
Araştırma Makalesi / Research Article

Termik Santral Küllerinde Yanmamış Karbonun Pulverize Kömür Boyut Dağılımı ve Uçucu Madde İçeriği ile İlişkisi

Mehmet BİLEN*, Serdar YILMAZ

*Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak
(ORCID: 0000-0003-0960-9421) (ORCID: 0000-0003-0249-1600)*

Öz

Bu çalışmada, iki termik santral özelinde uçucu küller yanmamış karbon açısından incelenmiş ve elde edilen analiz sonuçları kömürün kısa analiz sonuçlarıyla ve kömürün öğütülme sonrası boyut parametreleriyle karşılaştırılmıştır. İncelenen ilk santral için, yanma kazanının aynı şartlar altında farklı kömür örnekleriyle çalıştığı bir süreç incelenirse ve bu süreçte küllerde farklı değerlerde yanmamış karbon tespit edilirse, bunun nedeninin daha çok kömüre ait nedenler olduğu düşünülebilir. Bu çalışmada, iki farklı santral değerlendirilmiş olup, 17 farklı uçucu madde içeriği olan kömür kullanan birinci santralde gözlemlenen 17 farklı yanmamış karbon değerinin ilişkisi kurulmuş ve sonuçlar kömürün uçucu madde içeriğinin yanmamış karbon üzerinde oldukça etkili olduğunu göstermiştir. İkinci santralde ise pulverize kömür örneklerinin boyut dağılımları incelenmiş ve boyut parametreleriyle yanmamış karbon arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Kömür boyut dağılımına ait D_{32} boyut parametresinin yanmamış karbon ile ilişkisinin anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yanmamış karbon, Kömür, Boyut parametreleri, Termik santral, Uçucu madde.

The Relationship of Unburned Carbon in Coal fired Power Plants with Pulverized Coal Size Distribution and Volatile Matter Content

Abstract

In this study, considering two specific coal fired power plants, fly ash samples were analyzed in terms of unburned carbon and amount of unburned carbon in these samples were compared to coal proximate analysis results and the size parameter results of coal samples after grinding. For the first power plant under investigation, if a period of same conditions of same boiler utilization of different types of coals considered, and if different amounts of unburned carbon is observed in fly ashes in that specific period, the reason behind either high or low amount of unburned carbons can be explained mainly by coal related factors. In this study, two different coal fired power plant were investigated and regarding the first one, 17 utilized coal type with different volatile matter content and their corresponding unburned carbon in ash is plotted and the obtained correlation between coal volatile matter and unburned carbon in ash showed that volatile matter content of coal is dominantly affecting the coal burnout. Regarding the second coal fired power plant investigated, pulverized coal samples collected are analyzed in terms of their size distribution and relationships between size parameters and unburned carbon were determined. It was concluded that, D_{32} size parameter shows one of the better relation between unburned carbon among other size parameters.

Keywords: Unburned carbon, Coal, Size Parameters, Power plant, Volatile matter

1. Giriş

Termik santrallerde yanmamış karbon, kömürde depolanan kimyasal enerjinin tam olarak iletim ara maddesine verilmemesiyle oluşan kısımdır ve bu kimyasal enerjiden tam olarak faydalanılamaması anlamına gelmektedir. Yanmamış karbon miktarı gerek uçucu külde gerekse kazan altı küllerde yanma rejimine ve yanma verimliliğine bağlı olarak değişmektedir. Yanmamış karbonun küllerin bünyesinde bulunması hem işletme olarak termik santralin elde edilebilecek nihai enerji miktarında bir kayıp hem

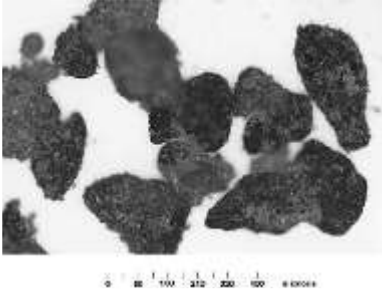
*Sorumlu yazar: mehmetubilen@yandex.com, mehmet.bilen@beun.edu.tr
Geliş Tarihi: 08.01.2020, Kabul Tarihi: 16.07.2020

de küllerin değerlendirilebilirliği anlamında bir yetersizlik olarak ortaya çıkmaktadır. Külün içerdiği yanmamış karbon oranı birçok nedene bağlıdır [1]. Bunlar;

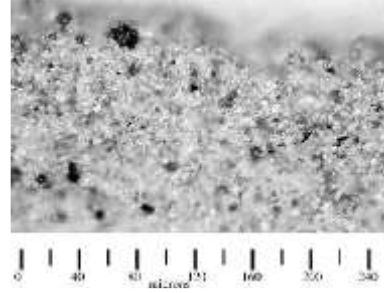
- Kömürün cinsi,
- Yakma kazanın dizaynı,
- Yakma şartları,
- Emisyon indirgeme teknolojileridir.

Enerji santrallerinde külde yanmamış karbon farklı miktarlarda olabilmektedir. Uçucu küldeki yanmamış karbon, termik santrallerde yakma verimini yansıtan önemli bir veridir [2]. Yanmamış karbon miktarları uçucu küllerde genelde daha fazladır ancak bu miktar yakma rejimine bağlı değişim göstermektedir. Bartonova [3] çalışmasına göre bitümlü kömürle çalışan bir santralde, yatak külünde yanmamış karbon miktarı %1.23 iken uçucu külde yanmamış karbon miktarı %5.57 olarak bulunmuştur. Deneysel ya da bilgisayarlı yollarla yanmamış karbon tahmin sistemi geliştirmek için birçok yaklaşım mevcuttur [4]. Moron [5] uçucu küldeki yanmamış karbonun, kömür karışımı için beslenen fazla hava oranıyla ilişkisini araştırmıştır [6]. Bartonova [3] çalışmasına göre yanmamış karbon miktarı, kömürün kimyasal kompozisyonundan, kömür petrografik özelliklerinden, kömür hazırlama yöntemlerinden gibi kömüre ait parametrelerle; yanma odası sıcaklığı, fazla hava miktarı, kazan içi kalma süresi gibi kazan dizaynına ait parametrelerle ilişkilidir [7, 8, 9, 10, 11]. Yanmamış karbon çeşitli fiziksel özellikler göstermektedir.

Şekil 1 ve Şekil 2’de küllerde bulunan yanmamış karbonun tipik doğası gösterilmiştir [1]. Küller kullanım potansiyeline göre ekonomik olarak düşük değerli olurlar ve bu tür küller uçucu madde giderme işlemi sırasında yumuşamazlar. Bu özelliklerinden dolayı keskin hatlı özelliklere sahip yanmamış karbon taneciklerine sahip olurlar. Diğer yandan bazı küller ise tam tersi olarak uçucu madde giderme işlemi sırasında yumuşama gösterirler. Bundan dolayı bu tür kömürlerden oluşan yanmamış karbon taneciklerinde “blow-holes” olarak adlandırılan delikler bulunmaktadır [1].



Şekil 1. Külde bulunan yanmamış karbon tanecikleri ($180 < d < 355 \mu\text{m}$) [1]



Şekil 2. Külde bulunan yanmamış karbon tanecikleri ($d < 45 \mu\text{m}$) [1]

Uçucu küllerdeki tüm yanmamış karbon örneklerinin tanecik boyutu $100 \mu\text{m}$ altında bulunmaktadır. Yanmamış karbonlar amorf bir yapıya sahiptir. Yanmamış karbon örneklerinin oluşum yoğunluk değerleri $0,15 \text{ gr/cm}^3$ civarındadır. Yanmamış karbon hafif bir malzemedir

Yanmamış karbon diğer karbon türleriyle karşılaştırıldığı zaman içerisinde ihtiva ettiği uçucu madde miktarının daha farklı olduğu görülür. Yanmamış karbon içinde bulunan uçucu madde miktarı, siyah karbon ve kalsine koka yakın miktarda, aktif karbondakinden ise daha az miktarda bulunmaktadır. Bu nedenle yanmamış karbonun tek başına yanması zordur. Karbon içerisindeki uçucu maddeler büyük oranda küçük yüzey gruplarına sahip, tam olarak karbonize olmamış hidrokarbonlar içerir [1].

Bu çalışma kapsamında iki ayrı santralden alınan veriler incelenmiş ve kömüre ait parametrelerle uçucu kül bünyesindeki yanmamış karbon miktarları ilişkilendirilmiştir. İlk santral farklı uçucu madde içeren 17 adet kömürün yakıldığı süreçte incelenmiş ve bu süreçte toplanan uçucu küllerin yanmamış karbon miktarları tayin edilmiştir. İlk santralde yapılan bu gözlem, 17 farklı kömürün yakıldığı süreçte operasyonel koşulların benzerlik taşıdığı varsayımıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise 2 ayrı ünitesi olan termik santralden değirmen çıkışlarından alınan öğütülmüş kömür örnekleri boyut açısından incelenmiş ve boyut parametreleriyle külde yanmamış karbon miktarları ilişkilendirilmiştir. Burada amaç kazana vardiya boyunca beslenen kömür dağılımını belirlemek ve bu dağılıma ait boyut parametreleriyle yanmamış karbonu ilişkilendirmektir. Kömüre ait parametrelerin yanmamış karbon açısından etkisi literatür çalışmalarında vurgulanmaktadır ancak bu etkinin

gözlemlenmesi ve sonuçların irdelenmesi literatürdeki eksiği tamamlaması da çalışmanın bir diğer amacını teşkil etmektedir.

2. Materyal ve Metod

Çalışma kapsamında iki farklı santralden kömür ve kül örnekleri alınmış ve birinci santralden alınan kömürlerin sadece uçucu maddeleri ikinci santralden alınan pulverize kömürlerin ise boyut dağılımları incelenmiştir. Alınan kül örnekleri ise yanmamış karbon açısından incelenmiştir.

2.1. Birinci Santralden Alınan Kömür ve Kül Örnekleri

Birinci santralden 17 farklı kömür örneği alınmış ve bunlar belli bir süreçte yakılmıştır. Bu süreçte operasyona ait parametrelerin sabit olduğu varsayılmış ve sisteme herhangi bir etki söz konusu olmamıştır. Toplanan bu kömürler uçucu madde içeriği açısından incelenmiştir. Kömür örneklerinin uçucu madde içerikleri analizi ASTM D 3175-07 [12] standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Kömürler santralde yakıldıktan sonra, yakılan kömüre karşılık gelen kül (uçucu kül) örnekleri toplanmıştır ve yanmamış karbon içeriği açısından incelenmiştir. Yanmamış karbon analizleri ise ASTM D7348-13 [13] yöntemi izlenerek yapılmıştır.

Kömür örneklerinde uçucu madde içeriği kuru bazda yapılmıştır. Ancak kömür örneklerinin nem içeriklerine göre orijinal kömürlerin uçucu madde içerikleri farklılaşabilmektedir. Santrale kömürler orijinal halleriyle beslenmekte ve boyut küçültme işlemlerinden sonra kazanda yanmaktadır. Kömürde uçucu madde içeriği kadar nem varlığı da kazan içinde yanmada ve kazan öncesi süreçlerde etkindir. Dolayısıyla, yapılacak yanmamış karbon ve uçucu madde kıyaslamalarında hem orijinal bazda hem de kuru bazda uçucu madde içeriğini ayrı ayrı değerlendirmek gerekmektedir. Çünkü uçucu maddelerin kömürden uzaklaşmasından önce nem kömürden uzaklaşır. Bu da enerji alan bir süreçtir. Kömürün yanması için verilen enerji toplamı, hem nemi hem de uçucuları uzaklaştırmak için kullanılır daha sonrasında da kömür yanmaya başladıkça enerji vermektedir. Kazan içi sistemi küçülterek bir parça kömürün yandığını düşünecek olursak, o parça kömürün tam yanması için verilecek enerji miktarı nem ve uçucu madde içeriği arttıkça artacaktır. Kazan içindeki bütün kömür parçacıkları için aynı gerçek söz konusudur.

2.2. İkinci Santralden Alınan Kömür ve Kül Örnekleri

İncelenen ikinci santral iki ayrı üniteden oluşmaktadır. Örnekler değirmen çıkışından, elektrostatik filtre (ESP) sıralarından ve uçucu kül silolarından her vardiyada dış bir müdahalenin en az olduğu bir süreçte üç gün boyunca alınmıştır. 2. ünite ve 3. ünite için numune alma noktaları ve numune alma sıklıkları Tablo 1’de yer almaktadır.

•Kömür stok sahasından alınan yaklaşık 1 ton kömürün standart örnek azaltma işlemleri takip edilerek yaklaşık 200 kilografa düşürülmüştür. Bu örnekte kömürün kısa analiz değerlendirilmesi yapılmıştır.

•Değirmen çıkışı numuneleri vardiya başında ve vardiya ortasında olmak üzere her vardiyada iki kez ‘burner’ denilen ve numune almanın havayla gerçekleştiği düzenek yoluyla alınmıştır. Pulverize kömür numunelerinin alınmasıyla paralellik gösteren uçucu kül numunelerinin alınması analizler ve kıyaslamalar için önemlidir.

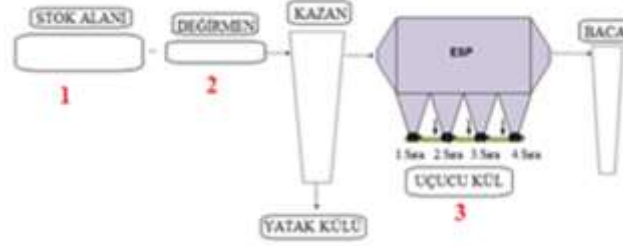
•Uçucu küller her vardiyada vardiya başı ve vardiya ortası olmak üzere iki kez alınmıştır.

Numune alımı akım şeması üzerinde numaralandırılmış noktalardan Tablo 1’de belirtilen sıklıklarda gerçekleştirilmiştir. Numunelerin alındığı süreçte santralde tek tip kömür kullanılmış ve santral sistemine müdahaleden olabildiğince kaçınılmıştır.

Tablo 1. Üniteler için numune alma noktaları ve numune alma sıklıkları

Numune Alındığı Yer	Numune Alma Sıklığı
Kömür Stok Sahası	Temsili numune alma
Değirmen Çıkışı (Pulverize Kömür)	Her vardiyada her değirmen çıkışından vardiya başı ve vardiya ortası olmak üzere iki defa numune alınmıştır.
Uçucu Kül	Her vardiyada 2 kez olmak üzere numune alınmıştır. Her sıradan 1. sıra, 2. sıra, 3. sıra, 4. sıra ve 1. ve 3. silolardan numune alınmıştır.

Şekil 3’de ikinci santrale ait örnek alma noktaları gösterilmektedir.

**Şekil 3.** İkinci santrale ait örnek alma noktaları

Kazana beslenen kömürün boyut dağılımını belirleyerek, boyut dağılımının etkisini anlamak üzerine çalışma yapılması planlandığı için çok sayıda numune ile çalışılmıştır. Değirmen çıkışından alınan pulverize kömür örnekleri Malvern Mastersizer S 2000 cihazıyla çalışılmış ve her bir vardiyada kazana beslenen kömürün boyut ortalamaları elde edilmiştir.

Boyut analizleri Malvern Mastersizer S 2000 cihazıyla yapılmış ve cihazın sağladığı 5 boyut parametresinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu boyut parametreleri ve anlamları;
 D_{10} : Numunenin %10’unun geçtiği boyut (μm), D_{50} : Numunenin %50’unun geçtiği boyut (μm), D_{90} : Numunenin %90’unun geçtiği boyut (μm), D_{32} : Hacim-yüzey ortalama çap (Sauter ortalaması)

$$D_{32} = \frac{\sum_1^n D_i^3 v_i}{\sum_1^n D_i^2 v_i} \quad (1)$$

D_{43} : Hacim-ağırlık ortalama çap (DeBroukere ortalaması)

$$D_{43} = \frac{\sum_1^n D_i^4 v_i}{\sum_1^n D_i^3 v_i} \quad (2)$$

şeklindedir.

Değirmen çıkışlarından alınan numunelerde her bir değirmene ait 4 brülörden çıkan numunelerle birlikte vardiyada; vardiya başı ve ortası olmak üzere alındığından ve 6 değirmen olduğundan 48 numune ile çalışılmıştır. Değirmen çıkışlarından numuneler 9 vardiya boyunca 2. ünite ve 3. ünitelerden alınmıştır. Uçucu kül örnekleri yanmamış karbon içeriğini bulmak üzere yakılmış ve yanmamış karbon analizleri gerçekleştirilmiştir.

3. Sonuçlar

Bu kısımda her bir santral için elde edilen sonuçlar ayrı ayrı ele alınmıştır.

3.1. Birinci Santral

Birinci santralde tek bir ünite mevcuttur ve 55 MW güç üretilmektedir. Bu santrale bir süreç içinde beslenen 17 kömür örneği uçucu madde içerikleri tespit edilmiştir. Bu kömürlerin uçucu madde içerikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Birinci santrale beslenen 17 farklı kömür örneğine ait uçucu madde içerikleri (Yılmaz 2019).

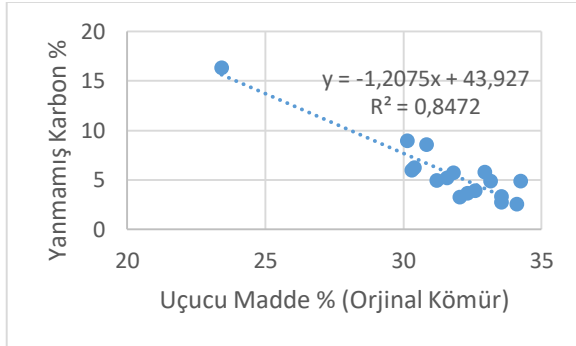
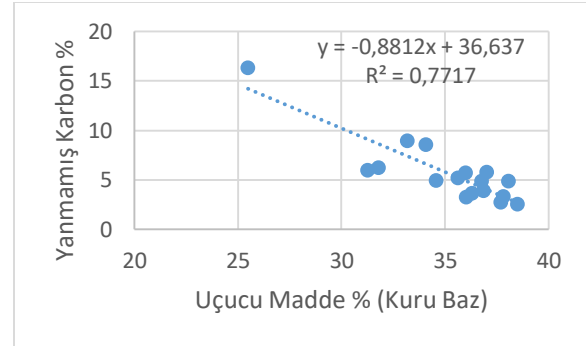
Kömür Örneği No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Uçucu Madde İçeriği (%) (Orj. Kömür)	23.42	32.96	30.14	30.31	34.24	33.56	34.1	33.55	30.84
Uçucu Madde İçeriği (%) (Kuru Kömür)	25.48	37.02	33.16	31.26	38.07	37.81	38.5	37.69	34.06
Kömür Örneği No	10	11	12	13	14	15	16	17	
Uçucu Madde İçeriği (%) (Orj. Kömür)	31.21	31.82	31.59	33.17	32.6	32.05	32.32	30.39	
Uçucu Madde İçeriği (%) (Kuru Kömür)	34.55	35.98	35.62	36.77	36.84	36.03	36.29	31.79	

Bu santrale incelen kömür örneklerinin yakılmasıyla elde edilen kül örnekleri yanmamış karbon açısından incelenmiş ve sonuçlar Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Birinci santrale beslenen 17 farklı kömür örneğine ait uçucu madde içerikleri (Yılmaz 2019).

Karşılık Gelen Kül Örneği No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Yanmamış Karbon (%)	16.31	5.79	8.95	5.99	4.89	3.31	2.52	2.72	8.55
Karşılık Gelen Kül Örneği No	10	11	12	13	14	15	16	17	
Yanmamış Karbon (%)	4.92	5.71	5.22	4.88	3.92	3.28	3.65	6.22	

Tablo 2 ve Tablo 3’de elde edilen birleştirilerek yanmamış karbonun uçucu madde ile olası ilişkileri belirlenmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5’de bu ilişkiler gösterilmiştir.

**Şekil 4.** Uçucu Madde (Orj. Baz) (%) ve yanmamış karbon (%).**Şekil 5.** Uçucu Madde (Kuru Baz) (%) ve yanmamış karbon (%).

Şekil 4 ve Şekil 5 incelendiğinde yanmamış karbon miktarı kömürün uçucu madde içeriğiyle önemli ölçüde ilişkilidir. Orijinal kömür örnekleriyle 0.84 olan ilişki katsayısı kuru kömür örneklerinde 0.77 olarak bulunmuştur. Bunun sebebi ise kömürün nem içeriğinin de yanmamış karbon miktarında etkili olduğu gerçeği olarak düşünülmektedir.

3.2. İkinci Santral

3.2.1. Kısa Analiz

Stok sahasından alınan örnek menşei Kolombiya olan 170 000 tonluk kömürü temsil eden bir numunedir. Stok sahasından alınan örneğin kısa analizi yapılmış ve Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Stok sahasından alınan kömürün kısa analiz sonuçları.

Analiz	Kuru Kömür	Orijinal Kömür
Nem (%)	-	14,63
Kül (%)	9,52	8,13
Uçucu Madde Miktarı (%)	27,49	24,71
Sabit Karbon (%)	51,89	46,64
Toplam Kükürt (%)	0,44	0,40
Üst Isıl Değer (Kcal/kg)	6628	5958
Alt Isıl Değer (Kcal/kg)	6403	5755

Numune orijinal bazda %8.13 kül, %24.71 uçucu madde, %46.64 sabit karbon içermektedir. Numunenin üst ısıl değeri 5958 kcal/kg'dır. Nem miktarının %14 civarında olması numunenin şubat aylarında temin edilmesi ve numune sürecindeki hava koşullarının etkisi olduğu söylenebilir. Kısa analizleri yapılan kömürün alt bitümlü kömür olduğu tespit edilmiştir.

3.2.2. Değirmen Çıkışlarından Alınan Kömür Örneği Çalışmaları

Değirmen çıkışlarından her vardiyada, vardiya başı ve vardiya ortası olmak üzere iki kez örnek alınmıştır ve alınan bu örneklerin ayrı ayrı boyut dağılımları belirlenmiştir [14]. Tablo 5'de örnek bir vardiyaya ait değirmen çıkışı numunelerinin örnek bir vardiyaya ait analiz sonuçları verilmiştir.

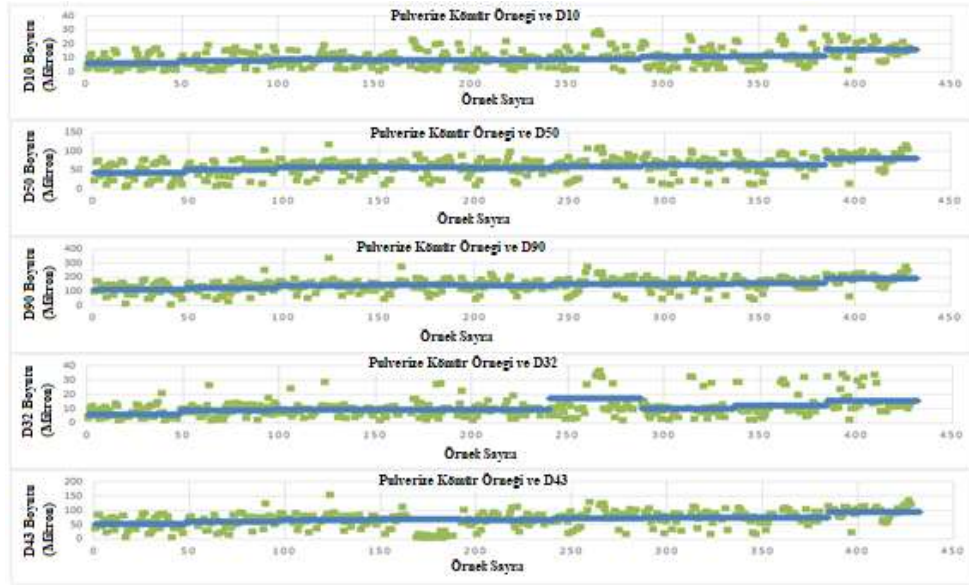
Tablo 5. Değirmen çıkışı numunelerinin örnek bir vardiyaya ait analiz sonuçları

Tarih: 13.02.2013, Çarşamba, Saat:17:00 Ünite:2						Tarih: 13.02.2013, Çarşamba, Saat:21:00, Ünite:2					
(Ç17002a1:Çarşamba,1700, 2 ünite, A Değirmeni, 1.brülör)											
Numune Kodu	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	D ₃₂	D ₄₃	Numune Kodu	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	D ₃₂	D ₄₃
Ç17002a1	8.34	50.26	110.82	9.16	56.19	Ç21002a1	14.73	75.42	166.30	11.37	84.66
Ç17002a2	8.02	59.55	150.96	8.49	71.27	Ç21002a2	15.62	75.40	161.58	13.14	82.97
Ç17002a3	11.34	68.21	158.06	10.17	78.20	Ç21002a3	6.11	43.16	105.21	6.96	50.64
Ç17002a4	8.10	49.86	114.75	8.73	57.22	Ç21002a4	7.00	47.73	109.85	8.41	54.55
Ç17002b1	5.59	49.23	126.08	7.11	58.65	Ç21002b1	12.56	78.84	190.89	10.14	92.43
Ç17002b2	5.90	53.24	128.96	7.70	61.35	Ç21002b2	17.31	80.06	170.25	13.85	88.53
Ç17002b3	5.36	36.51	94.67	12.27	44.25	Ç21002b3	*	*	*	*	*
Ç17002b4	5.93	48.15	118.85	7.36	56.66	Ç21002b4	8.37	60.10	137.69	9.56	68.23
Ç17002c1	9.59	54.05	120.25	9.11	60.91	Ç21002c1	14.34	68.29	157.85	12.50	79.06
Ç17002c2	12.00	60.81	134.44	10.79	68.34	Ç21002c2	14.04	67.79	151.43	12.19	76.76
Ç17002c3	2.84	21.27	65.28	4.04	28.80	Ç21002c3	2.29	17.03	52.70	3.49	23.94
Ç17002c4	2.63	19.01	62.24	3.81	27.15	Ç21002c4	6.37	49.98	125.20	7.44	59.26
Ç17002d1	5.01	39.23	123.20	6.26	53.37	Ç21002d1	8.10	59.12	139.17	8.96	68.05
Ç17002d2	5.46	46.49	124.79	6.65	57.18	Ç21002d2	13.35	69.07	146.81	12.86	76.19
Ç17002d3	13.67	75.28	159.35	12.03	82.45	Ç21002d3	10.06	51.79	115.53	9.73	58.93
Ç17002d4	18.76	69.29	128.79	26.33	72.33	Ç21002d4	12.98	68.10	148.35	11.82	75.93
Ç17002e1	0.58	5.42	41.09	1.59	15.13	Ç21002e1	1.14	13.65	89.93	2.39	31.95
Ç17002e2	2.07	32.65	164.88	3.20	60.61	Ç21002e2	17.88	102.82	253.33	12.26	121.68
Ç17002e3	1.09	11.23	61.97	2.28	23.10	Ç21002e3	7.45	59.74	154.48	7.55	72.31
Ç17002e4	1.12	11.02	57.93	2.29	21.84	Ç21002e4	10.02	70.33	163.50	9.73	80.40
Ç17002f1	4.23	31.96	98.44	5.45	43.62	Ç21002f1	8.79	64.25	149.97	6.28	73.51
Ç17002f2	3.95	41.00	130.50	5.25	55.60	Ç21002f2	10.96	63.86	150.77	10.91	74.11
Ç17002f3	1.20	8.97	29.52	2.27	13.04	Ç21002f3	9.04	41.26	102.40	17.19	49.56
Ç17002f4	4.63	28.89	81.96	5.73	38.45	Ç21002f4	7.70	63.72	154.27	8.41	73.82
ortalama	6.14	40.48	107.82	7.42	50.23	ortalama	10.27	60.50	143.36	9.87	70.32
Vardiya ortalaması: (D₁₀=8.20), (D₅₀=50.49), (D₉₀=125.60), (D₃₂=8.65), (D₄₃=60.28), * Numune alınmamıştır.											

Boyut Analizleri Malvern Mastersizer S 2000 cihazıyla yapılmıştır. Mastersizer cihazı ile hazırlanan yaklaşık 800 numunenin analizleri su ortamında yapılmıştır.

Malvern Mastersizer cihazından alınan herhangi bir vardiyadaki örnek boyutlandırma sonuçları incelendiğinde ilgililenen D₁₀, D₅₀, D₉₀, D₃₂, D₄₃ değerleri görülmektedir. Bu boyut parametreleri D₁₀, D₅₀, D₉₀, D₃₂, D₄₃ her bir numune için belirlenmiş ve her bir vardiyadaki kazana beslenen kömürlerin ortalama boyut parametreleri aritmetik olarak elde edilmiştir [14]. Bu analizler sonucunda Tablo 6'da 2. ve 3. ünitenin 9 vardiya boyunca ortalama boyut parametre sonuçları verilmiştir. Tablo 7'de ise her

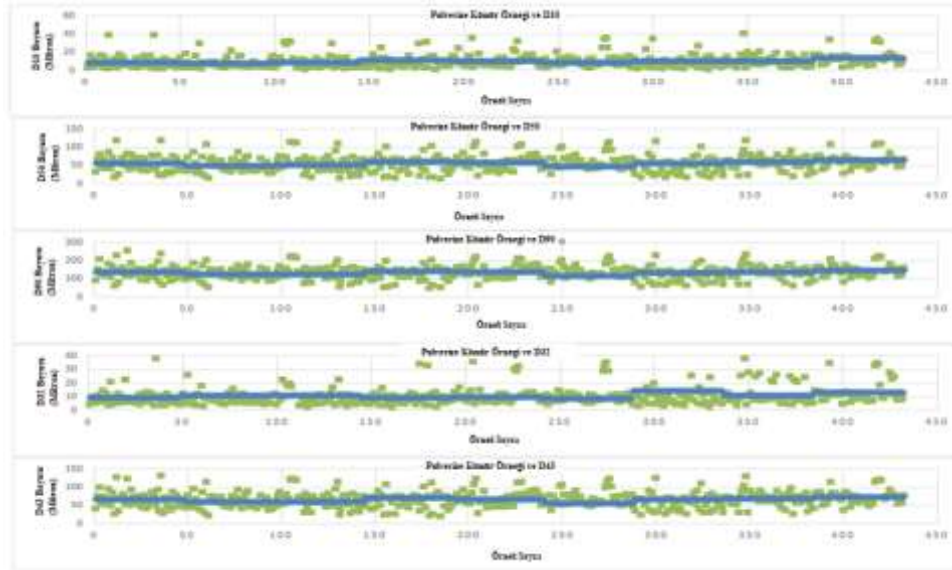
bir üniteden 9 vardiya boyunca gözlemlenen yanmamış karbon değerleri tablolaştırılmıştır. Şekil 6 ve Şekil 7’de ise pulverize kömür örneklerinin boyut parametrelerinin değişimi 9 vardiya boyunca her iki ünite için verilmiştir.



Şekil 6. Ünite 2 için 9 vardiya boyunca boyut parametrelerindeki değişim (Mavi çizgiler vardiya bazındaki ortalamaları göstermektedir) [15]

Tablo 6. 2. Ünite için 9 vardiya boyunca boyut parametre sonuçları [15]

Ünite No	Vardiya No	D ₁₀ (µm)	D ₅₀ (µm)	D ₉₀ (µm)	D ₃₂ (µm)	D ₄₃ (µm)
Ünite 2	1. Vardiya	6.38	42.06	114.44	6.02	52.72
	2. Vardiya	8.21	50.49	125.6	8.65	60.28
	3. Vardiya	9.16	56.79	141.3	9.26	67.56
	4. Vardiya	8.74	57.34	147.95	9.2	69.14
	5. Vardiya	8.6	56.19	141.33	9.27	67.21
	6. Vardiya	9.51	59.7	151.56	17.19	71.75
	7. Vardiya	10.99	63.88	155.97	10.15	75.24
	8. Vardiya	11.64	64.11	159.15	11.99	76.42
	9. Vardiya	15.99	81.17	191.6	15.72	94.32
Ünite No	Vardiya No	D ₁₀ (µm)	D ₅₀ (µm)	D ₉₀ (µm)	D ₃₂ (µm)	D ₄₃ (µm)
Ünite 3	1. Vardiya	9.09	56.19	137.88	9.01	66.42
	2. Vardiya	7.69	50.13	125.57	10.92	59.72
	3. Vardiya	9.08	51.18	123.84	11.13	60.23
	4. Vardiya	11.48	61	144.42	9.49	70.95
	5. Vardiya	10.27	58.26	136.05	9.65	67.23
	6. Vardiya	8.5	47.21	118.18	8.67	56.65
	7. Vardiya	10.44	57.16	134.99	14.16	66.35
	8. Vardiya	10.81	61.22	140.12	10.96	69.71
	9. Vardiya	13.52	64.2	147.53	13.17	73.76

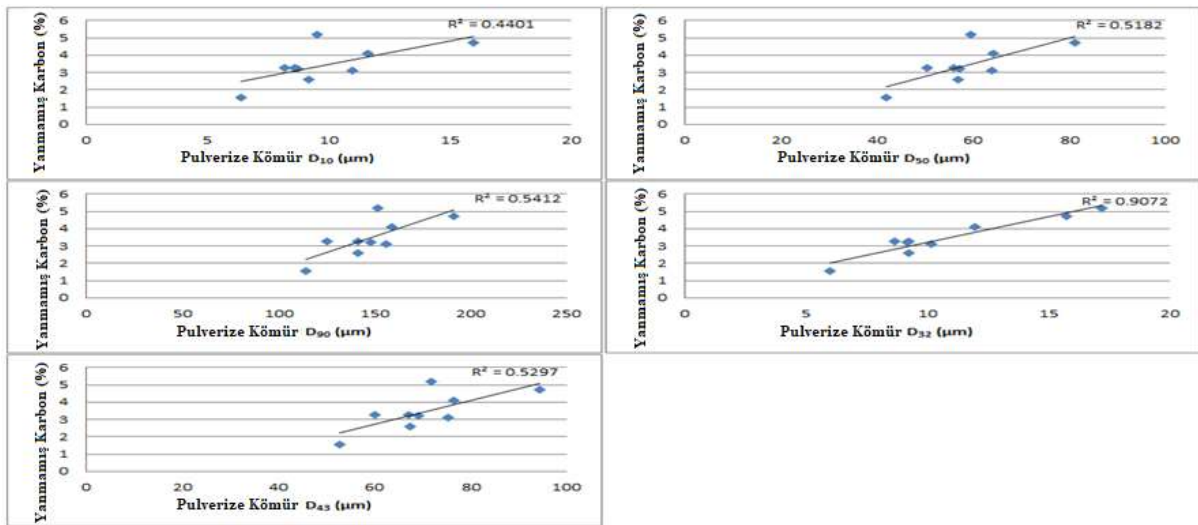


Şekil 7. Ünite 3 için 9 vardiya boyunca boyut parametrelerindeki değişim (Mavi çizgiler vardiya bazındaki ortalamaları göstermektedir) [15]

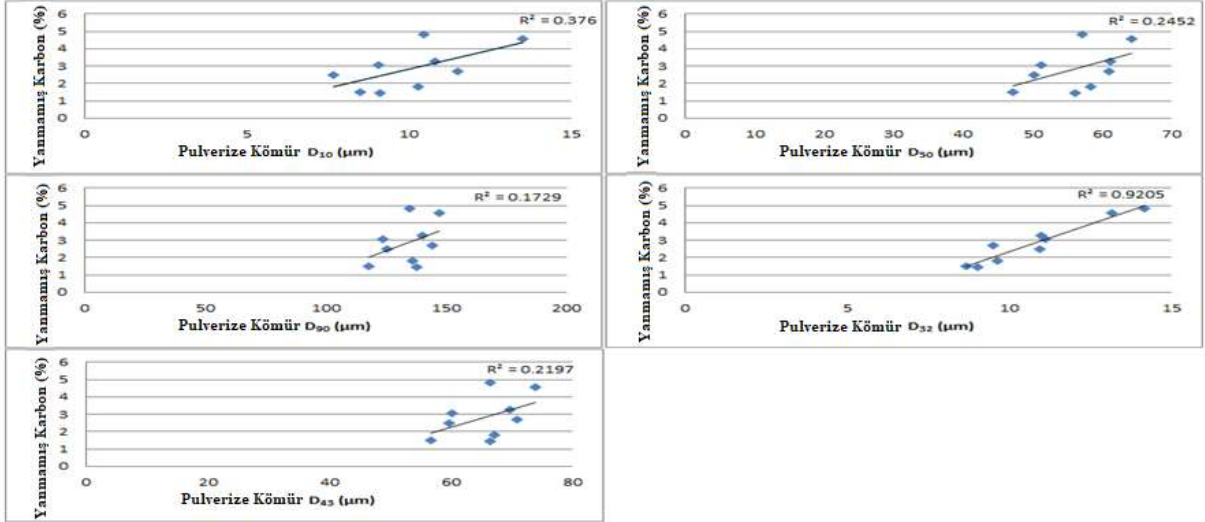
Tablo 7. İki ünite (2. ve 3. Ünite) için 9 vardiya boyunca gözlemlenen yanmamış karbon miktarları (%) [15]

		1. Vardiya	2. Vardiya	3. Vardiya	4. Vardiya	5. Vardiya	6. Vardiya	7. Vardiya	8. Vardiya	9. Vardiya
Yanmamış Karbon	Ünite 2	1.53	3.26	2.57	3.21	3.24	5.2	3.13	4.11	4.72
	Ünite 3	1.44	2.5	3.08	2.68	1.79	1.5	4.84	3.27	4.58

Şekil 8 ve Şekil 9’da ise her iki ünite için (sırayla 2. ve 3. ünite) pulverize kömür örneklerinin boyut parametreleri ile 9 vardiya boyunca küllerde gözlemlenen yanmamış karbon değerleri kıyaslanmıştır.



Şekil 8. Ünite 2 için 9 vardiya boyunca her bir boyut parametresinin (D_{10} , D_{50} , D_{90} , D_{32} , D_{43}) yanmamış karbon (%) miktarıyla ilişkisi [15]



Şekil 9. Ünite 3 için 9 vardiya boyunca her bir boyut parametresinin (D₁₀, D₅₀, D₉₀, D₃₂, D₄₃) yanmamış karbon (%) miktarıyla ilişkisi [15].

Şekil 8 ve 9 incelendiğinde, kömür boyut parametreleriyle kazanda yanarak elde edilen kül örneklerindeki yanmamış karbon miktarlarının ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle D₃₂ parametresi her iki ünite için de 0.90 mertebesinde bir ilişki katsayı göstermiştir. 2 no'lu ünite için boyut parametreleri ile külde yanmamış karbon daha anlamlı ilişkiler göstermiştir.

4. Tartışma ve Değerlendirme

Bu çalışma kapsamında, iki farklı santral farklı kömür özelliklerinin yanmamış karbon üzerinde etkisi araştırılarak incelenmiştir. Bu kapsamda ilk santralden 17 farklı kömür örneği ve bunların yanması sonucu oluşan 17 kül örneği toplanmıştır. Toplanan bu örnekler çalışmanın ilk aşamasında uçucu madde ile yanmamış karbon arasındaki ilişkinin tespiti için kömür örnekleri uçucu madde içeriği açısından kül örnekleri ise yanmamış karbon miktarları açısından incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, yanmamış karbon miktarları sırasıyla kuru bazdaki uçucu madde içeriği ve orijinal kömürdeki uçucu madde içeriğiyle anlamlı ilişkiler (0.77 ve 0.84; R²=0.77 ve R²=0.84) katsayılı ilişkiyle) vermiştir. İlişkiler gözlemlendiğinde uçucu madde içeriği arttıkça yanmamış karbonun azaldığı görülmektedir, bu da kömürün uçucu maddesinin yanma sırasında kömürün tam yanmasına yardımcı olduğuyla açıklanabilir. Yanma sırasında uçucu madde uzaklaşırken kömür daha gözenekli hale gelmekte ve oksijen daha kolay kömürün iç yapısına kadar nüfus edebilmektedir. Kuru bazda daha düşük olan ilişkinin nedeni kömürün nem içeriğinin de yanmamış karbon miktarında etkili olabileceğini düşündürmektedir. Kömür nem içeriği kömürün ilk ısınması sırasında ilk uzaklaşan kısımdır ancak bunda da nispeten bir enerji gerekir. Dolayısıyla kömürün tam yanması için gereken enerjinin küçük bir kısmı da olsa nem içeriğinin uzaklaşması için kullanılmakta ve yanma nispeten tamamlanmamış olarak kalmaktadır.

Çalışmanın ikinci kısmında ise, iki farklı üniteyle enerji üretimi yapan yerel bir santral çalışılmıştır. Bu santralden alınan öğütülmüş ya da diğer bir deyişle pulverize kömür örnekleri boyut dağılımları elde edilmiş ve her bir numuneye ait boyut parametreleri belirlenmiştir. Kazanda yanan kömürü temsil etmek amacıyla çok sayıda pulverize kömür örneği alınmış ve vardiya bazında boyut parametreleri ortalamaları belirlenmiştir. Her bir vardiyada yanma sonucu oluşan uçucu kül örnekleri de toplanmış ve yanmamış karbon içerikleri tespit edilmiştir. Elde edilen kömüre ait boyut parametresi sonuçları ile yanmamış karbon miktarları kıyaslanmıştır. Kıyaslamalar özellikle D₃₂ boyut parametresinin yanmamış karbon miktarlarıyla anlamlı sonuçlar verdiğini göstermiştir. D₃₂ boyut parametresi tanımlandığı şekliyle kömürlerin hacim yüzey ortalamasıdır. Dolayısıyla bu boyut parametresi ile yanmamış karbon arasında ilişki olması normaldir, çünkü kömür parçacıklarının

yüzeyleri büyüdükçe ve hacimleri azaldıkça daha iyi yanacakları bilinmektedir. Düşük D_{32} değerlerinde düşük yanmamış karbon miktarının olması da bu yüzden anlaşılabilir bir durumdur.

Bu çalışmayla termik santral enerji verimliliği dikkate alındığında kömüre ait parametrelerin etkisi daha iyi bilinecektir. Elde edilen sonuçların, gerek konu ile ilgili araştırmacılar için gerekse santral operatörleri için faydalı olacağı düşünülmektedir.

Yazarların Katkısı

Mehmet BİLEN pulverize kömürlerin boyut parametreleri ile yanmamış karbon arasındaki ilişkilerin araştırılmasında katkıda bulunmuştur. Mehmet BİLEN deneysel olarak pulverize kömürlerin boyut parametrelerini belirlemiş ve küllerde yanmamış karbon tayinini gerçekleştirmiştir. Serdar YILMAZ ise kömürlerin uçucu madde içeriği ile yanmamış karbon arasındaki ilişkileri araştırmıştır ve bu kapsamdaki deneyleri yapmıştır. Deneyler için gerekli koşulların sağlanması Serdar YILMAZ yürütücülüğünde, her iki konuya ait deneysel verilerin yorumlanması ise Mehmet BİLEN yürütücülüğünde gerçekleşmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Volkan S. 2006. Afşin-Elbistan termik santrali uçucu küllerinden yanmamış karbonun geri kazanımı. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [2] Yan W., Li J. 2009. Modelling of the unburned carbon in fly ash. EPE, 1: 90-93.
- [3] Bartonova L., Klika Z., Pears D.A. 2006. Characterization of unburned carbon from ash after bituminous coal and lignite combustion in CFBs. Fuel, 86: 455-463.
- [4] Pallarés J., Arauzo I., Teruel E. 2009. Development of an engineering system for unburned carbon prediction. Fuel, 88: 187-194.
- [5] Moroń W. 2007. In combustion characteristics of blended coals, third European combustion meeting, Proceedings of the European Combustion Meeting: United Kingdom. 10.1094/PDIS-91-4-0467B
- [6] Lee B.H., Eddings E.G., Jeon C.H. 2012. Effect of Coal Blending Methods with Different Excess Oxygen on Unburned Carbon and NO_x Emissions in an Entrained Flow Reactor. Energy Fuels, 26: 6803-6814.
- [7] Granite E., Pennline H. 2000. In: Proceedings of the technical sessions presented by the Conference on carbon on utility fly ash. May 16, 2000, Pittsburgh, USA.
- [8] Li Y., Zhang J.S., Liu Q., Lu J.L., Yue G.X., Sarofim A.F., Beér J.M., Lee Y.Y., Eliasson B. 2001. A study of the reactivity and formation of the unburnt carbon in CFB fly ashes. Dev Chem Eng Mineral Process, 9: 301-312.
- [9] Shibaoka M. 1986. Carbon content of fly ash and size distribution of unburnt char particles in fly ash. Fuel, 65: 449-450.
- [10] Stubington J.F., Wang A.L.T. 2000. Unburnt carbon elutriation from pressurised fluidised bed combustion of Australian black coals. Fuel, 79: 1155-1160.
- [11] Yılmaz S. 2019 The Relationship between Unburned Carbon Levels in Coal Combustion Ash and Volatile Matter Content in Coal. Combustion Science and Technology, 1-10.
- [12] ASTM D3175-07, 2007. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. ASTM International, West Conshohocken, PA, <https://doi.org/10.1520/D3175-07>.
- [13] ASTM D7348-13, 2013. Standard Test Methods for Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues. ASTM International, West Conshohocken, PA, <https://doi.org/10.1520/D7348-13>.

- [14] Bilen M. 2013. Eren Enerji Zonguldak Termik Santrali Küllerinin Yanmamış Karbon Bakımından Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [15] Bilen M., Kizgut S. 2016. Modeling of unburned carbon in fly ash and importance of size parameters. Fuel Processing Technology, 143: 7-17.