30, saf çimentonun 28 günlükte kazandığı dayanımın %85'lik kısmını sağlamıştır.

Farklı inceliklerdeki tras ve uçucu külün çimento dayanımlarına etkisinin incelendiği bir başka çalışmada, aynı incelikte öğütülmüş tras ve uçucu külün deney sonuçlarında, basınç dayanımında ölçülen değerlerin 1.yıla kadar tras katkılı numuneler için daha yüksek olduğu tespit edilmiş, tüm dayanım günlerinde bu etki devam etmiş, tras katkısı küle göre daha yüksek dayanım sonucu vermiştir (Çelik vd 2003). Mevcut çalışma verilerinin olduğu Şekil 61 ile

literatür verilerini gösteren şekil 62’de ki grafiklerde tras katkılı denemelerin uçucu kül katkılı denemelere göre yüksek dayanım değeri verdiği görülmektedir.

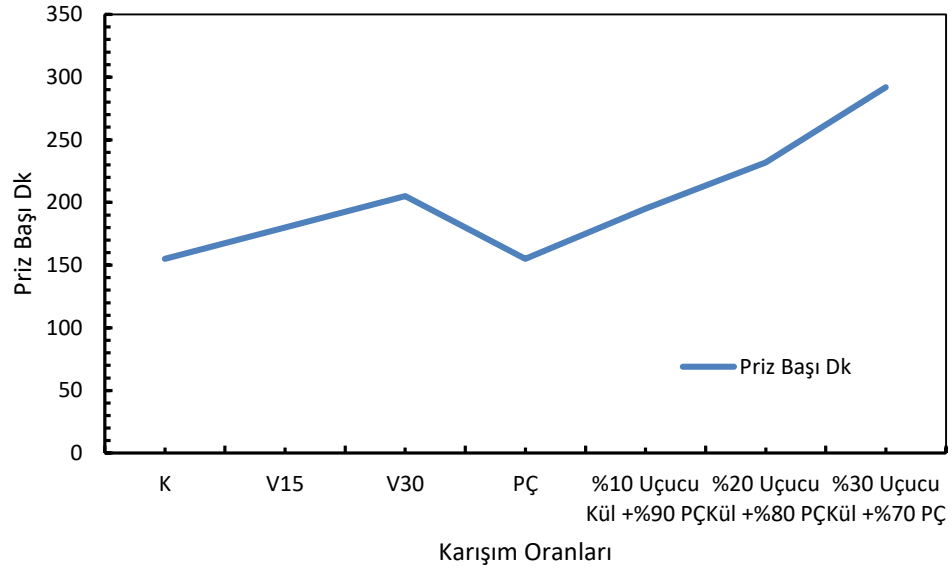


Şekil 61. Mevcut çalışma basınç dayanım değerleri

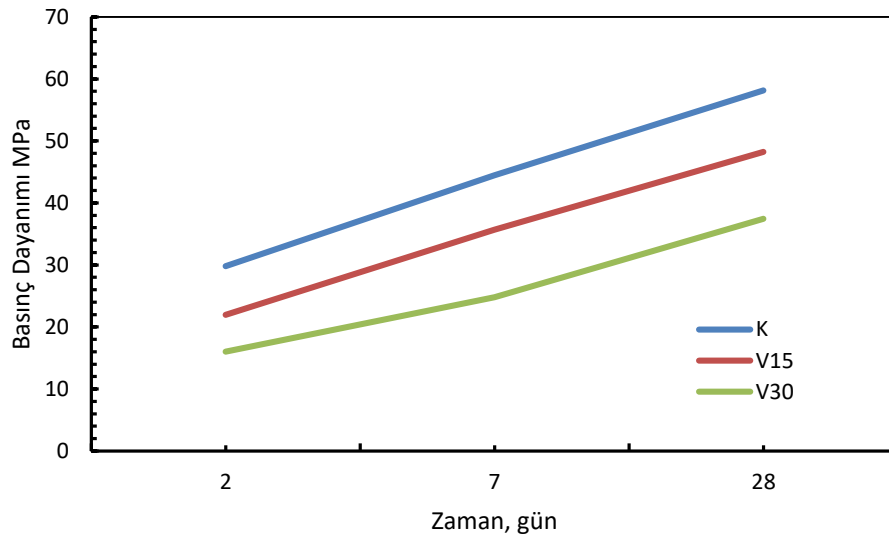


Şekil 62. Farklı inceliklerdeki tras ve uçucu külün çimento dayanımlarına etkisinin incelendiği çalışma verileri (Çelik vd 2003).

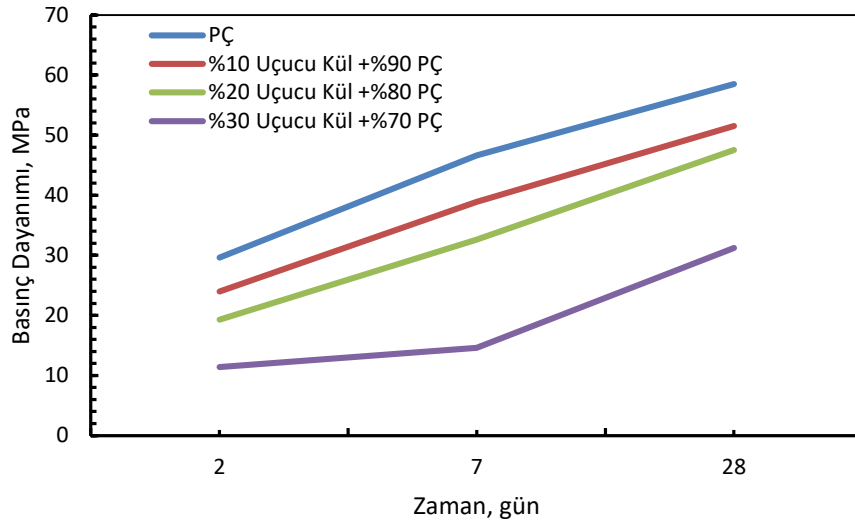
Termik santral atığı uçucu külün Portland çimentosu özelliklerine etkisi ile ilgili yapılan bir çalışmada; Şekil 63’de görüleceği gibi uçucu külün priz sürelerinde gecikmeye neden olduğu, Şekil 65’de ki basınç dayanım test sonuçlarına göre ise; kül oranı arttıkça erken dayanımın düştüğü görülmüştür. Bunun sebebi deney süresinin 28 günle sınırlandırılmış olması ve uçucu külün henüz tamamen hidrate olmaması olarak değerlendirilmiştir. Uçucu kül ikameli çimentolar, ilk günlerde Portland çimentosundan daha düşük bir dayanım oluşturur ancak ilerleyen günlerde bu fark gittikçe azalmaktadır. Özellikle dayanımın yanında dayanıklılığında önemli olduğu düşünülürse, yüksek dayanımlı çimentolara uygun oranda uçucu kül ikamesi veya katkısı ile standartların öngördüğü en düşük dayanımdan vazgeçilmeksizin yüksek dayanıklılığa sahip çimentoların üretilebileceği görülmektedir (Koçak 2011).



Şekil 63. Mevcut çalışma ile termik santral atığı uçucu külün portland çimentosu özelliklerine etkisinin incelendiği araştırmanın (Koçak 2011) priz sürelerinin karşılaştırılması

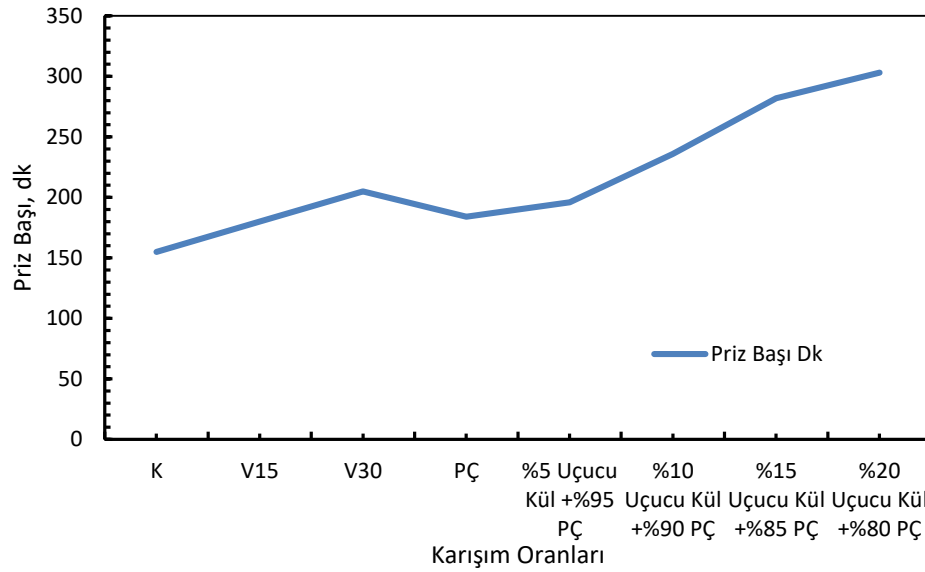


Şekil 64. Mevcut çalışma basınç dayanım değerleri



Şekil 65. Termik santral atığı uçucu külün portland çimentosu özelliklerine etkisinin incelendiği araştırmanın (Koçak 2011) basınç dayanımları üzerine etkisi

Seyitömer ve Çayırhan uçucu küllerinin Portland çimentosu - uçucu kül (PÇ-UK) hamurunun priz başlama ve sonu sürelerine etkisi üzerine yapılan bir çalışmada; şekil 66'da verilen grafikten de görüleceği üzere her iki uçucu külünde Portland çimentosunun priz süresini uzattığı deney sonuçları ile tespit edilmiştir (Çelik vd 2003).



Şekil 66. Mevcut çalışma ile Seyitömer ve Çayırhan uçucu küllerinin portland çimentosu - uçucu kül hamurunun priz başlama ve sonu sürelerine etkisinin incelendiği araştırma verileri (Çelik vd 2003).

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, literatürde mineral katkı olarak kullanılan tras ve uçucu külün hidratasyon ısısını ne ölçüde değiştirdiği, minör olarak katılan demir ve boksit katkısının ise bu mineral katkılar ile nasıl çalıştığı, çimentonun hidratasyon ısısına ve mekaniksel özelliklerine ne ölçüde etki ettiğini incelemek için yapılmıştır.

1. Bu çalışmada ilk olarak, Tablo 7’de belirtilen oranlarda çimento karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan 35 adet karışıma TS EN 196-8 standardına uygun yöntemle 7 günlük hidratasyon ısısı testleri yapılmıştır. Kontrol çimentosu olarak kabul edilen CEM I 42,5R (K)’nin hidratasyon ısısının 86,22 cal/g, %15 Uçucu kül + %85 CEM I 42,5R (V15) katkılı karışımın 65,08 cal/g, %30 Uçucu kül + %70 CEM I 42,5R (V30) katkılı karışımın 52,82 cal/g, %15 Tras + %85 CEM I 42,5R (T15) katkılı karışımın 74,95 cal/g, %30 Tras + %70 CEM I 42,5R (T30) katkılı karışımın 63,50 cal/g geldiği tespit edilmiştir. Sonuçlar uçucu kül katkısının trasa oranla, saf çimentonun hidratasyon ısısını düşürmede %16,8 daha etkili olduğunu göstermektedir. Yapılan deney sonuçlarında tras ve uçucu külün portland çimentosunun priz süresini uzattığı görülmüştür. Literatür çalışmalarında da tras ve kül katkılarının saf çimentonun priz sürelerinde beklenildiği gibi bir artışa sebep olduğu, bunun da hidratasyon hızını yavaşlattığı, hidratasyon ısı ve sıcaklığını düşürdüğü açıklanmıştır.
2. Saf çimento (K), %15 kül katkılı çimento (V15), %30 kül katkılı çimento (V30), %15 tras katkılı çimento (T15) ve %30 tras katkılı çimento (T30) karışımlarına eklenen %1,%2 ve %4 demir cevheri ile boksit katkılarından; demir katkılı denemelerin boksit katkılı denemelere göre hidratasyon ısısını daha çok düşürdüğü analiz sonuçları ile tespit edilmiştir. %1 demir cevheri katkılı denemelerde en düşük hidratasyon ısısı 52,91 cal/g ile V30D1 kodlu denemede, %2 demir cevheri katkılılarda en düşük hidratasyon ısısı 51,83 cal/g ile V30D2 kodlu denemede, %4 demir cevheri katkılı denemelerde ise en düşük hidratasyon ısısı 51,70 cal/g ile V30D4 kodlu numunede görülmüştür. %1-%2-%4 boksit katkılı denemelerde en düşük hidratasyon ısısı içeriğinde ki yüksek kül katkısından dolayı yine %30 kül katkılı deneme numunelerinin sonuçlarında görülmüştür. Tüm deneme numunelerinin sonuçları göz önüne alındığında en düşük hidratasyon ısısı V30D4

kodlu numunede, en yüksek hidrasyon ısısı ise KB4 kodlu numune sonucunda alınmıştır.

3. V30 en yüksek miktarda kül katkısını içerir ve her yaşta (1-2-7-28-60 gün) en düşük basınç dayanımını vermiştir. K tüm dayanım günleri için referans numune olarak seçilmiştir ve basınç dayanım değerleri %100 olarak kabul edilmiştir. Saf çimentoya göre 28 günlük dayanımda %15 kül katkısı %17 oranında mukavemet azalmasına neden olmuştur, %30 kül katkısı %35,6'lık azalmaya, %15 tras katkısı %8,3'lük azalmaya ve %30 tras katkısı %15,3 oranında mukavemet azalmasına neden olmuştur.
4. Saf çimentoya göre 1 günlük dayanımda en büyük düşüş oranı %54,9 ile V30B2 ve V30B4 numunelerinde, 2 günlükte %48,02 ile V30B2 numunesinde, 7 günlükte %44,45 ile V30B4 numunesinde, 28 günlükte %38,43 ile V30B4 numunesinde, 60 günlükte %33,10 ile V30B4 numunesinde görülmüştür.
5. 60 günlük dayanım sınıfında saf çimentonun %96,96'lık dayanımını karşılayan karışım numunesi T15D2 kodlu %15 tras + %85 CEM I içeren karışıma katılan %2 demir katkısıdır.
6. Priz süreleri açısından sonuçları incelediğimizde en uzun priz süresinin %30 kül katkılı karışım çimentolarında olduğu görülmektedir. Kül katkısı saf çimentonun priz süresinde %45'lik artışa neden olmuştur. Priz süresindeki bu uzama hidrasyon sürecinin yavaşlığını, hidrasyon ısısı ve sıcaklığının da düşüklüğünü desteklemektedir. En düşük hidrasyon ısısı sonuçları %30 kül katkılı deneme sonuçlarında görülmüştür.
7. Su ihtiyacı test sonuçlarına baktığımızda kül katkısının çimentonun su ihtiyacını düşürdüğü, tras katkısının ise yükselttiği tespit edilmiştir. Boksit ve demir katkılarının da su ihtiyacında artışa neden olduğu görülmüştür. En düşük su ihtiyacı V30 ve V30D1 kodlu numunelerde, en yüksek su ihtiyacı ise T30B4 kodlu numunede görülmüştür.
8. V30, V30D1, V30D2, V30D4, V30B1, V30B2, V30B4, T30, T30D1, T30D2, T30D4, T30B1, T30B2, T30B4 kodlu karışım çimentoları kıyı ve liman inşaatlarında, açık deniz yapılarında, atık su tesislerinde, betonarme yer altı su borularında, arıtma tesislerinde, tünel kaplamalarında kullanılabilir. Özellikle sülfata dayanıklılık, geçirimsizlik ve düşük hidrasyon ısısı istenen yapılar için kullanımları tavsiye edilir. T15, T15D1, T15D2, T15D4, T15B1, T15B2, T15B4 kodlu karışım çimentoları portland çimentonun dayanımına yakın mekanik özellikleri sağladığından özellikle baraj inşaatlarında kullanılabilir görülmektedir.

Ülkemizde ve tüm dünyada çimento üretimi ve akabinde beton yapımı sürecinde çeşitli mineral katkıları kullanılarak dayanıklılığın artırılması aynı zamanda maliyetlerin düşürülmesi için çalışmalar yapılmakta ve devam etmektedir. Tüm bu çalışmalar çimento ve beton standartlarının uygunluğu göz önünde tutularak sürdürülmektedir. Bu çalışmamızda, mineral katkılardan yararlanılarak çimentonun hidratasyon ısısı, fiziksel ve mekanik özelliklerinin değişimi deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Farklı bölgelerden çıkarılan doğal ve yapay puzolanik malzemelerle, kullanım oranları değiştirilerek, saf çimentonun hidratasyon ısısı, dayanım ve priz sürelerinin değişkenliğinin araştırılması önerilmektedir.



KAYNAKÇA

- Akçansa, S.A., 2006. Akçansa teknik notlar 3 Çimentonun hidratasyonu. Akçansa, teknik notlar, http://www.akcansa.com.tr/docs/20120216160047_teknik-notlar-3.pdf. (15.02.2021).
- Akman, M.S., 2003. 5.Ulusal Beton Kongresi, Gecikmiş Etrenjit Oluşumu (DEF). 9-16.
- Alsop, P.A., Chen, H., Chin, A.L., Jackura, A.J., Mckabe, M.I., Tseng, H.H., 2001. Cement Plant Operations Handbook For Dry Process Plants. Tradeship Publications Ltd., 276 p, Houston, United Kingdom.
- Ardoğa, M.K., 2014. Effect of particle size on heat of hydration of pozzolan-incorporated cements. MS Thesis, Middle East Technical University, Ankara.
- Biricik, H., 1999. Su geçirimsizliğinin puzolan malzeme ile azaltılması. Yapıda yalıtım konferansı bildiriler kitabı.
- Çelik, M.H., Aruntaş, H.Y., Baran, Y., 2003. Seyitömer ve Çayırhan uçucu küllerinin portland çimentosu-uçucu kül (PÇ-UK) hamurunun priz başlama ve sonu sürelerine etkisi. Politeknik dergisi, 6 (1), 397-409.
- Çelik, Ö., 2004. Farklı inceliklerdeki tras ve uçucu külün çimento dayanımlarına etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10 (3), 333-337.
- Doğan, Ü. A., Özkul, M.H., 2009. Mineral katkılı betonlarda bileşiminin basınç dayanımı ve geçirimsizliğe etkisi. İtü dergisi, 8(6), 121-132.
- Erdoğan, S.T., Erdoğan, T.Y., 2007. Puzolanik mineral katkılar ve tarihi geçmişleri. 2.yapılarda kimyasal katkılar sempozyumu, 264-329.
- Erdoğan, S.T., Erdoğan, T.Y., 2007. Portland çimentosunun Joseph Aspdin tarafından icadı ve çimento üretiminde Aspdin ailesinin rolü. 1-7.
- Erdoğan, T. Y., 1995. Türkiyede üretilen çimentolar, özellikleri ve kullanımları. ODTÜ inşaat mühendisliği bölümü, Ankara.
- Gopalakrishnan, R., Govindarajan, D., 2011. Compressive strength and electron paramagnetic resonance studies on waste glass admixed cement. New journal of glass and ceramics, (1), 119-124.
- Holcim., 2004. Reference guide for process performance engineers. Holcim group support Ltd, 148 p, Switzerland.
- Kapkaç, F., 2013. Çimento çeşitleri, özellikleri, hammaddeleri ve üretim aşamaları. Maden tetkik ve arama genel müdürlüğü, Maden etüt ve arama dairesi başkanlığı, chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.mta.gov.tr%2Fv3.0%2Fsayfalar%2Fhizmetler%2Fkutuphane%2Fekonomi-bultenleri%2F2013_16%2F223.pdf&clen=431589&chunk=true (10.03.2021).
- Kaplan, H., Binici, H., 1995. Tras ve traslı çimentolar. Pamukkale üniversitesi, mühendislik fakültesi, mühensilik bilimleri dergisi, 1(2-3), 121-127.
- Kılınçkale, F.M., Akyazı, Ö., 2015. Çimento özelliklerinin çözünme ısisına etkisi. 9.ulusal beton kongresi, 111-120.
- Kırgız, M.S., 2008. Mineralojik katkılarının çeşitli tanımları, sınıfları, özellikleri ve kullanım alanları (bölüm1). Trakya Univ J Sci, 9(2), 118-127.

- Koca, K., 2013. Betonda kullanılan doğal mineral katkı malzemelerinin tane boyut dağılımının su ihtiyacı ve dayanım aktivite indeksi üzerindeki etkileri. Y. Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Koçak, Y., 2011. Termik santral atığı uçucu külün portland çimentosu özelliklerine etkisi. Politeknik dergisi, 14(2), 135-140.
- Koçak, Y., 2017. Süper akışkanlaştırıcı ve trasın çimento hidrasyonuna etkileri. Pamukkale üniversitesi mühendislik bilimleri dergisi, 23 (3), 184-192.
- Koçak, Y., Dorum, A., Yılmaz, B., Uçar, A., 2010. Trasın çimento yüzey özelliğine, hidrasyona, ve basınç dayanımına etkisi. E-journal of New World Sciences Academy, 5(1), 1-14.
- Kuleli, Ö., 2010. Çimento mühendisliği el kitabı. TÇMB Ar-ge enstitüsü, Ankara.
- Massazza, F., 1993. Pozzolan Cements. Elsevier Science Limited, England. 185-214.
- Ozman, Ş., 1985. Traslı çimento ile üretilen betonlara uygun ısıtma işlem çevriminin belirlenmesi. Y. Lisans, Karadeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Öztürk, A.U., 2007. Katkıların çimento hamuru hidrasyon ısısına etkileri. Dumlupınar üniversitesi Fen bilimleri enstitüsü dergisi, (14), 73-86.
- Özyıldırım, Ç., 2007. Hava sürükleyici katkıların beton dayanıklılığındaki yeri. 2. yapılar da kimyasal katkı sempozyumu, 38-52.
- Pekmezci, B.Y., Atahan, H.N., 2014. Kimyasal ve nano katkıları: betonda kullanımı ve beton performansına etkileri, Hazır beton kongresi, 69-82.
- Sağlık, A., Tunç, E., Kocabeyler, M.F., 2007. Kimyasal ve mineral katkıların kütle betonu tasarımında yeri ve önemi. 2. yapılar da kimyasal katkı sempozyumu, 278-297.
- Şimşek, Z., 2005. Yapı yeraltı kabuğunda su ve nem sorunlarının geçirimsiz malzeme ile giderilmesinin araştırılması. Y. Lisans Tezi, Uludağ üniversitesi Fen bilimleri enstitüsü, Bursa.
- Topçu, İ.B., Canbaz, M., 2001. Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri. Osmangazi üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 16(2), 12-23.
- TS EN 196-8. 2011. Çimento Deney Yöntemleri-Bölüm 8: Hidrasyon Isısı – Çözelti Yöntemi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1. 2012. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türkel, S., Alabaş, V., 2002. İki farklı çimento ile üretilen betonların basınç dayanımına değişik buhar kürrü uygulama sürelerinin etkileri. Uluslararası yapı ve deprem mühendisliği sempozyumu, Orta Doğu teknik üniversitesi Ankara, 445-453.
- Uğurlu, A., 2009. Boraks üretiminde ortaya çıkan atık malzemenin çimento içerisinde puzolanik malzemeler ile birlikte kullanılmasının çimento üzerindeki etkileri. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Uygunoğlu, T., Yıldız, A., Ünal, O., 2012. Farklı tipte mineral katkı içeren kendiliğinden yerleşen betonlarda harç fazının ısıtma performanslarının belirlenmesi, Afyonkarahisar.
- Yılmaz, Y., 2014. Beton üretiminde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılmasının etkileri ve maliyet analizi. Y. Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen bilimleri enstitüsü, Tekirdağ.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Beldehan ŞEKER
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu: .	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Sivas Lisesi, Fen Bilimleri Bölümü, Sivas
Lisans:	Cumhuriyet Üniversitesi, Kimya Mühendisliği, Sivas
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Kimya Mühendisliği, Erzurum
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Kimya Mühendisleri Odası	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	