

Mineral Katkıların Erken Hidratasyon Isısına Etkileri*

Mustafa Tokyay¹

Özet

Mineral katkıları çimentolu sistemlerin hidratasyon mekanizması ve kinetiğini hem kimyasal hem de fiziksel açılarından etkiler. Hidratasyon ısısı bakımından değerlendirildiğinde, literatürde mineral katkıların çoğunlukla hidratasyon ısısını azalttıkları belirtilir. Oysa bunun aksinin söz konusu olduğu çeşitli araştırmalar da bulunmaktadır.

Mineral katkı içeren çimentolu sistemlerin suyla tepkimeleri (1) çimento seyreltme, (2) dağılım, (3) tane dağılımı değişikliği ve (4) çekirdeklenme gibi fiziksel ve pozvolanik ve gizil hidrolik gibi kimyasal etkiler nedeniyle yalnızca portland çimentosu içeren sistemlerden farklılıklar gösterir. Kimyasal etkiler kullanılan mineral katkının (1) kompozisyonu, (2) camsı faz miktarı, (3) inceliği, (4) miktarı; (5) birlikte kullanıldığı portland çimentosunun özellikleri ve (6) ortam sıcaklığı ve bağıl nemle ilişkilidir. Genellikle, söz konusu etkileri birbirinden ayırmak, imkânsız değilse de çok güçtür.

Bildiri ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Laboratuvarında 2010 yılından bu yana gerçekleştirilen, tras, kalker tozu ve yüksek fırın cürufu içeren mineral katkılı sistemlerin erken hidratasyon ısıları üzerindeki bir dizi araştırmanın bulgularını irdelemektedir. İlk çalışma çimento ve mineral

Effect of Mineral Admixtures on Early Heat of Hydration

Mineral admixtures affect the hydration mechanism and kinetics both physically and chemically. Generally, use of mineral admixtures are stated to be lowering the heat of hydration of cementitious systems, although there are various researches reporting the opposite.

Reaction of water with mineral admixture incorporated cementitious systems is affected physically by (1) cement dilution, (2) dispersion, (3) modification of particle size, and (4) nucleation and chemically by pozzolanic and latent hydraulic properties. Chemical effects depend on (1) the composition, (2) amount of glassy phase, (3) fineness, and (4) amount of the mineral admixture used and (5) properties of the portland cement and (6) ambient temperature and humidity. Differentiating these effects is very difficult, if not impossible.

This paper discusses the findings of a series of research work on mineral admixture incorporated cementitious systems carried out in the Civil Engineering Department Materials of Construction Laboratory in METU since 2010. The first investigation was based on the specific surface areas (Blaine) of the cement and mineral admixtures used. Later different size groups of the mineral admixtures obtained by ultrasonic sifting were taken as the independent variable.

The results obtained in these investigations made the complex effects mentioned above to be more understandable.

katkı özgül yüzeyini (Blaine) esas alırken diğer çalışmalar ultrasonik eleme vasıtasıyla elde edilen farklı tane boyut aralıkları bağımsız değişken olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar yukarıda değinilen karmaşık etkilerin daha anlaşılabilir olmasını sağlamaktadır.

GİRİŞ

Hidrate olmamış portland çimentosu bileşenleri, döner fırında çok yüksek sıcaklıklarda oluştukları için, yüksek enerji durumundadır. Suyla tepkimeye girdiklerinde daha kararlı ve daha düşük enerjili hidratasyon ürünleri meydana getirerek fazla enerjilerini ısı olarak açığa çıkarır. Dolayısıyla, priz ve katılma süreçlerinde, hidratasyon tepkimeleriyle açığa çıkan ısı nedeniyle, taze betonun sıcaklığı yükselir. Kütle betonları, sıcak ve soğuk havada beton dökümü, erken dayanımı yüksek betonlar gibi uygulamalarda açığa çıkan ısı ve he açığa çıkış hızı önem kazanır. Bazı durumlarda ısı açığa çıkışı yararlı olurken diğer bazı durumlarda istenmeyebilir. Örneğin, soğuk havada beton dökümünde yüksek erken hidratasyon ısısı düşük ortam sıcaklığının priz alma, katılma ve dayanım kazanma süreçlerindeki geciktirici etkisine karşı yararlı olabilirken yüksek sıcaklıklarda beton dökümlerinde tersi geçerlidir. Nispeten yalıtkan bir malzeme olması sebebiyle beton iç kısımlarında meydana gelen ısıyı kolayca yüzeye iletemezken dış

Anahtar kelimeler: Mineral katkıları, tras, yüksek fırın cürufu, hidratasyon ısısı.

¹⁾ mtokyay@metu.edu.tr

(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen BETON 2023 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

kısımları hızlıca ısıyı atmosfere verir. Böylece, yüzeydeki soğuma nedeniyle meydana gelen büzülme eğilimi iç kısımdaki ısınma nedeniyle meydana gelen genişleme tarafından engellenir ve içsel çekme gerilmeleri oluşmasına ve çatlaklara yol açar. Bu durumlar çoğunlukla hidrasyonun erken evrelerinde gerçekleşir. Bunların yanı sıra, hidrasyon ısı ve hızı ölçümleri hidrasyon derecesinin takibinde kullanılan yöntemlerden birisidir.

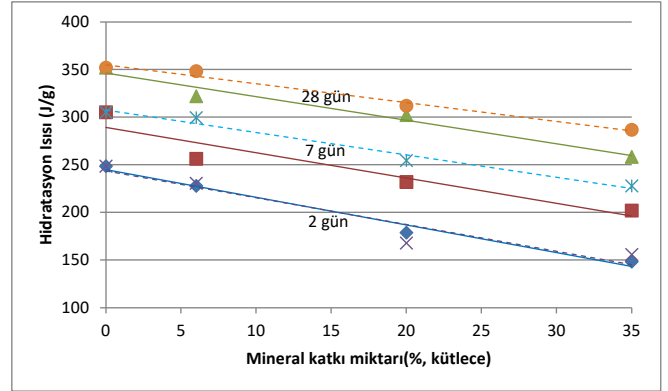
Portland çimentolarının hidrasyonu ile açığa çıkan toplam ısının %50'si ilk üç günde, %70'i ise ilk yedi günde elde edilir (Mehta ve Monteiro, 2006). Hidrasyon ısı yaklaşık olarak portland çimentosu ana bileşenlerinin her birinin hidrasyon ısısının ağırlıklı toplamıdır. Çizelge 1'de farklı yaşlarda bu bileşenlerin hidrasyon ısıları verilmiştir.

Mineral katkıların büyük bir çoğunluğu, portland çimentosunun bir kısmını ikame etmek üzere kullanıldıklarında, hidrasyon ısısında azalmaya yol açar. Söz konusu azalma, Şekil 1'de gösterildiği gibi, kullanılan mineral katkı miktarı arttıkça daha fazla olur. Esasen, doğal puzolanlar ve düşük kireçli uçucu küller gibi mineral katkıların betonda kullanılmasının ana gerekçelerinden birisi bunların hidrasyon ısısını ve hızını erken yaşlarda azaltmasıdır. Buna karşın, literatürde aksine sonuçlara da rastlanmaktadır.

Mineral katkıların büyük bir çoğunluğunun tepkimelerinin çok yavaş olduğu düşünülerek bunların erken hidrasyona yalnızca yavaşlatıcı etkisi olduğu ve dolayısıyla erken hidrasyon ısısını azalttığı düşünülür. Oysa, mineral katkıların birlikte kullanıldıkları portland çimentosunun hidrasyonunu yalnızca kimyasal olarak değil aynı zamanda da fiziksel olarak etkiler. Bu etkiler hidrasyon ısısının açığa çıkışında da görülür. Seyreltme etkisi (portland çimentosu miktarındaki azalma) hidrasyon ısısını düşürürken dağıtıcı etki (dispersiyon), çekirdeklenme etkisi ve bağlayıcı tane dağılımının modifikasyonu hidrasyonu hızlandırarak erken hidrasyon ısısında artışa yol açabilir. Bunların yanı sıra, mineral katkıların inceliği, kompozisyonu, tanecik yüzey özellikleri, alkali iyonu salma hızı gibi birçok diğer etken de açığa çıkan ısıyı artırıcı rol oynayabilir.

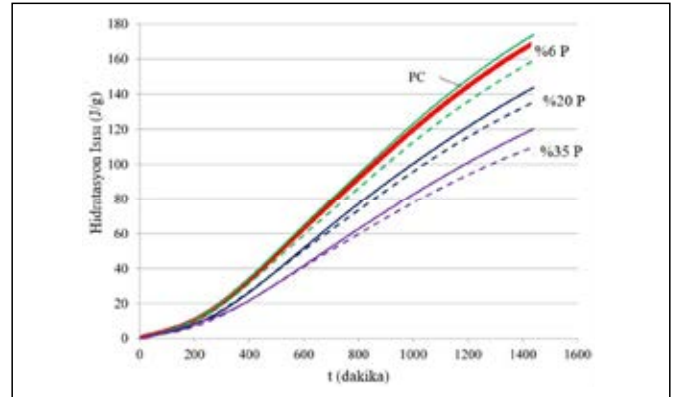
Çizelge 1. Çimento Ana Bileşenlerinin Hidrasyon Isıları (Odler, 1988; Mehta ve Monteiro, 2006).

Bileşen	Tepkiyenfazlar	Tekime ürün	Açığa çıkan ısı (J/g)		
			3 gün	90 gün	Toplam
C ₃ S	H	C-S-H+ CH	243	435	520
C ₂ S	H	C-S-H+ CH	50	176	260
C ₃ A	H+C \bar{S} H ₂	C ₆ A \bar{S} ₃ H ₃₂	887	1302	1670
C ₄ AF	H+CH	C ₃ (A,F)H ₆	289	410	420

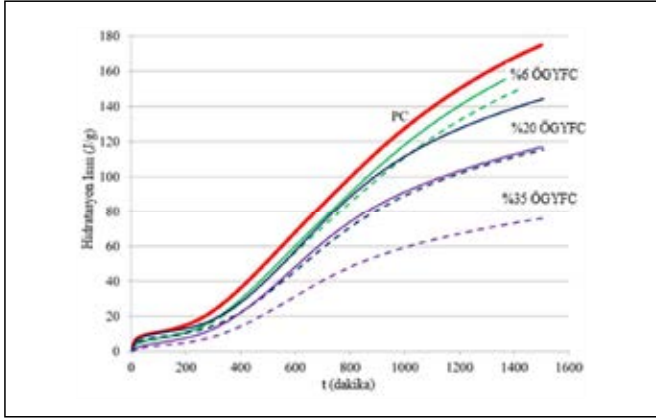


Şekil 1. Portland çimentosunun bir kısmının doğal puzolan (dolu çizgiler) ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufuyla (kesikli çizgiler) ikame edilmesinin hidrasyon ısısına etkileri (Tokyay et al, 2010).

Nitekim, Şekil 2 ve 3'te sırasıyla bir doğal puzolan ve bir öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC) için yalnızca seyreltme etkisi dikkate alınarak hesaplanan hidrasyon ısılarıyla izotermal kalörimetri yöntemiyle ölçülen hidrasyon ısıları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Bir doğal puzolanın erken hidrasyon ısısına etkisi (Ardoğa, 2014). Dolu çizgiler ölçülen, kesikli çizgiler yalnızca seyreltme etkisini dikkate alarak hesaplanan hidrasyon ısılarını göstermektedir.



Şekil 3. Bir ÖGYFC'nin erken hidrasyon ısısına etkisi (Çetin, 2013). Dolu çizgiler ölçülen, kesikli çizgiler yalnızca seyreltme etkisini dikkate alarak hesaplanan hidrasyon ısılarını göstermektedir.

2. YAPILAN ARAŞTIRMALARIN GEREKÇESİ

İlk olarak, 2010 yılında Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği AR-GE Enstitüsünde başlatılan bir araştırmada ülkemizde yaygın olarak kullanılan üç mineral katkının (granüle yüksek fırın cürufu, tras ve kalker) değişik oranlarda (CEM II çimentolarını temsil edecek şekilde %6, 20 ve 35) kullanılarak üretilen değişik inceliklerdeki (~3000, ~5000 ve ~6000 cm²/g Blaine) çimentoların EN 196-8'e göre 2, 7 ve 28 günlük hidrasyon ısılarının belirlenmesi elde edilen sonuçların mineral katkı içermeyen, aynı inceliklerdeki portland çimentolarıyla karşılaştırmalı olarak irdelenmesi kararlaştırılmıştır (Tokay,

et al, 2010). Söz konusu çalışma daha sonra genişletilerek bir yüksek lisans tezine dönüşmüştür (Delibaş, 2012). Bu araştırmalardan elde edilen sonuçlar peş peşe daha ayrıntılı üç yüksek lisans tezi çalışmasına (Över, 2012; Çetin, 2013; Ardoğa, 2014) daha yol açmıştır.

2010'larda çimentoların hidrasyon ısılarıyla ilgili mevcut bilgi birikiminin çok büyük bir bölümü mineral katkı içermeyen portland çimentolarıyla ilgiliydi. Mineral katkı içeren çimentoların hidrasyon ısıları hakkındaki çalışmalar ise yeterince ayrıntılı değildi. EN 197'de mevcut olan, mineral katkı içeren çok sayıda çimento tipi olduğu göz önünde bulundurulduğunda söz konusu katkıların klinker ile birlikte öğütülmeleri durumunda elde edilen çimentoların klinker kısmıyla mineral katkı kısımlarının gerek değirmende gerekse buna bağlı olarak hidrasyon sırasında birbirleriyle fiziksel ve kimyasal etkileşimleri hakkında yeterli bilgi bulunmamaktaydı. Dolayısıyla, yukarıda anılan çalışmaların temel gerekçesi bu bilgi eksikliğinin bir ölçüde kapatılması olmuştur. Bu amaçla, değişik miktarlarda tras ve ÖGYFC içeren çimentolar kullanılmış, farklı tane boyutlarının hidrasyon ısısı üzerindeki etkileri çalışılmıştır.

3. KULLANILAN MALZEMELER VE YÖNTEMLER

ODTÜ Yapı Malzemeleri Laboratuvarında yürütülen deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Araştırmalarda Kullanılan Malzemelerin Kimyasal Kompozisyonları*

Oksit (%)	Delibaş, 2012; Över, 2012				Çetin, 2013; Ardoğa 2014			
	K	T	C	A	K	C	T	A
SiO ₂	20.4	62.6	41.6	2.2	20.5	40.9	59.3	1.9
Al ₂ O ₃	5.7	15.6	13.9	-	4.5	13.5	17.2	-
Fe ₂ O ₃	3.3	3.9	1.1	0.3	4.3	1.0	4.6	0.2
CaO	65.5	6.8	32.7	32.2	66.4	32.6	5.9	32.4
MgO	2.7	1.8	7.0	0.7	1.0	7.4	1.7	0.2
SO ₃	0.4	-	1.6	42.7	0.8	2.2	0.2	44.4
Na ₂ O	0.4	3.4	0.8	0.3	0.2	0.2	3.5	-
K ₂ O	0.6	1.6	0.9	0.1	0.8	1.2	1.9	0.1
K.K.	1.0			21.5	1.1			20.9

*K (klinker); C (yüksek fırın cürufu); T (tras); A (alçı taşı)

Araştırmalarda kullanılan kontrol çimentoları ve katkı çimentolar laboratuvar koşullarında, bir bilyalı değirmende öğütülerek elde edilmiştir. Çimentolar, mineral katkıların kütlece %0, 6, 20 ve 35 oranlarında klinkeri ikame edeceği şekilde hazırlanmıştır. Birinci ve ikinci çalışmalarda 300 ± 20 m^2/kg , 500 ± 20 m^2/kg ve 600 m^2/kg (Blaine özgül yüzeyi) üç farklı incelikte; üçüncü çalışmada 377 ± 5 m^2/kg ; dördüncü çalışmada 395 ± 20 m^2/kg incelikte çimentolar üretilmiştir. Yine birinci ve ikinci çalışmalarda ilk iki çimento grubuna %5, son iki çimento grubunaysa %4 alçı taşı eklenmiştir. Üçüncü ve dördüncü çalışmalarda, sırasıyla, %5, %4,7, %3,2 ve %2,6 oranlarında alçı taşı kullanılmıştır.

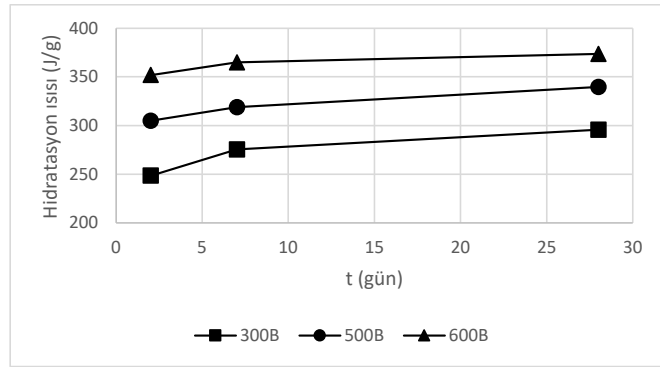
Hidratasyon ısıları ilk çalışmada adiabatik kalörimetri daha sonrakilerdeyse izotermal kalörimetri yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. İlk çalışmada deneyler hazırlanan çimentolar doğrudan; ikinci çalışmada doğrudan kullanmanın yanı sıra ince ($<45\mu m$) ve iri ($>45\mu m$) kısımlarına da ayrılarak; üçüncü ve dördüncü çalışmalarda, ultrasonik eleme yöntemiyle, dört farklı boyut grubuna da ($<10\mu m$; 10-30, 10-35 μm ; 30-50, 35-50 μm ; $>50\mu m$) ayrılarak yapılmıştır.

4. DENEY SONUÇLARI VE İRDELEME

Birbirini takip eden dört çalışmanın sonuçları bu bölümde önce ayrı ayrı özetlenmiş daha sonra da genel bir değerlendirme yapılmıştır.

4.1. İlk Çalışma (Delibaş, 2012) Sonuçları

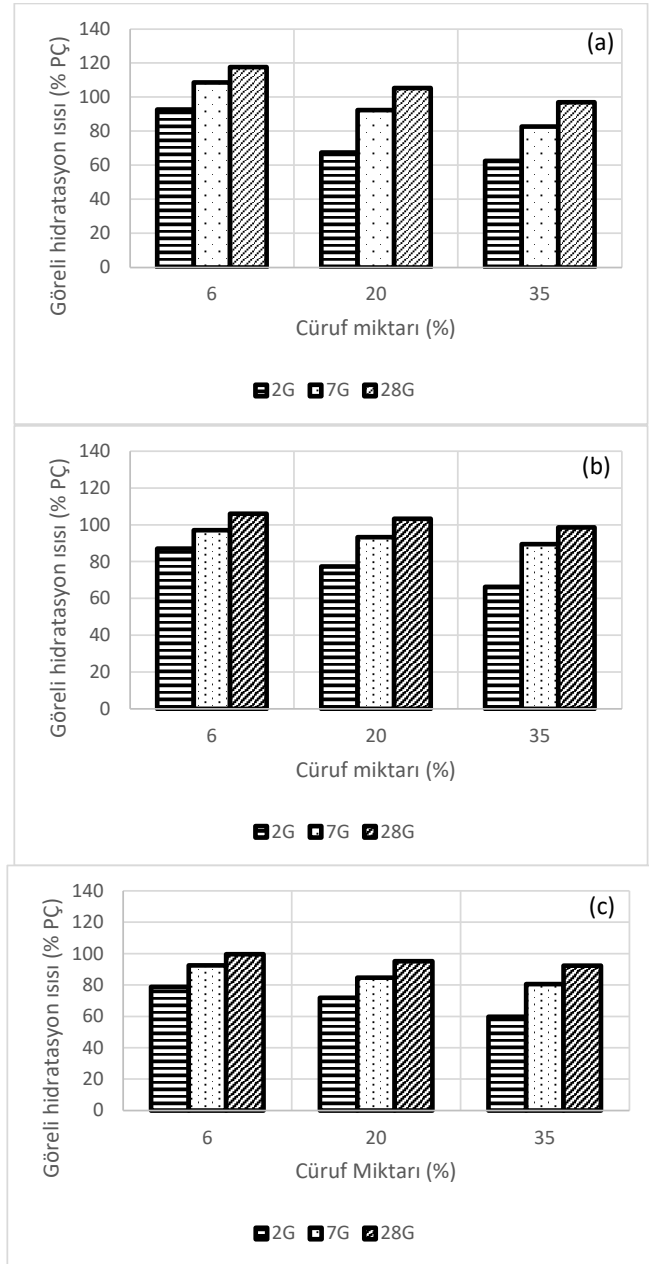
Üç farklı incelikte hazırlanmış olan kontrol (portland) çimentolarının 2, 7 ve 28 günlük hidratasyon ısıları Şekil 4'te; cüruf ve tras içeren çimentoların görelî hidratasyon ısılarıysa, sırasıyla Şekil 5 ve 6'da verilmiştir.



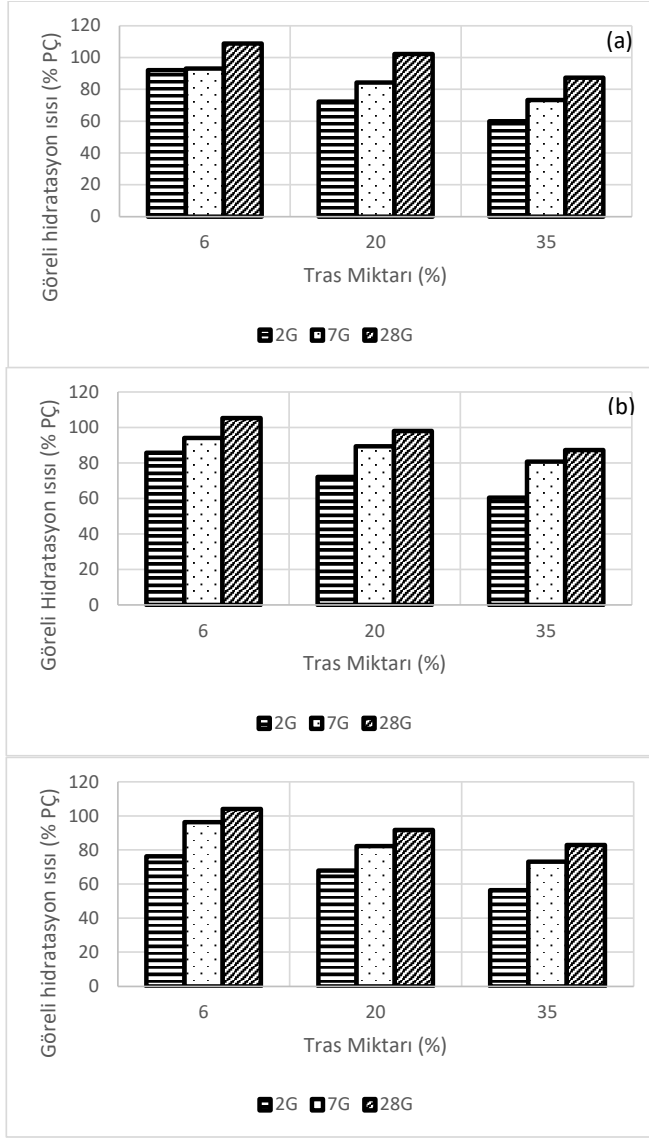
Şekil 4. Farklı inceliklerde (300, 500 ve 600 m^2/kg , Blaine) hazırlanmış olan kontrol Portland çimentolarının adiabatik yöntemle belirlenen 2, 7 ve 28 günlük hidratasyon ısıları.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, hidratasyon ısıyla ilgili literatürde belirtilen genel geçer bilgi birikimiyle uyumludur: Çimentoların inceliği arttıkça erken hidratasyon ısıları da ar-

tar; kullanılan mineral katkı miktarı arttıkça hidratasyon ısıları azalır. Öte yandan, 2 günlük ve 7 günlük hidratasyon ısılarının oranlarına bakıldığında, Portland çimentolarında bu oran incelik arttıkça azalırken tras ve cüruf içeren çimentolarda artmıştır. Söz konusu farklı davranışın nedeni cüruf çimentolarda cürufun öğütme işlemi sırasında klinker üzerindeki ekstra öğütme etkisine, traslı çimentolardaysa klinkerin tras üzerindeki öğütme etkisine dayandırılmıştır.



Şekil 5. Farklı miktarlarda ÖGYFC (C) içeren (a) 300 m^2/kg , (b) 500 m^2/kg ve (c) 600 m^2/kg inceliklerdeki çimentoların hidratasyon ısılarının aynı inceliklerdeki kontrol Portland çimentolarına oranları.



Şekil 6. Farklı miktarlarda tras (T) içeren (a) 300 m²/kg, (b) 500 m²/kg ve (c) 600 m²/kg inceliklerdeki çimentoların hidrasyon ısılarının aynı inceliklerdeki kontrol Portland çimentolarına oranları.

Çizelge 3. Çimentoların İnce ve İri Kısımlarındaki Klinker, Tras ve Alçı taşı Miktarları

Çimento	Klinker, Tras, ve Alçı taşı Miktarları (%)							
	İnce kısım (<45µm)				İri kısım (>45µm)			
	Klinker	Tras	Alçı	Toplam	Klinker	Tras	Alçı	Toplam
PÇ 300	65,9	-	4,2	70,1	29,1	-	0,7	29,8
PÇ 500	79,9	-	4,5	84,4	15,1	-	0,5	15,6
PÇ 600	82,2	-	4,7	86,9	12,8	-	0,3	13,1
6T 300	58,4	3,8	3,0	65,2	32,8	1,4	0,7	34,9
6T 500	76,9	4,5	3,6	85,0	14,0	0,6	0,4	15,0

Diğer bir deyişle, cürufun klinkere göre daha sert bir malzeme olması klinkerin daha ince öğütülmesine ve dolayısıyla daha reaktif olmasına, trasınsa klinkere göre daha yumuşak bir malzeme olması nedeniyle daha ince öğütülmesine yol açmaktadır. Her iki durumda da mineral katkının neden olduğu seyreltme etkisi, cüruf içeren çimentolarda klinkerin artan reaktivitesi, tras içeren çimentolardaysa mineral katkının dispersiyon, tane dağılımında modifikasyon ve çekirdek etkisi tarafında bir miktar azalmıştır. Bu çıkarım daha sonraki çalışmaların nedeni olmuştur.

4.2. İkinci Çalışma (Över, 2012) Sonuçları

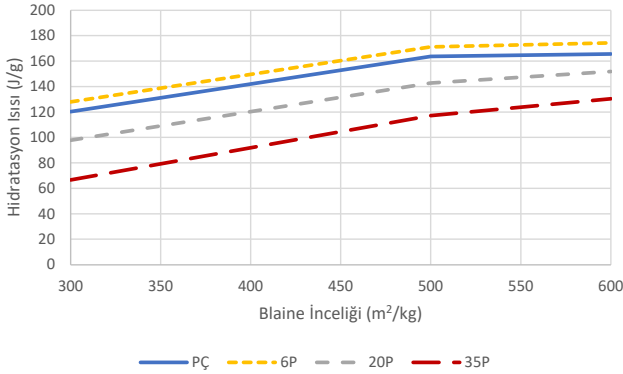
Bu çalışmada öncekinde kullanılan klinker ve tras kullanılmış, yine üç farklı incelikte (300, 500 ve 600 m²/kg) çimentolar üretilmiştir. Öte yandan her çimento ayrıca elenerek ince (<45 µm) ve iri (>45 µm) kısımlarına ayrılmıştır. Daha sonra üretilen her çimento orijinal hali ve ince ve iri kısımları olarak izotermal yöntem kullanılmak suretiyle 24 saat süreyle hidrasyon ısı testi tabi tutulmuştur. Deney sonuçları Şekil 7'de özetlenmiştir.

Farklı inceliklerdeki çimentoların 24 saatlik hidrasyon ısıları Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 7 ve 8'den anlaşılacağı gibi, az miktarda (%6) tras portland çimentosunun erken hidrasyonunu hızlandırmaktadır (Lawrence et al, 2003; Cyr et al, 2005). Öte yandan, %20 ve %35 tras içeren çimentoların 24 saatlik hidrasyon ısıları, kontrol portland çimentosunun, sırasıyla, 300 m²/kg incelik için %81 ve %55'i; 500 m²/kg incelik için %87 ve %72'si; 600 m²/kg incelik içinse %92 ve %79'u kadardır. Diğer bir deyişle, portland çimentosunun trasla kısmi ikamesi bir yandan seyreltme etkisi oluştururken diğer yandan erken hidrasyonu hızlandırıcı diğer fiziksel etkilere yol açmaktadır.

Çimentoların ince (<45 µm) ve iri (>45 µm) kısımlarının etkilerini belirleyebilmek açısından önce bu kısımların miktarları daha sonra da içerdikleri klinker, tras ve alçı taşı miktarları belirlenmiştir. Sonuçlar Çizelge 3'te verilmiştir.

Çimento	Klinker, Tras, ve Alçı taşı Miktarları (%)							
	İnce kısım (<45µm)				İri kısım (>45µm)			
	Klinker	Tras	Alçı	Toplam	Klinker	Tras	Alçı	Toplam
6T 600	80,0	4,4	3,3	87,7	11,2	0,6	0,5	12,3
20T 300	46,2	12,3	2,7	62,2	32,0	5,8	1,0	38,8
20T 500	64,7	16,9	3,8	85,4	12,1	2,1	0,4	14,6
20T 600	67,5	16,6	3,8	87,9	10,2	1,8	0,3	12,3
35T 300	31,0	20,8	2,4	54,2	30,7	14,1	1,1	45,9
35T 500	51,2	30,3	3,1	84,6	10,6	4,5	0,3	15,4
35T 600	54,3	31,2	3,0	88,5	8,0	3,3	0,2	11,5

Araştırmada üretilip kullanılan çimentoların tane dağılımları lazer difraksiyon yöntemiyle belirlenmiş ve 300 m²/kg Blaine inceliğindeki çimentolarda 20-40µm olan medyan tane boyutu 500 m²/kg ve 600 m²/kg inceliğindeki çimentolarda 6-10µm olmuştur. 300 m²/kg inceliğindeki çimentolarda kullanılan tras miktarı arttıkça tane dağılımının gözle görülür şekilde iri tarafa kaydığı saptanmıştır. Bu etki daha ince çimentolarda neredeyse belirsizdir. De Weerd (2007) tarafından da belirtildiği gibi, birlikte öğütme söz konusu olduğunda, sert olan klinkerin öğütülmesi yumuşak olan trasa göre daha zor olmaktadır.



Şekil 7. Aynı incelikteki farklı miktarlarda tras içeren çimentoların 24 saatlik hidratasyon ısılarının portland çimentosuyla karşılaştırılması.

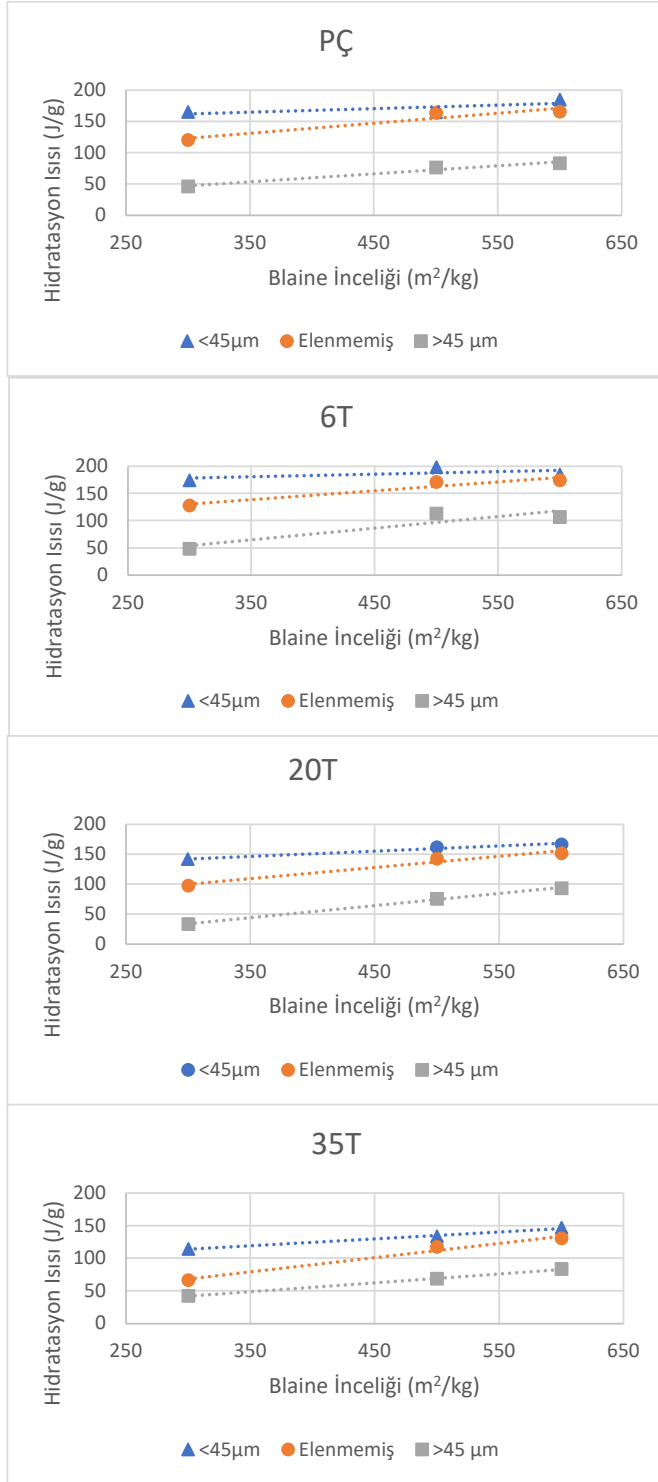
4.3. Üçüncü Çalışma (Çetin, 2013) Sonuçları

Üçüncü çalışmada 377±5 m²/kg incelikte çimentolar üretilmiştir. Granüle yüksek fırın cürufu (C) mineral katkı olarak %6, 20 ve 35 oranlarında kullanılmıştır. Kontrol çimentolarında ve %6 cüruf içeren çimentolarda %5, diğerlerinde %4 alçı kullanılmıştır. Bu kez, sonik eleme yöntemiyle, çimentolar 0-10µm, 10-30µm, 30-50µm ve >50µm olmak üzere dört ayrı tane boyutuna ayrılmıştır. Değişik boyut aralıklarındaki klinker, cüruf ve alçı taşı miktarları Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Çimentoların Farklı Tane Boyut Gruplarındaki Klinker, Cüruf ve Alçı taşı Miktarları.

		Miktar (%)			
		PÇ	6C	20C	35C
0-10 µm	Klinker	92,2	90,3	83,0	73,1
	Cüruf	-	2,5	11,7	22,5
	Alçı taşı	7,8	7,2	5,4	4,5
10-30 µm	Klinker	96,9	92,0	79,7	67,2
	Cüruf	-	4,7	18,2	31,2
	Alçı taşı	3,1	3,2	2,1	1,5
30-50 µm	Klinker	97,7	91,1	76,0	60,3
	Cüruf	-	6,8	22,6	38,9
	Alçı taşı	2,3	2,2	1,4	0,8
>50 µm	Klinker	97,2	89,5	74,4	53,8
	Cüruf	-	7,9	24,0	43,8
	Alçı taşı	2,8	2,6	1,6	1,0

Çizelge 4'te görüldüğü gibi, alçıtaşı miktarı 0-10 µm boyut grubunda yüksek olmaktadır. Alçı taşının diğer iki malzemeye göre daha yumuşak olması, doğal olarak bu sonuca yol açmıştır. Cüruf-klinker oranı bir yandan kullanılan cüruf miktarı arttıkça artarken diğer yandan tane boyutuyla da artmaktadır. Bu da doğal olarak cürufun, klinkere göre, daha sert olmasından kaynaklanmaktadır.

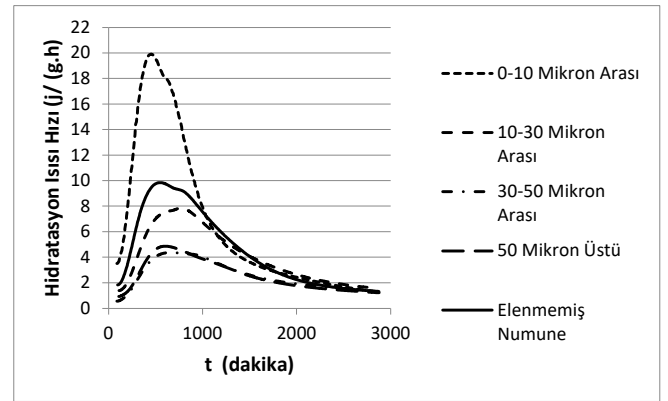


Şekil 8. Farklı miktarlarda (%0, 6, 20, 35) tras içeren çimentoların ince (<45µm), iri (>45µm) kısımlarının ve elenmemiş hâlinin incelik-hidratasyon ısı ilişkileri.

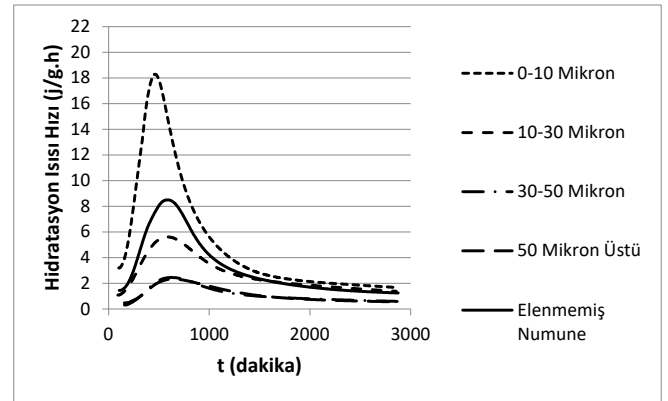
Bu çalışmada çimentoların farklı boyut gruplarındaki klin-ker kısmının ana bileşen kompozisyonları da hesaplanmıştır.

Ana bileşenlerin birbirinden farklı öğütülebilirlikleri nedeniyle, değişik tane boyut gruplarındaki oranları belirlenerek bir sonuca varılması düşünülmüşse de bu durum klinlerin homojenitesi, öğütülen miktar, taneciklerin yüzey elektriksel özellikleri vb. olası nedenlerle gerçekleşmemiştir.

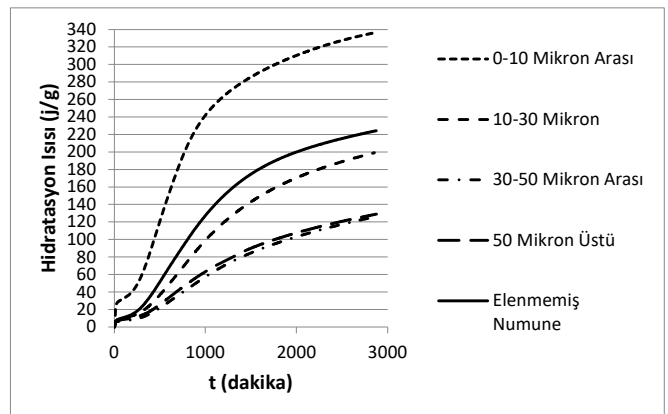
Kontrol (PÇ) ve %35 cüruf içeren çimentoların (35C) hidratasyon ısı hızı ve hidratasyon ısı grafikleri Şekil 9, 10, 11 ve 12'de verilmiştir.



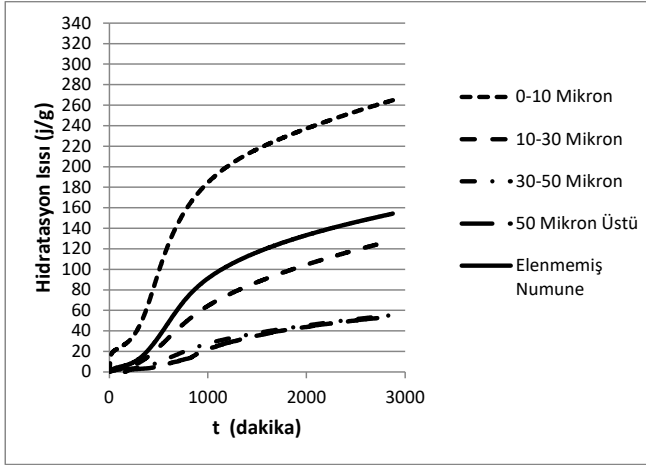
Şekil 9. Kontrol çimentosunun hidratasyon ısı hızı grafiği.



Şekil 10. 35C çimentosunun hidratasyon ısı hızı grafiği.



Şekil 11. Kontrol çimentosunun hidratasyon ısı grafiği.



Şekil 12. 35C çimentosunun hidrasyon ısı grafiği.

Şekil 9 ve Şekil 10 karşılaştırıldığında, her iki çimentonun da hidrasyon ısı hızı davranışlarının oldukça benzer olduğu görülmektedir. 35C’de cüruf nedeniyle hız bir miktar daha düşük olmaktadır. Öte yandan, kontrol çimentosunda ivmeleme bölgesinin sonundaki C₃S hidrasyonu pikinin ardından görülen ikincil pik C35’te mevcut değildir. Söz konusu pik genellikle kalsiyum alüminatların yeniden oluşmasıyla ilişkilendirildiğinden, C35’teki durum kullanılan alçı taşı-klinker oranının daha düşük olmasıyla açıklanabilir.

Şekil 11 ve 12 kıyaslandığında açığa çıkan erken hidrasyon ısı bakımından da benzer davranış görülmektedir ancak, yine kullanılan cüruf nedeniyle, C35’in erken hidrasyon ısıları kontrol çimentosuna göre daha düşüktür. Elenmemiş çimentoların erken yaştaki hidrasyon davranışı (gerek hız gerekse toplam ısı bakımından) 0-10µm ve 10-30µm boyut

gruplarının davranışlarının bir kombinasyonudur. Daha büyük boyut grupları bu erken evrede etkin değildir.

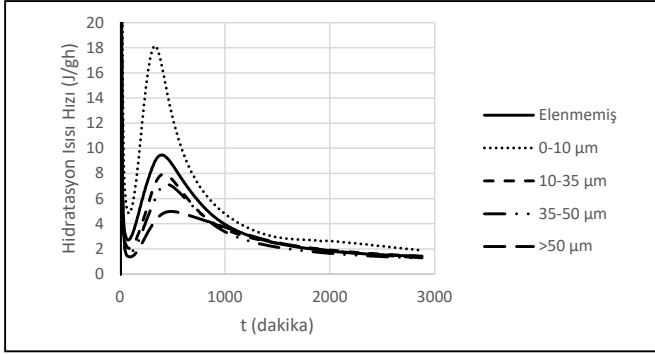
4.4. Dördüncü Çalışma (Ardoğa, 2014) Sonuçları

Dördüncü çalışmada katkı olarak tras %0, 3, 11 ve 22 oranlarında kullanılmış ve 395±20 m²/kg inceliğinde çimentolar üretilmiştir. Kontrol çimentolarında ve %3 tras içeren çimentolarda %5, diğerlerinde %4 alçı kullanılmıştır. Sonik eleme yöntemiyle, çimentolar 0-10µm, 10-35µm, 35-50µm ve >50µm olmak üzere dört ayrı tane boyutuna ayrılmıştır. Değişik boyut aralıklarındaki klinker, cüruf ve alçıtaşı miktarları Çizelge 5’te verilmiştir. Burada, önceki çalışmadan farklı bir durum söz konusudur: Gerek kontrol çimentosunda gerekse tras içeren çimentolarda en küçük tanecik boyut aralığı olan 0-10 µm’deki klinker kısmı daha iri olan gruplardakinden azdır. Buna karşılık alçı taşı ve tras miktarları fazladır. Öte yandan, en iri boyut aralığında (>50 µm) tras ve alçı taşı miktarlarının bir önceki boyut aralığından daha yüksek olması bu malzemelerin aglomerasyonuna bağlanmıştır.

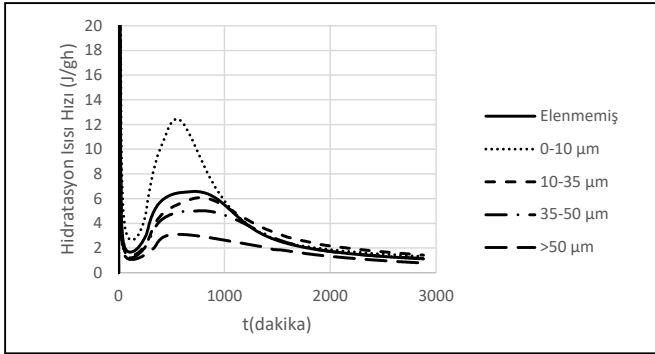
Kontrol (PÇ) ve %22 tras içeren çimentoların (22T) hidrasyon ısı hızı ve hidrasyon ısı grafikleri Şekil 13, 14, 15 ve 16’da verilmiştir. Şekil 13 ve Şekil 14 karşılaştırıldığında, elenmemiş numunelerdeki ana pikin 22T’de daha geniş olduğu görülmektedir. Bu durum çimentodaki tras miktarı arttıkça daha belirgin olmaktadır. Trasın dağıtıcı (dispersiyon) etkisi nedeniyle portland çimentosu kısmının daha homojen bir hidrasyonunun söz konusu olduğu düşünülebilir. Şekil 13-16 birlikte incelendiğinde elenmemiş çimentoların davranışlarıyla 10-35 µm boyut grubunun davranışlarındaki benzerlik çimentonun medyan tane boyutunun (~20 µm) bu gruba yakın olmasıyla açıklanabilir. Daha büyük boyut grupları bu erken evrede etkin değildir.

Çizelge 5. Çimentoların Farklı Tane Boyut Gruplarındaki Klinker, Tras ve Alçı taşı Miktarları.

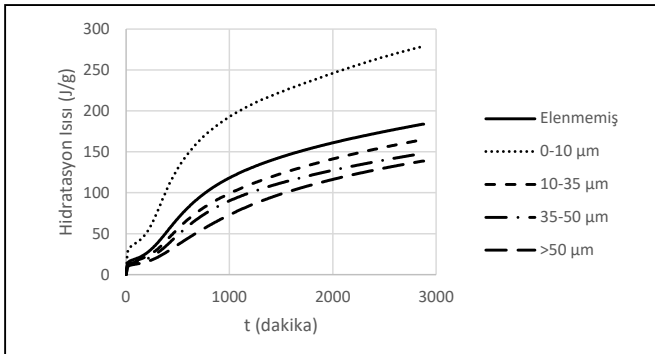
		Miktar (%)			
		PÇ	3T	11T	22T
0-10 µm	Klinker	90,7	82,6	75,2	63,6
	Tras	-	3,6	14,7	21,7
	Alçı taşı	9,3	13,8	10,6	4,6
10-35 µm	Klinker	96,4	91,4	85,7	75,4
	Tras	-	3,2	10,4	21,2
	Alçı taşı	3,6	5,4	3,9	3,5
35-50 µm	Klinker	96,1	92,6	88,6	77,8
	Tras	-	3,0	9,4	19,2
	Alçı taşı	3,9	4,4	2,0	3,0
>50 µm	Klinker	93,6	89,1	81,5	70,3
	Tras	-	4,1	13,7	26,7
	Alçı taşı	6,4	6,7	4,8	3,0



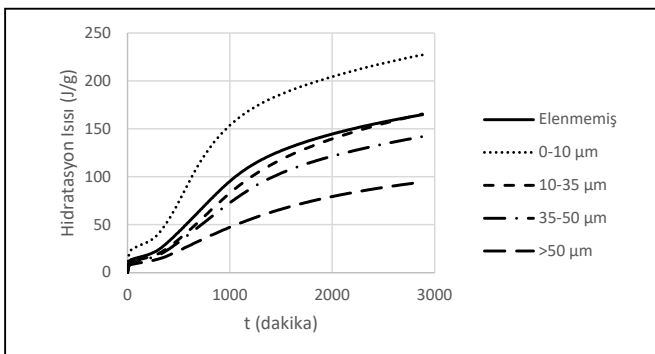
Şekil 13. Kontrol çimentosunun hidrasyon ısı hızı grafiği.



Şekil 14. 22T çimentosunun hidrasyon ısı hızı grafiği.



Şekil 15. Kontrol çimentosunun hidrasyon ısı grafiği.



Şekil 16. 22T çimentosunun hidrasyon ısı grafiği.

5. SONUÇ

Mineral katkı olarak tras ve yüksek fırın cürufunun kullanıldığı bu dört araştırmada mineral katkıların çimentoların hidrasyon ısılarına olan etkileri çalışılmıştır. Hidrasyon ısı bir yandan düşük ve yüksek sıcaklıklarda ve kütle betonu dökümleri gibi uygulamalarda önemli olurken diğer yandan hidrasyon derecesinin tayininde ve dolayısıyla birçok diğer sertleşmiş beton özelliğinin takibinin yapılmasında yararlı bir araçtır. Bu bakımdan, yukarıda özetlenmeye çalışılan araştırmaların sonucunda kullanılan klinker ve mineral katkıların türü, kompozisyonu, miktarları ve tane dağılımları ayarlanarak gerek hidrasyon ısı gerekse de dayanım ve dayanıklılık özellikleri bakımından istenilen vasıflarda çimentolar üretmek mümkündür.

Teşekkür

Bildiride özetlenmiş çalışmaların fikri benden çıkmış olmasına karşın, bu fikri destekleyerek benimseyen değerli meslektaşlarım Dr. İ. Özgür Yaman, Dr. Sinan T. Erdoğan'a ve araştırmaları bizzat yapan öğrencilerimiz Tuğhan Delibaş, Dr. Derya Över, Can Çetin ve Dr. M. Kemal Ardoğa'ya teşekkürlerimi sunarım.

Kaynaklar

- Ardoğa, M.K. 2014. "Effect of Particle Size on Heat of Hydration of Pozzolan-Incorporated Cements", ODTÜ FBE YL Tezi, 109s.
- Ardoğa, M.K., Erdoğan, T.Y., Tokyay, M. 2019. "Effect of Particle Size on Early Heat Evolution of Interground Natural Pozzolan Blended Cements", Constr. & Build. Mat., 206, 210-218.
- Çetin, C. 2013. "Early Heat Evolution of Different - Sized Portland Cements Incorporating Gound Granulated Blast Furnace Slag", ODTÜ FBE YL Tezi, 53s.
- Çetin, C., Erdoğan, S.T., Tokyay, M. 2016. "Effect of Particle Size and Slag Content on the Early Hydration of Interground Blended Cements", C&C Composites, 67, 39-49.
- Cyr, M., Lawrence, P., Ringot, E. 2005. "Mineral Admixtures in Mortars: Quantification of the Physical Effects of Inert Materials on Short-term Hydration", Cem. Concr. Res. 35 (4) 719-730.
- Delibaş, T. 2012. "Effects of Granulated Blast Furnace Slag, Trass, and Limestone Fineness on the Properties of Blended Cements", ODTÜ FBE YL Tezi, 72s.
- De Weerd, K. 2007. "Separate Grinding Versus Intergrinding." SINTEF Report SBF BK A07022.
- from: <http://www.sintef.no/upload/Byggforsk/COIN/STAR%204%20%20in%201.1%20OF%20Separate%20grinding%20versus%20intergrinding.pdf>
- Erdoğan, S.T., Över, D., Tokyay, M. 2014. "Effect of Pozzolan Content and Fineness on Early Hydration of Interground Blended Cements", J. Adv. Conc. Tech., 12, 101-110.
- Lawrence, P., Cyr, M., Ringot, E. 2003. "Mineral Admixtures in Mortars: Effect of Inert Materials on Short Term Hydration", Cement and Concrete Research, 33 (12), 1939-1947.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., "Concrete (3. Ed.)", McGraw-Hill, New York, 2006.
- Odler, I. 1988. "Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement. In Lea's Chemistry of Cement and Concrete", 4th Ed. (Ed. P.C. Hewlett), pp. 241-289, Elsevier, London.
- Över, D. 2012. "Early Heat Evolution in Natural Pozzolan-Incorporated Cement Hydration", ODTÜ FBE YL Tezi, 83s.
- Tokyay, M., Delibaş, T., Şengün, E., Katnaş, F. 2010. "Granüle Yüksek Fırın Cürufu, Tras ve Kalker İçeren Çimentolarda Mineral Katkı Türü, Öğütme Yöntemi ve Çimento İnceliğinin Hidrasyon Isısına Etkilerinin Araştırılması", Proje No: AR-GE 2010/01-A Çalışma Belgesi, TÇMB, Ankara, 2010.
- Tokyay, M., Delibaş, T., Yaman, İ.Ö. 2012. "Heat of Hydration of GGBFS and Natural Pozzolan Incorporated Cements", Cem. Concr. World. 17, 70-87.