

KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMASI İLE İLGİLİ LİTERATÜR ÇALIŞMASI VE KENDİLİĞİNDEN YANMA TESTLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Mustafa GÜNDOĞAR¹

Accepted: 2024-07-17
DOI: 10.47118/somatbd.1493739

ÖZET

Kömür'ün kendiliğinden yanma olayını "kömür ve oksijen bir araya geldiğinde ısı veren bir tepkime oluşur. Açığa çıkan ısı uzaklaştırılmadığında kömür sıcaklığında artış meydana gelir. Bu işlem kömür kendiliğinden tutuşmaya başlayana dek devam eder." şeklinde açıklamak mümkündür.

Çalışmada kömürünün kendiliğinden yanması ile alakalı güncel literatür taraması yapılmış ve yapılan kendiliğinden yanma testleri incelenmiştir. Yapılan testlerin karşılaştırılması ve farklı kaynaklar aracılığı ile kendiliğinden yanma konusu hakkında bilgiler verilmiştir. Kömür' ün kendiliğinden yanma testlerinin taraması yapılmış aynı zamanda bu testler karşılaştırılmıştır.

Anahtar sözcükler: kömür, yanma, maden, kaynak

LITERATURE STUDY ON SPONTANEOUS COMBUSTION OF COAL AND COMPARISON OF SPONTANEOUS COMBUSTION TESTS

ABSTRACT

When coal and oxygen come together, a reaction occurs that gives heat. When the heat released is not removed, an increase in coal temperature occurs. It is possible to explain this as follows: "This process continues until the coal starts to spontaneously ignite." In the study, current literature on the spontaneous combustion of tamarisk charcoal was reviewed and the spontaneous combustion tests were examined. The tests performed were compared and information about spontaneous combustion was given through different sources. The spontaneous combustion tests were scanned and compared.

Keywords: coal, combustion, mine, resource

1. GİRİŞ

Kömür, ülkemizde son yıllarda yüksek kullanım miktarına ulaşan bir madendir. En çok kullanılan türü ise taşkömürü ve linyit kömürüdür. Türkiye'de kömür ocaklarının en büyük problemlerinden biri kömürün kendiliğinden yanma ihtimaline karşı önlem alınmamasıdır.

¹ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Soma Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Maden Teknolojisi Programı, Manisa, Öğretim Görevlisi, ORCID : 0000-0003-2389-2008.

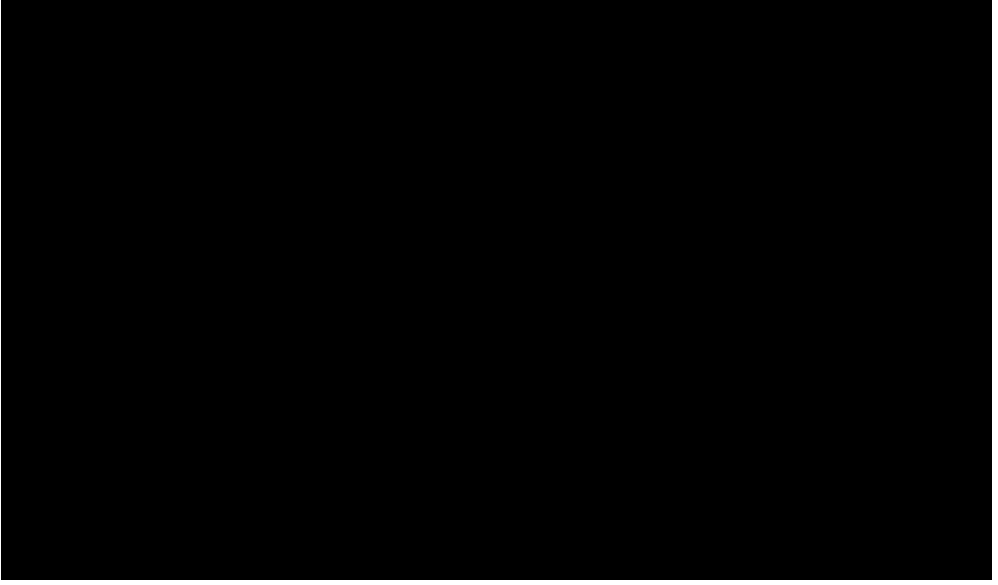
2. KENDİLİĞİNDEN YANMA KAVRAMI

Kömür'ün kendiliğinden tutuşması, ilk kez 1604 yılında tespit edilmiş ve 1686 yılında bilimsel bir inceleme konusu olmuştur (İnal, Aydın, 2019). Mamafih, bu karmaşık yanma reaksiyon yapısı nedeniyle hala tam olarak anlaşılmadığı bilinmektedir. Bu süreçteki belirgin özellikler arasında, bir kez başladıktan sonra geri dönüş olasılığının olmaması, ısıl sürüklenmenin devamlılığı ve hem yer üstünde hem de yer altında tespit edilmesinin zorluğu bulunmaktadır. Dolayısıyla, kömürün kendiliğinden yanması, akademik açıdan önemli ve güncelliğini koruyan bir konu olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenlerle çoğu araştırmacı, kendiliğinden yanmanın fiziksel ve kimyasal proseslerini (Kam vd., 1976a,b; Karsner ve Perlmutter, 1982; İtay vd., 1989; Arısoy ve Akgün, 1994; Carras ve Young, 1994; Zhu vd., 2012; Li vd., 2016; Zhou vd., 2017) ve kendiliğinden yanma prosesine etkilerini farklı parametreler kullanılarak araştırmış (Smith ve Glasser, 2005; Beamish ve Arısoy, 2008; Yuan ve Smith, 2011; Qi vd., 2015) olup konu ile ilgili çalışmalara ilgi devam etmektedir. ve konu üzerine yapılan araştırmalara ilgi sürmektedir.

Madencilik literatüründe, kömürün yavaş oksitlenme süreciyle kendiliğinden ısınması ve ardından ısı birikimiyle açık alevli yanmaya dönüşmesi durumu, "kendiliğinden yanma" olarak adlandırılmaktadır. Bu olay, özellikle linyit gibi düşük kaliteli kömürlerin madencilik faaliyetlerinde sıkça karşılaşılan bir özellik olarak bilinmektedir (Feng, 1985; Smith ve Lazzara, 1982). Derin, grizulu, grizusuz, linyit, antrasit gibi çeşitli madencilik koşullarında otomatik yanma olayının gerçekleşme ihtimali bulunmaktadır. Kendiliğinden yanma, ekipmanlara zarar veren, üretim faaliyetlerini engelleyen ve maden ocağının sürekliliğini ve büyümesini olumsuz etkileyen bir durumdur. Kömür, oda sıcaklığında ve normal atmosferik koşullarda oksijenle temas ettiğinde, oksijen emilimi gerçekleşir ve ısı, havalandırma olmadığı takdirde ortamda birikir. Bu durum, kömür sıcaklığında sürekli bir artışa neden olur (Şekil 1). Artan sıcaklık, oksitlenme sürecini hızlandırır ve bu mekanizma kontrol edilemez hale geldiğinde, açık alevli yanma meydana gelir (Karpuz ve ark., 1985,1986).

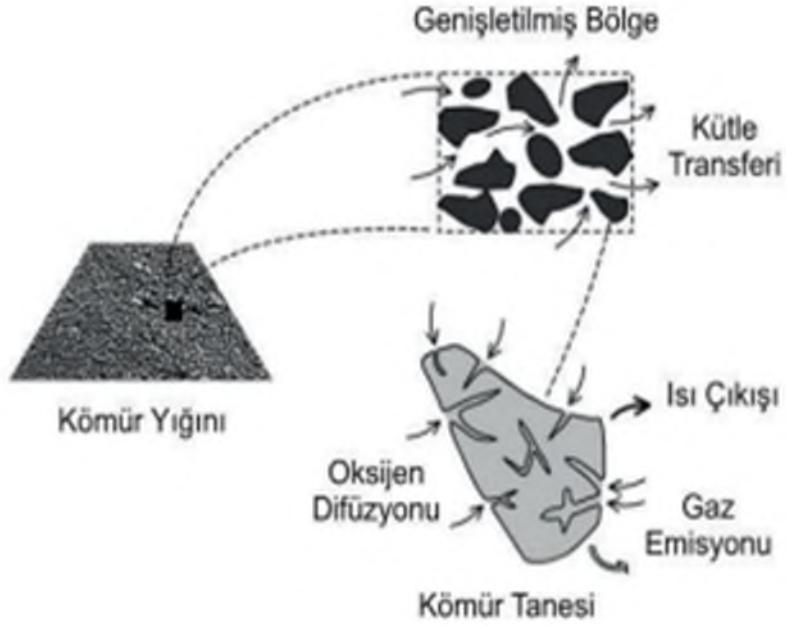
Kendiliğinden yanmayı etkileyen başlıca faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler kömür yapısı ve çevre koşulları ile doğrudan bağlantılıdır (Tablo 1).

Tablo 1. Kendiliğinden yanmayı etkileyen kritik faktörler (Singj,1986)



Nemi yüksek kömürler kendiliğinden yanma konusunda daha büyük riske sahiptir. Yine kömürün içinde pirit bulunması da kendiliğinden yanmayı doğru orantıda etkiler. Kendiliğinden yanma tespit edilirken bazı yöntemler kullanılır. Laboratuvarlarda kömürlerin kendiliğinden yanması incelenirken 5 yöntem kullanılır;

1. Adiyabatik oksidasyon metodu,
2. Tutuşma sıcaklığı metodu,
3. Statik izotermal (oksijen adsorbsiyon) metodu,
4. Dinamik oksidasyon metodu,
5. Kimyasal metodudur.



Şekil 1. Oksidasyon aşamaları (Wang vd., 2003)

2.1. Kendiliğinden Yanma Olayı Hakkında Teoriler

Bazı araştırmacılar kömürün kendiliğinden yanmasının fiziksel özelliğinin yanında kimyasal özelliklerini de incelemiş ve farklı teoriler ortaya çıkarmışlardır. Bu teoriler 4 tanedir.

1. Pirit Teorisi: Kömürlerin yapısında bulunan piritin kimyasal tepkime ile meydana gelen sıcaklık dolayısı ile kendiliğinden yanma durumunun ortaya çıktığı düşünülmektedir.

Yüksek oksijen ve nem değerlerine sahip bölgelerde, ince taneli ve %5 ila %10 arası pirit içeriğine sahip kömürlerin, kendiliğinden yanma eğilimini daha düşük sıcaklıklarda (50 °C'nin altında) artırdığı belirtilmiştir. Bu durum, pirit içerisindeki kükürdün oksidasyonu ile açığa çıkan ısıyla ilgilidir (Qi, 2011). Piritte bulunan kükürdün oksidasyona uğraması sonucunda oluşan sıcaklığın, kendiliğinden yanma reaksiyonunun %10'una denk olabileceği üzerinde vurgu yapılmıştır. Bu bulgular, kömür madenciliğinde kendiliğinden yanmanın anlaşılmasında ve önlenmesinde önemli bir role sahiptir (Wang, 2003).

2. Bakteri Teorisi: Bazı araştırmacılar da kömürün kendiliğinden yanma olayının yapısındaki bakteriler kaynaklı olduğunu savunmuşlardır.

3. Oksidasyon Teorisi: Teoriler arasında en çok onaylanan teoridir. Kömürlerin hava ile temas etmesinden kaynaklı farklı sonuçlara ulaşılmıştır.

4. Nem Teorisi: Bazı çalışmalarda kömürlerin nem oranının ile sıcaklığının arasında doğru orantı olduğu tespit edilmiştir. Kuru iklimlerde kömürün kendiliğinden yanması daha seyrek görülmektedir (Eroğlu, Gouws, 1993).

2.2. Kendiliğinden Yanmanın Erken Tespiti

Kömürün otomatik olarak oksijen ile reaksiyona girmesi sonucunda gerçekleşen kızışma olaylarının mümkün olduğunca erken belirlenmesi, ortaya çıkabilecek zararları en alt düzeyde tutabilmek açısından önemlidir. Sıcaklık arttıkça oksidasyon ve gaz çıkışı hızlanmakta bununla birlikte olayın ileri aşamalarında sorunlar ağırlaşmaktadır. Bu nedenle olayın erken tespiti ve gelişmesini sınırlandırmak için gerekli tedbirlerin alınması önem taşır. Bu amaca yönelik izleme ve değerlendirme çalışmalarında esas alınan ölçütler, üç ana başlıkta toplanabilir. (Kaymakçı, Toroğlu, Yılmaz, 2021)

- **Koku**

Oksidasyonun başlamasından itibaren yangının duyu organlar tarafından hissedilmesi günler bazen de haftalar sürebilmektedir. Bu geçen süreye kuluçka ismi verilmektedir. Koku meydana gelmesinden itibaren ise asıl yangın zamanı başlar ve kısa sürede alev alabilir. Koku alınmaya başlandığı vakit yangına müdahale etmek için çok geç olabilmektedir.

- **Sıcaklık Artışı**

Saraç (1992) konu ile ilgili olarak; “Oksidasyon ekzotermik reaksiyondur. Bu nedenle kızışmanın en belirgin göstergesi sıcaklık artışıdır. Ancak sıcaklıktaki ilk değişimler kızışan ortam çevresi ile sınırlı kalmakta, havalandırma havasındaki sıcaklık artışları çok daha ileri aşamalarda gözlenebilmektedir. Ayrıca kızışmanın ilk aşamalarındaki sıcaklık artışları kolayca seyreltilmekte, ısısal sensörler etkilenen alana çok yakın yerleştirilmedikçe, sıcaklıkta kayda değer değişimler fark edilememektedir. Yangına karşı erken uyarı sistemlerinde kullanılan sensör tiplerinden birisi ocak havasındaki sıcaklık değişimini esas alan sensörlerdir. Ancak sıcaklık artışının etkili bir şekilde izlenebilmesi için çok sayıda sensörün ocak boyunca ve özellikle şüpheli bölgelere çok yakın yerlere yerleştirilmesi gerektiğini” vurgulamaktadır.

- **Yanma Gazları**

Kömürün kendiliğinden yanma düzeneğinin araştırıldığı laboratuvar çalışmaları sonucunda oksidasyonun başlangıcından sonuna dek her anında farklı gazların ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır. En erken oluşan gaz karbonmonoksit olup 30-40 °C sıcaklıklarda dahi ölçülebilmektedir. Bu değer hidrojen için 80-100 °C propilen gazı için ise 150 °C civarındadır (Saraç 1992, Ökten vd. 1998)

3. KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMAYA YATKINLIĞININ BELİRLENMESİNDE KULLANILAN LABORATUVAR YÖNTEMLERİ VE RİSK İNDEKSLERİ

Kömürler kendiliğinden yanmaya yatkinlığına genel olarak üç faktörün etkisi vardır. Bu etkenler kömür faktörü, jeolojik faktör ve madencilik faktörüdür.

Bhattacharya (1982), kendiliğinden yanmanın toplam riskinin, bu üç faktöre ait sayısal değerlerin birbirleriyle çarpılarak bulunabileceğini ifade etmiştir.

Buna göre;

Toplam Risk = Kömür Faktörü x Jeolojik Faktör x Madencilik Faktörü (Eşitlik 1) şeklinde ifade edilmiştir (Kaymakçı 1998).

Kendiliğinden yanmaya yakınlıkları açısından kömürleri değerlendirmek amacıyla farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen ve literatürde ayrıntılı olacak şekilde tanımlanmış olan bu yöntemler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Kaymakçı, 1998)

- Doğrudan gözlemler
- Kimyasal yöntemler
- Statik İzotermal Yöntem
- Dinamik Yöntemler
- Adyabatik Oksidasyon Yöntemi
- Tutuşabilirlik Yöntemi
- DTA (Differential Thermal Analysis) Yöntemi
- Olpinski Yöntem

4. DENEYSSEL YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI KONUSUNDA DÜNYA ÇAPINDAKİ ARAŞTIRMACILARIN GÖRÜŞLERİ

Hodges ve Acherjee (1966), Bu iki araştırmacıya göre daha önce yapılan çalışmalara ait eleştirilerin en yaygını deneysel koşulların uygulamadaki koşullardan uzak olmasıdır. Bundan dolayı şu an yapılan çalışmalar izotermal kalorimetreyi haklı çıkarmaktadır.

Banerjee ve Chakravorty (1967), “Kömürlerin kendiliğinden yanmaya yakınlığının saptanması için DTA’lardan elde edilen termogramların dikkatli bir şekilde incelenmesi faydalı olacaktır.”

Güney ve Hodges (1969), “Adyabatik yöntem, kömürün kendiliğinden yanması esnasında meydana gelen reaksiyonların incelenmesinde uygun bir teknik olmaktadır.”

Banerjee vd. (1972), “Her ne kadar, yöntemlerin çoğunluğu kömürlerin kendiliğinden yanmaya yakınlığını saptamada, değişik açılardan güvenilir olsa bile, yöntemlerin hiçbiri başlı başına kendiliğinden yanmada etkili olan parametrelerin hepsini (örneğin; oksijen tüketimine yakınlığı, ısının birikme özelliklerini, kırılgenliği vb.) dikkate alamamaktadır. Bu nedenle, kömürün kendiliğinden yanmaya yakınlığının derecesi bir tek deneyden veya bir grup deneyin kullanılmasıyla bile doğru bir şekilde saptanamaz.”

Nandy vd. (1972), “Kesişme noktası sıcaklığı yöntemi, çeşitli Hindistan kömürlerinin kendiliğinden yanmaya yakınlıklarına göre sınıflandırılmasında geçerli bir indeks olarak kullanılabilir.”

Bagchi (1972), “Şimdiye kadar laboratuvarlarda kömürün kesişme noktası ve devamında

tutuşma noktası sıcaklığının saptanması ile göreceli olarak kömürün kendiliğinden yanmaya yatkınlığını saptamak olanaklı olmuştur.”

Kim (1977), “Kömürlerin kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının saptanmasında kullanılan çeşitli yöntemler olmasına rağmen, hiçbiri diğerinden açık bir üstünlüğe ve genel bir kullanıma sahip değildir.”

Cudmore ve Sanders (1984), “Kömürlerin kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının önceden saptanabilmesi için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Kömürlerin adyabatik koşullar altında kendiliğinden yanmasının incelenmesi belki de en iyi yöntem olmasına rağmen deney süresinin uzun olması nedeniyle sıkça başvurulmuş bir yöntem değildir.”,

Feng (1985), “Oksijen tüketimi tekniklerinden elde edilen karbonmonoksit oksijen azalması oranı ($CO \Delta O_2$) kendiliğinden yanmaya yatkınlığın en iyi göstergelerinden birisidir. Bu da statik izotermal yönteme işaret etmektedir.” (Bilen ve Kaymakçı, 2023)

5. TÜRKİYEDE YAPILMIŞ KENDİLİĞİNDEN YANMA TESTLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Delibalta, Gündoğar, 2020 tarihli İlgin Linyit İşletmesinde Kömürün Kendiliğinden Yanması ve Risk Analizi” isimli çalışmalarından” İlgin linyit işletmesindeki 5 farklı üretim noktasından alınan temsili kömür numunesi üzerinde yapılan kendiliğinden yanma deney sonuçlarına göre; kesişim noktası değerleri çok fazla bir sapma göstermemiş olup, genelde tutuşma sıcaklığı 195-234 °C arasında değiştiği belirlenmiştir. Laboratuvar test sonuçlarına göre; yangına yatkınlık indeksleri 2,73-3,73 arasında, risk düzeyi ise “düşük-orta” seviyede tespit edilmiştir. Ayrıca; yapılan TG/DTA analizlerine göre, işletme kömürleri başlangıçta 0-200 °C arasında nemini atarak endotermik reaksiyon göstermiş, daha sonra 200-300 °C arasında hızlı bir artış göstererek ekzotermik reaksiyon göstererek, kömürün ortam sıcaklığına bağlı olarak oksidasyona uğradığı ve kendiliğinden yanma meydana getirebileceği gözlenmiştir” bulgusunu çıkarmış ve bilimsel tespitler ile destekleyerek konu hakkında bilgi vermişlerdir.

Axundov, 2021 tarihli “Bir Yeraltı Kömür Madeninde Kömürün Kendi Kendine Yanmasına Etki Eden Parametrelerin Analizi” isimli çalışmada “(E2K2) istasyona ait karbondioksit (CO_2) konsantrasyonu ortalama 0,12 % iken yanma zamanı değerler artarak en fazla % 0,5’e yükselmiştir. Ortalama oksijen (O_2) %20,8 iken diğer gazların değerlerinin artmasıyla birlikte azalarak %20,5 değerine düşmüştür. Karbonmonoksit (CO) miktarı, ortalama 0 ppm gösterirken yanma gerçekleştiğinde 500 ppm’e yükseldiği gözlemlenmiştir. Aynı istasyona bulunan tehlikeli gaz değerlerinden olan metan (CH_4) max. %0,3 değerine yükseldiği gözlemlenmiştir. Ölçülen gaz oranları, Graham (2,1) ve benzeri oranların artması yangın oluşumunu tetiklemektedir. Netice itibarıyla yeraltında gaz oranları bilgisi sahibi olmak, kendiliğinden yanmanın tespitinde önemli parametreler olarak görülmektedir. Yapılan hesaplamalar, ölçümler, gözlemler ve işletme tarafından paylaşılan bilgiler yoluyla kendiliğinden yanmanın olduğu anlaşılmıştır” tespiti çıkarmış ve bilimsel tespitlerle destekleyerek konu hakkında bilgi vermişlerdir.

Yörük 2021 tarihli, “Kömürün Kendi Kendine Isınmasının ve Tutuşmasının Modellenmesi, Simülasyonu ve Deneysel İncelenmesi” isimli Doktora tezinde, Kömürün madencilik ortamlarında kendi kendine ısınması ve yanması sürecinin, önceden tahmin edilebilmesi günümüzde tam olarak çözümlenmemiş bir sorundur. Bu durumu etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Özellikle kömürün kendiliğinden yanmaya yatkınlığı veya reaktivitesi ile

içerdiği doğal nem miktarı, bu sürecin en belirleyici parametreleridir. Bu tez kapsamında, madencilik ortamına mümkün olduğunca yakın şartlarda, kömürün kendi kendine ısınma ve yanma süreçleri teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, kömürdeki nemin etkisi de dahil olmak üzere birçok parametreyi hesaba katan yeni bir model geliştirilmiştir. Deneysel çalışmalar için adyabatik fırın ve termo-denge deney düzenekleri üretilmiştir. Geliştirilen kontrol algoritması ile düşük sıcaklıklarda adyabatik ortam sağlanarak, 0.1°C'ye kadar hassas deneyler gerçekleştirilmiştir. İşletmelerden sağlanan ve kısa bir analizden geçirilen numuneler üzerinde önce R70, ardından kuluçka deneyleri yapılmıştır. R70 deneyi sonucunda, çok riskli olarak sınıflandırılan A numunesinde kuluçka deneyinde 40 saatlik bir ısıl sürüklenme gözlemlenmiştir. Ancak riskli olduğu düşünülen B numunesinde, özgün nem içeriğinin buharlaşma süreci sıcaklık artışı baskıladığı ve ısıl sürüklenme gözlemlenmediği tespit edilmiştir. Bu nedenle, kömürün içsel reaktivitesini belirlemede tek başına R70 deneylerinin yetersiz olduğu ve nem etkileşimlerinin daha derinlemesine incelenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Kömürün kendi kendine yanmasını belirleyen faktörler arasında, oksidasyon ve buharlaşma arasındaki ısı dengesi önemlidir. Bu nedenle, modelde reaksiyon kinetiği ve buharlaşma/nem çıkışı kinetiği detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Fiziksel modelde, adyabatik fırın koşulları temel alınmıştır. Bu çalışmada, yaşlanma etkisi de dahil edilmiş, yeni reaksiyon kinetik modeli önerilmektedir. Önerilen model için gerekli deneysel olarak gerekli parametrelerin nasıl elde edileceği açıklanmıştır. "Kuruma – nem çıkışı kinetiği" terimi, temel kütle taşınım denklemlerine dayanarak ve tek molekülü seviyede bağlı nemi de içerebilecek durumda yeniden düzenlenmiştir. Gerekli parametreler, Reynolds sayısının sıfıra yaklaştığı durumlarda küre çevresinde akış maksadıyla geçerli olan kütle hareketi bağlantıları kullanılarak hesaplanmıştır (Yörük, 2021). Tez çalışmasının simülasyon kısmında, en başta tavsiye edilen tepkime kinetiği modeli, R70 deneylerinin sonuçlarıyla netleştirilmiştir. Kuruma kinetiği modelinin sağlaması yapılması için ise thermo-balance deneyi ile lazım olan ölçütler 80'de elde edilmiş ve öteki sıcaklık ve akış hızlarında elde edilen model sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Önerilen teorik ifadeler, deneysel olarak ölçülen verilerle oldukça başarılı bir uyum içindedir. Geliştirilen simülasyon programı, kömür numuneleri için gerçekleştirilen kuluçka deneylerinin simülasyonunu başarıyla gerçekleştirmiştir. İçsel reaktivitesi yüksek olan A numunesi için modelin artan ısının kömürün daha fazla ısınması zamanı ve kendiliğinden ısınma eğrisi tahmini, deneysel sonuçlarla oldukça uyumludur. Daha emniyetli olarak tanımlanabilecek, düşük tepkimeye ve fazla nem içeriğine sahip B numunesinin davranışında ise model oldukça başarılı bir şekilde öngörmüştür (Yörük, 2021). Araştırma kapsamında geliştirilen yeni model, kömürün kendi kendine ısınma ve tutuşma süreçlerini teorik ve deneysel olarak inceleyerek, mevcut modellerin ötesine geçmiştir. Modelin ayırt edici unsurlarından biri, thermo-balance ve adyabatik fırın deney seti kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarını yüksek hassasiyetle tahmin edebilmesidir. Bu bağlamda, düşük sıcaklıklarda bile 0.1°C 'ye kadar adyabatik ortam sağlanması, deneylerin doğruluğunu artırmıştır. R70 deneyi ve kuluçka deneyleri kullanılarak kömür numunelerinin reaktivitesi incelenmiş ve kömürün nem içeriğinin bu süreçler üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Özellikle, yüksek risk taşıyan A numunesinde gözlemlenen ısıl sürüklenme, modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini göstermektedir. Diğer yandan, B numunesindeki özgün nem içeriğinin buharlaşma süreci, sıcaklık artışı baskılamış ve ısıl sürüklenmenin gerçekleşmediği sonucuna varılmıştır. Bu bulgular, R70 deneylerinin tek başına yeterli olmadığını ve nem etkileşimlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Kömürün kendi kendine tutuşma sürecini belirleyen oksidasyon ve buharlaşma arasındaki ısı dengesinin modelde ayrıntılı olarak ele alınması, çalışmanın bilimsel katkısını artırmaktadır. Reaksiyon kinetiği ve buharlaşma/nem çıkışı kinetiğinin detaylı bir şekilde modellenmesi, deneysel verilerle yüksek uyum göstermektedir. Özellikle, düşük

reaktiviteye sahip ve yüksek nem içeriği bulunan kömür numuneleri için modelin başarılı tahminler yapabilmesi, tezin pratik uygulamalar için değerini artırmaktadır. Kömürün kendi kendine tutuşma riskinin belirlenmesi ve yönetilmesi konusunda önemli bir adım atmıştır. Geliştirilen model ve yöntemler, haftalarca sürebilecek kuluçka testlerinin kısa sürede tamamlanmasını ve kömür numuneleri için tam bir sıcaklık-zaman değişiminin simüle edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu da, kömür madenlerinde güvenliğin artırılmasına ve potansiyel yangın risklerinin önlenmesine önemli katkılar sağlayacaktır. Bu çalışmanın bulguları, kömür madenciliği ve enerji üretimi alanlarında pratik uygulamalara yönelik değerli bilgiler sunmaktadır. Bu tezde önerilen model ve yöntem kullanılarak, kömürün kendi kendine tutuşma yatkınlığının belirlenmesinde en etkili yöntem olarak görülen ve haftalarca sürebilen kuluçka testleri çok kısa bir süre içerisinde tamamlanarak, simüle edilen kömür için tam bir sıcaklık – zaman değişimi elde edilebilir.” bulgusunu çıkarmış ve bilimsel tespitler ile destekleyerek konu hakkında bilgi vermişlerdir. Kendiliğinden yanma kavramı hakkında literatür taraması yapılmış, sonuçlar aşağıdaki Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Literatür tablosu

Yıl	Yazarlar	Çalışma Hakkında
1992	Kaymakçı ve Didari	Zonguldak havzasından iki taş kömür damarı ve garp linyitleri işletmesinden bir linyit damarı üzerinde deneyler yapılmış olup elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.
1998	Unver ve Özözen	Yer üstünde stoklanan kömürlerin oksidasyon sonucu kendiliğinden yanma olayı ve yanma modelleri ele alınmıştır. Kendiliğinden yanmada etkili olan iç ve dış faktörler hakkında bilgi verilmiştir.
2003	Wang ve Dlugogorski	100 °C ‘den düşük sıcaklığın kömürün kendi kendine yanmasından sorumlu olduğu çalışmada belirtilmiştir. Kömür oksidasyonunun kinetik modellemesi yapılmıştır.
2014	Kuzuluk	Çayırhan kömürlerinden hazırlanan stokların kendiliğinden yanma yapıları araştırılmış, 4 adet stok sahası hazırlanmıştır. Aynı zamanda kömürün sınıflandırılması ve özellikleri hakkında da bilgi verilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, Çayırhan kömürlerinin genel olarak 65 °C ‘de kuluçka evresine geçtikleri, ortalama 3 günün sonunda yaklaşık 70-75 °C’de alevli yangınların meydana geldiği gözlemlenmiştir.
2016	Yılmaz	Kendiliğinden yanma olayının sebep olduğu kayıpların nasıl önenebileceği çalışmada belirtilmiştir. Aynı zamanda erken tespit ve önlem alınmasının bu kayıpları nasıl en aza indirebileceği konusunda bilgi verilmiştir.

2019	İnal ve Aydın	Kömürün kendiliğinden yanma mekanizması ve kömürün yapısı detaylı şekilde incelenmiş ,oksidasyon aşamaları hakkında bilgi verilmiş kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen faktörler belirtmiş ve açıklanmıştır.
2020	Şensöğüt ve Ören	Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) içerisinde faaliyet gösteren Çan Linyitleri İşletme Müdürlüğü (ÇLİ), açık ocak ve stoklarından temin edilen kömür örneklerinin kendiliğinden yanma özellikleri, kesişim noktası yöntemiyle belirlenmiştir. Bu örnekler, KDPÜ Maden Mühendisliği Kendiliğinden Yanma Laboratuvarı'na getirilmiş ve çeneli kırıcı ve halkalı değirmen gibi ekipmanlar kullanılarak boyutları küçültülmüş, 75 µm boyutuna getirilmiş ve deneye hazır hale getirilmiştir.
2020	Delibalta ve Gündoğar	İlgın Linyit kömürü hakkında kendiliğinde yanma olayı hakkında bilgi verilmiş olup risk analizi yapılmıştır. İlgın Linyit işletmesinde beş farklı noktadan numune alınmış bu numuneler üzerinde kendiliğinden yanma deneyi yapılmıştır.
2021	Axundov	Kömürün kendi kendine yanma olayının madencilikte en büyük sorunlardan biri olmasından dolayı çalışmada bu yanmanın doğurduğu maddi ce manevi kayıpların azaltılabilmesi için kömürün mekanizması araştırılmış ,oksidasyon mekanizmasının, kendi kendine yanma parametrelerinin, özellikle hava akış ve basınç kayıplarını nasıl etkilediği konusunda bilgi verilmiştir. Aynı zamanda havalandırma parametrelerinin kendiliğinden yanma üzerindeki etkileri araştırılmış, tahmin modelleri hakkında bilgi verilmiştir.
2022	Naktiyok ve Özer	Kömürün kendiliğinden yanma süreçleri termal analiz cihazı ile incelenmiştir. Termal analiz cihazı verilerinden faydalanarak örneklerin ana yanma bölgesi için gerekli enerjileri hesaplanmış aynı zamanda kendiliğinden yama sıcaklıkları belirtilmiştir.
2023	Kahraman ve Ramazanirend	Kendiliğinden yanmanın erken tespitinde önemli rol oynayan gaz kromatografisi ekipmanının genel tanımı yapılmış ve Polyak Eynez A.Ş. Kınık Linyit İşletmesi' nde sistemin kullanılmasında elde edilen avantajlar hakkında bilgi verilmiştir.
2023	Kaymakçı ve Bilen	Kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen faktörler incelenmiş ve hem kömürün kendi yapısının hem de olası dış etkenlerin kendiliğinden yanmaya etkileri belirtilmiştir. Kendiliğinden yanmaya etkisi ilen faktörler hakkında detaylı

		şekilde bilgi verilmiştir.
2023	Wang ve Li	Üç farklı kömür numunesine ısı işlem uygulanarak nükleer manyetik rezonans (NMR), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve tek eksenli sıkıştırma (UC) testleri aracılığıyla, kendiliğinden yanma sırasında kömür türlerinin gözenek kırılmasındaki değişiklikler tespit edilmiştir.

6. SONUÇ

Kömürün kendiliğinden yanma olayı işçi sağlığı ve maden güvenliği adına çok büyük bir problemdir. Bu olayı engelleyebilmek için can ve mal kaybından önce gerekli tedbirler mutlaka alınmalıdır. Özellikle kendiliğinden ısınma problemine önceden müdahale edilmezse yapılan geç müdahale kömürün daha fazla yanmasına ve daha fazla kayıplar yaşanmasına sebebiyet verebilir. Kendiliğinden yanma konusunu etkileyen faktörler dikkate alındığında nem bu faktörlerin içinde oldukça önemli bir faktördür. Nemsiz ortamda ısınma daha kolay sağlanacağı için risk yüksektir.

Kömür kullanım alanı yaygın ve uzun süre kullanılacak bir madendir. Bu madeni kullanmaya devam ettiğimiz sürece kendiliğinden yanma tehlikesi her zaman hayatımızda var olacaktır. Çoğu zaman kendiliğinden yanmanın olmayacağını düşünülüyor eğimi az olan kömür damarlarında dahi yangınlar meydana gelmiştir. Bu konu ile alakalı hem işçi hem de işverene gerekli eğitimler verilmeli ve kayıp en aza indirilmeye çalışılmalıdır. Çalışmada geçen Türkiye de yapılmış kendiliğinden yanma testlerinin karşılaştırılması başlığı bu anlamda önemlidir. Bu testler ile kendiliğinden yanma konusunda yeni bilgiler edinilmiş ve gerekli önlemler alınması konusunda mesajlar verilmeye çalışılmıştır. Bu testler aynı zamanda kömürün hangi ortamda daha kendiliğinden yanma anlamında daha tehlikeli olduğu ve bunu etkileyen faktörler başta olmak üzere birçok ihtimali göz önünde bulundurmıştır.

Sonuç olarak can ve mal kaybına ilişkin risklerin ortadan kaldırılması veya en aza indirilmesi için kömür madenlerinde çıkan yangınların sebepleri araştırılmalı titiz bir şekilde bilgi edinilmelidir. Özellikle linyit kömürünün yanma riskine karşı tüm havzalarda risk haritası çıkarılmalıdır. Bu şekilde tedbirler alınarak müdahale yolları belirlenmeli ve sürekli olacak şekilde takip yapılmalıdır. Ancak bu şekilde can ve mal kaybının önüne geçilebilir. Sürekli hale gelecek yöntemler ile hiçbir işçi ekmek parası için canından olmayabilir ve ülkemizin yeraltı kaynakları açısından oldukça zengin olan madenlerimiz zarar görmekten kurtulabilir.

KAYNAKLAR

1. Yörük, B., 2021. Kömürün Kendi Kendine ısınmasının ve Tutuşmasının Modellenmesi, Simülasyonu ve Deneysel İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi.
2. Axundov, G., 2021. Bir Yeraltı Kömür Madeninde Kömürün Kendi Kendine Yanmasına Etki Eden Parametrelerin Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 49s.
3. Kam, A.Y., Hixson, A.N., Perlmutter, D.D., 1976a. The Oxidation of Bituminous Coal-1. Chemical Engineering Science, 31, 815-819.
4. Kam, A.Y., Hixson, A.N., Perlmutter, D.D., 1976b. The Oxidation of Bituminous Coal-2. Chemical Engineering Science, 31, 821-834.
5. Karsner G.G., Perlmutter D.D., 1982. Model for Coal Oxidation Kinetics. 1. Reaction Under Chemical Control. Fuel,61(1):29-34.
6. Arısoy, A., Akgün, F., 1994. Modelling of Spontaneous Combustion of Coal with Moisture Content Included. Fuel, 73,2, 281-286.
7. Itay M., Hill C.R., Glasser D., 1989. A Study of the Low Temperature Oxidation of Coal. Fuel Processing Technology, 21, 81-97.
8. Carras, J.N., Young, B.C., 1994. Self-heating of Coal and Related Materials: Models, Application and Test Methods. Progress in Energy and Combustion Science, 20, 1-15.
9. Zhu, J., He, N., Li, D., 2012. The Relationship Between Oxygen Consumption Rate and Temperature During Coal Spontaneous Combustion. Safety Science, 50, 842-845.
10. Li, Z., Zhang, Y., Jiang, X., Zhang, Y., Chang, L., 2016. Insight into the Intrinsic Reaction of Brown Coal Oxidation at Low Temperature: Differential Scanning Calorimetry Study. Fuel Processing Technology, 147, 64-70.
11. Zhou, C., Zhang, Y., Wang, J., Xue, S., Wu, J., Chang, L., 2017. Study on the Relationship Between Microscopic Functional Group and Coal Mass Changes During Lowtemperature Oxidation of Coal. International Journal of Coal Geology, 171, 212-222.
12. Feng, K.K., 1985. Spontaneous Combustion of Canadian Coals, CIM Bulletin, 877, 71-75.
13. Smith, A.C. ve Lazzara, C.P., 1987. Spontaneous Combustion Studies of U.S. Coals, Bureau of Mines Report of Investigation, RI 9079.
14. Karpuz, C, Bölükbaşı, N., Paşamehmetoğlu, A. ve Gürhan, A., 1985. Silopi Bölgesi Asfaltitlerinin Kaya Mekanığı Parametrelerinin Kesilebilirliğinin, Hidrolik Çatlaklılabirliğinin Araştırılması, TKİ için ODTÜ Ağüdos Raporu, 85-03-05-01-10 no.lu Rapor, 103.
15. Karpuz, C, Bölükbaşı, N., Paşamehmetoğlu, A. ve Gürhan, A., 1986; "GAL Silopi Asfaltitlerinin Gaz İçeriği, Kendiliğinden Yanma Riski ve Kesilebilirliğinin Araştırılması", Türkiye 5. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, s. 379-391.
16. Singh, R.N., 1986. A Practical System of Classifying Coal Seams Liable to Spontaneous Combustion, J. Col. Qual., 5-3, 108-112.
17. Qi, X., Wang, D., Milke, J.A., Zhong, X., 2011. Crossing Point Temperature of Coal. Mining Science and Technology (China), 21, 255-260.
18. Wang, H., Dlugogorski, B. Z., Kennedy, E. M., 2003. Coal Oxidation at Low Temperatures: Oxygen Consumption, Oxidation Products, Reaction Mechanism and Kinetic Modeling. Progress in Energy and Combustion Science, 29, 487-513.

19. Kaymakçı, E., Bilen, M., Yılmaz, S., 2023. Yeraltı Kömür Madenlerinde Kendiliğinden Yanabilirlik Etüdü ile İSG Uygulamalarının İzlenebilirliğinin Artırılması Projesi, Kömürün Kendiliğinden Yanma Olgusu, 4, 21-24.
20. Saraç, S., ve Soytürk, T., 1992. Tunçbilek Kömürlerinin Kendiliğinden Yanmaya Yatkınlıklarının Araştırılması, Türkiye 8. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, 141-152.
21. Ökten, G., Didari, V. ve Şensöğüt C., 1998. Kömürün kendiliğinden yanması ve önlenmesi için alınacak tedbirler, Kömür, Ed. O. Kural, s. 243-255
22. Kaymakçı, E., 1998. Zonguldak Havzası Kömür Damarlarına Uygulanabilecek Bir Kendiliğinden Yanmaya Doğal Yatkınlığı Değerlendirme Tekniğinin Geliştirilmesi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Ens., Doktora Tezi, 148.
23. Hodges, D.J., Acherjee, B, 1966. A Microcalorimetric Study of the Influence of Moisture on the Spontaneous Heating of Coal, The Mining Engineer, November, 121-131.
24. Banerjee, S.C., Chakravorty, R.N., 1967. Use of DTA in the Study of Spontaneous Combustion of Coal, Journal of Mines Metals and Fuels, January, 1-19.
25. Güney, M., Hodges, D.J., 1969. Adiabatic Studies Spontaneous Heating of Coal, Part 1, Colliery Guardian, February, 217,2,105-109.
26. Banerjee, S.C., Nandy, D.K., Banerjee, D.D., Chakravorty, R.N. 1972. Classification of Coals with Respect to their Susceptibility to Spontaneous Combustion, Trans. Min. Geol. Met. Inst., India, 59,2,15-31.
27. Nandy, D.K., Banerjee, D.D. and Chakravorty, R.N., 1972. Application of Crossing-Point Temperature for Determining the Spontaneous Heating Characteristics of Coals, Journal of Mines Metals and Fuels, 20, 2,41-48.
28. Bagchi, S., 1972. Spontaneous Combustion of Indian Coals, Qrt. J.Geol. Min.Metall Soc., 45, 2, 71-75.
29. Kim, A.G., 1977. Laboratory Studies on Spontaneous Heating of Coal, US Bureau of Mines, IC 8756, 13.
30. Cudmore, J.F. and Sanders, R.H., 1984. Spontaneous Combustion of Coal, Mine Fires and Interpretation of Analyses of Mine Gases-A Literature Review, Australian Coal Industry Research Laboratories Ltd., Published Report 84-10.
31. Feng, K.K., 1985. Spontaneous Combustion of Canadian Coals, CIM Bulletin, 78, 877, 71-75.
32. Delibalta, M., Gündoğar, M., 2020. Ilgın Linyit İşletmesinde Kömürün Kendiliğinden Yanması ve Risk Analizi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2, 1024.
33. İnal, S., Aydın, K., 2019. Kömürün Kendiliğinden Yanması ve Etkileyen Faktörler, Bilimsel Madencilik Dergisi 2, 146.
34. Şensöğüt, C., Ören, Ö., 2020. Çan Linyitlerinin Kendiliğinden Yanma Yatkınlıklarının Araştırılması, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 603.
35. Wang, H., Dlugogorski, B. Z., Kennedy, E. M., 2003. Coal Oxidation at Low Temperatures: Oxygen Consumption, Oxidation Products, Reaction Mechanism and Kinetic Modeling. Progress in Energy and Combustion Science, 29, 487-513.

36. Kahraman, E. ve Ramazanirend, A., 2023. Yeraltı Madenciliğinde Gaz Kromatografi Kullanımı ve Önemi, TMMOB Maden Mühendisleri Odası 9.Maden Makineleri ve Teknolojileri Kongresi, İzmir.
37. Naktiyok, J., Özer, A., 2022. Termogravimetrik Analiz İle Farklı Kömürlerin Yanma Prosesinin İncelenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(4), 691-701.
38. Eroğlu, N., Gouws, M. J., 1993. Theories on Spontaneous Combustion of Coal. Scientific Mining Journal, 32(2), 13-18.