



Kozlu taşkömürünün koklaşma özelliklerine oltu linyiti ilavesinin etkisi

Effect of oltu lignite addition on coking properties of kozlu hard coal

Jale Naktiyok^{1*}, Merve Korkmaz, Kübra Yanık¹

¹Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye.
jalenaktiyok@atauni.edu.tr, mrvekorkmaz@hotmail.com, ynkbr.25@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 06.06.2025
Kabul Tarihi/Accepted: 10.10.2025

Düzeltilme Tarihi/Revision: 28.08.2025

doi: 10.65206/pajes.73668
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Ülkemizde kok üretimi için kullanılan taşkömürü rezervleri oldukça sınırlıdır. Ancak koklaşmayan linyit rezervleri ise oldukça yüksektir. Linyitlerin taş kömürlerine ilave edilerek kok üretiminde kullanılabilmesi için bu karışımların koklaşabilme özelliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Erzurum Oltu linyiti ve Zonguldak Kozlu taşkömürü ve bu kömürlerin belirli oranlarda hazırlanan karışımları kullanılmıştır. Ham kömür ve kömür karışımlarının koklaşma kalitesini belirleyen nem içeriği, kül, uçucu madde, petrografik analiz, serbest şişme indeksi, Gray-King kok testi, dilatasyon ve plastisite (akışkanlık) gibi çeşitli parametreler incelenmiştir. Oltu kömüründe maseral bileşiminin %75 oranında hüminitten oluşması bu kömürün düşük ranklı karakterini, Kozlu kömürünün %65 vitrinit içeriği yüksek ranklı ve koklaşabilir karakterini göstermektedir. Mikrolitotip bileşimleri de bu durumu desteklemektedir. Kömürlerin ve karışımlarının serbest şişme indeksi testinde, %100 Oltu linyitinin hiç şişme göstermediği, %100 Kozlu kömürünün ise iyi bir koklaşma özelliğini yansıtan 6 FSI değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Gray-King kok testinde, Oltu linyiti tek başına bir kok tipi üretmezken, %100 Kozlu kömürü ve %20 Oltu-%80 Kozlu karışımı G tipi bir kok üretimi sağlamıştır. Akışkanlık testleri, Oltu linyitinin tek başına hiçbir plastisite veya akışkan davranış göstermediğini, Kozlu taş kömürünün ise 87°C'lik geniş bir plastik aralık ve 980 DDPM'lik (dakikada kadran bölümü) maksimum akışkanlık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Genleşme testlerinde, Oltu linyiti herhangi bir genleşme olmadan yumuşama ve büzülme davranışı göstermiş, Kozlu kömürü ise yumuşama ve büzülmenin yanında %+118'lik önemli bir genleşme oranı göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Koklaşma, karışım, koklaşma parametreleri

Abstract

In our country, hard coal reserves used for coke production are quite limited. However, non-coking lignite reserves are quite high. In order for lignites to be added to hard coals and used in coke production, the coking properties of these blends should be determined. In this study, Erzurum Oltu lignite and Zonguldak Kozlu hard coal and blends of these coals prepared at certain ratios were used. Various parameters such as moisture content, ash, volatile matter, petrographic analysis, free swelling index, Gray-King coke test, dilatation and plasticity (fluidity) which determine the coking quality of raw coal and coal blends were investigated. The 75% huminite content of the maceral composition in the Oltu coal indicates its low-ranking character, while the 65% vitrinite content in the Kozlu coal indicates its high-ranking and coking character. Microtype compositions also support this situation. In the free swelling index test of the coals and blends, it was determined that 100% Oltu lignite did not show any adhesion and 100% Kozlu coal had a FSI value of 6, which reflects a good coking property. In the Gray-King coke test, Oltu lignite alone did not produce a coke type, while 100% Kozlu coal and 20% Oltu-80% Kozlu coal blend produced a G type coke. Fluidity tests revealed that Oltu lignite alone showed no plasticity or fluid behaviour, while Kozlu coal showed a wide plastic range of 87°C and a maximum fluidity of 980 DDPM (Dial Division per minute). In expansion tests, Oltu lignite showed softening and shrinkage behaviour without any expansion, while Kozlu coal showed softening and shrinkage as well as a significant expansion rate of +118%.

Keywords: Coking, blend, coking parameters

1 Giriş

Metalurjik kok, kimyasal ve mekanik özellikleri ile demir-çelik üretiminde yakıt olmanın yanında hammadde (indirgeyici) ve yapısal destek olarak kullanılmaktadır [1, 2]. Elektrik ark ocaklı demir çelik fabrikalarındaki önemli gelişmelere rağmen, dünya çelik üretiminin %70'i kömüre bağımlıdır [3]. Entegre demir-çelik tesislerinde kömür alternatifsiz hammadde konumunu korumaktadır. Bu nedenle yerli demir-çelik endüstrisinin koklaşabilir kömür ihtiyacının tamamı olmasa bile önemli kısmının yerli kaynaklardan karşılanması önem arz etmektedir. Dünya çapında çeliğe olan yıllık talebin artmasıyla birlikte, çelik üretiminin 2050 yılında yaklaşık 2,2 milyar ton ham çeliğe ulaşması beklenmektedir. Sürekli artan çelik talebi, üretimi için giderek daha fazla kok kömürü kullanımına yol açmakta ve uygun kömür rezervlerinin tamamen tükenmesi riski bulunmaktadır [4].

Kok kömürü üretiminde iyi koklaşabilir kömür ya da kömür karışımları 1200°C sıcaklıktaki kok fırınında karbonizasyon işlemi ile üretilmektedir [5,6]. Bu süreçte kömür veya kömür karışımı, karbonizasyon sırasında önce yumuşayarak plastik bir kütle haline gelir; ardından ayrışma, şişme, gaz çıkışı ve bu gaz çıkışı devam ederken yeniden katılaşma evrelerinden geçerek gözenekli bir yapı oluşturur ve nihayetinde kok kömürüne dönüşür. Elde edilen kokun kalitesi, kullanılan kömür veya kömür karışımının koklaşabilme özellikleri ile karbonizasyon koşulları gibi çeşitli faktörlere bağlıdır [6]. Ancak kullanılan kömürün koklaşabilme özellikleri, büyük ölçüde elde edilen kokun kalitesini belirleyecektir. Bazı kömürler yüksek koklaşma yeteneğine sahip olsa da, diğer gerekli özelliklerden yoksun olmaları ya da kok fırınına zarar verebilecek bileşenler içermeleri nedeniyle tek başlarına kullanılamazlar. Geçmişte, kok üreticileri genellikle orta uçuculuğa sahip bitümlü kömürleri tercih etmişlerdir. Ancak bu kömürlerin sınırlı bulunabilirliği ve yüksek maliyetleri nedeniyle, söz konusu kömürler günümüzde genellikle kok

*Yazışılan yazar/Corresponding author

karışımlarında 'baz kömür' olarak kullanılmakta; farklı rank ve kimyasal özelliklere sahip diğer kömür türleri ile dengelenmektedir. Bu şekilde, hazırlanan kömür karışımı istenen kok kalitesine ulaşacak şekilde optimize edilebilmektedir [7]. Kok üretiminde, tek bir kömürün kullanımı yerine farklı özelliklere sahip kömürlerden hazırlanan karışımlarının kullanılması yaygın bir uygulamadır. Literatürde genellikle iki ile sekiz farklı kömürün birlikte harmanlandığı çok sayıda çalışma bulunmaktadır [8-11]. Bununla birlikte büyük ölçekli entegre çelik tesislerinde bu sayının 20 kömüre kadar çıkabildiği de belirtilmektedir [12]. Bu yaklaşım, yüksek kaliteli kok üretimini mümkün kılarak aynı zamanda düşük kaliteli ve daha ekonomik kömürlerin de harmana dâhil edilmesine olanak tanımaktadır.

Kömürlerin koklaşabilme kalitesinin belirlenmesinde; nem içeriği, kül oranı, uçucu madde miktarı, elementel bileşim, petrografik analiz, Serbest Şişme İndeksi (FSI), Gray-King kok testi, dilatasyon ve plastisite (akışkanlık) gibi çeşitli parametreler dikkate alınmaktadır [8]. Bu bağlamda, petrografik analiz, bir kömürün termoplastik davranışları hakkında bilgi sağlayarak koklaşabilirlik özelliklerinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır [13].

Kömür harmanlarında yer alan macerallerin özellikleri, harman tasarımında büyük önem arz etmektedir. Özellikle vitrinit ve liptinit makeralleri, plastik faz sırasında eriyerek kok yapısının bağlanmasını sağlamakta ve bu durum yüksek kok mukavemeti ile sonuçlanmaktadır. Buna karşın, inertinit içeriğinin yüksek olması, kok mukavemetinin düşmesine yol açmaktadır [5].

Erzurum-Oltu kömürü düşük ranklı, yüksek uçucu madde içeriğine sahip ve koklaşma kabiliyeti zayıf bir kömürdür. Bu nedenle tek başına kok üretiminde sınırlı bir kullanım alanına sahip olmakla birlikte, yüksek koklaşabilirlik gösteren taşkömürleri ile karıştırıldığında koklaşma davranışına olan etkilerinin araştırılması açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu çalışmada Erzurum-Oltu linyiti, bölgesel bir kömür olduğu için erişilebilirliğinin yüksek olması, düşük maliyeti ve yerli kaynakların değerlendirilmesine katkı sağlaması amacıyla tercih edilmiştir. MTA tarafından yürütülen çalışmalarda Oltu Merkez (Durular / Sütkaş) bölgesinde yaklaşık 7,4 milyon ton rezerv bulunduğu bildirilmiş, "Demirtaş-Oltu (Erzurum) linyit sahası" için yaklaşık 1,6 milyon ton mümkün rezerv tespit edilmiştir [14, 15]. Çalışmamızda, Erzurum-Oltu linyit ve Zonguldak-Kozlu taşkömüründen belirli oranlarda harmanlanarak hazırlanmış dokuz farklı kömür örneğinin koklaşabilirlik özellikleri ve elde edilen kokların kalitesi araştırılmıştır. Özellikle belirli bir linyitin, yüksek koklaşabilir taşkömürü ile farklı oranlarda karıştırılarak incelenmesi, hem bölgesel kaynakların etkin kullanımına hem de literatürde sınırlı sayıda ele alınmış bu konuya katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2 Materyal ve yöntem

Bu çalışmada, Zonguldak Kozlu taşkömürü ile Erzurum Oltu linyiti kullanılmıştır. Kömür numuneleri, laboratuvar tipi çeneli kırıcıda öğütülmüş, ardından tane boyutunu daha da küçültmek amacıyla demir havanla inceltilmiş ve istenilen tane boyutuna göre elenerek sınıflandırılmıştır. Çalışmada, 200 µm tane boyutuna sahip Oltu linyiti ve Kozlu taşkömürü, belirli oranlarda karıştırılmak üzere hazırlanmıştır. Seçilen tane boyutu koklaşabilme parametrelerinin belirlenmesine yönelik yapılacak olan analizler için uygundur [16, 17]. Elde edilen

karışımlar ile saf kömür numunelerinin koklaşabilme özellikleri; serbest şişme indeksi, Gray-King yöntemi, plastometre ve dilatometre analizleri kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Hazırlanan karışımlar aşağıda verilmiştir [18]:

1. Numune: %100 Kozlu
2. Numune: %80 Kozlu + %20 Oltu
3. Numune: %70 Kozlu + %30 Oltu
4. Numune: %60 Kozlu + %40 Oltu
5. Numune: %50 Kozlu + %50 Oltu
6. Numune: %40 Kozlu + %40 Oltu
7. Numune: %30 Kozlu + %70 Oltu
8. Numune: %20 Kozlu + %80 Oltu
9. Numune: %100 Oltu

Numuneler, %100 Kozlu kömüründen başlayarak kademeli olarak artan Oltu oranlarıyla hazırlanmıştır. Bu yöntem ile, yüksek koklaşma özelliğine sahip Kozlu taşkömürü ile düşük koklaşabilirlikteki Oltu kömürünün farklı oranlarda harmanlanarak karışımların koklaşma davranışının incelenmesi amaçlanmıştır.

2.1 Elementel ve kısa analizler

Kömür örneklerinin kalitesinin belirlenmesi amacıyla, elementel ve kısa analizler ASTM D3302 [19], ASTM D3174 [20] ve ASTM D3175 [21] standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, çalışmada kullanılan ham kömürlerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini belirlemek ve bu özelliklerin kömür kalitesi ile potansiyel kullanım alanları üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Elementel ve kısa analiz sonuçları Tablo 1'de sunulmaktadır. Kömürde yapılan bu analizler, kömürün yanma özelliklerinin yanında endüstriyel uygunluğu hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır.

2.2. Petrografik analizler

Petrografik Dağılım analizleri ASTM D2799-23 [22] standart test yöntemine uygun olarak MTA'da (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü) gerçekleştirilmiştir.

2.3 Serbest şişme indeksi (FSI) tayini

1 g kömür numunesi porselen bir kroze içine alınmış üstü kapatılarak sıcaklığı 820°C'ye ayarlanan fırına yerleştirilip 2.5 dakika boyunca ısıtılmıştır. Soğuduktan sonra, krozedeki kömür kalıntısı standart profiller ile karşılaştırılıp kömür numunesinin serbest şişme sayısı belirlenmiştir [23].

2.4 Gray- King analizi

Bu deney için 200 µm tanecik boyutundaki örnekler 10 gr tartılarak yatay olarak yerleştirilmiş 15 cm uzunluğundaki bir retort tüpü içerisine yayılmıştır [24]. Tüpün ucu pamuk ile kapatılarak başlangıç sıcaklığı 325°C olan bir fırına yerleştirilmiştir. Sıcaklık kademeli olarak 600°C'ye yükseltilmiştir. Retort tüpü 15 dakika sonra çıkarılarak soğumaya bırakılmıştır. Retort tüpü içindeki karbonize olmuş kömür örnekleri, standart Gray King profilleri ile karşılaştırılıp Gray- King kok tipi belirlenmiştir.

2.5 Dilatometrik özellikler

Dilatometrik ölçümler, ASTM D5515-22 [25] standart test yöntemine uygun olarak Kardemir (Karabük Demir Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş.) tesislerinde gerçekleştirilmiştir.

2.6 Plastometrik özellikler

Bu deney, kömür ve kok kömürlerinin plastisite indeksini belirlemek amacıyla kullanılan ASTM D2639 [26] standart test yöntemine uygun olarak Kardemir (Karabük Demir Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş.) tesislerinde gerçekleştirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Elementel /proximate analiz ve kok kalitesi

Tablo 1 Oltu linyiti ve Kozlu taşkömürüne ait elementel, kısa ve maseral analiz sonuçları sunulmaktadır. Koklaşabilirlik, genel kömür kalitesi açısından değerlendirildiğinde nem, kül ve uçucu madde içerikleri en kritik parametreler arasında yer almaktadır. Özellikle nem içeriğinin düşük olması, kömürün kalorifik değerini artırmakta ve diğer bileşenlerin etkinliğini olumlu yönde etkilemektedir. Kok üretimi sürecinde kömürlerdeki kül oranının %10'un altında olması arzu edilir; çünkü kül, yüksek sıcaklıklarda cüruf oluşumunu ve bileşimini etkileyerek çelik üretim süreçlerine doğrudan müdahale edebilmektedir [27]. Elde edilen sonuçlara göre, %100 Kozlu kömürü ve Oltu oranı düşük olan (<%20) karışımların kül içeriği %10'un altında olup istenilen sınıra uygundur. Ancak Oltu oranı arttıkça kül miktarı belirgin biçimde yükselmekte ve %10'un üzerine çıkmaktadır. Bu durum, yüksek Oltu içerikli karışımların koklaşma sürecinde cüruf oluşumu ve bileşimini olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermektedir.

Kozlu taşkömürü, Oltu linyitine kıyasla daha yüksek sabit karbon ve kalorifik değere sahiptir. Linyit örneği ise özellikle uçucu madde içeriğinin yüksekliği ile dikkati çekmektedir; bu durum, Oltu linyitin koklaşabilirliğinin taşkömürüne göre daha düşük olmasına neden olabilecektir.

3.2. Maseral analizi

Maseral analiz sonuçları, kömürlerin koklaşma potansiyelleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (Tablo 2 ve Tablo 3). Vitrinit grubu maseraller, linyit kömürlerde hüminit olarak adlandırılırlar [28]. Hüminit maseralleri düşük ranklı kömürlerde, vitrinit maseralleri ise yüksek ranklı kömürlerde oluşur [29]. Vitrinit grubu maseraller, koklaşma özelliği açısından en kritik bileşendir; çünkü 380–500°C sıcaklık aralığında plastikleşme göstererek (eriyerek) koklaşmayı sağlamaktadır [30]. Diğer yandan, aşırı inert bileşen içeriği ise reaktif bileşenlerin yetersizliğine inert bileşenleri sarmak için yeterli bağlayıcı madde olmamasına ve dolayısıyla kokun zayıf olmasına neden olabilmektedir [10]. Literatürde birçok çalışma, optimum vitrinit içeriğinin belirlenmesine yönelik olarak gerçekleştirilmiştir [31].

Oltu ve Kozlu kömürlerinin maseral ve mikrolitotip bileşimleri incelendiğinde, koklaşma davranışları açısından belirgin farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Oltu kömüründe maseral bileşiminin %75 oranında hüminitten oluşması bu kömürün düşük ranklı karakterini göstermektedir. Hüminit, nispeten yüksek oksijen ve düşük karbon içeriğiyle karakterize edilir. Hüminit, vitrinitin öncüsüdür. Kömürdeki hüminitin özellikle karbonizasyon, sıvılaştırma, gazlaştırma ve yanma gibi çoğu endüstriyel işlemleri etkilemektedir [32]. Oltu kömürünün yüksek nem (%9.12) ve kül (%20.27) içeriği, plastikleşme ve kok oluşum süreçlerini olumsuz etkileyeceği ortadadır. Üstelik Oltu Kömürünün düşük sabit karbon (%28.61), yüksek uçucu madde (%42) ve düşük kalorifik değerinden de (5424 cal/g) koklaşabilirlik özelliği gösteremeyeceği anlaşılmaktadır. Buna karşılık Kozlu kömüründe vitrinit oranı %65 gibi oldukça yüksek bir değere sahip olduğu ve bunun kok kalitesine

doğrudan katkı yaptığı bilinmektedir [31, 33] Kozlu kömüründeki %22 inertinit ve %10 liptinit, gözenekli yapıyı artırsa da yüksek vitrinit içeriği nedeniyle genel koklaşma potansiyeli yüksek kalmaktadır. Ayrıca Kozlu kömürü yüksek sabit karbon (%62.19), düşük uçucu madde (%29) ve yüksek kalorifik değer (7610 cal/g) ile metalurjik kok üretimine uygun nitelikler taşımaktadır.

Mikrolitotip bileşimleri de bu durumu desteklemektedir (Tablo 3). Oltu kömüründe vitrinit oranı %4'te kalırken Kozlu'da %18'e ulaşmaktadır; bu da Kozlu'nun plastisite geliştirme kapasitesinin daha güçlü olmasının nedenidir. Oltu'da duraklarit oranı %31, Kozlu'da %29 olup inert karakterli bu bileşenler kokun kompaktlığını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca her iki kömürde %17 oranında karbominerit bulunması mineral madde katkısıyla kokun mekanik dayanımını zayıflatmaktadır. Literatürde de vurgulandığı üzere yüksek inert faz ve mineral madde içeriği kokun sağlamlığını düşürmekte, vitrinit zenginliği ise koklaşmayı belirgin biçimde artırmaktadır [33, 34].

Aziz ve ark. (2021), inertinitin vitrinitle etkileşiminin kömürün viskoelastik özelliklerini ve uçucu madde salınımını etkilediğini, bu etkileşimin kömürün rankına bağlı olarak değiştiğini belirtmiştir [35]. Orta ranklı kömürlerde inertinitin vitrinitle etkileşimi, viskoziteyi beklenenden daha az artırırken, yüksek ranklı kömürlerde inertinitin etkisi daha belirgin olmuştur. Bu bulgular, inertinitin koklaşma sürecindeki rolünün kömürün rankına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

Ayrıca Liu ve ark. (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, vitrinit ve inertinitin moleküler yapılarının kömürün dönüşüm süreçlerine etkisi incelenmiştir [36]. Bu çalışma, vitrinit zengini kömürlerin daha fazla plastikleşme eğilimi gösterdiğini ve inertinitin bu süreci sınırladığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, Kozlu kömürünün yüksek vitrinit içeriği ve uygun kömürleşme derecesi ile koklaşabilirliğe uygun olduğunu desteklemektedir.

3.3. Serbest şişme indeksi (FSI) analizi

Serbest şişme indeksi (Free Swelling Index – FSI) ve dilatasyon testleri, kömür veya kömür karışımlarından elde edilecek kokun dayanıklılığını öngörmek amacıyla sıklıkla kullanılan analiz yöntemleridir. FSI, kömürün kontrollü ısıtma koşulları altında gösterdiği hacimsel genişlemeyi ve koklaşma potansiyelini ölçen bir parametredir. Bu indeks, 1 ile 9 arasında tanımlanmış standart değerlerle ifade edilmekte olup, yüksek FSI değeri genellikle yüksek koklaşabilirlik anlamına gelmektedir [23, 37].

Araştırmalar, FSI değerinin kömürün rankına (olgunluk derecesine) ve türüne bağlı olarak değiştiğini göstermektedir [27]. Kok üretiminde tek bir kömür tipi kullanılacaksa, FSI değerinin orta düzeyde (4–6 aralığında) olması tercih edilmektedir. Bunun nedeni, düşük FSI değerine sahip kömürlerin daha fazla gözenekli yapıya sahip olmalarına karşın, yüksek FSI değerlerinin ise gözenekliliğin azalmasına ve kokun mekanik dayanımının zayıflamasına yol açmasıdır [38]. Bu durum, elde edilen kokun yapısal bütünlüğünü ve kullanım dayanıklılığını doğrudan etkilemektedir.

Şekil 1'de, dokuz farklı kömür ve kömür karışımının serbest şişme deney sonrası elde edilen görsel sonuçlar sunulmaktadır. %100 Oltu kömürünün FSI değeri 0 olarak belirlenmiş olup, bu değer kömürün herhangi bir şişme veya genleşme göstermediğini ifade etmektedir. Bu sonuç, Oltu kömürünün kimyasal ve maseral analizleri ile de desteklenmektedir. Buna

karşılık, %100 Kozlu taşkömürünün FSI değeri 6 olarak tespit edilmiştir. FSI'nin 6 ve üzeri değerler alması, kömürün iyi derecede koklaşabilirliğe sahip olduğunu göstermektedir. Genel olarak, kömürler FSI değerlerine göre şu şekilde sınıflandırılmaktadır:

- 0 –2 aralığı: Zayıf koklaşma potansiyeli
- 2–4 aralığı: Orta derecede koklaşma potansiyeli
- 4–9 aralığı: Güçlü koklaşma potansiyeli

FSI değerinin tahmin edilmesine yönelik literatürde aşağıdaki ampirik denklem önerilmiştir [13]:

$$FSI = 10.097 - 0.313 \times Nem - 0.091 \times Kül - 0.103 \times Uçucu Madde \quad R^2 = 0.32$$

Bu denklem kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda, %100 Oltu ve %100 Kozlu kömürleri için FSI değerleri sırasıyla 0.8 ve 6.1 olarak hesaplanmıştır. Bu teorik sonuçların, deneysel olarak elde edilen FSI sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Deneysel sonuçlar, hazırlanan kömür karışımlarında Kozlu kömürü oranı arttıkça FSI değerinin yükseldiğini göstermektedir.

Tablo 1. Oltu ve Kozlu Kömür Numunelerinin Elementel ve Kısa Analizleri (Orijinal baz).
Table 1. Elemental and Ultimate Analyses of Oltu and Kozlu Coal Samples (Original basis).

	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	Nem (%)	Kül (%)	Uçucu Madde (%)	Sabit Karbon	Kalori (cal/g)
Kozlu	63.13	1.88	0.24	0.34	0.84	7.97	29	62.19	7610
Oltu	62.46	5.04	1.37	0.55	9.12	20.27	42	28.61	5424

Tablo 2. Linyit ve Taşkömürü Örneklerinde Maseral Madde Dağılımı.
Table 2. Distribution of Maceral Material in Lignite and Coal Samples.

	Vitrinit (%)	Hüminit	İnertinit (%)	Liptinit (%)	Diğer (%)
Kozlu	65	-	22	10	3
Oltu	-	75	8	6	11

Tablo 3. Linyit ve Taşkömürü Örneklerinde Mikrolitotip Dağılımı.
Table 3 Distribution of Microlithotype in Lignite and Coal Samples.

	Vitrinertit (%)	Durit (%)	Duraklarit (%)	Vitrinertoliptit (%)	Klarodurit (%)	Karbominerit (%)
Kozlu	18	0	29	0	0	17
Oltu	4	0	31	0	0	17



a. %100 Kozlu kömürü (FSI: 6)



b. %80 Kozlu- %20 Oltu kömür karışımı (FSI:5.5)



c. %70 Kozlu- %30 Oltu kömür karışımı (FSI:5)



d. %60 Kozlu- %40 Oltu kömür karışımı (FSI:4.5)



e. %50 Kozlu- %50 Oltu kömür karışımı (FSI:3)



f. %40 Kozlu- %60 Oltu kömür karışımı (FSI: 2.5)



g. %30 Kozlu- %70 Oltu kömür karışımı (FSI:2)



h. %20 Kozlu- %80 Oltu kömür karışımı (FSI:1)



i. %100 Oltu kömür numunesi (FSI:0)

Şekil 1. Kömürlerin ve karışımların serbest şişme indeksi analiz sonuçları.

Figure 1. Free swelling index analysis results of coals and blends.

Oltu kömürüne %20 oranında Kozlu kömürü eklenmesi, karışımın yapışma özelliği kazanmasına ve FSI değerinin 1'e yükselmesine neden olmuştur. %60 Kozlu kömürü içeren karışım ise FSI değeri 4.5'e ulaşmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, kok üretiminde kullanılacak kömürlerin FSI değerlerinin 4-6 aralığında olması tercih edilmektedir. Bu

sonuçlar, kömür karışımında Kozlu kömürünün oranı arttıkça koklaşma potansiyelinin de arttığını açıkça göstermektedir.

3.4 Gray-King Kok Analizi

Kok üretiminde, elde edilen kokun özelliklerini kömür karışımlarıyla ilişkilendirmek oldukça önemlidir. Koklaşma sürecinde sıcaklık yaklaşık 1000°C'ye kadar yükselir ve bu



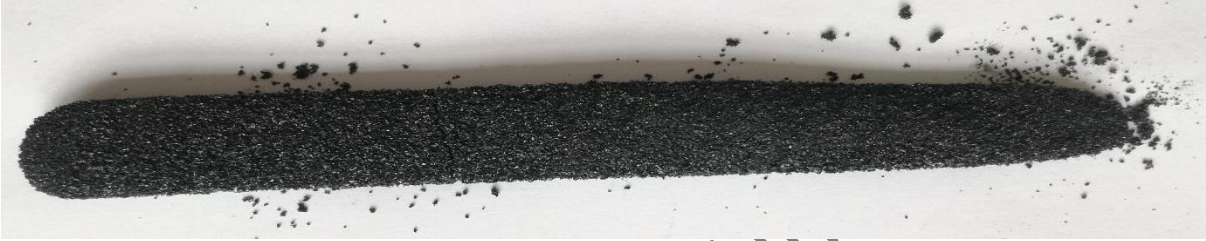
a. %100 Kozlu kömür numunesi (G Tipi)



b. %80 Kozlu- %20 Oltu kömür karışımı (G tipi)



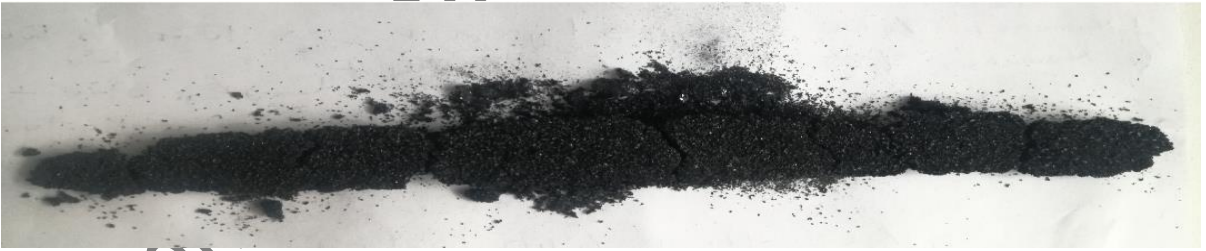
c. %70 Kozlu- %30 Oltu kömür karışımı (E Tipi)



d. %60 Kozlu- %40 Oltu kömür karışımı (D tipi)



e. %50 Kozlu- %50 Oltu kömür karışımı (C Tipi)



f. %40 Kozlu- %60 Oltu kömür karışımı (B Tipi)



g. %30 Kozlu- %70 Oltu kömür karışımı (B Tipi)



h. %20 Kozlu- %20 Oltu kömür karışımı (A tipi)



i. %100 Oltu kömür numunesi (A Tipi)

Şekil 2. Kömürlerin ve karışımların Gray- King Analizi.

Figure 2. Gray-King analysis of coals and blends.

sırada gerçekleşen karmaşık reaksiyonlar büyük bir rol oynar. Özellikle 600°C sıcaklığı, kokun yapısal dönüşümünde kritik bir noktadır. 600°C'nin altındaki sıcaklıklarda, aromatik halka yapılarındaki yan alifatik zincirler kırılır, büyük miktarda uçucu madde salınır ve bu süreç plastik maddelerin oluşumu ve katılaşmasına yol açar. Bu durum, aromatik yapılar açısından zengin bir kokun geride kalmasına neden olur. Daha yüksek sıcaklıklarda ise, sınırlı uçucu madde salınımı ile aromatik yapı yoğunlaşmaya başlar. Bu nedenle, 600°C'de oluşan kokun morfolojisi, koklaşma sürecinde önemli bir ara aşamadır. Gray - King testi de 600°C'de kok tipini karakterize etmek için bu nedenlerle geliştirilmiştir [5].

FSI, kömürün termal genleşme davranışını nicel olarak ölçerken, Gray-King testi, koklaşma sırasında oluşan kokun kalitesini ve yapısını değerlendirmektedir. Şekil 2'de, kömür ve karışımları için yapılan Gray-King testinden sonra elde edilen görsel sonuçlar sunulmaktadır. %100 Oltu kömürü ve %80 Oltu - %20 Kozlu karışımı Tip A olarak sınıflandırılmıştır, yani bu örneklerde yapışma gözlemlenmemiştir. Bu durum, söz konusu örneklerin koklaşma kabiliyetinin son derece zayıf olduğunu göstermektedir. Karışımındaki Kozlu kömür oranı arttıkça Gray-King referans numaraları da artış göstermektedir. Tip B'de, yapışma zorlukla gerçekleşmiş olup, ana kütlenin yanında bazı parça ve tozlar da mevcuttur; bu, zayıf koklaşmayı ifade eder. Tip C'de kömür yapışmıştır ancak oluşan kütle kolayca dağılabilir niteliktedir. Tip D orta sertlikte bir yapıya sahip olup belirgin büzülme davranışı sergilemiştir. Hem Tip C hem de Tip D örnekleri, genel olarak zayıf koklaşma potansiyeline sahiptir. Tip E yüksek derecede büzülme göstermiş, sert ve çok sayıda çatlak içeren bir yapı ile karakterize edilmektedir. Buna karşılık Tip G kömür karışımının başlangıçtaki hacmini koruyan, iyi derecede kaynaşmış, yüksek mekanik dayanım sunan ve sert bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, metalurjik kok üretiminde hedeflenen büyük parça boyutu ve yüksek mekanik dayanım kriterlerini yalnızca Tip G karşılayabilmektedir. Tip A'dan Tip E'ye kadar olan sınıflar bu gereksinimleri sağlayamamakta ve dolayısıyla metalurjik kok üretimi açısından elverişli kabul

edilmemektedir [5]. Tip G, metalurjik kok için en uygun adaydır ve az sayıda çatlak içerdiği için tercih edilir [5]. Tip G, Gx olarak adlandırılan 10 alt kategoriye ayrılır ve burada x, 1'den 10'a kadar olan tam sayılarla ifade edilir. G10, en güçlü kok olarak kabul edilir.

3.5 Plastometre Analizi

Kömürlerin termoplastik davranışları, koklaşma potansiyelleri açısından önemli bir değerlendirme kriteridir. Koklaşabilir kömürler, 350-500°C sıcaklık aralığında yumuşayarak koyu hamur benzeri akışkan bir yapıya dönüşür; bu olaya kömürün plastikleşmesi denir [34]. Plastometre cihazı kullanılarak belirlenen yumuşama sıcaklığı, maksimum akışkanlık sıcaklığı, maksimum akışkanlık (DDPM), katılaşma sıcaklığı ve plastiklik aralığı, kömür ya da karışımlarının ısıtma sürecinde geçirdiği yapısal dönüşümleri ortaya koymaktadır.

Ham kömürlerin ve bazı kömür karışımlarının plastometrik özellikleri Tablo 4'te verilmektedir. Koklaşabilirlik testleri kapsamında tüm kömür karışımları için FSI ve Gray-King deneyleri uygulanmış, ancak plastometre ve dilatometre analizleri yalnızca Kozlu kömürü oranı yüksek olan (%50, %70 ve %80) karışımlar ve yapılarını daha iyi anlayabilmek için %100 Oltu ve %100 Kozlu kömürleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bunun nedeni, Oltu kömürü oranı %50'nin üzerinde olan örneklerin koklaşabilirlik özelliklerinin zayıf bulunmasıdır. Çünkü bu örneklerin FSI değerleri 1 ile 2,5 arasında değişmiş ve Gray-King test sonuçları yalnızca A ve B tipleri ile sınırlı kalmıştır. Dolayısıyla, düşük koklaşma potansiyeli gösteren bu karışımlar için ileri düzey plastometre ve dilatometre analizlerinin yapılmasına gerek duyulmamıştır.

%100 Oltu kömürüne ait herhangi bir plastometrik değer elde edilememiştir. Bu durum, Oltu kömürünün termoplastik faza geçiş göstermediğini ve dolayısıyla koklaşma özelliği bulunmadığını ortaya koymaktadır. Bu tür kömürler, yüksek inert madde içeriği, düşük uçucu madde miktarı veya aromatik yapı eksikliği nedeniyle yumuşama ve akışkanlık geliştirememektedir. Söz konusu özellik, bu kömürün tek

başına metalurjik kok üretimi amacıyla kullanılmasının uygun olmadığını göstermektedir.

Buna karşılık %100 Kozlu taşkömürü örneği, 401°C'de yumuşama davranışı göstererek plastiklik fazına geçmiştir. Bu fazda 452°C'de maksimum 980 DDPM akışkanlık değerine ulaşmış ve 489°C'de katılaşmıştır. Elde edilen 87°C'lik plastiklik aralığı, Kozlu kömürünün ısıtma sırasında yeterli süre boyunca termoplastik davranış sergilediğini ve bu nedenle yüksek koklaşabilirliğe sahip olduğunu göstermektedir.

Oltu ve Kozlu kömürlerinin çeşitli oranlarda karıştırılması sonucunda plastometrik özelliklerde belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. %50Kozlu-%50Oltu karışımında maksimum akışkanlık değeri yalnızca 6 DDPM olarak kaydedilmiş olup, bu karışımın plastiklik aralığı da 60°C'de sınırlı kalmıştır. Bu değerler, karışımındaki Oltu kömürünün baskın etkisinin, Kozlu kömürünün termoplastik davranışını büyük ölçüde bastırdığını ve koklaşabilirliği önemli ölçüde düşürdüğünü göstermektedir.

%70 Kozlu-%30 Oltu karışımında ise maksimum akışkanlık değeri 136 DDPM'ye yükselmiş, plastiklik aralığı 71°C olarak tespit edilmiştir. Bu oran, Kozlu kömürünün termoplastik özelliklerinin belirginleşmeye başladığını, ancak hala istenilen kok kalitesine ulaşmak için yetersiz olduğunu göstermektedir.

%80 Kozlu-%20 Oltu karışımı, 274 DDPM maksimum akışkanlık ve 84°C plastiklik aralığı ile, yüksek kaliteli kok üretimine yakın değerler göstermiştir. Literatürde Kemal vd. (2004) tarafından Zonguldak taşkömürüne değişik oranlarında Tunçbilek linyit ilavesi gerçekleştirilmiştir. Zonguldak kömür oranı arttıkça Tunçbilek kömüründeki plastikleşme aralığının arttığı gözlenmektedir [33]. Bu karışım oranı, hem teknik uygunluk hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından değerlendirilerek, metalurjik kok üretiminde potansiyel olarak kullanılabilecek bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Elde edilen verilere göre karışımlar, tek başına kullanılan Oltu kömürüne göre yüksek yumuşama sıcaklığı, maksimum akışkanlık sıcaklığı ve maksimum akışkanlık (6 ddpm ve 274 ddpm) sergilemektedir. Oltu kömürü için yapılan plastikleşme testinde herhangi bir sıcaklık değeri tespit edilememiştir. Kozlu kömürü ise 980 DDPM ile maksimum akışkanlaşma değeri göstermiştir. Kozlu kömürünün bu özelliği, koklaşma yeteneği olmayan Oltu kömürüne belirli oranlarda eklenmesiyle, maksimum akışkanlık ve plastiklik aralığını artırmaktadır.

Literatürde, Gieseler plastometresi ile ölçülen maksimum akışkanlık değerinin dakikada 200 ile 1000 kadran bölümü (DDPM) arasında olması, kömürün iyi koklaşma potansiyeline sahip olduğunu gösteren kritik bir eşik olarak kabul edilmektedir [1]. Bu nedenle, bu parametreler kömür karışımlarının homojen bir katı kok oluşturma yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir [27]. Kömürün plastisitesi, kok yapısının oluşumunu doğrudan etkileyen bir faktördür. Bu süreç, kömür matrisinin zaman ve sıcaklık etkisiyle katı fazdan sıvı faza ve ardından farklı özelliklere sahip bir katı faza dönüşmesiyle gerçekleşir.

Koklaşan kömür genellikle 385-450°C aralığında yumuşamaya başlar. Kömürün plastik bir kütle oluşturduğu bu sıcaklık aralığı, büyük ölçüde kimyasal bileşimine bağlıdır. Sıcaklığın daha da yükselmesiyle, plastik kütle sertleşir ve sonunda gözenekli bir kok meydana gelir. Akışkanlık ise kömürün viskozitesinin zaman ve sıcaklığa bağlı olarak değişmesiyle

ilişkilidir. Kömürün plastikleşme bölgesinde, kömür eriyerek gaz bileşenleri oluşturur ve bu süreç nedeniyle kömür parçacıkları şişer. Bu durum, yarı kok fırınında plastik tabaka içinde iç basınç oluşmasına yol açar ve sonuçta "koklaşma basıncı" olarak da bilinen tehlikeli duvar basıncı meydana gelir [39].

3.6 Dilatometre Analizi

Dilatometri testi, kömürlerin ısı işleme tabi tutulduklarında gösterdikleri değişimleri (şişme ya da büzülme) nicel olarak değerlendirmek amacıyla yaygın biçimde kullanılan bir yöntemdir. Bu test aracılığıyla elde edilen yumuşama sıcaklığı, maksimum kontraksiyon (büzülme) ve dilatasyon (şişme) değerleri, kömürlerin koklaşma davranışlarını tahmin etmede kritik öneme sahiptir.

Örneklerin dilatometrik özellikleri Tablo 5'de gösterilmiştir. Sonuçlara göre kömürlerin yumuşama sıcaklıkları karışım oranlarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. En yüksek yumuşama sıcaklığı %100 Oltu kömüründe 401°C, %100 Kozlu taşkömürünün yumuşama sıcaklığı 372°C olarak belirlenmiştir. Karışımlarda ise Kozlu kömürü oranı arttıkça bu sıcaklığın azaldığı tespit edilmiştir. Kozlu taşkömürünün daha düşük sıcaklıklarda plastik faza geçiş yapma yeteneğine sahip olduğunu ve bu nedenle daha aktif koklaşma potansiyeli sunduğunu göstermektedir.

Öte yandan, maksimum kontraksiyon sıcaklıkları da benzer şekilde karışım oranlarına bağlı olarak değişim göstermektedir. Özellikle %70 Kozlu-%30 Oltu ve %80 Kozlu-%20 Oltu karışımlarında büzülme davranışının belirgin şekilde arttığı ve maksimum kontraksiyon değerlerinin sırasıyla -20 olarak ölçüldüğü tespit edilmiştir. Bu değerler, koklaşma sırasında yapısal sıkışmanın daha yoğun olduğunu göstermekte ve kömür matrisinin gaz çıkışı esnasında hacim kaybına uğradığını işaret etmektedir.

Dilatasyon verileri incelendiğinde ise yalnızca %80 Kozlu-%20 Oltu karışımı ve %100 Kozlu kömürü pozitif dilatasyon davranışı göstermiştir. Sırasıyla +%40 ve +%118 olarak ölçülen bu değerler, bu örneklerin yüksek şişme potansiyeline sahip olduğunu ve iyi koklaşabilirlik özellikleri sergilediklerini ortaya koymaktadır. Özellikle %100 Kozlu Kömürünün +%118 gibi yüksek bir dilatasyon değerine sahip olması, bu kömürün metalurjik kok üretimi açısından son derece uygun olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan, %100 Oltu kömüründe dilatasyon gözlenmemiştir; bu durum, söz konusu kömürün koklaşma potansiyelinin oldukça düşük olduğunu ve katkı kömürü olarak değerlendirilmesi gerektiğini düşündürmektedir.

Ayrıca, yalnızca %80 Kozlu-%20 Oltu ve %100 Kozlu örneklerinde tekrar katılaşma sıcaklığı belirlenebilmiştir (sırasıyla 466°C ve 469°C). Bu durum, bu örneklerin plastik fazdan yeniden sert yapılı bir koka dönüşüm sürecini tamamlayabildiğini ve kok yapısının bütünlüğünü koruyabildiğini göstermektedir.

%100 Kozlu 372°C'de yumuşadığı ve 428°C'de maksimum %118 genleşme ile maksimum %18 daralmayı gösterdiği görülmektedir. Bu koklaşabilir bir kömürden beklenen iyi bir plastik özelliktir. Öte yandan, %100 Oltu kömürü de 401°C'de yumuşamakta, 500°C'de maksimum daralma sıcaklığına ulaşmakta ve hiç genleşme göstermemektedir. Karışımlar arasında en yüksek genleşme değeri %40 ile %80 Kozlu-%20 Oltu karışımında kaydedilmiş olup, bu değer tek başına diğer karışımlardan %40 daha fazladır. Hiç genleşme göstermeyen

Oltu kömürü, Kozlu kömürüyle en az %20 oranında karıştırıldığında dilatometrik özellikler göstermiştir.

Benzer şekilde, literatürde bir çalışmada Chikila kömürünün 340°C'de yumuşadığı ancak hiç genleşme göstermediği, buna karşın Polonya veya Amerikan kömürleriyle karıştırıldığında genleşme davranışı kazandığı bildirilmiştir [27]. Bu durum, çalışmamızda da görüldüğü üzere, tek başına genleşme

göstermeyen Oltu kömürünün Kozlu ile harmanlandığında plastiklik özellikleri kazanmasına paralel bir bulgu olup, karışımların koklaşabilirliğini artırmada etkin bir yaklaşım olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 4. Ham kömürlerin ve karışımların plastomerik özellikleri.

Table 4. Plastomeric properties of raw coals and blends.

Parametreler	%100 Kozlu	%50Kozlu-%50Oltu	%70Kozlu-%30Oltu	%80Kozlu-%20Oltu	%100 Oltu
Yumuşama Sıcaklığı (°C)	401	413	409	401	-
Max. Akış. Sıcaklığı (°C)	452	443	450	452	-
Max. Akışkanlık (DDPM)	980	6	136	274	-
Katılma Sıcaklığı (°C)	489	473	480	485	-
Plastiklik aralığı (°C)	87	60	71	84	-

DDPM = Dial Division Per Minute

Tablo 5. Ham kömürlerin ve karışımların dilatometrik özellikleri.

Table 5. Dilatometric properties of raw coals and blends.

Parametreler	İlk Sıc. (°C)	Yumuşama Sıc. (°C)	Max. Kont. Sıc. (°C)	Tekrar Katılma Sıc. (°C)	Max Kont. (%)	Max. Dilatasyon (%)	Isınma Hızı (°C/dak)
%100 Kozlu	330	372	428	469	-18	+118	3
%50 Kozlu-%50 Oltu	330	390	499	-	-14	-	3
%70Kozlu-%30 Oltu	330	386	449	-	-20	-	3
%80 Kozlu-%20 Oltu	330	381	435	466	-20	+40	3
%100 Oltu	330	401	500	-	-6	-	3

4 Sonuçlar

Farklı kömür türlerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulan kömür karışımları, kok üretiminde daha yaygın bir uygulama haline gelmiştir. Özellikle düşük ranklı kömürlerin, başta linyit olmak üzere, koklaşabilir taş kömürlerine kıyasla daha düşük maliyetli ve daha kolay temin edilebilir olması, bu tür kömürlerin karışımlara dâhil edilmesini avantajlı kılmaktadır. Bu çalışmada, yerli kaynaklardan temin edilen düşük kaliteli ve koklaşmayan Oltu linyiti ile yüksek koklaşabilirliğe sahip Kozlu taşkömürünün farklı oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen harman kömürlerinin koklaşma davranışları; serbest şişme indeksi (FSI), Gray-King testi, Gieseler plastometrisi, dilatometri ve maseral analizleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Serbest şişme ve Gray-King testleri, Kozlu taşkömürünün tek başına iyi koklaşabilirliğe sahip olduğunu (FSI = 6, Tip G), Oltu

kömürünün ise bu özelliğe tamamen sahip olmadığını (FSI = 0, Tip A) açıkça ortaya koymuştur. Ancak Kozlu kömür oranının %70-80 seviyelerinde tutulduğu karışımlar, Tip D-G arasında sınıflandırılmış olup, sınırlı da olsa kok oluşumu ve yapışma davranışı göstermiştir.

Plastometrik test sonuçlarına göre, %100 Kozlu kömürü 980 ddpml'lik yüksek bir maksimum akışkanlık değeri ile literatürde belirtilen ideal sınırlar içinde yer almış; bu da onun iyi bir koklaşma potansiyeline sahip olduğunu teyit etmiştir. %20 Oltu - %80 Kozlu karışımı da 274 ddpml'lik değeriyle kabul edilebilir seviyede akışkanlık sergilemiş ve bu karışımın da koklaşma potansiyeli taşıdığı belirlenmiştir. Geniş plastiklik aralıkları, bu karışımların farklı kömürlerle birlikte kok harmanlarına entegre edilebileceğini göstermektedir.

Dilatometri verileri yalnızca %20 Oltu içeren karışım ve %100 Kozlu kömürü için pozitif dilatasyon (sırasıyla +40% ve

+118%) göstermiştir. Maseral analizleri de bu bulgularla uyumludur. Kozlu kömürü yüksek vitrinit içeriği ile koklaşabilirliğe katkı sağlarken, Oltu kömürü inertinit açısından zengin ve vitrinit açısından fakir bir yapı sergilemiştir.

Bu sonuçlar, Türkiye gibi koklaşabilir taşkömürü rezervlerinin sınırlı olduğu ülkelerde, ekonomik ve stratejik açıdan yerli linyitlerin sınırlı oranlarda koklaşabilir kömürlerle harmanlanarak kullanılabileceğini göstermektedir. Özellikle %80 Kozlu-%20 Oltu karışımı, hem dilatasyon hem de plastiklik özellikleri bakımından tatmin edici seviyede olup, harman kok üretimi için potansiyel bir adaydır. Bununla birlikte, Oltu kömürü %20'nin üzerine çıktığında kokun yapısal bütünlüğünde ciddi zayıflamalar meydana gelmektedir. Oltu kömürünün yüksek oranlarda kullanımı, kokun yapısal özelliklerini olumsuz etkileyerek nihai ürün kalitesini düşürmektedir. Bu nedenle, katkı oranları dikkatli belirlenmeli ve harmanlar, nihai kullanım amacına uygun olarak optimize edilmelidir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, sınırlı oranlarda Oltu kömürünün koklaşabilir Kozlu taşkömürü ile harmanlanarak kullanılabileceğini göstermektedir. Ancak karışımların daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesi için ileride yapılması planlanan çalışmalarda ek analizlere ihtiyaç vardır. Özellikle TG/DTG, FTIR ve XRD gibi termal ve yapısal analizler, kömürlerin bozunma davranışı ile aromatik yapısını daha ayrıntılı biçimde ortaya koyabilir. Ayrıca üretilen kokun reaktivitesi ve mekanik dayanımı gösteren CRI/CSR testleri, Drum Index ölçümleri ve mikroyapısal karakterizasyonlar (SEM, porozite analizi) gerçekleştirilmelidir. Bu tür tamamlayıcı çalışmalar, optimum harman oranlarının daha hassas biçimde optimize edilmesine ve endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğin güçlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

5 Conclusions

Coal blends created by combining different types of coal have become a more common practice in coke production. In particular, low-rank coals—especially lignites—are more cost-effective and easier to obtain compared to coking bituminous coals, making their inclusion in blends advantageous. In this study, the coking behavior of coal blends prepared by mixing low-quality, non-coking Oltu lignite (sourced from domestic resources) with highly coking Kozlu bituminous coal in varying proportions was evaluated using Free Swelling Index (FSI), Gray-King test, Gieseler plastometry, dilatometry, and maceral analyses.

The Free Swelling Index and Gray-King tests clearly demonstrated that Kozlu coal alone has good coking properties (FSI = 6, Type G), whereas Oltu coal lacks this property entirely (FSI = 0, Type A). However, blends containing 70–80% Kozlu coal were classified between Type D and G, showing limited but evident coke formation and adhesion behavior.

According to plastometric test results, 100% Kozlu coal exhibited a high maximum fluidity value of 980 ddpm, which falls within the ideal range reported in the literature, confirming its good coking potential. The 20% Oltu – 80% Kozlu blend also displayed acceptable fluidity with a value of 274 ddpm, indicating that this blend also possesses coking potential. The wide plasticity ranges observed suggest that these blends can be integrated into coke blends along with other coals.

Dilatometry data showed positive dilatation only for the 20% Oltu blend and the 100% Kozlu coal samples (with +40% and +118%, respectively). This indicates that volumetric expansion—and hence, the development of a porous coke structure—occurred only in these cases. The maceral analyses support these findings. While Kozlu coal, with its high vitrinite content, contributes positively to coking behavior, Oltu coal has structure rich in inertinite and poor in vitrinite.

These results indicate that in countries like Turkey, where coking coal reserves are limited, it is economically and strategically feasible to use domestic lignites in limited proportions blended with coking coals. In particular, 80% Kozlu-20% Oltu blend shows promising properties in terms of both dilatation and plasticity, making it a potential candidate for coke production from blends. However, when the Oltu coal exceeds 20%, significant weakening of the coke's structural integrity occurs. The use of high proportions of Oltu coal adversely affects the structural properties of the coke, thereby reducing the quality of the final product. Therefore, the proportions of additives must be carefully determined, and the blends should be optimized according to the intended end use.

The results obtained in this study indicate that Oltu coal can be blended with coking Kozlu coal at certain ratios. However, additional analyses are needed in future studies to evaluate the blends more comprehensively. Thermal and structural analyses, particularly TG/DTG, FTIR, and XRD, can reveal the decomposition behavior and aromatic structure of the coals in more detail. Furthermore, CRI/CSR tests, Drum Index measurements, and microstructural characterizations (SEM, porosity analysis) should be conducted to determine the reactivity and mechanical strength of the produced coke. Such complementary studies will contribute to more precisely optimizing the optimum blend ratios and enhancing industrial-scale applicability as plasticity, fluidity, and dilatation.

6 Teşekkür

Bu çalışma BAP Koordinasyon Birimi No.lu Proje ile desteklenmiştir.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada fikrin oluşması, sonuçların incelenmesi ve makalenin kontrol edilmesi kısımlarında; literatür taraması, deneylerin yapılması ve makale yazımında ve denetiminde;, literatür taraması ve yazım denetiminde katkı sunmuşlardır.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur”
“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”.

9 Kaynaklar

- [1] Díez MA, Alvarez R, Barriocanal C. “Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking”, *Int J Coal Geol*, 50(1–4), 389–412, 2002, doi: 10.1016/S0166-5162(02)00123-4.
- [2] Esin F, Acur O, İşçi B, Cantürk C, Besun C, Çevik E. “Improvement of coke strength after reaction value (CSR) by spraying boron solutions on metallurgical coke”, *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 30(1), 103-108, 2024
- [3] 2023 Yılı Taşkömürü Sektör Raporu, 2024.

- [4] Sahajwalla V, Maroufi S, Bell G, Bell P BariI. Alternative sustainable carbon sources as substitutes for metallurgical coal, *IEA Bioenergy*, 2019.
- [5] Xiang C, Liu Q, Shi L, Zhou B, Liu Z. "Prediction of Gray-King coke type from radical concentration and basic properties of coal blends", *Fuel Process Technol*, 211, 106584, 2021, doi: 10.1016/j.fuproc.2020.106584.
- [6] Sahoo BK, Ghosh B, Abhijnan A, Kumar A. "Effect of different size fractions on coal quality", *Asian J Sci Technol*, 9(4), 8032–8035, 2018.
- [7] Akpabio IO, Chagga MM, Jauro A. "Assessment of Some Nigerian Coals for Metallurgical Application", *J Minerals Mater Charact Eng*, 7(4), 301–306, 2008, doi: 10.4236/jmmce.2008.74023.
- [8] Koszorek A, Krzesińska M, Pusz S, Pilawa B, Kwiecińska B. "Relationship between the technical parameters of cokes produced from blends of three Polish coals of different coking ability", *Int J Coal Geol*, 77(3-4), 363–371, 2009.
- [9] P. Kumari, A.K. Singh. Blending strategies of coals from diverse origins for efficient coke making. *Journal of the Geological Society of India*, 101(2), 220–229, 2025.
- [10] L. Kieush, A. Koveria, J. Schenk, K. Rysbekov, V. Lozynskiy vd., Investigation into the Effect of Multi-Component Coal Blends on Properties of Metallurgical Coke via Petrographic Analysis under Industrial Conditions, *Sustainability*, 14, 9947, 2022.
- [11] Arslan V. and Kemal M. The effects of inert matters and low volatile coal addition on the plasticity of high volatile Zonguldak coals, *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 106, 199–204, 2006.
- [12] European Patent Office (2015). Method for blending coal, blended coal, and method for producing coke, EP2832823B1, Publicationdate:04.11.2015. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/050843609/publication/EP2832823B1>
- [13] Khorami MT, Chelgani SC, Hower JC, Jorjani E. "Studies of relationships between Free Swelling Index (FSI) and coal quality by regression and Adaptive Neuro Fuzzy Inference System", *Int J Coal Geol*, 85(1), 65–71, 2011, doi: 10.1016/j.coal.2010.09.011.
- [14] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 'Oltu (Erzurum) kömür sondaj raporu', MTA Yayınları, 1984.
- [15] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), 'Türkiye kömür envanteri raporu', MTA Yayınları, 2018.
- [16] ASTM D2013/D2013M-21, 'Standard Practice for Preparing Coal Samples for Analysis', 2022.
- [17] Faes ED, Barriocanal C, Di'ez MA, Alvarez R, 'Characterization of different origin coking coals and their blends by Gieseler plasticity and TGA', *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 80, 203–208, 2007.
- [18] Korkmaz M. "Erzurum Oltu kömürü ve Zonguldak Kozlu kömür karışımlarının koklaşma özelliklerinin incelenmesi", M.Sc. thesis, Atatürk University, Erzurum, 2024.
- [19] ASTM D05.21 Committee, *Standard Test Method for Total Moisture in Coal*, 2023. doi: 10.1520/D3302_D3302M-22A.
- [20] ASTM D05.21 Committee, *Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*, 2020. doi: 10.1520/D3174-12R18E01.
- [21] ASTM D05.21 Committee, *Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke*, 2020. doi: 10.1520/D3175-20.
- [22] ASTM D2799-23 Standard Test Method for Microscopical Determination of the Maceral Composition of Coal, 2023.
- [23] ASTM D720/D720M-22 Committee, *Standard Test Method for Free-Swelling Index of Coal*, 2023 doi: 10.1520/D0720-91R10.
- [24] Coal — Determination of caking power — Gray-King coke test: ISO 502:2015.
- [25] ASTM D5515-22, *Standart Test Method for Determination of the Swelling Properties of Bituminous Coal Using a Dilatometer*, 2022. doi: 10.1520/D5515-22.
- [26] ASTM D2639-D2639M-21, *Standart Test Method for Plastic Properties of Coal by the Constant-Torque Gieseler Plastometer*, 2022. doi: 10.1520/D2639_D2639M-21.
- [27] Nasirudeen MB, Jauro A, "Quality of Some Nigerian Coals as Blending Stock in Metallurgical Coke Production", *JMMCE*, 10(1) 101–109, 2011, doi: 10.4236/jmmce.2011.101007.
- [28] Büzkan İ, 'Kömür Petrografisi Teknikleri ve Endüstriyel uygulamalar', *Madencilik*, 26(4), 31–39, 1987.
- [29] Kumar D, Kumar D, 'Evaluation of Coking Coal Resources and Reserves', *Management of Coking Coal Resources*, 2016.
- [30] Sahoo M, Bhowmick T, Mishra V, Pala S, Sharma M, Chakravarty S, Significance of coal quality on thermoplastic properties: a case study International Journal of Coal Preparation and Utilization 42 (4) 1015–1032, 2022.
- [31] Hiçyılmaz C. "Kömürün Petrografik Özelliklerinden Yararlanılarak Koklaşma Özelliklerinin Tayini", *Madencilik*, 24, 4, 1990.
- [32] Sy'korov I, Pickel W, Christanis K, Wolf M, Taylor GH, Flores D, Classification of huminite—ICCP System 1994, International Journal of Coal Geology 62, 85–106, 2005.
- [33] Kemal M, Arslan V, Cengizler H, Kömür Karışımlarının Koklaştırılmasında Bileşenler Arası Etkileşimler, *Madencilik*, 43 (4), 29–40, 2004
- [34] Erik NY, Kömür Özelliklerinin Temiz Kömür Teknolojilerine (Gazlaştırma, Sıvılaştırma, Karbon Elyaf Ve Kok Üretimi) Etkisi: Derleme, *UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4(2), 22–56, 2022.
- [35] Aziz H, Congo T, Steel KM. "Understanding the multiple interactions of inertinite during pyrolysis/carbonisation with vitrinite: A study of two Australian coals of different rank", *Fuel Process Technol*, 217, 106823, 2021.
- [36] Liu Z, Cao D, Chen G, Chen Q, Bi Z. "Differences in Molecular Structure between Vitrinite and Inertinite and Their Impact on Coal Conversion and Utilization", *ACS Omega*, 8(1), 12345–12356, 2023.
- [37] Samuel OO, Olugbenga EA. "Estimation and assessment of free swelling index and some petrographic properties from chemical analysis of coals across River Niger", *Petroleum and Coal*, 2016.
- [38] Ryemshak SA, Jauro A. "Proximate analysis, rheological properties and technological applications of some Nigerian coals", *Int J Ind Chem*, 4(1) 7, 2013, doi: 10.1186/2228-5547-4-7.

[39] Sciazko M, Mertas B, Stepień L. Kinetic modelling of coking coal fluidity development, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 142, 977–990, 2020.

Düzenlenmemiş Sürüm - Uncorrected Version