

## MİNERALOJİK KATKILARIN ÇEŞİTLİ TANIMLARI, SINIFLARI, ÖZELLİKLERİ ve KULLANIM ALANLARI (BÖLÜM 1)

**Mehmet Serkan KIRGIZ**

Adres: Hacettepe Üniversitesi Polatlı Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Ankara  
Tel: 0539 – 6145238  
Elektronik posta: kirgiz@hacettepe.edu.tr

Alınış: 16 Nisan 2008

Kabul Ediliş: 27 Haziran 2008

**Özet:** Dünya’ da ve Türkiye’ de mineralojik malzemeler çimento ve beton katkılarıdır. Mineralojik malzemelerin özelliklerinin bilinmesi bu malzemelerin çimento, harç ve beton özelliklerine etkilerinin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Bu nedenle bu çalışmada mineralojik katkıların çeşitli tanımları, sınıfları, özellikleri ve kullanım alanlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Mineralojik katkılar elde edilmişlerine göre doğal ve doğal olmayan puzolanlar olarak ikiye ayrılır. Volkanik, sedimanter ve diyajenetik malzemeler doğal puzolanlardır. Doğal olmayan puzolanlar ise endüstri atıklarıdır. Literatürde incelenen çalışmalarda mineralojik katkılar, çimento, harç ve betonun dayanımını, bağlayıcılığını artırıp ve onları zararlı kimyasal etkilerden korumaktadır. Bu çalışmanın birinci bölümünde mineralojik katkıların çeşitli tanımları, sınıfları ve özelliklerinin bir kısmı anlatılmıştır. Mineralojik katkıların özelliklerinin devamı kullanım alanları, sonuçlar ve tartışmalar makalenin ikinci bölümünde açıklanacaktır.

**Anahtar kelimeler;** doğal olmayan puzolan, doğal puzolan, mermer tozu, mineralojik katkılar, tuğla tozu, volkanik kül

### **THE DIFFERENT DEFINITIONS, CLASSIFICATION, PROPERTIES AND USAGE AREAS OF THE MINERALOGICAL ADDITIVES (PART I)**

**Abstract:** Mineralogical materials are cement and concrete additives in Turkey and the world. The fact that the properties of mineralogical materials are known enables the effects of these materials on the cement, mortar and concrete properties to be understood better. Therefore, in this study the different definitions, classification, properties and usage areas of the mineralogical additives are aimed. Mineralogical additives are divided into two types as natural and unnatural pozzolana in accordance with the way they are obtained. Volcanic, sedimentation and diagenetic materials are natural pozzolana. Artificial pozzolana is, on the other hand, industrial wastes. In literature examined papers were shown that the mineralogical additives are increasing cement, mortar and concrete strength and binding to protect them harmful chemical effects. In first part of this study was told the different definitions, classification and a part of the properties of the mineralogical additives. Continued of the properties and usage areas of the mineralogical additives, results and discussions will explain in the paper’s second part.

**key words;** artificial pozzolana, natural pozzolana, marble powder, mineralogical additives, brick powder, volcanic ash

### **Giriş**

Doğada katı halde bulunan veya toz halde bir endüstri atığı olarak ortaya çıkan belirli bir kimyasal bileşiğe sahip, cansız kristal yapıya maddelere mineralojik malzemeler denir. Doğada bulunan mineralojik malzemeler değişik endüstriler tarafından çeşitli üretimler için kullanılır. Endüstri de üretim için kullanılan mineralojik malzemelerden ortaya çıkan atıklar da mineralojik malzemenin yapısına ve özelliklerine sahiptir. Dünya’ da ve Türkiye’ de uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi endüstri atıklarının çimentoda mineralojik katkı olarak kullanıldığı bilinmektedir. Bunlar en yaygın kullanılan ve en çok bilinen mineralojik katkılarıdır. Fakat Dünya’ da yıllık ortalama  $1 \times 10^6$  (ton) ve üzerinde atık üreten pek çok endüstri vardır. Bu endüstrilerin bazıları Türkiye’de de mevcuttur. Çimento ve harçlarda veya beton karışımında, doğal katkı malzemeleri ve çeşitli endüstri atıkları kullanılabilir. Katkı olarak kullanılan mineralojik malzemelerden beklenen, çimento, harç veya beton bileşenleriyle uyumlu olmasıdır. Katkı malzemelerinden beklenen bu uyum için en güzel örnek, çimento hidrasyonu sırasında serbest kalan kalsiyum hidroksitle mineralojik katkının birleşmesidir. Bu mineralojik malzemelerin, çimento, harç ve betonun bazı özelliklerini iyileştirmesi de bir diğer beklentidir [1, 2]. Endüstri atıklarının çimento, harç ve betona ikame veya katkı yoluyla eklenmesi ekonomik açıdan hem çimento ve beton sektörüne hem de bu atıkların ortaya çıktığı sektörler için fayda sağlar. Hiçbir maddi değeri olmayan bu atıklar bu yolla çimento hammaddesi, harç ve beton bileşeni olarak değer kazanır ayrıca endüstri atıklarının depolanma maliyetleri ortadan kalkar. Mineralojik malzemelerin

özelliklerinin bilinmesi bu malzemelerin çimento, harç ve beton özelliklerine etkilerinin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Ayrıca bu katkılarla yeni bir malzemenin üretilebilmesi de bu mineralojik malzemelerin özelliklerinin bilinmesini gerektirir [1]. **Bu çalışmada, mineralojik katkıların çeşitli tanımları, sınıfları, özellikleri ve kullanım alanlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Makale iki bölüme ayrılmıştır. İlk bölümde mineralojik katkıların çeşitli tanımları ve sınıfları belirtilmiş ve özelliklerinin bir kısmına değinilmiştir. İkinci bölümde mineralojik katkıların özelliklerinin devamı, kullanım alanları, sonuçlar ve tartışmalar açıklanacaktır.**

### **Mineralojik Katkıların Çeşitli Tanımları**

Mineralojik katkı için birçok farklı tanım vardır. Kreijger mineralojik katkı için: “Harç ve betonun karıştırılması sırasında, harç ve betonun taze ve sertleşmiş özelliklerini düzeltmek amacıyla eklenen, karışım malzemelerinin kabul ettiği malzemelerdir” tanımını yapmıştır [3]. ASTM C 125 standardına göre diğer bir mineralojik katkı tanımı: “Su, hava etkileri v.b başlangıçta beklenen özellikleri ya da dayanım ve donma – çözülme gibi sonuç özelliklerini etkileyen malzemelerdir” [4]. ACI 116R – 90 raporunda mineralojik katkıya: “Su, agrega, çimento ve lifli güçlendiricilerden ayrı harç ve betonun bir bileşeni olarak karıştırmadan hemen önce yığına veya karıştırma süresince eklenerek kullanılan malzeme” demektedir [5].

Neville ve Brooks mineralojik katkı için: “Çimentoya benzer özellikler gösteren, çimento silikatlarının hidrasyonu sonucunda harçta serbest kalan kalsiyum hidroksitle reaksiyon yapan ikame ve katkı malzemeleridir” tanımını yapmıştır [6]. Mindess ise, betona katılan ince öğütülmüş katı malzemelere mineralojik katkı veya çimento katkısı demektedir [7].

Kırgız doktora çalışmasına dayanarak, mineralojik katkı için: “Belli bir kimyasal bileşiğe ve puzolanik özelliğe sahip, çimento, harç ve beton gibi yapı malzemelerine katıldığında veya ikame edildiğinde, yapı malzemesinin kimyasal, fiziksel ve mineralojik özelliklerini olumlu yönde geliştiren, hammadde ve bileşenlerde ekonomi sağlayan, doğal ve doğal olmayan malzemelerdir” tanımını yapmaktadır [1].

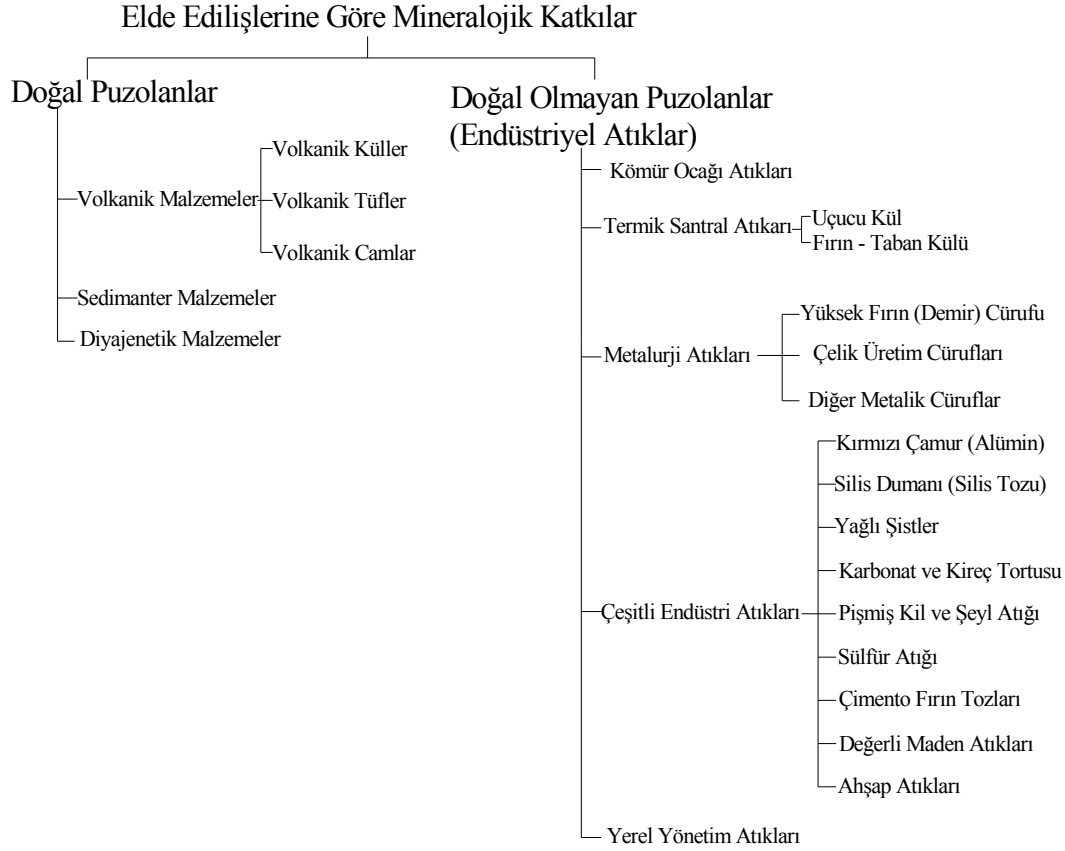
### **Mineralojik Katkıların Sınıfları ve Özellikleri**

Son yıllarda yapılan araştırmalarda bazı katkıların reaktif olmadıkları halde çimento hidrasyonunu olumlu yönde etkiledikleri anlaşılmıştır. Örneğin, mermer tozu taneleri hidrasyon ürünleri içinde su ile reaksiyonu hızlandırmaktadır [8].

Rouman tarafından yapılan mineralojik katkı sınıflaması şöyledir [9];

- Bağlayıcı özellikte olanlar: Suda soğutulmuş yüksek fırın cürufu v.b.
- Bağlayıcı ve puzolanik özellikte olanlar: Uçucu kül, bazı bitümlü şist külleri v.b.
- Puzolanik özelliği yüksek olanlar: Silis dumanı, pirinç kabuğu külü v.b.
- Normal puzolanlar: Pişmiş kil- metakaolin, silisli uçucu kül, v.b.
- Puzolanik özelliği düşük olanlar: Havada soğumuş yüksek fırın cürufu, bazı kazan cürufları, bazı bitümlü şist külleri, v.b.
- Mineralojik özelliği olanlar: Kuvars tozu, bentonit, demir tozu

Bu mineralojik katkı sınıflaması hem karışık hem de katkıların nasıl elde edildiği, özelliklerinin neler olduğu, nerelerde ve ne amaçla kullanılabileceği belli değildir. Mineralojik katkıların elde edilmişlerine göre sınıfları Şekil 1’ de verilmiştir [1].



**Şekil 1.** Elde edilişlerine göre mineralojik katkıları [1]

### Doğal puzolanlar

Volkanik, sedimanter ve diyajenetik malzemeler doğal puzolanlardır [11, 12]. 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 denir. Doğal puzolanların kimyasal yapısı silisyum oksit ( $\text{SiO}_2$ ), alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) bakımından zengindir. Kilerde, bu oksitlerin yanı sıra, % 20 civarında kalsit ( $\text{CaO}$ ) de yer almaktadır. Bazı doğal puzolanların kimyasal özellikleri Tablo 1’ de verilmiştir [11].

**Tablo 1.** Bazı doğal puzolanların kimyasal özellikleri [11]

Doğal Puzolanlar	Kimyasal Özellikleri (%)					
	Silisyum Oksit ( $\text{SiO}_2$ )	Alüminyum Oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	Demir Oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	Kalsiyum Oksit ( $\text{CaO}$ )	Magnezyum Oksit ( $\text{MgO}$ )	Alkali ( $\text{Na}_2\text{O} + 0,66\text{K}_2\text{O}$ )
Volkanik Cam	65,1	14,5	5,5	3,0	1,1	6,5
Volkanik Tüf	52,1	18,3	5,8	4,9	1,2	6,6
Diatomlar	86,0	2,3	1,8	-	0,6	0,4

**Volkanik malzemeler**

Volkanik malzemelerin büyük bir bölümü puzolanik özellik gösterir. Volkanik püskürme sırasında silisli ve alüminli malzemelerden oluşan eriyik durumdaki magma, yüzeye lav halinde çıkarak çok çabuk soğuma gösterirse, camı yapıya sahip olur. Püskürme esnasında gazların da bulunması, malzemenin gözenekli yapıya ve çok büyük yüzey alanına sahip olmasına neden olmaktadır. Yüzey alanının büyük olması ve düzensiz yerleşim göstermelerinden ötürü, alüminli silisler, sulu ortamda kalsiyumlarla kolayca reaksiyona girebilmektedir. Volkanik püskürmenin çok hızlı olması, malzemenin daha amorf yapıya ve daha yüksek puzolanik özelliğe sahip olmasına yol açmaktadır [11, 12].

**Sedimanter malzemeler**

Sedimanter malzemeler, opalin diatom bakımından zengindir. Diatomlar, silisli yapıya sahip olan mikroskobik büyüklükteki tek hücreli su bitkileridir. Bazı diatomlu malzemeler, öğütülmeden bazıları ise öğütüldükten sonra mineralojik katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu tür malzemelerin 760 – 1000 °C sıcaklığa kadar pışırıldıktan sonra öğütülmeleri puzolanik özelliklerini artırmaktadır [11, 12].

**Diyajenetik malzemeler**

Diyajenetik malzemeler, amorf (şekilsiz) silis bakımından zengin ve silisli kayaların kötü hava şartlarında aşınmasından elde edilir ve puzolanik özellik gösterirler. Mineralojik yapısında ise çok miktarda silis ve az miktarda diğer oksitler bulunur [12].

**Doğal olmayan puzolanlar (Endüstriyel atıklar)**

Doğal olmayan puzolanlar, endüstriyel işlemlerde atık olarak çıkan malzemelerdir. Kömür ocağı atıkları, termik santral atıkları, metalürji atıkları, çeşitli endüstri atıkları ve yerel yönetim atıkları bu gruptadır (Şekil 1) [10].

**Kömür ocağı atıkları**

Kömür ocağı atıkları, kömür çıkarılmasında ortaya çıkmaktadır. Ana kaya tipleri kömür damarıyla birleşiktir ve bu nedenle killi kayalar, silt kayalar, şist ve kumtaşları bu atığı oluşturur [3, 10]. Almanya’ da toplam atığın % 2’ den fazlası çeşitli ince filtreleme tortularındır. Benzer atığa İngiltere’de de rastlanmaktadır. Almanya’ da kömür atığı olarak kaybedilen miktar, ağırlıkça yaklaşık % 5’ den az fakat toplam karbon miktarı % 20’ den fazladır. Bu durum İngiltere için de geçerlidir ama Avustralya’ da kayıp karbon miktarı daha yüksektir. Çeşitli ülkelerde ortaya çıkan yanmamış ve yanmış kömür atığının kimyasal özellikleri Tablo 2’ de verilmiştir.

**Tablo 2.** Yanmamış ve yanmış kömür atığının kimyasal özellikleri [3]

Yanmamış Kömür Atığı Kimyasal Özellikleri	Ülkeler					
	Amerika		İngiltere	Almanya		Avustralya
	Antrasit Kalıntı	Bitümlü Kalıntı		10 – 80 (mm)	0,5 – 10 (mm)	
Silisyum Oksit (SiO <sub>2</sub> ) (%)	50 – 57	43 – 61	38 – 50	54 – 60	47 – 52	64 <sup>(a)</sup>
Alüminyum Oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	30 – 37	14 – 20	16 – 22	22 – 27	22 – 24	25 <sup>(a)</sup>
Demir Oksit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	3 – 10	2 – 31	0,5 – 3	5 – 8	8 – 11	3 <sup>(a)</sup>
Demir Mono Oksit (FeO) (%)	-	-	2 – 6	-	-	-
Titanyum Oksit (TiO <sub>2</sub> ) (%)	1 – 2	0,8 – 2,2	0,5 – 1	0,9 – 1,1	0,8 – 1	0,9 <sup>(a)</sup>
Fosfor Penta Oksit (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (%)	-	-	0,1 – 0,25	2 – 4	4 – 7	0,04 <sup>(a)</sup>
Kalsiyum Oksit (CaO) (%)	1 – 2	0,1 – 10	0,5 – 1,5			0,3 <sup>(a)</sup>
Magnezyum Oksit (MgO) (%)	0 – 1	0,5 – 3	1 – 2,5			0,7 <sup>(a)</sup>
Manganez Oksit (MnO) (%)	-	-	0,05 – 0,25			-
Sodyum Oksit (Na <sub>2</sub> O) (%)	1 – 3	2 – 5,5	0,1 – 0,6			0,15 <sup>(a)</sup>
Potasyum Oksit (K <sub>2</sub> O) (%)			0,8 – 1,5	2,5 <sup>(a)</sup>		
Kükürt Oksit (SO <sub>3</sub> ) (%)	0 – 1	0 – 2	0,5 – 2,5	0,75 – 3	1,5 – 8,5	0,25
Kızdırma Kaybı (105 °C) (%)	-	-	1 – 2	-	-	2,5 <sup>(c)</sup>
Kızdırma Kaybı (105 – 950 °C) (%)	-	-	15 – 33	-	-	41 <sup>(c)</sup>
Karbon Di Oksit (CO <sub>2</sub> ) (%)	-	-	0,5 – 2,5	-	-	-
Serbest Karbon (%)	-	-	5 – 21	3 – 13	4 – 27	30 <sup>(b)</sup>
Isı Verme (kJ/kg)	-	-	3000 – 10000	-	-	-
Birleşmiş H <sub>2</sub> O (%)	-	-	5 – 7	-	-	-
Yanmış Kömür Atıkları Kimyasal Özellikleri	Ülkeler					
	İngiltere			Avustralya		
Silisyum Oksit (SiO <sub>2</sub> ) (%)	45 – 60			65 <sup>(a)</sup>		
Alüminyum Oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	21 – 31			25 <sup>(a)</sup>		
Demir Oksit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	4 – 13			3,5 <sup>(a)</sup>		
Titanyum Oksit (TiO <sub>2</sub> ) (%)	0,15 – 0,25			0,8 <sup>(a)</sup>		
Fosfor Penta Oksit (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (%)	-			0,04 <sup>(a)</sup>		
Kalsiyum Oksit (CaO) (%)	0,5 – 6			0,3 <sup>(a)</sup>		
Magnezyum Oksit (MgO) (%)	1 – 3			1 <sup>(a)</sup>		
Sodyum Oksit (Na <sub>2</sub> O) (%)	0,2 – 0,6			0,2 <sup>(a)</sup>		
Potasyum Oksit (K <sub>2</sub> O) (%)	2 – 3,5			3 <sup>(a)</sup>		
Kükürt Oksit (SO <sub>3</sub> ) (%)	0,1 – 5			0,03		
Kızdırma Kaybı (105 °C) (%)	-			0,26 <sup>(c)</sup>		
Kızdırma Kaybı (105 – 950 °C) (%)	2 – 6			0,3 <sup>(c)</sup>		
Serbest Karbon (C) (%)	-			0,18 <sup>(b)</sup>		

<sup>(a)</sup> Kül analizi, <sup>(b)</sup> Kök, <sup>(c)</sup> Kül ve nem oranı bir Avustralya'n makalesinden alınmıştır.

### Termik santral atıkları

#### Uçucu kül

Toz kömürünün yanmasıyla büyük bir miktarı çok ince taneli, bir miktarı da nispeten biraz daha iri boyutlara sahip kül taneleri ortaya çıkmaktadır. Çok ince tanelere sahip olan küller, yakıt gazlarıyla beraber bacadan dışarı çıkmak üzere hareket eder. Atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık % 75 – 80' i gazlarla birlikte bacadan çıkma eğilimi gösterir. Bu küllere uçucu kül denir [10, 11].

Uçucu küller: küçük, küresel, katı ve % 5' i içi boşluklu tanelerden oluşmaktadır. Uçucu kül tanelerinin boyutları 1 – 150 ( $\mu\text{m}$ ) arasında değişiklik gösterir. Genellikle kül gri renklidir ve yüksek oranda pişmemiş karbon ihtivasiyla koyulaşmaktadır. Normal olarak 2,1 – 2,7 ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) arasında değişen yoğunluğa sahiptirler. ASTM C 618 no.lu standart, uçucu külleri F ve C sınıfı olarak gruplar. F sınıfı uçucu küller antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilen termik santral atığıdır. C sınıfı uçucu küller, linyit veya düşük bitümlü kömürlerden elde edilir ve puzolanik özelliğinin yanı sıra kendiliğinden de bir miktar bağlayıcılık özelliğine sahiptirler. Ayrıca % 10' dan daha az kalsiyum oksit (CaO) içeren uçucu küller “düşük kireçli uçucu küller”, % 10' dan daha yüksek kalsiyum oksit (CaO) içerenler ise, “yüksek kireçli uçucu küller” olarak adlandırılır [24, 30, 32]. İngiltere'nin 22 farklı uçucu külü üzerinde yapılan araştırmada bu küllerin ortalama yoğunluğunun 1,98 – 2,38 ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) arasında ve ortalama özgül yüzeyinin 260 – 595 ( $\text{m}^2/\text{kg}$ ) arasında olduğu belirtilmektedir. Türkiye, İngiltere, Fransa, Güney Afrika ve Hindistan' da ortaya çıkan uçucu küllerin kimyasal özellikleri Tablo 3' de verilmiştir [10 – 13]

**Tablo 3.** Çeşitli ülkelerde ortaya çıkan uçucu küllerin kimyasal özellikleri [10 – 12]

Kimyasal Özellikler	F Sınıfı Uçucu Kül				
	Türkiye	İngiltere	Fransa,	Güney Afrika	Hindistan
Silisyum Oksit ( $\text{SiO}_2$ ) (%)	43,6 – 64,4	39 – 56	43 – 53	43 – 54	56,6
Alüminyum Oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (%)	19,6 – 30,1	20 – 34	17 – 20	27 – 36	26,39
Demir Oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (%)	3,8 – 23,9	5 – 16	5 – 10	2 – 8	5,93
Kalsiyum Oksit (CaO) (%)	0,7 – 6,7	1 – 5	4 – 11	2 – 13	1,37
Magnezyum Oksit (MgO) (%)	0,9 – 1,7	1 – 2	1 – 3	< 3	0,44
Kükürt Oksit ( $\text{SO}_3$ ) (%)	0 – 2,8	0,5 – 1,2	5 – 8	< 1	-
Sodyum Oksit ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) (%)	0 – 2,8	0,05 – 1,5	-	< 3	-
Kızdırma Kaybı (%)	0,4 – 7,2	1 – 25	7 – 9	1 – 12	7,50

#### Fırın taban külü

Uçucu küllerin gaz ile birlikte hareket edemeyecek kadar ağır olan iri taneleri fırının tabanına düşmektedir. Fırın tabanına düşen bu atıklara fırın taban külü denir. Fırın taban külünün kimyasal özelliklerine ilişkin fazla bilgi bulunmamakla birlikte uçucu kül kimyasal ve mineralojik yapısıyla benzerlik göstermektedir. İngiliz fırın taban külü gözenekli yapı, 300 (mm) ve daha büyük tane boyutludur. Amerikan fırın taban külünün kimyasal özellikleri Tablo 4' de verilmiştir [3, 10, 11].

**Tablo 4.** Fırın taban külü kimyasal özellikleri [3]

Kimyasal Özellikler	Amerika
	Fırın Taban Külü
Silisyum Oksit ( $\text{SiO}_2$ ) (%)	20 – 60
Alüminyum Oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (%)	10 – 35
Demir Oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (%)	5 – 35
Kalsiyum Oksit (CaO) (%)	1 – 20
Magnezyum Oksit (MgO) (%)	0,3 – 4
Sodyum Oksit ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) (%)	1 – 4
Potasyum Oksit ( $\text{K}_2\text{O}$ ) (%)	1 – 4
Sodyum Oksit ( $\text{SO}_3$ ) (%)	0,1 – 12

### Metal cürufu atıkları

#### Yüksek fırın (demir) cürufu

Yüksek fırınlarda ergitme ile üretilen demirden çıkan atık yüksek fırın cürufu olarak adlandırılır. Eritilmiş demir cürufunun birkaç farklı tipte soğutulmasıyla katı cüruf elde edilir. Cürufun hava' da soğumasına izin verilirse kristalli bir malzeme elde edilir. Yüksek fırın cürufu eriyiği üzerine püskürtülen suyla' da soğutulabilir. Cüruf, büyük miktarda su ile çok hızlı soğutulursa camsı granüle yüksek fırın cürufu oluşur. Yüksek fırın cürufu Pelletleme işlemiyle soğutulduğunda büyük boyutlu (4–15 mm) çok gözenekli ve kısmen kristalli bir yapı ortaya çıkar. Çeşitli ülkelerin yüksek fırın cüruflarının kimyasal özellikleri Tablo 5' de verilmiştir [3, 10, 12, 14].

**Tablo 5.** Çeşitli ülkelerdeki yüksek fırın cürufu kimyasal özellikleri [10, 12]

Ülkeler	Yüksek Fırın Cürufu Kimyasal Özellikleri (%)												
	Silyum Oksit (SiO <sub>2</sub> )	Alüminyum Oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Kalsiyum Oksit (CaO)	Demir Oksit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Magnezyum Oksit (MgO)	Titanyum Oksit (TiO <sub>2</sub> )	Demir Mono Oksit (FeO)	Manganez Oksit (MnO)	Sodyum Oksit (Na <sub>2</sub> O)	Potasyum Oksit (K <sub>2</sub> O)	Kükürt (S)	Fosfor Oksit (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	(CaO) / (SiO <sub>2</sub> )
Türkiye	34 - 36	13-19	34-41	0,3-2,5	3,5- 7	-	-	1 - 2,5	-	-	1,0 - 2,0	-	-
Avustralya <sup>(a)</sup>	33– 37	15–18	39–44	-	1 – 3	0,6	0,7	0,3 – 1,5	0,2	0,5	0,6 – 0,8	-	-
Amerika	34– 38	11–15	45–47	-	1 – 3	-	1,3-4,5	-	-	-	-	-	-
Almanya <sup>(b)</sup>	35	12,2	41	-	8	-	0,25	0,5	1,2	0,6	-	-	-
Norveç	34– 38	7 – 10	40–48	-	6 – 13	0,7–1,1	-	-	0,1 – 0,4	-	-	-	-
İngiltere <sup>(c)</sup>	31 - 36	9 – 20	33–45	-	4 – 15	-	-	-	-	-	0,8 – 2	-	-
İngiltere <sup>(d)</sup>	34	13,5	40,9	-	5,5	0,8	0,5	0,8	0,7	0,8	0,53	0,6	1,2
İsveç	34– 39	7 – 15	35–44	-	4 – 12	-	0,5–1,2	-	0 – 3	0,9 – 1,2	-	-	-
Fransa	31– 36	11–21	39–45	-	4 – 8	0,4-0,7	0,1– 1	0,1 – 1,2	0,2–0,8	0,2–1,5	0,7 – 1	-	-

<sup>(a)</sup> Dört cürufun ortalaması, <sup>(b)</sup> Tipik cüruf analizi, <sup>(c)</sup> Dokuz cürufun ortalaması, <sup>(d)</sup> Tipik cürufta sülfür, SO<sub>3</sub> olarak çözünabilir sülfat, <sup>(e)</sup>Tipik cüruf kimyasal analizi

#### Çelik üretim cürufu

Pik demir ve çelik üretiminden atık olarak ortaya cüruf çıkar. Genellikle havada soğumasına izin verilen ve fırından uçan filtre edilmiş cüruf, çelik cürufu olarak adlandırılır. Karbon (C), silikon (Si), manganez (MnO), fosfor (F) ve sülfür (S) gibi kirleticiler cüruf içinde karmaşık oksitlere dönüşür. Birçok farklı işlemle çelik üretilmektedir. Çeşitli ülkelerdeki basit oksijen fırınında, elektrik ark ve ocak fırınında yapılan çelik üretiminden ortaya çıkan çelik cürufunun kimyasal özellikleri Tablo 6 ve Tablo 7' de verilmiştir [10].

**Tablo 6.** Basit oksijen fırını çelik cürufunun kimyasal özellikleri [10]

Kimyasal Özellikler (%)	Almanya <sup>(a)</sup>		Güney Afrika	Amerika <sup>(c)</sup>	İngiltere <sup>(b)</sup>	Kanada <sup>(d)</sup>
	Düşük Karbonlu	Yüksek Karbonlu				
Kalsiyum Oksit (CaO)	47,2	59,9	50 – 60	40,3	33 – 51	41,3
Silisyum Oksit (SiO <sub>2</sub> )	14,8	13,8	10 – 16	21,7	9 – 19	15,6
Demir Oksit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	15,8	10,5	17 – 23	16,3	24 – 45	20
Alüminyum Oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,6	2,10	-	3,8	0,5 – 3	2,2
Magnezyum Oksit (MgO)	1,5	0,9	2 – 3	4,4	0,5 – 4	6,9
Manganez Oksit (Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5,4	3,0	~ 4	4	3 – 10	10
Fosfor Penta Oksit (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	2,5	-	-	-	0,8 – 1,8	-
Sodyum Oksit (Na <sub>2</sub> O)	< 0,10	< 0,10	-	-	0,05 – 0,1	-
Potasyum Oksit (K <sub>2</sub> O)			-	-	0,02 – 0,1	-
Titanyum Oksit (TiO <sub>2</sub> )	-	-	~ 3	-	0,5 – 1	0,5
Kükürt Oksit (SO <sub>3</sub> )	< 0,25	< 0,25	-	-	0,05 – 0,4	-
Sülfür (H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> )	-	-	-	-	0,05 – 0,15	-
Flor (F)	-	-	-	-	0,02 – 0,5	-
<b>CaO/ SiO<sub>2</sub></b>	3,2	4,3	-	1,85	2,7 – 5,4	2,65
<b>Serbest Kireç</b>	0,6	13,3	-	-	-	3,3

<sup>(a)</sup> Tipik analiz, <sup>(b)</sup> Dokuz cüruf örneği, <sup>(c)</sup> Altı cüruf örneğin ortalaması, <sup>(d)</sup> İki haftadan fazla üretimin ortalaması

**Tablo 7.** Elektrik ark ve ocak fırını çelik cürufunun kimyasal özellikleri [10]

Kimyasal Özellikler	Elektrik Ark Fırın Cürufu		Ocak Fırın Cürufu		
	İngiltere <sup>(a)</sup>	Yeni Zelanda	Amerika <sup>(a)</sup>	Amerika <sup>(b)</sup>	Kanada <sup>(c)</sup>
Kalsiyum Oksit (CaO) (%)	31 – 50	55	25,1	36,17	25,8
Silisyum Oksit (SiO <sub>2</sub> ) (%)	11 – 24	20	25,6	18,02	16,4
Demir Oksit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	5 – 30	~ 20	18	17,46	26,0
Alüminyum Oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	5 – 18	-	6,7	8,54	2,4
Magnezyum Oksit (MgO) (%)	2 – 8	-	10,6	9,96	10
Manganez Oksit (Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	6 – 22	-	4	-	~ 13
Fosfor Penta Oksit (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (%)	0,03 – 1,8	-	-	-	-
Sodyum Oksit (Na <sub>2</sub> O) (%)	0,05 – 0,3	-	-	-	-
Potasyum Oksit (K <sub>2</sub> O) (%)	0,04 – 0,4	-	-	-	-
Titanyum Oksit (TiO <sub>2</sub> ) (%)	0,3 – 1	-	-	-	0,8
Kükürt Oksit (SO <sub>3</sub> ) (%)	0,04 – 0,9	-	-	-	-
Sülfür (H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ) (%)	0,04 – 0,4	-	-	-	-
Flor (F) (%)	0,1 – 2,6	-	-	-	-
<b>CaO/ SiO<sub>2</sub></b>	1,9 – 2,64	2,75	0,98	2,01	1,57
<b>Serbest Kireç (%)</b>	-	-	-	-	2,1

<sup>(a)</sup> Yedi cüruf örneği <sup>(a)</sup> Üç cürufun ortalaması  
<sup>(b)</sup> Literatür bilgisi  
<sup>(c)</sup> İki haftalık üretimin ortalaması



### Çeşitli endüstriyel atıklar

#### Alüminyum atığı

Kırmızı çamur olarak adlandırılan alüminyum atığı, alüminyumun boksitten ( $Al_2O_3 \cdot NH_2O$ ) elektroliz yoluyla elde edilmesi sırasında ortaya çıkar. Amerika’ da bazı alüminyum fabrikalarında atık olarak ortaya kahverengi çamur çıkar. Arkansas boksitinin işlenmesi sırasında siyah kum toplam atık miktarının % 8 – 18’ ini oluşturmaktadır. Avustralya fabrikalarında ise alüminyum elde edilirken çıkan atık kırmızı kumdur. Alüminyum atığının kimyasal özellikleri Tablo 8’ de, kurutulduktan sonraki mineralojik özellikleri Tablo 9’ da verilmiştir [10].

**Tablo 8.** Alüminyum atığının kimyasal özellikleri [10]

Kimyasal Özellikler	Yerli Maden				Kahverengi Çamur	Kırmızı Çamur
	Amerika	Avustralya			Amerika	Japonya
Alüminyum Oksit ( $Al_2O_3$ ) (%)	26,5	16	24	27	6,4	20±3
Demir Oksit ( $Fe_2O_3$ ) (%)	10,7	31,5	24	50	6,1	35±5
Silisyum Oksit ( $SiO_2$ ) (%)	22,9	34,5	16	9	23,3	15±2
Kalsiyum Oksit ( $CaO$ ) (%)	8,1	3	-	-	46,6	2±2
Sodyum Oksit ( $Na_2O$ ) (%)	11,8	2	8,5	-	4,1	0,4±0,2
Titanyum Oksit ( $TiO_2$ ) (%)	3,3	3	9	8	3	6±1
Kükürt Oksit ( $SO_3$ ) (%)	2,8	-	-	-	0,5	-
Kızdırma Kaybı (%)	12,9	10	13 – 15	-	7,3	11±2

**Tablo 9.** Alüminyum atığının kurutulduktan sonraki mineralojik özellikleri [10]

Kimyasal Özellikler	Japon Çamuru	Jamaika Boksitinden Kırmızı Çamur
Hematit ( $Fe_2O_3$ ) (%)	35±3	75 – 80
Goethit ( $\alpha Fe_2O_3 \cdot H_2O$ ) (%)		
Kuvars ( $SiO_2$ ) (%)	4±1	-
Anataz ( $TiO_2$ ) (%)	6±1	-
Sodalit ( $3Na_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot nH_2O$ ) (%)	50±4	-
Kalsit ( $CaCO_3$ ) (%)	-	5 – 10
Beohemit ( $AlO(OH)$ ) (%)	-	3 – 5

Alüminyum atıkları genellikle demir oksit bakımından zengindir (Tablo 8). Japonya kırmızı alüminyum atıkları, 11 – 12 arası pH’ a, yaklaşık 2,9 ( $gr/cm^3$ ) kuru yoğunluğa ve 10 – 30 ( $\mu m$ ) arasında tane boyutuna sahiptir [10].

#### Silis dumanı (Silika tozu)

Silis dumanı (silika tozu), demirli silikon gibi metal alaşımlarının üretilmesinde ortaya çıkmaktadır. Norveç’ de üçlü alaşım elde edilmesi sırasında ortaya çıkan silis dumanının kimyasal özellikleri Tablo 10’ da verilmiştir [10, 11].

**Tablo 10.** Silis dumanı kimyasal özellikleri [11]

Kimyasal Özellikler (%)	Silika Alaşımli Metal	%90 Demir-Silika Alaşımli Metal	%75 Demir-Silika Alaşımli Metal
Silisyum Oksit (SiO <sub>2</sub> )	94 – 98	92 – 95	86 – 90
Silisyum Karbon (SiC)	0,2 – 1,0	0,2 – 0,5	0,1 – 0,4
Karbon (C)	0,2 – 1,3	0,5 – 1,2	0,8 – 2,3
Demir Oksit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,02 – 0,15	0,2 – 0,5	0,3 – 1,0
Alüminyum Oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,1 – 0,4	0,4 – 1,0	0,2 – 0,6
Kalsiyum Oksit (CaO)	0,08 – 0,3	0,1 – 0,5	0,2 – 0,6
Magnezyum Oksit (MgO)	0,3 – 0,9	0,5 – 1,2	1,0 – 3,5
Sodyum Oksit (Na <sub>2</sub> O)	0,1 – 0,4	0,2 – 0,7	0,8 – 1,8
Potasyum Oksit (K <sub>2</sub> O)	0,2 – 0,7	1,0 – 1,5	1,5 – 3,5
Diğer	0,1 – 0,5	0,4 – 0,8	0,5 – 0,9
Kızdırma Kaybı	0,8 – 1,5	0,7 – 2	2,0 – 4,0

Silis dumanının temel bileşeni şekilsiz (amorfl) silis' dir. Fiziksel özellikleri silisten farklı değildir. Özgül yüzeyi 22 (m<sup>2</sup>/gr) ve tane boyutunun % 85' i 1(µm)' den azdır. Yoğunluğu 0,150 – 0,250 (gr/cm<sup>3</sup>), özgül ağırlığı 2,2 – 2,25 (gr/cm<sup>3</sup>) arasındadır [10, 11].

*İki bölümden oluşan çalışmamın toplam sayfa sayısının 34' e ulaşması nedeniyle makalenin ilk bölümü, çeşitli endüstriyel atıklardan silis dumanının anlatılmasıyla sonlandırılmıştır. Makalenin ikinci bölümünde “Doğal olmayan puzolanlar (Endüstriyel atıklar)” ana başlığı altında “Çeşitli endüstriyel atıklar” alt başlığındaki “Karbonat ve kireç tortu atıkları” başlığından başlayarak, “Mineralojik Katkıların Kullanım Alanları” ve “Sonuçlar ve Tartışmalar” başlıkları anlatılacaktır.*

#### Bölüm Kaynakları

1. Kırgız, MS. Mermer ve tuğla endüstrisi atıklarının çimento üretiminde mineralojik katkı olarak kullanılması, 228 S., Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 2007.
2. Gimenez, S, Blanco, MT, Palomo, A., Puertas, F. Production of cement requiring low energy expenditure – An industrial test, **ZKG International**, 44 (1): 12–15, 1991.
3. Kreijger, PJ. Terminology, definition and classification of admixtures, **Materials and Structures**, 1 (2): 79–88,1968.
4. ASTM C 125, Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates, 1-4 S., **ASTM International**, Conshohocken, 2003.
5. ACI 116R – 90, Cement and concrete terminology, 1 – 82 S., **American Concrete Institute Report**, Michigan, 2008.
6. Neville, AM, Brooks JJ. Admixtures, S. 147 – 160, 1987, [Editörler: Neville, AM, Brooks JJ. Concrete technology, 431 S., **Longman Scientific & Technical**, Harlow Essex].
7. Mindess, S., Young, JF, Darwin, D. Mineral admixture and blended cement, S. 93 – 114, 2002, [Editörler: Mindess, S., Young, JF, Darwin, D. Concrete, Second Edition, 629 S., **Pearson Education Inc., Prentice Hall**, New Jersey].
8. Yeğınobalı, A. Katkılı betonmu, katkılı çimentomu, **Çimento ve Beton Dünyası**, 5 (30): 33 – 35, 2001.
9. Rouman, JC, Sarkar, LS, 21. Yüzyılın çimentoları, **Çimento ve Beton Dünyası**, 5 (30): 36 – 45, 2001.
10. Gutt, W, Nixon, PJ. Use of waste materials in the construction industry, **Materials and Structures**, 12 (70): 255 – 306, 1970.
11. Erdoğan, TY. Mineral katkı maddeleri, S. 169 – 208, 2003, Portland çimentoları ve diğer çimento türleri, S. 17 – 37, 2003. [Editörler: Erdoğan, TY. Beton, 741 S., **ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.**, Ankara].
12. Lewis, R., Sear, L., Wainwright, P., Ryle, R. Part 2 Cementitious additions, , S. 1-66, 2003, [Editörler: Newman, J., Choo, BS. Advanced concrete technology constituent materials, 272 S., **Elsevier Ltd.**, London].
13. ASTM C 618, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use mineral admixture in concrete”, 1 – 4 S., 2003, **ASTM International**, Conshohocken.
14. Tokyay, M. Cürufılar ve cürufılu çimentolar, 47 S., 2002, **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliđi, Ar – Ge Y97-2**, Ankara.