

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

Fatma BİLİRGEN

**İŞİK SENSÖRLÜ 1 LİTRELİK TOZ PATLAMA KÜRESİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA-2022

ÖZ

DOKTORA

**IŞIK SENSÖRLÜ 1 LİTRELİK TOZ PATLAMA KÜRESİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

Fatma BİLİRGEN

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman : Prof. Dr. Suphi URAL
Yıl: 2022, Sayfa: 186
Jüri : Prof. Dr. Suphi URAL
Prof. Dr. Mehmet BİLGİLİ
Prof. Dr. Gökhan AYDIN
Prof. Dr. İzzet KARAKURT
Doç. Dr. Füsün DOBA KADEM

Bu çalışmada, toz taneciklerinin patlama karakteristiğinin ve kalorifik değerinin aynı anda belirlenmesini sağlayan kompakt bir cihaz geliştirip doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Mevcut 20 L'lik Siwek küresindeki basınç sensörüne ilaveten bu patlama küresinde ışık sensörü kullanılarak patlama anı ve süresi hassas olarak ölçülebilmektedir. Işık sensörü ile patlama kürelerinde patlama hızı tayini ilk defa denenilen bir çalışma olmuştur. Işık yayılımı toz patlaması anında oluşan basınç dalgalarının yayılım hızından çok daha hızlı olduğu için ışık sensörü tarafından patlamanın algılanması zaman kaybı olmadan gerçekleşmektedir. İlk andaki patlamayı algılayabilen bir sensör patlama küresi içerisindeki olayların daha iyi anlaşılması sağlamıştır. 1 L'lik toz patlama küresi kullanılarak ölçülen maksimum basınç (P_{max}) değerleri 20 L'lik Siwek kullanılarak elde edilen P_{max} değerleri arasında lineer bir orantı olduğu saptanmıştır. İki veri arasındaki ilişki lineer eğri uydurma yöntemiyle formülize edilmiştir. Böylece, 1 L'lik toz patlama küresinde elde edilen sonuçların bu çalışmada geliştirilen lineer eğri ile birlikte mühendislik uygulamalarında güvenli bir şekilde kullanılabilirliğinin mümkün olduğu görülmüştür. 1 L'lik ve 20 L'lik toz patlama kürelerinde aynı kömür için ölçülen P_{max} değerleri arasındaki belirleme (determinasyon) katsayısı, $R^2=0.903$ olarak hesaplanmıştır. 1 L'lik patlama küresi ile ölçülen P_{max} değerleri ve bu değerlere bağlı olarak hesaplanan patlama indeks katsayısı bu çalışmada geliştirilen lineer eğri yardımıyla 20 L'lik Siwek küresi kullanılarak ölçülen P_{max} değerlerine yaklaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Toz patlaması, patlama küresi, patlama indeksi, maksimum patlama basıncı

ABSTRACT

Phd THESIS

DEVELOPMENT OF A 1 LITER EXPLOSION CHAMBER EQUIPPED WITH A LIGHT SENSOR

Fatma BİLİRGEN

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF MINING ENGINEERING

Supervisor : Prof. Dr. Suphi URAL
Year: 2022, Pages: 186
Jury : Prof. Dr. Suphi URAL
Prof. Dr. Mehmet BİLGİLİ
Prof. Dr. Gökhan AYDIN
Prof. Dr. İzzet KARAKURT
Doç. Dr. Füsün DOBA KADEM

In this study, a compact device has been developed and verified to determine the explosion characteristics and calorific value of dust particles simultaneously. In addition to the pressure sensor used in the existing 20 L Siwek, the moment and duration of the explosion could be precisely measured using a light sensor developed in this study. The determination of the detonation speed in the explosion spheres via a light sensor has been a study attempted for the first time in literature. Since the light speed is much faster than the propagation speed of the pressure waves formed at the time of the dust explosion, the detection of the explosion by the light sensor takes place without loss of time. A sensor that can detect the explosion instantly can be very helpful for a better understanding of the events within the explosion sphere. It has been determined that there is a linear proportionality between the Pmax values measured using the 1 L explosion chamber and the Pmax values previously obtained using a 20 L Siwek. The relationship between the two data was formulated using the linear regression method. Thus, it has been seen that the results obtained in the 1 L powder explosion sphere can be used safely in engineering applications together with the linear curve developed in this study. The determination coefficient between Pmax values measured for the same coal in 1 L and 20 L dust explosion spheres was calculated to be $R^2=0.903$. The Pmax values measured with a 1 L explosion sphere and the explosion index coefficient calculated based on these values were approximated to the Pmax values measured using a 20 L Siwek sphere with the help of the linear curve developed in this study.

Keywords: Dust explosion, explosion vessel, explosion index, maximum explosion pressure

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Bu çalışma, 2015–2022 yılları arasında Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Prof. Dr. Suphi URAL yönetiminde DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Tozlarının ortam şartlarına göre patlama riski oluşturup oluşturmadığının bilinmesi ve oluşturuyorsa patlama riskinin ortadan kaldırılması için gerekli işletimsel tedbirlerin alınması işletmelerde hayati önem taşımaya rağmen yanıcı tozların bulunduğu birçok sanayi dallarında tozun patlama parametreleri bilinmemektedir. Endüstride karşılaşılan toz bulutlarının patlayabilirlik ve tutuşabilirlik parametrelerini belirlemek genellikle laboratuvar ortamlarındaki deneylerle veya ortam şartlarının benzer olduğu modellemelerle mümkün olmaktadır. Laboratuvar ortamında yapılan toz patlama deneylerinde genellikle toz patlama küresi olarak adlandırılan cihazların en yaygın olanı 20 L Siwek küresi, 1 m³ patlama haznesi ve 1,2 L Hartman deney tüpüdür. Yapılan deneyler sonucunda tozun patlayabilirliğini etkileyen önemli parametreler incelenmektedir. Ülkemizde toz patlama karakteristiği ölçen bir cihaz üretilmemektedir. Yurt dışında bulunan bu ölçüm cihazlarının maliyetleri çok yüksektir. Ülkemizde bu testler yurt dışındaki laboratuvarlara gönderilerek yaptırılmaktadır. Bunun yanısıra ülkemizde üretimi bulunmayan kalorimetre ölçüm cihazı da (bomba kalorimetre) ihtiyaç duyulduğunda yurt dışından yüksek maliyetlerle ithal edilmektedir.

Bu çalışmada dünyada bir ilk olarak toz taneciklerinin patlama karakteristiğinin ve kalorifik değerinin aynı anda belirlenmesini sağlayan kompakt bir cihaz geliştirilip doğrulaması gerçekleştirilmiştir. 1 L toz patlama küresinin iç haznesinde yapılan deneylerde tozun patlama karakteristiği belirlenirken dış kısımdaki saf su bulunan haznede ise tozun kalorifik değeri ölçülebilmektedir. Kalorifik değer ölçüm metodu bomba kalorimetre cihazının çalışma prensibi gözönüne alınarak geliştirilmiştir. Bu toz patlama küresinin tasarımsal olarak

kompakt bir cihaz olmasının yanı sıra mevcut cihazlardan ayrılan en önemli avantajı kullanımı kolay, az miktarda bir toz örneği ile test yapmaya müsait, hızlı cevap verebilen ve kolay taşınabilir 1 L bir cihaz olmasıdır.

Bu cihazın imalatında kürenin toz patlama deneylerinde oluşacak basınca karşı dayanıklı olmasına dikkat edilmiştir. Bu yüzden EN 14460 (patlamaya dayanıklı ekipman) standardı tasarımı dikkate alınmıştır. Test İşletiminde ise ASTM 1226 ve EN 14034 standartları göz önünde bulundurulmuştur. 1 L iç hacme sahip ve küresel bir yapı olarak tasarlanan bu cihazla yapılan deneylerde kömür tozunun cinsi ve operasyonel parametreleri değiştirilerek toz patlama karakteristikleri ile ilgili bir çok veri oluşturulmuştur.

Ayrıca bu cihazı diğer cihazlardan ayıran bir özellikte patlama anını yakalayabilmek için küreye basınç ölçen sensörlerin yanısıra ışık sensör eklenmiştir. Işık sensörü ile patlama hızı tayini patlama kürelerinde ilk defa denenen bir çalışma olmuştur. Işığın yayılım hızı patlama anında oluşan basınç dalgalarının yayılım hızından çok daha hızlı olduğu için ışık sensörü tarafından patlamanın (yani ilk patlama anındaki ani aydınlanmanın) algılanması zaman kaybı olmadan gerçekleşmektedir. Basınç dalgalarının hava ortamında ilerleme hızı (~343 m/s) ile ışık hızı (~300.000.000 m/s) arasındaki fark kıyaslanmayacak kadar fazladır. Bu çalışmada elde edilen test verilerinden bir tanesinde ilk patlama anındaki hızlı yükseliş süresi 0,02 s olarak ışık sensörü tarafından ölçülebilmıştır. Oysa ki, basınç sensöründen alınan veriler patlama anını ışık sensöründen ancak 0,02 s sonra algılayabilmıştır. Dolayısı ile basınç sensörüne kıyasla patlama anı süresinin net olarak tesbiti ışık sensörü gibi yüksek tepkime zamanına sahip sensörler ile daha doğru saptanabileceği görülmüştür. Bu sebepten ilk andaki patlamayı algılayabilen bir sensör patlama küresi içerisindeki olayların daha iyi anlaşılması ve buna paralel olarak patlama indeksinin (K_{st}) daha hassas olarak hesaplanmasında literatür ve endüstriyel uygulamalara büyük katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışma kapsamında 1 L hacme sahip toz patlama küresi ile yapılan deney sonuçları 20 L hacme sahip Siwek küresi ile gerçekleştirilen deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Her iki çalışmada da aynı kömür tozu kullanılmıştır. 1 L hacme sahip toz patlama küresinde elde edilen P_{max} değerleri tutarlı ve orantılı bir şekilde 20 L Siwek küresinden elde edilen P_{max} değerlerinden düşük ölçülmüştür. Her iki veri serisinin kıyaslanması sonucu aralarında lineer bir ilişki olduğu görülmüştür. İki veri arasındaki eğri uydurma yöntemiyle formülize edilmiştir. Böylece 1 L hacme sahip patlama küresinde elde edilen sonuçların bu çalışmada geliştirilen lineer eğriyi kullanarak mühendislik uygulamalarında güvenli bir şekilde kullanılabilirliğinin mümkün olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada yapılan deneylerde ülkemiz ve dünyada yaygın olarak kullanılan bazı kömürler için toz patlama karakteristiğini belirleyen başlıca parametreler incelenmiştir. Toz patlamalarındaki en önemli faktörler olan patlama indeksi (K_{st}), maksimum patlama basıncı (P_{max}), maksimum patlama basınç artış oranı $(dP/dt)_{max}$ (patlama hızı), min patlama konsantrasyonu, minimum oksijen oranı, nem ve tanecik aralığı parametreleri beş farklı kömür için test edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kömürler şunlardır; Soma kömürü (linyit), Rus kömürü (linyit), Güney Afrika kömürü (bitümlü), Kolombiya Çumra karışım kömürü (altbitümlü_linyit) ve Endonezya kömürleridir (Jembayan altbitümlü). Bu kömür tozları için nem miktarı ve tane iriliği gibi yakıta ait özelliklerle birlikte ortamla şartları ile ilgili olan toz ve oksijen konsantrasyonlarının da patlamaya etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada patlama küresinin kalorimetre kısmında ise test kömürleri için ısı değer ölçme çalışmaları yapılmıştır. Bu değerler bomba kalorimetre ile elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır.



TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında yardımlarını esirgemeyen ve bana daima yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Suphi URAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doktora Tez İzleme Komitesi üyesi Sayın Prof. Dr. Mehmet BİLGİLİ 'ye ve Doç. Dr. Füsun DOBA KADEM 'e çalışmamın tüm aşamalarında yönlendirici ve olumlu katkılarından dolayı teşekkür ederim.

TABi Mühendislik ve Enerji Teknolojileri firmasına ve çalışma arkadaşlarıma destekleri için teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım sırasında benden desteğini ve sabrını hiç esirgemeyen eşim, Harun ve çocuklarım, Asu Ceren ve Taha Mert'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ	I
ABSTRACT.....	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET	III
TEŞEKKÜR.....	VII
ÇİZELGELER DİZİNİ	XII
ŞEKİLLER DİZİNİ	XVI
TERMİNOLOJİ	XXIV
1. GİRİŞ	1
1.1. Yanma Nedir?	4
1.2. Patlama Nedir?	5
1.3. Patlayıcı Atmosfer	5
1.4. Ateşleme Kaynakları	6
1.5. Patlayıcı Maddeler	7
1.5.1. Gazlar	8
1.5.2. Sıvılar	9
1.5.3. Tozlar	9
2. TOZ PATLAMALARI	11
2.1. Toz Patlamalarının Görüldüğü Endüstriler.....	13
2.2. Toz Patlamalarının Tarihçesi.....	15
2.3. NFPA Toz Patlama Standartları	18
2.4. Tozun Sınıflandırılması	18
2.5. Toz Patlama Testleri.....	22
3. TOZ PATLAYABİLİRLİĞİNİ ÖLÇMEKTE KULLANILAN CİHAZLAR....	25
3.1. Toz Patlama Parametreleri	29
3.1.1. Patlama Konsantrasyonu Alt Sınırı, MEC	30
3.1.2. Sınırlayıcı Oksijen Konsantrasyonu, LOC	32

3.1.3. Minimum Tutuşma Enerjisi, MIE.....	32
3.1.4. Minimum Tutuşma Sıcaklığı, MIT	32
3.1.5. Maksimum Patlama Basıncı, P_{max}	33
3.1.6. Maksimum Patlama Basıncı Artış Hızı $(dP/dt)_{max}$	34
3.1.7. Tozun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	34
3.1.7.1. Nem	35
3.1.7.2. Tanecik Boyutu veya Yüzey Alanı.....	35
3.1.7.3. Uçucu Madde	36
3.1.7.4. Toz Bulutu Türbülansı.....	37
4. ÖNCEKİ ÇALIşMALAR	39
4.1. Toz Patlama Karakteristiğine Genel Bakış	39
4.2. Mevcut Durum ve Gelecekteki Beklentiler.....	40
5. MATERYAL ve METOD	47
5.1. Materyal	48
5.2. 1 Litre Patlama Küresi	49
5.2.1. Toz Patlama Küresi Hesaplamaları.....	49
5.2.2. Deney Düzenegi.....	52
5.2.3. Malzeme	65
5.3. Metod	70
6. ARAşTIRMA BULGULARI.....	73
6.1. Soma Kömür Tozu Patlama Deneyleri	74
6.2. Rus Linyit Tozu Patlama Deneyleri.....	109
6.3. Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Patlama Deneyleri	122
6.4. Kolombiya-Çumra Kömür Tozu Patlama Deneyleri	134
6.5. Endonezya Altbitümlü Kömür Tozu Patlama Deneyleri	146
6.6. Patlama Küresi ile Toz Kalorifik Değerinin Ölçülmesi	157
6.7. 20 L Patlama Küresi ile 1 L Patlama Küresi Kıyaslaması	160

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	165
KAYNAKLAR	173
ÖZGEÇMİŞ.....	177
EKLER.....	179





ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 2.1.	Patlama Sınıfları (1 m ³ patlama haznesi, 10 kJ patlama enerjisi). ...	19
Çizelge 2.2.	ASTM E1226-12a Standardına göre (dP/dt) _{max} ve K _{st} Hesaplanması.....	21
Çizelge 3.1.	K _{st} ve Hartman Deney Tüpü Arasındaki İlişkileme	29
Çizelge 3.2.	Toz Patlama Parametrelerinin Etkileri	38
Çizelge 5.1.	1 L Toz Patlama Küresi Deney Tablosu	47
Çizelge 5.2.	Soma Kömür Tozu Go/NoGo Testi	48
Çizelge 5.3.	AISI 304L Malzeme Özellikleri.....	51
Çizelge 5.4.	Soma Kömür Tozu Numune Analizi.....	66
Çizelge 5.5.	Rus Linyit Tozu Numune Analizi	66
Çizelge 5.6.	Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Numune Analizi.....	67
Çizelge 5.7.	Kolombiya Çumra (altbitümlü-linyit) Kömür Tozu Numune Analizi	67
Çizelge 5.8.	Endonezya-Jembayan Altbitümlü Kömür Tozu Numune Analizi ...	68
Çizelge 5.9.	Soma Kömür Tozu Kısmi Nem Alma İşlemi.....	70
Çizelge 5.10.	Soma Kömür Tozu Kısmi Nem Analizi.....	70
Çizelge 6.1.	(+)90 (-)125 Mikron Soma Kömür Tozu Değişik Konsantrasyonlarda Patlama Parametreleri	78
Çizelge 6.2.	0,125 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarında Oksijen Konsantrasyonu ve Patlama Parametreleri	82
Çizelge 6.3.	0,125 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu Patlama Basıncı Oksijen Konsantrasyonu Oranı	88
Çizelge 6.4.	0,125 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu (dP/dt) _{max} Oksijen Konsantrasyonuna Oranı	90
Çizelge 6.5.	0,250 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun Patlama Parametrelerine Etkisi	91

Çizelge 6.6.	0,250 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarında $dP_{\max}/dO_2$	97
Çizelge 6.7.	0,250 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarında $(dP/dt)_{\max}/dO_2$	99
Çizelge 6.8.	0,125 g/L ve 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Konsantrasyonunun Değişik Tanecik Aralıklarında $(dP/dt)_{\max}/dO_2$ Kıyaslanması	101
Çizelge 6.9.	0,125 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarında Patlama Parametreleri	102
Çizelge 6.10.	0,250 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarında Patlama Parametreleri	105
Çizelge 6.11.	0,250 g/L Soma Kömür Tozu Tanecik Aralığı ve Kalorifik Değer.	107
Çizelge 6.12.	Rus Linyiti Elek Analizi	109
Çizelge 6.13.	(+)90 (-)125 Mikron Rus Linyiti için Değişik Konsantrasyonlardaki Patlama Parametreleri	112
Çizelge 6.14.	0,125 g/L Rus Linyit Tozu Tanecik Aralığının Patlama Parametrelerine Etkisi	116
Çizelge 6.15.	0,250 g/L Rus Linyit Tozu Tanecik Boyutunun Patlama Parametrelerine Etkisi	118
Çizelge 6.16.	(+)45 (-)90 Mikron Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Değişik Konsantrasyonlarda Patlama Parametreleri	125
Çizelge 6.17.	0,125 g/L Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Aralığının Patlama Parametrelerine Etkisi.....	129
Çizelge 6.18.	0,250 g/L Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Aralığının Patlama Parametrelerine Etkisi.....	131
Çizelge 6.19.	(+)45 (-)90 Mikron Kolombiya Çumra Kömür Tozu Değişik Konsantrasyonlarda Patlama Parametreleri	135
Çizelge 6.20.	0,125 g/L Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığının Patlama Parametrelerine Etkisi	141

Çizelge 6.21. 0,250 g/L Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığının Patlama Parametrelerine Etkisi	143
Çizelge 6.22. Endonezya Kömür Tozu Değişik Toz Konsantrasyonlarında Patlama Parametreleri	149
Çizelge 6.23. Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığının Patlama Parametrelerine Etkisi	152
Çizelge 6.24. Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığının Patlama Parametrelerine Etkisi	154
Çizelge 6.25. ÇÜ Kömür Numunesi Analizleri	161



ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 1.1. Yanma Üçgeni	4
Şekil 1.2. Patlama Üçgeni	6
Şekil 2.1. Patlama Pentagonu	12
Şekil 3.1. 1,2 L Hartman Deney Tüpü	25
Şekil 3.2. Fike 1000 L Patlama Haznesi	26
Şekil 3.3. 20 L Siwek Patlama Küresi	27
Şekil 3.4. PRL Patlama Küresi	27
Şekil 3.5. Mısır Tozu Patlayıcı Toz Konsantrasyon Aralığının Endüstriyel Hijyen ve Maksimum Toz Konsantrasyonu Aralığına Kıyası	31
Şekil 3.6. MIT Deney Düzenegi	33
Şekil 4.1. Zayıf Toz Patlamalarında Basınç ve Basınç Artış Hızı Değişimi	39
Şekil 4.2. Orta Toz Patlamalarında Basınç ve Basınç Artış Hızı Değişimi	40
Şekil 4.3. Toz Patlama Modellemesi	42
Şekil 4.4. Geleneksel Ventilasyon Teknolojisi ve Alevsiz Ventilasyon Teknolojisi Kıyası (Fike Corporation, USA)	43
Şekil 4.5. Toz Patlama Pentagonu	44
Şekil 4.6. Siloda Patlama Alev Simülasyonu	45
Şekil 4.7. Halka Kanal ve Delikli Halka Kanal ile Tanecik Dağılımının Kıyaslanması	46
Şekil 5.1. Küre Kesiti	50
Şekil 5.2. Küredeki Gerilimler	51
Şekil 5.3. 1 L Toz Patlama Küresi Proses Diagramı	53
Şekil 5.4. 1 L Toz Patlama Küresi Parça Çizimleri	54
Şekil 5.5. 1 L Toz Patlama Küresi Gövde Görüntüleri	55
Şekil 5.6. Patlama Küresi Gözlem Penceresi Çizimler	55
Şekil 5.7. Patlama Küresi Gözlem Penceresi ve Patlama Anı	56
Şekil 5.8. Patlama Küresi SolidWork Çizimleri	56

Şekil 5.9. 1 L Toz Patlama Küresi	57
Şekil 5.10. Manometre	57
Şekil 5.11. Oksijen Tüpü ve Regülatör	58
Şekil 5.12. 1 L Toz Patlama Küresindeki Basınç, Sıcaklık ve Işık Sensörleri.....	59
Şekil 5.13. 1 L Patlama Küresinde Kullanılan Değişik Işık Sensörleri	60
Şekil 5.14. Işık ve Basınç Sensörlerinin Tepkime Zamanlarının Kıyaslanması	61
Şekil 5.15. Güç Kaynağı	62
Şekil 5.16. Küre İçi Görüntü	63
Şekil 5.17. HIOKI Datalogger	63
Şekil 5.18. Gaz Analizörü	64
Şekil 5.19. 1 Litre Toz Patlama Küresi Deney Düzeneği	65
Şekil 5.20. Sarsak Elek	69
Şekil 5.21. Patlama Küresi Akış Şeması.....	72
Şekil 6.1. 0,250 g/L, (+)90 (-)125 Mikron Soma Kömür Tozu Patlama Görüntüleri.....	75
Şekil 6.2. Patlama Anı Basınç ve Işık Sensörü Verileri.....	76
Şekil 6.3. Patlama Anı Basınç ve Işık Sensörü Verileri – Büyütülmüş	76
Şekil 6.4. Soma Kömür Toz Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi.....	80
Şekil 6.5. Soma Kömür Toz Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi	80
Şekil 6.6. 0,125 g/L, (-)45 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi	83
Şekil 6.7. 0,125 g/L, (-)45 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi.....	83
Şekil 6.8. 0,125 g/L, (+)45 (-)90 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi	84
Şekil 6.9. 0,125 g/L, (+)45 (-)90 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi.....	84

Şekil 6.10. 0,125 g/L, (+)90 (-)125 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen	
Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi	85
Şekil 6.11. 0,125 g/L, (+)90 (-)125 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen	
Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi.....	85
Şekil 6.12. 0,125 g/L, (+)125 (-)212 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen	
Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi	86
Şekil 6.13. 0,125 g/L, (+)125 (-)212 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen	
Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi.....	86
Şekil 6.14. 0,125 g/L, Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu	
Oksijen Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi	87
Şekil 6.15. 0,125 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu	
Patlama Basıncı Oksijen Konsantrasyonu Oranının	88
Şekil 6.16. 0,125 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu	
Oksijen Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi	89
Şekil 6.17. 0,125 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu	
$(dP/dt)_{max}$ Oksijen Konsantrasyonuna Oranını	90
Şekil 6.18. 0,250 g/L, (-)45 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen	
Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi.	92
Şekil 6.19. 0,250 g/L, (-)45 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen	
Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi.....	92
Şekil 6.20. 0,250 g/L, (+)45 (-)90 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen	
Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi.....	93
Şekil 6.21. 0,250 g/L, (+)45 (-)90 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen	
Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi.....	93
Şekil 6.22. 0,250 g/L, (+)90 (-)125 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen	
Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi	94
Şekil 6.23. 0,250 g/L, (+)90 (-)125 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen	
Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi.....	94

Şekil 6.24. 0,250 g/L, (+)125 (-)212 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi.	95
Şekil 6.25. 0,250 g/L, (+)125 (-)212 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi.....	95
Şekil 6.26. 0,250 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi.....	96
Şekil 6.27. 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarında dP_{max}/dO_2 Oranı.....	97
Şekil 6.28. 0,250 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi	98
Şekil 6.29. 0,250 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu $(dP/dt)_{max}/dO_2$ Oranını.....	99
Şekil 6.30. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Konsantrasyonunun Değişik Tanecik Aralıklarında $(dP/dt)_{max}/dO_2$ Kıyaslanması.....	101
Şekil 6.31. 0,125 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarının P_{max} 'a Etkisi.....	103
Şekil 6.32. 0,125 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarının $(dP/dt)_{max}$ Etkisi.....	104
Şekil 6.33. 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarının P_{max} 'a Etkisi.....	105
Şekil 6.34. 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarının $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi.....	106
Şekil 6.35. 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Tanecik Aralığının Kalorifik Değere Etkisi.....	107
Şekil 6.36. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Tanecik Aralığının P_{max} 'a Etkisinin Kıyası	108
Şekil 6.37. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Tanecik Aralığının $(dP/dt)_{max}$ Etkisinin Kıyası	108

Şekil 6.38. 0,125 g/L Rus Linyit Tozu Patlama Görüntüleri	110
Şekil 6.39. (+)90 (-)125 Mikron Rus Linyitinin Basınç ve Işık Siddeti Grafiği ...	111
Şekil 6.40. Patlama Anının Büyütülmüş Görüntüsü	111
114	
Şekil 6.41. Rus Linyit Tozu Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi	114
Şekil 6.42. Rus Linyit Tozu Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi	115
Şekil 6.43. 0,125 g/L Rus Linyit Tozu Tanecik Boyutunun P_{max} 'a Etkisi	117
Şekil 6.44. 0,125 g/L Rus Linyit Tozu Tanecik Boyutunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi...	117
Şekil 6.45. 0,250 g/L Rus Linyiti Tozu Tanecik Boyutunun P_{max} 'a Etkisi	119
Şekil 6.46. 0,250 g/L Rus Linyiti Tozu Tanecik Aralığının $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi ..	119
Şekil 6.47. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Rus Linyit Tozu Tanecik Aralığının P_{max} 'a Etkisinin Kıyası	120
Şekil 6.48. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Rus Linyit Tozu Tanecik Aralığının $(dP/dt)_{max}$ Etkisinin Kıyası.....	120
Şekil 6.49. Rus Linyit Tozu Tanecik Aralığıyla Kalorifik Değer Değişimi	121
Şekil 6.50. Güney Afrika Kömür Tozu Patlama Görüntüleri	123
Şekil 6.51. Patlama Anı Basınç ve Işık Sensörü Verileri.....	124
Şekil 6.52. Patlama Anı Basınç ve Işık Sensörü Verileri – Büyütülmüş	124
Şekil 6.53. Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi	127
Şekil 6.54. Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi.....	127
Şekil 6.55. 0,125 g/L Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Boyutunun P_{max} 'a Etkisi	130
Şekil 6.56. 0,125 g/L Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Aralığının $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi	130
Şekil 6.57. Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Aralığının P_{max} 'a Etkisi	132

Şekil 6.58. Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Aralığının (dP/dt) _{max} 'a Etkisi	132
Şekil 6.59. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Aralığının P _{max} 'a Etkisinin Kıyası.....	133
Şekil 6.60. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Aralığının (dP/dt) _{max} 'a Etkisinin Kıyası	133
Şekil 6.61. 0,250 g/Lt Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Aralığı Kalorifik Değer Değişimi	134
Şekil 6.62. Kolombiya Çumra Kömür Tozu Patlama Deneyi Görüntüleri	137
Şekil 6.63. Patlama Anı Basınç ve Işık Sensörü Verileri.....	138
Şekil 6.64. Patlama Anı Basınç ve Işık Sensörü Verileri – Büyütülmüş	138
Şekil 6.65. Kolombiya Çumra Kömür Tozu Konsantrasyonunun P _{max} 'a Etkisi ...	140
Şekil 6.66. Kolombiya Çumra Kömür Tozu Konsantrasyonunun (dP/dt) _{max} 'a Etkisi	140
Şekil 6.67. Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığının P _{max} 'a Etkisi.....	142
Şekil 6.68. Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığının (dP/dt) _{max} 'a Etkisi	142
Şekil 6.69. Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığının P _{max} 'a Etkisi.....	144
Şekil 6.70. Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığının (dP/dt) _{max} 'a Etkisi	144
Şekil 6.71. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığının P _{max} 'a Etkisinin Kıyası.....	145
Şekil 6.72. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığının (dP/dt) _{max} Etkisinin Kıyası	145
Şekil 6.73. Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığı Kalorifik Değer Değişimi.....	146
Şekil 6.74. Endonezya Kömür Tozu Patlama Görüntüleri.....	147
Şekil 6.75. Patlama Anı Basınç ve Işık Sensörü Verileri.....	148

Şekil 6.76. Patlama Anı Basınç ve Işık Sensörü Verileri – Büyütülmüş	148
Şekil 6.77. Endonezya Kömür Tozu Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi.	151
Şekil 6.78. Endonezya Kömür Tozu Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi	151
Şekil 6.79. Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığının P_{max} 'a Etkisi	153
Şekil 6.80. Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığının $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi	153
Şekil 6.81. Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığının P_{max} 'a Etkisi	155
Şekil 6.82. Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığının $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi	155
Şekil 6.83. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığının P_{max} 'a Etkisinin Kıyası	156
Şekil 6.84. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Endonezya Kömür Tozu Tanecik A ralığının $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisinin Kıyası	156
Şekil 6.85. Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığı Kalorifik Değer Değişimi .	157
Şekil 6.86. (+)45 (-)90 Tanecik Aralığında Soma Linyiti Basınç ve Işık Şiddetinin 119. Saniyedeki Değişimi	159
Şekil 6.87. (+)45 (-)90 Tanecik Aralığında Soma Linyiti Basınç ve Su Sıcaklığının 119. Saniyedeki Değişimi	159
Şekil 6.88. Bomba Kalorimetre ve 1 L Toz Patlama Küresi Alt Isıl Değer Ölçümlerinin Kıyaslaması	160
Şekil 6.89. ÇÜ Kömür Numunelerinin 1 L Toz Patlama Küresindeki P_{max} Değerleri	161
Şekil 6.90. 20 L ve 1 L Toz Patlama Küreleri P_{max} Kıyaslaması	162



KISALTMALAR VE SEMBOLLER

$(dP/dt)_{\max}$	: Zamana göre basınç değışimi [bar/s], patlama hızı
C_p	: Suyun özgül ısısı, kJ/kg.°C
dT	: Patlama öncesi ile patlama anındaki maksimum su sıcaklıkları arasındaki fark, °C
g	: Gram
K_{st}	: Patlama indeksi [bar.m/s], (St; Staub'un kısaltması toz anlamına gelmektedir.)
L	: Litre
m	: Patlama küresi etrafındaki su miktarı, kg
m_{kt}	: Patlama küresine konulan toplam kömür tozu miktarı, kg
P	: Basınç [bar]
$P_{\max}$	: Maksimum basınç [bar]
Q_{kt}	: Kömür tozunun ısı değeri, kJ/kg
Q_w	: Suya transfer edilen ısı miktarı, kJ
r	: Patlama küresi iç çapı, m
s	: Saniye
t	: Zaman [s]
$thck$	: Patlama küresi cidar kalınlığı, m
V	: Testin yapıldığı kapalı kabın hacmi (m ³)
σ	: Gerilim (Stres), MPa

1. GİRİŞ

Patlamalar gaz/buhar ve toz patlamaları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Gaz patlamaları daha yaygın olarak bilinmesine ve tehlikelerinden dolayı önlemler alınmasına rağmen toz patlamaları uzun yıllar tanımlanamamıştır. Dünyada ve ülkemizde endüstriyel aktivitelerin artmasıyla orantılı olarak toz patlamalarından kaynaklı iş kazalarındaki artış ve oluşturdıkları hasarların büyüklüğü bu konularda yapılan çalışmaları derinleştirmiştir. Yapılan çalışmalar toz patlamalarının da gaz patlamaları kadar etkili olduğunu ve verdikleri hasarların büyüklüğünü göstermiştir. Havada veya gazda serbest olarak asılı kalan veya sürüklenen toz taneciklerinin her zaman yanma ve patlama riski ihtiva ettiği gözlemlenmiştir. Normal şartlar altında havada yanacak olan herhangi bir malzeme ince toz halindeyken patlama riski taşımaktadır. Özellikle kömür, kâğıt, plastik, metal, tekstil, ilaç ve yiyecek endüstrilerinde çok sayıda toz patlamaları oluşmaktadır.

Toz bulutlarının patlayabilirlik ve tutuşabilirlik parametrelerini belirlenmesi ve patlama riski varsa bunların ortadan kaldırılması için gerekli işletimsel tedbirlerin alınması işletmelerde hayati önem taşımaktadır. Tozların patlayabilirliğinin belirlenmesi için laboratuvar ortamında toz patlama deneyleri yapılmaktadır. Genellikle patlama küresi olarak adlandırılan cihazlarla yapılan deneylerle tozun patlayabilirliğini etkileyen önemli parametreler tesbit edilmektedir. Bu parametreler doğrultusunda işletmelerde toz patlamasını önleyici tedbirler alınmakta ve tasarımlar bu parametreler göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmektedir. Aksi takdirde meydana gelebilecek olan patlamalar sonucunda karşılaşılabilecek olan can ve mal kayıpları çok ciddi boyutlara ulaşabilmektedir. Alınan tedbirlere ve çalışmalara rağmen toz patlamaları ülkemizde ve dünyada hala büyük kayıplara sebep olmaktadır. Özellikle ülkemizde meydana gelen patlamalarda tozun etkisi detaylı bir şekilde araştırılıp istatistiksel verilerin oluşturulması acil önem arz etmektedir.

Patlama testlerinde en sık kullanılan cihazlar 1,2 L Hartman deney tüpü, 20 L Siwek küresi, 20 L PRL ve 1 m³ Fike yanma haznesi olarak bilinmektedir. Bu cihazlarının toz patlama parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan testlerde bazı avantaj ve dezavantajlarının olduğu araştırmacılar tarafından belirlenmiştir

Bu çalışmadaki ana hedef ise daha önce kullanılan cihazların avantaj ve dezavantajlarının gözönünde bulundurularak toz taneciklerinin patlama karakteristiklerinin ve kalorifik değerinin belirlenmesi amacıyla kompakt, kullanımı kolay, az miktarda bir toz örneği ile test yapmaya müsait, hızlı cevap verebilen ve kolayca taşınabilir bir cihaz üretmek ve bu avantajlarından dolayı toz patlama riski taşıyan endüstrilerde tasarım ve işletim sırasında bu cihazın pratik, küçük ve hızlı olma avantajından yararlanarak kullanımını yaygın hale getirmektir. Önceki çalışmalar ve standartlara göre küre veya silindirik şekiller içerisindeki toz ve sıcaklığı daha homojen olarak dağıtmaktadır. Literatür çalışmalarımız ve hesaplamalarımız sonucunda tasarladığımız cihaz paslanmaz çelikten 1 L içi boş kapalı bir küre olarak imal edilmiştir. Küre içerisindeki basınç küre üzerine yerleştirilen kafaları iç duvarla aynı hızda olan basınç sensörü aracılığı ile ölçülmektedir. Ayrıca patlama anını daha hassas olarak yakalayabilmek için küreye bir tane ışık sensörü yerleştirilmiştir. Bu şimdiye kadar ilk defa patlama kürelerinde denenilen bir çalışma olmuştur. Buradaki amacımız patlama anında oluşan ışık dalgaları, basınç dalgalarından çok daha hızlı hareket ettiğinden dolayı küre içerisindeki aydınlanma anı ve süresini hassas olarak yakalamak ve kaydetmektir. Şöyle ki, ışık hızı yaklaşık olarak 300.000.000 m/s iken basınç dalgalarının hızı ise yaklaşık olarak 343 m/s dir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde de görüleceği gibi, ışık sensörü çok daha hızlı ve hassas bir şekilde patlama anını yakalayabilmektedir. Küre üzerine yerleştirilen basınç sensörü ile maksimum basınç ölçülmektedir. Işık sensöründen patlama süresi ve basınç sensöründen de maksimum basınç ölçülerek patlama indeksi hesaplanmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda ise hem patlama

süresi ve hem de maksimum basınç değerleri basınç sensörü kullanılarak ölçülmüştür.

1 L toz patlama küresinin etrafına küreyi saran bir bölme yaptırılmıştır. Bu bölmeye saf su doldurulmaktadır ve suyun sıcaklık artışı thermocouplar aracılığıyla ölçülmekte ve datalogger dan veriler alınmaktadır. Bu kısımda bize kalorifik değer in hesaplanması konusunda yardımcı olmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen toz patlama küresi ile yapılan deneylerde ülkemizdeki bazı kömürler için toz patlama karakteristiğini belirleyen başlıca parametreler incelenmiştir. Bu parametreler hem yanıcı tozla hem de tozun bulunduğu ortam şartları ile alakalıdır. Çalışmada toz patlamalarındaki en önemli faktörler olan patlama indeksi (K_{st}), maksimum patlama basıncı (P_{max}), maksimum patlama basınç artış oranı $(dP/dt)_{max}$, patlama konsantrasyonu alt sınırı, minimum oksijen oranı, nem ve tanecik aralığı parametreleri bazı kömürler için test edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kömürler şunlardır; Soma kömürü (linyit), Rus kömürü (linyit), Güney Afrika kömürü (bitümlü), Kolombiya-Çumra karışım kömürü (altbitümlü-linyit) ve Endonezya kömürleridir (Jembayan altbitümlü). Bu kömür tozları için nem miktarı ve tane iriliği gibi yakıta ait özelliklerle birlikte ortam şartları ile ilgili olan toz ve oksijen konsantrasyonlarının da patlamaya etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada geliştirilen patlama küresinin kalorimetre kısmında ise test kömürleri için ısı değer ölçme çalışmaları yapılmıştır. Bu değerler gerçek bomba kalorimetre ile elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Özellikle ülkemizde endüstride geniş kullanım alanı bulunan bu kömür tozlarının daha önce patlıyabilirlik parametrelerinin çalışılmadığı da göz önünde buludurulursa bu çalışmanın bir veri tabanı oluşturacağı düşünülmüştür.

1.1. Yanma Nedir?

Yanma yanıcı maddenin ısı ve oksijenle birleşmesi sonucu meydana gelen kimyasal bir reaksiyondur. Yanmanın olması için yanıcı madde, oksijen ve ateşleyici yetmektedir. Bu yanma üçgeni olarak adlandırılmaktadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Yanma Üçgeni

Yavaş Yanma; Yanıcı maddenin yetersiz oksijen nedeniyle, yeteri miktarda ısı, buhar veya gaz üretmediği durumlarda meydana gelir. Canlıların hücre solunumu olayı da bir nevi yavaş yanma olayıdır.

Hızlı Yanma; Yanmanın bütün belirtileri ile oluştuğu bir olaydır. Yanmanın belirtileri alev, ısı, ışık ve korlaşmadır.

Parlama ve Patlama; Parlama kolayca ateş alan maddelerde görülen bir olaydır. (Örneğin benzin gibi) Patlama ise ani bir şekilde meydana gelen yanma olayıdır. Patlama ve parlama şeklinde yanmanın, hızlı yanmadan farkı, enerji boşalma hızının çok yüksek olmasıdır.

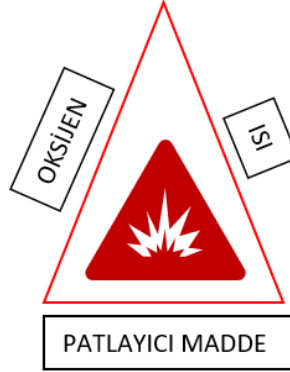
Kendi Kendine Yanma; Yavaş yanmanın zamanla hızlı yanmaya dönüşmesidir. Özellikle bitkisel kökenli yağlı maddeler normal hava ısı ve oksijen içinde kolaylıkla oksitlenmekte bu oksitlenme sırasında ise gittikçe artan bir ısı çıkmaktadır. Zamanla doğru orantılı olarak artan bu ısı, bir süre sonra alevlenmeye yetecek dereceyi bulurak maddenin kendiliğinden tutuşmasına neden olmaktadır.

1.2. Patlama Nedir?

Çoğunlukla patlama ve yanma birbirinin ardı sıra oluşan kimyasal reaksiyonlardır. Patlama bir yanma sonucunu oluşan yüksek iç basıncın etkisiyle kapalı bir hacmin tahrip olması veya parçalanması olarak tanımlanmaktadır. Patlamanın şiddeti oluşan kimyasal reaksiyonun saldığı enerji miktarı ile orantılıdır. Patlamanın yanmada farkı ortaya çıkardığı enerjinin yayılma hızının çok yüksek olmasıdır. Patlamalar kimyasal reaksiyonda ortaya çıkan enerjinin yayılma hızına göre hızlı tutuşma ve infilak olarak ayrılmaktadırlar. Eğer patlamada yanma işleminin yayılma hızı ses hızının altında ise buna hızlı tutuşma denmektedir. İnfilakta ise yanma işleminin yayılması ses hızından daha hızlı bir şekilde meydana gelmektedir. Patlamalar gaz/buhar ve toz patlamaları olmak üzere ikiye ayrılırlar. Gaz patlamaları tehlikeli olmasına rağmen toz patlamaları ile birleştikleri zaman çok daha fazla hasara sebep olmaktadır.

1.3. Patlayıcı Atmosfer

Patlayıcı Atmosfer; “Herhangi bir tutuşturucu kaynakla temasında yanmanın tüm hacme yayılabildiğı gaz, buhar ve toz formlarında bulunabilen yanıcı maddelerin atmosferik şartlar altında hava ile oluşturduğı karışım” dır. Patlamanın olması için oksijen, ateşleme kaynağı ve patlayıcı maddenin bir araya gelmesi gerekir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Patlama Üçgeni

Gaz, buhar gibi patlayıcı maddelerde patlama üçgeni patlamanın meydana gelmesi için yeterli olurken tozlarda durum daha karışıktır. Toz patlamalarında patlama pentagonu patlama atmosferinin oluşması için gerekmektedir. Patlayıcı maddeleri işlemek zorunda olan iş yerlerinde alınması gereken en önemli tedbir, patlayıcı atmosfer oluşmasını önlemektir.

1.4. Ateşleme Kaynakları

Patlayıcı maddenin havanın oksijeni ile karıştıklarında patlayabilmeleri için bir ısı kaynağına ihtiyaç vardır. Isı kaynağı olarak sürtünmenin veya metalik parçaların neden olduğu kıvılcımlar, aşırı ısınan yataklar, statik elektriklenme, açık alevler, aşırı ısınan ampuller, kurutucular, sürekli sıcak yüzeyleri sıralıyabiliriz. Endüstride en sık karşılaşılan iki ateşleme kaynağı sıcak yüzey ve kıvılcımdır.

Sıcak yüzeyler, Patlayıcı ortamlar ısıtılmış bir yüzeye temas ederse, patlama meydana gelebilir. Sadece sıcak yüzeyin kendisi bir tutuşturma kaynağı olarak görev yapmaz, ayrıca sıcak yüzeye temas eden ve sıcak yüzey tarafından tutuşturulan bir toz tabakası veya yanıcı bir katı madde de bir patlayıcı ortam için tutuşturma kaynağı olarak görev yapabilir. Örneğin sıkışan yatak ve rulmanların aşırı ısınmaları gibi.

Alevler ve sıcak gazlar, Çok küçük bir alev bile en etkili patlama kaynakları arasındadır. Örneğin kaynak esnasında etrafa fırlayan akkor haldeki parçacıklar patlayıcı ortamı ateşleyebilir. Bu tip partiküller bilhassa yanıcı tozlar için tehlike arz etmektedirler.

Mekanik kıvılcımlar, Öğütme, sürtünme, parçalama veya aşındırma işlemlerinin bir sonucu olarak, taneler katı malzemelerden ayrılır ve ayırma işleminde kullanılan enerjiden dolayı sıcak hale gelir. Bu taneler (kıvılcımlar), yanıcı gazlar /buharlar ve belirli toz-hava karışımlarını (özellikle metal tozu-hava karışımlarını) tutuşturabilir. Birikinti halindeki tozlarda, kıvılcımlar alevsiz yanmaya sebep olabilir ve bu durum, patlayıcı ortam için bir tutuşma kaynağı oluşturabilir. Kömür madenlerinde, gazın ve tozun patlayıcı orana gelmemesine çok dikkat edilir. Kazmanın, çekicin, ayakkabı demirinin ucundan çıkan kıvılcımla patlamalar olabilir.

Elektrikli cihazlar, Elektrikli aletlerin tamamı ya ark çıkardıklarından veya ısı ürettiklerinde her zaman patlayıcı ortama zemin hazırlayabilir.

Statik elektrik, Yüklenmiş, yalıtılmış iletken parçalardan olan boşalmalar, kolayca yangına/patlamaya yol açan kıvılcımlara yol açabilir. Akar yakıt ve yanıcı tozların doldurma ve boşaltma olaylarında meydana gelen patlamaların kaynağı da yine statik elektriklenme olabilmektedir.

1.5. Patlayıcı Maddeler

Patlayıcı maddeler içerisinde bir patlamaya neden olabilecek büyüklükte enerji depolanmış maddelerdir. Benzin, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), boya ve toz - hava karışımı gibi patlayıcı maddeler patlamaya sebep olabilecek bir ısı kaynağı ile karşılaştıklarında patlayıcı bir atmosfer oluşturabilirler. Patlayıcı maddeler gaz, buhar ve toz formunda bulunabilirler. Genellikle patlayıcı gaz karışımları ve patlayıcı toz bulutları benzer tutuşma ve yanma özellikleri taşırlar. Aralarındaki benzerlikler şu şekilde sıralanmaktadır;

- (1) yanıcılık / patlayıcılık sınırları
- (2) laminar yanma hızları ve söndürme mesafeleri
- (3) bulut türbülansının yanma hızına etkisi
- (4) patlama davranışları
- (5) adyabatik sabit hacim patlama basınçları
- (6) iyi tanımlanmış minimum ateşleme enerjileri
- (7) verilen deneysel koşullar için minimum ateşleme sıcaklıkları

Bu benzerliklerin yanısıra gaz karışımı patlamaları ve toz bulutu patlamaları arasında özellikle iş güvenliği açısından iki önemli fark bulunmaktadır. Birincisi, genel olarak patlayıcı toz bulutu oluşumu ve devamlılığı, patlayıcı özelliği bulunan gaz/buhar bulutu oluşumundan daha zordur. İkinci olarak gaz bulutu patlamalarında gaz/hava karışım oranları alt ve üst limitler içerisinde olduğu sürece alev yayılımı gerçekleşirken, toz bulutu patlamalarında toz/hava bulutundaki alev yayılımı toz bulutundaki hava miktarının yanı sıra durgun halde bulunan toz katmanları ve depozitlerdeki toz tanecikleri arasında sürekli olarak hapsolan bir miktar havada alev yayılımına ilave katkı oluşturabilmektedirler (Eckhoff, R. K., 2006).

1.5.1. Gazlar

Patlayıcı gazlara örnek olarak doğal gaz, metan gazı, evlerde kullanılan tüp gaz ve kaynak işlerinde kullanılan hidrojen ve asetilen gazları verilebilir. Gaz patlamaları genellikle sınırlı alan veya sınırsız alan olarak ikiye ayrılırlar. Eğer alan sınırlı ve patlamanın başladığı alanda hiçbir ventilasyon işlemi yoksa bu patlama da basınç çok yüksek olur. Basınç alev hızının yayılımına da ortamdaki türbülans seviyesine bağlıdır. Maden yangınları veya patlamaların çoğunlukla metan gazı patlamaları ile başlar ve bu patlama kömür tozu patlamalarına dönüşür. Küçük bir metan gazı patlaması ile oluşan türbülans maden ocağı girişine doğru yayılarak

havaya kömür tozları üflemeğe başlar. Bu toz tutuşur tutuşmaz bir dizi reaksiyon gelişir ve çok uzaklara kadar alev yayılmasına ve şiddetli bir patlamaya neden olur.

1.5.2. Sıvılar

Yanıcı sıvılar, sıvı halleri ile patlayıcı ortam oluşturmazlar. Bir şekilde oksijenle karışıtlarında tehlike arz ederler. Oksijenle karışımları için de buharlaşmaları gerekir. Örneğin alevlenmiş, sıcaklığı yüksek değere ulaşmış sıvı yağın üzerine su döküldüğünde düşen su tanecikleri aniden buharlaşmakta hacimleri 2000 misli artmaktadır. Genleşme miktarı çok fazla ve hızlı olduğundan bu yangın ya çok büyür veya patlamalara neden olur.

1.5.3. Tozlar

Uluslararası Standardizasyon Örgütü'ne göre “toz çapı genellikle 75 mikrondan küçük, hava ortamında asılı kalabilen ve zaman içinde kendi ağırlığına bağlı olarak çökebilen katı parçacıklar” olarak tanımlanmaktadır (ISO 4225, 2020). NFPA 68 e göre ise “toz 420 mikron ve altındaki katı parçacıklar” olarak tanımlanmıştır. Görüldüğü üzere toz taneciklerinin boyutları hakkında kesin bir tanımlama getirilememiştir. Tozlar endüstriyel uygulamalar sonucunda oluşabildikleri gibi doğal olarak da oluşabilirler. Örneğin polenler, volkanik küller ve kum fırtınaları gibi tozlar doğal süreçlerde oluşan tozlara örnek olarak verilebilir.



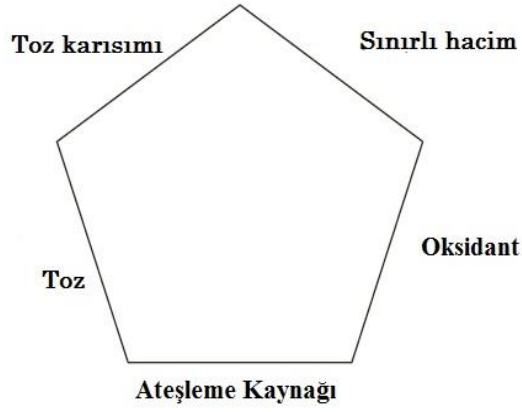
2. TOZ PATLAMALARI

Toz patlamaları, İşletim endüstrisindeki karşılaşılan buhar bulutu patlamaları ve sıvılardaki buharlaşma sonucundaki genişlemelerden dolayı meydana gelen patlamaların yanısıra en tehlikeli ve yaygın patlamalardandır. Yapılan çalışmalarda İşletim endüstrisindeki tozların %70'inin patlama tehlikesi taşıdığı anlaşılmıştır. Toz patlamaları belirli bir hacim içerisinde patlama limitinin üzerinde bir yoğunlukta toz konsantrasyonunun patlamayı sağlayacak yükseklikteki bir enerji kaynağı ile karşılaştığında yanıcı maddenin hızlı oksidasyonu sonucu ısı ve basınçtaki ani artışla oluşmaktadır. Patlamanın şiddeti oluşan kimyasal reaksiyonun saldırdığı enerji miktarı ile orantılıdır.

Patlayıcı tozun özellikleri ve hangi koşullarda patlamaya sebep oldukları hâlâ araştırılmaya devam edilmesine rağmen NFPA 654-2013 tarafından yapılan genel tanımı 'boyut ve şekline bakılmaksızın, belirli bir konsantrasyon aralığında oksitleyici bir ortamda havada askıda iken patlama veya patlama tehlikesi oluşturabilen yanıcı katı tanecik' olarak yapılmıştır. Fakat buradan yola çıkarak havada yanma özelliği bulunan tanecik Aralığı küçük ve nem oranları düşük bütün tozların patlayacağını söylenemez. Bazı yanıcı tozların patlayıcı olmamasının nedeni kesin olarak anlaşılamamasına rağmen bunun doğrudan yanma ısı ve tozun kalorifik değeri ilgili olmadığı açıktır. O yüzden yanıcı tozların bulunduğu İşletimlerde tozun patlayıcı özelliğine karar vermek için ya bu tozla ilgili geçmiş raporlar incelenmeli veya tozun laboratuvar testleri yapılmalıdır (Eckhoff, R. K., 2006). Örneğin antrasit ve grafit gibi kömürler kalorifik değeri yüksek olmasına rağmen içerisindeki uçucu madde oranları az olduğundan bu malzemeler patlama riskleri yüksek olan tozlardan değildir.

Toz patlamalarında yanma üçgenindeki üç parametrenin dışında iki parametreye daha ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar toz-hava karışımı ve sınırlı hacimdir. Bir toz patlaması için gerekli koşullar ise genellikle patlama pentagonu (Amyotte, P. R.,

2014) olarak özetlenmiştir (Şekil 2.1). Patlama pentagonunu oluşturan faktörler yanıcı toz, toz-hava karışımı, oksijen, ateşleme kaynağı ve sınırlı bir hacim olarak sıralanmıştır. Sınırlı hacim genellikle reaksiyonun gerçekleştiği ekipmanın veya binanın kendi duvarlarıdır fakat reaksiyonun çok hızlı olduğu durumlarda bu sınırlayıcı alan belirgin bir çerçeveye ihtiyaç olmadan patlama meydana gelebilmektedir. Reaksiyon hızının çok hızlı olduğu durumlarda toz bulutu içindeki meydana gelen basınç toz bulutundan salıverilen basınçtan çok daha hızlı bir şekilde yükselir ve bu kendi kendine bir sınır hacim oluşturur. Bu gibi durumlarda açık havada bile patlamalar meydana gelebilmektedir.



Şekil 2.1. Patlama Pentagonu (Amyotte, P. R., 2014)

Patlama pentagonundan anlaşılacağı gibi bir patlamanın oluşması patlamayı meydana getiren tozun özelliklerinin yanısıra ortam şartlarıyla da doğrudan ilgilidir. Yanıcı tozun tanecik Aralığı, nem miktarı, oluşan toz bulutunun konsantrasyonu, ortamdaki oksijen miktarı, ateşleme kaynağının gücü gibi özellikler toz patlamalarına etki eden parametrelerdir.

Toz patlamaları birincil ve ikincil toz patlamaları olarak ayrılmaktadır. Birincil patlamada ortamda toz patlamasına sebep olacak beş şart bir araya geldiğinde (patlama pentagonu- yanabilen toz, toz karışımı, oksijen, ateşleme

kaynağı ve sınırlı bir alan) ortaya çıkan kıvılcım sonucu patlama gerçekleşmekte ve bu patlama havada toz bulutu şeklinde asılı duran toz tanecikleriyle zincirleme bir reaksiyon şeklinde daha büyük ve etkili olan ikincil patlamayı oluşturmaktadır. İlk patlama tabaka halinde bulunan tozu havaya kaldırarak yanıcı toz-hava bulutunu oluşturur. Hemen sonrasında ilk patlamanın alevleri bu toz bulutunu tutuşturur ve daha büyük bir ikincil patlamayı meydana getirir. Bu ikincil patlama tarihteki örneklerinde görüldüğü gibi birincil patlamaya göre daha ölümcül ve etkisi fazla olmaktadır (OSHA, 2014) İkincil toz patlamalarını önlemenin en iyi yolu toz birikimlerini en aza indirmektir. Bunun için düz yüzeylerin ve tozun birikebileceği diğer alanların ve temizlenmesi zor alanların minimize edilmesi, toz biriken yerlerin iyi bir şekilde temizlenmesi, toz sızıntılarını önlenmesi olarak sayılabilir. Ayrıca toz patlamasına karşı temizlik yaparken havaya toz bulutu kaldırmaması önem arzettiğinden temizlik yapılırken sadece vacum kullanılması gerekmektedir.

2.1. Toz Patlamalarının Görüldüğü Endüstriler

Endüstrinin birçok dalında toz patlaması riski bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir; tarım, kimya, gıda, tahıl, gübre, tütün, plastik, ahşap, orman, kâğıt, kauçuk, mobilya, tekstil, böcek ilacı, ilaç, lastik ve kauçuk imalatı, boyalar, kömür, metal işleme, geri dönüşüm işlemleri, fosil yakıtlı enerji üretimi ve 3D kaynak (OSHA, 2014). Endüstride hem İşletimler sırasında hem de taşıma ve depolama sırasında tozlar meydana gelmektedir ve bu ortamlar patlama riskiyle karşı karşıya kalmaktadırlar

Normal şartlar altında patlamaya sebep olamayacak maddeler ince toz haline geldikleri zaman patlayabilme özelliği taşımaktadırlar.

Toz patlama riski ihtiva eden malzemeleri şu şekilde sıralanabilir;

- doğal organik malzemeler (tahıl, odun, keten, şeker gibi)
- sentetik organik malzemeler (plastikler, ilaç sanayi ürünleri gibi)

- kömür ve turba
- metaller (alüminyum, magnezyum, titanyum, çinko, demir gibi) (Eckhoff, R. K., 2003)

Bu malzemelerin bulunduğu endüstriler her zaman toz patlama riski taşımaktadır ve bu konuda alınacak önlemler hayati önem taşımaktadır. Toz patlamalarını önleyebilmek için toz biriken yerler etkin ve doğru yöntemler uygulanarak temizlenmeli ve temizleme işlem sırasında toz bulutu oluşumu engellenmelidir. Ayrıca filtreler ve torbalar gibi toz tutucu ekipmanlardan toz sızdırmasına dikkat edilmeli, temizlik ve bakımları düzenli olarak yapılmalıdır. NFPA 652, 2019 nolu standart özellikle kimya, ahşap, metal ve gıda endüstrilerinde karşılaşılan toz patlamalarındaki standartları içermektedir. Bu standardın alt sınıfları ayrılmış halleri bulunmaktadır. Bunlardan bazıları, NFPA 61, 2019 standardı tarım ve gıda endüstrilerinde yangın ve toz patlamalarının önlenmesi, NFPA 484, 2019 standardı patlayıcı metallerde yangın ve toz patlamalarının önlenmesi, NFPA 654, 2019 standardı toz taneciklerinin bulunduğu üretim, işletme ve İşletim endüstrilerinde yangın ve toz patlamalarının önlenmesi, NFPA 664, 2019 no'lu standardı ahşap endüstrilerinde yangın ve toz patlamalarının önlenmesi için temel standartları içermektedir.

Zhi Yuan ve arkadaşları tarafından 2015 yılında yapılan çalışmada 1785 ile 2012 yılları arasında dünyada meydana gelen toz patlamaları yıl, ülke, patlamanın olduğu ekipman, endüstri dalı, patlayıcı malzeme, meydana getirdiği hasarlar ve ateşleyicinin tipi çizelge halinde özetlenmiştir (Çizelge Ek 1.1.).

Proust'un 1996 yılında yaptığı çalışmada ise istatistiksel olarak toz patlamalarını şu şekilde özetlemiştir (Proust, C., 1996);

- Almanya'da, 1965-1985 yılları arasında endüstrideki toz patlaması sayısının yılda 160 civarında olduğu tahmin edilmektedir

- ABD'de 1900-1956 yılları arasında 1000'den fazla toz patlaması kazası rapor edildi ve bunların %50'sinin gıda sektöründe meydana geldiği
- Japonya'da, 1969'dan 1973'e kadar, tahıl depolama tesislerinde 187 toz patlamasının raporlandığı
- İngiltere'de 1969-1976 döneminde 400'den fazla toz patlaması bildirildiği
- Fransa'da istatistikler çalışmalar pek olmamasına karşın ancak endüstrideki toz patlaması sıklığının büyüklüğünün çalışma günü başına bir kaza olabileceği tahmin edilmektedir.

Endüstriyel alandaki ilerleyiş doğal olarak toz patlamalarının artmasına neden olurken bu ilerlemeler sonucu oluşan gelişmişlikle alınan tedbirler de toz patlamalarını engelleyici veya hasarı azaltıcı yönde çalışmaktadır. İş Güvenliği ve Sağlığı Merkezi (OSHA 2014) tarafından ABD de 2012 yılında 10,71 milyon dolar ve 2013 yılında 10,77 milyon dolar iş güvenliği ile ilgili harcama yapılmıştır (Yuan, Z., ve arkadaşları, 2015). Bütün bu alınan tedbirlere rağmen meydana gelen patlamaların şiddeti ve meydana getirdikleri hasarlar toz patlamalarının önemini gözler önüne sermektedir.

2.2. Toz Patlamalarının Tarihçesi

Literatürde toz patlamalarından bahsedilmesine rağmen sistematik olarak toz patlamalarının kayıtları 20. yüzyılın başlarından itibaren mevcuttur. Tarihte ilk defa kayıtlara toz patlaması olarak geçen patlama 1795' te İtalya' da mısır unu deposunun patlamasıdır (Eckhoff, R. K., 2003). Depodaki mısır unları kürekle diğer depoya atılırken havada asılı kalan toz taneciklerinin lambanın alevi ile parlaması sonucu oluşan patlamada can kaybı olmamış ama tahıl tozlarının yüksek patlama riski taşıdığı ve depolanmasında dikkat edilmesi gereken kurallar olduğu insanlar tarafından anlaşılmıştır. Kaza raporu olarak Piedmont bölgesinde 5, 6 aydır yağmur

yağmadığından dolayı mısır ambarındaki mısırların fazla kuruması olarak yazılmıştır (Mercan, B., 2018).

Toz patlaması nedeniyle meydana gelen en eski ve en ciddi kazalardan biri ise 12 Ocak 1807'de Hollanda'nın Leiden kentinde meydana gelmiştir. Yaklaşık 85.000 kg siyah toz bulunan bir gemi Ouderkerk'ten gelmiş ve Leiden'in merkezinde demirlemişti. Tayfalardan dört tanesi ocakta yiyeceklerini pişirirken, 9000 kg kimyasal patlatıcıya eşdeğer olduğu tahmin edilen bir patlama meydana gelmiştir. Patlama 151 kişiyi ölmüş ve yaklaşık 2000 kişiyi yaralanmıştır. Gemiden 168 m mesafede bulunan evler tamamen çökmüş ve tüm şehir içinde insanlar cam ve kiremit parçalarından yaralanmıştır. Patlama 485 m uzaklığa kadar etkisini göstererek çeşitli hasarlara neden olmuştur. 1942 yılında Çin'de bir kömür madeninde meydana gelen toz patlaması ise 1594 ölü ve 246 yaralı ile tarihin en büyük toz patlaması olarak yerini almıştır (Yuan, Z., ve arkadaşları, 2015). 10 Mart 1906 yılında Kuzey Fransa da Courrières yeraltı kömür ocağında kömür tozu patlaması meydana gelmiştir. Courrières maden işletmesinde meydana gelen bu yıkıcı patlamada 1099 kişi hayatını kaybetmiştir (Palmer, K. N., 1973). 1890 yılında Polonya'da linyit kömürü fabrikasının kurutma fırınında kömür tozu patlaması, 1979 yılında Bremen'de bir değirmende un patlaması, 2008'de Amerika'da Imperial şeker fabrikasında şeker tozlarının patlaması meydana getirdikleri can ve mal kayıpları ile dikkatleri çeken çok sayıda toz patlamalarına örnek olarak sıralanabilir.

Yapılan araştırmalara göre, üçüncü dünya ülkelerinde de toz patlamaları üzerinde durulmamakta ve toz patlamalarının ciddiyeti ve sonuçları yeterince bilinmemektedir. Halbuki bu ülkelerde toz patlaması sıkça gerçekleşmekte fakat bu kazalar sadece yangın veya patlama olarak kayıtlara geçmektedir. Eckhoff toz patlamalarının yalnızca %15'inin toz patlaması olarak kayıtlara işlendiğini belirtmiştir (Eckhoff, R. K., 2003).

Özellikle gıda, kimya ve maden endüstrisinde meydana gelen patlamalar incelendiğinde toz patlamalarının önemi daha iyi anlaşılabacaktır. Günümüze kadar

meydana gelmiş maden kazaları incelendiğinde bunlar genellikle gaz sıkışması, metan gazı patlaması, kömür tozu patlaması ve karbonmonoksit zehirlenmesinden kaynaklanmaktadır. Genellikle bir olaylar diğetine tetikleyici olmakta ve olay anında zincirleme patlamalar meydana gelmektedir. Özellikle Metan gazı tarafından tetiklenen toz patlamaları kömür madenlerinde önemli ölümlere neden olmuştur. 9 Kasım 1963'te Japonya'da 458 madencinin yaşamını yitirdiği, 833 kişinin yaralandığı patlamaya kömür tozu patlaması neden olmuştur.

Kömür tozunun patlayıcılığı üzerine araştırmalar uzun yıllardır yapılmaktadır. Essenhigh 1961 yılında yaptığı çalışmada 1580 de İngiltere'de bir patlama hakkında Anthony Thomas tarafından verilen bilgilere Edward Lloyd tarafından 1630'da yapılan yorumlarda kömür tozunun kömür madeni patlamalarındaki rolünden bahsetmiştir. Kömür tozlarının tutuşabilirliği ve patlayıcılığı konusunda daha sistematik araştırmalar 19. yüzyılın sonunda ve 20. yüzyılın başlarında başlamıştır (Eckhoff, R. K., 2003).

Ülkemizde meydana gelen toz patlamaları istatistiklerine maalesef çok fazla raslanmamaktadır. Sadece yakın tarihteki kazalar ve nedenleri ile ilgili bilgilere ulaşılabilir. Bunlarda genellikle patlama olarak genel bir ad altında sınıflandırılmıştır. Özellikle madenlerde meydana gelen kazaların birçoğunun nedeni tam olarak belirlenmemiş yangın veya grizu patlaması olarak genelleme yapılmıştır. Genelde bir grizu patlaması sonucu oluşan sıcak gazların genleşmesiyle güçlü bir hava akımı oluşmakta ve toz bu turbilans etkisiyle kolayca toz bulutu oluşturabilmektedir. Yanmakta olan metan ise bu bulutu ateşleyerek büyük bir patlamaya sebep olabilmektedir.

Türkiye'de yaşanan maden ocağı patlamalarından en çok can kaybı yaşananlar ise şu şekilde sıralanabilir; Zonguldak Armutçuk'ta 103 ölü (7 Mart 1983), Amasya Yeni Çeltekte 68 ölü (7 Şubat 1990), Zonguldak Kozlu 263 ölü (3 Mart 1992), Yozgat Sorgun 37 ölü (26 Mart 1995), Zonguldak 30 ölü (17 Mayıs 2010), Manisa Soma 301 ölü (13 Mayıs 2014) (Derin, L. ve arkadaşları, 2017).

10 Ocak 2013'te Mersin'de dokuz büyük ırmık silosu bulunan bir binada büyük bir toz patlaması meydana gelmiştir. Patlamada iki işçinin ölmüş, iki işçiye ağır yaralanmıştır. Kaza günü, ırmık silolarının üzerine kaynak yapılması gerekmişti. Fakat ırmık bozulmasından meydana gelen metan gazları kaynak sırasında küçük patlamaya sebep olmuş daha sonra bu patlama ekipmanlar üzerinde bulunan tozları havaya kaldırarak daha büyük ikincil patlamayı oluşturmuştur (Mercan, B., 2018).

2.3. NFPA Toz Patlama Standartları

NFPA'in toz patlamalarına karşı oluşturduğu standartlar aşağıda sıralanmıştır (NFPA 2019);

- NFPA 652 (toz patlamalarını kapsayan genel standart)

- NFPA 654
- NFPA 61
- NFPA 664
- NFPA 484
- NFPA 499
- NFPA 655

2.4. Tozun Sınıflandırılması

Tozlar patlayıcılıkları ve patlama şiddetlerine göre sınıflandırılmışlardır. Patlama önleme ve koruma sistemleri tasarlamının ilk aşaması, bir tozun patlayıcı testlerini yaparak patlama parametrelerinin elde edilmesidir. Birleşik Krallıklar'da kabul gören bir yöntemde tozlar iki guba ayırmıştır

Grup A. Alev tutuşturabilen ve yayabilen tozlar

Grup B. Alev yayamayan tozlar

Bu grupta tozların alev aldığı sırada atmosferik şartlar altında olduğu kabulü yapılmaktadır. Bu şartlar değiştiğinde tozun patlama parametreleride değişmektedir. Fakat bu şekilde bir gruplandırma tozlar için sadece nitel bir sınıflandırma sağlamaktadır (Lunn, G. A., ve Gummer, J., 2003).

Tozun patlayabilirliğinin diğer bir sınıflandırma şekli ise K_{st} değerine göredir. K_{st} tozun patlama şiddetini karakterize etmek ve karşılaştırmak için kullanılan bir değerdir. Bartknecht, W. (1978) yaptığı çalışmada kapalı bir kapta meydana gelen toz patlamasında hacmin patlamanın şiddeti üzerinde etkisi ‘Kübik Yasa’ ile belirlenmiştir. Buna göre bir toz veya gaz karışımında meydana gelen patlamada sabit konsantrasyon, basınç ve ateşleme kaynağı koşullarında patlama küresinin hacmi değişse de P_{max} sabit kalır, fakat $(dp/dt)_{max}$ patlama küresinin hacminin küp köküyle orantılı olarak değişir. Kübik Yasanın farklı boyutlardaki patlama kürelerinde geçerli olabilmesi aşağıdaki kurallara bağlıdır (Eckhoff, R. K., 2003);

- Patlama deneyi yapılacak kürelerin geometrik şekilleri benzer olmalıdır.
- Alev kalınlığı küre çapı yanında ihmal edilebilir olmalıdır.
- Basınç ve sıcaklığın fonksiyonu olan yanma hızı tüm hacimlerde aynı olmalıdır.
- Ateşleme kürenin merkezinde gerçekleşmelidir.

Çizelge 2.1. Patlama Sınıfları (1 m³ patlama haznesi, 10 kJ patlama enerjisi) (OSHA, 2014)

Toz Patlama Sınıfı	K_{st} (bar/sn)	Özellikler
St 0	0	Patlama özelliği bulunmayan
St 1	> 0-200	Zayıf patlama özelliği
St 2	201-300	Güçlü patlama özelliği
St 3	> 300	Çok güçlü patlama özelliği

Endüstride patlama koruma yöntemlerinin belirlenmesinde $P_{\max}$ ve K_{st} iki önemli toz patlama parametresidir. K_{st} sabiti özellikle 1 m³'le gerçekleştirilen patlama deneyleri için daha uygundur. Düşük K_{st} değerlerine sahip tozlar için 20 L ve 1 m³ haznelerde yapılan testler arasında farklılıklar gözlenmiştir. Güvenlik yöntemlerini belirlemek için K_{st} değerlerini kullanırken, Uluslararası Standartlar Örgütü'nün ISO 6184 (Patlamaya Karşı Koruma Sistemleri) standartları kullanılmalı ve daha küçük patlama küreleri kullanılacaksa buna göre kalibre edilerek K_{st} belirlenmelidir (Eckhoff, R. K., 2003). ASTM E1226-12a (20 L) ve EN 14034-2 / ISO6184 (1 m³) standartları bu testleri kapsamaktadır (Amerikan Kimya Mühendisliği Kimyasal İşlemler Güvenliği Merkezi, 2017). Çizelge 2.2 ve sonrası hesaplamalar ASTM E1226-12a standardına göre $(dP/dt)_{\max}$ ve K_{st} hesaplamalarını göstermektedir.

Çizelge 2.2. ASTM E1226-12a Standardına göre $(dP/dt)_{\max}$ ve K_{st} Hesaplanması

			Patlama Parametreleri	
	Kömür konsantrasyonu (g/m ³)	Test Tekrarları	Pmax (bar)	dP/dt (bar/s)
Seri 1	250	1	6,9	242
Seri 2		2	7,3	281
Seri 3		3	7,1	266
Seri 1	500	1	8,1	300
Seri 2		2	7,8	342
Seri 3		3	8,0	323
Seri 1	750	1	7,8	340
Seri 2		2	8,2	369
Seri 3		3	7,9	355
Seri 1	1000	1	7,4	389
Seri 2		2	7,6	346
Seri 3		3	7,5	377
Seri 1	1250	1	7,2	341
Seri 2		2	7,0	324
Seri 3		3	6,9	359

Seri 1 MAX	Seri 2 MAX	Seri 3 MAX
Pmax		
8,1	8,2	8,0
dP/dt		
389,0	369,0	377,0

Her bir serinin maximum değerleri kullanılarak;

$$K_{st} = (dP/dt)_{\max} \cdot V^{1/3} \quad (1)$$

$$P_{\max} = P_{\max(\text{seri1})} + P_{\max(\text{seri2})} + P_{\max(\text{seri3})} / 3 \quad (2)$$

$$P_{\max} = (8,1+8,2+8) / 3$$

$$P_{\max} = 8,1 \text{ bar}$$

$$(dP/dt)_{\max} = (dP/dt)_{\max(\text{seri1})} + (dP/dt)_{\max(\text{seri2})} + (dP/dt)_{\max(\text{seri3})} / 3 \quad (3)$$

$$(dP/dt)_{\max} = (389+369+377) / 3$$

$$(dP/dt)_{\max} = 378 \text{ bar/sn}$$

$$V = 20 \text{ L} = 0,02 \text{ m}^3$$

$$K_{st} = (378 \text{ bar/s}) (0,02)^{1/3} = 102 \text{ bar m/s}$$

2.5. Toz Patlama Testleri

Toz patlaması sonucu oluşacak hasarların kontrol altında tutulabilmesi için tasarımlar her zaman ilgili sürece dahil olan malzemeler üzerinde yapılan testlerin sonuçlarına göre yapılmalıdır. Malzeme test için uygun değilse, aksi kanıt olmadıkça patlayıcı ve tutuşmaya duyarlı olarak kabul edilmelidir (Lunn, G. A. ve Gummer, J., 2003). Genel bir test felsefesi olarak en mükemmel test yöntemleri ve teorileri kullanılsa dahi temsili olarak seçilen test örneğinin doğru seçimi testin sonucu üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Test örneğinin hem ateşleme hassasiyeti hem de patlayıcılık üzerinde çok önemli bir etkiye sahip fiziksel ve kimyasal özelliklerinin dikkat edilerek seçilmesi ve malzemeyi doğru temsil etmesi test sonuçların güvenilirliği açısından gerekmektedir (Eckhoff, R. K., 2003).

Genel olarak uygulanan standart test metodunda iki toz konsantrasyonda, tipik olarak 1000 g / m^3 (1 g / L) ve 3000 g / m^3 (3 g / L), bir toz numunesi patlama haznesine dağıtılır ve bir ateşleme kaynağına maruz bırakılır. Patlama sonucunda elde edilen maksimum patlama basıncı ($P_{\max}$) başlangıç basıncına ($P_{\max}/P_0$) bölünür. Bu basınç oranı 2'den düşükse toz patlama ihtimali düşüktür denmektedir (Go/No Go testi) (Amerikan Kimya Mühendisliği Kimyasal İşlemler Güvenliği Merkezi, 2017). Fakat ABD'de bir tozun patlayıcı olup olmadığını gösteren tek bir test metodu

bulunmamaktadır. Bunun yanısıra bir tozun elektrik kıvılcımı ile tutuşup tutuşmayacağını belirleyen veya $P_{\max}$ veya minimum patlama konsantrasyonuna daha güçlü ateşleyiciler kullanarak karar veren testler bulunmaktadır (Dorsett, H.G., ve arkadaşları, 1960).





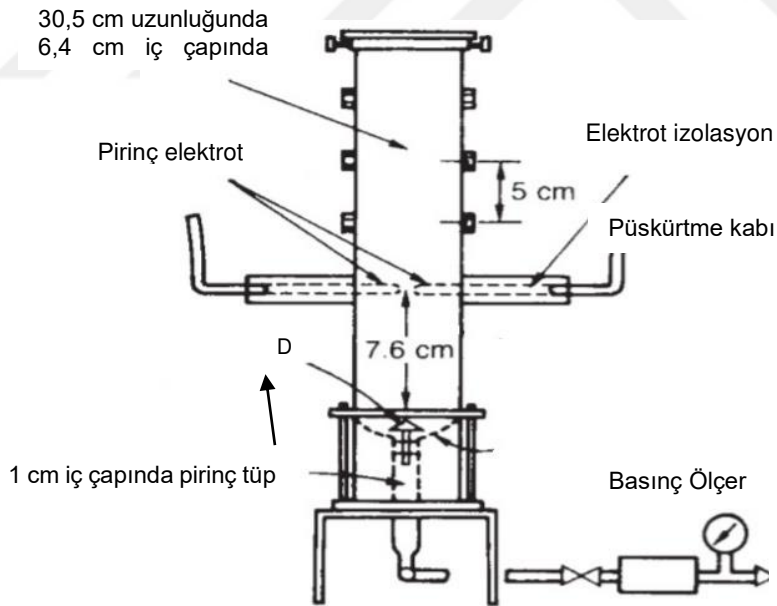
3. TOZ PATLAYABİLİRLİĞİNİ ÖLÇMEKTE KULLANILAN CİHAZLAR

Fatma BİLİRGEN

3. TOZ PATLAYABİLİRLİĞİNİ ÖLÇMEKTE KULLANILAN CİHAZLAR

Laboratuvar ortamında yapılan toz patlama deneylerinde kullanılan cihazlarının en bilinenleri 1,2 L Hartman deney tüpü (Şekil 3.1), 1000 L Fike yanma haznesi (Şekil 3.2), 20 L Siwek küresi (Şekil 3.3) ve 20 L Pittsburgh Research Laboratory (PRL) (Şekil 3.4) olarak sıralayabiliriz.

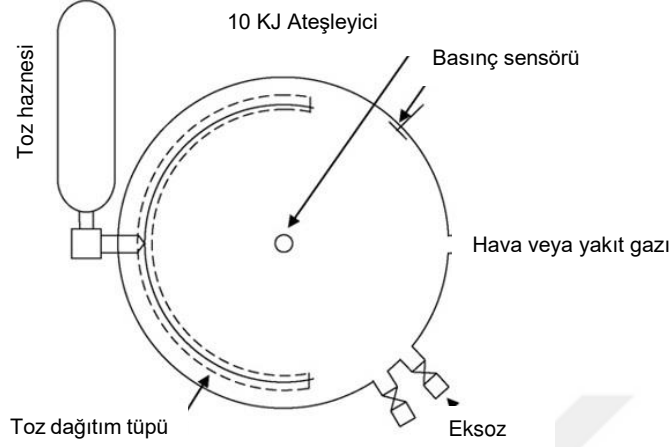
Hartmann tüpü yaygın olarak deneylerde kullanılan ilk patlama tüpü olmuştur ve 1980 öncesinde bu cihazla yapılan deneylerden elde edilen çok sayıda veri bulunmaktadır. Hartman deney tüpü içerisinde ateşleme teli bulunan dikey bir tüptür. Hartmann deney tüpü geçmişte çokça kullanılmasına rağmen homojen bir toz dağılımı sağlayamadığı ve zayıf bir ateşleme kaynağına kullanıldığı için her toz için uygun olmadığı savunulmaktadır (Lunn, G. A., ve Gummer, J., 2003).



Şekil 3.1. 1,2 L Hartman Deney Tüpü (Mannan, S., 2005)

3. TOZ PATLAYABİLİRLİĞİNİ ÖLÇMEKTE KULLANILAN CİHAZLAR

Fatma BİLİRGEN

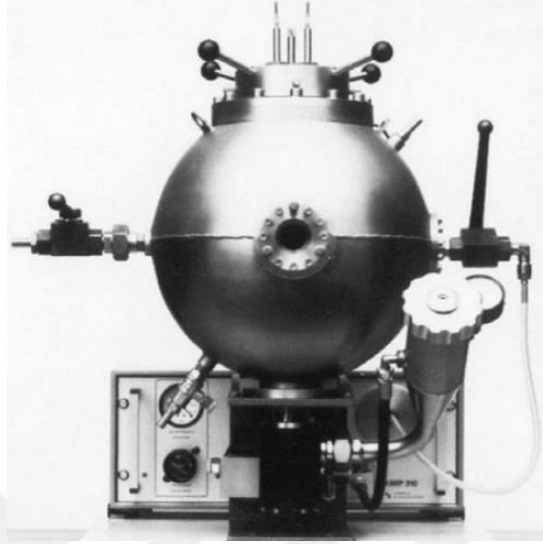


Şekil 3.2. Fike 1000 L Patlama Haznesi (Abbasi, T. A., 2007)

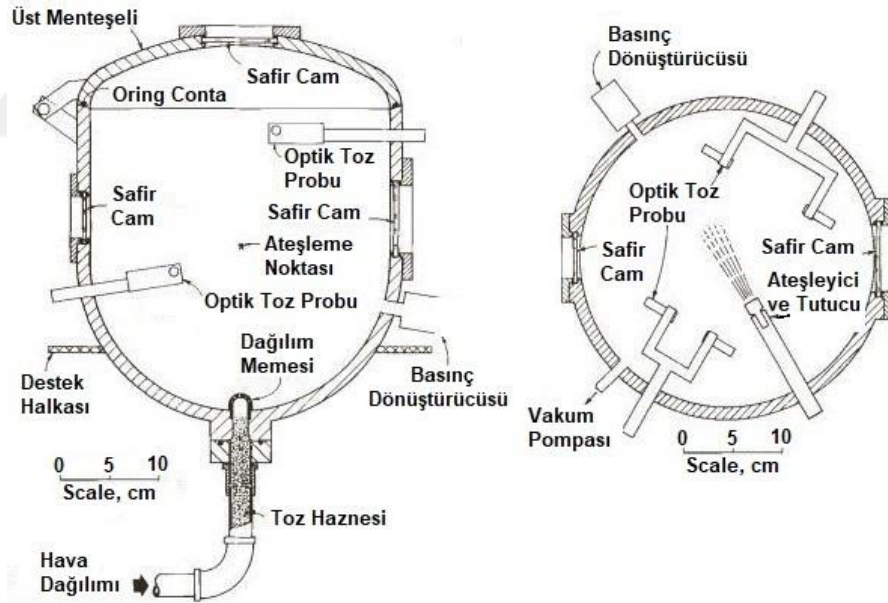
Modifiye edilmiş Hartmann dikey tüpünde olduğu gibi 20 L ve 1m³ patlama küreleri de bir tozun patlayıcı olup olmadığını belirlemek ve maksimum patlama basıncını ve basınç artış oranını ölçmek için kullanılmaktadır. Minimum toz patlama konsantrasyonu ve minimum patlama enerjisi sıklıkla 20 L (Şekil 3.4) ve 1m³ küreler kullanılarak belirlenmektedir (Mannan S., 2005).

3. TOZ PATLAYABİLİRLİĞİNİ ÖLÇMEKTE KULLANILAN CİHAZLAR

Fatma BİLİRGEN



Şekil 3.3. 20 L Siwek Patlama Küresi (Amyotte P.R. ve arkadaşları, 2005)



Şekil 3.4. PRL Patlama Küresi (Cashdollar K.I., 2000)

3. TOZ PATLAYABİLİRLİĞİNİ ÖLÇMEKTE KULLANILAN CİHAZLAR

Fatma BİLİRGEN

Bu cihazlarla yapılan deneylerde de 1 m³ patlama haznesi ve 20 L Siwek küresinden alınan sonuçlar karşılaştırıldığında genellikle 20 L Siwek küresinden ölçülen maksimum patlama basıncı 1 m³ patlama haznesinde ölçülenden biraz daha düşük çıktığı gözlemlenmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken bir husus K_{st} değeri için 1 m³ veya 20 L standart test cihazlarından başka bir aparat kullanılırsa, buna göre kalibrasyon edilmesi gerekmektedir (NMAB Endüstriyel Tehlikeleri Değerlendirme Komitesi, 1978). Özellikle K_{st} değeri patlama kabı toz alevinin kalınlığı ve ateşleyicinin alev hacmine kıyasla daha büyük olduğu durumlarda geçerli olmaktadır. Bu sabitin özellikle 1 m³ ile gerçekleştirilen patlama deneylerinde daha uygun olduğu tavsiye edilmiştir. 20 L patlama küresi ve güçlü ateşleyici kullanılan deneylerde ateşleme ve yanma küre hacmine kıyasla daha hacimseldir. Ateşleyicilerin, büyük ölçekli ve küçük ölçekli patlama testlerinden elde edilen test sonuçları tutarsızlığına önemli neden olabileceği belirtilmektedir (Zhen, G., ve Leuckel, W., 1997). Düşük ateşleme enerjisi küçük hacimli test aparatlarında patlamaya sebep olurken büyük hacimli test aparatlarında olmamaktadır. Ayrıca küçük hacimlerde iç türbilans hızlı bir şekilde meydana gelebildiği için tutuşması zor karışımlar dahi düşük yanma hızında alev alabilmektedirler.

Çizelge 3.1'de 20 L patlama küresinde yapılan testler sonucu hesaplanan patlama indeksi, K_{st}, ile 1,2 L Hartman tüpü arasında bir indirek bir kıyaslama yapmaktadır. Hartman tüpü ile K_{st} değerinin hesaplanması mümkün olmadığından dolayı, Hartman tüpü için (dP/dt)_{max} değerleri kıyaslanmaktadır (Bartknecht W., 1978). K_{st} ile (dP/dt)_{max} değerleri direk olarak kıyaslanamayacağı için Çizelge 3.1'de gösterilen değerler sadece bir fikir edinme açısından bu çalışmaya dahil edilmiştir.

3. TOZ PATLAYABİLİRLİĞİNİ ÖLÇMEKTE KULLANILAN CİHAZLAR

Fatma BİLİRGEN

Çizelge 3.1. K_{st} ve Hartman Deney Tüpü Arasındaki İlişkileme (Bartknecht, W., 1978)

K_{st} (bar m/sn)	Hartman bomba $(dp/dt)_{max}$ (psi/s)
≤ 200	≤ 7300
201-300	7300-22000
> 300	> 22000

3.1. Toz Patlama Parametreleri

Tozun patlayabilirliğine etki eden parametrelerden bazıları şu şekilde sıralanabilir;

1. Maksimum Patlama Basıncı (P_{max}) EN 14034-1/ISO 6184/ASTM E1226-12a
2. Maksimum Patlama Basıncı Artış Hızı $(dP/dt)_{max}$ EN 14034-2/ISO 6184
3. Minimum Patlama Konsantrasyonu (MEC) EN 14034-3/ ISO-6184/ASTM E1515
4. Minimum Oksijen Konsantrasyonu (LOC) EN 14034-4/ASTM E2931
5. Minimum Tutuşma Enerjisi (MIE) EN 13821/ASTM E2019
6. Minimum Tutuşma Sıcaklığı (MIT) EN 50281-2-1:1999/ASTM E1491
7. Toz Bulutu Türbülansı

Bu parametreler hem tehlikelerin değerlendirilebilmesi hem de önleme ve hafifletme tekniklerinin tasarlamasında kullanılmaktadır. Patlayıcı tozları karakterize etmek için kullanılan K_{st} , P_{max} , MEC, LOC, MIE, MIT malzemenin temel özellikleri değildir. Bu değerler test koşulları, tozun partikül büyüklüğü ve nem içeriği gibi özelliklere büyük ölçüde bağımlıdır. Dolayısı ile tozun kimyasal ve fiziksel özellikleri test sonuçları üzerinde büyük etki yapmaktadır. Parçacık Aralığı, şekli, gözeneklilik ve nem gibi fiziksel özelliklere bağlı olarak aynı kimyasal maddenin farklı tozları farklı tutuşabilirlik ve patlayıcılık özelliğine sahip olabilir.

3. TOZ PATLAYABİLİRLİĞİNİ ÖLÇMEKTE KULLANILAN CİHAZLAR

Fatma BİLİRGEN

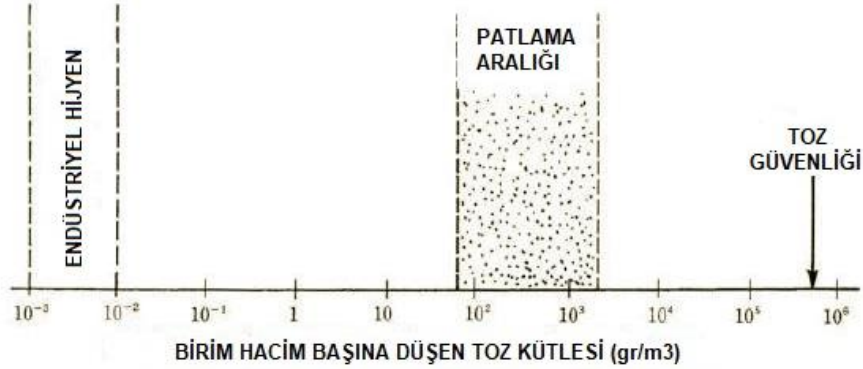
Ayrıca bu fiziksel özellikler üretim, işletme ve kullanım sırasında da değişebilir. Bu yüzden K_{st} değeri 0'dan büyük herhangi bir patlayıcı toz patlayabilir olarak sınıflandırılmaktadır. Hatta zayıf patlamalar bile ciddi hasara, yaralanmaya ve ölüme neden olabilmektedir. Örneğin şekerin K_{st} değeri düşük olmasına rağmen 2008 yılında meydana gelen patlamada 14 kişinin ölümüne neden olmuştur (OSHA, 2014).

3.1.1. Patlama Konsantrasyonu Alt Sınırı, MEC

Bir toz bulutunun patlayabilmesi için konsantrasyonunun belirli sınırlar içinde olması gerekmektedir. Test kabının hacmine bölünen kritik toz kütlesi, minimum patlayıcı toz konsantrasyonu (MEC) olarak adlandırılmıştır. Ortamda birikmiş olan tozların bir tetikleyici sayesinde hareketlenerek belirli bir konsantrasyonda toz bulutu oluşturması ve bu toz bulutunun bir ateşleyici ile karşılaşması sonucu toz patlamaları meydana gelmekte olup bu toz taneciklerinin toz bulutu içinde dağılımları patlamanın oluşmasında büyük önem taşımaktadır. Genel olarak minimum patlama konsantrasyonu için en düşük 50-100 g / m³'ten en yüksek 2-3 kg / m³'e kadar uzanan geniş bir yelpazeden söz edilebilmektedir. Bu limitler değişik tozlar için farklılıklar göstermektedir. Örneğin, çinko tozu havada yaklaşık 500 g / m³'lük minimum patlama konsantrasyonuna sahiptir (Eckhoff, R. K., 2003) (Şekil 3.5).

3. TOZ PATLAYABİLİRLİĞİNİ ÖLÇMEKTE KULLANILAN CİHAZLAR

Fatma BİLİRGEN



Şekil 3.5. Mısır Tozu Patlayıcı Toz Konsantrasyon Aralığının Endüstriyel Hijyen ve

Maksimum Toz Konsantrasyonu Aralığına Kıyası (Eckhoff, R. K., 2003)

Minimum patlama konsantrasyonu tanecik aralığı küçüldükçe ve ortamda oksijen miktarı ve uçucu maddeler artıkça azalır, bunun yanı sıra nem ve inert tozlar artıkça minimum patlama konsantrasyonu artar. Çok küçük tanecik boyutlarında geçerli olmamakla birlikte özellikle 30 mikron üzerinde minimum patlama konsantrasyonu tanecik Aralığıyla artar ve patlama meydana gelebilecek aralığı ulaşana kadar artmaya devam eder (Cashdollar, K. I., 2000). Toz konsantrasyonu minimum patlama konsantrasyonunun üzerine alev hızı ve patlama şiddeti artar.

1 m³ patlama haznesi minimum patlayıcı konsantrasyonunun tespiti için en güvenilir test metodu olara kabul edilmektedir. 1 m³ patlama tankında kullanılan 10 kJ'lık çok güçlü bir ateşleme kaynağı bile toz bulutunun büyük hacmi nedeniyle toz bulutu yayılımının ana aşamasına müdahale etmemektedir. Buna rağmen büyük Aralığı nedeniyle rutin testler için çok uygun bulunmayıp ve daha küçük laboratuvar ölçekli yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır (Eckhoff, R. K., 2003).

Çoğu zaman P_{max} ve $(dP/dt)_{max}$ için optimum değer değişik konsantrasyonlarda meydana gelebilir. Özellikle yüksek atomik element ağırlığı veya yüksek inert bileşenleri olan malzemeler için optimum değer daha yüksek toz konsantrasyonu gerçekleşmektedir (ASTM: E 1226 , 2005).

3. TOZ PATLAYABİLİRLİĞİNİ ÖLÇMEKTE KULLANILAN CİHAZLAR

Fatma BİLİRGEN

3.1.2. Sınırlayıcı Oksijen Konsantrasyonu, LOC

Toz bulutunda patlamanın yayılabilmesi için ortamda bulunması gereken minimum oksijen miktarını ifade eder. Yanma için yeterli oksijen genellikle havada bulunmaktadır. %21'den fazla oksijen konsantrasyonu yakıtın yanma hızını artırırken %21'den az oksijen konsantrasyonu yanma hızını azaltır. Yanma ancak havada oksijen konsantrasyonu %10'dan fazla olduğunda devam eder (Abbasi, T. A., 2007). NFPA 69 ortam oksijen konsantrasyonunun önceden belirlenmiş olan sınırlayıcı oksijen konsantrasyonundan en az %2 daha düşük tutulmasını önermektedir (Cashdollar, K. I., 2000).

3.1.3. Minimum Tutuşma Enerjisi, MIE

Belirli test koşulları altında en optimum toz-hava karışımını tutuşturmak için gereken minimum elektrik kıvılcımı enerjisini ifade eder (Mittal, M., 2013). Bu değer için standartlar oluşturulmakla birlikte bir madde için tek bir MIE değeri tanımlanamaz çünkü bu değer tozun fiziksel ve kimyasal özelliklerine ve kullanılan test aparatına (örneğin, kıvılcım oluşturmak için kullanılan elektrik devresi) bağlıdır (Lunn, G. A., ve Gummer, J., 2003). Min tutuşma enerjisi tanecik aralığı küçüldükçe, oksijen konsantrasyonu ve uçucu maddeler artıkça azalır, nem ve inert tozların artması ile artar.

3.1.4. Minimum Tutuşma Sıcaklığı, MIT

Belirli test koşulları altında en optimum toz-hava karışımını tutuşturan minimum yüzey sıcaklığıdır (Eckhoff, R. K., 2003). MIT değerinin bilinmesi sıcak yüzeyler gibi ateşleme kaynaklarına dikkat edilmesini sağlamanın yanısıra elektrikli ekipmanların tasarım parametrelerinin belirlenmesi için de gerekmektedir.

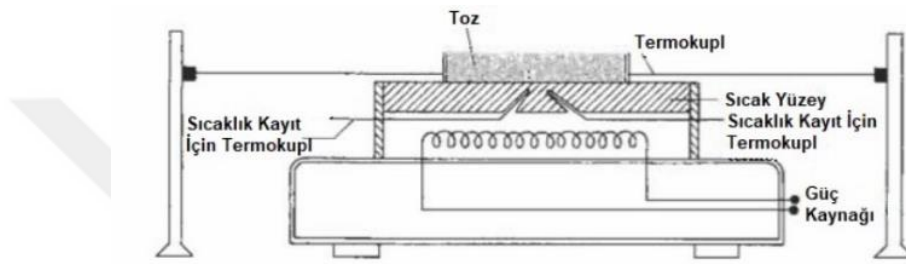
Birçok tahıl tozları 400–500 °C arasında sıcak bir yüzeyle karşılaştıklarında alev alabilirler. Tanecik Aralığı, nem miktarı ve turbilans gibi uygun şartlar

3. TOZ PATLAYABİLİRLİĞİNİ ÖLÇMEKTE KULLANILAN CİHAZLAR

Fatma BİLİRGEN

oluştığında 200 °C gibi bir sıcaklıkta bile içten içe yanma başlamakta ve bu da patlamaya sebep olabilmektedir (Lunn, G. A., ve Gummer, J., 2003).

MIT ve MIE tesbiti için 1994 yılında Uluslararası Elektroteknik Komisyonu tarafından düzenlenmiş test düzeneği Şekil 3.6’da gösterilmiştir (Eckhoff, R. K., 2003).



Şekil 3.6. MIT Deney Düzeneği (Eckhoff, R. K., 2003)

3.1.5. Maksimum Patlama Basıncı, P_{max}

Belirli test koşulları altında kapalı bir deney kabında toz bulutunun patlaması sonucu oluşan maksimum basıncı ifade eder (Barton, J., 2002). P_{max} optimum toz konsantrasyonunda herbir seride patlama basıncının maksimum değerinin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanır.

$$P_{max} = (dP)_{max(seri1)} + (dP)_{max(seri2)} + (dP)_{max(seri3)} / 3 \text{ (bar)} \quad (\text{EN 14034-1})$$

Patlama şiddeti standart testlerle maksimum patlama basıncı ve maksimum patlama basınç artış hızı ve bunlarla ilişkili olarak K_{st} değerine bakılarak ölçülebilir. Patlamayı önleyici tedbirler alınırken K_{st} değerinin bilinmesi önemlidir. Ancak göreceli olarak yavaş gelişen bir olayda (düşük K_{st} değeri), yüksek basınçlar oluşursa yine de büyük hasara neden olabileceği bilinmelidir. Örneğin, kömür tozu aspirin veya alüminyum tozuna kıyasla daha düşük patlayıcılık ve patlama şiddetine (düşük

3. TOZ PATLAYABİLİRLİĞİNİ ÖLÇMEKTE KULLANILAN CİHAZLAR

Fatma BİLİRGEN

K_{st} değeri) sahiptir. Ancak, kömür tozu patlamaları, kömür madeni patlamalarında çok yıkıcı etkilere sebep olmuştur (Barton, J., 2002).

3.1.6. Maksimum Patlama Basınç Artış Hızı $(dP/dt)_{max}$

Patlamanın şiddetini etkileyen iki önemli faktör maksimum patlama basıncı ve maksimum basınç artış hızıdır. Bu değer özellikle toz patlamalarının engellenmesi için kullanılan patlama algılayıcıları ve patlama kapaklarının dizaynında büyük önem taşımaktadır. Maksimum patlama basıncı artış hızı patlamanın hızını dolayısı ile şiddetini belirlemektedir. Maksimum patlama basıncı artış hızı tanecik Aralığı küçüldükçe, oksijen konsantrasyonu ve uçucu maddeler artıkça artar, nem ve inert tozların artması ile azalır. Maksimum patlama basıncı artış hızı optimum toz konsantrasyonunda herbir seride patlama basıncı artış hızının maximum değerinin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanır (EN 14034-2).

$$(dP/dt)_{max} = (dP/dt)_{max(seri1)} + (dP/dt)_{max(seri2)} + (dP/dt)_{max(seri3)} / 3 \quad (\text{bar/sn})$$

3.1.7. Tozun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Özellikle toz patlamalarının engellenmesi için ortamda bulunan patlayıcı maddenin bileşiminin bilinmesi önemlidir. Yakıt içerisinde bazı maddeler yanmayı ve patlamayı engelliyebilecek özelliklere sahip olabilir. Örneğin kömür gibi bazı tozlar homojen değildir ve kaynağa bağlı olarak çok farklı bileşimlere ve dolayısıyla çok farklı patlama özelliklerine sahip olabilir. Kömür tozu genellikle daha yüksek derecelerde patlama özelliği taşımaktadır fakat içeriğinde uçucu miktarı arttıkça patlayıcılığı ve patlama şiddeti artış göstermektedir. Mesela antrasit kalorifik değeri yüksek bir malzeme olmasına rağmen patlayıcı özelliği çok düşüktür, çünkü uçucu madde içeriği düşüktür (Lunn, G. A. ve Gummer, J., 2003).

3. TOZ PATLAYABİLİRLİĞİNİ ÖLÇMEKTE KULLANILAN CİHAZLAR

Fatma BİLİRGEN

3.1.7.1. Nem

Tozdaki nem içeriği toz patlamaları üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Nem toz bulutlarının hem ateşleme hassasiyetini hem de patlama şiddetini azaltır. Genellikle tozdaki nem oranı %30 üzerinde olduğunda tozun patlama riski zayıflamaktadır.

3.1.7.2. Tanecik Boyutu veya Yüzey Alanı

Toz bulutlarının patlama hızı tanecik boyutu veya yüzey alanı ile direk bağlantılıdır. Toz, değişik tanecik boyutlarından oluştuğunda, ince tozlar alev almada veya patlamanın yayılmasında tanecik aralığı en belirgin rolü oynar. Havada asılı kalabilen herhangi bir yanıcı katı madde tanecik aralığı küçüldükçe daha hızlı ve şiddetli bir şekilde patlamalara neden olabilmektedir. 20 L patlama küresinde yapılan deneylerde kömür tozunun patlayıcı özellikleri parçacık büyüklüğü ve konsantrasyonu ile önemli ölçüde ilişkili olduğu ortaya çıkmıştır. Araştırmalar nano boyutlu kömür tozunun maksimum patlama basıncı mikron aralığına kıyasla daha fazla ve maksimum patlama basıncına ulaşması için gereken süre mikrondan daha az bir zamandır. Nano boyutlu kömür tozunun aynı konsantrasyonda patlama basıncı, maksimum basınç artışı ve patlama indeksi, mikro boyutlu kömür tozundan daha büyüktür ve bu da nano boyutlu kömür tozunun daha patlayıcı olduğunu göstermiştir. Patlamadan sonra kalan gaz O₂ ve CO konsantrasyonu karşılaştırıldığında ise aynı kömür tozu için nano boyutlu toz patlamasından sonra O₂ ve CO konsantrasyonlarının mikrondan daha düşük olduğu görülmüştür (Tan, B., ve arkadaşları, 2020).

Fakat bazı malzemelerde toz parçacıkları topaklanma eğilimi gösterdiğinden ve bu durumda da yüzey alanı azaldığından dolayı tanecik aralığını azaltmak patlama şiddetini artırmamaktadır. Genel olarak tozlar tanecik aralığı 500 mikron üzerinde ve 50-74 mikron altında iken patlama riski azalmaktadır.

3. TOZ PATLAYABİLİRLİĞİNİ ÖLÇMEKTE KULLANILAN CİHAZLAR

Fatma BİLİRGEN

Bazı durumlarda ise özellikle kömür gibi maddelerde homojen gaz fazında meydana gelen yanma proliz ve devolatilizasyondan daha önce meydana gelir. Devolatilizasyon, gaz fazı karıştırma ve gaz fazı yanma oranları yanma hızını etkiler. Tanecik aralığı öncelikle devolatilizasyon oranını etkiler. Fakat bu reaksiyonda gaz fazı yanma bu üç adımdan en yavaşı ise, tanecik aralığını küçülterek devolatilizasyon oranını artırmak genel olarak yanma hızını artırmaz. Bu sebepten bu gibi malzemelerde tanecik çapını küçültmek patlamanın şiddetini artırmaz. Genel olarak patlamaya neden olabilecek sınır tanecik çapı kömür için 50 mikron, nişasta gibi organik malzemeler için ise 10 mikronun çok altına düşmemektedir (Eckhoff, R.K.,2003).

3.1.7.3. Uçucu Madde

Tozun bünyesinde barındırdığı uçucu maddelerin tozun patlayabilirliğine etkisi büyüktür. Uçucu maddede %10 artış bile tozun patlayıcılığını yüksek oranda etkilemektedir. Özellikle kömür tozları bünyesinde bulundurdıkları uçucu madde oranının düşük olması kömürün yanmasını önler, yüksek olması ise havayı kirletir. Genellikle linyitlerde uçucu madde oranı %50 civarında antrasit gibi yaşlı kömürlerde %10'dan azdır. Taş kömürlerinde uçucu madde oranı %10–45 arasında değişmektedir. Ortalama olarak bu değer %30 olarak kabul edilebilir. Uçucu madde miktarı %10'un altında olan kömürlerin tutuşturabilmesi güçleşir. Antrasit ve grafit gibi kalorifik değeri yüksek fakat içinde uçucuları az bulunan kömür tozları patlama riskleri yüksek olan tozlardan değildir. Örneğin, Nagy ve Verakis (1983)'e göre saf karbon tozunun patlayıcı özelliği bulunmamaktadır. Fakat genel anlamda içerisinde %8 ve üzeri uçucusu bulunan karbon tozlarının patlama özelliği bulunduğu kabul edilmektedir (Mannan, S., 2005).

Howard ve Essenhigh araştırmasında ise, 100 mikrondan küçük çaplı parçacıklar için toplam devolatilizasyon süresinin parçacık aralığından bağımsız olduğu varsayılmaktadır. Burada, parçacık yüzey alanı birimi başına ortalama uçucu

3. TOZ PATLAYABİLİRLİĞİNİ ÖLÇMEKTE KULLANILAN CİHAZLAR

Fatma BİLİRGEN

oranının parçacık aralığı ile arttığını ifade edilmektedir. Fakat bazı durumlarda çok küçük parçacıklar için uçucular parçacığın etrafında bir alev yüzeyi oluşturmak için yetersiz kalmaktadır (Eckhoff, R.,2003).

3.1.7.4. Toz Bulutu Türbülansı

Yüksek türbülans içeren toz bulutlarında tanecikler homojen olarak dağılır ve ateşleyici bir kaynakla karşılaştığında alev alır ve türbülansında yardımıyla bu alev hızla yayılır. Türbülansın yüksek olduğu yerlerde alev çok hızlı bir şekilde yayılır ve bu da patlamanın şiddetini artırır (Abbasi, T. A., 2007). Toz bulutunda türbülansın yanma hızına etkisi P_{max} 'a etkisinden daha fazladır. Bunun nedeni, türbülanstaki artış toz taneciklerinin hareketliliği artırmakta ve tanecik yüzeyine oksijenin erişimini çoğaltarak yanma hızını artırmaktadır (Lunn, G. A. ve Gummer, J., 2003).

Toz patlama parametrelerinin etkileşimleri Mannan, S., 2005, tarafından çalışılmış ve Çizelge 3.2'de özetlenmiştir.

3. TOZ PATLAYABİLİRLİĞİNİ ÖLÇMEKTE KULLANILAN CİHAZLAR

Fatma BİLİRGEN

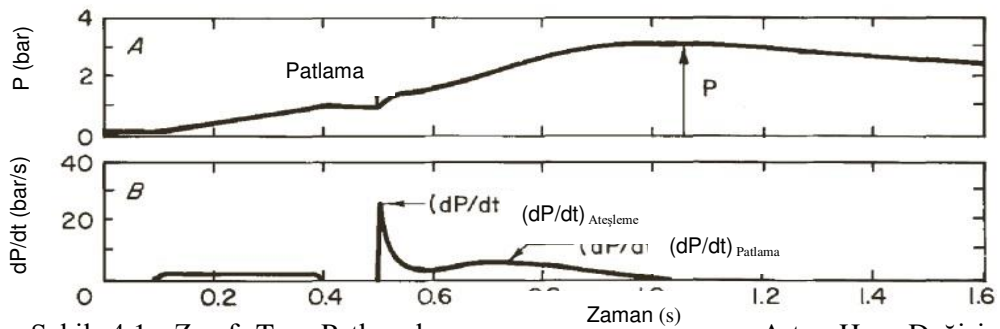
Çizelge 3.2. Toz Patlama Parametrelerinin Etkileri (Mannan, S.,2005)

Parametreler	Artırıcı Parametreler	Azaltıcı Parametreler
Tozun Patlayabilirliği	Düşük Patlama Konsantrasyonu Düşük Ateşleme Enerjisi Düşük Tutuşma Sıcaklığı Yanma Hızı Maksimum Basınç Artış Hızı Tanecik Aralığının küçüklüğü Oksijen konsantrasyonunun artması Tozun içerisinde uçucu madde miktarının %10 un üzerinde olması, COOH, OH, NH ₂ , NO ₂ gibi kimyasalların varlığı	Tozun nem oranının %30 un üzerinde olması Cl, Br, F gibi kimyasalların varlığı İnert madde içeriğinin 10–20% üzerinde olması
Tanecik Aralığının patlamayı başlatmadaki etkisi	50-70 mikron<tanecik Aralığı<500 mikron	500 mikron<tanecik Aralığı<50-70 mikron
Min Patlama Konsantrasyonu	Nem artışı İnert toz konsantrasyonunda artış	Tanecik Aralığında azalma Uçucu maddelerde artma Oksijen konsantrasyonu artma
Min Ateşleme Sıcaklığı	Nem artışı İnert toz konsantrasyonunda artış	Tanecik Aralığında azalma Uçucu maddelerde artma Oksijen konsantrasyonu artma Toz tabakası kalınlığında artma
Min Oksijen Konsantrasyonu	Toz sıcaklığında düşüş	Toz sıcaklığındaki artış
Max Patlama Basıncı	Tanecik aralığında azalma	
Max Patlama Basınç Artış Hızı	Tanecik aralığındaki azalma Uçucu maddelerde artma	Nem artışı İnert madde içeriğinin artması

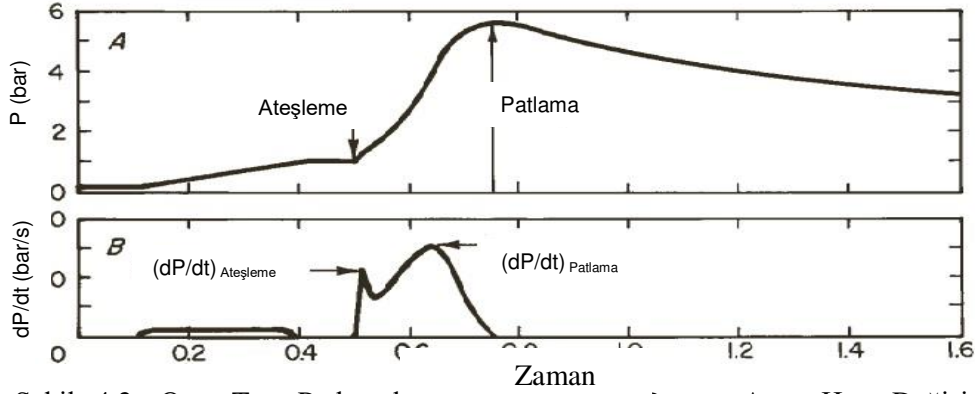
4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

4.1. Toz Patlama Karakteristiğine Genel Bakış

Cashdollar, K. I., 2000 toz patlamaları konusunda çok sayıda çalışmalar yapmış ve bu konuda literature katkıları olan araştırmacıların başında gelir. Bu çalışmasında endüstride karşılaşılan toz bulutlarının patlama sonucu meydana getirecekleri hasarı mümkün olduğunca minimum seviyeye indirebilmek için tozların patlayabilirlik ve tutuşabilirlik parametrelerini incelemiştir. Çalışmada min patlama konsantrasyonu (MEC), max patlama basıncı (P_{max}), min oksijen konsantrasyonu (LOC), min ateşleme sıcaklığı (MIE) ve alev yayılımını azaltmak için ortama ilave edilen kireçtaşı'nın patlamaya olan etkileri gibi toz patlamasında önem arzeden parametreler incelenmiştir. 20 L PRL (Pittsburgh Research Laboratory) patlama küresinin kullanıldığı deneylerde toz taneciklerinin bünyesinde barındırdığı ucucu madde miktarı, tanecik Aralığı, turbülans, başlangıç basınç ve sıcaklıkları, oksijen konsantrasyonları dikkatle incelenmiştir. Ayrıca bu araştırmada toz ve gaz (metan gazı) patlamalarını da kıyaslamıştır. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de zayıf ve orta şiddetli toz patlamalarında basınç ve basınç artış değişimi kıyaslanmıştır.



Şekil 4.1. Zayıf Toz Patlamalarının Basınç ve Basınç Artış Hızı Değişimi (Cashdollar, K. I., 2000)



Şekil 4.2. Orta Toz Patlamalarında Basınç ve Basınç Artış Hızı Değişimi (Cashdollar, K. I., 2000)

4.2. Mevcut Durum ve Gelecekteki Beklentiler

Eckhoff R. K., 2005’deki çalışmalarında toz patlamalarında ana parametreleri ve bunları engellemenin veya azaltmanın yollarını şimdiye kadar yapılan çalışmalarda mevcut durumları özetlemiş ve gelecek araştırmalarda yoğunlaşılacak kısımları öngörmüştür. Eckhoff R. K., 2005 toz patlaması hususunda etkin bir araştırmacı olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışmasını toz bulutu tutuşması, alev yayılması ve toz bulutu patlaması sırasında dalgaların incelenmesi olmak üzere üç ana başlık altında toplamıştır. Ayrıca toz bulutu patlamalarını önlemek için gerekli şartları ve alınması gereken tedbirleri gözler önüne sermektedir.

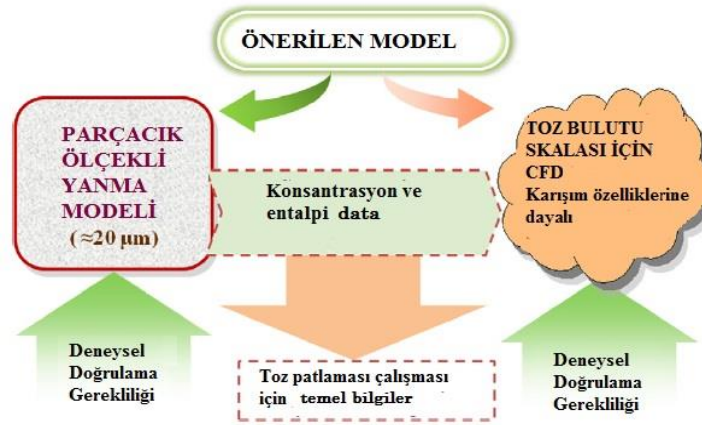
Amyotte ve arkadaşları, 2005 yılı ve önceki çalışmalarında pulverize akışkan yataklı termik santrallerde petcoke ve kömürün karıştırılarak kullanılmasının daha ekonomik olmasının yanı sıra kömür taşıma hatları ve taşıma silolarında patlamayı azaltıcı etkileri olduğunu ortaya koymuştur. Bunun ana sebebinde petcoke da uçucu madde oranlarının daha düşük olması olarak açıklamıştır. Bu çalışmada ise bu karışımın kullanılmasının sonucunda kazanda oluşan uçucu kül ve cüruflardaki karbon miktarında artışın elektrostatik filtreler gibi çeşitli unitelerde toz patlamalarında yapacağı artışı inceleme ihtiyacı duymuşlardır. Çalışmada 20 L Siwek patlama küresinde kömür ve petcoke küllerinin patlama

riskleri deneysel olarak incelenmiş ve sonuçlar raporlanmıştır. Patlama parametreleri olarak patlama basıncı ve basınç artış hızını detaylı olarak ele almıştır. Çalışmaları sonucunda belirli parametreler içerisinde uçucu küllerin patlama riskinin hemen hemen bulunmadığı kanaatine varırken kazan altı cürufunun sınırlıda olsa patlama riskinin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca patlamanın oluşabilmesi için üç değişik kül içerisinde minimum uçucu madde oranları olanlar çalışılmıştır. Uçucu kül konsantrasyonunun 1000 g/m^3 olduğu bir ortamda patlamanın gerçekleşmesi için kül içerisinde uçucu madde oranlarının %7 ile %13 arasında olması gerektiği görülmüştür. Uçucu madde oranlarının bu değerlerin altına düşmesi durumunda patlama riskinin ortadan kalktığı gözlenmiştir. Ayrıca çalışmada kül konsantrasyonu, uçucu madde oranları gibi değerlerin yanı sıra tanecik Aralığının da etkisine dikkat çekilmiştir. Tanecik Aralığı çok büyük olduğu zaman uçucu madde oranları patlama sınırlarında olsa bile patlama gerçekleşmemektedir. Bu çalışma test konusu küller odaklanılmış sadece bunların sonuçları incelenmiştir.

Eckhoff R. K., 2009'daki çalışmalarında toz patlamalarındaki temel parametreler üzerinde durmuştur. Özellikle toz bulutundaki tanecik Aralığının dağılımının, taneciklerin toz bulutundaki dağılma derecesinin, toz bulutundaki tanecik yoğunluğunun ve toz bulutundaki türbülansın patlamaya olan etkileri incelenmiştir. Ayrıca toz patlamalarından korunmak ve patlamanın vereceği hasarları azaltmak için alınabilecek tedbirlerden söz etmektedir.

Bind V. K. ve arkadaşları, 2012'deki çalışmalarında 20 L Siwek küresi kullanılarak alüminyum ve mısır tozları patlamalarının yanma kinetiği ve partikül taşıma reaksiyon modelleri oluşturulmuştur (Şekil 4.3). Önceki çalışmalarda toz patlamaları tanecik aralığında ve toz bulutları olmak üzere ayrı çalışmalarda incelenmiştir. Çalışmalarda modelleme oluşturulurken tanecikler arasındaki mesafe dikkate alınarak tanecik veya toz bulutu olarak modellenmesine karar verilmiştir. Tanecik Aralığında genellikle mikron seviyesindeki taneciklerin tutuşması katı-gaz non-katalitik reaksiyon olarak modellenirken, toz bulutlarında alevlenme ve basınç

yayılımı iki fazlı katı gaz karışımı olarak modellenmiştir. Bu çalışmada bu iki durum birlikte ele alınarak tanecik aralığında alev alma değişik sınır şartlarında metalik bir toz olan alüminyum toz patlamaları için modellenmiş ve bundan elde edilen reaksiyon hızı değeri CFD modellemesinde kullanılmıştır. Aynı şekilde organik toz olan nişasta için toz bulutlarında zamana bağımlı alev dağılımı ve basınç yayılımı CFD kullanılarak modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar daha önceki yapılan çalışmalarda sonuçlarla karşılaştırılarak CFD modelinin validasyonu gerçekleştirilmiştir. Patlama tankındaki basıncın zamana göre değişimi detaylı olarak analiz edilmiş ve deneysel ölçümler nümerik sonuçlarla kıyaslanmıştır.



Şekil 4.3. Toz Patlama Modellemesi (Bind V. K. ve Arkadaşları, 2012)

Deneysel ölçümler ve nümerik sonuçların kıyaslamaları göstermiştir ki nümerik model basıncın zamanla değişimini (dp/dt) biraz farklı olarak tahmin edebilmiş, ayrıca basınç zaman eğrisi eğiliminde de gerçekleşen ve tahmin edilen arasında farklılıklar bulunmuştur. Teorik ve deneysel sonuçlar ile bu çalışmadaki CFD sonuçları arasındaki farklılıkların en önemli sebebi, CFD modelleme gerçek hayattaki ısı kayıplarını ve tam tamamlanamamış yanma reaksiyonlarını göz ardı etmektedir. Çalışmanın ilerleyen basamaklarında ise bu sonuçlardan yararlanılarak 10,3 m³ lük bir endüstriyel hazne içerisindeki yarı homojen bir toz bulutunun (mısır

nişastası) patlamasının simülasyonu oluşturulmuştur. Bu simülasyon ile deneysel sonuçlar arasında bazı farklar bulunmuş ve bunun farklı toz tanecik boyutlarındaki dataların sonuçlarının kıyaslanması olarak açıklanmıştır. Toz patlamalarında CFD modellemenin daha karmaşık modellemelerde kullanılabilecek bir araç olduğunu ortaya koymuştur.

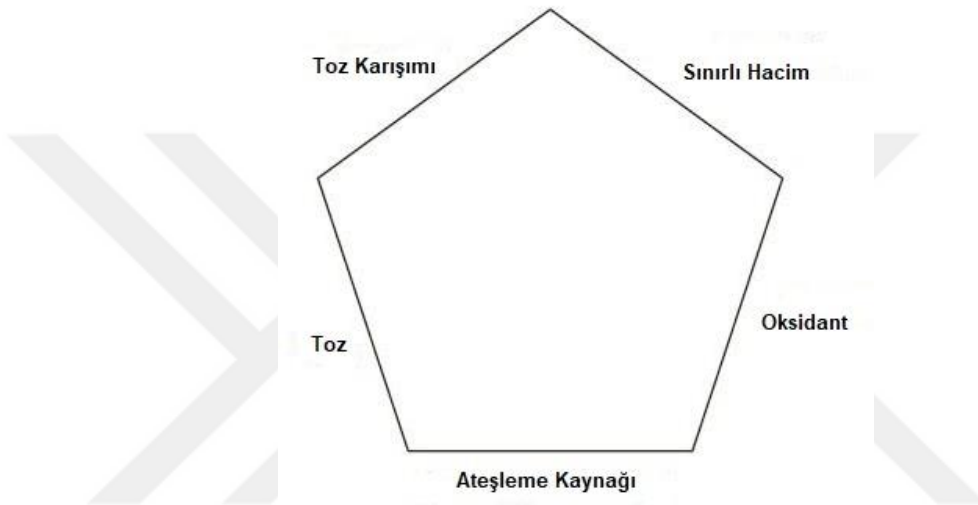
Snoeys J. ve arkadaşları 2012 yılında geleneksel toz patlama ventilasyon teknolojilerine göre daha avantajlı olan alevsiz ventilasyon teknolojisi birçok uygulamada tercih edilmeye başlanmıştır.

Fike Firması (USA) tarafından geliştirilen ‘alevsiz ventilasyon’ teknolojisi ile geleneksel patlama ventilasyon sisteminin kıyaslanması Snoeys J. ve arkadaşları (2012) tarafından gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.4). Çalışmanın sonucunda alevsiz ventilasyon teknolojisinin avantajları sunulmuş ve teknolojinin standartlaşması için çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 4.4. Geleneksel Ventilasyon Teknolojisi ve Alevsiz Ventilasyon Teknolojisi Kıyası (Fike Corporation, USA) (Snoeys, J., ve ark. 2012)

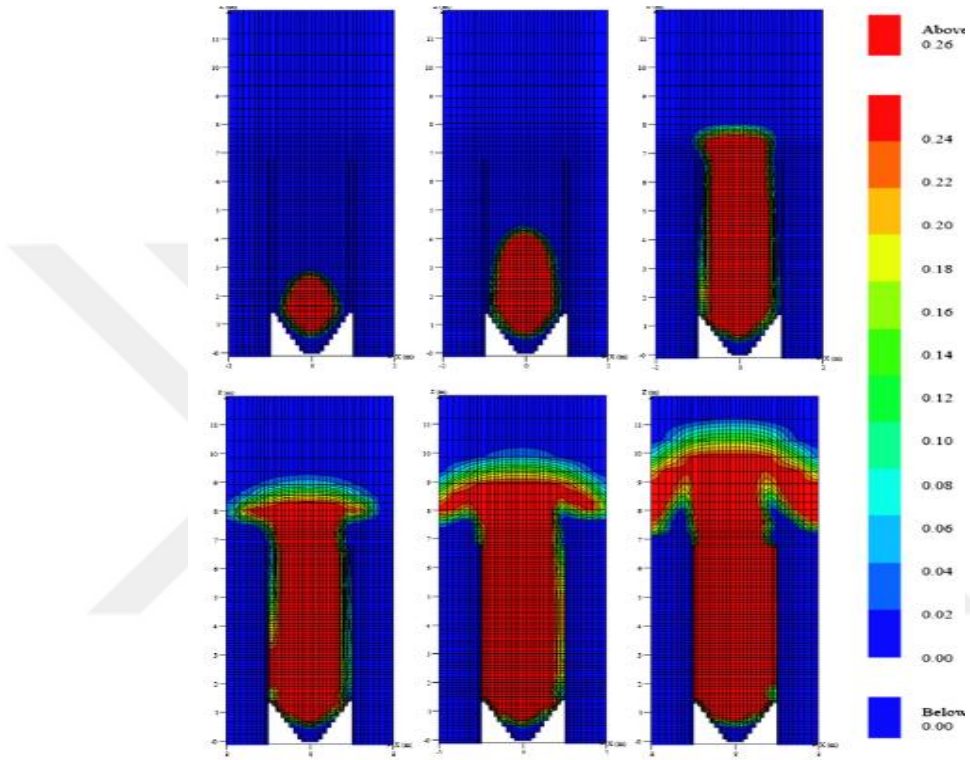
Amyotte P. R., 2014'deki çalışmasında toz patlamalarının meydana gelmesi için gerekli şartlar patlama pentagonu (Şekil 4.5) olarak göstermiştir. Bunlar yanabilen toz, toz karışımı, oksijen, ateşleme kaynağı ve sınırlı bir alan olarak sıralanmıştır.



Şekil 4.5. Toz Patlama Pentagonu (Amyotte, P. R., 2014)

Tascon A. ve Aguadob P. J., 2015'de 16,3 m³ hacme sahip bir silo da toz patlamasını CFD yardımı ile modellemişlerdir (Şekil 4.6). CFD modelleme havalandırma kapakları olma ve olmama durumlarına göre tekrarlanmıştır. Patlamaya tesir edeceği düşünülen toz konsatrasyonu ve kıvılcımın başlatıldığı nokta parametrik olarak test edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ticari modelleme programı FLACS-DustEx Gexon firması tarafından geliştirilmiştir. Ventilasyon yüzey alanı ile patlama anı basıncı arasındaki ilişki çalışılmış ve NFPA 68 ve EN 14491 standartlarına göre kıyaslanmıştır. Bu çalışmada gerçekleştirilen CFD sonuçlarına göre patlama basıncı her iki standarda göre daha aşağılarda gerçekleşmektedir. Bunun yanı sıra bu çalışma da her iki standardın da patlama kapak ölçülendirmesi yaparken kullanıldığı parametrelerin (maksimum basınç, depolanan ürünün patlama

karakteristikleri ve tankın fiziksel şekli) aslında yeterli olmadığı ve daha farklı senaryoların olabileceği tartışılmaktadır.

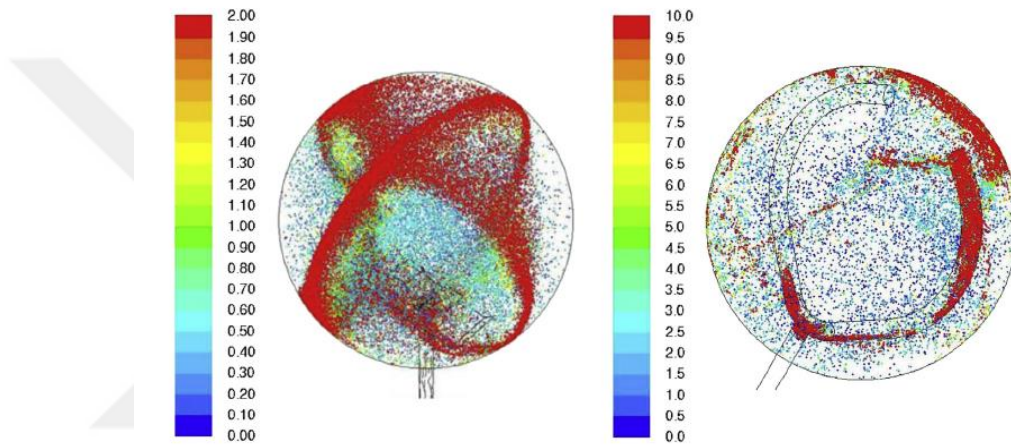


Şekil 4.6. Siloda Patlama Alev Simülasyonu (Tascón, A. ve Aguadob, P. J., 2015)

Rania S.I. ve arkadaşları 2015’de yaptıkları çalışmada siloya toz yüklemesi esnasında toz konsantrasyon dağılımının toz patlama riski üzerindeki etkisi CFD modelleme kullanılarak incelenmiştir.

Çalışmada iki fazlı CFD akış modellemesi kullanılmış olup, toz yoğunluğuna göre patlama riskinin artabileceği öngörülmüş ve risk analizleri yapılmıştır. Bu çalışma yanma/patlama modellemesi, toz tanecikleri arasındaki etkileşimler ve farklı türbülans modelleri seçilerek yapılacak ileriki çalışmalara faydalı olabilecek önemli bir çalışmadır.

Sarli V.D. ve arkadaşları 2015’de yaptıkları çalışmada delikli halka şeklinde bir nozzle bulunan 20 L’lik patlama küresi üç boyutlu CFD model kullanılarak modellenmiş ve CFD model ile tahmin edilen toz konsantrasyon dağılımı deneysel sonuçlarla kıyaslanarak model tamamlamışlardır (Şekil 4.7). Çalışmada halka kanal ve delikli halka kanal karşılaştırılmış ve delikli halka nozzle toz konsantrasyonun daha homojen yayılmasına sebep olduğu görülmüştür.



Şekil 4.7. Halka Kanal ve Delikli Halka Kanal ile Tanecik Dağılımının Kıyaslanması (Sarli, V.D. ve arkadaşları, 2015)

Bilirgen F., 2019 yılındaki çalışmasında 1 L hacme sahip toz patlama küresi tasarlamıştır. Bu çalışmada tasarlanan ve imalatı yapılan patlama kuresinde yerli ve yabancı birkaç kömür tozu kullanarak bu tozların patlama karakteristiklerini belirlemek için küre içerisindeki maksimum patlama basıncını (P_{max}) ölçmüştür. Bu çalışmada Soma kömürü (linyit), Rus kömürü (linyit), Güney Afrika kömürü (bitümlü), Kolombiya Çumra karışım kömürü (altbitümlü_linyit) ve Endonezya kömürü (Jembayan altbitümlü) için maksimum patlama basınç değerleri incelenmiştir.

5. MATERYAL ve METOD

Bu çalışma kapsamında 1 L hacme sahip bir patlama küresi başarıyla geliştirilmiş ve operasyonel hale getirilmiştir. 1 L'lik toz patlama küresi kullanılarak 500'ün üzerine toz patlama testleri gerçekleştirilmiştir. 1 L'lik cihaz ile test edilen kömür tozları ve bu cihaz kullanılarak gerçekleştirilen test ve analizler Çizelge 5.1'de tablo halinde özetlenmiştir. Çizelge 5.1'de görüleceği gibi Soma kömürü (linyit), Rus kömürü (linyit), Güney Afrika kömürü (bitümlü), Kolombiya Çumra karışım kömürü (altbitümlü_linyit) ve Endonezya (Jembayan altbitümlü) kömürleri kullanılarak patlama karakteristik testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada toz patlamalarındaki en önemli faktörler olan patlama indeksi (K_{st}), maksimum patlama basıncı (P_{max}), maksimum patlama basınç artış oranı (dP/dt)_{max}, patlama konsantrasyonu alt sınırı, minimum oksijen oranı, nem ve tanecik aralığı parametreleri bu kömürler için test edilmiştir. Toz patlama karakteristiklerini belirlemek için test edilen parametreler çizelgenin ilk kolonunda listelenmiştir.

Çizelge 5.1. 1 L Toz Patlama Küresi Deney Tablosu

Numune Menşei	Soma Linyit	Rus Linyit	Güney Afrika Bitümlü	Kolombiya Çumra Karışımı	Endonezya Jembayan
Kısa Analiz	✓	✓	✓	✓	✓
Elemental Analiz	✓	✓	✓	✓	✓
Go/NoGo Testi	✓	✓	✓	✓	✓
Kurutma	✓	✓	✓	✓	✓
Tanecik Boyutlarını Belirleme	✓	✓	✓	✓	✓
Min Toz Konsantrasyonu	✓	✓	✓	✓	✓
Min Oksijen Konsantrasyonu	✓				
Patlama Enerjisinin Belirlenmesi	✓	✓	✓	✓	✓
P_{exp}	✓	✓	✓	✓	✓
dP/dt_{exp}	✓	✓	✓	✓	✓
dP_{max}	✓	✓	✓	✓	✓
dP/dt_{max}	✓	✓	✓	✓	✓
K_{st}	✓	✓	✓	✓	✓
Tanecik Boyutunun Patlamaya Etkisi	✓	✓	✓	✓	✓
Değişik Toz Konsantrasyonlarının Patlamaya Etkisi	✓	✓	✓	✓	✓
Kalorifik Değer	✓	✓	✓	✓	✓

5.1. Materyal

Havada veya gazda serbest olarak asılı kalan veya sürüklenen tozun yanma ve patlama karakteristikleri çoğunlukla laboratuvar şartlarında toz patlama cihazları ile saptanmaktadır. Ülkemizde toz patlama karakteristiğini belirlemek için gerekli olan ölçüm cihazları bulunmamaktadır. Bu çalışmanın birinci aşamasında toz taneciklerinin patlama karakteristiklerinin ve kalorifik değerinin belirlenmesi amacıyla kompakt bir cihaz geliştirilmiştir. İkinci aşamasında ise Soma kömürü (linyit), Rus kömürü (linyit), Güney Afrika kömürü (bitümlü), Kolombiya Çumra karışım kömürü (altbitümlü_linyit) ve Endonezya (Jembayan altbitümlü) kömürlerinden örnekler toplanmış, bu kömürler için toz patlama deneyleri yapılmış ve bu sonuçlar literatürdeki benzer özellikler taşıyan kömür tozlarının patlama parametreleri ile kıyaslanarak geliştirilen cihazın doğrulaması sağlanmıştır.

Patlama testlerinde ilk olarak numuneleri için Bölüm 2.5’de anlatıldığı gibi Go/NoGo testi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.2’ de Soma kömür tozu için yaptığımız Go/NoGo testinin sonuçları gösterilmektedir.

Çizelge 5.2. Soma Kömür Tozu Go/NoGo Testi

Deney No	Kömür Miktarı (gr)	Kömür Durumu (Nemli/Kuru)	Tane İriliği (mikron)	Saf Oksijen (bar)	Atmosfer Havası (bar)	Toplam Basınç (bar)	Başlangıç Basıncı (bar)	Max. Basınç (bar)	Fark (bar)	Pmax/P0 (bar)
80	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,25	2,48	1,23	1,98
81	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,27	2,5	1,23	1,97
87	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,26	3,11	1,85	2,47
88	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,47	3,73	2,26	2,54
89	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,33	2,69	1,36	2,02
90	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,43	2,92	1,49	2,04
91	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,36	3,02	1,66	2,22
93	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,5	2,98	1,48	1,99
94	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,28	2,26	0,98	1,77
99	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,43	3,31	1,88	2,31
100	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,3	3,05	1,75	2,35
101	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,29	3,18	1,89	2,47
102	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,33	3,02	1,69	2,27
105	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,39	3	1,61	2,16
107	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,39	2,47	1,08	1,78
108	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,23	2,86	1,63	2,33
109	0,2	nemli	Karışık	0,5	0,5	1	1,42	2,75	1,33	1,94

5.2. 1 Litre Patlama Küresi

Patlama testlerinde en sık kullanılan küreler 1,2 L Hartman deney tüpü, 20 L Siwek küresi, 20 L PRL ve 1 m³ Fike patlama haznesi olarak sıralamıştık. EN 14460'a göre, standart patlama kabı 1 m³ hacme sahip, en az 20 bar basınca dayanıklı, en boy oranı 1: 1 ±%10 olan küresel veya silindirik bir tanktır.

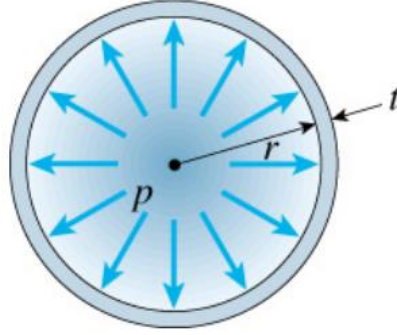
Bu çalışmada tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen patlama küresindeki temel amaç kullanımı kolay, az miktarda bir toz örneği ile test yapmaya müsait, hızlı sonuç verebilen ve kolayca taşınabilir bir patlama küresi geliştirmek ve bu sayede toz patlama riski taşıyan endüstrilerde tasarım ve işletim sırasında bu cihazların kullanımını yaygın hale getirmektir. Önceki çalışmalar ve standartlar incelendiğinde, küre veya silindirik şekiller içerisinde toz sıcaklıklarının daha homojen olarak dağılımı sağlanabilmektedir. Ayrıca küresel basınçlı tanklar yüksek iç basınca karşı silindir tanklara göre yaklaşık iki kat mukavemet özelliği gösteren tanklardır. Küresel basınçlı tanklar endüstride kullanım alanı çok geniştir. Bu sebeplerden dolayı cihaz AISI 304/316 paslanmaz çelikten 1 L içi boş kapalı bir küre olarak imal edilmiştir. Bu cihazın mühendislik hesaplarında en dikkat edilen parametre can güvenliği açısından kürenin toz patlama deneylerinde oluşacak basınca karşı dayanıklı olmasıdır. Bu yüzden EN 14460 (patlamaya dayanıklı ekipman) standardı tasarımda göz önünde bulundurulmuştur. Bu Avrupa Standardı, patlamaya dayanıklı ekipmanların iç patlamaya dayanabilecek ve çevreye tehlikeli etkilere yol açmayacak şekilde olmaları için gerekli özelliklerini belirler.

5.2.1. Toz Patlama Küresi Hesaplamaları

Küresel basınçlı tanklar büyük iç basınçlar karşısında yüksek sızdırmazlık ve mukavemet özelliği gösteren tanklardır. Bu tanklar endüstride birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Üretilcek tankların tasarımının amaca uygun olmasının yanısıra, analizinin doğru yapıpı emniyetli kullanım şartlarının sağlanması gerekmektedir.

Bunun sağlanması için tank üzerindeki yüklerin doğru belirlenerek testlerinin ve yapısal analizlerinin yapılması gerekir.

Küresel bir kaptaki gerilmeleri belirlemek için kürenin dikey çap düzlemi üzerindeki kesiti ve bu düzlem üzerindeki kuvvetler incelenir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Küre Kesiti

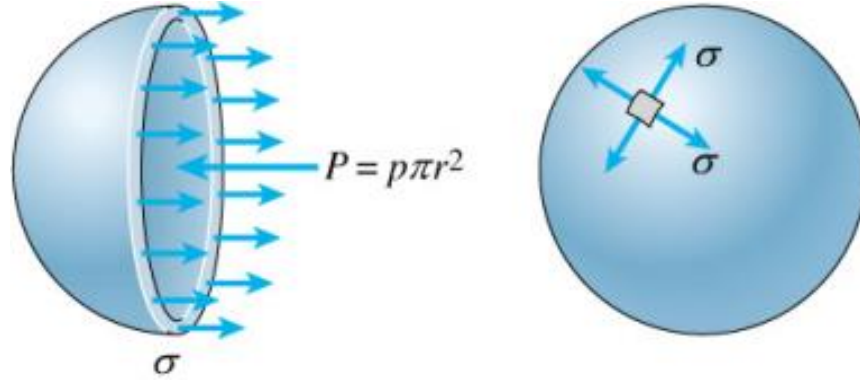
Yatay dairesel düzlem üzerindeki bileşke basınç, $P = p\pi r^2$, formülü ile tanımlanır. İç basınç, 'p', yarıçap, 'r', cidar kalınlığı, 'thck' ile tanımlanır. Gerilme, çevre boyunca düzenli dağılır ve 't' kalınlığı boyunca boyunca uniform olarak yayılır. Bileşke yatay kuvvet, $F_y = \sigma(2\pi r_m)$, formülü ile tanımlanır. Burada;

$$r_m = r + \frac{thck}{2} \text{ olarak tariflenir.}$$

Kuvvet dengesine göre eşitleme yapıldığında dayanım ve iç basınç ilişkisi,

$$\sigma(2\pi r_m).thck = p\pi r^2$$

$$\sigma = \frac{pr}{2.thck}, \text{ şeklinde ifade edilebilir (Şekil 5.2).}$$



Şekil 5.2. Küredeki Gerilimler

$$\begin{aligned}
 P_{\max} &= 20 \text{ bar} = 2 \text{ MPa} \\
 r &= 0,062 \text{ m} \\
 \text{thck} &= 0,01 \text{ m} \\
 \sigma &= 2 \text{ MPa} \times 0,062 \text{ m} / [2 \times 0,01 \text{ m}] = 6,2 \text{ MPa} \ll 215 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Yapılan dikey düzlemde kesme işlemi simetrik olduğu için, kürenin diğer yarısı içinde aynı denklemler kullanılabilir. Basıncı küresel tank her yönde uniform bir şekilde çekme gerilmelerine maruz kalmaktadır.

Küresel tank yüksek basınca maruz kalacağından, uygun malzeme seçimi fiyat ve güvenilirlik açısından önemlidir. Endüstriyel alanlarda kullanım alanının geniş olması, insan sağlığına zarar verebilecek olması, malzemenin güvenlik katsayısının da yüksek olmasını gerektirir. Seçilen malzemenin özellikleri Çizelge 5.3`de verilmiştir.

Çizelge 5.3. AISI 304L Malzeme Özellikleri

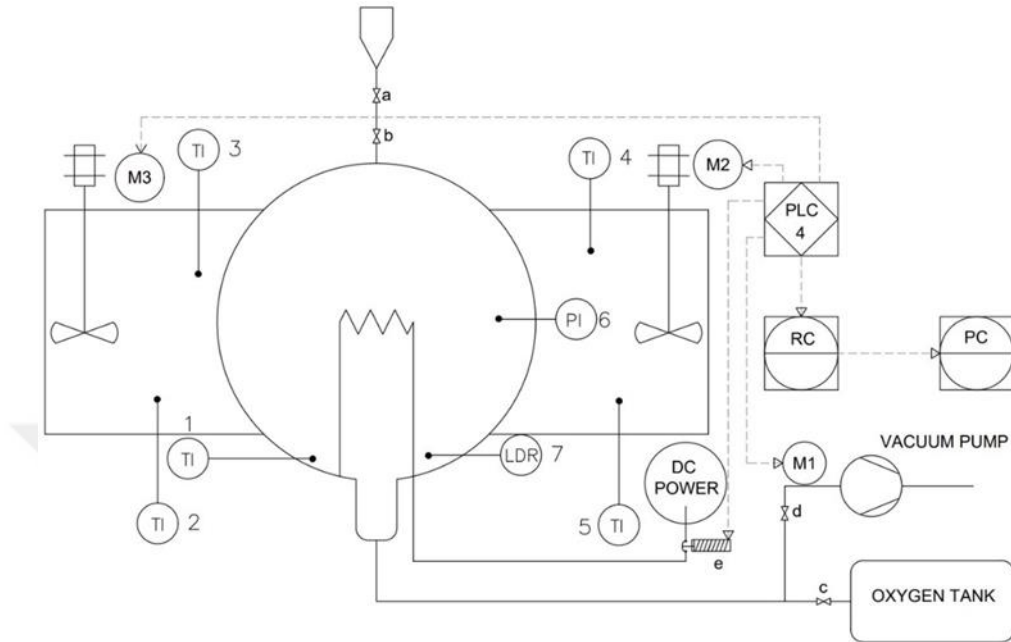
Kopma Mukavemeti (MPa)	Min. Akma Mukavemeti (MPa)	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)
505	215	7850 – 8060	193

Seçilen malzemenin özellikleri paslanmaz elik, SS316, malzemesinin kopma mukavemeti 505 MPa ve akma mukavemeti 215 MPa olarak verilmektedir. Tasarladığımız küre içerisinde oluşabilecek maksimum basınç 20 bar (2 MPa) olduğundan dolayı, küre içi patlamalardan dolayı ani basınç artmalarında küreye herhangi bir zarar verilmeyecektir.

Bilindiği gibi toz patlama deneylerindeki standartlara göre kürenin min 20 bar basına dayanması istenmektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi tasarımın basınç değerleri deney şartlarının çok üzerindedir ve küre için kullanılacak malzeme dayanımının istenilenden çok daha iyi olduğu görülmektedir.

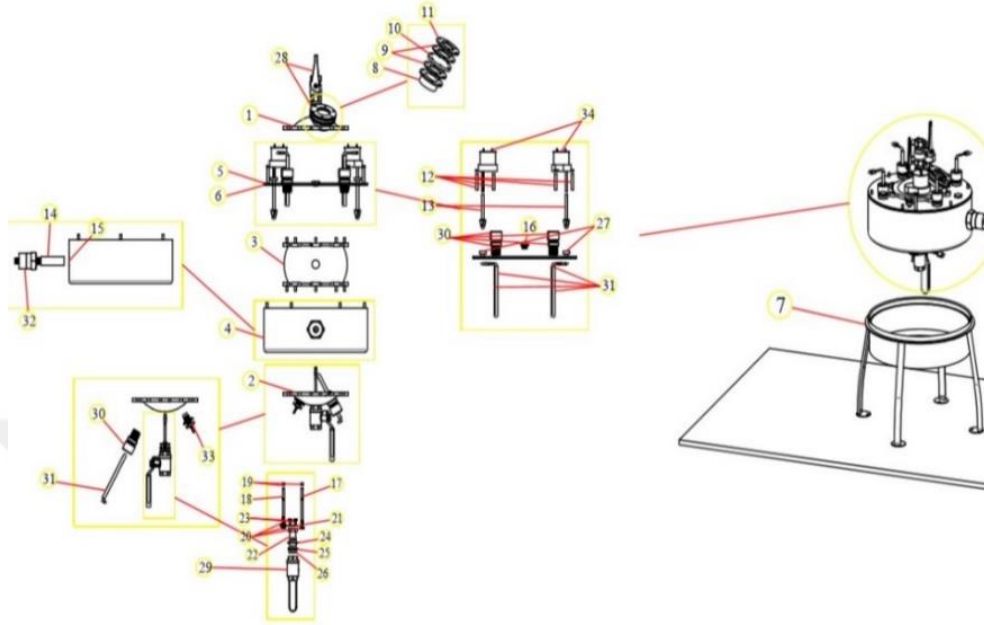
5.2.2. Deney Düzeneği

Bu hesaplamalar sonucunda 1 L’lik kürenin kalınlığının 10 mm olması durumunda hiçbir güvenlik tehlikesi bulunmadığına karar verilmiştir. Patlama küresi, EN 14460 uyarınca patlamaya dayanıklı bir küre olarak tasarlanmıştır. 1 L toz patlama küresi AISI 304/316 paslanmaz çelikten içi boş kapalı bir küre olarak imal edilmiştir. Sistem proses diagramı çizilerek sistem tasarım ve kontrolü çalışılmıştır (şekil 5.3).



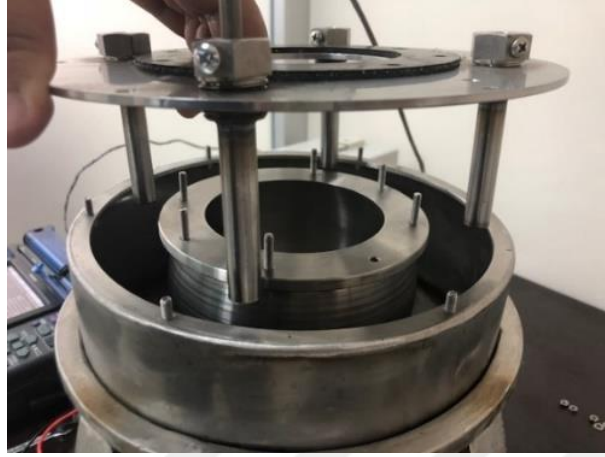
Şekil 5.3. 1 L Toz Patlama Küresi Proses Diagramı

AutoCAD ve SolidWork kullanılarak 1 L toz patlama küresinin tasarım ve imalat çizimleri yapılmıştır (Şekil 5.4). Sistem işletim diagramı çalışılmıştır. EN 14460 (patlamaya dayanıklı ekipman) standardı tasarımda göz önünde bulundurulmuştur.



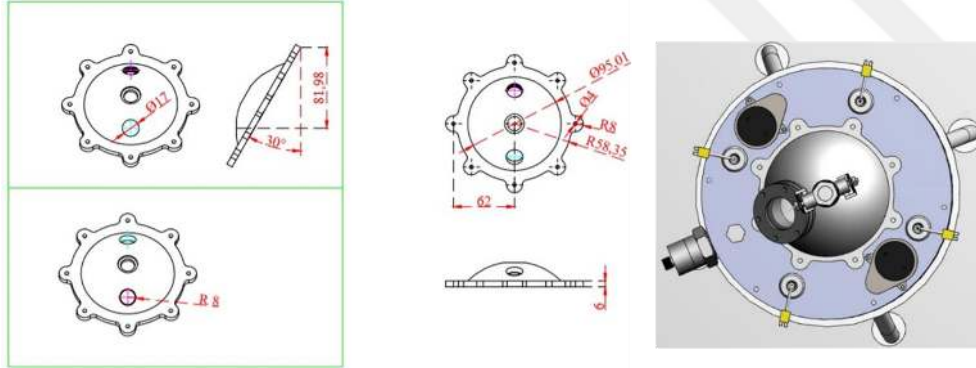
Şekil 5.4. 1 L Toz Patlama Küresi Parça Çizimleri

İçi boş olarak tasarlanan kürenin alt ve üstünde bulunan kapakları flanşlar ve civatalarla birleştirilmiştir (Şekil 5.5). Bunun sebebi kürenin içinde çalışma kolaylığı ve temizlik açısından rahatlık sağlamasıdır. Ayrıca birleşim noktalarındaki sızdırmazlıklar dikkatli bir şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 5.5. 1 L Toz Patlama Küresi Gövde Görüntüleri

Küre içerisinde meydana gelen patlamanın rahatlıkla izlenebilmesi amacı ile kürenin üst kısmında yer alan kapak üzerine plexiglas bir pencere yerleştirilmiştir (Şekil 5.6 ve Şekil 5.7).

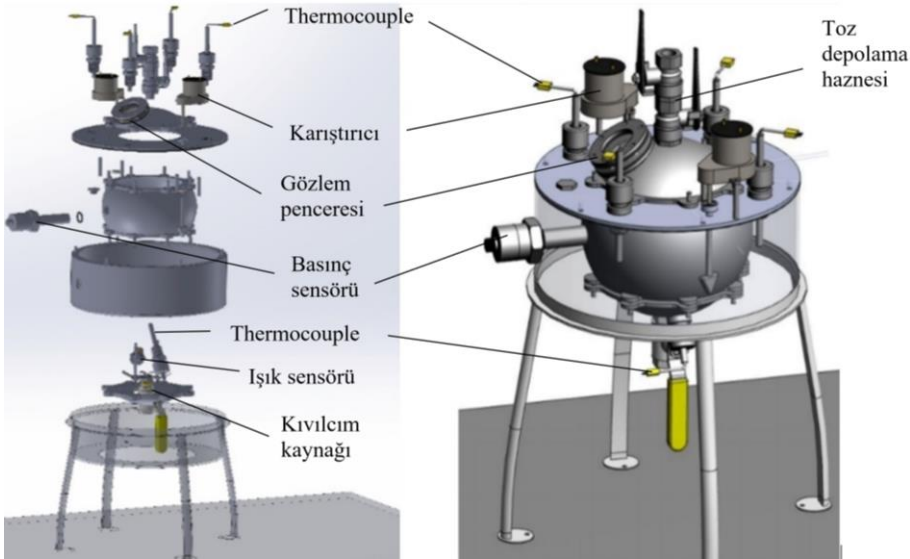


Şekil 5.6. Patlama Küresi Gözlem Penceresi Çizimler

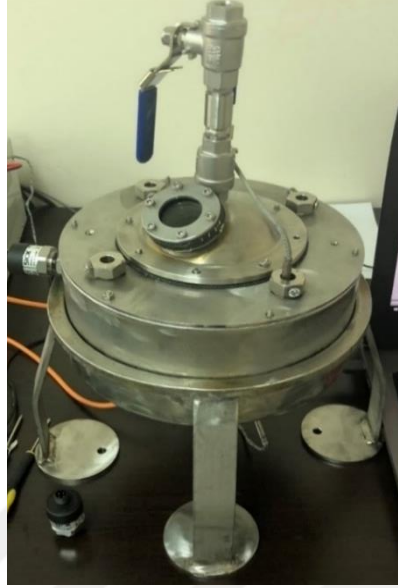


Şekil 5.7. Patlama Küresi Gözlem Penceresi ve Patlama Anı

Geliştirilen 1 L'lik toz patlama küresinin SolidWorks çizimi Şekil 5.8'de gösterilmektedir. Şekil 5.9' de 1 L'lik patlama küresinin fotoğrafı gösterilmektedir.



Şekil 5.8. Patlama Küresi SolidWork Çizimleri



Şekil 5.9. 1 L Toz Patlama Küresi

Testi yapılacak olan toz bu hazneye yerleştirilir ve hazneye belirli miktarda basınçlı hava sıkıştırılır. Bunun sebebi ise vana açıldığında tozların homojen bir şekilde püskürtülmesini sağlamaktır.

Küre içerisine test şartlarına göre oksijen eklemek için sistemde bir oksijen tüpü kullanılmaktadır. Küre içerisindeki ortam şartları deney parametrelerine göre basınçlı hava ve oksijen miktarları (Şekil 5.10 ve Şekil 5.11) ile ayarlanmaktadır.

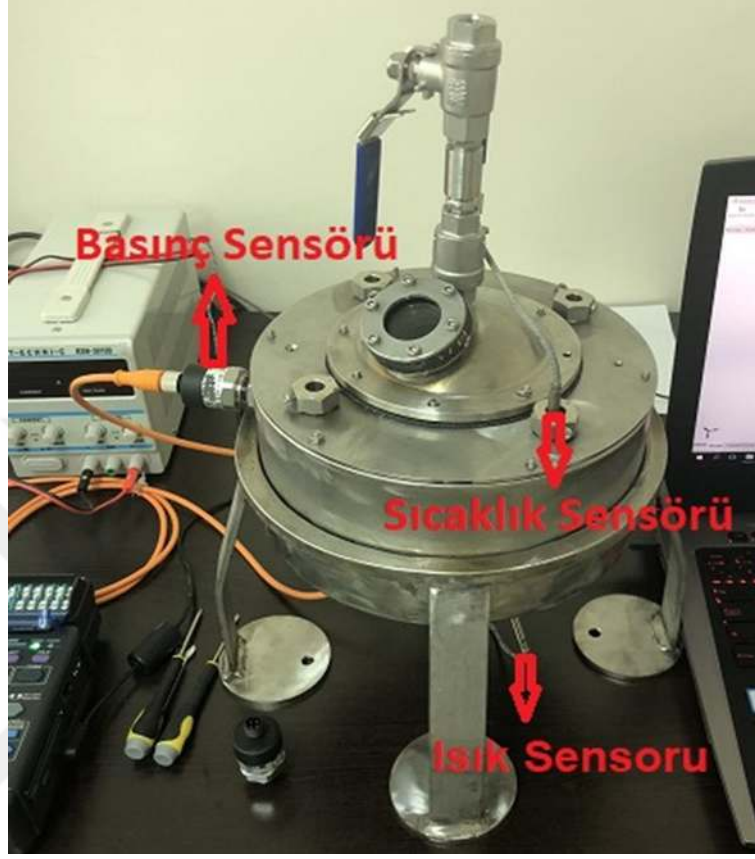


Şekil 5.10. Manometre



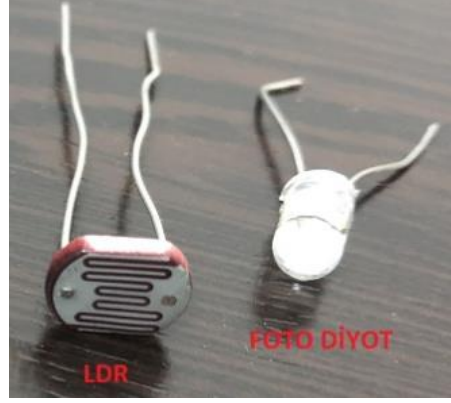
Şekil 5.11. Oksijen Tüpü ve Regülatör

Küre içerisindeki basınç küre üzerine yerleştirilen kafaları iç duvarla aynı hizada olan basınç sensörü aracılığı ile ölçülmektedir. 1 L'lik patlama küresinin etrafına küreyi saran bir bölme yaptırılmıştır (Şekil 5.12). Bu bölmeye saf su doldurulmaktadır ve suyun sıcaklık artışı thermocouple lar aracılığıyla ölçülmekte ve datalogger aracılığı ile veriler toplanmaktadır.



Şekil 5.12. 1 L Toz Patlama Küresindeki Basınç, Sıcaklık ve Işık Sensörleri

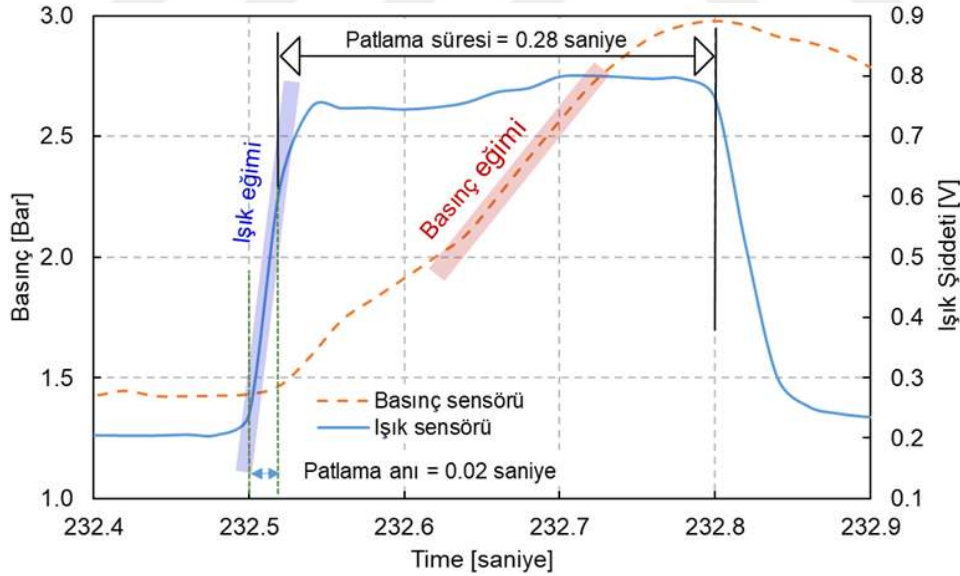
Ayrıca patlama anını yakalayabilmek için küreye bir tanede ışık sensörü yerleştirilmiştir. Bu şimdiye kadar ilk defa patlama kürelerinde denenen bir çalışma olmuştur. Buradaki amacımız ışık dalgası çok daha hızlı yayıldığı için bu sensörün patlama anını daha hızlı yakalayabilmesidir. Küre içerisinde meydana gelen patlamayı en hızlı şekilde yakalayabilmek için farklı ışık sensörleri test edilmiştir. Şekil 5.13’de bu çalışmadaki testlerde kullanılan iki adet ışık sensörü gösterilmektedir.



Şekil 5.13. 1 L Patlama Küresinde Kullanılan Değişik Işık Sensörleri

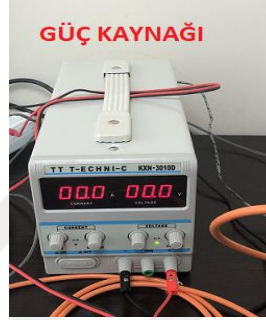
Bu çalışmanın özgün yanlarından birisi olan ışık sensörünün etkinliğini göstermek için bir patlama deneyinden elde edilen basınç ve ışık sensörü verileri Şekil 5.14’de gösterilmektedir. Bu şekilden de açıkça görüleceği gibi patlamanın olduğu anda ışık sensörü tepki vermiştir. Bu verilere göre ilk patlama anındaki ani yükseliş süresi 0,02 s olarak ölçülebilmektedir. Oysa, basınç sensörünün ilk tepkimesi ışık sensöründen 0,02 s sonra oluşmuş ve 0,28 s sonra maksimum yaparak düşüş eğilimine geçmiştir. Işık sensörü sinyallerinde ilk patlamanın olduğu an ve sonrasındaki hızlı yükseliş net olarak gözlemlenebilirken, basınç sensörü sinyallerinde bu durum ancak basınç artışıyla orantılı bir şekilde zamana yayılmış olarak gözlemlenmiştir. Dolayısı ile basınç sensörüne göre ilk kıvılcımın olduğu an yani patlama anı süresinin net olarak ölçülebilmesinin ancak ışık sensörü gibi yüksek tepkime zamanına sahip sensörler ile mümkün olabileceği Şekil 5.14’den açıkça görülebilmektedir. Şekil 5.14’de gösterilen durum için, ışık sensörü ilk patlamanın anı süresinin 0,02 s olduğu ve sonrasında ise patlamanın küre içerisinde 0,28 s’lik bir süre zarfında devam ettiğini göstermektedir. Oysa, basınç sensörü patlama anını ancak 0,02 s sonra algılamaya başlamış ve 0,28 s sonra maksimum basınç değerine ulaşmıştır. Bunun yanısıra küre içerisindeki patlama sonucu oluşan küre içi maksimum basınç değerinin basınç sensörü ile doğru olarak ölçüldüğü

düşünülmektedir. Bunun sebebi ise, patlama küresi içerisinde oluşan basıncın kümülatif olarak artması ve küre içerisinde oluşan maksimum basınçtaki değişimin ancak gaz sıcaklığının düşmesi ya da kürenin herhangi bir yerinde sızıntı durumunda olabileceğidir. Küreden dışarıya oluşabilecek ısı kayıplarının ihmal edilebilecek düzeyde olması ve kürenin mekaniksel olarak iyi yalıtılması yukardaki bahsedilen anlık ısı kayıplarının ihtimal dışı olduğunu kanıtlamaktadır. Geleneksel patlama kürelerinde K_{st} hesaplarındaki $(dP/dt)_{max}$ ifadesindeki her iki terim de basınç sensörlerinin sinyallerinden alınmaktadır. Bu çalışmada basınç farkının yine basınç sensöründen alınması fakat patlama zamanının küreye yerleştirilen ekstra bir ışık sensörü tarafından ölçülen sinyallerden alınması önerilmekte ve bu sayede K_{st} hesaplamalarında özellikle küre hacmi ve toz patlama konsantrasyonu göz önünde bulundurulduğunda daha doğru ve hassas sonuçlar alınabileceği Şekil 5.14'den anlaşılmaktadır.



Şekil 5.14. Işık ve Basınç Sensörlerinin Tepkime Zamanlarının Kıyaslanması

Ateşleme kaynağı ve gücü için Uluslararası Elektroteknik Komisyonu tarafından düzenlenmiş test düzeneği incelenmiş ve değişik güç kaynakları (Şekil 5.15) kullanılarak çok sayıda deneyler yapılmıştır. Buna göre güç kaynağı ve enerjisi ayarlanmıştır.



Şekil 5.15. Güç Kaynağı

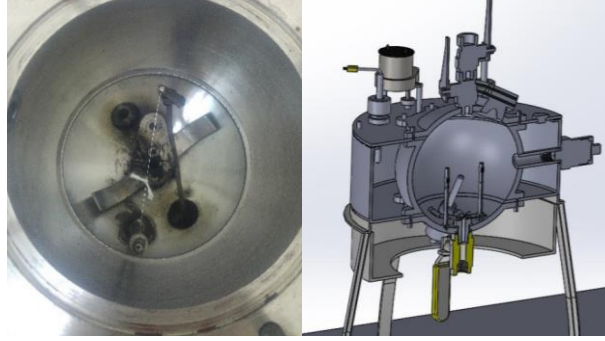
Kürenin tam merkezinde elektrikli bir ateşleme teli yerleştirilmiş (Şekil 5.16) ve bu tel bir güç kaynağına bağlanmıştır. Telin malzemesi ve şekline çok sayıda yapılan deneyler sonucunda karar verilmiştir. Patlama küresinde deneylerde kullanmaya karar verilen telin özellikleri aşağıdaki gibidir;

Telin Cinsi: Rezistans Teli (Alüminyum, Nikel ve Demir Karışımı)

Telin Çapı: 0,5 mm

Telin Direnci: 5,5 ohm/mt

Kullanılan Tel Uzunluğu: 400 mm



Şekil 5.16. Küre İçi Görüntü

Patlama küresinde gerçekleşen patlamalar çok kısa bir sürede gerçekleştiği için sistem verilerinin çok hızlı bir şekilde toplanıp kaydedilmesi gerekmektedir. Bu iş için sisteme HIOKI marka 50 Hz hızlı bir datalogger bağlanmıştır (Şekil 5.17). Patlama küresinde kullandığımız veri kayıt cihazı marka ve model bilgileri şu şekildedir;

Marka: HIOKI

Model: LR8402-20

Data Kayıt Aralığı: 0 ms

Deneylerde Kullandığımız Kayıt Aralığı: 20 ms

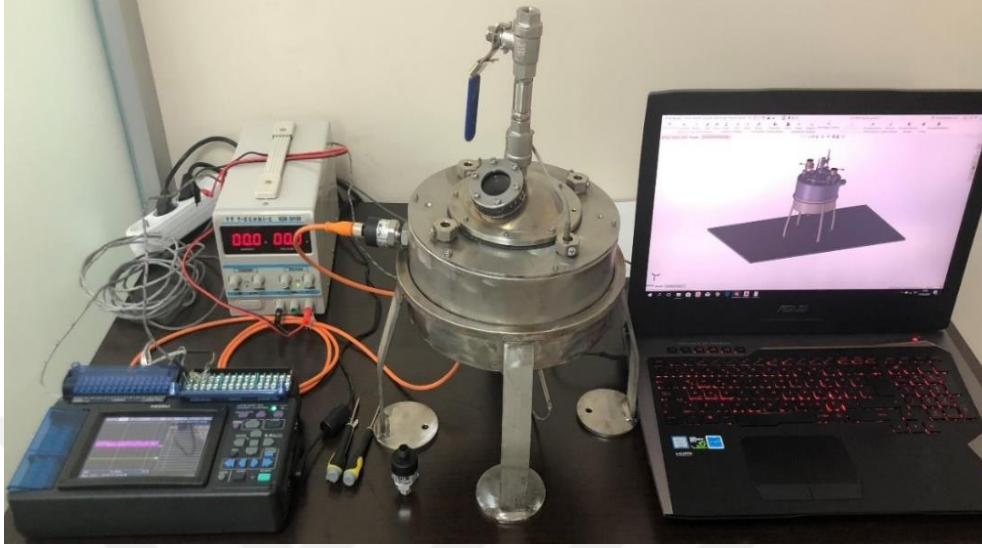


Şekil 5.17. HIOKI Datalogger

Sistemde ilk olarak datalogger kaydını başlatıp patlama öncesi küre içerisindeki ortam verileri alınmaya başlanır. Küre içerisinde patlama gerçekleştiği anda basınç sensörü, ışık sensörü ve sıcaklık sensörü verileri datalogger tarafından kayıt altına alınmakta ve bu kayıtların bir bilgisayar yardımıyla daha sonra analizleri yapılmaktadır. Toplanan bu verilerin analizleri sonucunda patlaması gerçekleştirilen toz için patlama parametreleri P_{max} , K_{st} , patlama konsantrasyonu alt sınırı, oksijen miktarı, nem, tanecik aralığı belirlenmektedir. Ayrıca bir gaz analizörüyle yanma/patlama sonucu oluşan gazların O_2 , CO , SO_2 , NO_x konsantrasyonları ölçülmektedir (Şekil 5.18).



Şekil 5.18. Gaz Analizörü



Şekil 5.19. 1 Litre Toz Patlama Küresi Deney Düzenegi

5.2.3. Malzeme

Toz patlama deneylerini gerçekleştirmek için tasarım ve imalatını yaptığımız toz patlama küresinde kullanılmak üzere Soma kömürü (linyit), Rus kömürü (linyit), Güney Afrika kömürü (bitümlü), Kolombiya Çumra karışım kömürü (altbitümlü-linyit) ve Endonezya (Jembayan altbitümlü) kömür numunelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiştir. Soma kömürü (linyit), Rus kömürü (linyit), Güney Afrika kömürü (bitümlü), Kolombiya Çumra karışım kömürü (altbitümlü_linyit) ve Endonezya (Jembayan altbitümlü) kömür toz numunelerinin analiz sonuçları Çizelge 5.4, Çizelge 5.5, Çizelge 5.6, Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8’de gösterilmektedir. Bu çizelgelerden de görüleceği gibi çalışmalarda kullanılan kömür nem, ısı değeri, kül ve uçucu madde gibi kömür özellikleri geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Test edilen kömürlerin nemi %6 ile %39 arasında, kül %4 ile %56 arasında, ısı değeri 1646 kcal/kg ile 6500 kcal/kg arasında ve uçucu madde %10 ile %37 arasında değişmektedir. Yapılan analizler ASTM standartlarına uygun olarak yapılmıştır.

Çizelge 5.4. Soma Kömür Tozu Numune Analizi

Elek boyutu	Mikron	250	125	90	45	0
Dağ	%	53,1	16,8	13,3	14,6	2,2
Nem	%	6,1	6,72	6,11	5,8	6,16
Kül	%	39	36,8	44,8	50,7	56,5
Uçucu	%	36,3	32,6	30,5	28,8	27,6
Sabit karbon	%	18,6	23,8	18,6	14,7	9,7
Alt ısııl değer	kcal/kg	2765	2999	2597	2130	1646
Hidrojen	%	3,01	2,87	2,64	2,35	2,1
Karbon	%	39,7	41,8	37,1	31,9	28,8
Kükürt	%	1,01	1,09	1,05	1,01	0,95

Çizelge 5.5. Rus Linyit Tozu Numune Analizi

Temel Analizler	Metod	Birim	Minimum	Maximum
Toplam Nem	ISO 589 (Met B2)	%	7	14
Kül	ISO 1171	%	8	25
Uçucu	ISO 562	%	10	35
Toplam Kükürt	ASTM D 4239	%	0,5	1,2
Alt ısııl değer	ISO 1928	Kcal/kg	4500	6500
Sabit karbon	ASTM D 3172	%	45	55
HGI	ISO 5074	%	30	60

Çizelge 5.6. Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Numune Analizi

Temel Analizler	Unit	Orjinal	Kuru	Havada kuruma	Standarts
Toplam Nem	%	38,37	-	-	ASTM D2013
Havada Kuruma	%	-	-	29,09	ASTM D7582
Kül	%	0	0	0	ASTM D7582
Uçucu Madde	%	28	37	35	ASTM D7582
Kalorifik Değer	kcal/kg	3846	6240	4425	ASTM D 5865

Elemental Analizler					
Toplam Karbon	%	38,94	63,18	44,8	ASTM D 5373
Kükürt	%	1,96	3,19	2,26	ASTM D 4239
Hidrojen	%	7,33	4,52	5,4	ASTM D 5373
Azot	%	0,35	0,56	0,4	ASTM D 5373

Çizelge 5.7. Kolombiya Çumra (altbitümlü-linyit) Kömür Tozu Numune Analizi

Analizler	Unit	Hava	Kuru	Orjinal	Standarts
Toplam Rutubet	%	-	-	16,11	ASTM D3302/D3302M
Bünye Rutubeti	%	3,17	-	-	ASTM D3173/D3173M
Kül	%	24,51	25,31	21,24	ASTM D3174
Uçucu Madde	%	29,71	30,69	25,74	ASTM D3175
Üst Kalori Değeri	kcal/kg	5551	5732	4809	ASTM D D5865/TS ISO 1928
Alt Kalori Değeri	kcal/kg	5344	5537	4556	TS ISO 1928
Toplam Kükürt	%	1,35	1,39	1,17	ASTM D4239
Toplam Karbon	%	55,31	57,12	47,92	ASTM D5373
CO2 Emisyon Faktörü	tCO2/Tj	90,58	90,28	92,04	ÇSB-Sera Gazı Emisyonları Tebliğ

Çizelge 5.8. Endonezya-Jembayan Altbitümlü Kömür Tozu Numune Analizi

Orjinal	
Karbon	54,35
Hidrojen	3,7
Kükürt	0,22
Azot	0,96
Oksijen	14,81
Kül	4,96
Nem	21
Toplam	100

Havada Kurutma	
Sabit Karbon	41,99
Uçucu Madde	37,49
Kül	5,30
Nem	15,50
Toplam	100
Alt Isıl Değer (kcal/kg)	5250

1 kcal/kg=1,7987 Btu/lb

9450 Btu/lb = 5253,8 kcal/kg

Deneylere başlamadan önce kömür numuneleri bir öğütücü tarafından öğütülerek sarsak elek (Şekil 5.20) yardımıyla tanecik boyutlarına göre ayrımı yapılmıştır. Tanecik Aralığı (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron boyutlu eleklerden geçirilerek guplandırılmışlardır.



Şekil 5.20. Sarsak Elek

Tanecik boyutlarına ayrılan ve ortalama nem oranı %30 civarı olan kömür numuneleri etüv içerisinde ortam sıcaklığı 50 ile 90 °C arasında yaklaşık 2 saat kurutularak kısmi nemi %4 civarına düşürülmektedir. Ayrıca tane iriliğine bağlı olarak kömür taneciklerinin nem oranları da farklı olabilmektedir. Yapılan deneylere ait bir kömür nem kurutma analizi Çizelge 5.9 ve Çizelge 5.10'de örnek olarak gösterilmektedir. Bu örnekte Soma kömür tozu yaklaşık iki saat 90 °C de kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Kömür tozu deney numuneleri EN-14034-3 standardı dikkate alınarak hazırlanmıştır. Genel bir test felsefesi olarak en mükemmel test yöntemleri ve teorileri kullanılsa dahi temsili olarak seçilen test örneğinin doğru seçimi testin sonucu üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Dolayısı ile tozun kimyasal ve fiziksel özellikleri test sonuçları üzerinde büyük etki

yapmaktadır. Parçacık Aralığı, şekil, gözeneklilik ve nem gibi fiziksel özelliklere bağlı olarak aynı kimyasal maddenin farklı tozları farklı tutuşabilirlik ve patlayıcılık özelliğine sahip olabilir.

Çizelge 5.9. Soma Kömür Tozu Kısmi Nem Alma İşlemi

Tarih	Sıcaklık	Süre	Başlama	Bitiş
05/09/2019	90 °C	120 dk	08:35	10:35

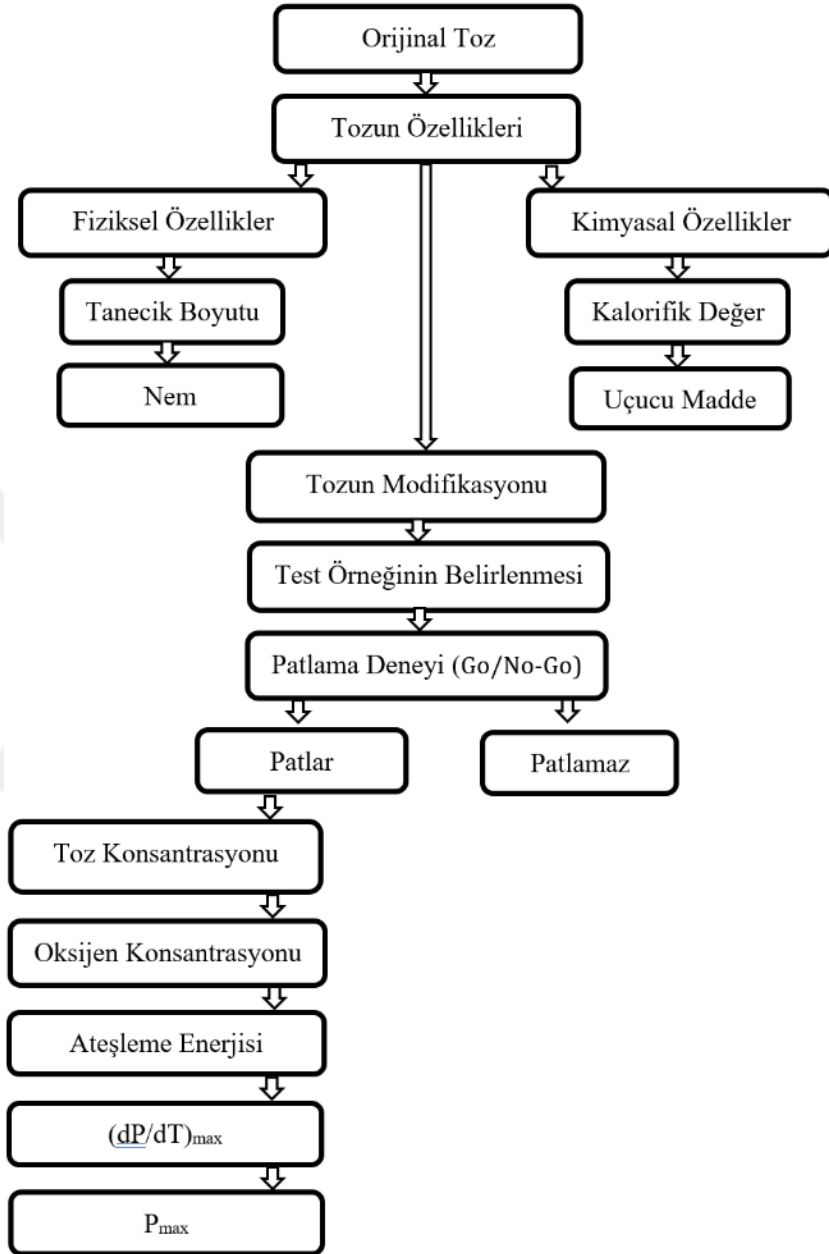
Çizelge 5.10. Soma Kömür Tozu Kısmi Nem Analizi

Patlama Küresi Yakıt Numune Kısmi Nem Analizi								
		Kurutma Öncesi			Kurutma Sonrası			
Kroze	Açıklama	1.Tartım	1.Dara	1.Fark	2.Tartım	2.Dara	2.Fark	Nem
No		(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	%
1	- 45 mikron	10,187	9,158	1,029	10,146	9,158	0,988	3,98
2	+ 45 - 90 mikron	10,944	9,158	1,786	10,872	9,158	1,714	4,03
6	+90-125 mikron	10,331	9,158	1,173	10,283	9,158	1,125	4,09
7	+125-212 mikron	10,588	9,158	1,430	10,526	9,158	1,368	4,34

5.3. Metod

Bölüm 2.5’de anlatılan Go/NoGo testi sonucunda patlama riski taşıdığına karar verilen toz numunelerinin sarsak elek kullanılarak tanecik boyutlarına göre ayrımı yapılır. Deneyler için (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron tanecik boyutlarına ayrılan kömür tozlarının etüv içerisinde düşük sıcaklıkta kömür nemi kısmi olacak şekilde kurutulur. Kömür tozları küre üzerinde bulunan toz toplama haznesine yapılacak olan deney parametrelerine göre gram miktar yerleştirilir ve küre etrafını saran hazneye saf su doldurulur. Deney parametreleri doğrultusunda küre içerisindeki ortam şartları basınçlı hava ve oksijen miktarları ile ayarlanır. Sistemde ilk olarak datalogger kaydını başlatıp patlama öncesi küre içerisindeki ortam verileri alınıp sistem patlamaya hazır hale getirilmektedir (P_0 , T_0). Kürenin tam merkezinde bulunan elektrikli ateşleme teline enerji verilmesi ile

beraber toz toplama haznesinin vanası açılarak toz küre içerisine püskürtülmektedir. Küre içerisinde belirli bir enerji ile patlama gerçekleşir. Küre içerisindeki ateşleme teline verilen enerji ortalama 3000-5000 J arasında değişmektedir. Bu miktara kömürün özelliklerine göre karar verilmektedir. Patlama gerçekleştiği anda basınç sensörü, ışık sensörü ve sıcaklık sensörü verileri datalogger tarafından toplanmakta daha sonrada bu veriler bir bilgisayara aktararak analiz edilmektedir. Patlayabilir tozlar için toz patlamasındaki en önemli parametreler olan P_{max} , $(dP/dt)_{max}$ ve bunlardan yararlanılarak K_{st} çalışılmaktadır. Yapılan çalışmalarda kömür tane iriliği, nemi, toz konsantrasyonu, ortamın oksijen değeri gibi parametreler patlama riskinin değerlendirilmesi açısından önemli parametreler olarak gözlemlenmiş ve bütün bu parametrelerinin değişik kombinasyonları çalışılmıştır. Her kombinasyonun 3 er kere tekrarı yapılmış ve hatalı görülen deneyler tekrarlanmak şartıyla düzeltilmiştir. Toplam 500+ deney yapılmıştır. Bu testler ASTM 1226 ve EN 14034 standartları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.21 yukarda anlatılan akış şeması göstermektedir.



Şekil 5.21. Patlama Küresi Akış Şeması

6. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada, Bilirgen F. (2019) tarafından test edilen kömür tozlarına ilave olarak Kolombiya_Çumra kömür toz karışımı ve Güney Afrika kömürleri için ışık sensörü sinyallerinden faydalanılarak zaman farkı, dt, belirlenmiş Kst hesaplanmıştır. Bu çalışmada ışık sensörü sinyalleri detaylı olarak incelenerek patlama anı ve patlama süreleri tespit edilmiştir.

Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği (Ürünveren, A., ve Ural, S., 2017) tarafından üç değişik numune için yurtdışında yaptırılan toz patlama deney sonuçları bu çalışmada geliştirilen toz patlama küresinin sonuçları ile kıyaslanarak 1 L toz patlama küresinin doğrulaması sağlanmıştır.

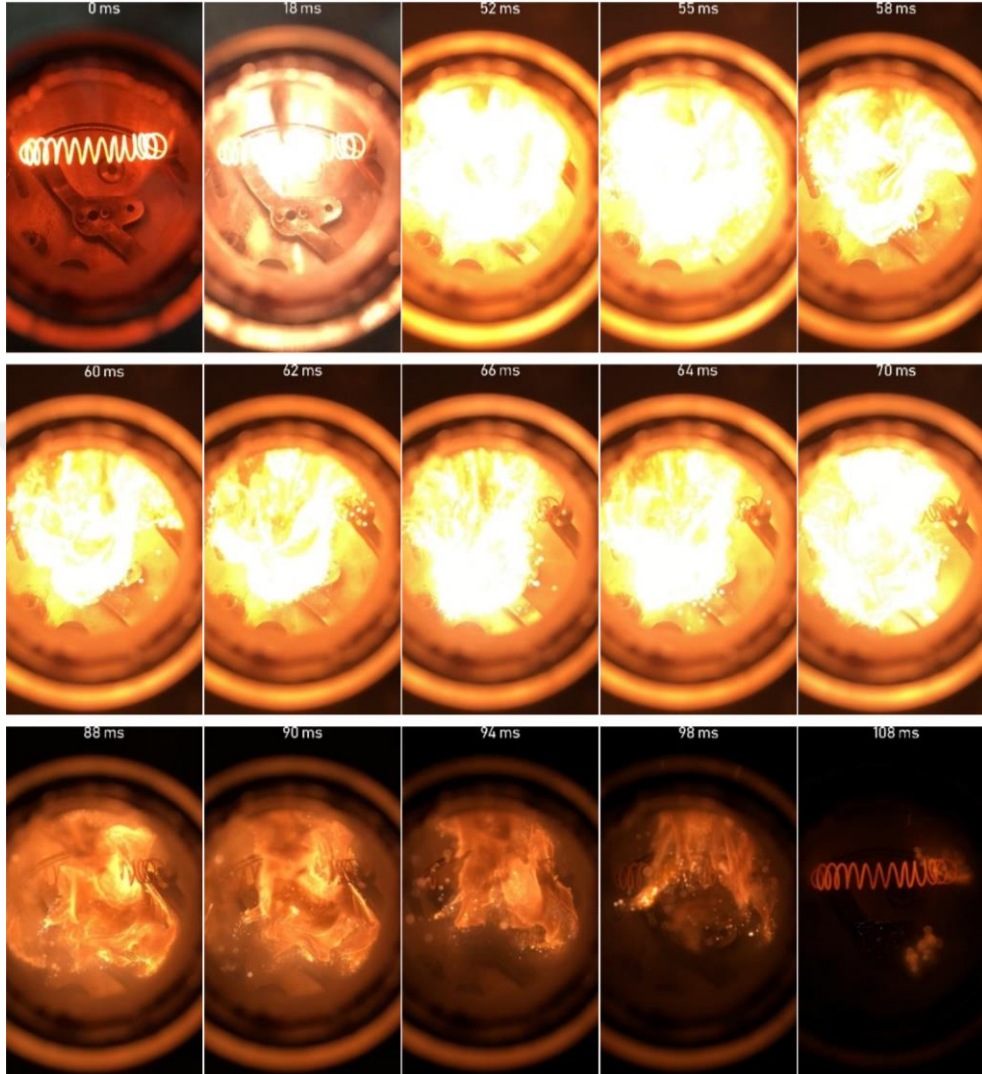
Bilirgen F. (2019) tarafından yapılan çalışmaya ilave olarak bu çalışmada, 1 L'lik toz patlama küresine eklenen ışık sensörü değişik tozlar ve değişik deney parametreleri ile test edilmiştir. Bu deneylerin sonucunda elde edilen verilerin analizleri yapılmıştır. Bu sonuçlar toz patlamaları deneylerinde standart olarak kabul edilen 20 L'lik Siwek küresi sonuçları ile kıyaslanmıştır. İki verinin kıyaslanması sonrasında aralarında lineer bir ilişki olduğu görülmüştür. Böylece tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen 1 L'lik toz patlama küresinin doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Dolayısı ile basınç sensörüne kıyasla patlama anı süresinin net olarak tesbiti ışık sensörü gibi yüksek tepkime zamanına sahip sensörler ile daha doğru saptanabileceği görülmüştür. Bu sebepten ilk andaki patlamayı algılayabilen bir sensör patlama küresi içerisindeki olayların daha iyi anlaşılması ve buna paralel olarak patlama indeksinin (K_{st}) daha hassas olarak hesaplanmasında literatür ve endüstriyel uygulamalara büyük katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmaların sonucu olarak, elde edilen katsayı kullanılarak 1 L'lik toz patlama küresinin endüstride pratik uygulamalarda kullanılabileceği tavsiye edilmiştir.

6.1. Soma Kömür Tozu Patlama Deneyleri

Soma linyiti toz patlama deneyleri için ilk aşamada test örneğinin patlayıp patlamadığı incelenmiştir. Bunun içinde orjinal halde tanecik boyutlarına ayrılmadan, nemli olarak Go/NoGo testine tabi tutularak patlayıp patlamadığı test edilmiştir (Çizelge 5.2). Soma kömür toz numunelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiştir (Çizelge 5.4). Patlama riski taşıdığına karar verilen bu kömür tozu için (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron tanecik boyutlarına ayrılarak etüv içerisinde düşük sıcaklıkta kömür nemi kısmi olarak kurutulmuştur. Nemi alınmış kömür tozları küre üzerinde bulunan toz toplama haznesine deney parametrelerine göre belirlenen gram tutarında yerleştirilmiştir. Küre etrafını saran hazneye saf su doldurulmuştur. Deney parametreleri doğrultusunda küre içerisindeki ortam şartları basınçlı hava ve oksijen miktarları ile ayarlanmıştır. Küre içerisinde belirli bir enerji ile toz patlaması gerçekleştirilmiştir. Sistemde değişik parametreler kullanılarak 250+ deney serisi oluşturulmuş ve elde edilen verilerin analizleri yapılmıştır. Soma linyit kömürü için patlama parametreleri P_{max} , $(dP/dt)_{max}$ ve toz patlama indeksi K_{st} hesaplanmıştır.

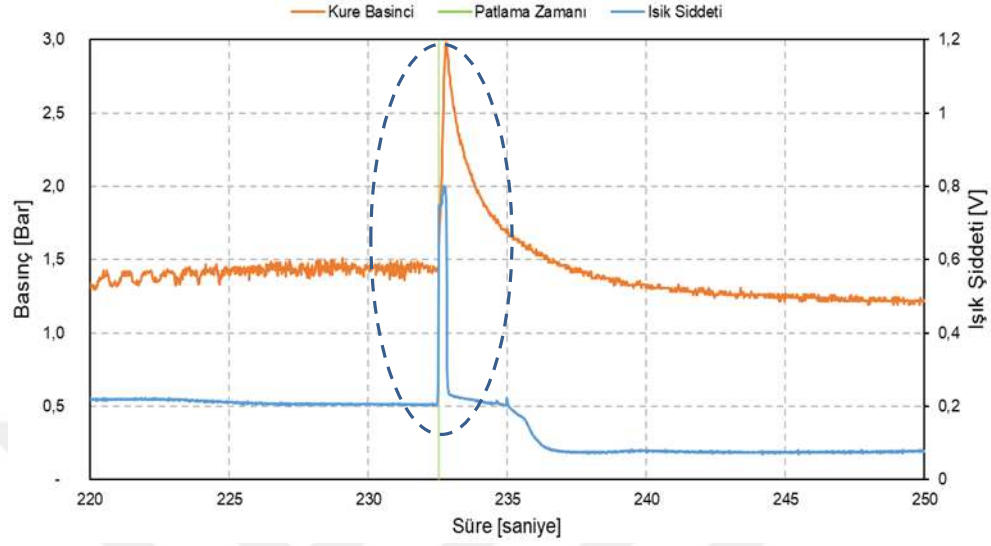
Soma kömürü için değişik parametreler kullanılarak 250+ deney serisi oluşturulmuş ve elde edilen verilerin analizleri yapılmıştır. Küre içerisinde patlama gerçekleştiği zaman basınç sensörü, ışık sensörü ve sıcaklık sensörü verileri datalogger tarafından kayıt altına alınmış ve bir bilgisayara aktararak grafikleri elde edilmiştir. 5. Bölümde anlatıldığı gibi ışık sensörü basınç sensörüne göre patlamayı çok daha hızlı algılama özelliğine sahiptir.

0,250 g/L toz konsantrasyonu, (+)90 (-)125 mikron tane aralığı ve 3928 Joule kıvılcım enerjisi kullanılarak gerçekleştirilen patlama deneylerinin gözlemleme penceresinden alınan görüntüleri kameraya çekilerek bu görüntülerin bir kısmı Şekil 6.1’de gösterilmektedir.



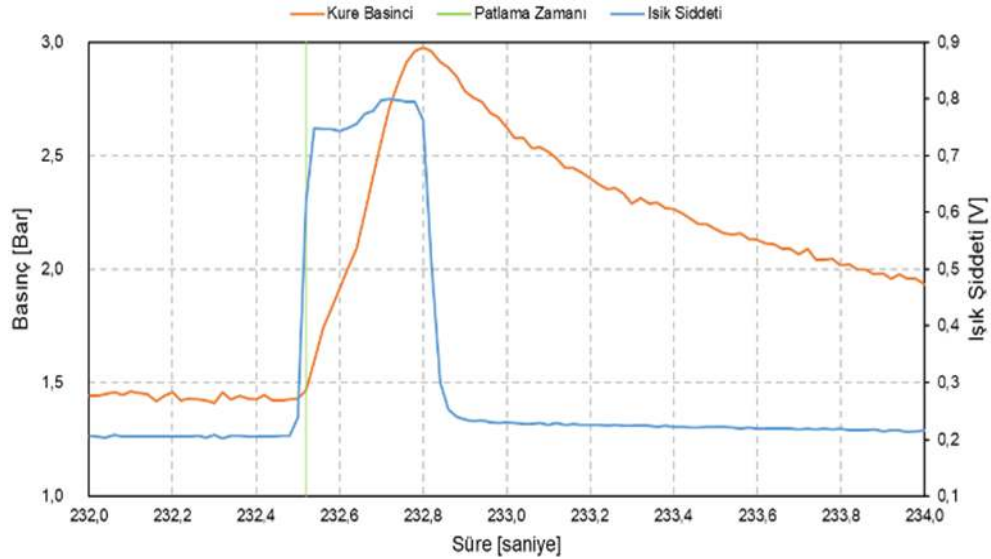
Şekil 6.1. 0,250 g/L, (+)90 (-)125 Mikron Soma Kömür Tozu Patlama Görüntüleri

Şekil 6.2 Soma kömürü için 1 L'lik toz patlama küresinde elde edilen, patlama öncesi ve sonrası basınç ve ışık şiddetinin zaman serisini göstermektedir. Patlama anındaki 'dt' teriminin belirlenmesinde ışık sensörünün verileri kullanılmıştır. Bu ilk defa toz patlama kürelerinde denenen bir çalışmadır.



Şekil 6.2. Patlama Anı Basınç ve Işık Sensörü Verileri

Basınç ve ışık sensörlerinin patlama anını tespit hususundaki hassasiyetlerini anlayabilmek için, Şekil 6.3'te patlama anı Şekil 6.2'de büyütülmüş olarak gösterilmektedir.



Şekil 6.3. Patlama Anı Basınç ve Işık Sensörü Verileri – Büyütülmüş

Patlama konsantrasyonunun alt sınırını (LEL) belirleyebilmek amacı ile Soma kömür tozu deney numuneleri EN-14034-3 standardı dikkate alınarak hazırlanmıştır.

Tanecik aralığı ve nem miktarı toz patlama konsantrasyonunun alt sınırını belirleyen önemli parametrelerden olduğu için öncelikli olarak kömür toz numuneleri sarsak eleklerden geçirilerek (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron olacak şekilde tanecik boyutlarına ayrılmıştır. Tanecik boyutlarına ayrılan kömür tozlarının etüv içerisinde düşük sıcaklıkta kömür nemi kısmi olarak alınmıştır (Çizelge 5.9 ve Çizelge 5.10). Normal atmosferik şartlar altında ve ortalama 3900 J ateşleme enerjisi kullanarak 1 L toz patlama küresinde deneyler başlatılmıştır. Bu kömür toz numunesi için (+)45 (-)90 ve (+)90 (-)125 mikron tanecik aralığı en yüksek P_{max} değerini vermiştir. Bunun yanı sıra kalorifik değer sonuçları da göz önünde bulundurulduğunda toz patlama konsantrasyonunun belirlenmesi için yapılan deneylere (+)90 (-)125 tanecik aralığında devam edilmiştir. Deneyler 1 g/L ile başlayarak 1, 0,5, 0,250, 0,125, 0,0625 g/L olmak üzere değişik toz konsantrasyonlarında tekrarlanmıştır. Bu tekrarlar, toz patlamasının gerçekleşmediği minimum limitteki toz konsantrasyon değerine ulaşıncaya kadar devam etmiştir. Testler, Çizelge 6.1’de gösterildiği gibi, herbir toz konsantrasyonu için 3 defa tekrarlanmıştır. Toplanan veriler yardımıyla toz konsantrasyonuna göre değişen P_{max} , $(dP/dt)_{max}$ ve K_{st} hesaplanmıştır.

Çizelge 6.1. (+)90 (-)125 Mikron Soma Kömür Tozu Değişik Konsantrasyonlarda Patlama Parametreleri

Kömür konsantrasyonu (g/L)	Test Tekrarları	Patlama Parametreleri		
		P _{max} (bar)	dt (s)	dP/dt (bar/s)
0,0625	1	1,82	0,30	6,067
	2	1,39	0,36	3,861
	3	1,10	0,32	3,438
0,125	1	2,20	0,34	6,471
	2	2,13	0,36	5,917
	3	2,36	0,36	6,556
0,250	1	2,333	0,336	6,943
	2	2,610	0,406	6,429
	3	2,990	0,48	6,229
0,500	1	3,17	0,48	6,604
	2	2,50	0,41	6,098
	3	3,00	0,46	6,522
1,000	1	3,78	0,60	6,300
	2	2,50	0,51	4,902
	3	2,00	0,30	6,667

Soma kömür tozu için K_{st} değeri hesaplamada en yüksek P_{max} ve $(dP/dt)_{max}$ değerlerini elde ettiğimiz (+)90 (-)125 mikron tanecik aralığı seçilmiştir. Bu hesaplamalar maksimum toz patlama basıncı (EN-14034-1) ve maksimum toz patlama basınç hızı (EN-14034-2) standartlarında belirtildiği gibi yapılmıştır.

Çizelge 6.1’de görüldüğü gibi (+)90 (-)125 mikron tanecik aralığında değişik toz konsantrasyonları için 3 farklı deney serisindeki P_{max} , $(dP/dt)_{max}$ nin en yüksek değerleri seçilerek ortalamaları alınmış ve bunlardan yararlanılarak K_{st} hesaplanmıştır. Hesaplanan patlama indeksi, K_{st} , aşağıda özetlenmiştir;

$$K_{st} = (dP/dt)_{max} \cdot V^{1/3} \quad (4)$$

$$P_{\max} = P_{\max(\text{seri1})} + P_{\max(\text{seri2})} + P_{\max(\text{seri3})} / 3 \quad (5)$$

$$P_{\max} = (3,78 + 2,61 + 3) / 3$$

$$P_{\max} = 3,13 \text{ bar}$$

$$(dP/dt)_{\max} = (dP/dt)_{\max(\text{seri1})} + (dP/dt)_{\max(\text{seri2})} + (dP/dt)_{\max(\text{seri3})} / 3 \quad (6)$$

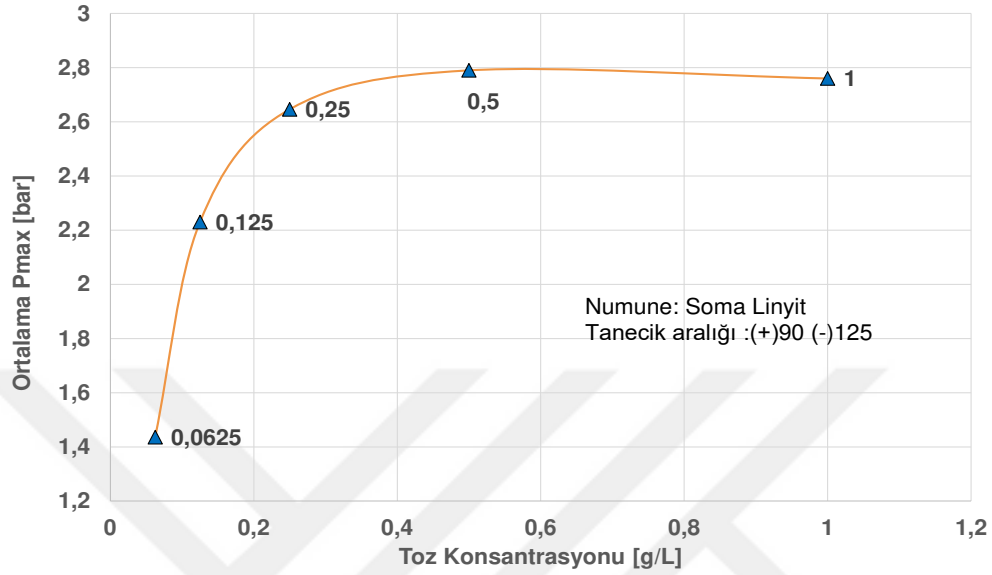
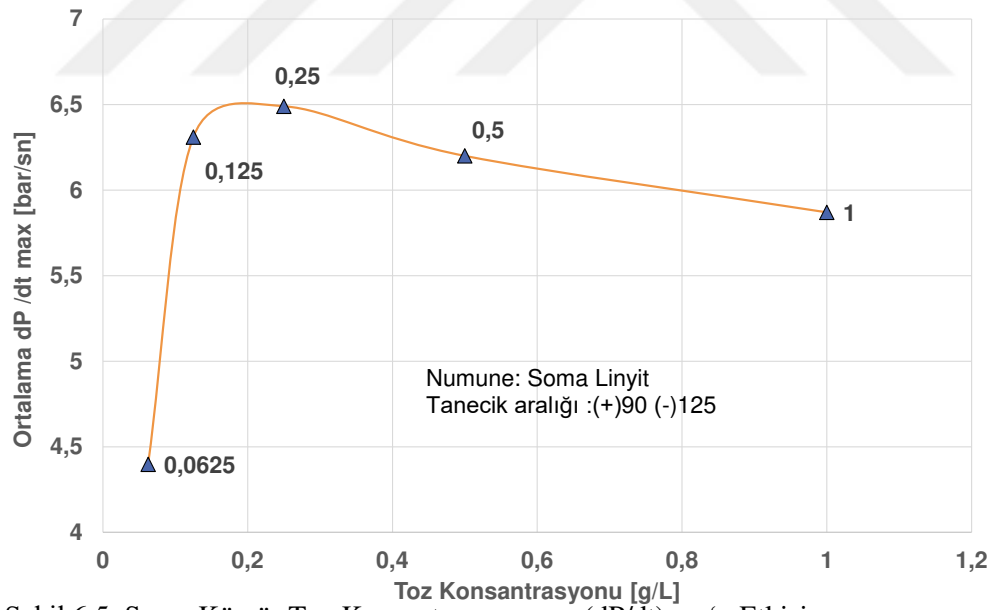
$$(dP/dt)_{\max} = (6,94 + 6,42 + 6,66) / 3$$

$$(dP/dt)_{\max} = 6,679 \text{ bar/sn}$$

$$V = 0,001 \text{ m}^3$$

$$K_{st} = 0,667 \text{ bar m/sn}$$

Şekil 6.4'te (+)90 (-)125 mikron tanecik aralığında Soma kömür tozu için toz konsantrasyonunun artkça $P_{\max}$ yükselmiştir. Bilindiği gibi toz konsantrasyonu artkça patlama basıncı ve toz patlama hızı belirli bir konsantrasyona kadar artıp daha sonra düşmeye başlamaktadır (Şekil 3.9). ASTM: E 1226 da anlatılan 20 L patlama küresi için tipik bir toz patlamasında toz konsantrasyonu patlama hızı değişimi Şekil 6.4'te gösterilen gafiği tamamen destekler durumdadır. Şekil 6.5'de patlama hızı 0,125 ve 0,250 g/L'da en yüksek seviyeye ulaşmıştır daha sonra konsantrasyon artmış fakat patlama hızı azalmıştır.

Şekil 6.4. Soma Kömür Toz Konsantrasyonunun $P_{\max}$ 'a EtkisiŞekil 6.5. Soma Kömür Toz Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{\max}$ 'a Etkisi

Bilindiği gibi toz ve gaz patlamalarında oksijen oranı etkili bir faktördür. Endüstriyel uygulamalarda, oksijen konsantrasyonunu düşürmek ve bu sayede patlama riskini azaltmak için ortama inert gazlar enjekte edilmektedir.

Minimum Oksijen Konsantrasyonunun (LOC) toz patlamaları üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla EN-14034-4 standartlarına uygun olarak Soma kömür tozu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylere (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron olacak şekilde kömür tozu sarsak elek yardımıyla tanecik boyutlarına ayrılmış ve etüvde nemi kısmi olarak alınmıştır.

Deneyin 1. kısmında 0,125 g/L kömür tozu konsantrasyonu için (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron tanecik aralıklarındaki testler 1,0, 0,75, 0,5, 0,25, 0 oksijen oranları için gerçekleştirilmiştir.

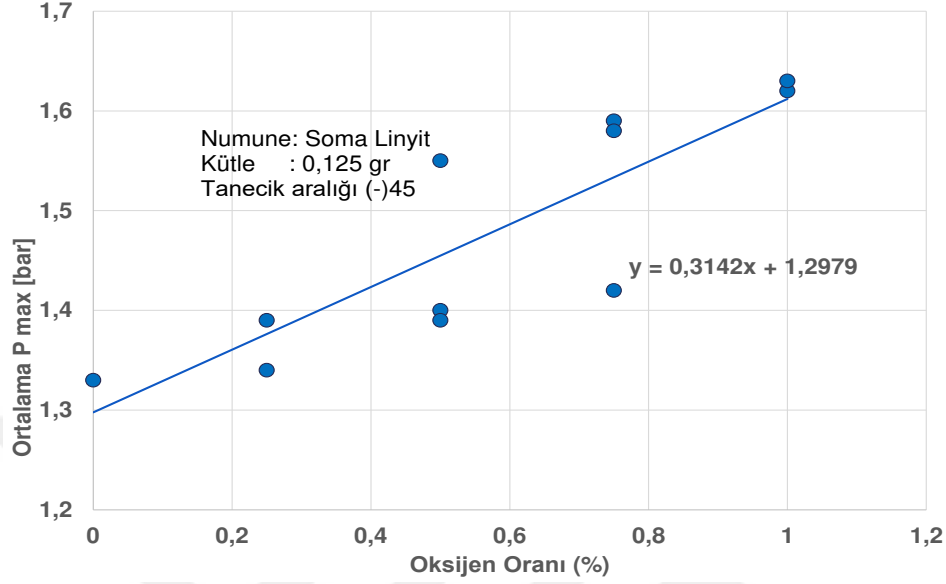
Çizelge 6.2’de 0,125 g/L toz konsantrasyonuna sahip Soma kömür tozu için farklı oksijen konsantrasyonlarında gerçekleştirilen patlama deney sonuçları gösterilmektedir. Bu testler dört farklı toz tanecik aralığı için yapılmıştır.

Çizelge 6.2. 0,125 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarında Oksijen Konsantrasyonu ve Patlama Parametreleri

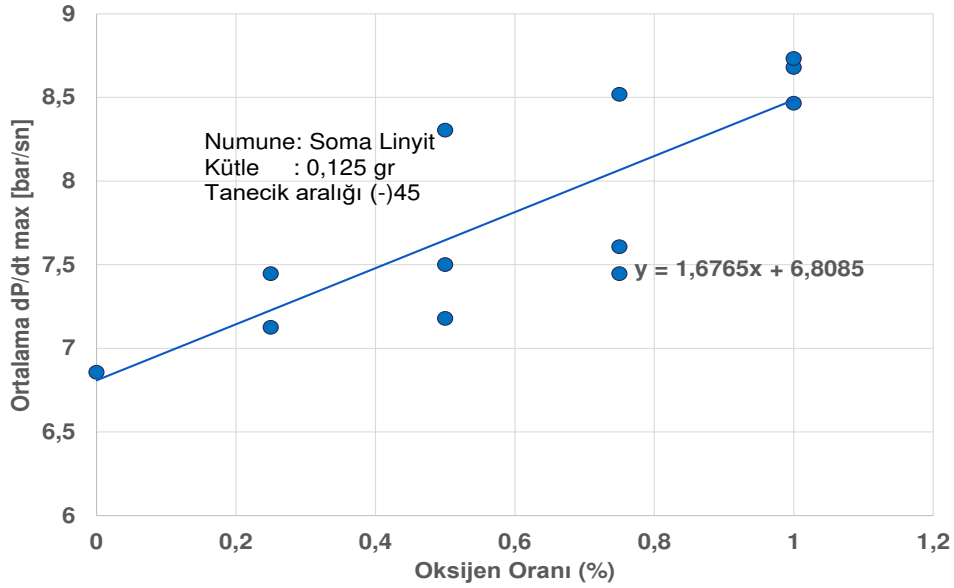
Oksijen oranı(%)	Patlama Parametreleri			
	Tane irilik Mikron	P _{max} (bar)	dt (saniye)	dP/dt (bar/s)
0,000	(-)45	1,280	0,187	6,857
	(+)45 (-)90	1,663	0,303	5,496
	(+)90 (-)125	1,467	0,367	4,000
	(+)125 (-)212	1,543	0,305	5,054
0,250	(-)45	1,360	0,187	7,286
	(+)45 (-)90	1,923	0,303	6,355
	(+)90 (-)125	2,153	0,367	5,873
	(+)125 (-)212	1,557	0,305	5,098
0,500	(-)45	1,430	0,187	7,661
	(+)45 (-)90	2,250	0,303	7,436
	(+)90 (-)125	2,187	0,367	5,965
	(+)125 (-)212	1,837	0,305	6,015
0,75	(-)45	1,467	0,187	7,857
	(+)45 (-)90	2,333	0,303	7,709
	(+)90 (-)125	2,423	0,367	6,609
	(+)125 (-)212	1,797	0,305	5,884
1,00	(-)45	1,610	0,187	8,625
	(+)45 (-)90	2,537	0,303	8,381
	(+)90 (-)125	2,717	0,367	7,409
	(+)125 (-)212	2,263	0,305	7,413

Şekil 6.6, 6.8, 6.10 ve 6.12 'de 0,125 g/L Soma kömür toz konsantrasyonu için değişik tanecik aralıklarındaki P_{max} 'ın oksijen oranı ile değişimini göstermektedir.

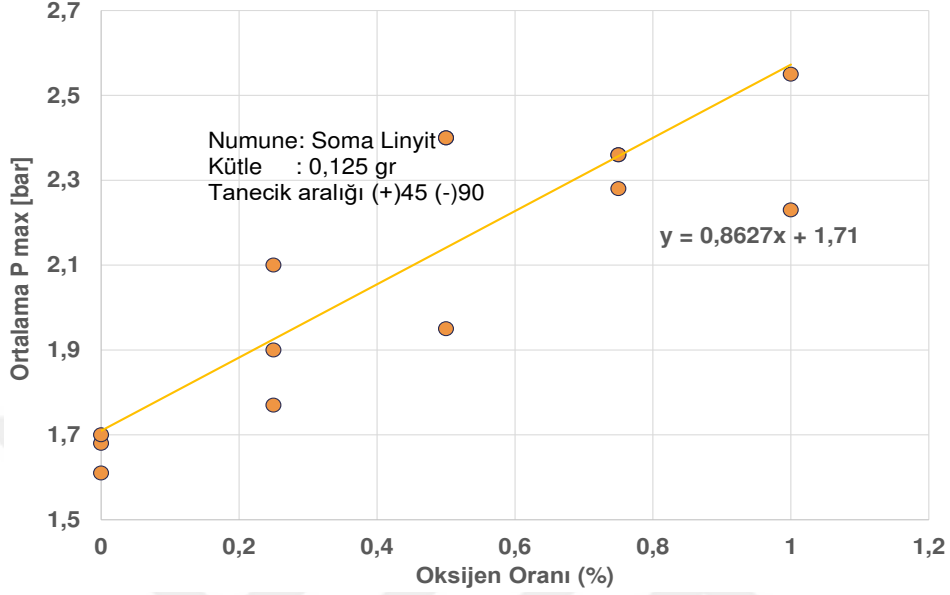
Şekil 6.7, 6.9, 6.11 ve 6.13' de 0,125 g/L Soma kömür toz konsantrasyonu için değişik tanecik aralıklarındaki patlama hızının $(dP/dt)_{max}$ oksijenle değişimini göstermektedir. Patlama şiddeti ile doğru orantılı olan patlama hızı oksijen oranı ile bütün tanecik aralıklarında artış göstermiştir.



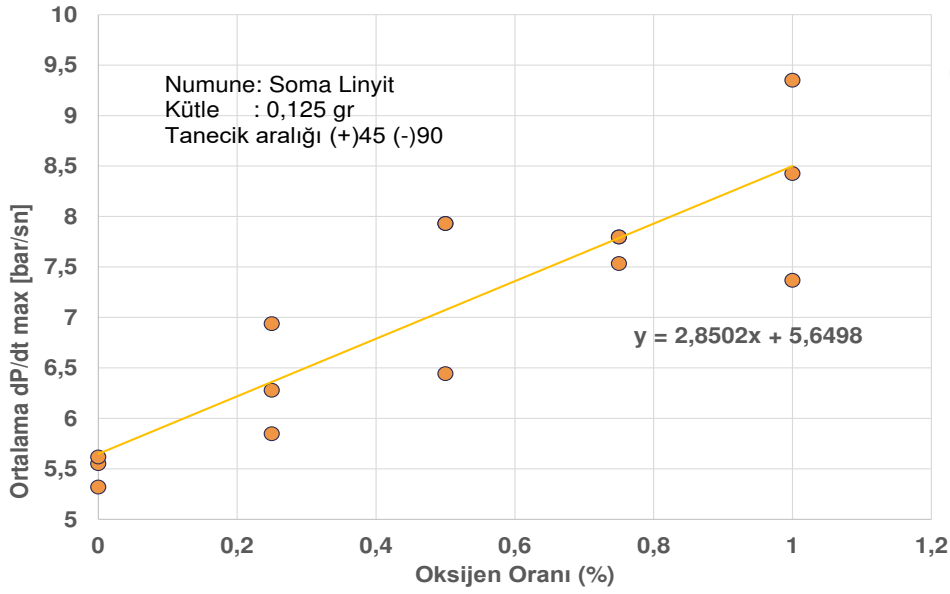
Şekil 6.6. 0,125 g/L, (-)45 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun $P_{\max}$ 'a Etkisi



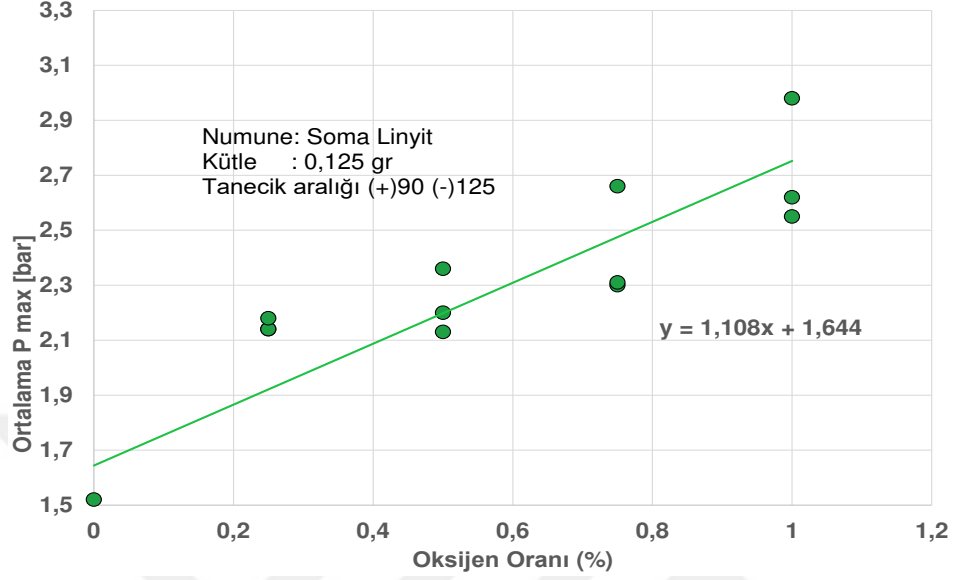
Şekil 6.7. 0,125 g/L, (-)45 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{\max}$ 'a Etkisi



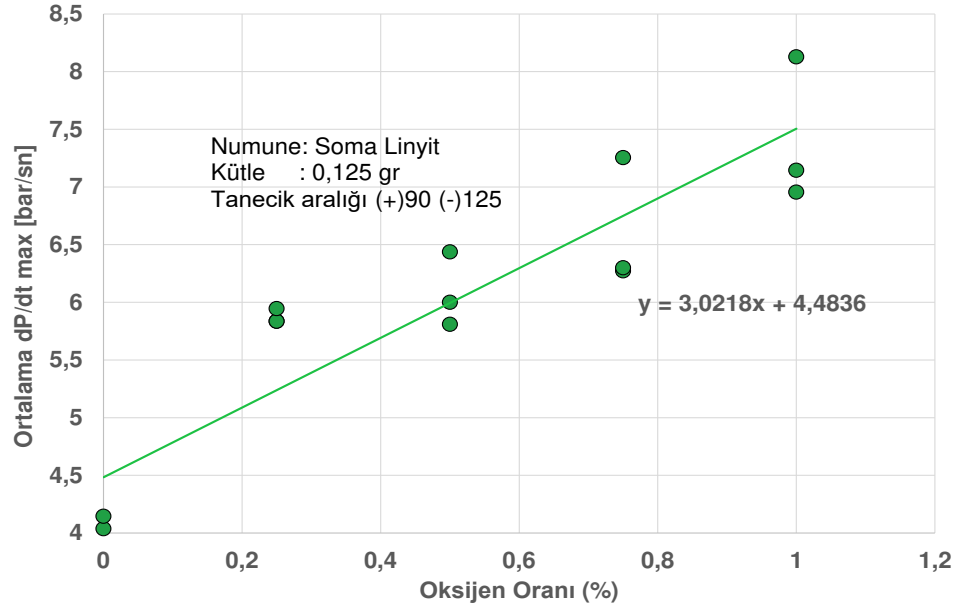
Şekil 6.8. 0,125 g/L, (+)45 (-)90 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi



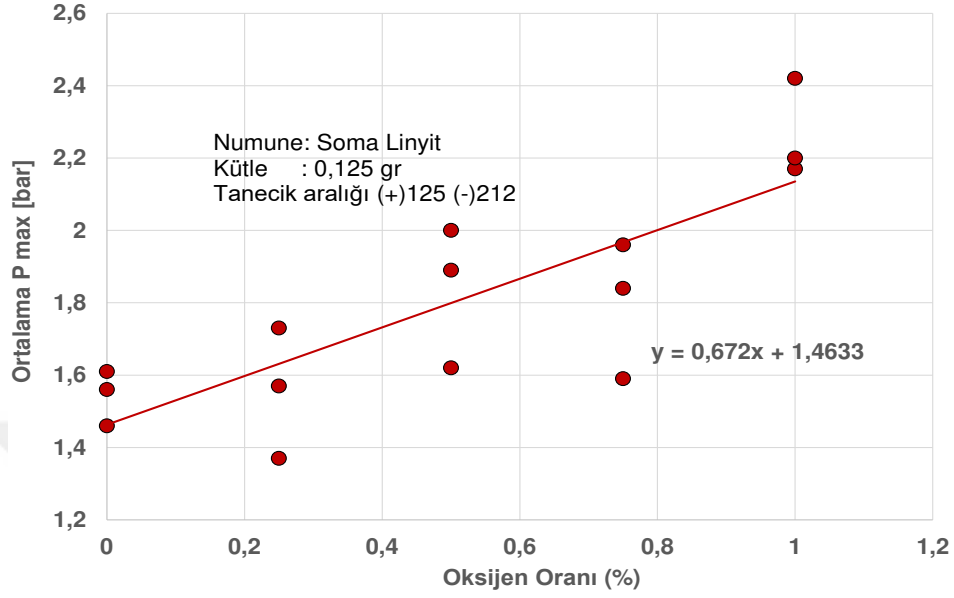
Şekil 6.9. 0,125 g/L, (+)45 (-)90 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi



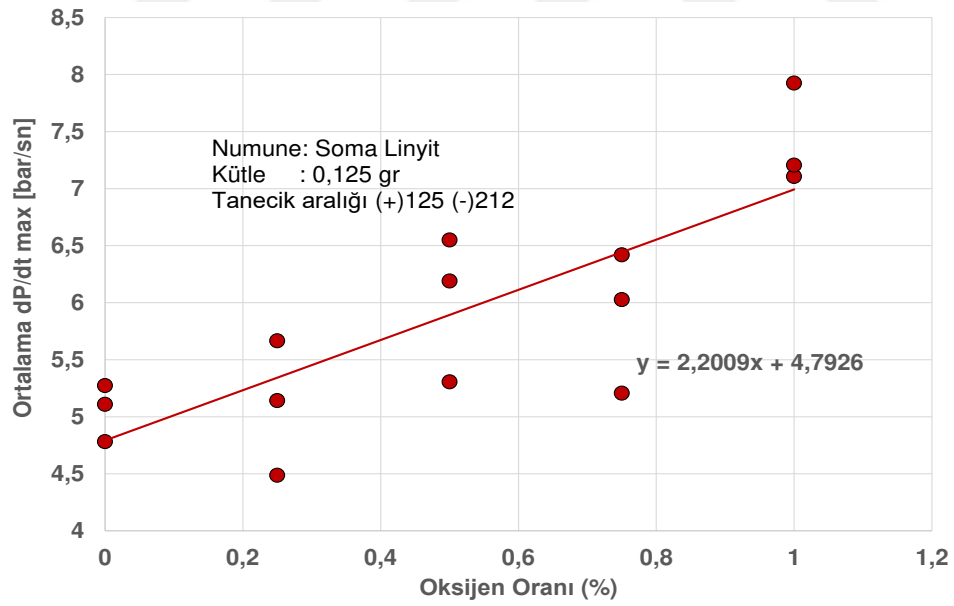
Şekil 6.10. 0,125 g/L, (+)90 (-)125 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun $P_{\max}$ 'a Etkisi



Şekil 6.11. 0,125 g/L, (+)90 (-)125 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{\max}$ 'a Etkisi

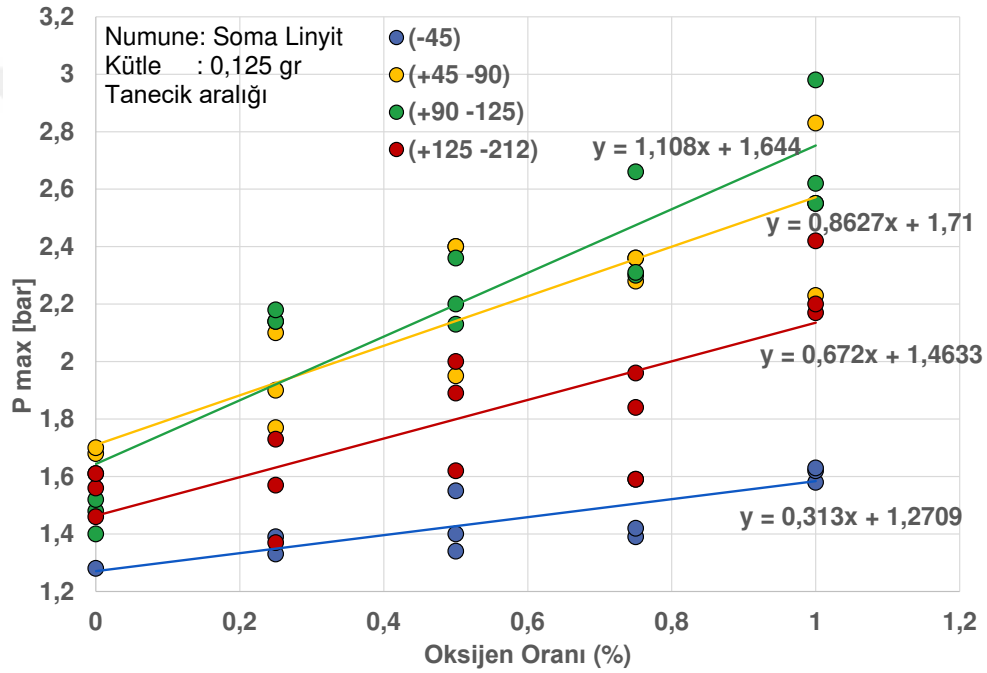


Şekil 6.12. 0,125 g/L, (+)125 (-)212 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun $P_{\max}$ 'a Etkisi

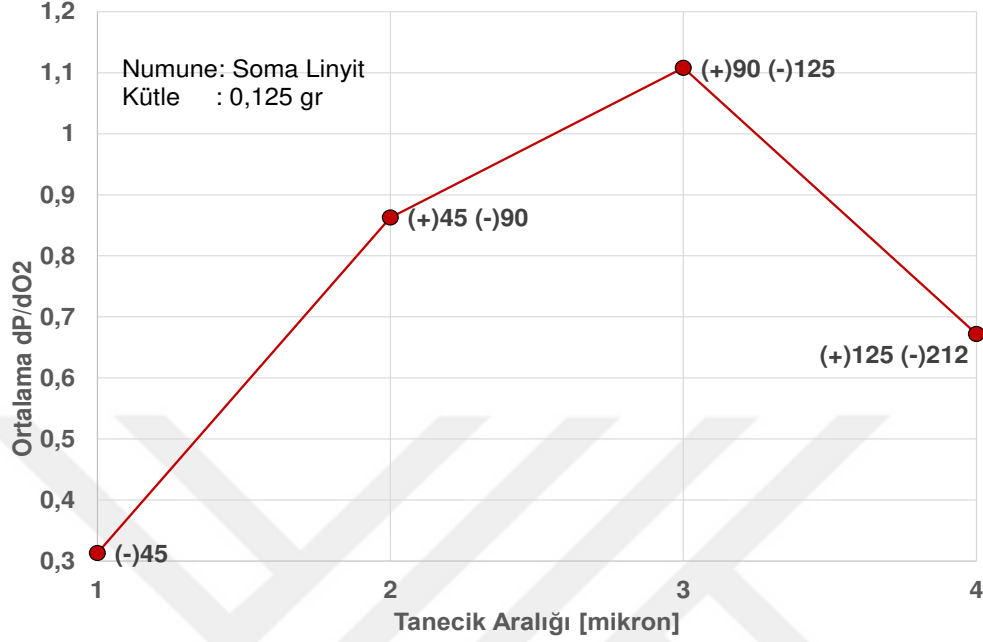


Şekil 6.13. 0,125 g/L, (+)125 (-)212 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{\max}$ 'a Etkisi

Şekil 6.14'te özetlendiği gibi toz patlamaları üzerinde oksijen oranının büyük etkisi olmaktadır. 0,125 g/L kömür tozu (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron tanecik aralıklarında oksijen oranı artıkça patlama basıncı artmıştır. Şekil 6.14'te görüleceği üzere (+)45 (-)90, (+)90 (-)125 mikron tanecik aralıklarında patlamanın basıncı oksijen oranı artıkça daha hızlı bir şekilde yükselmiştir. Dolayısı ile patlamanın şiddeti daha yüksek olmuştur.



Şekil 6.14. 0,125 g/L, Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi



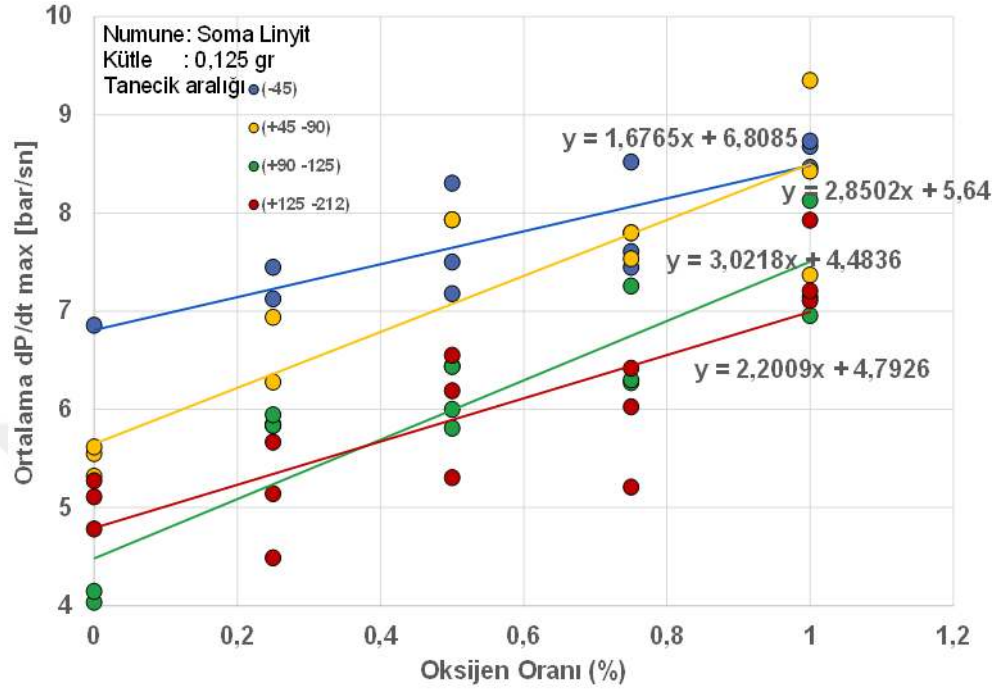
Şekil 6.15. 0,125 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu Patlama Basıncı Oksijen Konsantrasyonu Oranının

Çizelge 6.3, Şekil 6.15'te gösterilen veriler tablo halinde gösterilmektedir. Oksijen konsantrasyonuna göre basınç değişimi (+)90 (-)125 tanecik aralığında maksimum değere ulaşmıştır.

Çizelge 6.3. 0,125 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu Patlama Basıncı Oksijen Konsantrasyonu Oranı

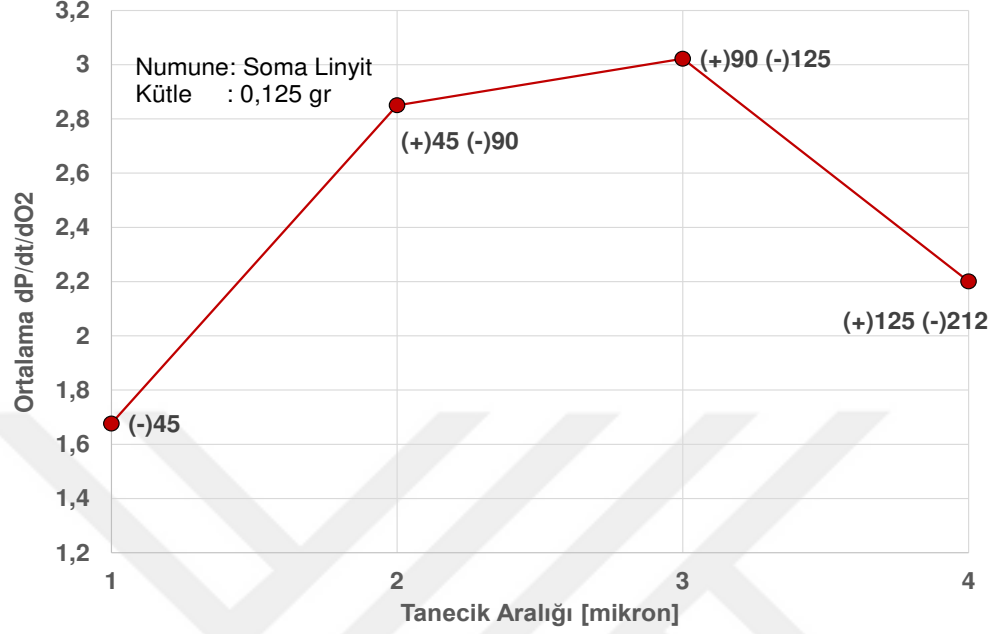
seri	tanecik boyutu	dPmax/dO2
1	(-)45	0,313
2	(+)45 (-)90	0,8627
3	(+)90 (-)125	1,108
4	(+)125 (-)212	0,672

Şekil 6.16'da değişik tanecik aralıklarında oksijen oranının $(dP/dt)_{max}$ 'a etkisi gösterilmiştir. Şekil 6.16, Şekil 6.7, Şekil 6.9, Şekil 6.11 ve Şekil 6.13'te gösterilen grafiklerinin bir arada gösterimidir.



Şekil 6.16. 0,125 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi

Şekil 6.16' da oksijen konsantrasyonundaki artışın patlama hızı üzerindeki etkisi değişik tanecik aralıklarında gösterilmiştir. (+)90 (-)125 tanecik aralığında patlama hızını oksijen konsantrasyonundaki değişimi en yüksek seviyelere ulaşmıştır.



Şekil 6.17. 0,125 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu (dP/dt)_{max} Oksijen Konsantrasyonuna Oranı

Çizelge 6.4, Şekil 6.17’da gösterilen veriler tablo halinde gösterilmektedir. Her iki durumda da görüleceği gibi oksijen konsantrasyonuna göre basınç değişimi (+)90 (-)125 tanecik aralığında maksimum değere ulaşmıştır.

Çizelge 6.4. 0,125 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu (dP/dt)_{max} Oksijen Konsantrasyonuna Oranı

seri	tanecik boyutu	dP/dtmax/dO2
1	(-)45	1,6765
2	(+)45 (-)90	2,8502
3	(+)90 (-)125	3,0218
4	(+)125 (-)212	2,2009

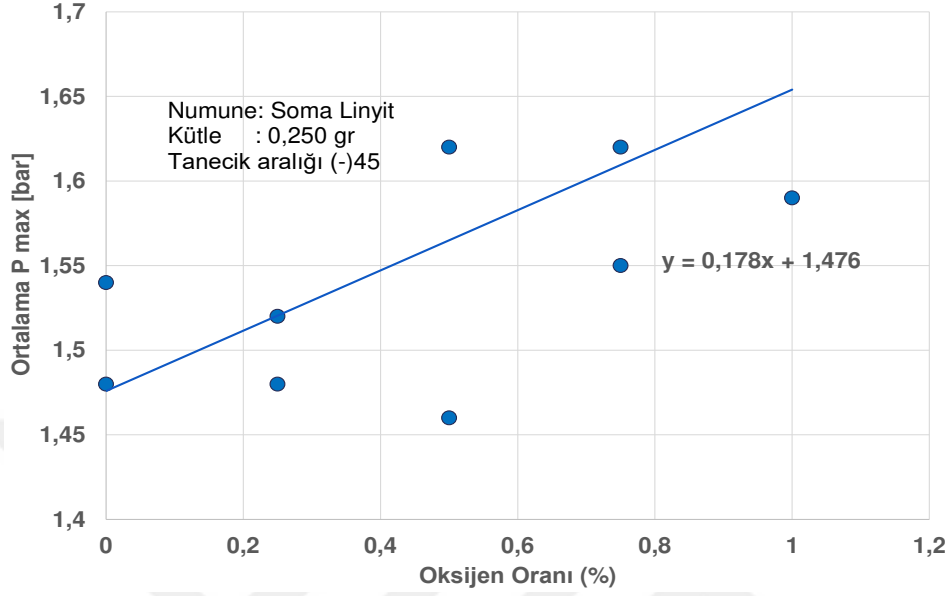
Toz konsantrasyonunu 0,250 olarak ayarlayıp farklı oksijen konsantrasyonlarında, (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron tanecik

aralıklarında patlama deneyleri tekrarlanmıştır. Çizelge 6.5'te görüleceği gibi testler dört farklı toz tanecik aralığında yapılmıştır.

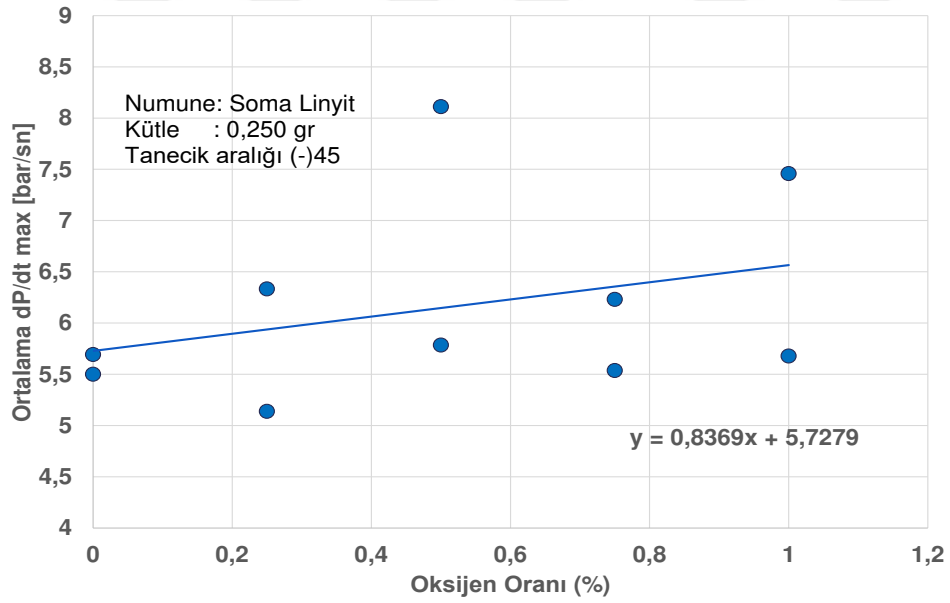
Çizelge 6.5. 0,250 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun Patlama Parametrelerine Etkisi

Oksijen oranı(%)	Patlama Parametreleri			
	Tane irilik Mikron	P _{max} (bar)	dt (saniye)	dP/dt (bar/s)
0,000	(-)45	1,510	0,270	5,593
	(+)45 (-)90	1,640	0,240	6,833
	(+)90 (-)125	1,595	0,346	4,610
	(+)125 (-)212	1,550	0,345	4,493
0,250	(-)45	1,505	0,265	5,679
	(+)45 (-)90	1,725	0,220	7,841
	(+)90 (-)125	2,160	0,370	5,838
	(+)125 (-)212	1,935	0,350	5,529
0,500	(-)45	1,540	0,230	6,696
	(+)45 (-)90	2,200	0,295	7,458
	(+)90 (-)125	2,450	0,359	6,825
	(+)125 (-)212	2,275	0,380	5,987
0,75	(-)45	1,585	0,270	5,870
	(+)45 (-)90	2,300	0,243	9,485
	(+)90 (-)125	2,645	0,390	6,782
	(+)125 (-)212	2,435	0,390	6,244
1,00	(-)45	1,690	0,260	6,500
	(+)45 (-)90	2,475	0,253	9,802
	(+)90 (-)125	2,900	0,360	8,056
	(+)125 (-)212	2,565	0,360	7,125

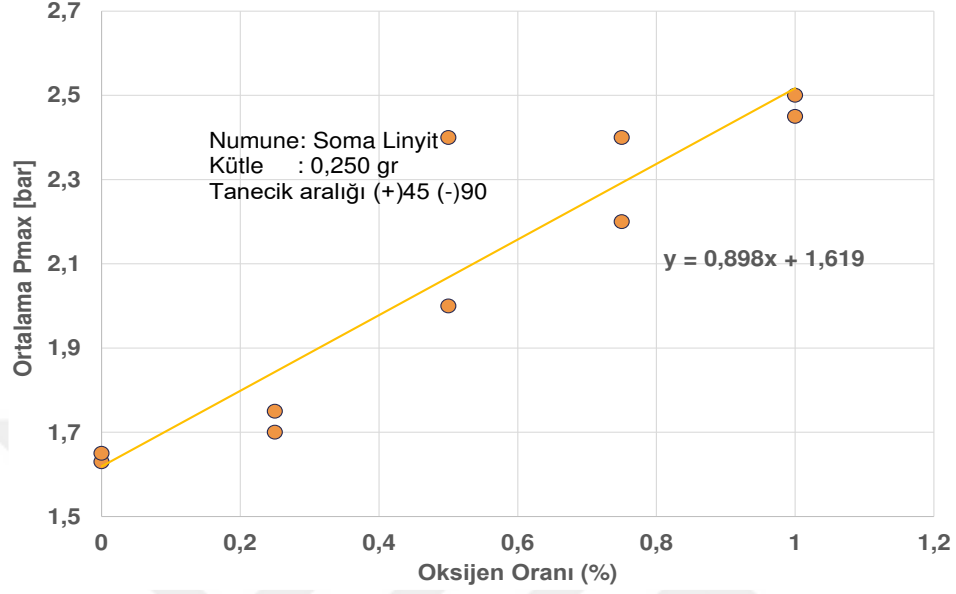
Şekil 6.18, Şekil 6.20, Şekil 6.22 ve Şekil 6.24'de 0,250 g/L Soma kömür toz konsantrasyonu için değişik tanecik aralıklarında P_{max} oksijenle artış göstermekte ve Şekil 6.19, Şekil 6.21, Şekil 6.23 ve Şekil 6.25'de ise (dP/dt)_{max} oksijenle artış göstermektedir.



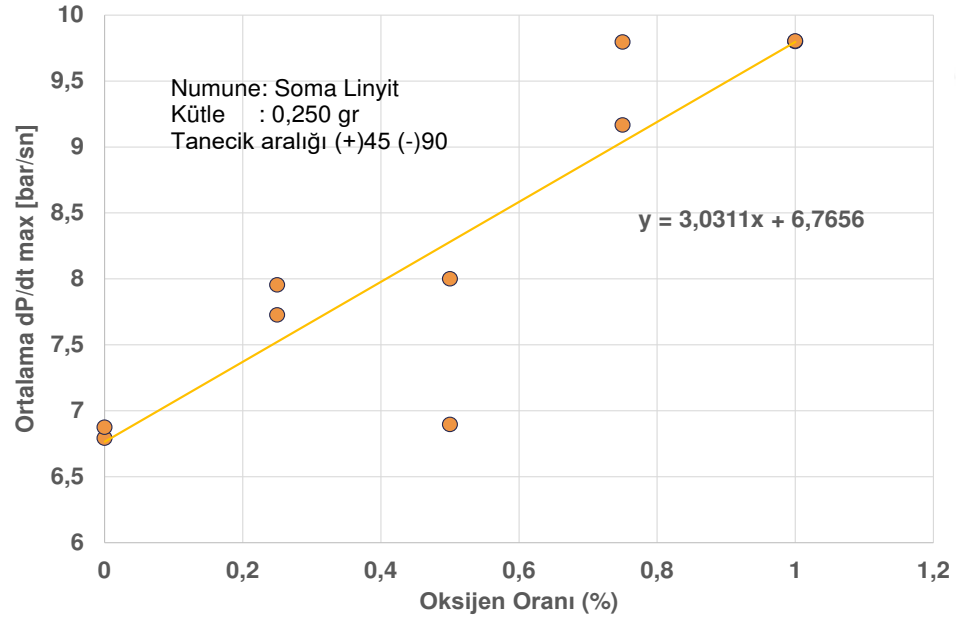
Şekil 6.18. 0,250 g/L, (-)45 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi



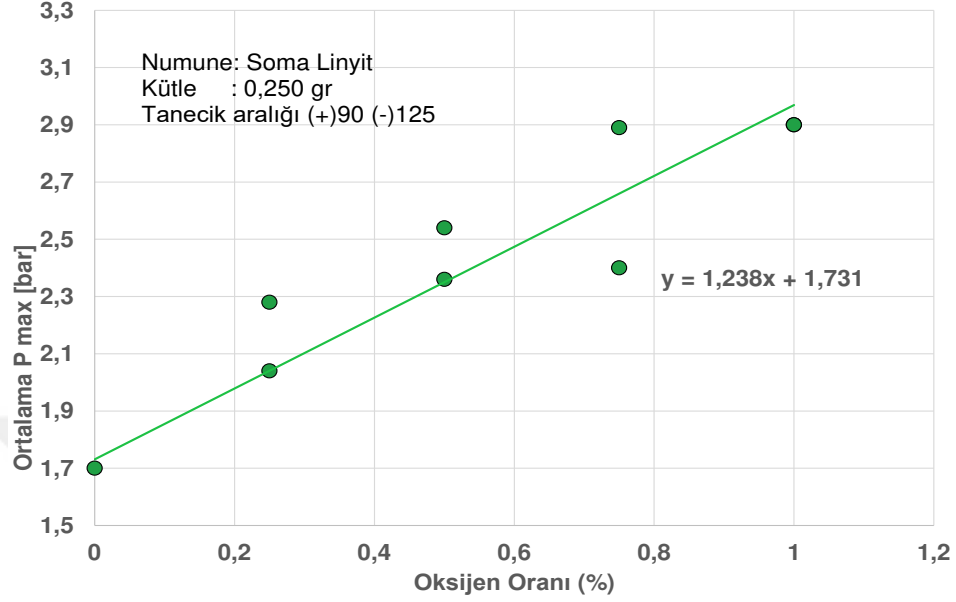
Şekil 6.19. 0,250 g/L, (-)45 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi



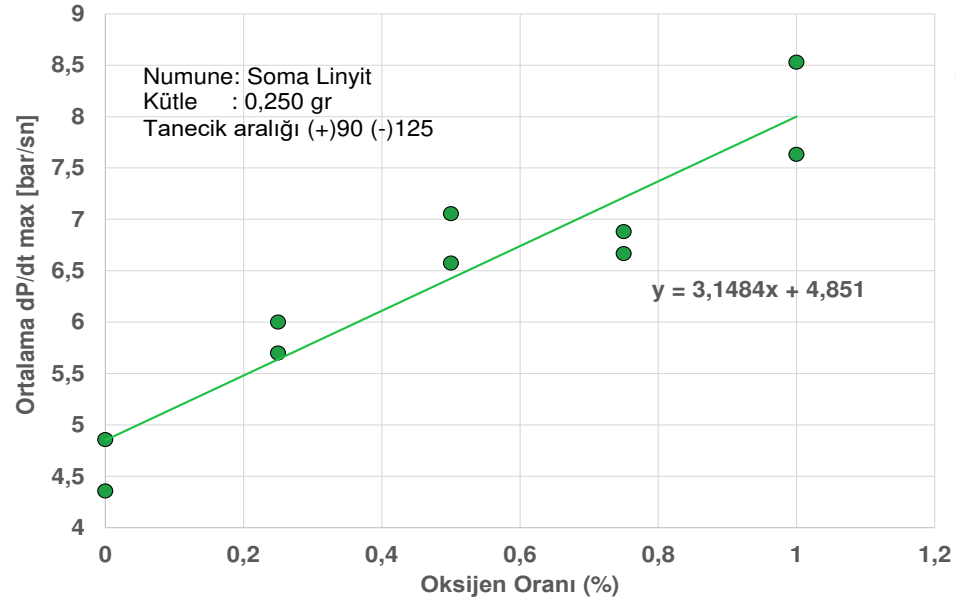
Şekil 6.20. 0,250 g/L, (+)45 (-)90 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun $P_{\max}$ 'a Etkisi



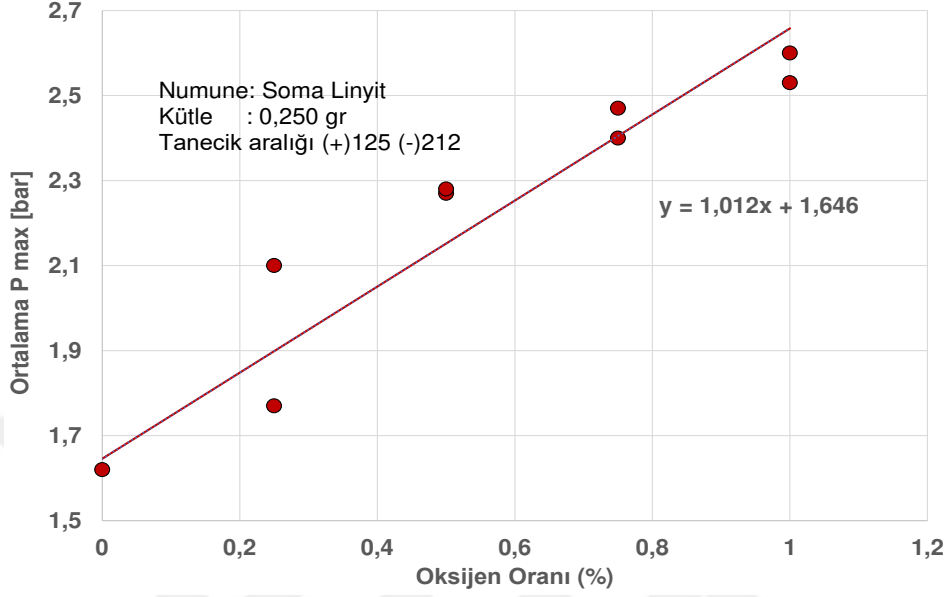
Şekil 6.21. 0,250 g/L, (+)45 (-)90 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{\max}$ 'a Etkisi



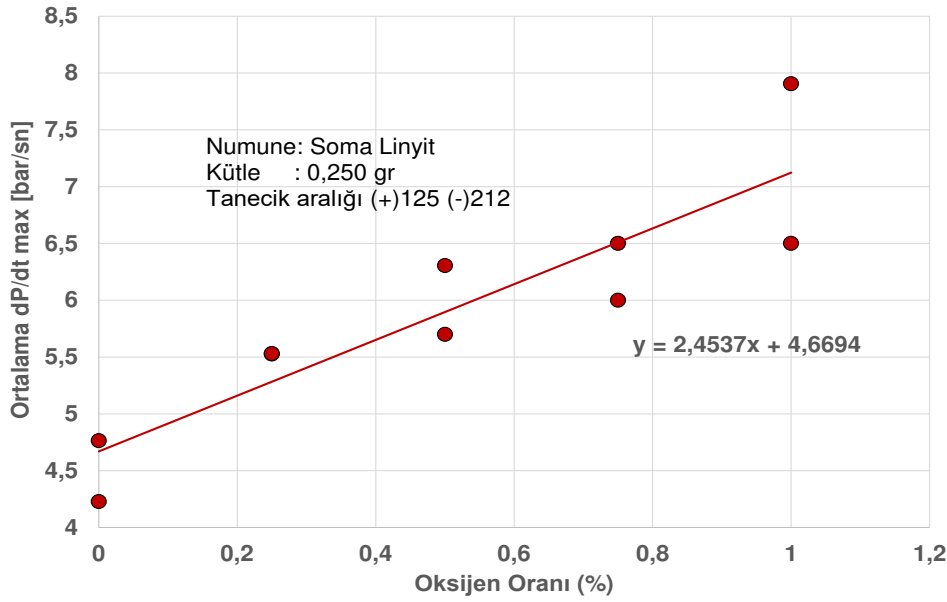
Şekil 6.22. 0,250 g/L, (+)90 (-)125 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun P_{max}'a Etkisi



Şekil 6.23. 0,250 g/L, (+)90 (-)125 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun (dP/dt)_{max}'a Etkisi

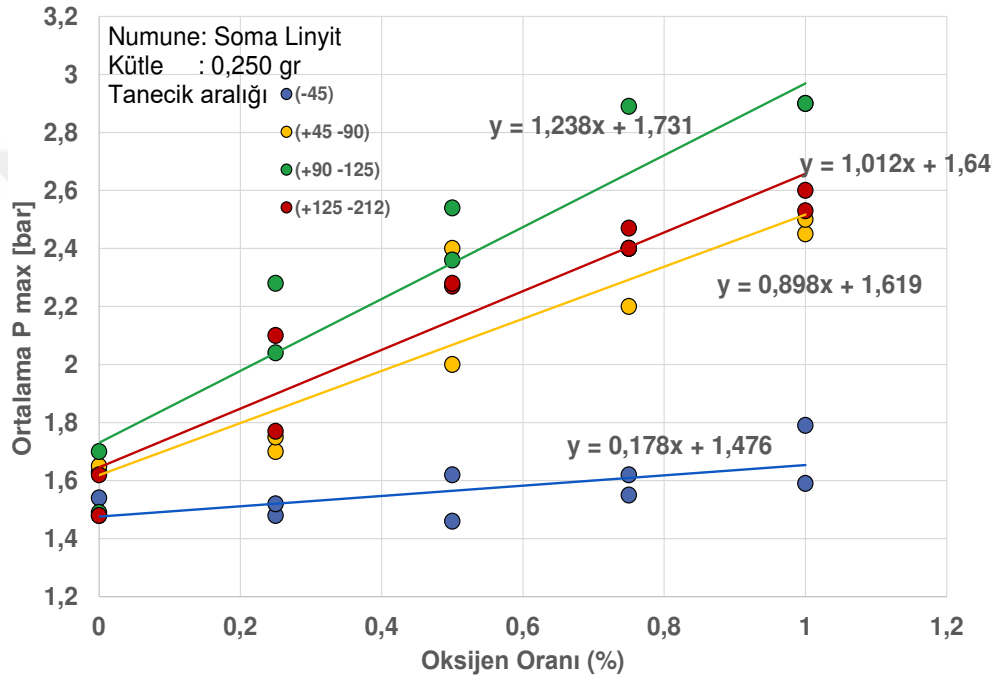


Şekil 6.24. 0,250 g/L, (+)125 (-)212 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi



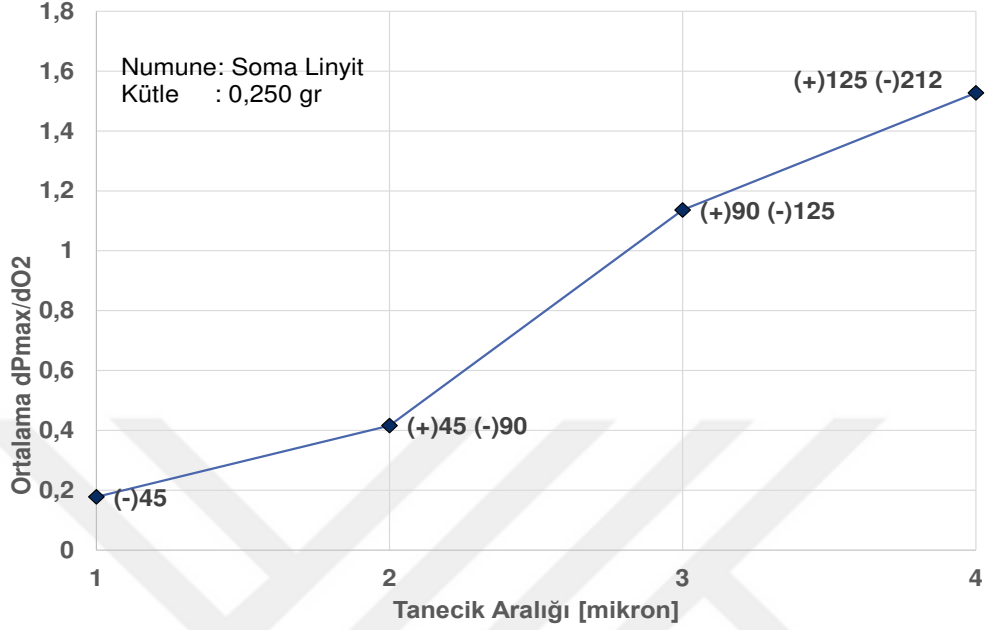
Şekil 6.25. 0,250 g/L, (+)125 (-)212 Mikron Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi

Şekil 6.26' da görüldüğü gibi toz patlamaları üzerinde oksijen oranının büyük etkisi olmaktadır. 0,250 g/L Soma kömür tozu için (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron tanecik aralıklarının hepsinde oksijen oranı artıkça toz patlama basıncı artmıştır.



Şekil 6.26. 0,250 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun P_{max} 'a Etkisi

Şekil 6.27' de 0,250 g/L Soma kömür tozu için oksijen konsantrasyonundaki artışın patlama hızı üzerindeki etkisi değişik tanecik aralıklarında gösterilmiştir. Tanecik aralığı ve patlama basıncı oksijen konsantrasyonu oranı ile sürekli bir artış göstermiştir.

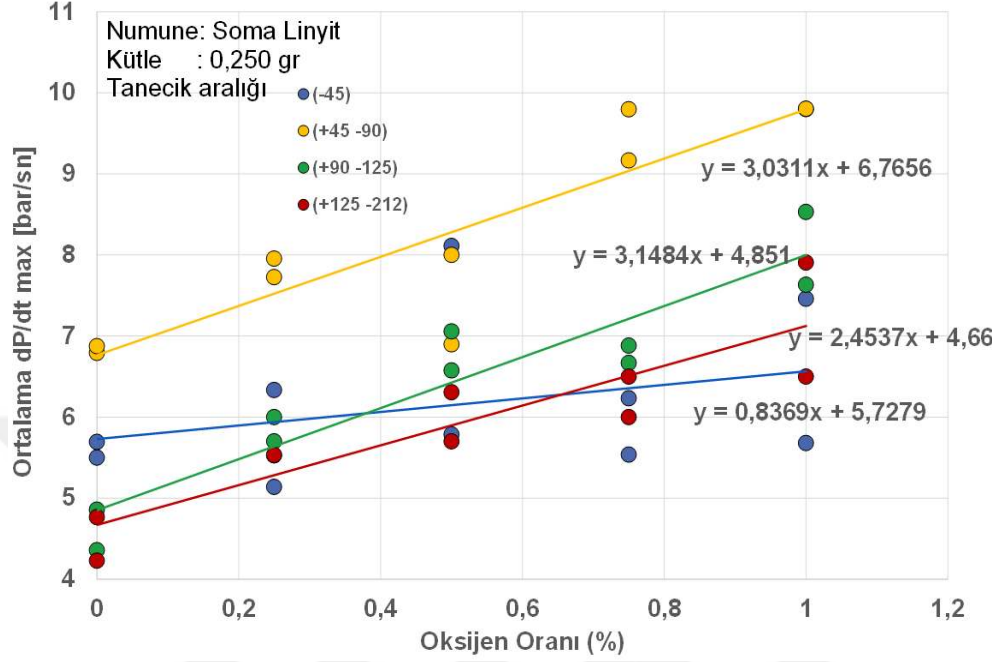


Şekil 6.27. 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarında dP_{max}/dO_2 Oranı

Çizelge 6.6'da Şekil 6.27'de gösterilen veriler tablo halinde gösterilmektedir. Her iki durumda oksijen konsantrasyonuna göre basınç değişimi (+)125 (-)212 tanecik aralığında maksimum değere ulaşmıştır.

Çizelge 6.6. 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarında dP_{max}/dO_2

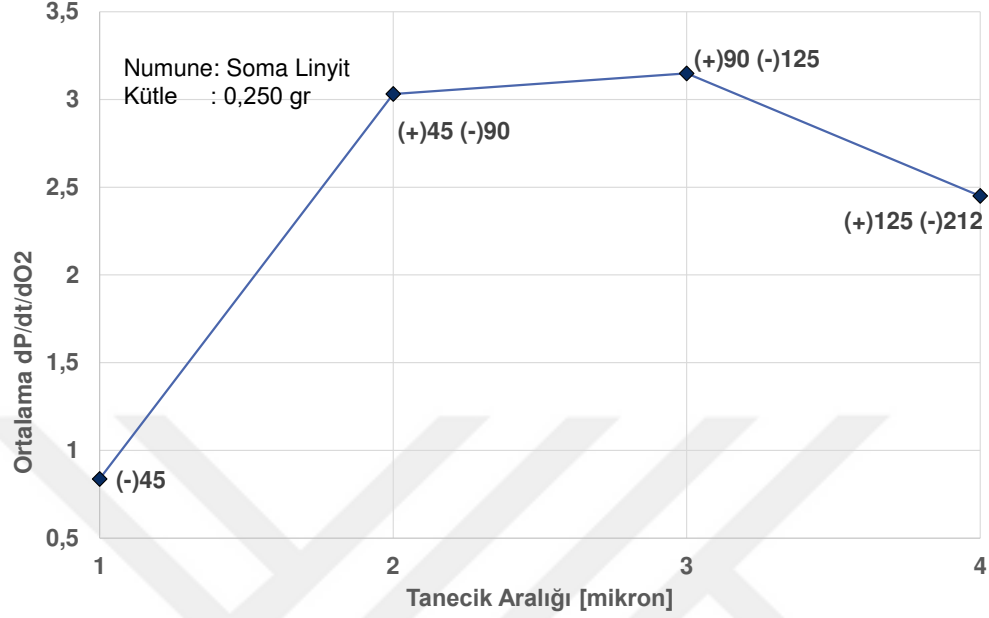
seri	tanecik boyutu	dPmax/dO2
1	(-)45	0,178
2	(+)45 (-)90	0,4159
3	(+)90 (-)125	1,1364
4	(+)125 (-)212	1,5273



Şekil 6.28. 0,250 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu Oksijen Konsantrasyonunun (dP/dt)_{max}'a Etkisi

Şekil 6.28'de görüldüğü gibi toz patlamalarının şiddeti üzerinde oksijen oranının büyük etkisi olmaktadır.

Şekil 6.29'da 0,250 g/l toz konsantrasyonunda (+)90 (-)125 mikron tane iriliği aralığında oksijen oranındaki değişikliğe karşı en yüksek (dP/dt)_{max} değerini vermiştir.



Şekil 6.29. 0,250 g/L Değişik Tanecik Aralıklarında Soma Kömür Tozu (dP/dt)_{max}/ dO_2 Oranını

Çizelge 6.7’de Şekil 6.29’da gösterilen veriler tablo halinde gösterilmektedir. Her iki durumda da görüleceği gibi oksijen konsantrasyonuna göre basınç değişimi (+)90 (-)125 tanecik aralığında maksimum değere ulaşmıştır.

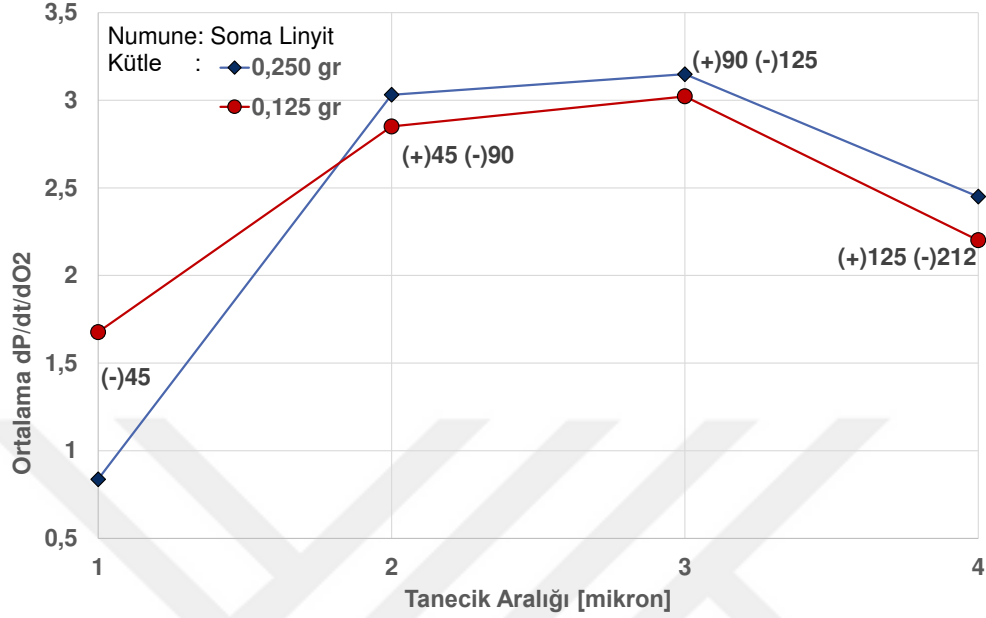
Çizelge 6.7. 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarında (dP/dt)_{max}/ dO_2 .

seri	tanecik boyutu	$dP/dt_{max}/dO_2$
1	(-)45	0,8369
2	(+)45 (-)90	3,0311
3	(+)90 (-)125	3,1484
4	(+)125 (-)212	2,2262

Bilindiği gibi patlama hızı yüzey alanı yani tanecik aralığı ile orantılıdır. Özellikle (-)45 altı ve (+)125 üstü tanecik aralıklarında oksijen oranının düşük olduğu deneylerde patlama olmamış veya çok zayıf gerçekleşmiştir. Yani oksijen

değerinin düşük olduğu ortamlarda tane iriliği yüksekse patlama hızı düşük olmaktadır. Çok küçük tanecik aralıklarında ise tozun kimyasal ve fiziksel özelliklerine göre bu olaylar çok daha kompleks bir hal almakta ve olay patlama, yanma veya yavaş yanma şeklinde değişebilmektedir. Örneğin küçük taneciklerde tanecikler arası statik elektriklenmeden dolayı oluşan topaklanma olayı veya çok küçük tanecik aralıklarında tanecik etrafındaki uçucu madde katmanının inceliğinden dolayı olay uçucuların yanmasından çok oksijen hızlı bir şekilde karbona ulaşarak tanecik yanmasına dönüşebilmektedir. Ayrıca tanecik etrafındaki uçucuların yüzey alanına ile olan oranından ve ortamdaki oksijen miktarının yüzey alanına düşen miktarından dolayı patlama hızı azalabilmektedir. Aynı şekilde tanecik yüzeyinin homojen ve heterojen olması, gözenekli veya pürüzsüz olması da olayda önemli rol oynamaktadır (Eckhoff, R.,2003).

Şekil 6.30 iki farklı toz konsantrasyonunda gerçekleştirilen deneylerde $(dP/dt)_{\max}/dO_2$ değişimlerinin farklı tane irilik aralıklarındaki değerleri göstermektedir. Daha önceki kısımlarda da anlatıldığı gibi her iki toz konsantrasyonunda da maksimum basınç değişiminin oksijen konsantrasyonuna oranı en yüksek 90 mikron tane iriliği civarında gerçekleşmektedir. Bu sonuçlar, toz tane iriliği bakımından değerlendirildiğinde, toz patlamasının oluşabileceği en riskli bölgenin (+)45 (-)90 ve (+)90 (-)125 mikron tanecik aralığı olduğuna işaret etmektedir. Patlama hızının en yüksek olduğu $(dP/dt)_{\max}$ değerinin oksijen konsantrasyonuna bölünmesi ile elde edilen $(dP/dt)_{\max}/dO_2$ değerinin yükek olması aslında $(dP/dt)_{\max}$ değerinin yüksek olmasının yanısıra, toz patlama küresi içerisinde kullanılan oksijen oranının da düşük olmasını gerektirmektedir. Payda da olan oksijen değerinin küçük olması ise Şekil 6.30'da y-eksenini temsil eden $(dP/dt)_{\max}/dO_2$ değerinin artması anlamına gelmektedir.



Şekil 6.30. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Konsantrasyonunun Değişik Tanecik Aralıklarında $(dP/dt)_{\max}/dO_2$ Kıyaslanması

Çizelge 6.8' de Şekil 6.30'daki grafikte gösterilen veriler tablo halinde gösterilmektedir.

Çizelge 6.8. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Konsantrasyonunun Değişik Tanecik Aralıklarında $(dP/dt)_{\max}/dO_2$ Kıyaslanması

Toz konsantrasyonu		0,125 gr/Lt	0,250 gr/Lt
seri	tanecik boyutu	dP/dtmax/dO2	dP/dtmax/dO2
1	(-)45	1,6765	0,8369
2	(+)45 (-)90	2,8502	3,0311
3	(+)90 (-)125	3,0218	3,1484
4	(+)125 (-)212	2,2009	2,2262

Tanecik aralığının toz patlamaları üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla kısmi olarak kurutulmuş Soma kömür tozu (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125,

(+)125 (-)212 mikron tanecik aralıklarına ayrılarak 0,125 g/L toz konsantrasyonu kullanılarak deneyler yapılmıştır.

1 litre toz patlama küresi içerisinde patlama gerçekleştiği zaman basınç sensörü, ışık sensörü ve sıcaklık sensörü verileri datalogger tarafından kayıt altına alınarak daha sonra bir bilgisayar yardımıyla analizleri yapılmıştır. Elde edilen veriler ve analiz sonuçları Çizelge 6.9, Şekil 6.31 ve Şekil 6.32’de gösterilmiştir.

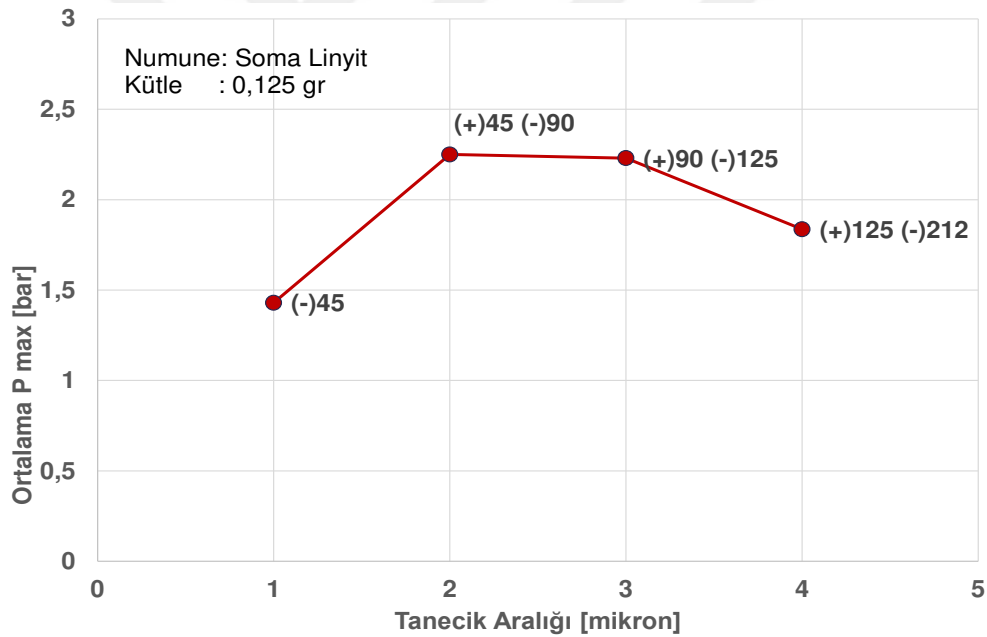
Çizelge 6.9. 0,125 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarında Patlama Parametreleri

Tanecik Boyutu (mikron)	Patlama Parametreleri			
	Deney Serisi	Pmax (bar)	dt (saniye)	dP/dt (bar/s)
(-45)	1	1,550	0,260	5,962
	2	1,340	0,180	7,444
	3	1,400	0,320	4,375
(+)45 (-)90	1	2,400	0,380	6,316
	2	2,400	0,320	7,500
	3	1,950	0,300	6,500
(+)90 (-)125	1	2,360	0,360	6,556
	2	2,130	0,360	5,917
	3	2,070	0,340	6,088
(+)125 (-)212	1	1,890	0,400	4,725
	2	1,620	0,260	6,231
	3	2,000	0,460	4,348

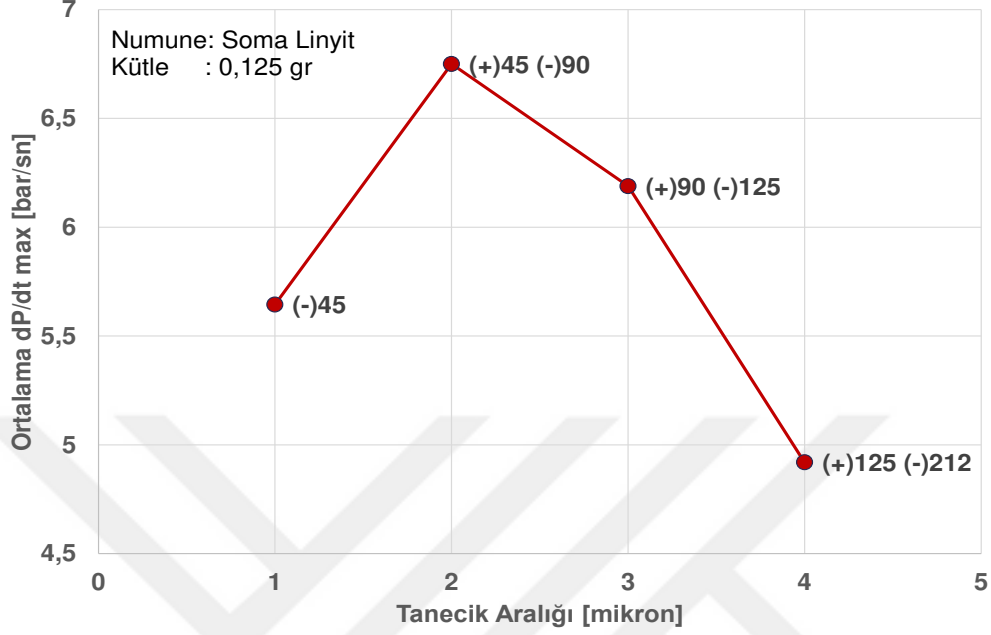
Daha önceki gözlemlere paralel olarak toz patlamasının en şiddetli olduğu tanecik aralığı ağırlıklı olarak 45 ile 90 mikron aralığındaki tozlar için gerçekleşmektedir.

Çalışmanın önceki bölümlerinde gözlemlendiği gibi oksijen oranının artması ile patlama basıncının artması beklenen bir durumdur. Genel olarak daha küçük kömür tozlarının daha büyük tozlardan daha hızlı tutuşup patlamasına rağmen, 1 L’lik toz patlama küresi içindeki en düşük patlama basıncı 45 mikrondan küçük toz

parçacıkları ile meydana gelmektedir. En yüksek $P_{\max}$ değerleri ise genel olarak 90 ile 125 mikron arasındaki toz tanecik aralıklarında gözlenmektedir. 45 mikrondan küçük tozlarda öğütme ve elek analizleri esnasındaki ayrıştırma işleminin bir sonucu olarak 45 mikron altı kömür parçacıkları, patlama küresindeki patlamayı bastırabilecek demir, alüminyum, kil ve diğer yabancı maddeler içerebilmektedirler. Küçük taneli tozlar daha büyük tozlar göre daha fazla yabancı madde ihtiva etmesi ise patlama anında baskılayıcı bir faktördür. Bu nedenle, 45 mikron altı partiküllerde kimyasal bileşim muhtemelen daha düşük $P_{\max}$ değerlerinden sorumluyken, parçacık aralığının iri olması da 125 mikron üzeri toz patlamalarında daha düşük $P_{\max}$ a sebep olmaktadır.



Şekil 6.31. 0,125 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarının $P_{\max}$ 'a Etkisi



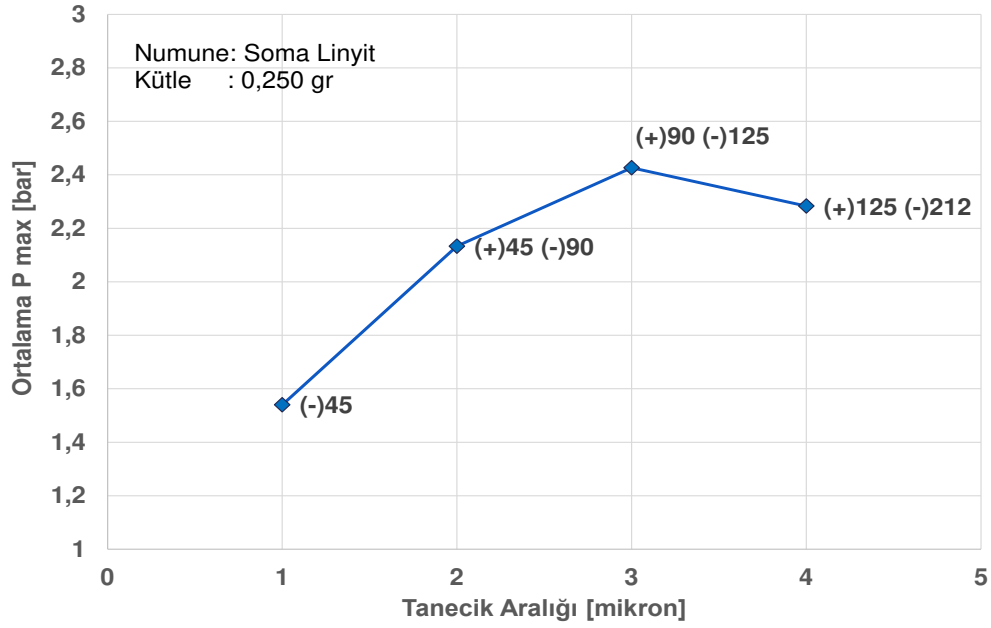
Şekil 6.32. 0,125 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarının $(dP/dt)_{max}$ Etkisi

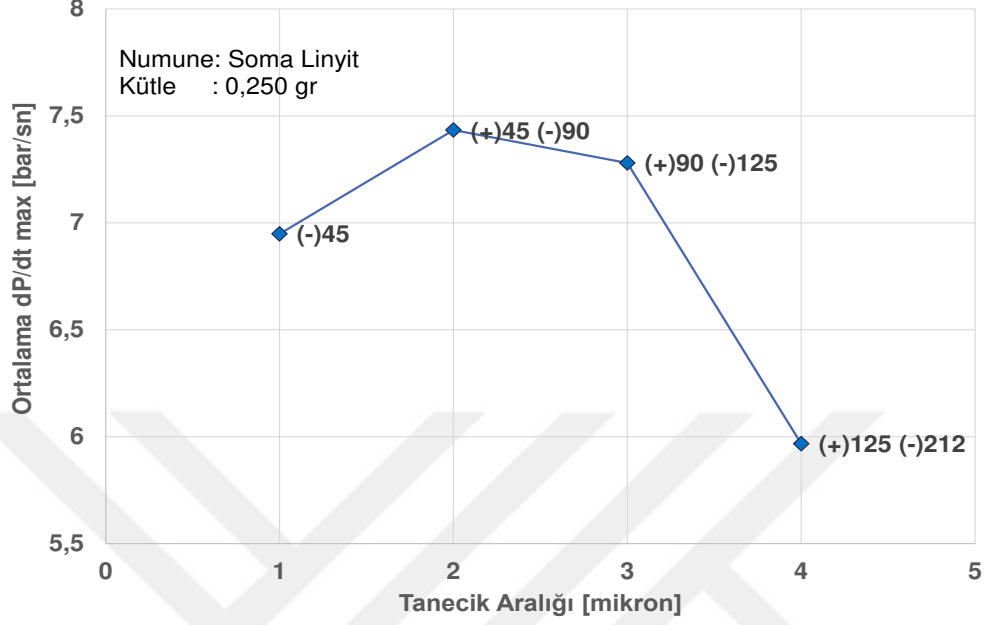
Tanecik aralığının toz patlamaları üzerindeki etkisinin toz konsantrasyonu ile değişimini anlayabilmek amacı ile toz konsantrasyonu 0,250 g/L olarak değiştirilmiştir. Bu kömür tozlarının kısmi olarak nemi alınıp (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron tanecik aralıklarına ayrılarak deneyler tekrarlanmıştır.

Elde edilen veriler ve analiz sonuçları Çizelge 6.10, Şekil 6.33 ve Şekil 6.34'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.10. 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarında Patlama Parametreleri

Tanecik Boyutu (mikron)	Patlama Parametreleri			
	Deney Serisi	Pmax (bar)	dt (saniye)	dP/dt (bar/s)
(-45)	1	1,460	0,180	8,111
	2	1,620	0,280	5,786
	3			
(+45 (-)90)	1	2,000	0,290	6,897
	2	2,400	0,300	8,000
	3	2,000	0,270	7,407
(+90 (-)125)	1	2,540	0,300	8,467
	2	2,360	0,359	6,574
	3	2,380	0,350	6,800
(+125 (-)212)	1	2,270	0,360	6,306
	2	2,280	0,400	5,700
	3	2,300	0,390	5,897

Şekil 6.33. 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarının P_{max} 'a Etkisi

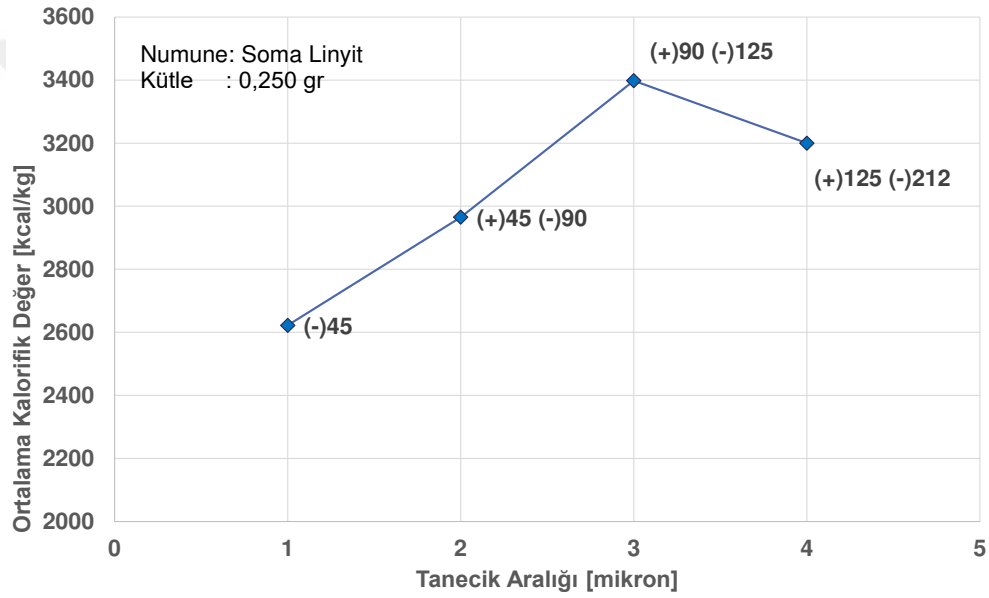


Şekil 6.34. 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Değişik Tanecik Aralıklarının $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi

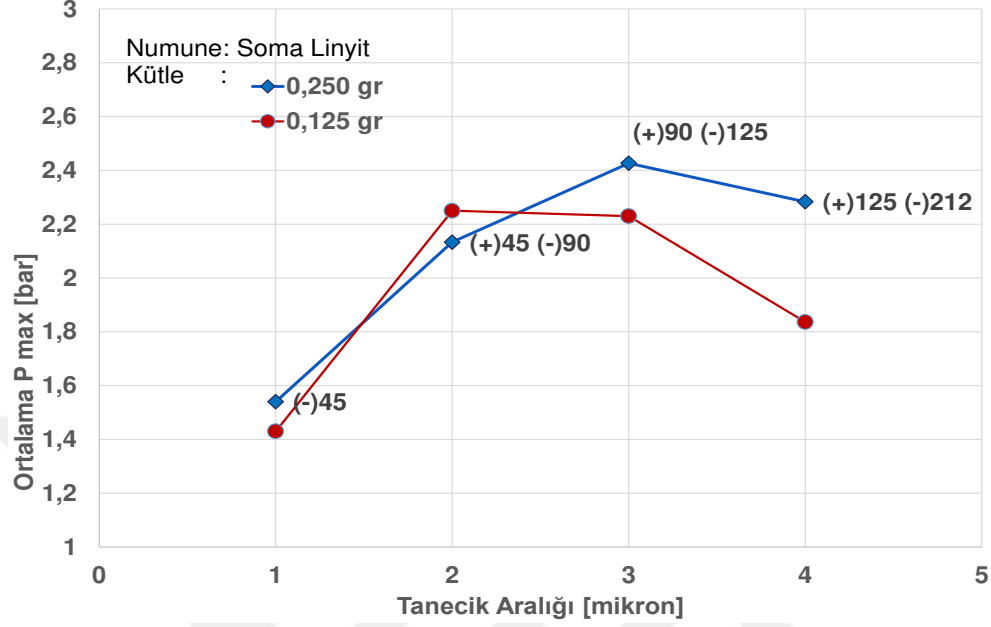
0,250 g/L Soma kömür toz konsantrasyonu için (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron tanecik aralıklarında kalorifik değerdeki değişimi incelenmiştir. Çizelge 6.11 ve Şekil 6.35'de gösterilen kalorifik değerler standart bomba kalorimetre ile ölçümlerin sonuçlarıdır. 1 L toz patlama küresinde ölçülen kalorifik değerler ise Bölüm 6.6'da anlatılmış ve standart bomba kalorimetre ile kıyaslanmıştır (Şekil 6.88).

Çizelge 6.11. 0.250 g/L Soma Kömür Tozu Tanecik Aralığı ve Kalorifik Değer

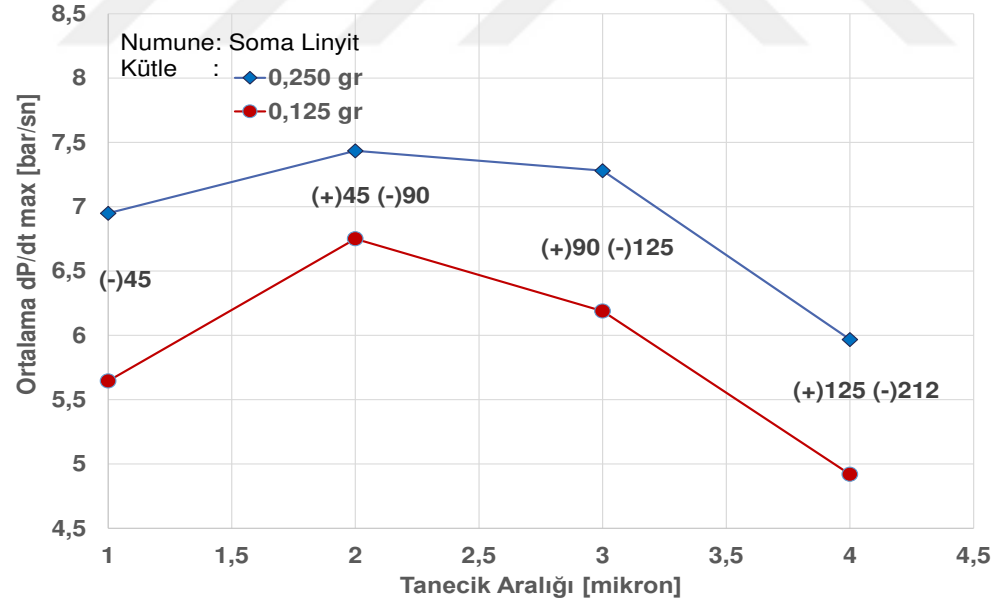
Tanecik Boyutu (mikron)	Patlama Parametreleri		
	Deney Serisi	Pmax Ortalama	Kalorifik Değer kcal/kg
(-45)	1	1,540	2622
(+)45 (-)90	2	2,133	2965
(+)90 (-)125	3	2,427	3398
(+)125 (-)212	4	2,283	3200



Şekil 6.35. 0.250 g/L Soma Kömür Tozu Tanecik Aralığının Kalorifik Değere Etkisi



Şekil 6.36. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Tanecik Aralığının P_{max} 'a Etkisinin Kıyası



Şekil 6.37. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Soma Kömür Tozu Tanecik Aralığının $(dP/dt)_{max}$ Etkisinin Kıyası

6.2. Rus Linyit Tozu Patlama Deneyleri

Toz patlama deneyleri için getirdiğimiz Rus linyitinin fiziksel ve kimyasal analizleri aşağıdaki çizelgede yer almaktadır. (Çizelge 5.6) Soma kömürü için yapılan testlerin aynıları Rus linyiti içinde yapılmıştır. Kömür toz numunesinin sarsak elek kullanılarak tanecik aralıklarına göre ayrımı aşağıdaki Çizelge 6.12’de yer almaktadır.

Çizelge 6.12. Rus Linyiti Elek Analizi

Mersin Soda Öğütülen Kömür				
Elek Çapı	Kep Dara	Kep + Numune	Numune	Numune
Micron	(gr)	(gr)	(gr)	%
>212	85,0337	130,7833	45,7496	40,33
>125	78,6829	118,1213	39,4384	34,77
>90	53,7315	67,6620	13,9305	12,28
>45	63,7883	75,9586	12,1703	10,73
<45	78,5806	80,7181	2,1375	1,88
		Toplam	113,4263	

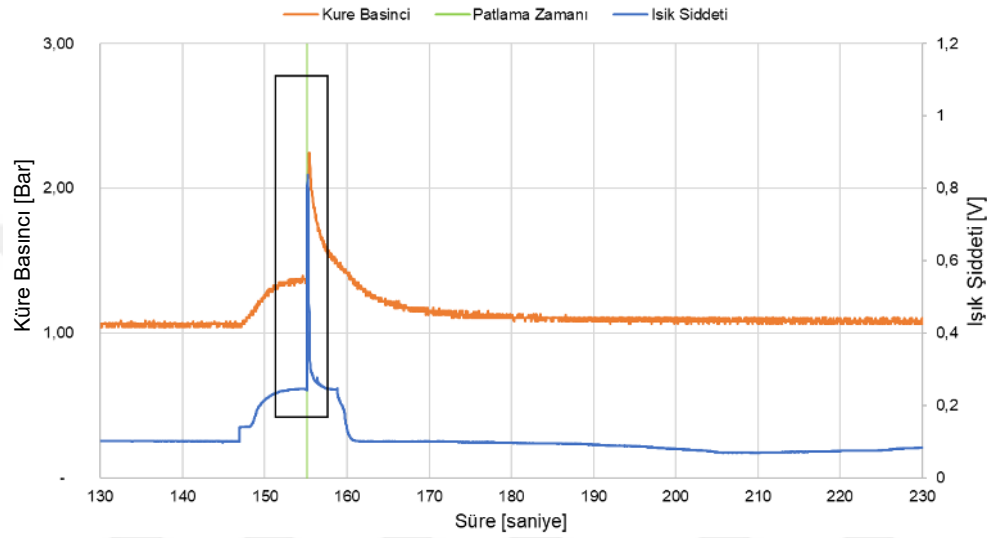
Testler tanecik aralığı (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron olarak yapılmıştır. Tanecik aralıklarına ayrılan kömür tozlarının etüv içerisinde düşük sıcaklıkta kömür nemi kısmi (%4) olarak alınmıştır. Bu numuneden alınan elek üstü kömürlerin ayrı ayrı patlama deneyleri yapılmıştır. Toz konsantrasyonları olarak 0,250 g/L ve 0,125 g/L olarak belirlenen ve nemi alınmış kömür tozları küre üzerinde bulunan toz toplama haznesine yerleştirilip deney koşullarına göre toz patlama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Küre içerisinde patlama gerçekleştiği anda basınç sensörü, ışık sensörü ve sıcaklık sensörü verileri datalogger tarafından kayıt altına alınarak daha sonra bilgisayar vasıtasıyla analizleri yapılmıştır. Patlama riskinin doğru olarak analiz edilebilmesi için bütün bu işletim parametrelerinin değişik kombinasyonları çalışılmıştır. Bütün bu kombinasyonların 3 defa tekrarı yapılmıştır. Deneylere örnek olması açısından aşağıda deney serilerinden biri örnek olarak anlatılmıştır;

0,125 g/L toz konsantrasyonu, (+)90 (-)125 mikron tane aralığı ve 3000 Joule kıvılcım enerjisi kullanılarak gerçekleştirilen patlama deneylerinin gözlemlene penceresinden alınan görüntüleri kameraya çekilerek bu görüntülerin bir kısmı Şekil 6.38’de gösterilmektedir.

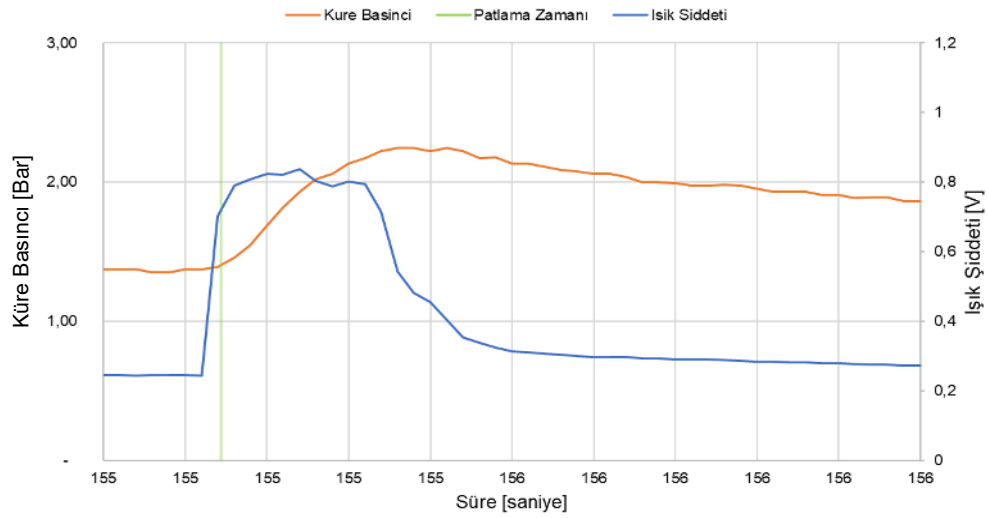


Şekil 6.38. 0,125 g/L Rus Linyit Tozu Patlama Görüntüleri

Şekil 6.39’de 1 L toz patlama küresindeki basınç ve ışık şiddetlerinin zamanla değişimini göstermektedir. Şekil 6.40’da patlama anı pencere aralığında göstermektedir.



Şekil 6.39. (+)90 (-)125 Mikron Rus Linyitinin Basınç ve Işık Şiddeti Grafiği



Şekil 6.40. Patlama Anının Büyütülmüş Görüntüsü

Patlama konsantrasyonunu alt sınırını belirleyebilmek amacı ile Rus linyit tozu deney numuneleri EN-14034-3 standardı dikkate alınarak hazırlanmıştır. Daha önceki deneylere benzer şekilde, bu deneyler de toz konsantrasyonu 1 g/L ile başlayarak 1, 0,5, 0,250, 0,125, 0,0625 g/L olarak değişik toz konsantrasyonlarında tekrarlanarak taki toz patlaması gerçekleşmeyene kadar toz miktarı azaltılmış ve arka arkaya 3 deney serisinde patlama olmayana kadar deneyler tekrarlanmıştır. Çizelge 6.13 te gösterildiği gibi toplanan veriler yardımıyla toz konsantrasyonuna göre değişen P_{max} , $(dP/dt)_{max}$ ve bu değerden K_{st} hesaplanmıştır.

Çizelge 6.13. (+)90 (-)125 Mikron Rus Linyiti için Değişik Konsantrasyonlardaki Patlama Parametreleri

Kömür konsantrasyonu (g/Lt)	Test Tekrarları	Patlama Parametreleri		
		Pmax (bar)	dt (saniye)	dP/dt (bar/s)
0,0625	1	1,420	0,300	4,733
	2	1,390	0,300	4,633
	3	1,300	0,320	4,063
0,125	1	2,200	0,500	4,400
	2	2,450	0,520	4,712
	3	2,290	0,460	4,978
0,250	1	2,706	0,500	5,412
	2	2,473	0,553	4,470
	3	2,380	0,520	4,577
0,500	1	2,630	0,510	5,157
	2	2,520	0,565	4,460
	3	2,730	0,587	4,651
1,000	1	2,700	0,650	4,154
	2	2,500	0,570	4,386
	3	2,600	0,525	4,952

Rus linyit tozunun K_{st} değerini hesaplamak için en yüksek P_{max} ve $(dP/dt)_{max}$ değerlerini elde ettiğimiz (+)90 (-)125 mikron tanecik aralığı seçilmiştir.

Çizelge 6.13’de görüldüğü gibi (+)90 (-)125 mikron tanecik aralığında değişik toz konsantrasyonları için 3 farklı deney serisindeki P_{max} , $(dP/dt)_{max}$ nin en yüksek değerleri seçilerek ortalamaları alınmış ve bunlardan yararlanılarak K_{st} hesaplanmıştır.

$$K_{st} = (dP/dt)_{max} \cdot V^{1/3} \quad (7)$$

$$P_{max} = P_{max(seri1)} + P_{max(seri2)} + P_{max(seri3)} / 3 \quad (8)$$

$$P_{max} = (2,7 + 2,52 + 2,73) / 3$$

$$P_{max} = 2,652 \text{ bar}$$

$$(dP/dt)_{max} = (dP/dt)_{max(seri1)} + (dP/dt)_{max(seri2)} + (dP/dt)_{max(seri3)} / 3 \quad (9)$$

$$(dP/dt)_{max} = (5,41 + 4,71 + 4,97) / 3$$

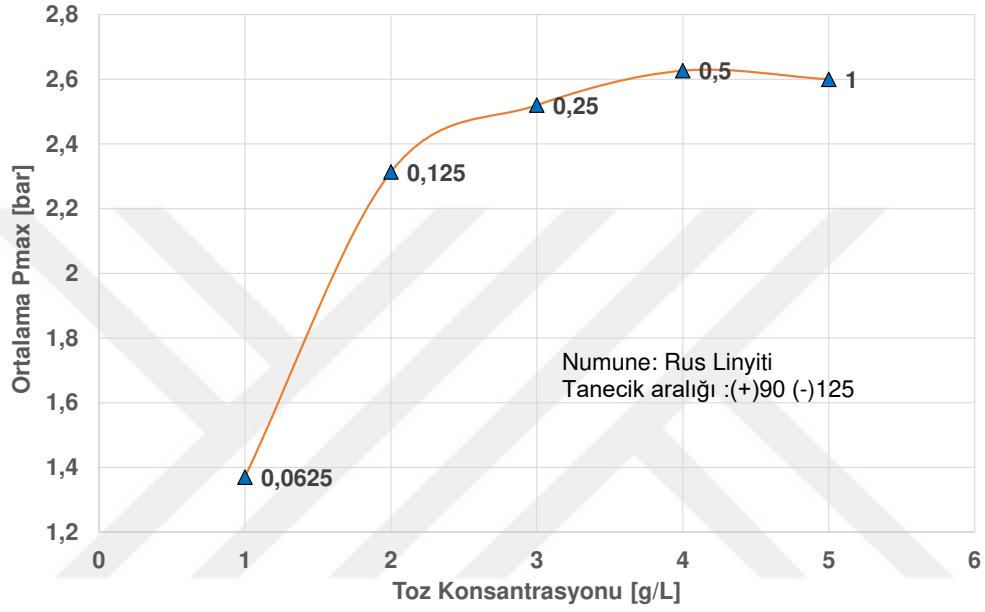
$$(dP/dt)_{max} = 5,034 \text{ bar/sn}$$

$$V = 0,001 \text{ m}^3$$

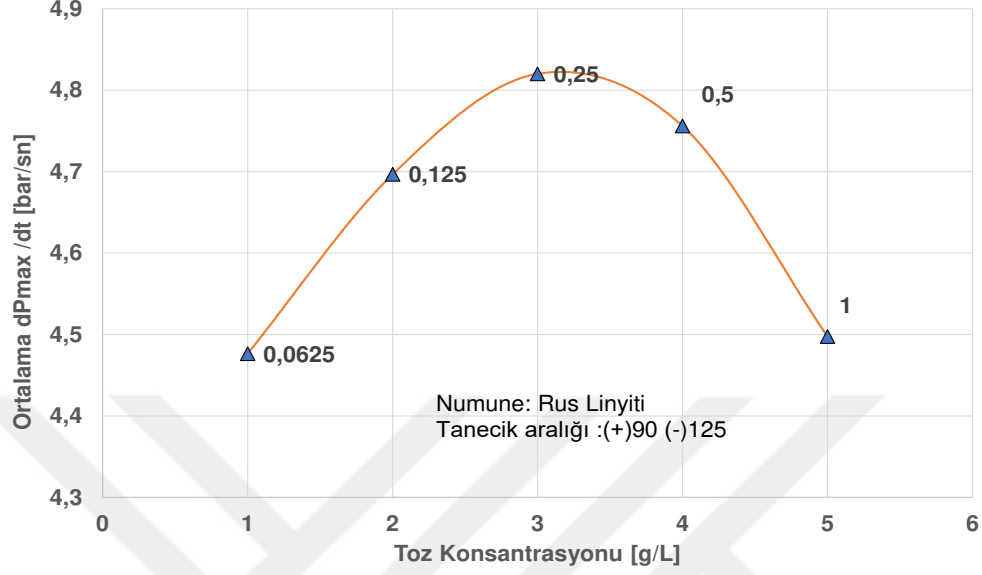
$$K_{st} = 0,5034 \text{ bar m/sn}$$

Şekil 6.41 ve Şekil 6.42 sırasıyla P_{max} ve $(dP/dt)_{max}$ değerlerini toz konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Bu testlerde toz tanecik aralığı 90 ile 125 mikron arasındadır. Şekil 6.41’den görüldüğü gibi bu kömür için toz konsantrasyonu arttıkça küre içerisindeki maksimum basınçta artmaktadır. Fakat, patlama hızı $(dP/dt)_{max}$ toz konsantrasyonu 0,250 g/L olan kadar artmakta ve sonrasında azalmaktadır (Şekil 6.42). Toz konsantrasyonun artışına karşılık P_{max} ve

$(dP/dt)_{\max}$ artması beklenen bir durumdur. Benzer şekilde toz konsantrasyonunun belli bir değerinden sonrasında da patlama hızının düşmesi de beklenen bir durumdur.



Şekil 6.41. Rus Linyit Tozu Konsantrasyonunun $P_{\max}$ 'a Etkisi



Şekil 6.42. Rus Linyit Tozu Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{\max}$ 'a Etkisi

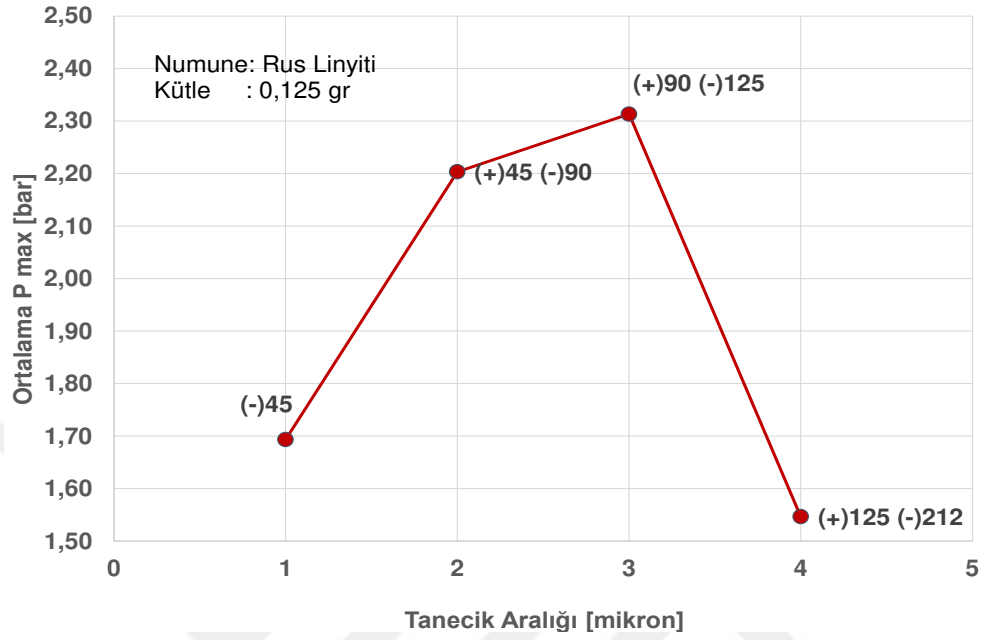
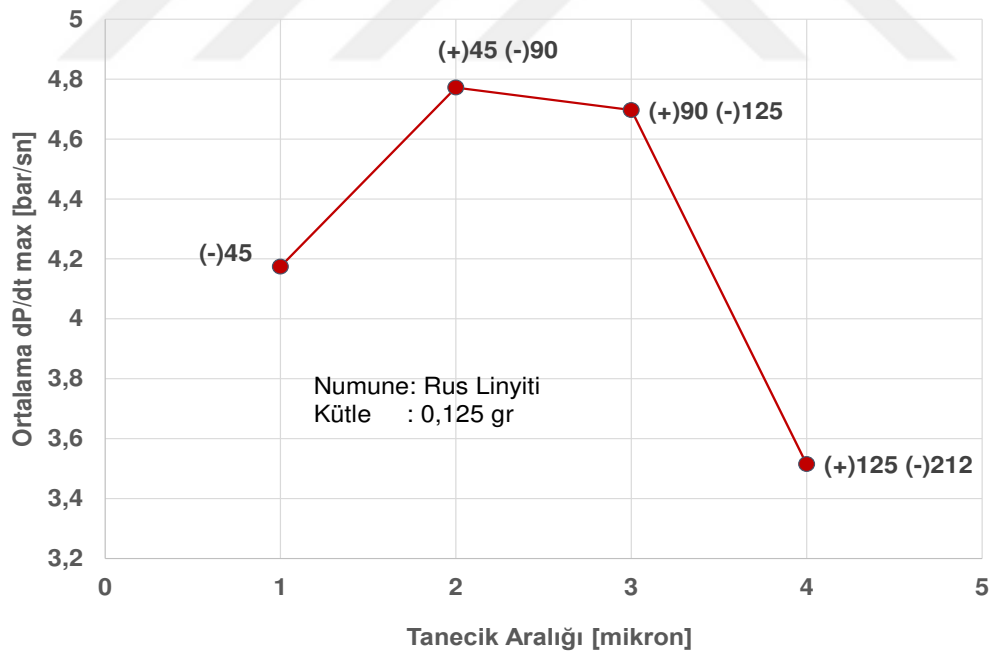
Tanecik aralığının toz patlamaları üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla Rus linyiti tozları kısmi olarak kurutulup (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron tanecik aralıklarına ayrılarak atmosferik şartlar altında 0,125 g/L toz konsantrasyonu kullanarak deneyler yapılmıştır.

Küre içerisinde patlama gerçekleştiği zaman basınç sensörü, ışık sensörü ve sıcaklık sensörü verileri datalogger tarafından kayıt altına alınarak daha sonra bir bilgisayar yardımıyla analizleri yapılmıştır. Elde edilen veriler ve analiz sonuçları Çizelge 6.14'te özetlenmiştir.

Çizelge 6.14. 0,125 g/L Rus Linyit Tozu Tanecik Aralığının Patlama Parametrelerine Etkisi

Patlama Parametreleri				
Tanecik Boyutu (mikron)	Deney Serisi	P _{max} (bar)	dt (saniye)	dP/dt (bar/s)
(-45)	1	1,710	0,400	4,275
	2	1,730	0,440	3,932
	3	1,640	0,380	4,316
(+)45 (-)90	1	2,150	0,620	3,468
	2	2,240	0,360	6,222
	3	2,220	0,480	4,625
(+)90 (-)125	1	2,200	0,500	4,400
	2	2,450	0,520	4,712
	3	2,290	0,460	4,978
(+)125 (-)212	1	1,600	0,440	3,636
	2	1,510	0,440	3,432
	3	1,530	0,440	3,477

Şekil 6.43 ve Şekil 6.44 sırasıyla P_{max} ve $(dP/dt)_{max}$ değerleri farklı tanecik büyüklüklerine göre gösterilmektedir. Bu testlerde kullanılan toz konsantrasyonu 0,125 g/L'dir. Her iki şekilden de görüldüğü gibi 45 mikron altı ve 125 mikron üzeri toz tanecikleri için P_{max} ve $(dP/dt)_{max}$ değerleri 45 mikron üzeri ve 125 mikron altı toz taneciklerine göre daha düşüktür.

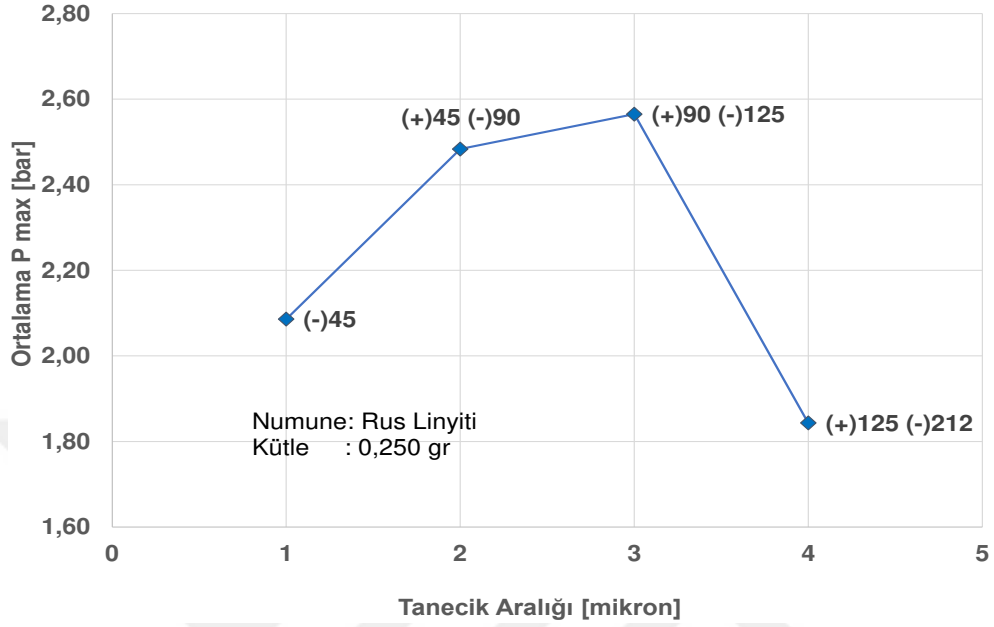
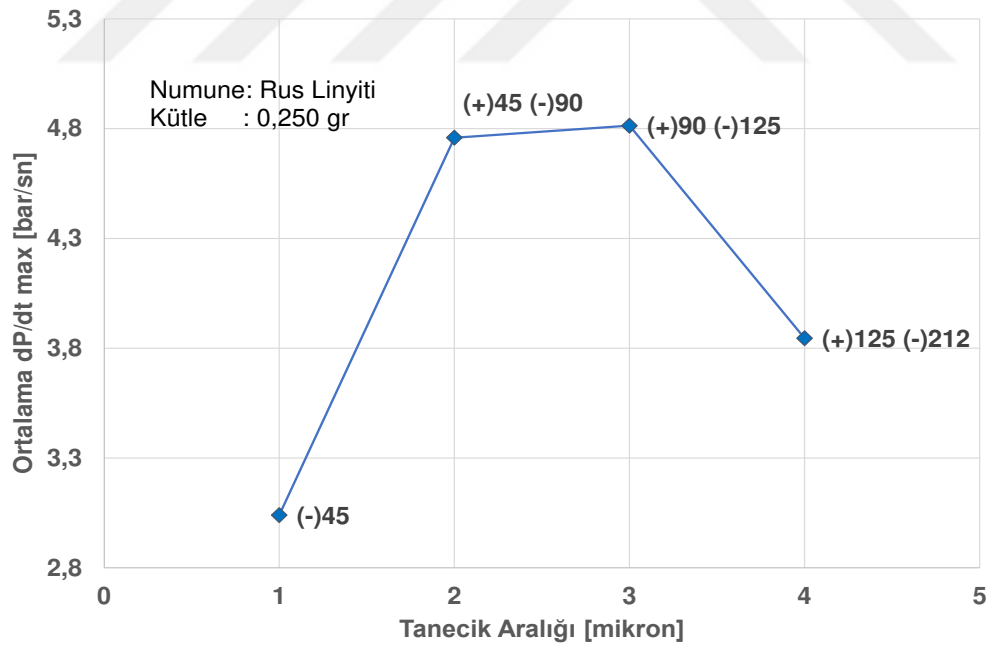
Şekil 6.43. 0,125 g/L Rus Linyit Tozu Tanecik Boyutunun $P_{\max}$ 'a EtkisiŞekil 6.44. 0,125 g/L Rus Linyit Tozu Tanecik Boyutunun $(dP/dt)_{\max}$ 'a Etkisi

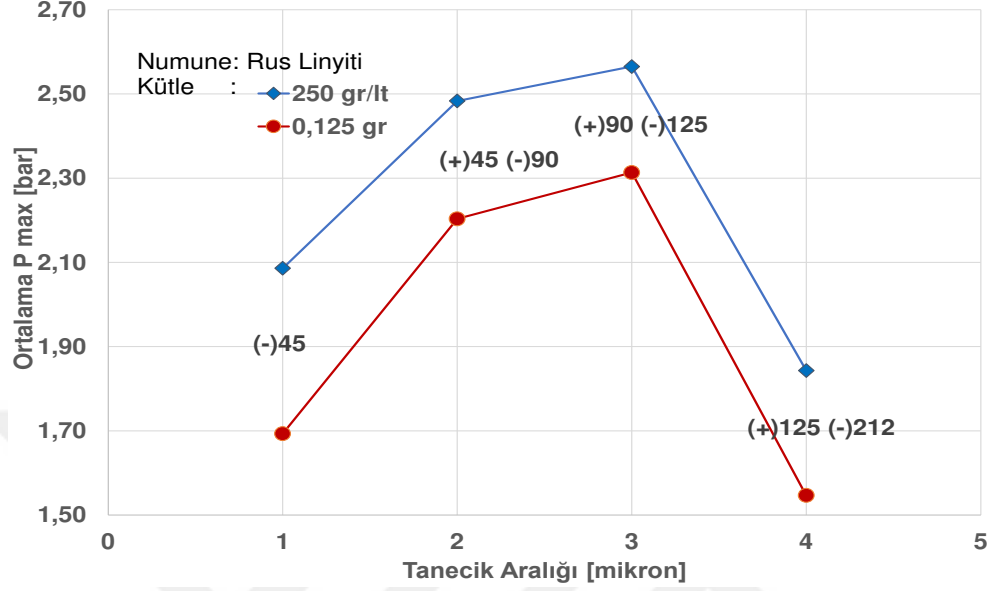
Testlerin bu kısmında toz konsantrasyonu 0,250 g/L olacak şekilde artırılmıştır. Bu konsantrasyondaki Rus linyit tozu için tanecik aralığının toz patlamaları üzerindeki etkisini görebilmek amacı ile aynı deneyler (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron tanecik aralıklarına ayrılarak tekrarlanmıştır. Elde edilen veriler ve analiz sonuçları Çizelge 6.15'te özetlenmiştir.

Çizelge 6.15. 0,250 g/L Rus Linyit Tozu Tanecik Boyutunun Patlama Parametrelerine Etkisi

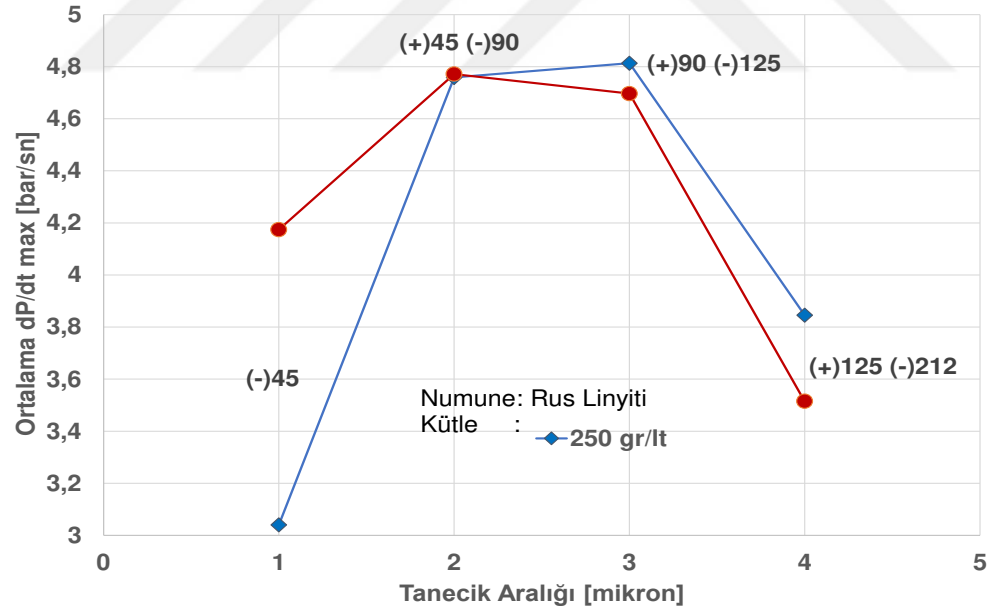
Patlama Parametreleri				
Tanecik Boyutu (mikron)	Deney Serisi	P _{max} (bar)	dt (saniye)	dP/dt (bar/s)
(-45)	1	2,050	0,810	2,531
	2	1,995	0,620	3,218
	3	2,340	1,100	2,127
(+)45 (-)90	1	2,590	0,720	3,597
	2	2,350	0,450	5,222
	3	2,510	0,460	5,457
(+)90 (-)125	1	2,706	0,500	5,412
	2	2,473	0,553	4,470
	3	2,380	0,520	4,577
(+)125 (-)212	1	1,820	0,460	3,957
	2	1,780	0,500	3,560
	3	1,930	0,480	4,021

Şekil 6.45 ve Şekil 6.46 sırasıyla P_{max} ve (dP/dt)_{max} değerlerini farklı boyutta gruplanmış toz taneciklerine göre göstermektedir. Rus kömür tozu konsantrasyonu 0,250 g/L dir. P_{max} ve (dP/dt)_{max} değerlerinin her iki toz konsantrasyonu için de 45 mikron altı ve 125 mikron üzeri toz tanecikleri için 45 mikron üzeri ve 125 mikron altı toz taneciklerine göre daha düşük olduğu görülmektedir.

Şekil 6.45. 0,250 g/L Rus Linyiti Tozu Tanecik Boyutunun P_{max} 'a EtkisiŞekil 6.46. 0,250 g/L Rus Linyiti Tozu Tanecik Aralığının $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi



Şekil 6.47. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Rus Linyit Tozu Tanecik Aralığının P_{max} 'a Etkisinin Kıyası

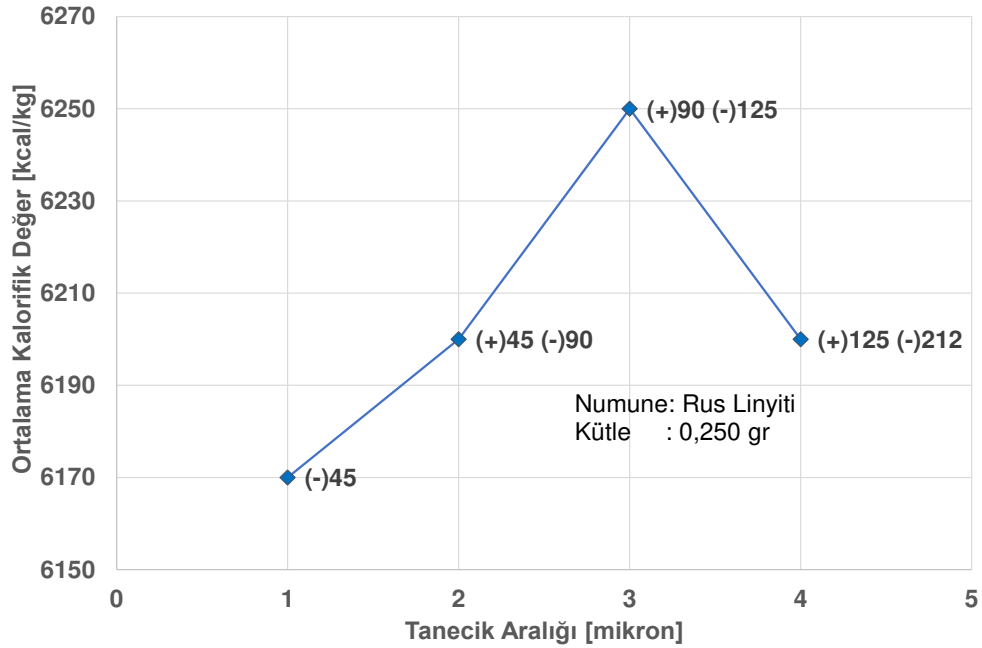


Şekil 6.48. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Rus Linyit Tozu Tanecik Aralığının $(dP/dt)_{max}$ Etkisinin Kıyası

Şekil 6.47 ve Şekil 6.48 'da sırasıyla $P_{\max}$ ve $(dP/dt)_{\max}$ değerleri iki farklı toz konsantrasyonu için kıyaslamaktadır.

Şekil 6.49'da gösterilen kalorifik değerler) standart bomba kalorimetre ile yapılan ölçümlerin sonucunu göstermektedir. Bu sonuçlara göre toz tane irilik aralığı gubu olan 90 mikron ve 125 mikron arası tanecikler için alt ısı değeri en yüksek değere ulaşmıştır. Benzer durum daha önceki bölümde Soma linyitlerinde de gözlemlenmiş olup, maksimum basınç değerinin her iki kömürde de yaklaşık olarak 90 mikron civarında çıkmasının açıklanmasına yardımcı olmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen toz patlama küresi ile ölçülen kalorifik değerler Bölüm 6.6'da anlatılmış ve standart bomba kalorimetre ile yapılan ölçümlerle kıyaslanmıştır. Böylece bu çalışmada geliştirilen toz patlama küresinin doğrulaması bu metot kullanılarak da gerçekleştirilmiştir.



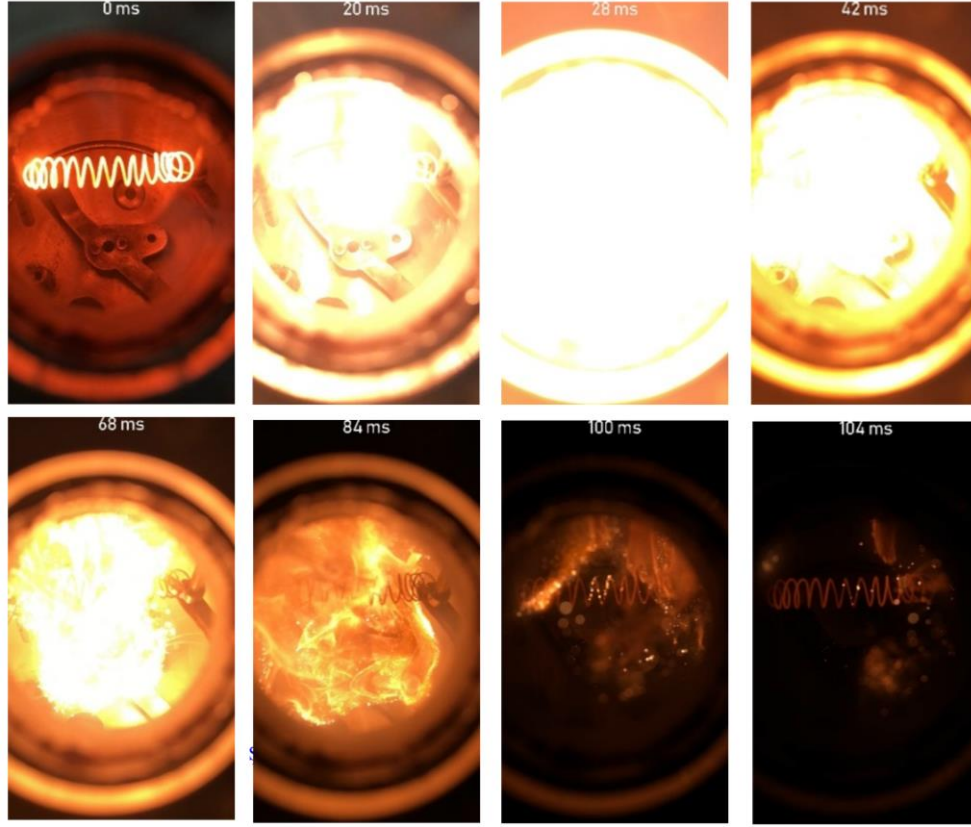
Şekil 6.49. Rus Linyit Tozu Tanecik Aralığıyla Kalorifik Değer Değişimi

6.3. Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Patlama Deneyleri

Güney Afrika bitümlü kömür tozu için fiziksel ve kimyasal analizler yapılmış ve sonuçlar Çizelge 5.7 da özetlenmiştir.

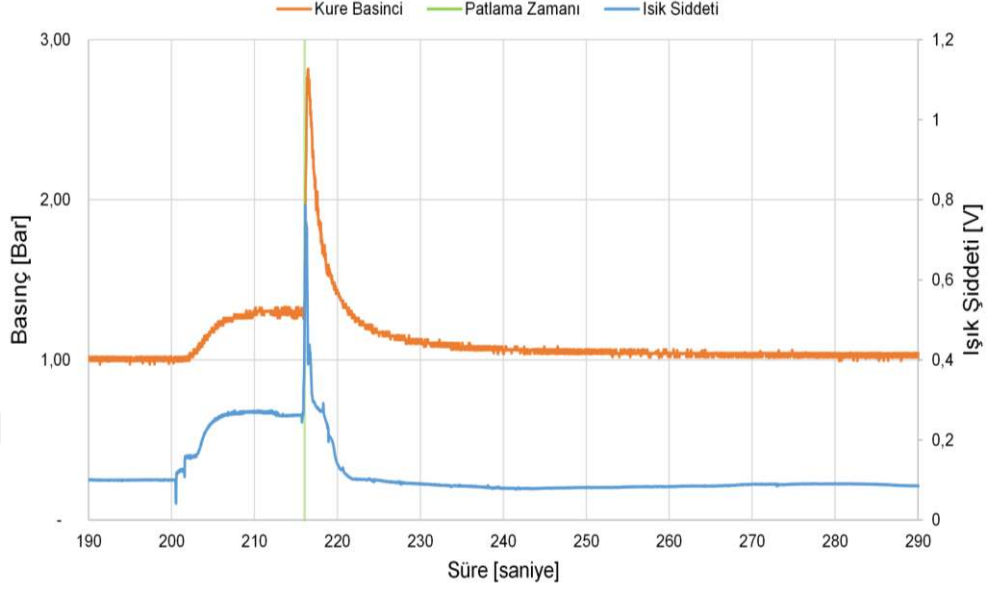
Patlama deneylerine başlarken kömür tozu sarsak elek yardımıyla tanecik aralığı (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron olacak şekilde ayrılarak etüv içerisinde düşük sıcaklıkta kömür nemi kısmi (%4) olarak alınmıştır. Toz konsantrasyonları olarak 0.25 g/L ve 0.125 g/L olarak belirlenen ve nemi alınmış kömür tozları küre üzerinde bulunan toz toplama haznesine yerleştirilip deney koşullarına göre toz patlama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Küre içerisinde patlama gerçekleştiği anda basınç sensörü, ışık sensörü ve sıcaklık sensörü verileri datalogger tarafından kayıt altına alınarak daha sonra bilgisayar vasıtasıyla analizleri yapılmıştır. Bütün kombinasyonların 3 defa tekrarı yapılmıştır. Bu kömürle yaptığımız deneylere örnek olması açısından aşağıda deney serilerinden birinin patlama sırasından gözlemlene penceresinden elde edilen görüntüler Şekil 6.50'de yer almaktadır. 0,250 g/L toz konsantrasyonu, (+)90 (-)125 mikron tane aralığı ve 3500 Joule kıvılcım enerjisi kullanılarak gerçekleştirilen patlama deneylerinin gözlem penceresinden alınan görüntüleri kameraya çekilmiş ve aynı zamanda da fotoğraflanmıştır.

Kısmi olarak kurutulmuş Güney Afrika bitümlü ithal kömür tozu 1 L'lik toz patlama küresindeki patlama görüntülerinden birkaçı Şekil 6.50'de gösterilmektedir.

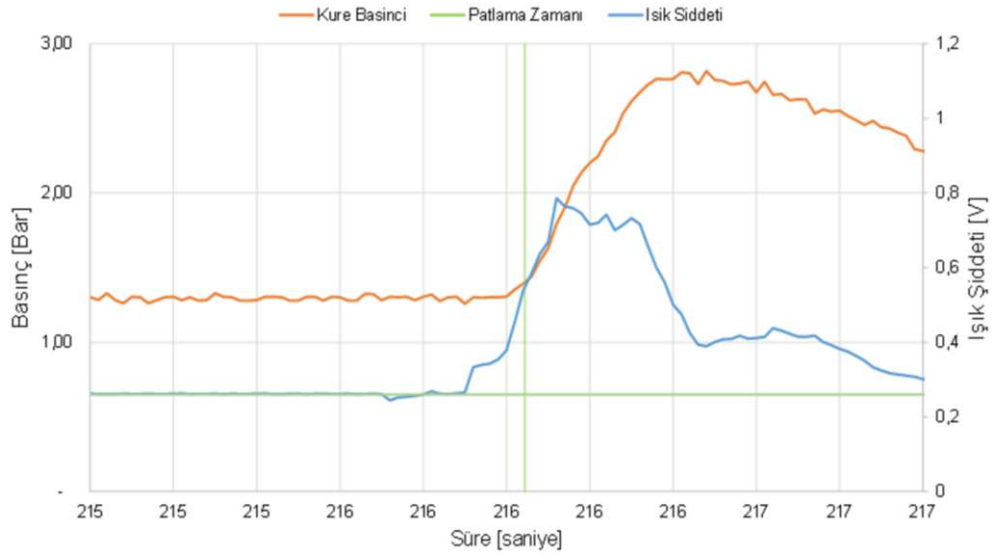


Şekil 6.50. Güney Afrika Kömür Tozu Patlama Görüntüleri

Önceki testlere benzer şekilde, patlama küresi içerisinde patlama gerçekleşmeden hemen önce başlamak üzere basınç sensörü, ışık sensörü ve sıcaklık sensörü verileri datalogger tarafından kayıt alma işlemi başlatılmıştır. Şekil 6.51 ve Şekil 6.52 1 L'lik patlama küresi içerisindeki basınç ve ışık şiddetlerinin zamanla değişimini göstermektedir. Şekil 6.52'de patlama anındaki basınç ve ışık şiddetleri zaman serilerinin genişletilmiş halini göstermektedir. Daha önceki kısımda da üzerinde vurgulandığı gibi, ışık sensörünün küre içi basınç dalgalanmalarına karşı tepkisinin çok daha hızlı olduğu bu şekillerden de açıkça görülebilmektedir.



Şekil 6.51. Patlama Anı Basınç ve Işık Sensörü Verileri



Şekil 6.52. Patlama Anı Basınç ve Işık Sensörü Verileri – Büyütülmüş

Patlama konsantrasyonunu alt sınırı belirleyebilmek amacı ile Güney Afrika bitümlü kömür tozu deney numuneleri EN-14034-3 standardı dikkate alınarak

hazırlanmıştır. Güney Afrika Bitümlü kömür 1 g/lt toz konsantrasyonu ile başlayarak 0,5, 0,250, 0,125, 0,0625 g/L olarak değişik toz konsantrasyonlarında tekrarlanmıştır. Bu tekrarlar, toz patlamasının gerçekleşmediği minimum limitteki toz konsantrasyon değerine ulaşıncaya kadar devam etmiştir. Testler, Çizelge 6.16'da gösterildiği gibi, herbir toz konsantrasyonu için arka arkaya 3 defa tekrarlanmıştır. Toplanan veriler yardımıyla toz konsantrasyonuna göre değişen P_{max} , $(dP/dt)_{max}$ ve K_{st} hesaplanmıştır.

Çizelge 6.16. (+)45 (-)90 Mikron Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Değişik Konsantrasyonlarda Patlama Parametreleri

Patlama Parametreleri				
Kömür konsantrasyonu (g/lt)	Test Tekrarları	Pmax (bar)	dt (saniye)	dP/dt (bar/s)
0,0625	1	1,950	0,350	5,571
	2	2,000	0,380	5,263
	3	1,900	0,330	5,758
0,125	1	2,310	0,420	5,500
	2	2,470	0,360	6,861
	3	2,740	0,460	5,957
0,250	1	3,340	0,860	3,884
	2	3,250	0,520	6,250
	3	3,670	0,480	7,646
0,500	1	3,300	0,560	5,893
	2	3,400	0,590	5,763
	3	3,350	0,580	5,776
1,000	1	3,000	0,570	5,263
	2	3,220	0,560	5,750
	3	3,100	0,550	5,636

Güney Afrika bitümlü kömür tozu için K_{st} değeri hesaplanmasında en yüksek P_{max} ve $(dP/dt)_{max}$ değerlerini elde ettiğimiz (+)45 (-)90 mikron tanecik aralığı seçilmiştir. Çizelge 6.16'da görüldüğü gibi (+)45 (-)90 mikron tanecik

aralığında değişik toz konsantrasyonları için $P_{\max}$, $(dP/dt)_{\max}$ 'nin en yüksek değerleri seçilerek ortalamaları alınmış ve bunlardan yararlanılarak K_{st} (patlama indeksi) aşağıda gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$K_{st} = (dP/dt)_{\max} \cdot V^{1/3} \quad (10)$$

$$P_{\max} = P_{\max(\text{seri1})} + P_{\max(\text{seri2})} + P_{\max(\text{seri3})} / 3 \quad (11)$$

$$P_{\max} = (3,34 + 3,4 + 3,67) / 3$$

$$P_{\max} = 3,47 \text{ bar}$$

$$(dP/dt)_{\max} = (dP/dt)_{\max(\text{seri1})} + (dP/dt)_{\max(\text{seri2})} + (dP/dt)_{\max(\text{seri3})} / 3 \quad (12)$$

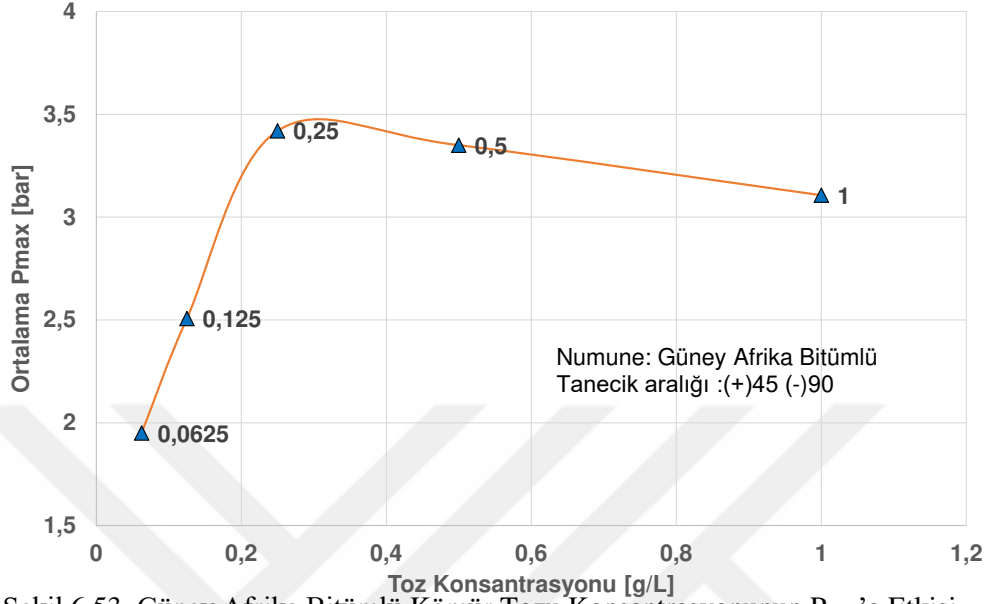
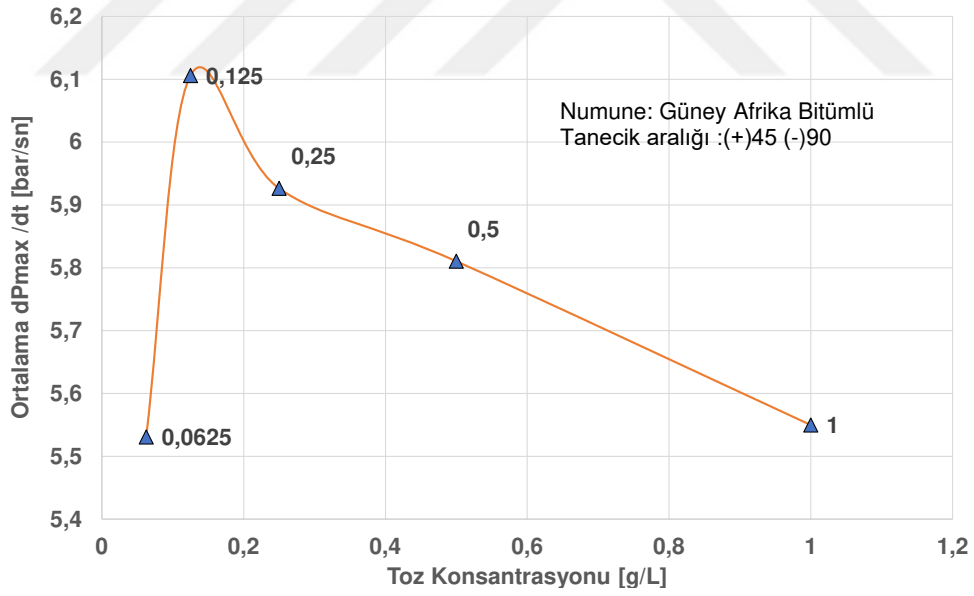
$$(dP/dt)_{\max} = (5,89 + 6,86 + 7,64) / 3$$

$$(dP/dt)_{\max} = 6,799 \text{ bar/sn}$$

$$V = 0,001 \text{ m}^3$$

$$K_{st} = 0,679 \text{ bar m/sn}$$

Şekil 6.53 ve Şekil 6.54 yapılan test sonuçları gösterilmektedir. Deneylerde ölçülen $P_{\max}$ ve $(dP/dt)_{\max}$ değerleri küre içerisindeki toz konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Şekil 6.53'ten görüleceği gibi (+)45 (-)90 mikron tanecik aralığında 0,250 g/L toz konsantrasyonlarında $P_{\max}$ en yüksek değeri almıştır. Şekil 6.54'te $(dP/dt)_{\max}$ 0,125 g/L toz konsantrasyonunda en yüksek seviyelere ulaşmıştır. $P_{\max}$ ve $(dP/dt)_{\max}$ değerlerinin bazı malzemelerde farklı konsantrasyonlarda oluşması normal bir durumdur. Bu kömür için özellikle bu durumun kömürdeki uçuculardan kaynaklandığı düşünülmüştür.

Şekil 6.53. Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Konsantrasyonunun P_{max} 'a EtkisiŞekil 6.54. Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi

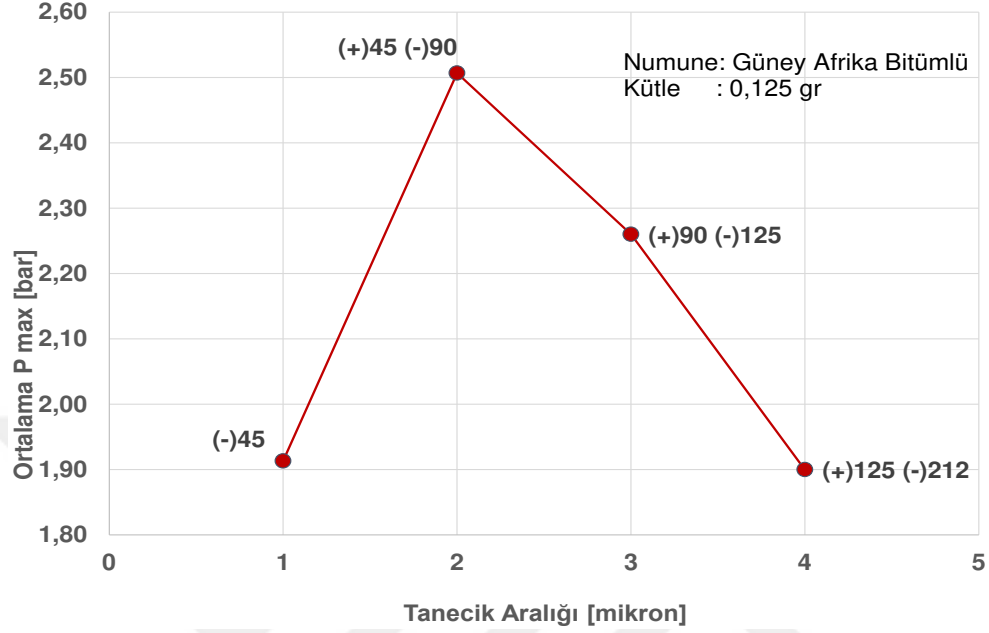
Tanecik aralığının toz patlamaları üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla bu bölümünde Güney Afrika Bitümlü kömür tozları kısmi olarak kurutulup (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron tanecik aralıklarına ayrılarak toz konsantrasyonu 0,125 g/L olarak deneyler yapılmıştır. Elde edilen veriler ve analiz sonuçları Çizelge 6.17’de özetlenmiştir.



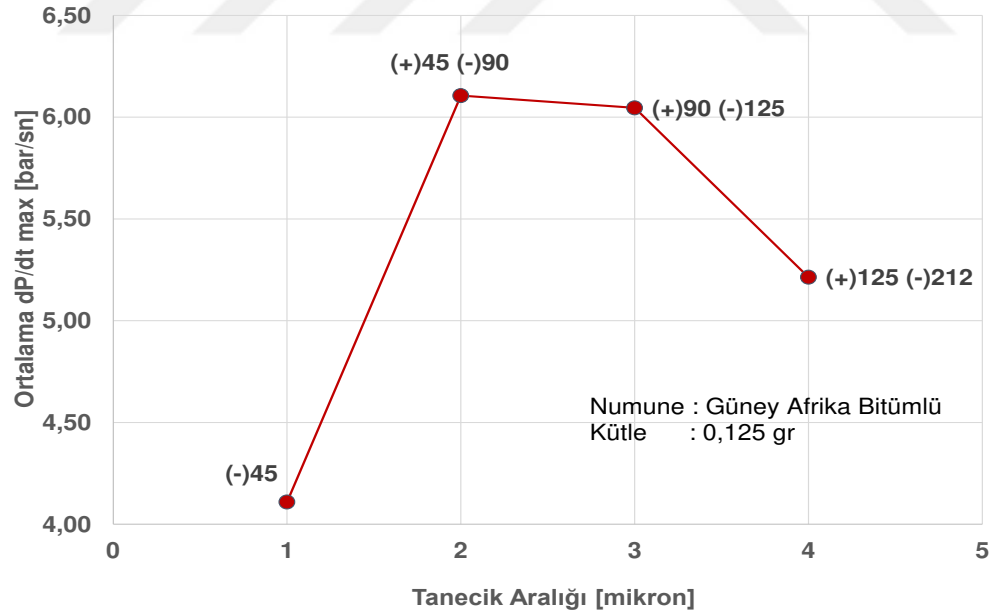
Çizelge 6.17. 0,125 g/L Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Aralığının Patlama Parametrelerine Etkisi

Patlama Parametreleri				
Tanecik Boyutu (mikron)	Deney Serisi	P _{max} (bar)	dt (saniye)	dP/dt (bar/s)
(-45)	1	1,920	0,480	4,000
	2	1,870	0,480	3,896
	3	1,950	0,440	4,432
(+)45 (-)90	1	2,310	0,420	5,500
	2	2,470	0,360	6,861
	3	2,740	0,460	5,957
(+)90 (-)125	1	2,020	0,360	5,611
	2	2,330	0,380	6,132
	3	2,430	0,380	6,395
(+)125 (-)212	1	1,820	0,320	5,688
	2	1,950	0,400	4,875
	3	1,930	0,380	5,079

Toz tane irilik dağılımlarının patlama karakteristikleri, sırasıyla P_{max} ve (dP/dt)_{max} değerleri Şekil 6.55 ve Şekil 6.56’te gösterilmektedir. Bu çalışmada da daha önceki testlerde olduğu gibi maksimum patlama basıncı toz tane iriliğinin yaklaşık olarak 90 mikron civarlarında olduğu toz tane iriliğinde gözlemlenmiştir.



Şekil 6.55. 0,125 g/L Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Boyutunun P_{max} 'a Etkisi



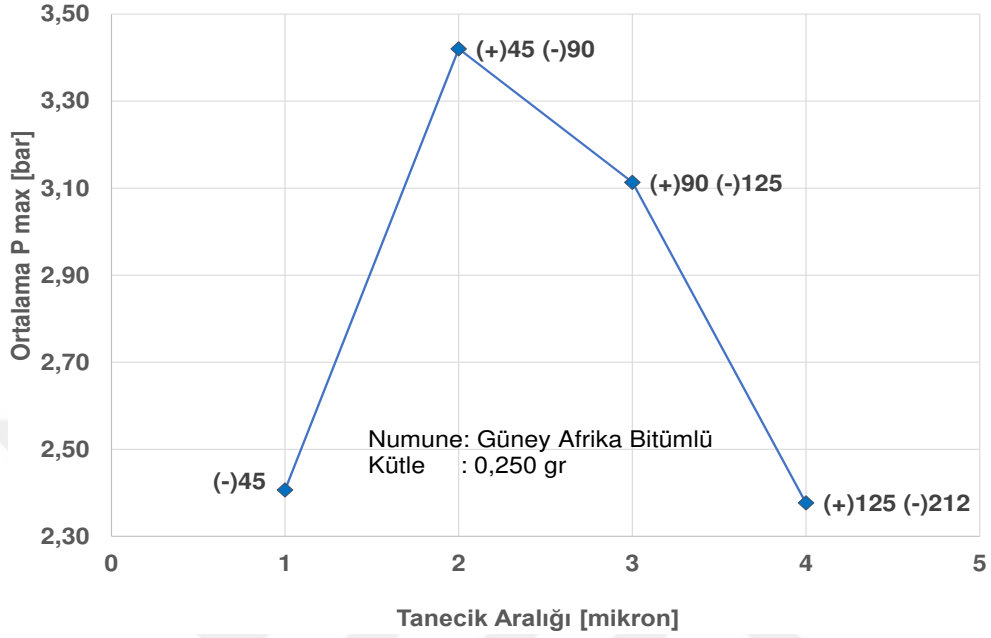
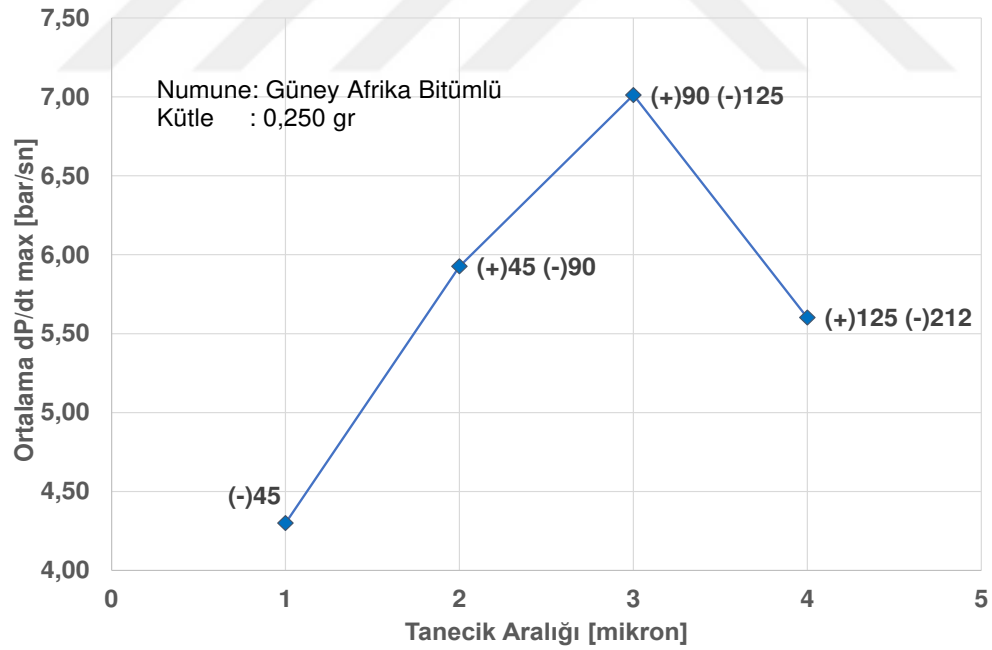
Şekil 6.56. 0,125 g/L Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Aralığının $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi

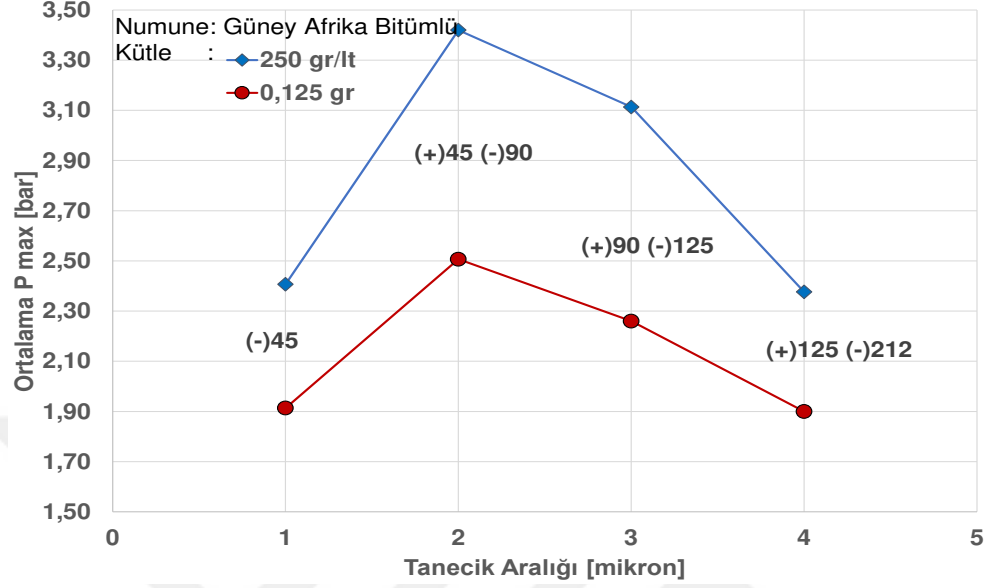
Diğer tozlar ile yapılan testlerde olduğu gibi Güney Afrika Bitümlü kömür tozu için de toz konsantrasyonun toz patlaması üzerindeki etkisini anlamak için 0,250 g/L toz konsantrasyonu ile testler tekrarlanmıştır. Her deney üç defa tekrarlanarak ortalama değerler alınmıştır. 0,250 g/L konsantrasyonu için tanecik aralığının patlama parametrelerine etkisi Çizelge 6.18’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.18. 0,250 g/L Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Aralığının Patlama Parametrelerine Etkisi

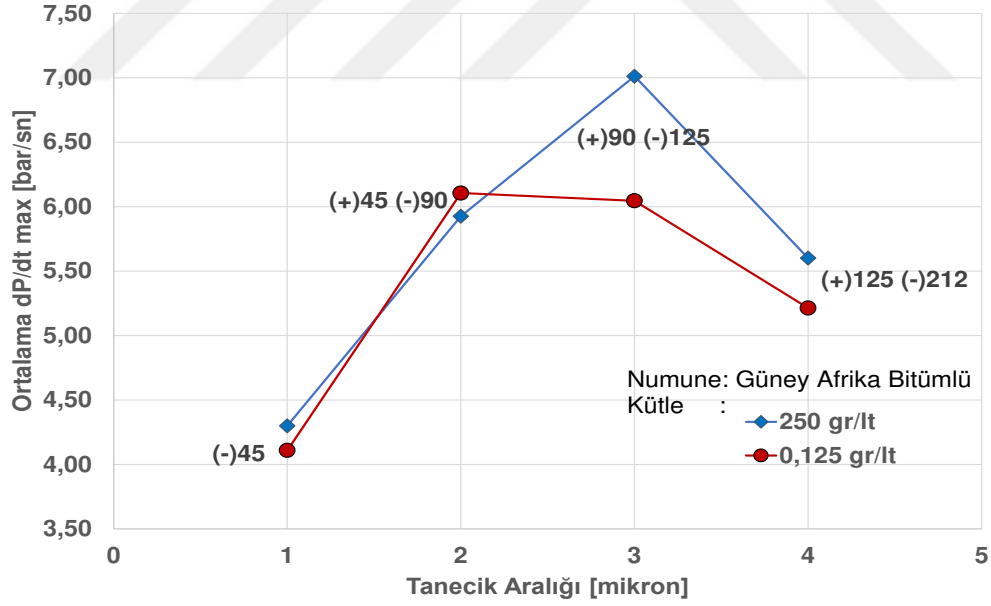
Patlama Parametreleri				
Tanecik Boyutu (mikron)	Deney Serisi	P _{max} (bar)	dt (saniye)	dP/dt (bar/s)
(-45)	1	2,140	0,540	3,963
	2	2,570	0,480	5,354
	3	2,510	0,700	3,586
(+)45 (-)90	1	3,340	0,860	3,884
	2	3,250	0,520	6,250
	3	3,670	0,480	7,646
(+)90 (-)125	1	3,540	0,420	8,429
	2	3,000	0,460	6,522
	3	2,800	0,460	6,087
(+)125 (-)212	1	2,310	0,400	5,775
	2	2,380	0,400	5,950
	3	2,440	0,480	5,083

Şekil 6.57’de dört farklı toz tanecik aralığı için ölçülen maksimum basınç (P_{max}) değerlerini göstermektedir. Maksimum patlama basıncı 90 mikron toz tanecik aralığında gerçekleşmektedir (Şekil 6.59 ve Şekil 6.60). Benzer şekilde patlama hızı tanecik aralığı 90 mikron civarlarında maksimuma ulaşmıştır.

Şekil 6.57. Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Aralığının P_{max} 'a EtkisiŞekil 6.58. Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Aralığının $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi

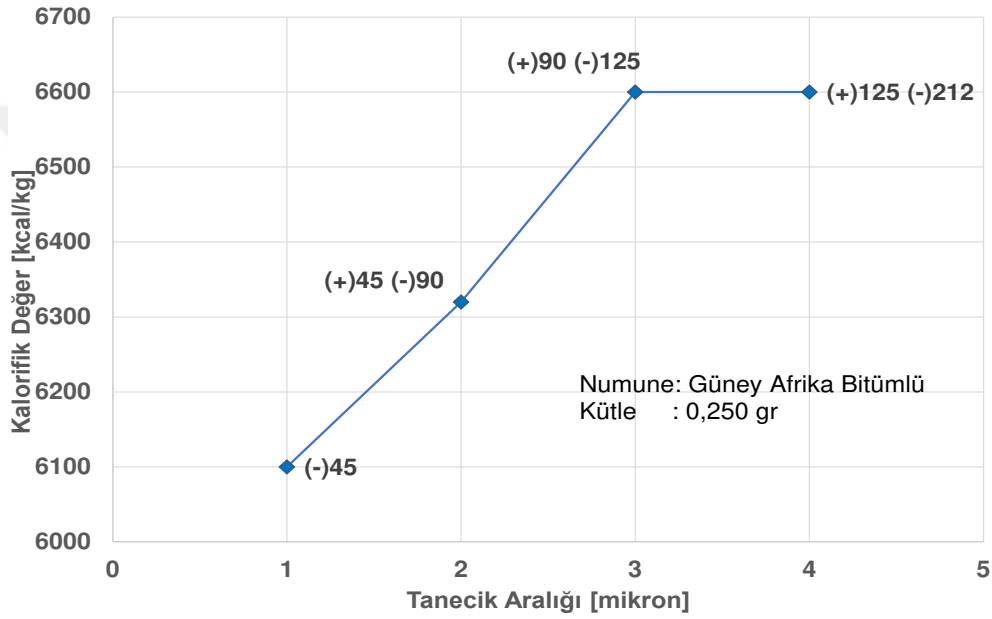


Şekil 6.59. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Aralığının P_{max} 'a Etkisinin Kıyası



Şekil 6.60. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Aralığının $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisinin Kıyası

Güney Afrika bitümlü kömürünün dört farklı toz tanecik aralığında kalorifik değerleri ölçülerek, Şekil 6.61’de özetlenmiştir. Patlama basınç ve şiddeditin maksimum olduğu partikül Aralığı olan 90 mikron civarlarında kömür kalorifik değerinin de yüksek olduğu görülmektedir ki, bu 90 mikron civarı patlama şiddet ve basıncının yüksek olmasını açıklamaktadır.



Şekil 6.61. 0,250 g/Lt Güney Afrika Bitümlü Kömür Tozu Tanecik Aralığı Kalorifik Değer Değişimi

6.4. Kolombiya-Çumra Kömür Tozu Patlama Deneyleri

Kolombiya Çumra karışım kömür tozu numuneleri fiziksel ve kimyasal analizleri Çizelge 5.8’de yer almaktadır. Deneylere başlamadan önce kömür tozları sarsak elek yardımıyla tanecik aralığı (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron olacak şekilde ayrılmıştır. Etüv içerisinde düşük sıcaklıkta kömür nemi kısmi olarak alınmıştır. Toz konsantrasyonları olarak 0,250 ve 0,125 g/L olarak belirlenen ve nemi alınmış kömür tozları toz toplama haznesine yerleştirilip deney koşullarına göre deneyler gerçekleştirilmiştir. Küre içerisinde patlama gerçekleşmeden öncesi

ve sonrası zaman dilimini kapsayacak şekilde basınç, ışık ve sıcaklık sensörleri verileri datalogger tarafından kayıt altına alınmıştır. Bu veriler bir bilgisayar yardımıyla kaydedilerek analizleri yapılmıştır. Elde edilen veriler ve analiz sonuçları Çizelge 6.19’da özetlenmiştir. Her deney üç defa tekrarlanarak ortalama değerler alınmıştır.

Çizelge 6.19. (+)45 (-) 90 Mikron Kolombiya Çumra Kömür Tozu Değişik Konsantrasyonlarda Patlama Parametreleri

Patlama Parametreleri				
Kömür konsantrasyonu (g/lt)	Test Tekrarları	P _{max} (bar)	dt (saniye)	dP/dt (bar/s)
0,0625	1	1,500	0,350	4,286
	2	1,900	0,340	5,588
	3	1,400	0,310	4,516
0,125	1	1,850	0,420	4,405
	2	2,150	0,420	5,119
	3	2,330	0,420	5,548
0,250	1	2,200	0,460	4,783
	2	2,500	0,500	5,000
	3	2,980	0,480	6,208
0,500	1	2,500	0,470	5,319
	2	2,660	0,510	5,216
	3	2,530	0,480	5,271
1,000	1	2,440	0,502	4,861
	2	2,441	0,470	5,194
	3	2,445	0,450	5,433

Kolombiya Çumra karışım kömür tozu için K_{st} değeri en yüksek P_{max} ve $(dP/dt)_{max}$ değerlerini elde ettiğimiz (+)45 (-)90 mikron tanecik aralığı seçilmiştir.

Çizelge 6.19’da görüldüğü gibi (+)45 (-)90 mikron tanecik aralığında değişik toz konsantrasyonları için 3 farklı deney serisindeki $P_{\max}$, $(dP/dt)_{\max}$ nin en yüksek değerleri seçilerek ortalamaları alınmıştır. Bu kömür tozu için en yüksek $P_{\max}$ ve $(dP/dt)_{\max}$ değerleri (+)45 (-)90 mikron tanecik aralığıdır. K_{st} değeri bu aralıkta aşağıda gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$K_{st} = (dP/dt)_{\max} \cdot V^{1/3} \quad (13)$$

$$P_{\max} = P_{\max(\text{seri1})} + P_{\max(\text{seri2})} + P_{\max(\text{seri3})} / 3 \quad (14)$$

$$P_{\max} = (2,5 + 2,66 + 2,98) / 3$$

$$P_{\max} = 2,713 \text{ bar}$$

$$(dP/dt)_{\max} = (dP/dt)_{\max(\text{seri1})} + (dP/dt)_{\max(\text{seri2})} + (dP/dt)_{\max(\text{seri3})} / 3 \quad (15)$$

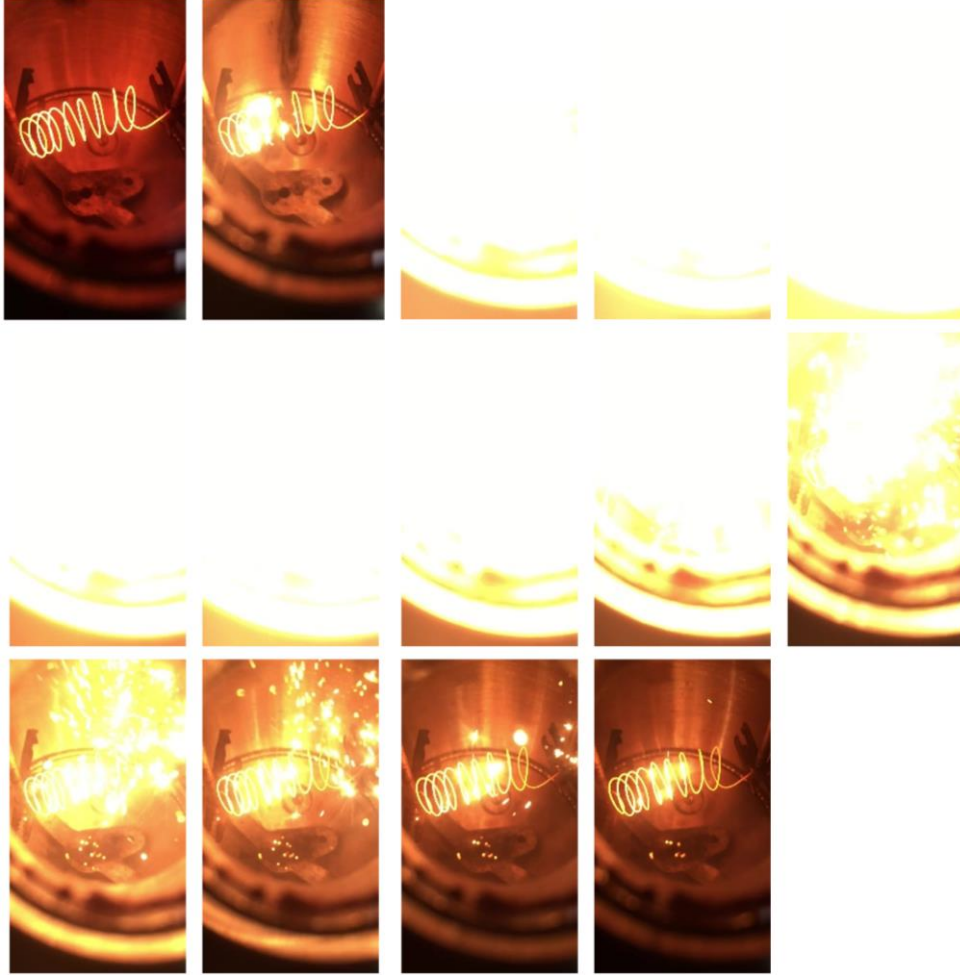
$$(dP/dt)_{\max} = (5,319 + 5,588 + 6,208) / 3$$

$$(dP/dt)_{\max} = 5,705 \text{ bar/sn}$$

$$V = 0,001 \text{ m}^3$$

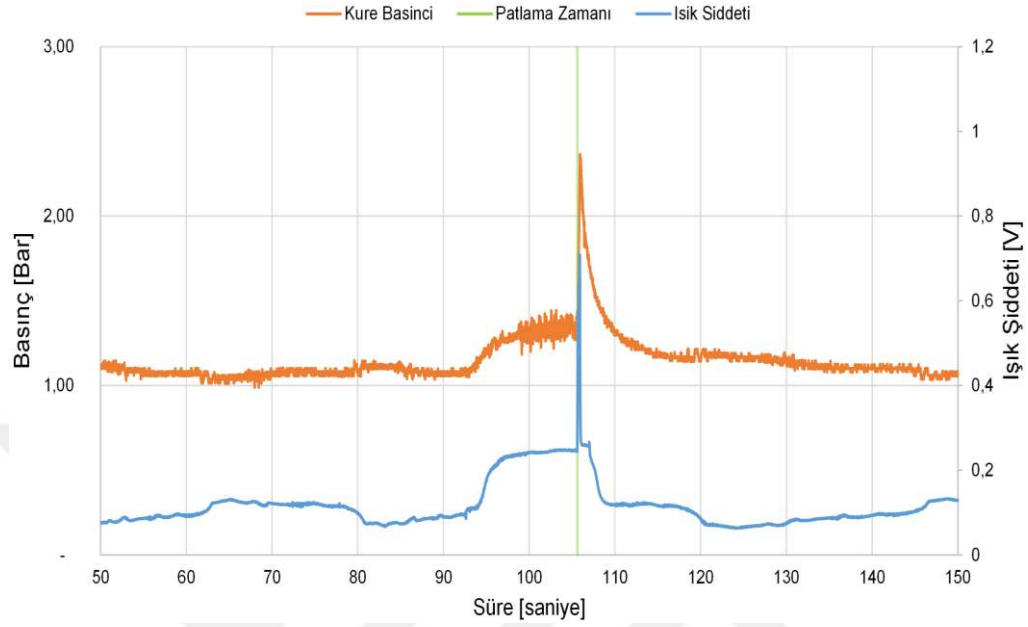
$$K_{st} = 0,5705 \text{ bar m/sn}$$

Kısmi kurutulmuş Kolombiya Çumra karışım kömür tozu için 1 L’lik toz patlama küresinde yapılan toz patlama deneylerinin görüntüleri Şekil 6.62’de gösterilmektedir.

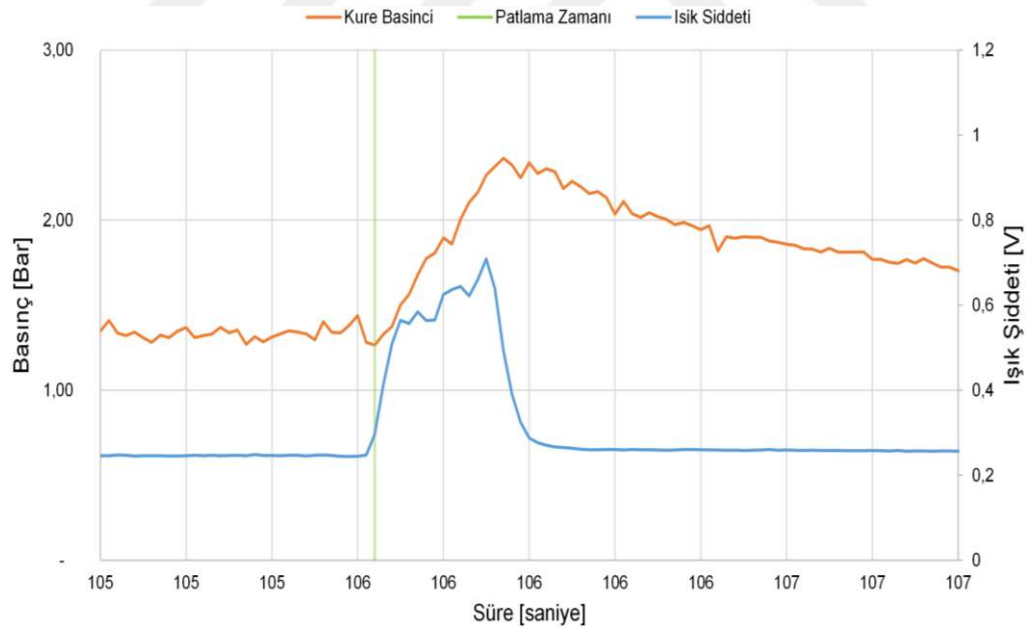


Şekil 6.62. Kolombiya Çumra Kömür Tozu Patlama Deneyi Görüntüleri

Daha önceki testlerde yapıldığı gibi, küre içerisinde patlama gerçekleşmeden hemen önce başlamak üzere basınç sensörü, ışık sensörü ve sıcaklık sensörü verileri datalogger tarafından kayıt alma işlemi başlatılmıştır. Şekil 6.63 ve Şekil 6.64 1 L küre içerisindeki basınç ve ışık şiddetlerinin zamanla değişimini göstermektedir. Şekil 6.64 patlama anındaki basınç ve ışık şiddetleri zaman serilerinin genişletilmiş halini göstermektedir.



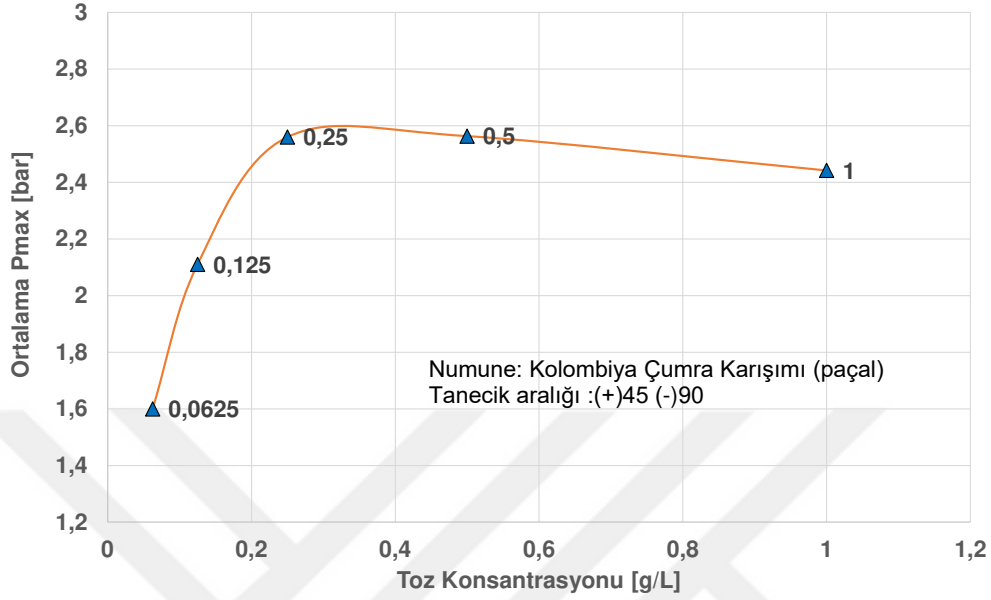
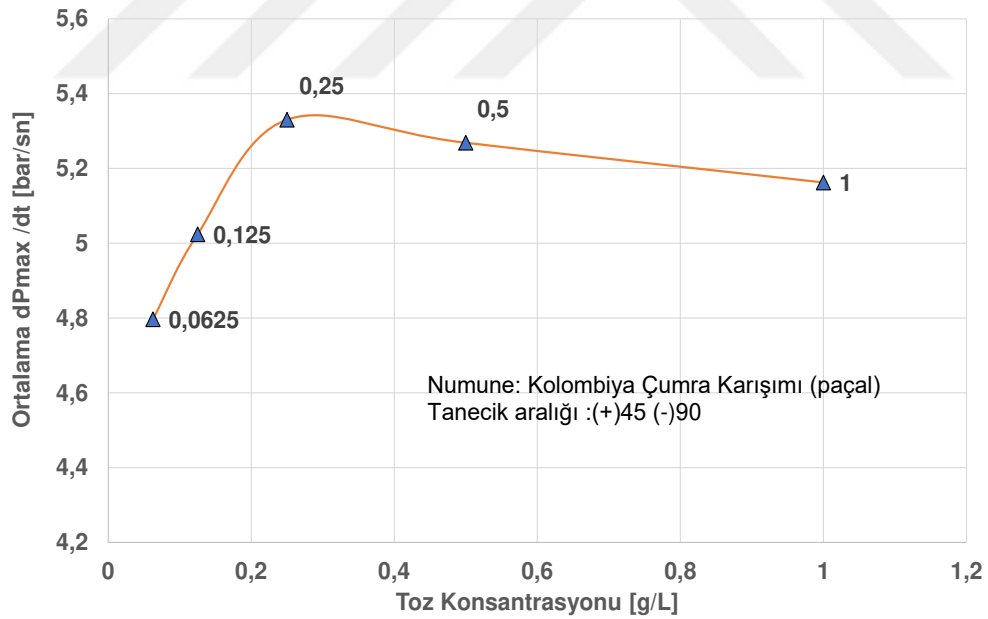
Şekil 6.63. Patlama Anı Basınç ve Işık Sensörü Verileri



Şekil 6.64. Patlama Anı Basınç ve Işık Sensörü Verileri – Büyütülmüş

Kolombiya Çumra karışım kömür tozunun patlama konsantrasyonu alt sınırı belirlemek için oluşturulan test numuneleri EN-14034-3 standardı dikkate alınarak hazırlanmıştır. 1 g/L ile başlayarak 1,0, 0,5, 0,250, 0,125, 0,0625 g/L olarak değişik toz konsantrasyonlarında tekrarlanmıştır. Bu tekrarlar, toz patlamasının gerçekleşmediği minimum limitteki toz konsantrasyon değerine ulaşıncaya kadar devam etmiştir. Testler Çizelge 6.19’da gösterildiği gibi herbir toz konsantrasyonu için arka arkaya 3 defa tekrarlanmıştır.

Toz konsantrasyonunun toz patlama karakteristikleri üzerindeki etkisini anlamak için gerçekleştirilen test sonuçları Şekil 6.65 ve Şekil 6.66’da gösterilmektedir. Toz tane irilik aralığı (+)45 (-90) mikron olan Kolombiya Çumra karışım kömür tozlarının maksimum P_{max} değeri Şekil 6.65 ve $(dP/dt)_{max}$ değeride Şekil 6.66’da toz konsantrasyonunun fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Maksimum patlama basıncı ve patlama hızı toz tane iriliğinin yaklaşık olarak 90 mikron civarlarında olduğu Güney Afrika kömüründe yapılan testlerde bir defa daha görülmüştür. (+)45 (-90) mikron tanecik aralığında Kolombiya Çumra karışım kömür tozu için 0,250 g/L toz konsantrasyonlarında P_{max} en yüksek değeri almıştır. $(dP/dt)_{max}$ da aynı şekilde 0,250 g/L’da en yüksek seviyelere ulaşmıştır. Kolombiya Çumra karışım kömür tozunda toz konsantrasyonu 0,250 g/L’den sonra P_{max} ve $(dP/dt)_{max}$ ‘de düşüş meydana gelmeye başlamıştır.

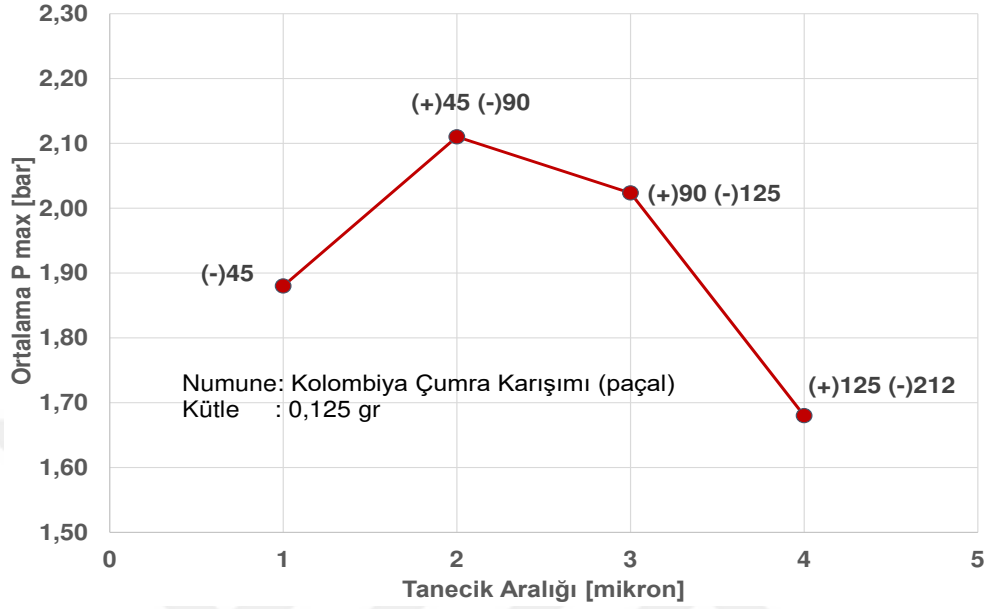
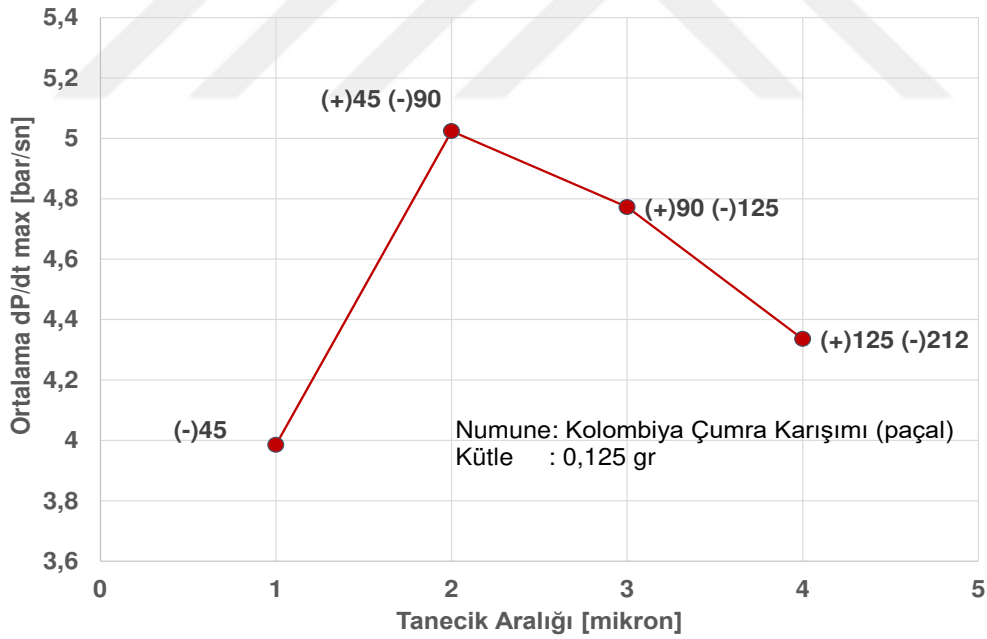
Şekil 6.65. Kolombiya Çumra Kömür Tozu Konsantrasyonunun P_{max} 'a EtkisiŞekil 6.66. Kolombiya Çumra Kömür Tozu Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi

Kolombiya Çumra karışım kömür tozları kısmi olarak kurutulup (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron tanecik aralıklarında gruplandırılarak 0,125 g/L toz konsantrasyonunda testler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.20 toz konsantrasyonu 0,125 g/L olan Kolombiya Çumra karışım kömür tozlarının tanecik boyutlarının patlama parametreleri üzerindeki etkisini tablo halinde göstermektedir. Şekil 6.67 ve Şekil 6.68 ise Çizelge 6.20’de gösterilen ölçüm sonuçlarının P_{max} ve $(dP/dt)_{max}$ değerlerini grafik olarak sunulmaktadır.

Çizelge 6.20. 0,125 g/L Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığının Patlama Parametrelerine Etkisi

Patlama Parametreleri				
Tanecik Boyutu (mikron)	Deney Serisi	Pmax (bar)	dt (saniye)	dP/dt (bar/s)
(-45)	1	1,820	0,600	3,033
	2	1,760	0,380	4,632
	3	2,060	0,480	4,292
(+)45 (-)90	1	1,850	0,420	4,405
	2	2,150	0,420	5,119
	3	2,300	0,420	5,476
(+)90 (-)125	1	1,920	0,380	5,053
	2	2,220	0,500	4,440
	3	1,930	0,400	4,825
(+)125 (-)212	1	1,620	0,340	4,765
	2	1,610	0,360	4,472
	3	1,810	0,480	3,771

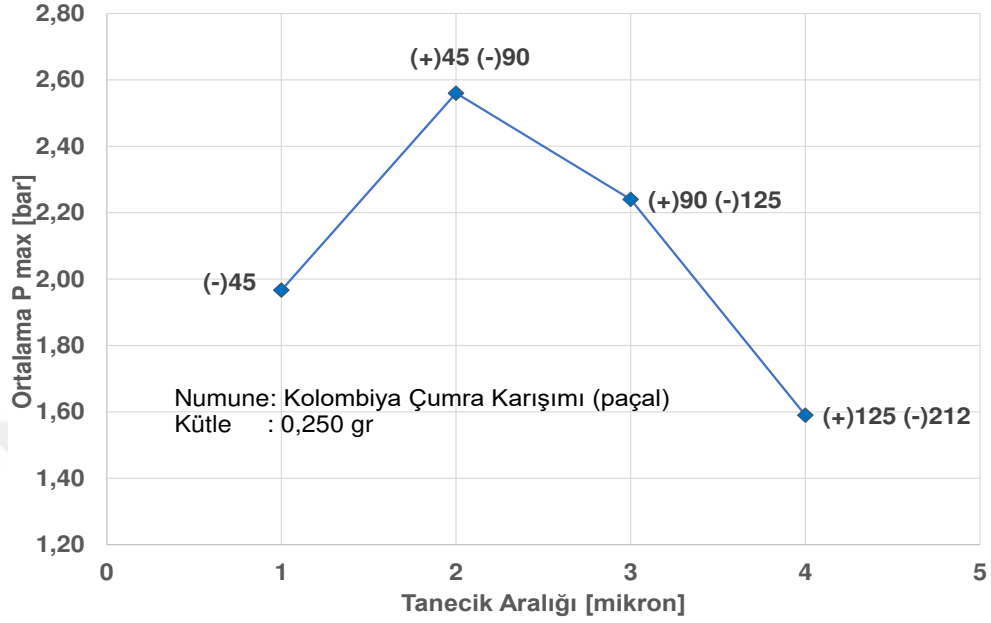
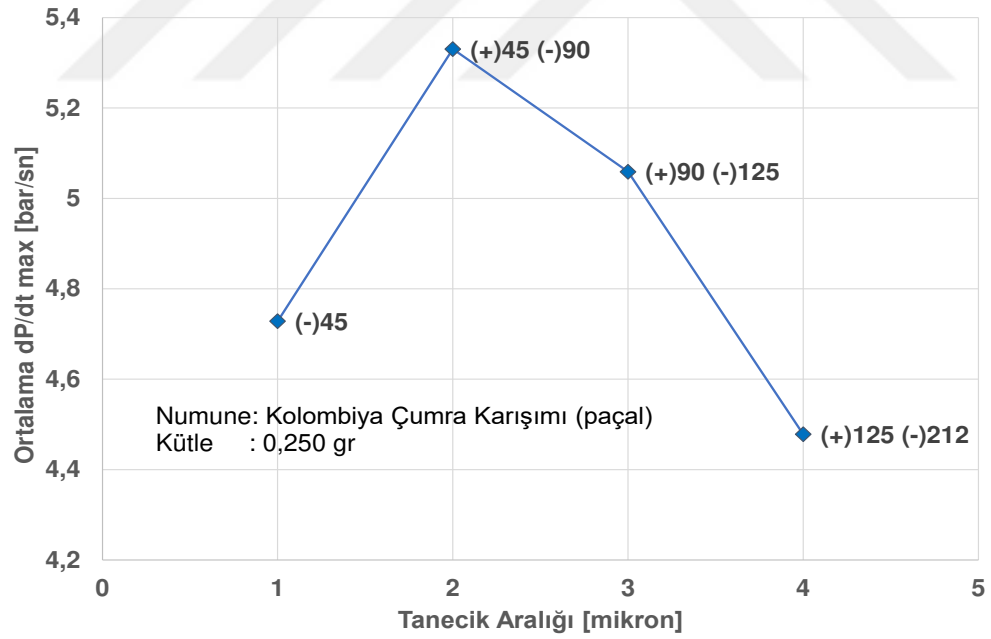
P_{max} ve $(dP/dt)_{max}$ tanecik büyüklüğünün bir fonksiyonu olarak artış göstermiş, 90 mikron tanecik aralıklarında en yüksek değere ulaşmıştır. Her iki değer de tanecik iriliği arttıkça düşüş göstermiştir. Daha önceki testlerde de tane büyüklüğüne göre bu şekilde davranış gösteren patlama karakteristiği gözlemlenmiştir.

Şekil 6.67. Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığının P_{max}'a EtkisiŞekil 6.68. Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığının (dP/dt)_{max}'a Etkisi

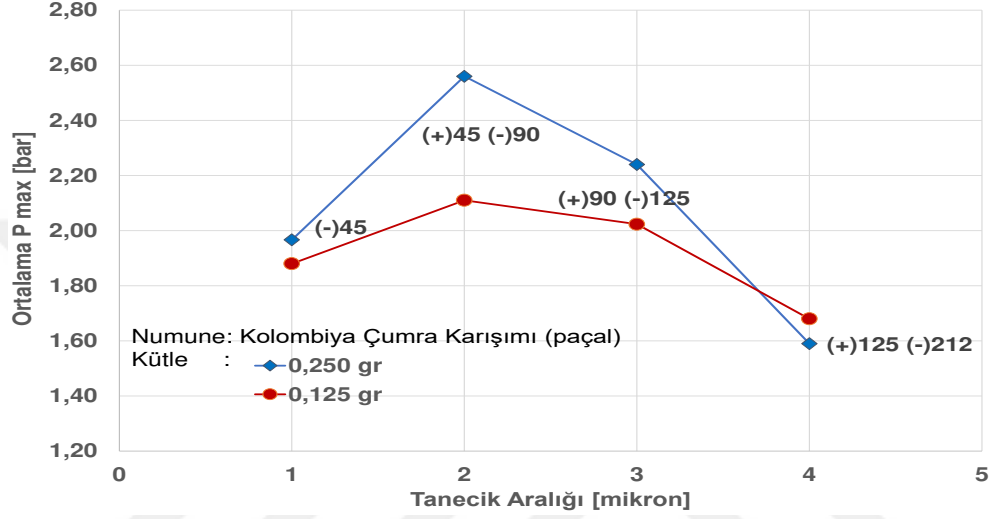
Bir önceki testlerdeki Kolombiya Çumra karışım kömür tozu konsantrasyonu iki katına yani 0,250 g/L çıkarılarak yapılan testler tekrar edilmiştir. Çizelge 6.21, Şekil 6.69 ve Şekil 6.70’de 0,250 g/L Kolombiya Çumra karışım kömürü kullanarak yapılan test sonuçlarını göstermektedir.

Çizelge 6.21. 0,250 g/L Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığının Patlama Parametrelerine Etkisi

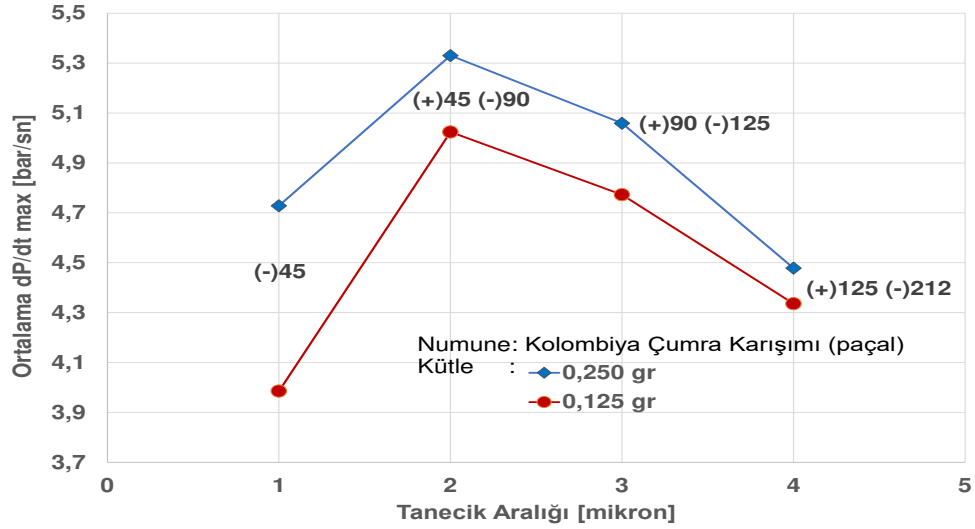
Patlama Parametreleri				
Tanecik Boyutu (mikron)	Deney Serisi	Pmax (bar)	dt (saniye)	dP/dt (bar/s)
(-45)	1	2,090	0,420	4,976
	2	1,980	0,480	4,125
	3	1,830	0,360	5,083
(+)45 (-)90	1	2,200	0,460	4,783
	2	2,500	0,500	5,000
	3	2,980	0,480	6,208
(+)90 (-)125	1	2,120	0,380	5,579
	2	2,150	0,440	4,886
	3	2,450	0,520	4,712
(+)125 (-)212	1	1,660	0,380	4,368
	2	1,560	0,400	3,900
	3	1,550	0,300	5,167

Şekil 6.69. Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığının P_{max}'a EtkisiŞekil 6.70. Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığının (dP/dt)_{max}'a Etkisi

Şekil 6.71 ve Şekil 6.72’de $P_{\max}$ ve $(dP/dt)_{\max}$ toz tanecik aralığının fonksiyonu olarak, 0,125 g/L ve 0,250 g/L toz konsantrasyonları için kıyaslamaktadır.

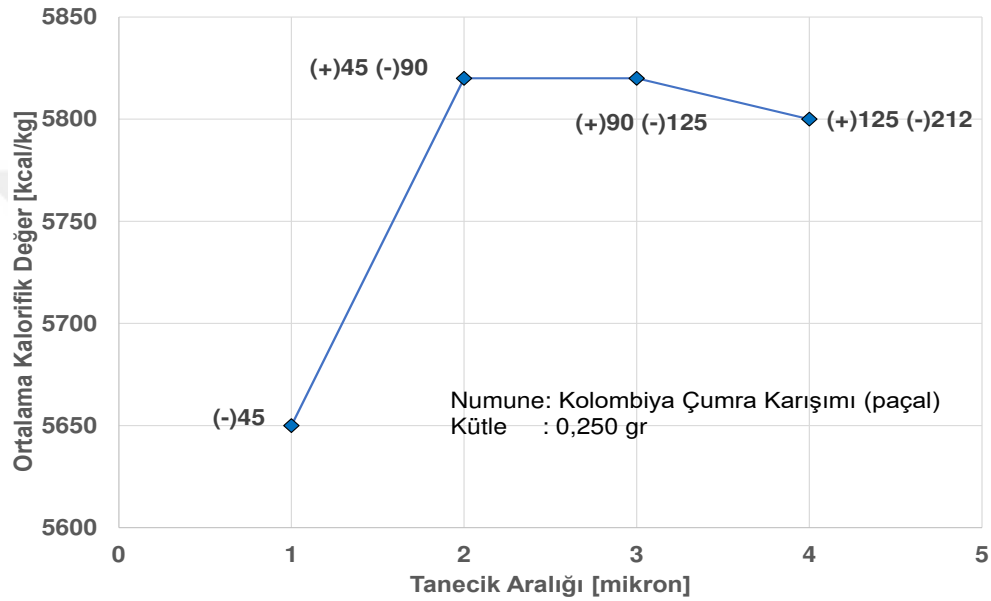


Şekil 6.71. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığının $P_{\max}$ ’a Etkisinin Kıyası



Şekil 6.72. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığının $(dP/dt)_{\max}$ Etkisinin Kıyası

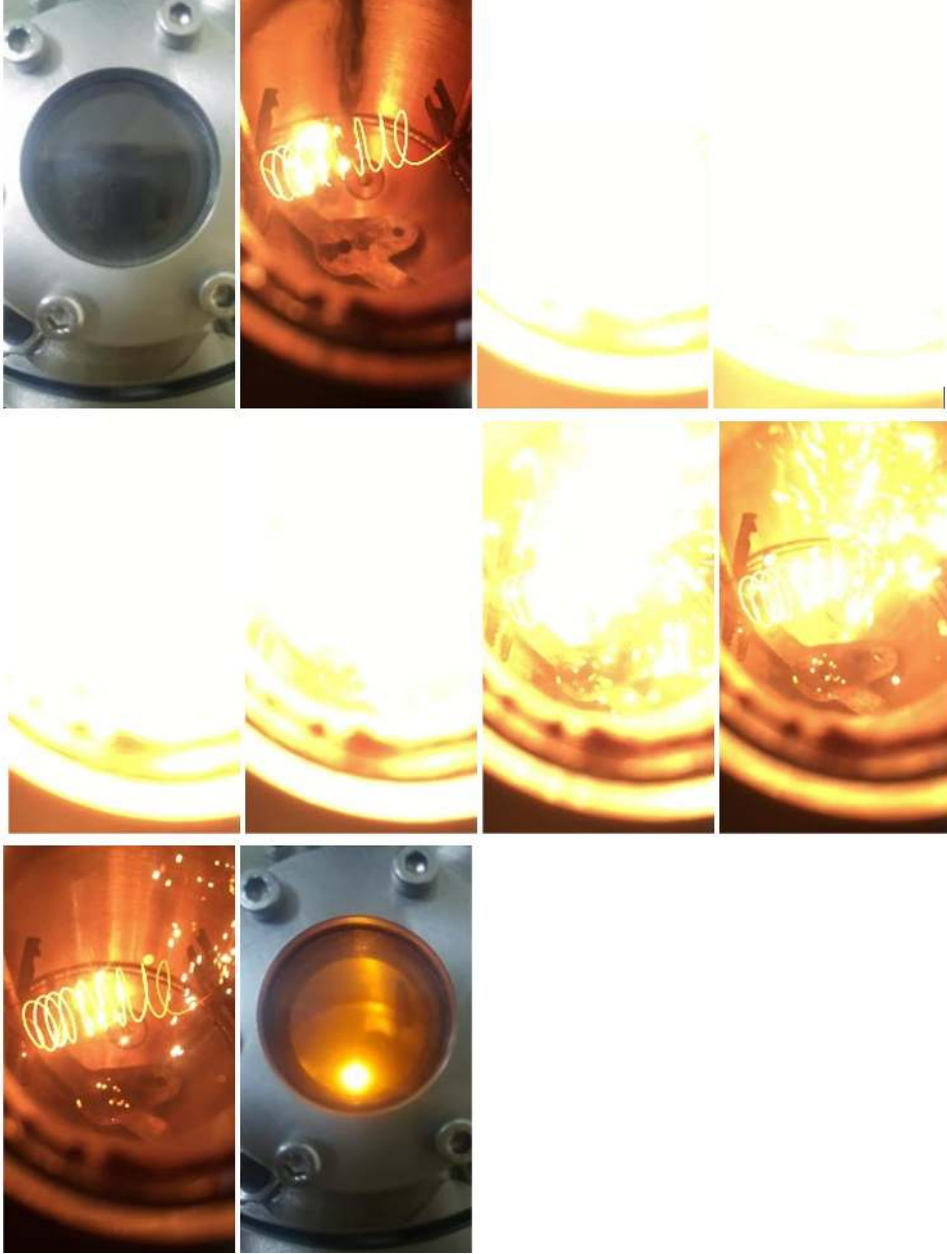
Şekil 6.73 Kolombiya Çumra karışım kömür tozları için gerçekleştirilen kalorifik ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Bu kömürler için kömür tozu alt ısı değeri 45 mikron altı tanecikler için diğer tane Aralığı aralıklarına göre daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 6.73. Kolombiya Çumra Kömür Tozu Tanecik Aralığı Kalorifik Değer Değişimi

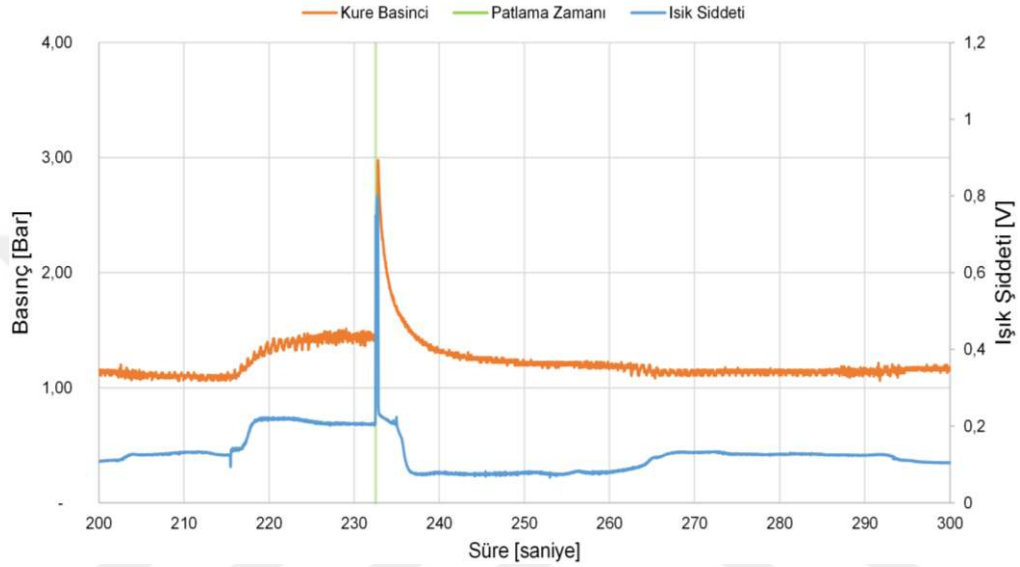
6.5. Endonezya Altbitümlü Kömür Tozu Patlama Deneyleri

Endonezya da bulunan Jembayan kömür numunelerinin fiziksel ve kimyasal analizleri Çizelge 5.9’de verilmiştir. Deneyler için Endonezya kömür tozları sarsak elek yardımıyla tanecik aralığı (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron olacak şekilde ayrılmıştır. Kömür tozları etüv içerisinde düşük sıcaklıkta yaklaşık olarak %4 nem’e düşürülünceye kadar kurutulmuştur. Deneyler 0,250 g/L ve 0,125 g/L konsantrasyonlarında yapılmıştır. Gözlemlene penceresinden patlama süreci kameraya çekilmiştir. Endonezya toz patlama deneyinden elde edilen görüntüler Şekil 6.74’te gösterilmektedir.

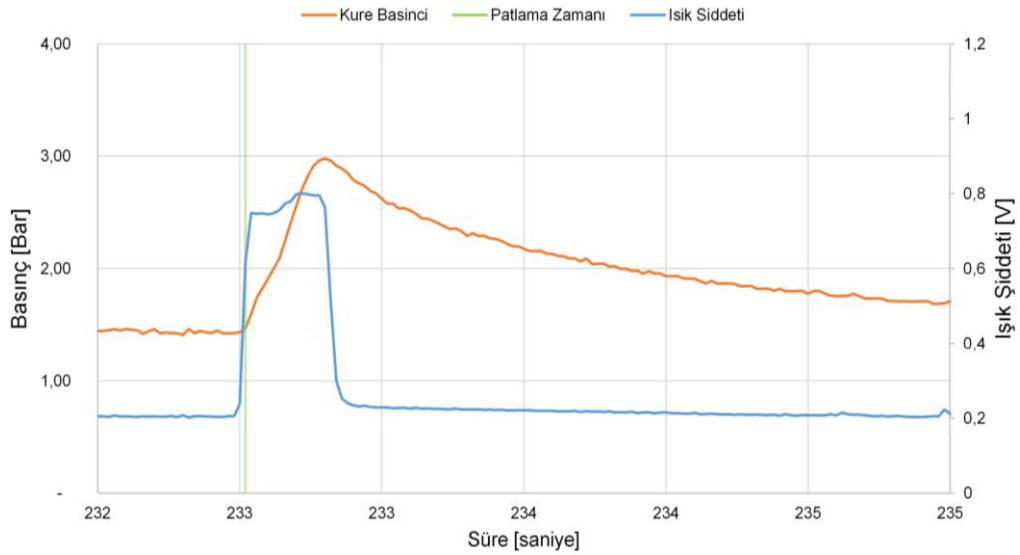


Şekil 6.74. Endonezya Kömür Tozu Patlama Görüntüleri

Şekil 6.75 ve Şekil 6.76 1 L'lik toz patlama küresindeki basınç ve ışık şiddetlerinin zamanla değişimini göstermektedir. Şekil 6.76 zaman serilerinin genişletilmiş halini göstermektedir.



Şekil 6.75. Patlama Anı Basınç ve Işık Sensörü Verileri



Şekil 6.76. Patlama Anı Basınç ve Işık Sensörü Verileri – Büyütülmüş

Çizelge 6.22.'de (+)45 (-)90 mikron tanecik aralığındaki Endonezya kömür tozu için değişik toz konsantrasyonlarında elde edilen patlama parametreleri gösterilmektedir.

Çizelge 6.22. Endonezya Kömür Tozu Değişik Toz Konsantrasyonlarında Patlama Parametreleri

Patlama Parametreleri				
Kömür konsantrasyonu (g/lt)	Test Tekrarları	P _{max} (bar)	dt (saniye)	dP/dt (bar/s)
0,0625	1	1,500	0,280	5,357
	2	1,490	0,280	5,321
	3	1,470	0,250	5,880
0,125	1	2,000	0,340	5,882
	2	2,300	0,400	5,750
	3	2,200	0,360	6,111
0,250	1	3,000	0,430	6,977
	2	2,500	0,450	5,556
	3	2,600	0,450	5,778
0,500	1	2,703	0,449	6,020
	2	2,690	0,430	6,256
	3	2,700	0,452	5,973
1,000	1	2,630	0,434	6,060
	2	2,672	0,447	5,978
	3	2,690	0,450	5,978

Endonezya kömür tozu için Çizelge 6.22'de verilen $P_{\max}$ ve $(dP/dt)_{\max}$ değerleri kullanılarak (+)45 (-)90 mikron tanecik aralığında K_{st} değeri hesaplanmıştır. Değişik toz konsantrasyonları için 3 farklı deney serisindeki $P_{\max}$ ve $(dP/dt)_{\max}$ 'ın en yüksek değerleri seçilerek ortalamaları alınmıştır.

Çizelge 6.22'deki veriler kullanılarak K_{st} aşağıda gösterildiği gibi hesaplanmıştır;

$$K_{st} = (dP/dt)_{\max} \cdot V^{1/3} \quad (16)$$

$$P_{\max} = P_{\max(\text{seri1})} + P_{\max(\text{seri2})} + P_{\max(\text{seri3})} / 3 \quad (17)$$

$$P_{\max} = (3 + 2,69 + 2,7) / 3$$

$$P_{\max} = 2,796 \text{ bar}$$

$$(dP/dt)_{\max} = (dP/dt)_{\max(\text{seri1})} + (dP/dt)_{\max(\text{seri2})} + (dP/dt)_{\max(\text{seri3})} / 3 \quad (18)$$

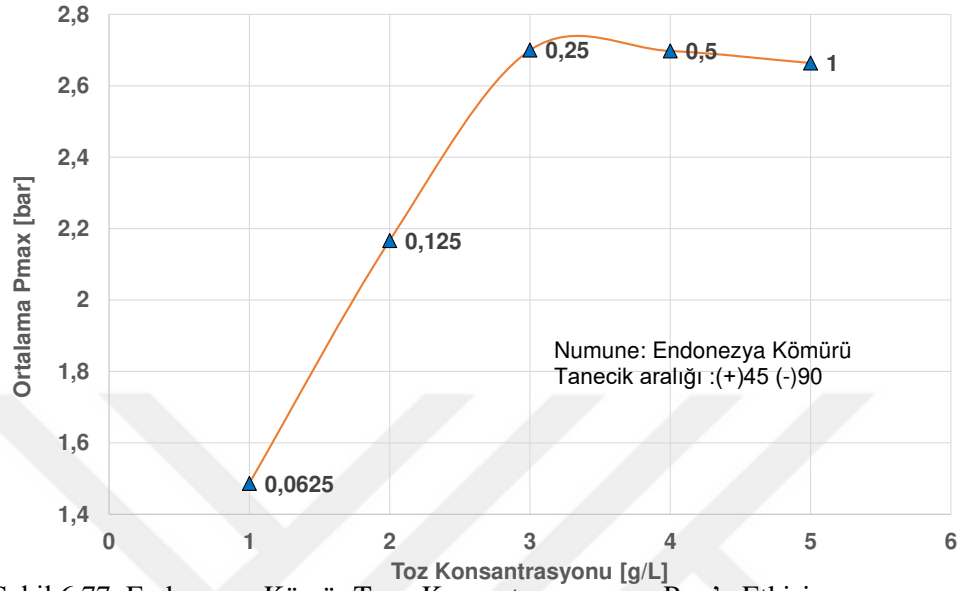
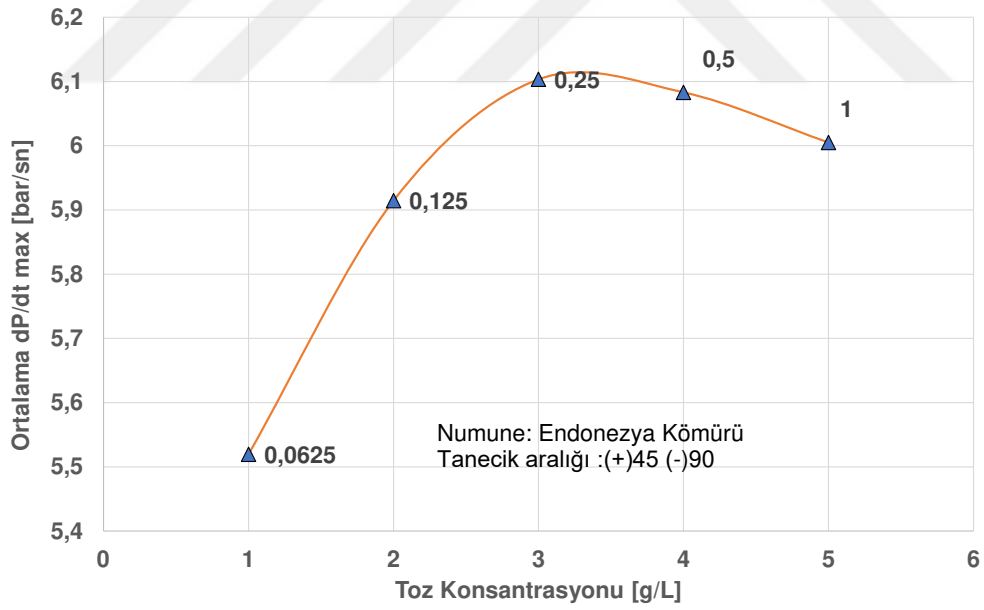
$$(dP/dt)_{\max} = (6,97 + 6,25 + 6,111) / 3$$

$$(dP/dt)_{\max} = 6,447 \text{ bar/sn}$$

$$V = 0,001 \text{ m}^3$$

$$K_{st} = 0,6447 \text{ bar m/sn}$$

Şekil 6.77 ve Şekil 6.78 Endonezya kömürleri için toz konsantrasyonunun $P_{\max}$ ve $(dP/dt)_{\max}$ üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu testlerde kullanılan toz tanecik aralığı (+)45 (-)90 mikrondur. (+)45 (-)90 mikron tanecik aralığında Endonezya kömür tozu için 0,250 g/L toz konsantrasyonlarında $P_{\max}$ en yüksek değeri almıştır. $(dP/dt)_{\max}$ da aynı şekilde 0,250 g/L'da en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Toz patlama deneylerinde toz konsantrasyonu 0,250 g/L'dan sonra $P_{\max}$ ve $(dP/dt)_{\max}$ 'da düşüş meydana gelmeye başlamıştır.

Şekil 6.77. Endonezya Kömür Tozu Konsantrasyonunun $P_{\max}$ 'a Etkisi.Şekil 6.78. Endonezya Kömür Tozu Konsantrasyonunun $(dP/dt)_{\max}$ 'a Etkisi

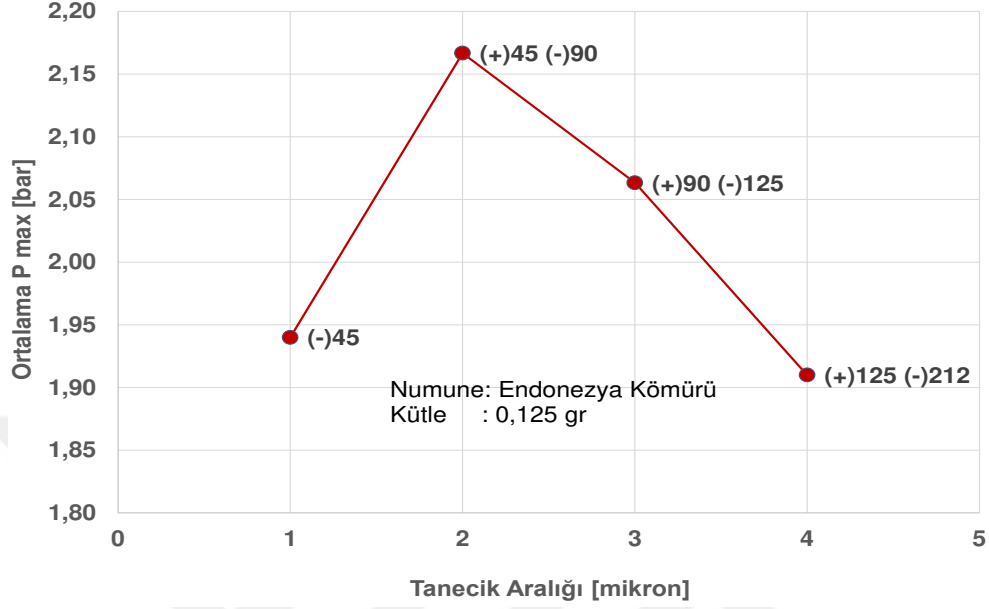
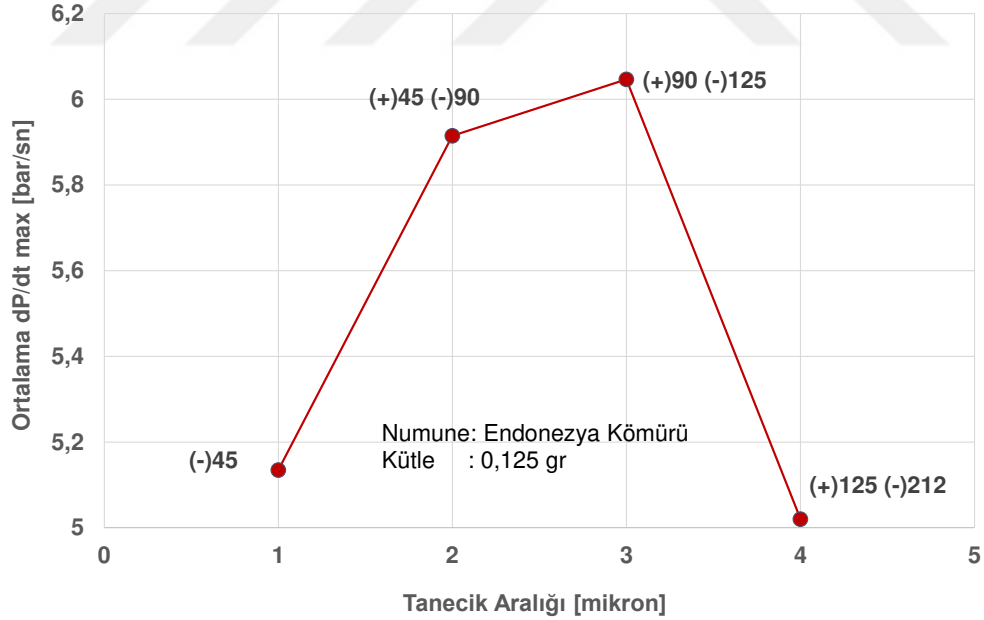
Tanecik aralığının toz patlamaları üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla bu bölümde Endonezya kömür tozları kısmi olarak kurutulup (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron tanecik aralıklarına ayrılarak testler yapılmıştır. Testlerin bu kısmında toz konsantrasyonu 0,125 g/L olarak alınmıştır.

Önceki testlerde olduğu gibi patlama deneyinde basınç, ışık ve sıcaklık sensörleri verileri datalogger tarafından kayıt altına alınmış ve bu verilerin bir bilgisayar yardımıyla analizleri yapılmıştır. Elde edilen veriler ve analiz sonuçları Çizelge 6.23’de özetlenmiştir. Bu çizelgede dört gruba ayrılmış tanecik aralıkları için yapılan testlerdeki maksimum basınç ve patlama hızları özetlenmektedir.

Çizelge 6.23. Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığının Patlama Parametrelerine Etkisi

Patlama Parametreleri				
Tanecik Boyutu (mikron)	Deney Serisi	Pmax (bar)	dt (saniye)	dP/dt (bar/s)
(-45)	1	1,800	0,400	4,500
	2	2,220	0,360	6,167
	3	1,800	0,380	4,737
(+)45 (-)90	1	2,000	0,340	5,882
	2	2,300	0,400	5,750
	3	2,200	0,360	6,111
(+)90 (-)125	1	2,190	0,280	7,821
	2	2,000	0,420	4,762
	3	2,000	0,360	5,556
(+)125 (-)212	1	1,970	0,360	5,472
	2	1,600	0,360	4,444
	3	2,160	0,420	5,143

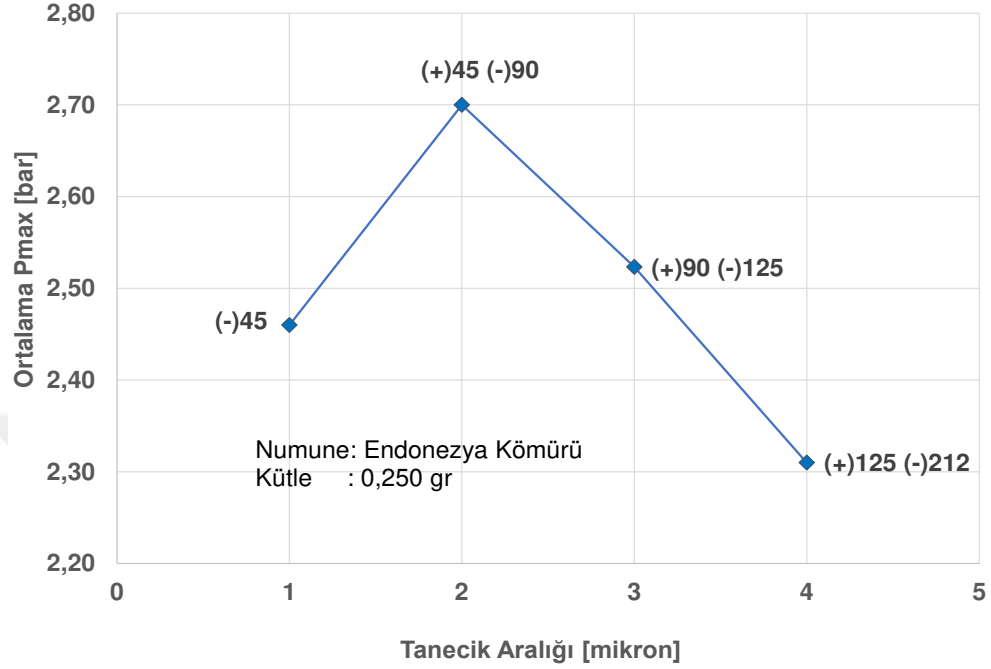
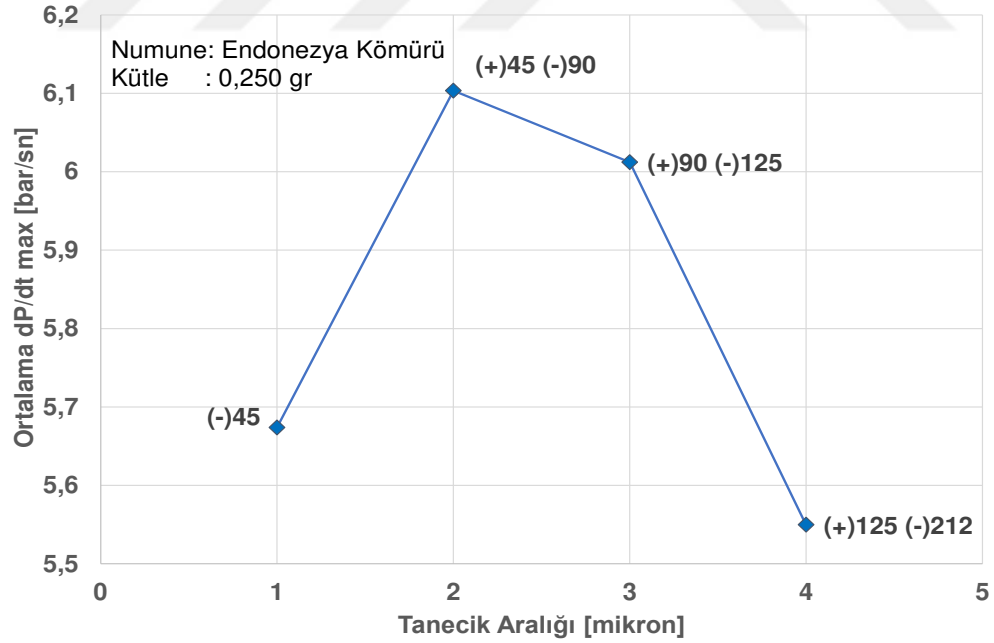
Şekil 6.79 ve Şekil 6.80’ de Endonezya kömürü için tane iriliklerine göre ölçülen maksimum basınç ve patlama hızlarını gösterilmektedir.

Şekil 6.79. Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığının P_{max} 'a EtkisiŞekil 6.80. Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığının $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi

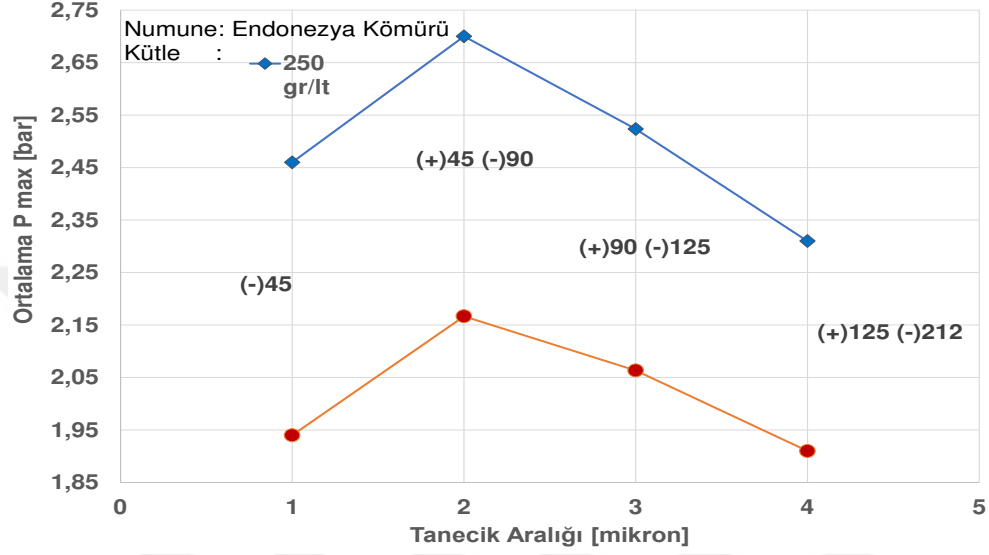
Çizelge 6.24, Şekil 6.81 ve Şekil 6.82’de 0,250 g/L toz konsantrasyonuna sahip Endonezya kömür tozu için yapılan test sonuçları gösterilmektedir. Bu kömür tozu için önceki testler 0,125 g/L olarak yapılmış bu testlerde ise 0,250 g/L toz konsantrasyonu kullanılmıştır. Çizelge 6.24’te testlerden elde edilen veriler ve analiz sonuçları özetlenmiştir. Bu çizelgede (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron tanecik aralıklarında yapılan testlerdeki maksimum basınç ve patlama hızları özetlenmektedir.

Çizelge 6.24. Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığının Patlama Parametrelerine Etkisi

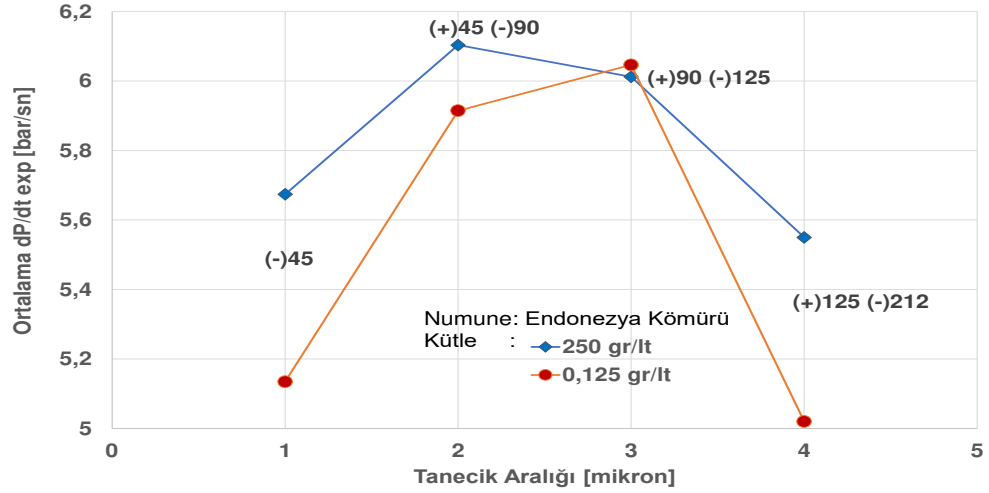
Patlama Parametreleri				
Tanecik Boyutu (mikron)	Deney Serisi	Pmax (bar)	dt (saniye)	dP/dt (bar/s)
(-45)	1	2,100	0,440	4,773
	2	1,700	0,420	4,048
	3	2,000	0,440	4,545
(+)45 (-)90	1	3,000	0,430	6,977
	2	2,500	0,450	5,556
	3	2,600	0,450	5,778
(+)90 (-)125	1	2,670	0,380	7,026
	2	2,700	0,490	5,510
	3	2,200	0,400	5,500
(+)125 (-)212	1	2,000	0,320	6,250
	2	2,530	0,540	4,685
	3	2,400	0,420	5,714

Şekil 6.81. Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığının P_{max} 'a EtkisiŞekil 6.82. Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığının $(dP/dt)_{max}$ 'a Etkisi

Şekil 6.83 ve Şekil 6.84 iki farklı toz konsantrasyonunda $P_{\max}$ ve $(dP/dt)_{\max}$ kıyaslanmıştır.

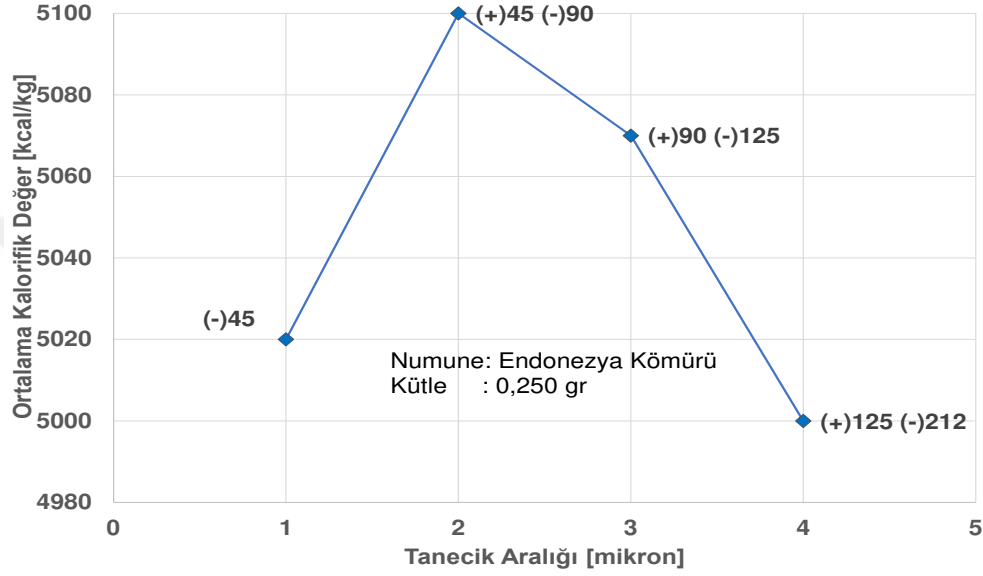


Şekil 6.83. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığının $P_{\max}$ 'a Etkisinin Kıyası



Şekil 6.84. 0,125 g/L ve 0,250 g/L Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığının $(dP/dt)_{\max}$ 'a Etkisinin Kıyası

Bu çalışmada kullanılan diğer kömür numunelerinde olduğu gibi Endonezya kömür tozunda da en yüksek kalorifik değer (+)45 (-)90 mikron tanecik aralığında olmaktadır.



Şekil 6.85. Endonezya Kömür Tozu Tanecik Aralığı Kalorifik Değer Değişimi

6.6. Patlama Küresi ile Toz Kalorifik Değerinin Ölçülmesi

Şekil 6.86 ve Şekil 6.87’de patlama küresi ile yapılan testlerde ölçülen küre basıncı, ışık şiddeti ve küre etrafındaki hazne su sıcaklığının zamanla değişimini gösterilmektedir. Toz patlama anındaki ani basınç yükselmesi ve ışık sensörünün patlamaya karşı davranışı açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 6.87’de patlama küresini çevreleyen haznedeki su sıcaklığının zamanla değişimi gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği gibi su sıcaklığının artmaya başlaması ilk patlamadan kısa bir süre sonra gerçekleşmiştir. Patlama küresinin dış kısmına eklenen dışı izole edilmiş su haznesi literatürde ilk defa patlama anında ortaya çıkan enerjiyi (ya da patlayan tozun ısı değerini) hesaplamak için bu çalışmada kullanılmaktadır.

Şekil 6.88’de gösterilen sıcaklık zaman eğrisi kullanılarak su sıcaklığındaki değişim ölçülmüştür. Aşağıda gösterilen denklem ile de patlama sonucu ortaya çıkan ya da suya transfer edilen ısı hesaplanmıştır.

$$Q_w = m.C_p. dT$$

Burada,

Q_w : Suya transfer edilen ısı miktarı, kJ

m :Patlama küresi etrafındaki su miktarı, kg

C_p :Suyun özgül ısısı, kJ/kg.°C

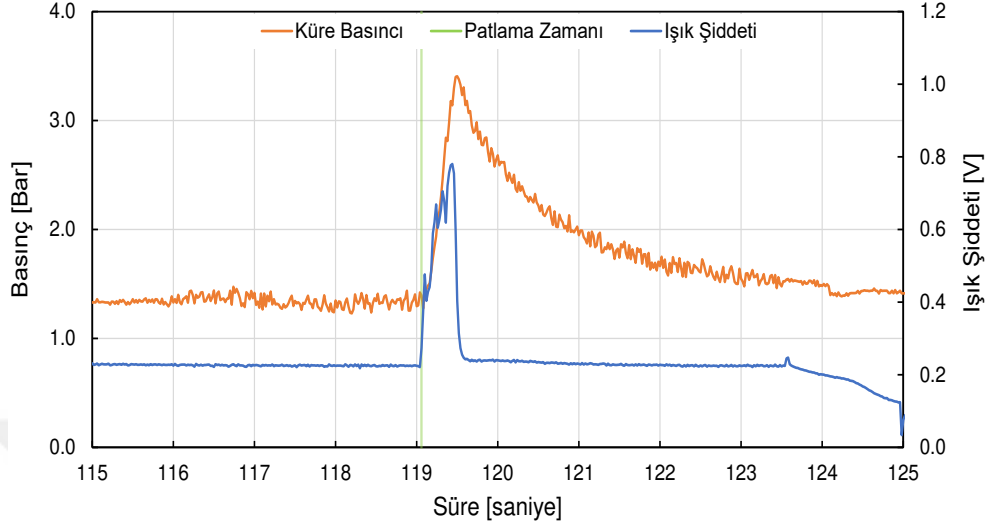
dT :Patlama öncesi ile patlama anındaki maksimum su sıcaklıkları arasındaki fark, °C

Suya transfer edilen ısı miktarı (Q_w) değerinin patlama küresi içerisine konulan toplam toz miktarına (m_{kt}) bölünmesiyle kömür tozunun kalorifik değeri (Q_{kt}) hesaplanır;

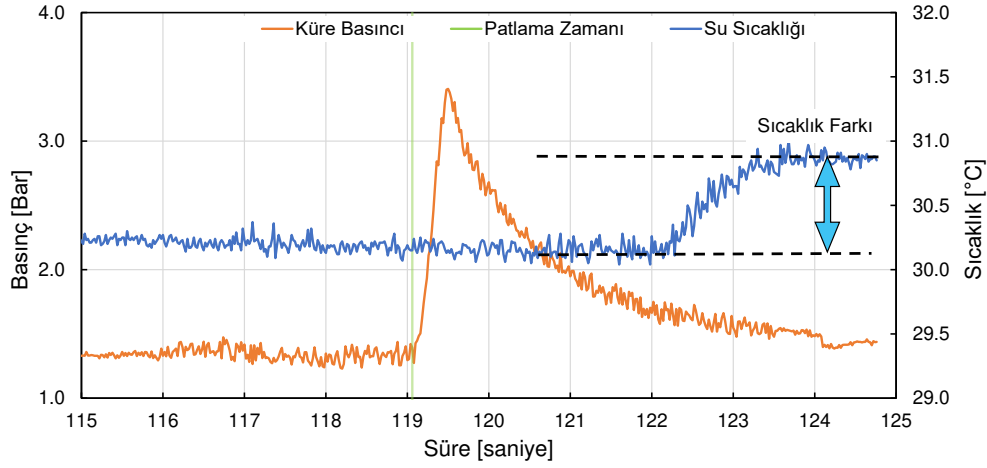
$$Q_{kt} = Q_w / m_{kt}$$

Q_{kt} :Kömür tozunun ısı değeri, kJ/kg

m_{kt} :Patlama küresine konulan toplam kömür tozu miktarı, kg

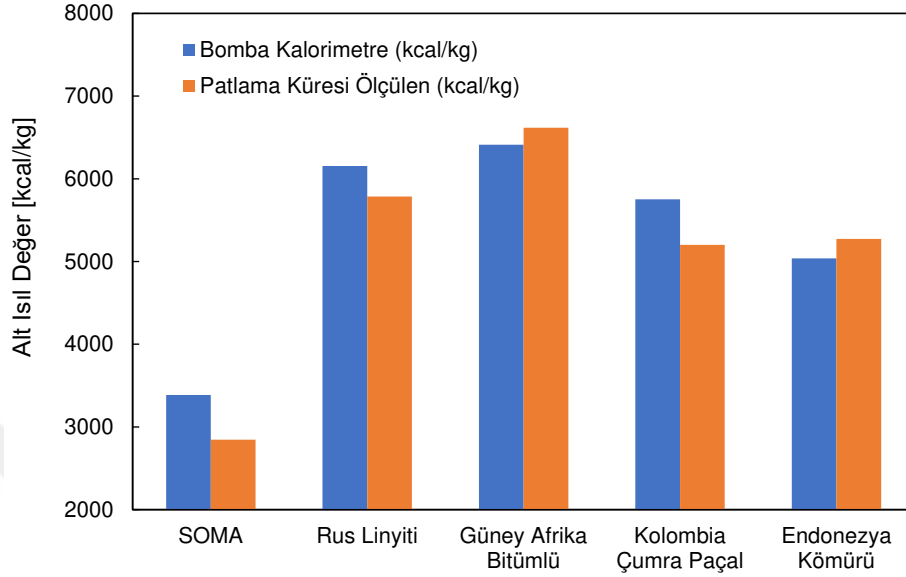


Şekil 6.86. (+)45 (-)90 Tanecik Aralığında Soma Linyiti Basınç ve Işık Şiddetinin 119. Saniyedeki Değişimi



Şekil 6.87. (+)45 (-)90 Tanecik Aralığında Soma Linyiti Basınç ve Su Sıcaklığının 119. Saniyedeki Değişimi

Bu çalışmada 1 L'lik toz patlama küresi ile test edilen bütün kömürler için yukarıda bahsedildiği şekilde kömür tozu kalorifik değerleri hesaplanmıştır (Şekil 6.88). Aynı kömür tozlarının kalorifik değerlerini aynı zamanda standart bomba kalorimetre ile de ölçülerek Şekil 6.88'de birbirleri ile kıyaslanmıştır.



Şekil 6.88. Bomba Kalorimetre ve 1 L Toz Patlama Küresi Alt Isıl Değer Ölçümlerinin Kıyaslaması

Kıyaslamalar iki ölçüm arasında farklılıkların olduğunu göstermesine rağmen iki ölçüm arasındaki farkların kabul edilebilir sınırlar içerisinde oldukları söylenebilir. Patlama küresi ile ısı değer ölçümü dünyada ilk defa denenen bir çalışmadır. Bu açıdan bakıldığında ölçülen ısı değerlerin çok başarılı bir şekilde gerçek değerlere yakın olduğu görülmektedir. Fakat bunun yanısıra, patlama küresi tasarımının daha da iyileştirilmesi ile ısı değer ölçüm hatalarının ilerideki yapılacak çalışmalarla giderileceği düşünülmektedir.

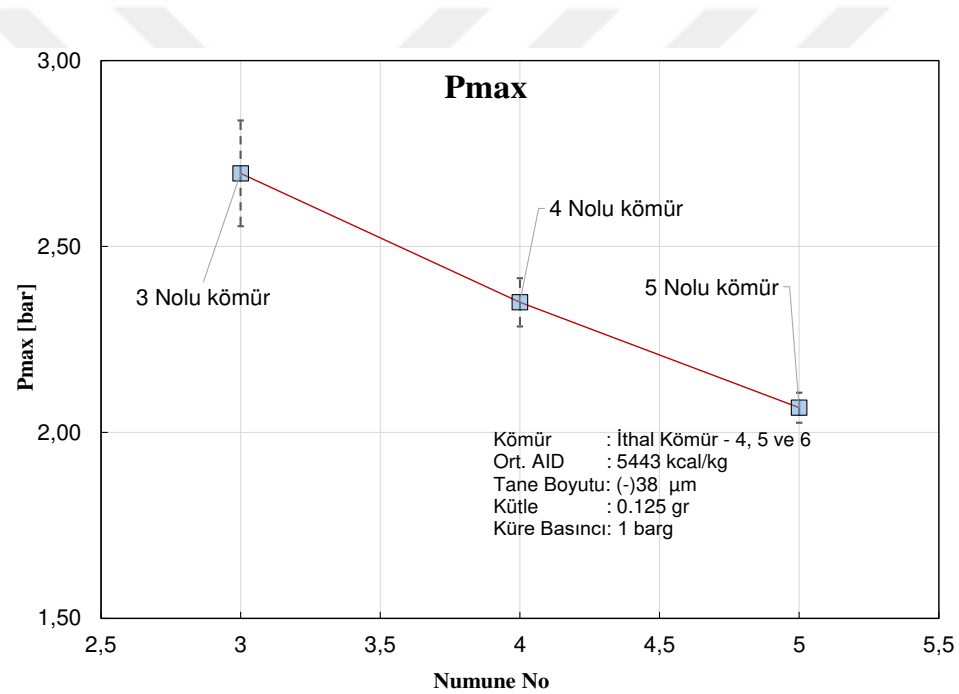
6.7. 20 L Patlama Küresi ile 1 L Patlama Küresi Kıyaslaması

Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği (Ürünveren, A., ve Ural, S., 2017) tarafından üç değişik toz numunesi için yurtdışında yaptırılan toz patlama deney sonuçları bu çalışmada geliştirilen patlama küresinin sonuçları ile kıyaslanarak 1 L toz patlama küresinin doğrulaması yapılmıştır.

Kömür numunelerinin fiziksel ve kimyasal analizleri Çizelge 6.25'te gösterilmektedir. Bu numuneler için 1 L toz patlama küresi ile yapılan testlerde elde edilen P_{max} değerleri Şekil 6.89'da gösterilmektedir.

Çizelge 6.25. ÇÜ Kömür Numunesi Analizleri (Ürünveren, A., ve Ural, S., 2017)

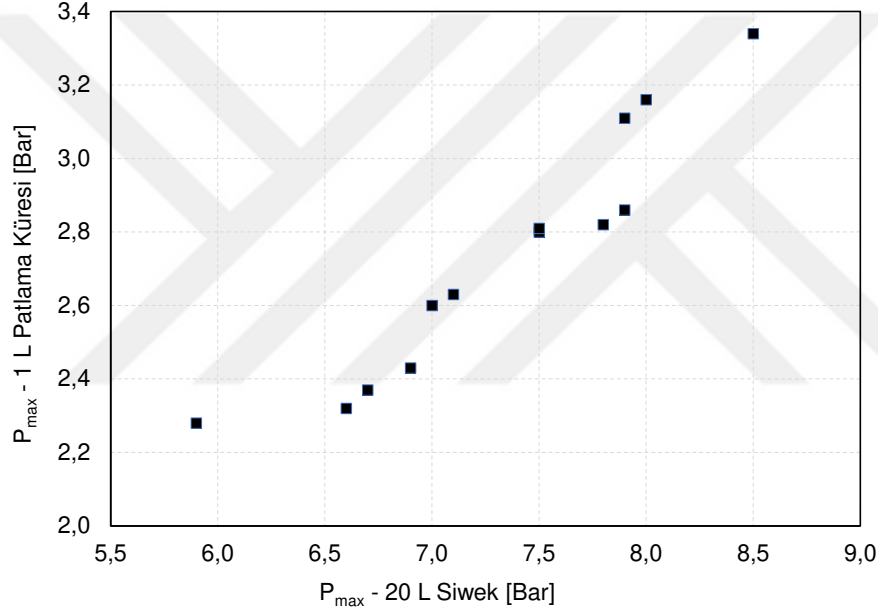
Tabi Kod	Gelen Kod	Numunelerin Tane Boyutu Dağılımı			Tabi AID (kcal/kg)	Gelen AID (kcal/kg)	Gelen Nem %
		< 53 μm	< 32 μm	< 20 μm			
3. CU	S	97%	65%	44%	5847	5400	3,6
4. CU	T	96%	70%	39%	5900	5600	3,5
5. CU	E	96%	73%	53%	4429	3400	5,5



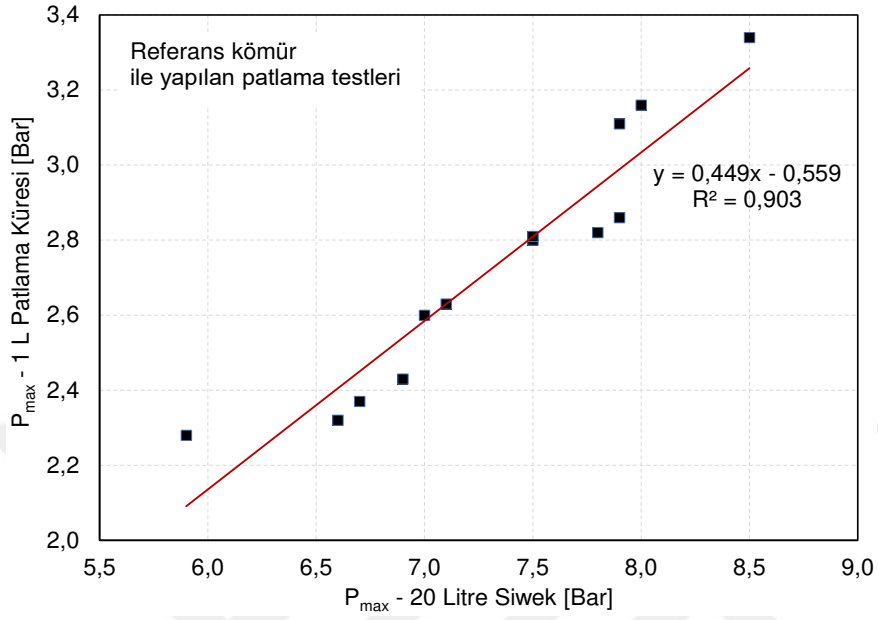
Şekil 6.89. ÇÜ Kömür Numunelerinin 1 L Toz Patlama Küresindeki P_{max} Değerleri (Ürünveren, A., ve Ural, S., 2017)

Bu çalışmada 1 L toz patlama küresi ile yapılan deney sonuçları 20 L Siwek küresi deney sonuçları (Ürünveren, A., ve Ural, S., 2017) ile kıyaslanmıştır. Her iki çalışmada da aynı kömür tozu kullanılmıştır. 1 L toz patlama küresinde elde edilen P_{max} değerleri orantılı bir şekilde Siwek küresinden elde edilen P_{max} değerlerinden

düşük ölçülmüştür (Şekil 6.90). Bu sonuç önce ki araştırmacılarında değişik toz patlama cihazlarıyla yaptıkları deneylerde karşılaştıkları bir durumdur. Her iki veri serisinin kıyaslanması sonucu aralarında lineer bir ilişki olduğu görülmüştür. İki veri arasındaki ilişki lineer eğri uydurma yöntemiyle formülize edilebilmiştir. Böylece bu çalışmada geliştirilen 1 L patlama küresinde elde edilen sonuçların lineer eğri yardımıyla mühendislik uygulamalarında güvenli bir şekilde kullanılabilirliğinin mümkün olacağı görülmüştür (Şekil 6.91).



Şekil 6.90. 20 L ve 1 L Toz Patlama Küreleri $P_{\max}$ Kıyaslaması

Şekil 6.91. 1 L Toz Patlama Küresi $P_{\max}$ Değerleri Düzeltme Katsayısı



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında 1 L iç hacme sahip ve küresel yapıda bir toz patlama küresi tasarlanarak imal edilmiştir. Çeşitli kömür tozları ile gerçekleşen patlamaları gözle görebilmek ve patlama öncesi ve sonrası görsel kayıtları oluşturabilmek için patlama küresi üzerine yüksek basınç ve sıcaklığa dayanıklı pleksiglas malzemeden bir pencere yerleştirilmiştir. Bu pencere vasıtasıyla bütün deneylerin görsel kayıtları alınarak arşivlenmiştir. Toz patlama küresi deney düzeneği ölçüm cihazları ile donatılmıştır. Sıcaklık ölçümleri için hızlı tepkime veren thermocouple'lar kullanılmıştır. Toz patlama küresi içerisindeki patlama basıncının ölçülmesi için kürenin yüzeyine basınç sensörü yerleştirilmiştir. Bu çalışmada önceki test cihazlarındaki patlama hızı ölçümlerine alternatif olarak ilk defa test edilen ve geliştirilen ışık sensörü kullanılmıştır. Bu sayede patlama küresi içerisindeki patlama anındaki olaylar çok hızlı ve yüksek çözünürlükte ölçülebilmektedir. Yüksek çözünürlükteki ölçümlerin kaydedilebilmesi için saniyede 100 veri kaydetme özelliği bulunan HİOKİ marka datalogger kullanılmıştır.

Bu çalışmanın özgün yanlarından birisi olan ışık sensörü ile patlama hızı tayini şimdiye kadar dünyada ilk defa toz patlama kürelerinde denenen bir çalışma olmuştur. Işık toz patlaması anında oluşan basınç dalgalarının yayılım hızından çok daha hızlı olduğu için ışık sensörü tarafından patlamanın (yani ilk patlama anındaki ani aydınlanmanın) algılanması zaman kaybı olmadan gerçekleşmektedir. Basınç dalgalarının hava ortamında ilerleme hızı (~343 m/s) ile ışık hızı (~300.000.000 m/s) arasındaki fark kıyaslanmayacak kadar fazladır. Bu sebepten ilk patlama anını algılayabilen bir sensör toz patlama küresi içerisindeki olayların daha iyi anlaşılması hususunda büyük katkılar sağlamıştır. Geleneksel patlama kürelerinde patlama indeksi hesaplarındaki $(dP/dt)_{max}$ ifadesindeki her iki terim de (dP ve dt terimleri) basınç sensörlerinin sinyallerinden alınmaktadır. Bu çalışmada ise patlama basıncının $(dP)_{max}$ yine basınç sensöründen alınması ama patlama zamanının ışık

sensörü tarafından ölçülen sinyallerden alınması tavsiye edilmekte ve bu sayede patlama indeksi (K_{st}) hesaplamalarında daha doğru ve hassas sonuçlar alınabileceği öngörülmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen toz patlama cihazının diğerlerinden ayrılan özelliği boyutunun küçük olmasından dolayı kolay taşınabilmesi ve çok az bir numune kullanılarak kısa zamanda sonuç verebilmesidir. Bu cihazla yapılan deney sonuçları 20 L Siwek küresinden alınan sonuçlar karşılaştırıldığında genellikle maksimum patlama basıncı, P_{max} , 20 L Siwek küresi ile ölçülenden düşük çıkmıştır. Bu durum Bölüm 3'te anlatıldığı gibi önceki araştırmacıların yaptıkları sonuçlarla uyusmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken bir husus K_{st} değerinin standart test cihazlarından elde edilen değere göre kalibre edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada geliştirilen patlama küresinden elde edilen maksimum patlama basıncı değerleri için düzeltme katsayısı önerilmektedir. Böylece bu çalışmada geliştirilen 1 L toz patlama küresinde elde edilen sonuçların bir düzeltme katsayısı kullanarak mühendislik uygulamalarında güvenli bir şekilde kullanılabileceğinin mümkün olduğu görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında 1 L hacme sahip bir toz patlama küresi başarıyla geliştirilmiş ve operasyonel hale getirilmiştir. 1 L toz patlama küresi kullanılarak 500'ün üzerine patlama testleri gerçekleştirilmiştir. 1 L toz patlama küresi ile gerçekleştirilen test ve analizler Çizelge 5.1'de tablo halinde özetlenmiştir. Çizelge 5.1'de görüleceği gibi Soma kömürü (linyit), Rus kömürü (linyit), Güney Afrika kömürü (bitümlü), Kolombiya Çumra karışım kömürü (altbitümlü-linyit) ve Endonezya (Jembayan altbitümlü) kömürleri kullanılarak patlama parametre testleri gerçekleştirilmiştir. Toz patlama karakteristiklerini belirlemek için test edilen parametreler ise çizelgenin ilk kolonunda listelenmiştir.

Bu çalışmanın sonucunda aşağıda liste halinde sıralanmış sonuç ve tavsiyeler sunulmuştur;

- 1 L toz patlama küresi fonksiyonel olarak çalışır hale getirildikten sonra değişik kömürler kullanılarak 500'den fazla test yapılmıştır. Gerçekleştirilen test sayısının çokluğu, patlama küresi test düzeneğinin sorunsuz bir şekilde uzun süredir çalışıyor olması bu sistemin sağlamlığının bir göstermektir.
- Bu çalışmayı özgün yapan faktörlerden birisi olan ışık sensörü ile patlama hızının $(dP/dt)_{\max}$ belirlenmesi şimdiye kadar dünyada ilk defa toz patlama kürelerinde denenen bir çalışma olmuştur. Işık hızı toz patlaması anında oluşan basınç dalgalarının yayılım hızından çok daha hızlı olduğu için ışık sensörü tarafından patlamanın (yani ilk patlama anındaki ani basınç artışının) algılanması zaman kaybı olmadan gerçekleşmektedir. Bu sebepten ilk patlamayı algılayabilen bir sensör patlama küresi içerisindeki olayların daha iyi anlaşılması hususunda büyük katkılar sağlamıştır.
- Geleneksel toz patlama kürelerinde patlama indeksi hesaplarındaki $(dP/dt)_{\max}$ ifadesindeki her iki terim de (dP ve dt terimleri) basınç sensörlerinin sinyallerinden alınmaktadır. Bu çalışmada ise maksimum patlama basıncının $P_{\max}$ yine basınç sensöründen alınması ama zaman farkının ' dt ' ışık sensörü tarafından ölçülen sinyallerden alınmasının tavsiye edilmekte ve bu sayede de K_{st} hesaplamalarında daha doğru ve hassas sonuçlar alınabileceği öngörülmektedir.
- Yapılan testlerde Soma kömürü (linyit), Rus kömürü (linyit), Güney Afrika kömürü (bitümlü), Kolombiya Çumra karışım kömürü (altbitümlü_linyit) ve Endonezya (Jembayan altbitümlü) kömürleri toz patlama karakteristikleri bu çalışmada geliştirilen 1 L toz patlama küresi ile ölçülmüştür.
- Bu kömürlerin toz patlama karakteristiklerinin belirlenmesinde kömür tane iriliği, kömür nemi, toz konsantrasyonu ve küre içerisindeki

oksijen konsantrasyonu gibi başlıca toz patlama parametreleri test edilmiştir. Bu kömürler için patlama karakteristiğini belirleyen ana parametreler olan P_{max} , $(dP/dt)_{max}$ ve K_{st} değerleri deneysel verileri kullanarak hesaplanmıştır.

- Ayrıca bomba kalorimetrede kalorifik değeri ölçülen kömür tozlarının bu cihaz kullanılarak kalorifik değeri ölçülmüş ve sistem verifikasyonları gerçekleştirilmiştir.
- Yapılan parametrik testlerin sonuçlarına göre;
- Beklenildiği gibi ortamda artan oksijen konsantrasyonu toz patlamasının şiddetini lineer bir şekilde artırmaktadır.
- Kömür numunesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri toz patlama riskini belirleyen parametrelerin başında gelmektedir.
- Karışımdaki toz konsantrasyonunun belirli bir değerine kadar patlama basıncını ve buna bağlı olarak patlama hızını ve patlamanın şiddetini arttığı görülmüştür. Minimum toz konsantrasyonunu belirlemek için yapılan testler 1 g/L ile başlayarak 0,5, 0,250, 0,125, 0,0625 g/L olarak değişik toz konsantrasyonlarında tekrarlanmış ta ki toz patlaması gerçekleşmeyene kadar toz miktarı %50 azaltılarak düşürülmüş ve arka arkaya 3 deney serisinde patlama olmayana kadar deneyler tekrarlanmıştır. Toplanan veriler yardımıyla toz konsantrasyonuna göre değişen P_{max} , $(dP/dt)_{max}$ ve K_{st} hesaplanmıştır. 0,125 ve 0,250 g/L toz konsantrasyonlarında en yüksek P_{max} , $(dP/dt)_{max}$ değerleri testlerde öne çıkınca optimum değer olarak bu konsantrasyonu kabul edilip deneylere 0,125 ve 0,250 g/L olarak devam edilmiştir.
- Tanecik aralığının toz patlamaları üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacı ile deneyler (-)45, (+)45 (-)90, (+)90 (-)125, (+)125 (-)212 mikron tanecik aralıklarında 0,125 ve 0,250 g/L toz konsantrasyonları olarak yapılmıştır. Deneylerde genel olarak 90 mikron civarı tanecik

aralığı en yüksek patlama basıncı ve patlama hızını vermiştir. 45 mikron altı (-)45, ve 125 ile 212 mikron arası (+)125 (-)212 tanecik aralıklarında ise maksimum basınç değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise “3.1.7.2. Tanecik Boyutu ve Yüzey Alanı” başlığı altında belirttiğimiz gibi tanecik aralığı yani yüzey alanı patlama hızı ile doğrudan ilişkilidir ve patlamanın şiddetini artırmaktadır. Fakat tanecik aralığı çok küçüldüğünde tanecikler birbirine yapışıp topaklama özelliği gösterdiğinden dolayı yüzey alanları daha küçülmektedir. Bu da patlama basınç ve hızında düşüşlere sebep olmaktadır.

- Bir önceki maddede tartışılan konuyu farklı bir açıdan daha değerlendirmek gerekirse, çok küçük tanecik boyutlarında tozun kimyasal ve fiziksel özelliklerine göre tozun ilk tutuşması, yanması ve patlaması çok daha karışık bir hal almaktadır. Örneğin küçük taneciklerde taneler arası statik elektriklenmeden dolayı oluşan topaklanma olayı veya çok küçük tanecik boyutlarında tanecik etrafındaki uçucu madde katmanının inceliğinden dolayı olay uçucuların yanmasından çok oksijen hızlı bir şekilde karbona ulaşarak tanecik yanmasına dönüşebilmektedir. Ayrıca tanecik etrafındaki uçucuların yüzey alanı ile olan oranından ve ortamdaki oksijen miktarının yüzey alanına düşen miktarından dolayı patlama hızı azalabilmektedir. Aynı şekilde tanecik yüzeyinin homojen ve heterojen olması, gözenekli veya pürüzsüz olması da olayda önemli rol oynamaktadır.
- 45 mikron altı ve 125 mikron üstü tanecik aralıklarında oksijen oranının düşük olduğu deneylerde patlama olmamış veya çok zayıf gerçekleşmiştir. Yani oksijen değerinin düşük olduğu ortamlarda tane iriliği yüksekse patlama hızı düşük olmaktadır.

- Yapılan test sonuçlarından en dikkat çeken parametre olarak tane aralığı ve patlama hızı arasındaki ilişki detaylı bir şekilde çalışılmıştır. Patlama hızı (+)45 (-)90, (+)90 (-)125 mikron tane aralıklarında maksimuma ulaşmış olup, beklenilenin aksine daha küçük tane boyutlarında daha şiddetli patlamalar olmamıştır. Bu durumun teyidi için birçok deney yapılırsa da testler sonuçları doğrular şekilde tekrar etmiştir. Bu durumun daha iyi anlaşılabilmesi için değişik tanecik aralıklarında kömür kalorifik değerleri ölçülmüştür. Yukarda belirtilen patlama davranışını teyit eder nitelikte, küçük tane iriliklerinde kömür kalorifik değerlerinin daha düşük olduğu ölçülmüştür. Bunun sebebi ise kömür öğütülürken, içerisindeki kil ve benzeri gibi organik olmayan ve daha kolay öğütülebilen yabancı maddelerin küçük tane iriliklerine sahip olmaları düşünülmektedir. Bu yabancı madde bulunan küçük tane iriliklerinde maddeler patlamada baskılayıcı bir faktör olarak rol alarak patlamanın şiddetini düşürmektedir.
- Toz patlama küresi içerisinde patlayan tozun kalorifik değerini belirlemek için kürenin dış tarafını çevreleyen su haznesindeki su sıcaklığının zamanla değişimi sürekli olarak ölçülmüştür. Kürenin dış kısmını çevreleyen su haznesinin dış kısmı yalıtıldığından dolayı küreden dışarıya ısı kaybı önlenmiştir. Zamanın bir fonksiyonu olarak ölçülen su sıcaklığı grafiğinin altında kalan alan nümerik olarak hesaplanarak küre etrafındaki suyun aldığı ısı hesaplanmıştır. Sudaki sıcaklık artışı patlama küresi içerisindeki kömür tozunun yanmasından kaynaklandığından dolayı, hesaplanan bu ısı tozun kalorifik değeridir. Küre içerisinde patlayan tozun açığa çıkardığı enerji bu metodla hesaplanmıştır. Aynı tozun standart kalorimetre ile yapılan ölçümlerinde elde edilen kalorifik değeri ile kıyaslaması yapılmıştır.

Bu projenin sonucu olarak geliştirilen toz patlama küresi endüstriyel ürüne dönüştürülmeye hazır bir cihazdır. 1 L hacme sahip olmasından dolayı 20 L Siwek küresine göre düşük ölçülen P_{max} değerleri yine bu çalışma kapsamında geliştirilen bir formülasyon ile düzeltilebilmektedir. Son olarak, 1 L toz patlama küresinde kullanılan ışık sensörü patlama anındaki olayların yakalanması, kaydedilmesi ve hassas K_{st} hesaplarının yapılabilmesi bakımından geleneksel patlama kürelerine göre avantaj sağlamaktadır.





KAYNAKLAR

- Abbasi, T. A., 2007. Dust explosions–Cases, causes, consequences, and control. *Journal of Hazardous Materials*, 140: 7–44
- Amyotte, P. R., 2014. Some myths and realities about dust explosions, *Process Safety and Environmental Protection*, 9 2: 292–299.
- Amyotte, P.R., Basu, A. and Khan, F.I., 2005. Dust explosion hazard of pulverized fuel carry-over. *Journal of Hazardous Materials*. A122:23–30.
- ASTM: E 1226 – 05 Standard, 2005. Standard Test Method for Pressure and Rate of Pressure Rise for Combustible Dusts, 11s.
- Bartknecht, W., 1978. Gas, Vapour and Dust Explosion, Fundametal, Prevention, Control, 270s.
- Barton, J., 2002. Dust explosion prevention and protection: A practical guide. Gulf Professional Publishing, 352s.
- Bilirgen, F., 2019. Toz Patlama Karakteristiği Belirleme ve ve Kalori Ölçme Cihazı, Kosgeb Ar-Ge Innovasyon Progamı, Proje final Raporu, 6/12/2019
- Bind, V. K., Roy, S., and Rajagopal, C., 2012. A reaction engineering approach to modeling dust explosions. *Chemical Engineering Journal*, 207–208:625-634.
- Cashdollar, K. I., 2000. Overview of dust explosibility characteristics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13:183–199.
- Center for Chemical Process Safety of The American Institute of Chemical Engineers, 2017. Guidelines for Combustible Dust Hazard Analysis, American Institute of Chemical Engineers, John Wiley & Sons, Inc., 223s.
- Davis. S. G., Hinze, P. C., Hansen, O. R., and Wingerden, K., 2011. Does your facility have a dust problem: Methods for evaluating dust explosion hazards. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24: 837-846

- Derin, L., Varol, N., ve Uymaz, S., 2017. Türkiye’deki Kömür Madeni Kazalarına İlişkin Değerlendirme. *Journal of Resilience*. 1(1):47-53.
- Dorsett, H.G., Jacobson, M., Nagy, J., and Williams, R.P., 1960. Laboratory Equipment and Test Procedures for Evaluating Explosibility of Dusts. US Bureau of Mines, RI 5624
- Eckhoff, R. K., 2003. *Dust Explosions in the Process Industries*, Third Edition, Gulf Professional Publishing, 754s.
- Eckhoff, R. K., 2006. Differences and similarities of gas and dust explosions: A critical evaluation of the European ‘ATEX’ directives in relation to dusts. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19:553–560.
- ISO 4225, 2020. Air quality — General aspects — Vocabulary. 19s.
- ISSA, 1998. Determination of the Combustion and Explosion Characteristics of Dusts. International Section of the ISSA for Machine Safety, 18s.
- Lunn, G. A., and Gummer, J., 2003. Ignitions of explosive dust clouds by smouldering and flaming agglomerates. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 16:27–32.
- Mannan, S., 2005. *Lee’s Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control Volume 1 – Third Edition*. Elsevier Butterworth Heinemann, 3708s.
- Mercan, B., 2018. Dust explosion in Turkey. *Loss Prevention Bulletin*, 260: 15-18
- Mittal, M., 2013. Limiting oxygen concentration for coal dusts for explosion hazard analysis and safety. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26:1106-1112.
- NFPA Codes. List of National Fire Protection Association Codes & Standards.
- NMAB Committee on Evaluation of Industrial Hazards, 1978. *International Symposium on Grain Elevator Explosions – Volume I*. National Materials Advisory Board National Academy of Sciences, 447s.
- OSHA, 2014. OSHA Fact Sheet – Hazard Alert: Combustible Dust Explosions, 2s.

- Palmer, K. N., 1973. Dust Explosion Hazards in Pneumatic Transport, Fire Research Station Borehamwood Hertfordshire, 21s.
- Proust, C., 1996. Dust explosions in pipes: a review. J. LOSS PWV. Process Ind., Vol. 9. No. 4:261-211,
- Rania, S.I., Aziz, B.A. and Gimbut, J., 2015. Analysis of dust distribution in silo during axialfilling using computational fluid dynamics: Assessment on dust explosion likelihood. Process Safety and Environmental Protection. 96:14–21.
- Sarli, V.D., Sanchirico, R., Russo, P. and Benedetto, A.D., 2015. CFD modeling and simulation of turbulent fluid flow and dust dispersion in the 20-L explosion vessel equipped with the perforated annular nozzle. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 38:204-213.
- Snoeys, J., Going, J. E., Taveau, J. R., 2012. International Symposium on Safety Science and Technology Advances in dust explosion protection techniques: flameless venting. Procedia Engineering 45: 403-413.
- Tan, B., Shao, Z., Xu, B., Wei, H., and Wang, T., 2020. Analysis of explosion pressure and residual gas characteristics of micro-nano coal dust in confined space. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 64:1-7.
- Tascón, A. and Aguadob, P. J., 2015. CFD simulations to study parameters affecting dust explosion venting in silos. Powder Technology, 272:132–141.
- Ürünveren, A., and Ural, S., 2017. Investigation of explosibility characteristics of some Turkish lignite coal dusts, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 39:21, 2039-2045, DOI: 10.1080/15567036.2017.1403515.
- Yuan, Z., Khakzad, N., Khan, F, and Amyyotte, P., 2015. Safety, Dust explosions: Process Safety and Environmental Protection, 98: 57–71
- Zhen, G., and Leuckel, W., 1997, Effects of ignitors and turbulence on dust Explosions. J. lms Prev. Process Ind., PII: S0950-4230:317-324.



ÖZGEÇMİŞ

Fatma BİLİRGEN, İlkokulu Öğretmen bir anne babanın çocuğu olduğu için değişik şehirlerde okudu. Orta ve lise öğrenimini Adana'da tamamladı. 1992 yılında Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden dereceyle mezun oldu. 1995-1999 yılları arasında Amerika'da Psychology ve Early Childhood Education eğitimi aldı. 2001 yılında Endüstri Mühendisliğinde master eğitimini tamamladı. Daha sonra Web Design ve Solidwork sertifikaları aldı. 2006 yılından itibaren Lehigh Üniversitesi Enerji Araştırmaları Merkezi'nde araştırmacı olarak göreve başladı. Burada çalıştığı yıllar içinde katı-gaz iki fazlı akışların deneysel ve nümerik yöntemler ile modellenmesi alanlarında çalışmalar yaptı. 2008 yılında Amerika'da Volvo Şirketler Gubu'na ait Mack Tır'larında tasarım ve üretim mühendisi olarak çalışmaya başladı. Mack Tır'ları için fren ve emisyonlar kısmında değişik tasarımlar geliştirerek uygulama imkânı yakaladı.

Amerika Birleşik Devletleri'nde edindiği tecrübelerini ülkesine taşımak amacı ile 2013 yılında Türkiye'ye dönüş yaptı ve Ar-Ge mühendisi olarak çalışmalarına başladı. Eğitimin hayat boyu devam eden bir süreç olduğuna inanarak 2015 yılında konusunda uzmanlaşmak amacı ile Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği bölümünde doktora eğitimine başladı. 2017 yılında Çukurova Üniversitesi Teknokent bünyesinde TABİ Mühendislik ve Enerji A.Ş. firmasını kurarak Ülkemizin ihtiyacı olan beyin göçü ve kadın girişimci sıfatıyla çalışmalarına devam etmektedir. Özellikle düşük kaliteli linyit rezervlerimizin elektrik üretiminde etkin olarak kullanılması ve emisyonlarının azaltılması konularında çalışmaların yanı sıra firmasında yaptığı patent ve yayınlarla da bu sığata layık olmaya çalışmaktadır.

TABİ Mühendislik ve Enerji ve Teknolojileri Sanayi ve Ticaret A.Ş.'yi 2017 yılında kurmuş ve hala orada yönetici olarak çalışmaktadır.





EKLER



Çizelge Ek 1.1. 1785-2012 yılları arasında dünyada meydana gelen toz patlamaları (Yuan, Z., ve arkadaşları, 2015).

Tablo A1 - 1785'ten 2012'ye kadar dünyadaki toz patlamalarının yüzde on üçü						
Tarih	Ülke	İlgili Ekipman	Endüstri Tipi	Ölü / Yaralı	Ateşleme Kaynağı	Referans
1785	IT	Depo	Gıda tesisi	2y	Alev ve direkt ısı	Eckhoff (2003)
1866	UK	-	-	388ö	Sıcak çalışma	Mining-Technology (2014)
1878	US	-	Fabrika	18ö	-	Explosion Hazards Ltd. (2015)
1906	FR	-	Kömür madeni	1099ö	Alev ve direkt ısı	Mining-Technology (2014)
1911	UK	-	Gıda ve yem tesisi	39ö/100y	Elektrik kıvılcımı	Explosion Hazards Ltd. (2015)
1911	UK	-	-	3ö/5y	-	Abbasi ve Abbasi (2007)
1916	US	Çelik çöp kutusu	Silo	-	-	Vijayaraghavan (2011)
1919	US	-	Gıda ve yem tesisi	43ö	-	Explosion Hazards Ltd. (2015)
1924	US	Nişasta tozu evi	Gıda ve yem tesisi	42ö/100y	Statik elektrik	GenDisasters (2007)
1930	UK	Silo	Gıda	11ö/32y	alevsiz yanma	Explosion Hazards Ltd. (2015)
1936	US	Kömür taşıma ekip	Kimyasal tesisi	2ö	-	NFPA (1957)
1956	US	Asansör	Gıda ve yem tesisi	1y	Sıcak çalışma	NFPA (1957)
1960	CHN	Elektrik lokomotif	Kömür madeni	684ö	Elektrik kıvılcımı	Wang ve Li (2001)
1960	AUS	Asansör	Silo/depo/asansör	-	Sıcak çalışma	Explosion Hazards Ltd. (2015)
1963	JPN	Maden rampası	Kömür madeni	458ö/839y	Sürtünme kıvılcımı	Hoshino and Iijima (1992)
1963	CHN	Toz toplayıcı	Metal ürün tesisi	19ö/24y	Darbe sürtünmesi	Wenku (2012)
1965	IN	Maden rampası	Kömür madeni	375ö	Alev ve direkt ısı	Mining-Technology (2014)
1969	CHN	Elektrik lokomotif	Kömür madeni	115ö/108y	Elektrik kıvılcımı	Wang ve Li (2001)

1970	GER	Silo	Silo/depo/asansör	6ö/17y	-	Eckhoff (2003)
1973	CHN	Kablo	Kömür madeni	50ö/10y	Alev ve direkt ısı	Wang and Li (2001)
1975	IN	-	Kömür madeni	372ö	-	Mining-Technology (2014)
1977	US	Asansör tüneli	Silo/depo/asansör	18ö/22y	Sürtünme kısılcımı	GenDisasters (2009)
1977	US	Asansör	Silo/depo/asansör	36ö/10y	Statik elektrik	BRIGHT HUB (2012)
1978	CHN	toz toplayıcı	Metal ürün tesisi	5ö/6y	Darbe sürtünmesi	Safahoo (2011)
1980	US	Çöp kutusu	Gıda ve yem tesisi	8ö/1y	-	CSB (2006)
1981	CHN	Ambar	Silo/depo/asansör	7y	Alev ve direkt ısı	Muyung Ltd. (2010)
1985	CHN	Çalışma alanı	Kömür madeni	63ö/3y	Sıcak çalışma	Wang ve Li (2001)
1985	US	Elektrik ekipmanı	hayvan ilacı paketleme	13ö/1y	Alev ve direkt ısı	CSB (2006)
1986	JPN	Tartı hunisi	Kimyasal tesisi	1y	Statik elektrik	Failure Knowledge Database (198
1986	CHN	-	Gıda ve yem tesisi	2ö/5y	-	Yan ve Yu (2012)
1986	CHN	Toz toplayıcı	Tekstil fabrikası	5ö/15y	Sürtünme kısılcımı	Safahoo (2011)
1986	US	Yakma firmı	Gıda ürünleri için duman aroması	4ö	Alev ve direkt ısı	CSB (2006)
1987	CHN	Çalışma alanı	Kömür madeni	3ö/1y	Sıcak çalışma	Wang ve Li (2001)
1987	CHN	-	Gıda ve yem tesisi	1y	-	Yan ve Yu (2012)
1987	CHN	Toz toplama sistemi	Tekstil fabrikası	58ç/177y	Statik elektrik	Explosion Hazards Ltd. (2015)
1987	CHN	-	-	1y	-	Yan ve Yu (2012)
1987	US	Öğütücü	kaplama gravür ve ilgili hizmetler	5ö/1y	-	CSB (2006)
1988	CHN	Çalışma alanı	Kömür madeni	26ö/1y	Sıcak çalışma	Wang and Li (2001)

1989	US	Toz toplama sistemi	Metal ürün tesisi	2ö/1y	Sıcak çalışma	CSB (2006)
1989	US	Tyler mode 2004 multispinder panel	Desteklenmeyen plastik profil şekilleri	2ö	Sıcak yüzey	CSB (2006)
1990	CHN	Detanatörler, karayolu	Kömür madeni	12ö/4y	-	Wang ve Li (2001)
1990	JPN	Depolama	Kimyasal tesisi	9ö/17y	-	Abbasi ve Abbasi (2007)
1990	US	Magnezyum harmanlama hunisi	Kimyasal tesisi	1ö/2y	Darbe kıvılcımı	CSB (2006)
1991	CHN	Karayolu, kablo	Kömür madeni	29ö/14y	Elektrik kıvılcımı	Wang ve Li (2001)
1991	CHN	Çalışma alanı	Kömür madeni	35ö/1y	Sıcak çalışma	Wang ve Li (2001)
1991	CHN	Çalışma alanı	Kömür madeni	16ö/7y	Sıcak çalışma	Wang ve Li (2001)
1991	US	Granülasyon	farmasötik müstahzar	1ö/1y	-	CSB (2006)
1991	US	Taşıma bandı	Ahşap ürün tesisi	2ö/1y	-	CSB (2006)
1991	US	Makine presi, asetilen meşalesi	Plastik ürünler fabrikası	2ö	Alev ve direkt ısı	CSB (2006)
1992	JPN	Karıştırıcı	Havaifşek üretim tesisi	3ö/58y	Sürtünme kıvılcımı	Explosion Hazards Ltd. (2015)
1992	CA	-	Kömür madeni	26ö/1y	Alev ve direkt ısı	GenDisasters (2009)
1992	US	Toz toplama sistemi	Ahşap ürün tesisi	2ö	-	CSB (2006)
1993	CHN	Karayolu	Kömür madeni	40ö/45y	Sıcak çalışma	Wang ve Li (2001)
1993	US	Plazma hava ark göstergesi, karıştırma tankı	Plastik ürünler fabrikası	2ö/2y	Elektrik kıvılcımı	CSB (2006)
1993	US	-	Gıda ve yem tesisi	9ö/17y	Alev ve direkt ısı	CSB (2006)
1994	CHN	Kömür şeridi	Kömür madeni	79ö/129y	Sürtünme kıvılcımı	Wang ve Li (2001)
1994	US	Türbin jeneratör hunisi	Elektrik servisi	22ö	Alev ve direkt ısı	CSB (2006)
1994	US	Metal kanal	Metal ürün tesisi	6ö/1y	Sürtünme kıvılcımı	CSB (2006)

1994	US	Halojen ışık, toz toplama sistemi	Tesis destek tesisi	2ö	Sıcak yüzey	CSB (2006)
1996	US	Karıştırma çantası	Otomobil fren pedi ve astarı üreticisi	1ö	-	CSB (2006)
1997	JPN	Torba filtresi, toz toplama aygıtı	-	1ö/1y	-	Abbasi ve Abbasi (2007)
1997	FR	Depo	Silo/depo/asansör	11ö/1y	Darbe kıvılcımı	Masson (1998)
1997	US	Toz toplama sistemi, kaynak makinesi	Motorlu araç parça ve aksesuarları	5ö	-	CSB (2006)
1998	US	Kesici, vakum	Elektrik servisi	17ö	-	CSB (2006)
1998	US	Toz toplayıcı, hava talıma kanalı	Spor ekipman üreticisi	16ö	-	CSB (2006)
1999	US	Kazan	Güç istasyonu	30ö/6y	Alev ve direkt ısı	CSB (2006)
1999	US	Ocak, Toz toplama sistemi	gri ve kanal dökümhan	9ö/3y	Alev ve direkt ısı	CSB (2006)
1999	US	Silo	Ahşap ürün tesisi	4ö	-	CSB (2006)
1999	US	Plastik pelet öğütme makine	Plastik ürünler fabrikası	2ö	Sıcak çalışma	CSB (2006)
2000	CHN	Toz geri dönüşüm ekipmanı	Ahşap ürün tesisi	4ö/7y	-	Chinanews (2008)
2000	US	-	Gıda ve yem tesisi	3ö	Sıcak çalışma	CSB (2006)
2001	CHN	Karayolu	Kömür madeni	17ö/23y	-	China State Administration of Work Safety (2015)
2001	IT	Depo	Yün fabrikası	3ö/5y	Elektrik kıvılcımı	Piccinini (2008)
2001	CHN	Havalandırma	Ahşap ürün tesisi	6y	Statik elektrik	Safehoo (2011)
2001	CHN	Silo	Gıda ve yem tesisi	1ö/7y	Kendi kendine yanma ve alevsiz yanma	Chinanews (2008)
2001	US	-	Ahşap ürün tesisi	10ö/3y	-	CSB (2006)
2001	US	Testere, süpürge	Roket yakıtı/motor	3ö/1y	Sıcak çalışma	CSB (2006)
2001	US	Toz toplayıcı	Metal ürün tesisi	2ö	-	CSB (2006)

2002	CHN	Karıştırıcı	Gıda ve yem tesisi	8y	-	Sina (2002)
2002	CHN	-	-	-	Alev ve direkt ısı	Anquan (2015)
2002	CHN	-	Gıda ve yem tesisi	6ö/12y	-	Chinanews (2002)
2002	CHN	-	Kömür madeni	9ö/14y	-	China State Administration of Work Safety (2015)
2002	CHN	Atölye	Bakımhan e	17y	Sıcak çalışma	Sina (2002)
2002	US	Lastik kutusu	Lastik geri dönüşüm	13ö	-	CSB (2006)
2003	CHN	-	Kömür madeni	3ö	-	China State Administration of Work Safety (2015)
2003	US	Freze ekipmanı	Mekanik kauçuk ürünler	38ö/6y	-	CSB (2006)
2003	US	-	-	2ö	-	CSB (2006)
2003	US	Fırın	-	37ö/7y	-	CSB (2006)
2003	US	-	-	9ö/2y	-	CSB (2006)
2004	CHN	Kömür şeridi	Kömür madeni	2ö/16y	-	China State Administration of Work Safety (2015)
2004	UK	LPG tankı	Plastik ürünler fabrikası	9ö/33y	Alev ve direkt ısı	Explosion Hazards Ltd. (2015)
2004	US	-	-	2ö	-	CSB (2006)
2004	US	Toz toplama sistemi	Ahşap ürün tesisi	3ö	Darbe kıvılcımı	CSB (2006)
2004	US	Filtreleme bölümü	Soya peyniri üretim	16ö/1y	-	CSB (2006)
2005	CHN	Yeraltı kömürlük	Kömür madeni	171ö	-	Chinanews (2005)
2006	CHN	-	-	7y	-	Yan ve Yu (2012)
2006	CHN	-	Kömür madeni	14ö	-	China State Administration of Work Safety (2015)
2007	CHN	Taşıyıcı	Odun postu	4ö/5y	-	Xinhuanews (2007)

2007	CHN	Atölye	Pirinç fabrikası	-	Sıcak yüzey	Wenku (2010)
2007	CHN	Tahıl ambarı	Gıda işlemecisi	5y	Kendi kendine yanma ve alevsiz yanma	Fire Department (2007)
2007	CHN	Paketleme atölyesi	Ahşap ürün tesisi	16/1y	Elektrik kıvılcımı	Chinanews (2007)
2007	CHN	-	Kömür madeni	31ö	-	China State Administration of Work Safety (2015)
2008	CHN	-	Nişasta/Şeker	12y	-	Yan ve Yu (2012)
2008	CHN	Toz toplama sistemi	Metal ürün tesisi	10y	Elektrik kıvılcımı	Chinanews (2008)
2009	CHN	Atölye	Alüminyum ürün üreticisi	11ö/20y	Kendi kendine yanma ve alevsiz yanma	Xinhuanews (2009)
2009	CHN	-	Ahşap ürün tesisi	8y	-	Yan ve Yu (2012)
2009	CHN	Toz toplama sistemi	Kimyasal tesisi	2y	-	Chinanews (2009)
2010	US	Silo	Titanyum tesisi	3ö	-	CSB (2006)
2010	CHN	Toz odası	Metal parlatma	26/6y	Darbe kıvılcımı	Chinanews (2010)
2010	US	Kömür şeridi	Kömür madeni	29ö/2y	Alev ve direkt ısı	McAteer ve diğerleri (2011)
2011	US	Borular, fırın	Demir tozu tesisi	36/2y	Darbe stürtünmesi	CSB (2011)
2011	CHN	Parlatma atölyesi	Alüminyum ürün	56/1y	Alev ve direkt ısı	Chinanews (2011)
2012	CHN	Parlatma atölyesi	Metal parlatma tesisi	136/16y	Elektrik kıvılcımı	Safahoo (2013)
2012	CHN	Parlatma atölyesi	Elma tedarik fabrikası	59y	-	NPR News (2012)
2012	CHN	-	Kömür madeni	66	-	Chinanews (2012)

M: Metal T: Tahta G: Gıda İN: İnorganik K: kömür P: Plastik