

Portland Kalkerli Çimento Bölüm I - Çimentoların Hazırlanması

Kamile TOSUN*
Burak FELEKOĞLU**
Bülent BARADAN***
İ. Akın ALTUN****

ÖZ

Bu makale TÜBİTAK tarafından desteklenen “Portland Kalkerli Çimento Üretiminde Mekanik Performans ve Sülfat Kaynaklı Durabilite Problemleri Açısından Optimum Kalker Oranının Belirlenmesi” konulu proje bulgularının sunulduğu çalışmanın birinci bölümüdür. Bu bölümde, %5’den %40’a kadar değişen oranlarda kalker katkısı içeren çimentolar hazırlanmıştır. Çimentoların hazırlanmasında karşılaşılan sorunlar ve kalker ikamesinin hazırlanan harçların fiziksel ve mekanik özelliklerindeki meydana getirdiği değişiklikler araştırılmıştır. Kalker katkısı oranının artışıyla, tane boyut dağılımının daha geniş bir aralığa yayıldığı belirlenmiştir. Blaine değerinin artmasına rağmen, kalker oranı artışı ile incelik (32 µm elek üstü) değerinin de arttığı gözlenmiştir. Hazırlanan harçların kıvamında bir yapışkanlık ve sakızlanma meydana gelmiştir. Ayrıca, kalker miktarının artışıyla birim hacim ağırlıklarda azalma, su emme değerlerinde artma ve tüm yaşlardaki basınç dayanımında düşüş görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: kalkerli çimento, öğütme, incelik, basınç dayanımı

ABSTRACT

Portland Limestone Cement Part 1- Preparation of Cements

This paper is the first part of a research project which was supported by TUBITAK titled “Determination of Optimum Limestone Content in Portland Limestone Cement Production from the View Point of Mechanical Performance and Sulfate Originated Durability Problems”. In this stage, blended cements incorporating different amounts of limestone powders from 5% to 40% were prepared. The problems observed in the preparation stage of limestone blended cements and the effects of limestone replacement on the physical and mechanical properties were investigated. Increasing the limestone replacement ratio

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu’na 14.07.2008 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2009 gününe kadar tartışmaya açıktır.

- * Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - kamile.tosun@deu.edu.tr
- ** Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - burak.felegoglu@deu.edu.tr
- *** Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - bulent.baradan@deu.edu.tr
- **** Dokuz Eylül Üniversitesi, Malzeme ve Metalürji Müh. Bölümü, İzmir - akin.altun@deu.edu.tr

resulted in a wider particle size distribution. In contrast with the increases in Blaine values, fineness (residue at 32 µm) values of cements have also increased. Mortars had a sticky and cohesive consistency. Besides, by increasing the limestone content, unit weights decreased, water absorption values increased, and compressive strength values of mortars decreased at all ages.

Keywords: limestone cement, grinding, fineness, compressive strength

1. GİRİŞ

Katkılı çimentoların kullanımı, gerek sağladıkları ekonomik ve teknik avantajlar, gerekse klinker üretimini azaltarak CO₂ emisyonunu azaltmadaki dolaylı faydaları ile günümüzde tercih edilir duruma gelmiştir. Geçmişte çoğunlukla puzolanik özellik gösteren malzemeler bu amaçla kullanılırken, kalker katkısı çimentoda genellikle minör bileşen olarak ağırlıkça %5'lik kullanım oranı ile sınırlandırılmıştı. Ancak, asıl ilave bileşen olarak kalkerin kullanıldığı katkılı çimentoların üretimi son yıllarda EN 197-1 standardının yürürlüğe girmesi ile birlikte artmıştır. Ülkemizde de TS EN 197-1 standardına göre üretilen CEM II/A-L, CEM II/B-L sınıfı kalker katkılı çimentolar kullanılmaya başlanmıştır. Kalker katkısı aynı zamanda CEM II sınıfı Portland kompoze çimento üretiminde, ilave bileşen olarak da kullanılmaktadır. Kullanılan maddelerin kodlarının çimento isimlendirilmesinde belirtilmesi gerekmektedir. Örneğin CEM II/A-M (S-V-LL) 32.5 R, toplam olarak küttelece %6-20 arasında granüle yüksek fırın cürufu, silissi uçucu kül ve kalker (Toplam organik karbon miktarı %0.2'den az) içeren 32.5 dayanım sınıfında, yüksek erken dayanımlı Portland kompoze çimento olarak adlandırılmaktadır. Çizelge 1'de TS EN 197-1 standardına göre yapılan sınıflandırma görülmektedir [1]. Minör bileşenin de kalker olduğu düşünülürse standart en azından 32.5 sınıfının sağlanması halinde %40'a kadar kalker ikamesini kabul etmektedir (CEM II/B-L 32.5 N). Ancak yüksek kalker ikamelerinin bu çimento ile hazırlanan harç ve/veya betonun dayanıklılık özelliklerini nasıl etkileyeceği konusunda bilgi birikimi henüz oluşum aşamasındadır. Bu çalışma kapsamında da, incelenen klinkerin, % 0, 5, 10, 20 ve 40 oranlarında kalker ile ikame edilmesiyle üretilen kalker katkılı çimentolar ile hazırlanan harçların mekanik özellikleri ve sülfat etkisine karşı dayanıklılıkları araştırılmıştır. Böylece kalker katkılı çimentoların kullanım oranları için, dayanıklılık açısından bir üst sınırın ortaya konulması hedeflenmiştir.

TS EN 197-1 standardına göre katkılı çimento üretiminde kullanılacak kalkerin CaCO₃ oranı en az %75 olmalıdır. Kalkerin kil içeriği de %1.2'yi geçmemelidir. Kalker, hammadde safsızlıklarına göre bünyesinde organik karbon bulundurabilir. Çimento katkısı olarak kullanılacak kalkerde toplam organik karbon (TOC) miktarı TS EN 13639 standardına göre tespit edilmelidir. Çünkü organik karbon miktarının yüksek olması, beton üretimi sırasında kullanılacak hava sürükleyici katkı maddeleri ile olumsuz etkileşime girmesine neden olur. Organik karbon içeriği %0.5'i aşan kalker, çimento katkısı olarak kullanılamaz. TS EN 197-1 standardı kalker katkılı çimentoları, TOC değerinin en fazla %0.5 (L) ve %0.2 (LL) olduğu iki sınıfa ayırmıştır.

Çizelge 1. Kalker katkılı çimentoların TS EN 197-1 standardına göre sınıflandırılması

Çimento kodu	Kalker katkısı içeren çimento tipleri		Bileşim (kütlece % olarak)				
			Klinker	Yüksek fırın cürufu, silis dumanı, doğal puzolan, uçucu kül, pişmiş şist	Kalker		Minör ilave bileşen
					L	LL	
CEM II	Portland kalkerli çimento	CEM II/A-L	80-94	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	21-35	0-5
	Portland kompoze çimento	CEM II/A-M	80-94	← 6-20 →			0-5
		CEM II/B-M	65-79	← 21-35 →			0-5

1.1. Kalker katkılı çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri

Kalker katkılı çimentoların normal Portland çimentosundan farklı özelliklere sahip olması nedeniyle, fiziksel ve mekanik özelliklerin kalker katkısı ile nasıl değiştiğinin incelenmesinde yarar vardır. Bu kısımda, kalker katkısının öğütülebilirliğe, kıvam suyu ihtiyacı ve priz süresine, hacim sabitliğine, hidrasyon ısı ve basınç dayanımı gelişimine etkileri ile ilgili literatür özeti sunulacaktır.

1.1.1. Öğütülebilirlik

Kalker katkılı çimentolar hedeflenen dayanıma ulaşmak amacıyla çok yüksek Blaine değerlerine kadar öğütülmektedir. Ancak, incelik (32 mikron elek üstünde kalan miktar) ve Blaine değerleri kalker katkısının yüksek oranlarda kullanımında paralel gitmemektedir. Literatürde kalker katkısının, çimentonun Blaine değerini artırırken, tane boyut dağılımını daha geniş bir aralığa yaydığına dair bulgular mevcuttur [2,3,4]. Voglis vd. [3], kalker katkısının klinker ile birlikte öğütülerek kullanıldığı katkılı çimentolarla ilgili çalışmalarında, kalkerin öğütülebilirliğini, doğal puzolan ve uçucu kül katkılı (%15 ikame oranı) çimentolarla karşılaştırarak incelemiştir. Bu çimentolarla hazırlanan harçların hedef basınç dayanımı (28 günlük) sabit tutulup, gerekli Blaine değerleri ve öğütme süreleri karşılaştırılmıştır (Çizelge 2). Tek başına düşünüldüğünde en kolay öğütülebilen malzemeler sırasıyla kalker, uçucu kül, doğal puzolan ve son olarak da klinkerdir. Ancak, kalker katkılı çimentoların gerekli dayanıma ulaşması için hedeflenmesi gereken Blaine değeri en yüksek çıkmış ve öğütme süresi de en uzun olan katkı olarak bulunmuştur. Tek başına kolay öğütülen kalkerin kullanıldığı çimento, aynı dayanıma ulaşmak için daha yüksek öğütme enerjisine ihtiyaç duymaktadır [3].

Tsvivilis vd. [4]'de, kalker katkılı çimentoların farklı ikame oranlarında (% 10, 20, 30, 40) ve farklı öğütme sürelerinde (35, 50, 65, 85 dakika) öğütülebilirliklerini incelemiştir. Araştırmacılar, karışımdaki kalker katkısı oranının ve karışımın Blaine değerinin

Portland Kalkerli Çimento Bölüm I - Çimentoların Hazırlanması

artmasıyla, tane boyut dağılımının genişlediğini tespit etmiştir. Ancak, %40 kalker içeren çimentolarda, hem klinkerin hem de kalkerin öğütülebilirliğinin olumsuz etkilendiği ve %30'la kıyaslandığında kalker ve klinkerin daha düşük incelik değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 2. Kalker, doğal puzolan ve uçucu kül katkı (%15 ikame oranı) çimentoların öğütme parametreleri ve bu çimentolarla hazırlanan örneklerin basınç dayanımları

Çimento tipi	Kompozisyon		Öğütme süresi (dk)	Blaine değeri (m ² /kg)	28 günlük basınç dayanımı (MPa)
Portland çimentosu	%100 klinker	%5* alçıtaşı	41	303	40.3
Kalker katkıli çimento	%85 klinker + %15 kalker	%5* alçıtaşı	60	511	40.5
Doğal puzolan katkıli çimento	%85 klinker + %15 doğal puzolan	%5* alçıtaşı	52	418	41.2
Uçucu kül katkıli çimento	%85 klinker + %15 uçucu kül	%5* alçıtaşı	40	388	41.0

* Klinkerin ağırlıkça %'si

İnan Sezer [5], klinkerin % 0-6-21 ve 35 oranlarında kalker ikamesi ile birlikte öğütülerek hazırlanan çimentoların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Öğütme hedefi olarak, klinkerin Blaine değerinin 330 m²/kg olması için gereken süre belirlenmiştir. Diğer tüm katkıli çimentoları bu sürede öğütüp Blaine ve incelik (32-90 mikron elek üstü) değerlerini tespit etmiştir. Sabit öğütme süresinde kalker katkıli çimentoların Blaine değeri artarken, incelik değerlerinin de arttığı (elek üstünde kalan kaba malzemenin arttığı) rapor edilmiştir. Bu çimentolarla hazırlanan harçların basınç dayanımları da kalker oranı artışı ile düşmüştür. Sonuç olarak öğütme süresinin yetersiz kaldığı söylenebilir. Böylece, sadece Blaine değerine bakılarak kalker katkıli çimentolar için yorum yapmanın hataya yol açabileceği gösterilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise, ayrı ayrı öğütülen kalker ve klinkerin karıştırılmasıyla hazırlanan çimentoların göreceli performansının daha iyi olduğu ancak yine de dayanım sınıfı açısından kalker oranı artışı ile düşüş gözlemlendiği rapor edilmiştir.

Yukarıda sunulan araştırmalar, aslında kalker ikame oranının, öğütülebilirlik açısından da dikkate alınması zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır.

1.1.2. Kıvam suyu ihtiyacı ve priz süresi

Bilindiği üzere, kıvam suyu ihtiyacı ve priz süresi çimentolarda Vicat sondası ve iğnesi ile tespit edilmektedir. Teorik olarak, kalker katkıli çimento, normal Portland çimentosuna kıyasla hedef dayanıma ulaşmak için daha ince öğütüleceğinden yüzey alanı artacaktır. Buna bağlı olarak kıvam suyu ihtiyacının artması beklenir. Ancak, kalker oranı artışı ile kıvam suyu ihtiyacının azaldığını rapor eden araştırmacılar mevcuttur [2,3,4,5]. Örneğin, İnan Sezer [5], kıvam suyu ihtiyacının, kalker ve klinkerin birlikte öğütüldüğü durumda

azaldığını belirlemiştir. Çünkü, tüm çimentolar hazırlanırken öğütme süresi sabit tutulmuş ve kalker katkılı çimentoların Blaine değerleri artmasına rağmen, katkı içermeyen çimentoya kıyasla daha kaba kalmışlardır. Bu durum 32 ve 90 mikron elek üstleri incelendiğinde ortaya çıkmıştır. Ayrıca, çimento kompozisyonunun oluşturulmasında kullanılan alçıtaşı miktarı ve kalkerin mikroporozitesi ve morfolojik özellikleri de (öğütme sırasında oluşan yüzey pürüzlülüğü) kıvam suyu ihtiyacını etkileyebilir. Örneğin, Erdoğan [6], % 5-10-20 ve 30 kalker ikameli çimentoları sabit Blaine değerinde hazırlamıştır ve kıvam suyu ihtiyacının kalker ikamesi ile azaldığını rapor etmiştir. Kıvam suyundaki azalmanın nedenini, kalker tanelerinin öğütme sonrasındaki düzgün yüzeyine ve gözeneksizliklerine bağlamıştır. Ancak, özellikle yüksek kalker ikamelerinde ulaşılan dayanımların yetersiz kaldığını, kalker katkılı çimentoların daha ince öğütülmesi gerektiğini de vurgulamıştır.

Dhir vd. [7], %15-45 oranlarında kalker ikameli çimentoların özelliklerini inceledikleri çalışmada, Çizelge 3'deki sonuçları elde etmiştir. Kalker ikamesi ayrı öğütülüp sonradan karıştırma ile yapılmıştır. Penetrasyon derinliğinin 30 ± 5 mm'de sabit tutulması için gerekli kıvam suyunun %26-27 aralığında değiştiği belirlenmiştir.

Çizelge 3. Kalker ikame oranı ile fiziksel ve mekanik özelliklerin değişimi

Fiziksel ve mekanik özellikler		Kalker ikame oranı (ağırlıkça)				
		%0	%15	%25	%35	%45
Vicat sondası penetrasyonu (mm)		28	30	34	31	35
Kıvam suyu (%)		26.5	26.8	26.8	26.8	27
Priz başlangıcı (dk)		105	128	128	122	118
Hedeflenen dayanım sınıfı (MPa)		42.5	42.5	32.5	32.5	-
Basınç dayanımı (MPa)	2 gün	30.6	25.3	21.6	17.7	14.1
	7 gün	45.8	37.7	33.0	28.5	22.4
	28 gün	63.5	45.0	40.1	34.7	26.9
Hacim sabitliği (mm)		0.5	0.5	0.5	0.5	0

1.1.3. Hacim sabitliği

Kalker katkılı çimentolarda kalker ikame oranı arttıkça, Le Chatelier yöntemi ile belirlenen hacim sabitliğinde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir [2, 5, 7]. Ancak kalker katkılı çimentolarla hazırlanan harçların, kalker oranı artışı ile su emme oranlarının arttığı rapor edilmiştir. Açık boşluk oranı kalker oranı artışı ile artmakta ve emilen su, bir miktar geri dönüşümlü genleşmeye neden olmaktadır.

1.1.4. Hidratasyon ısısı

Kalker ikame oranı %5 olan çimentolarda hidratasyon ısısının, hidratasyonun ilk zamanlarındaki gelişimi sadece Portland çimentosu ile üretilen örneklerle karşılaştırıldığında daha hızlıdır.

Portland Kalkerli Çimento Bölüm I - Çimentoların Hazırlanması

Toplam hidrasyon ısısı açısından da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak daha yüksek ikame oranlarında, çimento miktarının azalması nedeniyle hidrasyon ısısı düşme eğilimindedir [6]. Belli bir kullanım oranına kadar, ince öğütülmüş kalker tanecikleri kalsiyum silika hidrat ve kalsiyum hidroksit oluşumu için çekirdek vazifesi görerek hidrasyonu hızlandırmaktadır. Ayrıca kalker katkısının hemikarbonat, monokarboalüminat ve kalsiyum trikarboalüminat oluşumunda rol oynayarak, hidrasyon ısısını, hidrasyonun erken aşamalarında arttırdığı rapor edilmiştir [8].

Son yıllarda yaygınlaşmakta olan Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) uygulamalarında, yüksek viskozite ve ayrışma direncinin sağlanmasında yüksek oranda kalker katkısı kullanımı, hem kalkerin ekonomik açıdan uygun olması hem de hamur fazında sağladığı reolojik özellikler açısından tercih edilmektedir [9]. Bu konuya yönelik araştırmalarında Poppe ve Schutter [10], 240 kg/m³ kalker katkısı içeren KYB'ler ile geleneksel yöntemlerle üretilen betonların, izotermal ve adyabatik yöntemler kullanarak hidrasyon ısılarındaki farklılıkları incelemiştir. Deneysel çalışmaları elde ettikleri verileri kullanarak bir modelleme yapmış ve yüksek oranda kalker katkısı kullanımının hidrasyon ısısında yükselme yarattığını tespit etmişlerdir. Ancak bu yükselmenin, KYB'nin geleneksel betona göre göreceli olarak çok daha düşük su/toz oranlarında üretilmesinden de kaynaklanabileceği düşünülebilir. Bu açıdan çalışma bulguları tartışmaya açıktır.

Bu konuda benzer araştırmalar yapan Bentz [11], kalker tozu katkısının çimento hidrasyonuna etkisini incelemiş ve CEMHYD3D programını kullanarak bazı bilgisayar simülasyonları ve modellemeler yapmıştır. Bu modellemelerde hidrasyon derecesi, mikro yapı ve dayanım gelişimi zamanın fonksiyonu olarak modellenmiştir. CEMHYD3D programı kalker katkısının etkileri dikkate alınarak revize edilmiştir. %20 oranına kadar kalker tozu ikamesinin çimento hidrasyonuna etkileri farklı su/çimento (S/Ç) oranları için incelendiğinde, özellikle S/Ç oranının kalker tozunun etkinliğini göstermesinde kritik olduğu saptanmıştır. S/Ç oranı 0.4'ün altındaki karışımlarda kalker katkısı hidrasyonu tetikleyici, hızlandırıcı etki gösterirken, yüksek S/Ç oranlarında etkinliğini kaybetmektedir.

Rahhal ve Tolero [8], ince öğütülmüş kalker ve kuvars tozunun, farklı kompozisyonlara sahip Portland çimentolarına ilave edilerek kullanılması halinde, erken yaşlarda hidrasyon mekanizmasını nasıl etkilediklerini incelemiştir. Bu amaçla kalorimetre, hidrolik aktivite (Fratini deneyi) ve XRD analizleri yapılmıştır. Her iki inert katkı ilavesinin de farklı çimento kompozisyonlarında şiddeti değişmekle beraber, hidrasyonu aktive edici veya yavaşlatıcı etki gösterdiklerini belirlemiştir. Deneylerde özellikle C₃A içeriği yüksek çimento kullanıldığında, her iki filler için de hidrasyon reaksiyonlarının hızlandığı, bu fillerlerin ilavesinin hidrasyon ürünlerinin daha hızlı oluşmasına imkan veren çekirdek noktalar olarak görev aldığı tespit edilmiştir. Ancak C₃A içeriği düşük çimentolarda ise, her iki filler ilavesinin de hidrasyonu geciktirdiği belirlenmiştir.

1.1.5. Basınç dayanımı

Kalkerin basınç dayanımına doğrudan bir katkısı bulunmamaktadır. Yalnızca dolgu yapıcı vazife görür. Puzolanik bir özelliğinin olmadığı kabul edilir [8]. Kalker katkısının %5 oranında kullanımı halinde hidrasyonu hızlandırıcı dolaylı etkisi ile erken dayanımı arttırabildiği bilinmektedir. Ancak daha yüksek oranda kullanımlarında basınç dayanımını düşürücü etkisi vardır [5-8].

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar kapsamında 4 farklı ikame oranı (%0-5-10-20-40) kullanılarak, birlikte öğütme yöntemi ile kalker katkılı çimentolar hazırlanmıştır. Hazırlanan çimentoların ayrıntılı incelik karakterizasyonları yapıldıktan sonra kalker katkısı kullanımının, çimento harcı kıvamına, mekanik performansına ve fiziksel özelliğine etkileri araştırılmıştır.

2.1. Gereç ve Yöntem

2.1.1. Çimento örneklerinin hazırlanması

Kalker katkılı çimentoların üretiminde bir çimento fabrikasından temin edilen klinkerler kullanılmıştır. Fabrikanın III nolu fırınından alındığı için klinkerler bu kod ile adlandırılmıştır. Klinkerin kimyasal analizleri (XRF) ve Bogue formülü kullanılarak hesaplanan teorik faz oranları Çizelge 4’de verilmiştir. Fırın soğutma sistemlerinin çıkışından alınan klinkerler öncelikle kırıcılardan geçirilerek öğütme öncesi kum boyutuna indirgenmiştir. Bu amaçla klinkerler önce çeneli kırıcıdan, ardından ise çift silindri kırıcıdan geçirilerek yaklaşık ince agrega (4mm altı) boyutuna getirilmiştir.

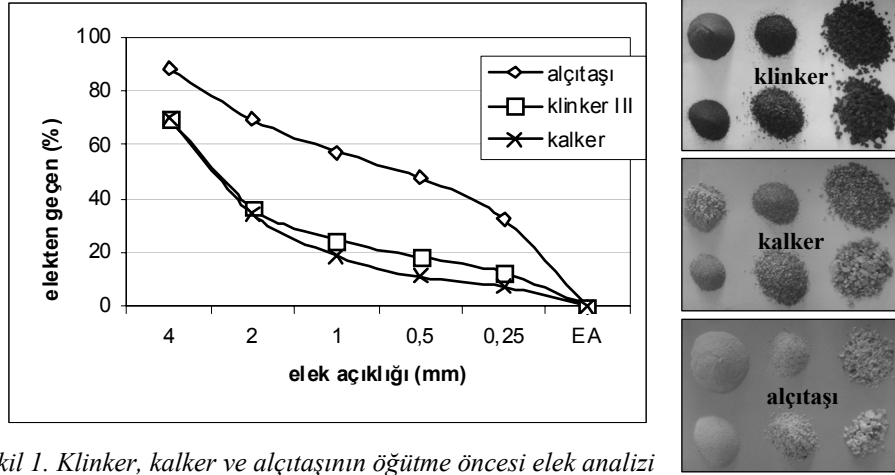
Çizelge 4. Klinkerlerin kimyasal analizleri (XRF) ve Bogue formülü kullanılarak hesaplanan teorik faz oranları

	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Cl	Na ₂ O	S.CaO	Ölç.	Eşd. alkali
III (%)	0.91	5.01	21.68	0.55	0.52	66.78	3.63	0.001	0.24	0.18	0.69	0.58

	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
III (%)	67.47	11.27	7.13	11.03

Klinkerlerin öğütülmeye hazır hale getirilmesinin ardından, kullanılacak kalker de önce kurutulmuş sonra kırıcılardan geçirilerek kum boyutuna getirilmiştir. Kullanılan kalkerin kimyasal kompozisyonu %55 CaO ve %43.6 kızdırma kaybından oluşmaktadır. Ayrıca toplamı %1’in altında olan MgO, K₂O, Fe₂O₃, SO₃, SiO₂ ve Al₂O₃ safsızlıklarına rastlanmıştır. Kullanılan kalkerin toplam organik karbon miktarı TS EN 13639 standardına göre yaptırılan kimyasal analiz sonucu %0.25 olarak belirlenmiştir. TS EN 197-1 standardına göre bu kalker ile üretilecek çimentoların isimlendirilmesinde L harfi kullanılmaktadır (L grubu: %0.5 ile %0.2 arası, LL grubu 0.2’den az). TS EN 197-1 standardına göre üretilen çimentoların CEM II/A-L (kalker ikame oranı %20’ye kadar) ve CEM II/B-L (kalker ikame oranı %20’nin üzerinde kadar) olarak adlandırılma ihtimali vardır. Ancak dayanım sınıfı, 32.5 ve 42.5 MPa değerlerini sağlama durumuna göre belirlenmiştir. İlerleyen aşamalarda, elde edilen dayanım değerleri sunularak sınıflandırma yapılacaktır.

Öğütme esnasında kullanılacak alçıtaşı da önce etüvde kurutulmuştur. Temin edilen alçıtaşı zaten önceden kırıcıdan geçirilmiş olduğu için aynı tane boyut dağılımında kullanılmıştır. Alçının SO₃ oranı %40’dır. Klinker, kalker ve alçıtaşının tane boyut dağılımları Şekil 1’de toplu olarak görülmektedir.



Şekil 1. Klinker, kalker ve alçıtaşının öğütme öncesi elek analizi

Çimentolar %0, %5, %10, %20 ve %40 oranlarında kalker katkısı kullanılarak hazırlanmıştır. Çimentoların hazırlanmasında laboratuvar tipi değirmen kullanılmıştır. Değirmende, farklı çaplarda (20, 30, 40, 50 ve 60 mm) toplam 66 kg bilya bulunmaktadır. Her karışım için 2.5 kg'lık 5 parti çimento hazırlanmıştır. Her çimento örneğine klinker ağırlığının %5'i oranında alçıtaşı ilavesi yapılmıştır.

Kalker katkısız ve %5 kalker ikameli çimentolar öğütülürken, 30 dakikalık öğütme süresi boyunca, Blaine ve 32 mikron incelik değerleri TS EN 196-6 standardına uygun şekilde eleme metoduyla ölçülmüştür. Böylece aynı sürede klinkerlerin öğütülme özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Blaine ölçümlerinde hücreye doldurulması gereken çimento miktarını tespit etmek için, hazırlanan çimentonun özgül ağırlığı, nitrojen piknometre cihazı ile ölçülmüştür. Blaine cihazının hücre hacmini dolduracak çimento miktarı tespit edilip ölçümler yapılmıştır. Ayrıca çimento örneklerinden ikişer gram alınıp 32 mikronluk elekten vakumla elenmiş, elek üstünde kalan çimento miktarı ölçülmüştür. Blaine değerleri ve 32 mikron elek üstü malzeme miktarları tespitinin yanı sıra parçacık boyut dağılımının kalker katkısı ile nasıl değiştiğini gözlemlemek amacıyla, Lazer difraksiyon dağılımı (LASER Diffraction Scattering-LDS) ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümler Malvern Mastersizer 2000 cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Parçacık tane boyut dağılımı 0.1 ile 800 mikron arasında, "eşdeğer çaplı parçacık" prensibiyle, hacimce tespit edilmiştir. Ayrıca her ölçümün kümülatif parçacık dağılım grafikleri de çizilmiştir. Elde edilen veriler "Bulgular ve Tartışma (3.2)" bölümünde sunulacaktır.

2.1.2. Çimento harcı örneklerinin hazırlanması, kıvam deneyleri ve deney programı

Hazırlanan beşer set çimento (%0, 5, 10, 20 ve 40 kalker ikameli) ile standart harç karışımları üretilmiştir. Harç karışımları TS EN 196-1 standardına göre, ağırlıkça kum/çimento/su oranı 3/1/0.5 olacak şekilde hazırlanmıştır. Her karışım üzerinde kalıba yerleştirilmeden önce ASTM C 230 standardına uygun bir sarsma tablası kullanılarak

kıvam deneyleri yapılmış ve yayılma çapları belirlenmiştir. Öncelikli olarak 56 günlük basınç dayanımı gelişimi ve uzun vadede farklı ortam koşullarında basınç dayanım değişimi için 50 mm küp formunda örnekler hazırlanmıştır. Ayrıca boy değişimi için her koşul için 2'şer adet 25x25x285 mm ayrıtlı prizmatik örnek, boy ölçümü için uçlarında pim yerleştirilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan tüm örnekler ilk 56 gün normal koşullarda bekletilmiştir. Bu bekleme esnasında örneklerin bir kısmı ile 1, 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca, kalker katkılı harç örneklerinin bazı fiziksel özellikleri de incelenmiştir. Suda 56 gün beklemenin ardından, kuru yüzey doygun birim hacim ağırlıkları, kalıp çıkışı ağırlıkları baz alınarak 56 günlük su emme oranları ve yine kalıp çıkışı boyları baz alınarak 56 gün suda bekleme nedeniyle meydana gelen boy değişimleri ölçülmüştür. Tüm bu fiziksel deneyler ile kalker katkısının çimento harcında nasıl bir değişiklik yarattığının gözlenmesi amaçlanmıştır.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Çimentoların öğütülmesi ile ilgili bulgular ve tartışma

Çimentolar bilyalı laboratuvar değirmenlerinde öğütülürken belirli sürelerde öğütücü durdurulmuş ve örnek alınarak Blaine ve 32 mikron incelik değerleri belirlenmiştir. Böylece, hazırlanan çimentoların ulaşacağı incelik, zamana bağlı olarak takip edilmiştir. Kalker katkısı içermeyen ve %5 kalker katkılı çimentoların deney sonuçları Çizelge 5 ve 6'da sunulmuştur. Öğütme ile Blaine değeri artmakta ve 32 mikron incelik değeri azalmaktadır. Ancak %10'luk karışımlar öğütülürken, yapılan incelik deneylerinde öğütme süresinin artırılmasına rağmen, 32 mikron elek bakiyesi oranının azalmadığı gözlenmiştir. Yüksek oranda kalker katkısı kullanılarak hazırlanan çimentolarda Blaine değerinin artmasına rağmen, incelik değerinin (32 mikron elek bakiyesi) de arttığı Çizelge 7'den açıkça görülmektedir. İncelik deneyi yapılırken 32 mikron elek üzerinde kalan kaba kısım incelendiğinde, klinkerlerin ufalanırken kalker taneciklerinin iri olarak kaldığı gözlenmiştir (Şekil 2). Kalker oranı arttıkça sözü edilen durum daha da belirgin bir hale gelmiştir. Blaine değerinin artışına rağmen, 32 mikron elek bakiyesinin de artması önceleri şaşırtıcı bir sonuç olarak değerlendirilmiştir. Bu farklılık klinkerlerin daha iyi öğütüldüğünün, ancak kalker taneciklerinin iri olarak kaldığının bir göstergesidir. Daha geniş açıklıklı eleklerle yapılan ölçümlerde de benzer durum gözlenmiştir. Örneğin, %40 kalker katkılı karışımın öğütme sonrası 500 mikron üzeri %2.5 ve 250 mikron üzeri ise %10 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5. Kontrol çimentolarının öğütme süresine bağlı olarak Blaine ve incelik değerlerinin değişimi

süre	III-K	
	Blaine (m ² /kg)	32 mikron incelik (%)
18 dakika	241	37
25 dakika	317	22
30 dakika	358	19

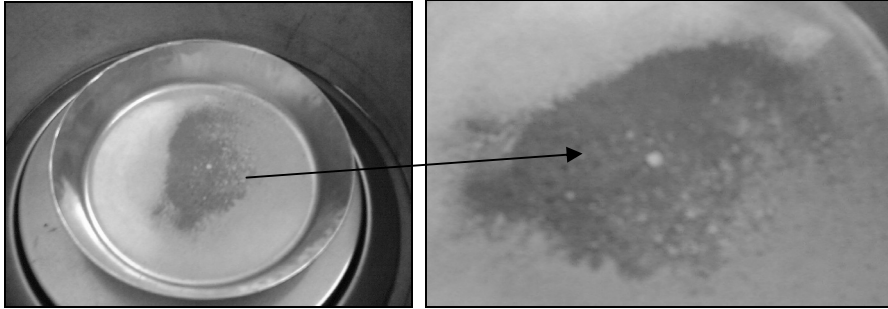
Portland Kalkerli Çimento Bölüm I - Çimentoların Hazırlanması

Çizelge 6. Kalker katkısı oranı %5 olan çimentoların öğütme süresine bağlı olarak Blaine ve incelik değerlerinin değişimi

süre	III-%5	
	Blaine (m ² /kg)	32 mikron incelik (%)
18 dakika	240	36
25 dakika	355	24
30 dakika	399	21
33 dakika	442	21

Çizelge 7. Değirmen çıkışı (elenmemiş) Blaine ve incelik değerleri

Öğütme süresi	Çimento	Blaine (m ² /kg)	32 mikron incelik (%)
36 dakika	III-%10	432	30
40 dakika	III-%20	466	37
45 dakika	III-%40	494	40



Şekil 2. Klinkerler öğütülürken kalker ve klinker taneciklerinin 32 mikron elek üstünde iri olarak kalması.

Genel olarak kalker taneleri klinker tanelerine göre daha yumuşaktır. Ancak bu yumuşaklığın kalkerin kolay öğütülebilmesini sağlayabilmesi için kalkerin tam kuru olması gereklidir. Bu çalışmada kırıcıdan geçirilip kum boyutuna indirgenen kalker tanelerinin etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulmasına rağmen, öğütme esnasında değirmen çeperlerine ve öğütücü bilya yüzeylerine yapıştığı gözlenmiştir (Şekil 3). Sözü edilen yapışmaya kalker bünyesinde bulunan ve etüvde 100°C sıcaklıkta kurutmaya bünyeden ayrılmayan higroskopik su neden olmaktadır. Öğütmenin başlangıç aşamalarında hem kalker hem de klinker taneleri incelmektedir. İleriki aşamalarda, kalker tanelerinin bünyesindeki higroskopik su, öğütme esnasında kalkerin ufalanması ile ortaya çıkarak kalker tanelerini, değirmen çeperine ve bilyalara yapıştırmaktadır. Kalker tanelerinin bilya üzerine ve çeperlere yapışması bilyanın ve çeperin yüzeylerinde yumuşak tabakalar

Kamile TOSUN, Burak FELEKOĞLU, Bülent BARADAN, İ. Akın ALTUN

oluşturmaktadır. Bu yumuşak tabakalar bilya çarpması ile kalker tanelerinde meydana gelmesi beklenen kırılma ve öğütülme verimini düşürmektedir.

Bazı kalker türlerinde higroskopik su bulunabilmekte ve bu durum kalkerin çimento ile birlikte öğütülmesinde sorunlara yol açabilmektedir. Literatürde bu konuda farklı özellikte kalker tiplerinin incelendiği bir doktora tezi bulunmaktadır [6]. Bu tez kapsamında incelenen kalker tiplerinden higroskopik su içeren kalker ile çimentolar üretilmiştir. Çimento üretiminde kalker kullanılması durumunda, benzer öğütme problemleriyle karşılaşmıştır.



Şekil 3. Kalker ikame oranı %10 ve üzerinde olan çimentoların öğütüldüğü değirmende bilya yüzeylerinin kalkerle kaplanması

Bir başka tez çalışmasında da kalker katkılı çimentoların öğütülmesinde Blaine değeri artmasına rağmen, 32 mikron elek üstü değerlerinin de arttığı belirlenmiştir [5]. Ancak bu çalışmada kalkerin değil klinkerin iri kaldığı gözlenmiştir. Bu durum söz konusu çalışmada kullanılan kalkerin higroskopik su barındırmamasından kaynaklanmış olabilir. Belki de, böylece kolay öğütülen kalker, yapışma yapmadan incelerek elekten geçebilmektedir.

Portland Kalkerli Çimento Bölüm I - Çimentoların Hazırlanması

Yukarıda sözü edilen ve literatürde de benzerlerine rastlanan durum, laboratuvar koşullarında küçük değirmenlerde üretilen kalker katkıli çimentolarda ortaya çıkabilir. Ancak, gerçek boyutlu değirmenlerde, değirmen içi sıcaklık 100°C'nin üzerine çıktığından öğütme esnasında bu higroskopik su buharlaşmakta ve laboratuvar değirmeninde gözlenen etkiyi yaratmamaktadır. Böylece kalker ve klinker öğütülmesinde higroskopik suyun etkisi azalmaktadır. Buna karşılık laboratuvar değirmeninde higroskopik suyun buharlaşması için gerekli sıcaklıklara ulaşılamamaktadır.

Ayrıca, gerçek boyutlu değirmende üretilen çimentolar değirmen çıkışında seperatörlerden geçirilmekte ve çimentoya öğütülmemiş klinker ve/veya kalker karışması engellenmektedir. Laboratuvar değirmenlerinde ise böyle bir filtreleme sistemi yoktur. Bu çalışma kapsamında hazırlanan çimentoların da uygulamada kullanılan çimentolara benzemesi açısından %10 ve üzerinde kalker katkısı içeren karışımların tümü önce değirmende öğütülmüş ardından 250 mikron elekten elenmişlerdir. Böylece seperatörün yaptığı ayıklama işlemi bir bakıma yapay olarak gerçekleştirilmiştir. Ayıklanan iri tanecikler daha küçük bir bilyalı değirmende tekrar öğütülüp 250 mikron altına indirilmiş ve çimento karışımına ilave edilmiştir. Hazırlanan 5 parti çimento homojenizatörde karıştırıldıktan sonra çimentoların incelik (32 ve 90 mikron) ve Blaine değerleri tekrar belirlenmiştir. Çimento karışımlarının son hallerinin (elekten yeniden elenmiş) fiziksel özellikleri Çizelge 8'de verilmiştir. Dikkat edileceği üzere, %10-20 ve 40 oranlarında kalker kullanılan karışımların ilk incelik ve Blaine değerleri Çizelge 8'de bir miktar değişmektedir (Çizelge 7'ye göre). Zira iri kalker tanecikleri elenip öğütülüp homojenizatörde karıştırılarak sisteme yeniden dahil edilmiştir. Uygulamada da kalker bu şekilde öğütülmemekte, ancak seperatörlerde tutulan bu iri parçacıklar tekrar öğütücüye gönderildiğinden herhangi bir soruna yol açmamaktadır. Eleme, öğütme ve yeniden karıştırma işlemleri yapılmasına rağmen, 32 ve 90 mikron elek üstünde kalan tane miktarları kalker kullanım oranı ile artmaktadır. Sonuç olarak, sadece klinker ve alçıtaşı içeren çimentoya kıyasla %10 ve üzeri kalker katkıli çimentoların öğütülebilirlikleri, bu çalışmada kullanılan kalkerden (bünyesindeki higroskopik su nedeniyle) olumsuz etkilenmiştir. Üstelik kalker katkıli çimentolarda, gerekli öğütme süreleri de artış göstermiştir.

Çizelge 8. Elek üstünde kalan kısmın bilyalı değirmende öğütülüp tekrar karışıma ilave edilmesi ile elde edilen çimentoların fiziksel özellikleri

Çimento kodu	2.5 kg'lık değirmen şarjı için malzeme miktarları (g)			Öğütme süresi (dk)	Özgül ağırlık	İncelik 90 mikron üstü (%)	İncelik 32 mikron üstü (%)	Blaine değeri (m ² /kg)
	Klinker	Alçıtaşı	Kalker					
III-K	2375	125	-	30	3.12	0	19	358
III-%5	2255	120	125	33	3.10	1	21	442
III-%10	2135	115	250	36	3.06	1,5	26	452
III-%20	1900	100	500	40	3.02	4	31	465
III-%40	1425	75	1000	45	2.94	9	36	505

Özetle bazı teknik yayınlara ters gibi görünen kalker katkılı çimentoların öğütüldükçe Blaine değerinin artmasına rağmen 32 mikron elek üzerinde iri kalker taneciklerinin kalması;

- bu çalışmada kullanılan kalkerin bünyesinde higroskopik su barındırmasına, söz konusu su nedeniyle kalkerin değirmen çeperi ve bilyalara yapışarak öğütme performansını azaltmasına,
- laboratuvar değirmeni koşulları ile gerçek değirmen koşulları arasındaki farklılığın (değirmen içi sıcaklık ve filtreleme farklılığı) higroskopik suyun buharlaşmamasından ve öğütülemeyen iri taneciklerin çimentodan ayrıştırılmasına bağlanabilir.

3.2. Çimentoların parçacık boyut dağılımları ve çimento harcı kıvamı ile ilişkisi

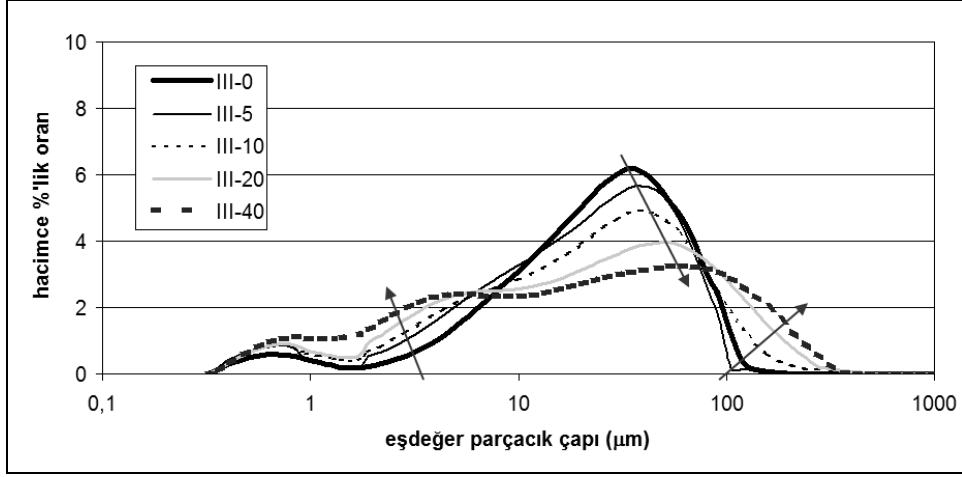
Çimentoların Blaine ve incelik değerlerinin, özellikle %10'dan yüksek kalker ikameli çimentolarda, çelişkili sonuçlar vermesi nedeniyle tüm çimentoların tane boyut dağılımları da Bölüm 2.1.1 açıklanan yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Hazırlanan çimentoların parçacık boyut dağılımı grafikleri Şekil 4'de sunulmuştur.

Şekil 4a'da her eşdeğer parçacık çapındaki taneciklerin hacimce % bulunma oranları görülmektedir. Kalker katkısı ile parçacık boyut dağılımı daha geniş bir aralığa yayılmaktadır. Hem daha iri taneciklerin hacimce oranı, hem de daha ince taneciklerin hacimce oranı artmakta, dağılım fonksiyonunun tepe kısmı basıklaşarak genişlemektedir. Aynı zamanda hacimce en fazla miktarda malzeme bulunan eşdeğer tanecik çapı (fonksiyonun tepe noktası) kalker katkısı ikamesi ile artmaktadır. Tüm bu gözlemler kalker katkısı ilavesi ile hem bazı taneciklerin ufalandığını, hem de bazı taneciklerin ufalanamayarak iri olarak kaldıklarını göstermektedir. Blaine deneyinde, taneciklerin etrafından geçen havanın hızı ölçülmektedir. Çok ince tanecikler de sistemde var olduğundan havanın geçiş hızı (az miktarda iri tane sistemde var olsa bile) azalmaktadır. Böylece Blaine değerleri kalker katkısı ile önemli derecede artmaktadır. Ancak parçacık boyut dağılımı aslında iri tanelerin de sistemde kaldığını ispatlamaktadır. Bu açıdan kalker katkılı çimentoların inceliğinin belirlenmesinde Blaine deneyinin tek başına güvenilir olmadığı söylenebilir. Şekil 4b'de hacimce kümülatif oranlar görülmektedir. Yalnızca klinker ve alçıtaşı ile üretilen çimentolarda 100 mikrondan büyük tane çaplı malzeme hacmi sıfıra yakinken, kalker katkısı ilavesi ile üretilen çimentolarda 100 mikrondan büyük tane çaplı malzeme miktarı artış göstermektedir. Öte yandan 5 mikrondan küçük tane çaplı malzeme miktarı da kalker ikamesi ile artmaktadır. Bu konuda yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde, kalker katkısı ikamesi ile tane boyut dağılımının genişlediği sonucunun başka araştırmacılar tarafından da desteklendiği görülmüştür [3, 8].

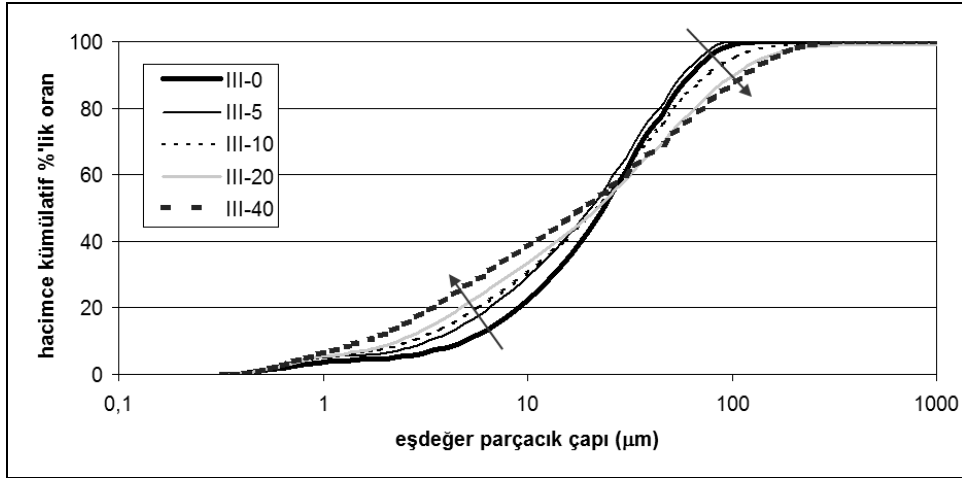
Kalker katkılı çimentoların tane boyut dağılımlarında gözlenen farklılığın, taze harç kıvamına nasıl yansıtılmasının incelenmesi amacıyla, Bölüm 2.1.2'de verilen karışım oranları ile hazırlanan çimentolar kullanılarak harç karışımları hazırlanmıştır. Bu karışımların yayılma çapları tespit edilmiştir. Sabit su/çimento oranına sahip çimento harçlarının yayılma çapları 124-127 mm aralığında olup, Çizelge 9'da değerler verilmiştir. Karışım suyu sabit tutulduğu için kıvamdaki değişiklikler doğrudan kalker ikamesi ile ilişkilendirilebilir. Kalker ikame oranı değişiminin yayılma çapında önemli bir farklılık yaratmadığı, ancak harçta bir yapışkanlık ve sakızlanma meydana getirdiği gözlenmiştir.

Portland Kalkerli Çimento Bölüm I - Çimentoların Hazırlanması

Yayılma deneyi sonrasında, harçların formunda da farklılıklar meydana gelmiştir. Şekil 5'de kalker ikamesi artışı sonucu, yayılma çapında nasıl bir görsel değişim olduğu görülmektedir. Yayılma çapı ile ölçülemeyen bu değişiklik aslında, çimento harcının plastik viskozitesinin arttığının bir göstergesidir.



(a)



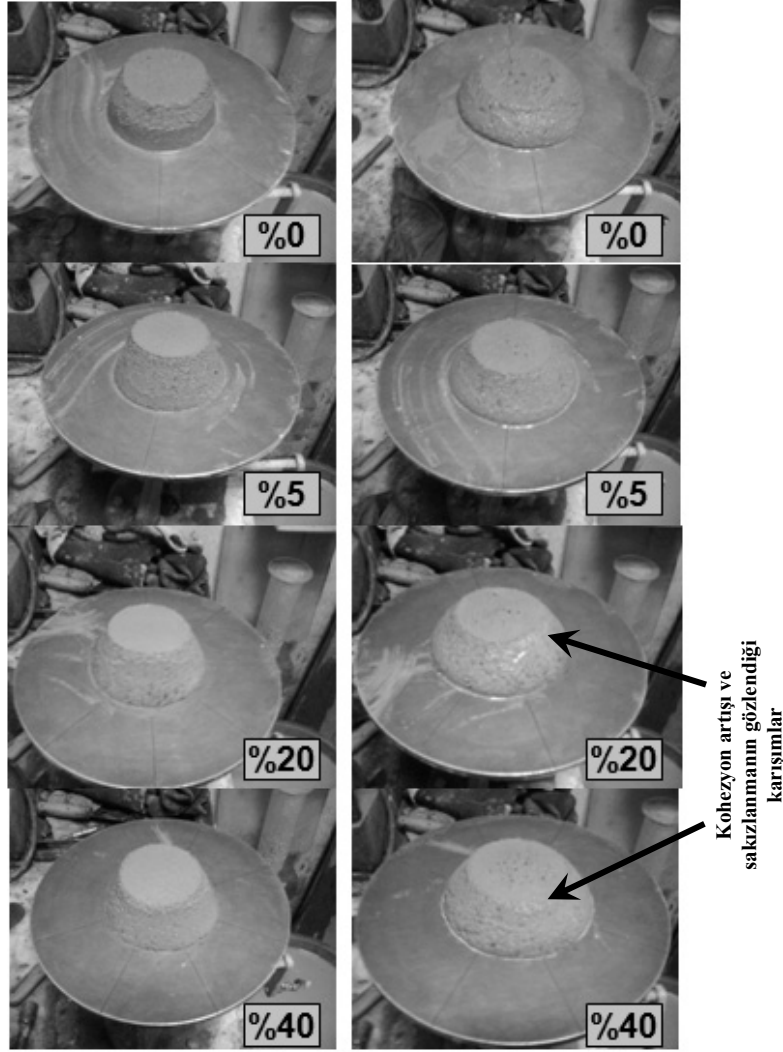
(b)

Şekil 4. Kalker katkısı ikamesinin çimentonun parçacık boyut dağılımına etkisi. a) hacimce ve b) kümülatif hacimce, eşdeğer parçacık boyut çapı dağılımı grafikleri

(Grafik göstergesinde III-0 kalker içermeyen ve III no'lu klinker ile hazırlanan çimentonun parçacık boyut dağılımını göstermektedir. Kalker katkılı çimentolarda ise ikame edilen kalker oranları verilmiştir.)

Çizelge 9. Harç karışımlarının yayılma çapları

Kalker ikame oranı	%0	%5	%10	%20	%40
Yayılma çapı (mm)	125	124	125	125	125
%0'a göre kıvamla ilgili farklılık	-	yumuşama	sakızlanma	sakızlanma	sakızlanma



Şekil 5. Kalker katkısı ikamesinin çimento harçlarının kıvam özelliklerine etkisi

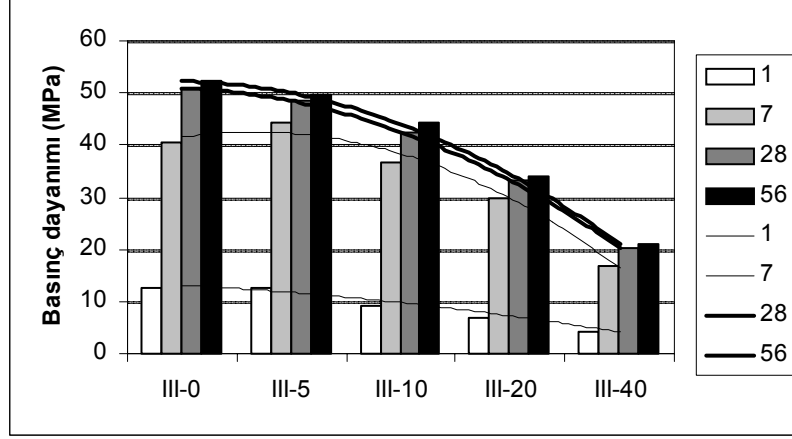
(Soldaki fotoğraflar sarsma öncesi, sağdaki fotoğraflar ise sarsma sonrasında çekilmiştir. Fotoğrafların sağ alt köşelerinde taze harçların kalker ikame oranları bulunmaktadır.)

Portland Kalkerli Çimento Bölüm I - Çimentoların Hazırlanması

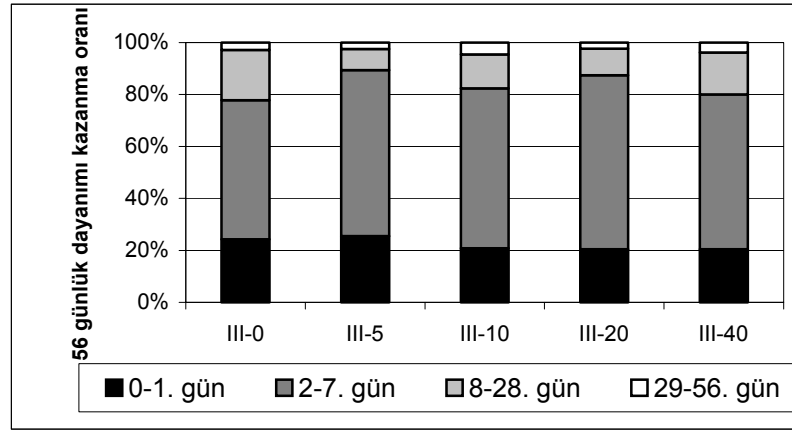
Yukarıda özetlenen veriler, parçacık boyut dağılımı ölçümleri ile kıvam özellikleri arasında bir ilişki olduğunu göstermektedir. Parçacık boyut dağılımı kalker ikamesi artışı ile genişlemekte, parçacık sistemindeki hem ince hem de kaba parçacıkların oranı artarken, ortalama boyuttaki parçacık oranı azalmaktadır. Bu durum yüzey alanı artışına neden olduğu için aynı kıvam suyuna sahip harçların kohezyonu kalker ikamesi ile artmaktadır. Yayılma çapı deneyi tek başına kohezyonu ölçmekte yetersiz kaldığı için farkın deney yayılma çapı ölçümleri ile anlaşılması mümkün olamamaktadır. Ancak meydana gelen kıvam değişikliği harcın kalıba yerleştirilmesi ve sıkıştırılması sırasında kendini belli etmektedir. Uygulamada sözü edilen kıvam farklılığı, kalker katkılı çimento kullanılarak hazırlanan betonlarda belirli bir işlenebilirlik derecesi için gerekli su ihtiyacını arttırabilir. Çünkü yapışkan kıvamlı bir betonun işlenmesi pratikte daha güç olabilmektedir. Öte yandan günümüzde beton üretiminin vazgeçilmez bileşeni olan akışkanlaştırıcı katkıların da kalker katkılı çimentolarla zaman zaman uyumsuzluk sorunu yaşatabildiği dikkate alınmalı, ön denemelerle işlenebilirlik uyumu kontrol edilmelidir.

3.3. Kalker ikamesinin çimento harcı basınç dayanımı gelişimine etkisi

Kalker ikame oranı artışı ile basınç dayanımı gelişimindeki değişimler Şekil 6a'da verilmiştir. Kalker katkısının basınç dayanımına etkisi, %5 oranında ikame için önemli bir farklılık göstermemektedir. Hatta erken yaşlarda %5 kalker katkılı örneklerin basınç dayanımı bir miktar daha yüksektir. Ancak ikame oranı arttıkça tüm yaşlarda dayanımda azalma olduğu görülmektedir. Basınç dayanımının farklı zaman aralıklarında ne oranda kazanıldığını gösteren çubuk diyagramlar Şekil 6b'de verilmiştir. Kalker ikame oranı %5 olan örneklerde erken yaşta dayanım kazanma oranının bir miktar yükseldiği söylenebilir. Erken dayanım artışının nedeni düşük konsantrasyondaki CaCO₃ taneciklerinin hidrasyonun ilk aşamalarında CH kristalleri için çekirdek oluşturmasına ve CSH oluşumunu hızlandırmasına bağlanmaktadır [8]. Aynı zamanda karboalüminat fazları gibi yeni hidrasyon ürünleri oluşturarak boşluk oranını azaltmakta ve bu yolla dayanıma katkı sağlamaktadır [6]. Uzun vadede ise (28-56. günler arası), kalker ikamesi ile dayanımda hemen hemen hiç artış gözlenmemiştir. Bu sonuç literatürde de sözü edildiği gibi, kalkerin puzolanik özelliği olmadığını ispatlamaktadır [8]. Kalker ikame oranı %5 ve %10 olan katkılı çimentoların 28 günlük basınç dayanımları 42.5 MPa'nın üzerindedir. Bu çimentolar 50 mm ayrıtlı küp ile 40 mm ayrıtlı küp değerlerinin birbirine yakın olduğu kabulü ile CEM II/A-L 42.5 sınıfı olarak kabul edilebilir. Kalker ikame oranı %20 olan çimento ise CEM II/B-L 32.5 sınıfına girmektedir. En yüksek kalker ikameli çimentolarda ise dayanım sınıfı açısından standartların öngördüğü değerlere ulaşamamıştır. Ancak, harç çimentosu olarak kullanılabilecek dayanıma sahip bu çimento da karşılaştırmalarda kullanmak amacıyla deney programına dahil edilmiştir.



(a)



(b)

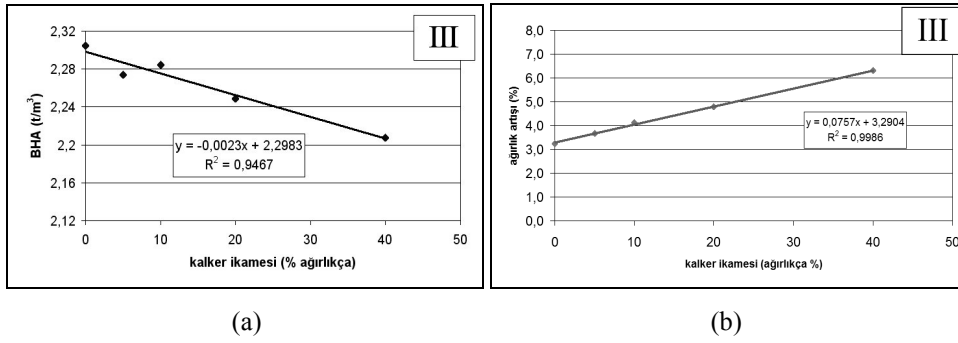
Şekil 6. Harç örneklerinde kalker ikamesine bağlı olarak; a) zamana bağlı dayanım artışı, b) farklı zaman aralıklarında dayanım kazanma oranları

3.4. Kalker ikamesinin çimento harcının birim hacim ağırlık ve su emme özelliklerine etkisi

Kalker ikamesinin çimento harçlarının birim hacim ağırlığına etkisini incelemek amacıyla, 50 mm ayrıtlı küp formundaki örnekler kullanılmıştır. Bu örnekler 56 gün su küründen sonra yüzeyleri kurutularak tartılmış ve ağırlıkları teorik hacimlerine bölünerek kuru yüzey doygun (KYD) birim hacim ağırlıkları (BHA) belirlenmiştir. Bu yöntem, örneklerin perdah yüzeylerindeki pürüzlülükler ve yükseklik farklılıkları ihmal edildiği için standart bir yöntem olmayıp, birim hacim ağırlık değişimi hakkında fikir vermesi amacıyla kullanılmıştır. Kuru yüzey doygun BHA değerlerinin kalker ikame oranı ile değişimi Şekil

Portland Kalkerli Çimento Bölüm I - Çimentoların Hazırlanması

7a'da görülmektedir. Her nokta 12 örneğin ortalaması kullanılarak elde edilmiştir. BHA değerlerinde %40 kalker ikamesi ile hazırlanan örnekler için yaklaşık olarak 100 kg/m^3 'lük bir azalma olduğu görülmektedir. Birim hacim ağırlıklardaki azalma, basınç dayanımı düşüşlerini de beraberinde getirmiştir. Su emme miktarlarının tespiti amacıyla, kuru yüzey doygun BHA değerleri 56. günde belirlenen örneklerin etüvde kurutulularak ağırlıkları ölçülmüştür. Kalıp çıkışı ağırlıklarına göre, ne kadar su emdikleri belirlenmiştir. Şekil 7b'da her nokta için ölçümü yapılan 12'şer örneğin ortalama su emme değerleri verilmiştir. Kalker ikame oranı artışı ile her iki klinkerle hazırlanan örneklerde de su emme değerleri artmaktadır. Kalker ikame oranı %40 olan örneklerde su emme miktarı iki kat artmıştır. Elde edilen deney sonuçları kalker katkılı harçlarda açık boşluk oranının yükseldiğini ve dış ortamdan harca su girişinin kolaylaştığını göstermektedir. Bu kapsamda, kalker katkılı harçların dayanıklılık özellikleri açısından, su emme potansiyellerinin belirlenmesi oldukça önemlidir [7]. Kalker katkısı ile artan su emme özelliği, çimento harcının durabilite açısından zayıfladığını göstermektedir.



Şekil 7. Kalker ikamesinin çimento harçlarının fiziksel özelliklerine etkisi,
a) birim hacim ağırlık, b) su emme

4. SONUÇLAR

İki bölümden oluşan bu makalenin ilk bölümünde %5'den %40'a kadar değişen oranlarda kalker katkılı çimentolar hazırlanmıştır. Kalker katkılı çimentoların öğütülmesinde karşılaşılan sorunlar tartışılmış, elde edilen katkılı çimentolarda kalker ikamesinin fiziksel ve mekanik özelliklerde meydana getirdiği değişiklikler araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Kalker ikamesi ile %10 ve üzeri ikame oranlarında pratikte öğütülebilirlik sorunları yaşanmaktadır. Bu durum kalkerdeki higroskopik suyun öğütme esnasında açığa çıkmasından ve kalkerin bilyalara yapışmasından kaynaklanmaktadır.
- Kalker ikamesi ile hazırlanan çimentoların tane boyut dağılımında değişiklik meydana gelmektedir. Meydana gelen değişiklik tek başına Blaine yöntemi veya 32 mikron üstü malzeme miktarı kullanılarak anlaşılabilir. Tane boyut dağılımlarının lazer difraksiyon yöntemleri ile belirlenmesi daha uygun olacaktır. Kalker katkılı

çimentoların tane boyut dağılımları, kalker katkısız çimentoya kıyasla daha geniş bir aralığa yayılmaktadır. Bu durum hem ince hem de kaba tanecik yoğunluğunun arttığını göstermektedir.

- Kalker katkılı çimentolarla hazırlanan harçların kıvam özellikleri farklılık göstermekte, daha kohezif, yapışkan bir harç elde edilmektedir. Klasik işlenebilirlik ölçüm yöntemleri ile ayırt edilemeyen bu değişiklik kalkerin çimento tane boyut dağılımında yarattığı değişiklikten kaynaklanmaktadır.
- Çimento harçlarının birim hacim ağırlıkları, kalker ikamesi ile azalmakta, aynı zamanda su emme değerleri de artış göstermektedir. Tüm bu veriler kalker ikamesi ile çimento harçlarının açık boşluk oranının arttığını göstermektedir. Bu durum, çimento harçlarının kalker ikamesi ile dayanıklılık açısından olumsuz etkileneceğinin göstergesidir.
- Çimento harçlarının basınç dayanımı gelişimleri incelendiğinde, kalker ikame oranı %5'in üzerindeki tüm karışımlarda, kalker ikamesinin dayanım kaybına yol açtığı görülmektedir. Kalker ikame oranı %5 olan örneklerde, erken dayanımda kontrol harcına kıyasla bir miktar dayanım artışı söz konusudur. Bu dayanım artışı kalker taneciklerinin kalsiyum hidroksit çökmesi için çekirdek oluşturarak hidrasyon gelişimini etkilemesine bağlanabilir. Yalnızca dayanım açısından düşünüldüğünde en uygun kalker ikame oranı %5-10 olarak görülmektedir. Ancak; çimento inceliği, klinker-kalker uyumu ve kalkerdeki higroskopik su vb. diğer etkenler, kalker katkılı çimento üretimi için en uygun kalker ikame oranını değiştirebilir.

Teşekkür

Yazarlar, "Portland Kalkerli Çimento Üretiminde Mekanik Performans ve Sülfat Kaynaklı Durabilite Problemleri Açısından Optimum Kalker Oranının Belirlenmesi" konulu projeyi (MAG-1041083) destekleyen TÜBİTAK'a ve ayrıca projenin sanayi ortakları olan İzmir ÇİMENTAŞ Türk A.Ş. ve ÇİMBETON A.Ş.'ye projeye verdikleri malzeme ve deneysel çalışma altyapısı desteği nedeniyle teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

- [1] Yeğinoğlu, A., Ertün, T., Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar. TÇMB Ar-Ge Enstitüsü, Ankara, 2004.
- [2] Tsivilis, S., Chaniotakis, E., Badogiannis, E., Pahoulas, G., Ilias, A., A Study on The Parameters Affecting The Properties of Portland Limestone Cements. Cement and Concrete Composites, 21, 107-116, 1999.
- [3] Voglis, N., Kakali, G., Chaniotakis, E., Tsivilis, S., Portland-Limestone Cements. Their Properties and Hydration Compared to Those of Other Composite Cements. Cement and Concrete Composites, 27, 191-196, 2005.
- [4] Tsivilis, S., Chaniotakis, E., Kakali, G., Batis, G., An Analysis of Properties of Portland Limestone Cements and Concrete. Cement and Concrete Composites, 24, 371-378, 2002.

Portland Kalkerli Çimento Bölüm I - Çimentoların Hazırlanması

- [5] İnan Sezer, G., Kalker ve Klinker Özelliklerinin Kalkerli Çimento Özelliklerine Etkisi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2007.
- [6] Erdoğan, K., Hydration Properties of Limestone Incorporated Cementitious Systems. PhD. Thesis, METU, Civil Engineering Department, Ankara, 2002.
- [7] Dhir, R.K., Limbachiya, M.C., McCarthy, M.J., Chaipanich, A., Evaluation of Portland Limestone Cements for Use in Concrete Construction. *Materials and Structures*, 40, 459–473, 2007.
- [8] Rahhal, V., Tolero, R., Early Hydration of Portland Cement with Crystalline Mineral Additions. *Cement and Concrete Research*, 35, 1285-1291, 2005.
- [9] Yahia, A., Tanimura, M., Shimoyama, Y., Rheological Properties of Highly Flowable Mortar Containing Limestone Filler-Effect of Powder Content and W/C Ratio. *Cement and Concrete Research*, 35, 532-539, 2005.
- [10] Poppe, A.M., Schutter, G.D., Cement Hydration in The Presence of High Filler Contents. *Cement and Concrete Research*, 35, 2290-2299, 2005.
- [11] Bentz, D.P., Modeling The Influence of Limestone Filler on Cement Hydration Using CEMHYD3D. *Cement and Concrete Composites*, 28, 124-129, 2006.