

# Yüksek Hızlı Görüntüleme Tekniğini Kullanarak Hassas Patlayıcı Analizi

*Yazar Dr. Vilem Petr, Colorado School of Mines*

*Teknik Katkıları: Philip Taylor ve Gene Nepomuceno, Vision Research*

**P**atlayıcıların inşaat için arazi temizlemede ve derin madenleri kazmada veya askeri ve polis teşkilatı tarafından kullanıldığı göz önünde bulundurularak, çeşitli kimyasal karışımların ve füyelerin bir kimyasalın gücünü nasıl etkilediğinin anlaşılması önem arz etmektedir. Yüksek hızlı görüntüleme tekniği nicel olarak patlayıcıları yakalamak, oluşan hasarı kaydetmek ve patlamanın diğer önemli parametrelerini ölçmek için kullanılabilir. Toplanan veriler, sonradan daha iyi ve daha hassas patlamaların oluşmasına neden olan, bir patlamanın anlaşılması ve karakterizasyonu açısından yardımcı bilgiler sağlayabilir.

## **YÜKSEK HIZLI GÖRÜNTÜLEMENİN GÜCÜ**

Patlamalar, eskiden bir patlama öncesindeki sahnenin manüel olarak gözlemlenmesi ve ardından nihai enkaza bakılmasıyla analiz edilirdi. Şok dalgasının hızlı, radyal genişlemesi ve patlamayla dağılan parçaların hızı dahil olmak üzere ilgili ölçümleri sağlamak için yüksek hızlı görüntüleme teknolojisiyle birlikte gölge ölçümü veya Schlieren görüntüleme gibi gelişmiş görüntüleme teknikleri kullanılabilir.

Patlamalar, aşırı parlak ışık ve genellikle geniş, yüksek hızlı ve görüşü engelleyen enkazları ortaya çıkaran termokimyasal reaksiyonlardır. Bir şok dalgası saniyede 400 ila 600 metre arasında hareket ettiğinden dolayı, görüntüleme alanının bu değişiklikleri yakalayabilecek kadar büyük olması gerekir - tipik olarak 50 x 50 cm civarında bir alan gerekir. Ayrıca, görüntülerin işleme sonrasında yüksek kaliteli veri sağlamak için mümkün olan en yüksek çözünürlüğün kullanılması önemlidir. Kamera, patlamaya yakın bir yerde yerleştirilecekse, güçlü patlamanın yarattığı şok dalgalarına ve bu şok dalgalarını takip eden güçlü hava hareketlerine karşı dayanıklı bir kamera seçilmelidir.

Gelişmiş teknikler ...  
İlgili ölçümleri  
sağlamak için yüksek  
hızlı görüntüleme  
tekniki ile birleştirilebilir.

## Yüksek Hızlı Görüntüleme Tekniğini Kullanarak Hassas Patlayıcı Analizi

### AKIŞKANA KARŞI DUYARSIZLAŞTIRILMIŞ FÜNYELERİN YÜKSEK HIZDA GÖRÜNTÜLENMESİ

Colorado School of Mines'daki Gelişmiş Patlayıcılar İşleme ve Araştırma Grubu (AXPRO) petrol ve gaz uygulamalarında, özellikle de iyi bir delik açma için kullanılan akışkana karşı duyarsızlaştırılmış füyeler üzerinde çalışmak için yüksek hızlı görüntüleme tekniğini kullandı. Bu füyeler herhangi bir akışkan varlığında deaktive olmasını sağlayan deliklere sahip olup, akışkanın delme tabancasına girişini önlemek için ek koruma sunar.<sup>1</sup> AXPRO'da lisans araştırmacısı Erika Nieczkoski, petrol endüstrisi tarafından yaygın olarak kullanılan bir duyarsız füyenin özellikle

su, beyaz ispirotolar ve dizel petrol gibi delme ekipmanını temizlemek için kullanılan akışkanlara maruz kaldığında doğru çalışıp çalışmadığını belirlemeye çalışmıştır. Bu çalışmanın bulguları petrol ve gaz endüstrisi tarafından delinme yüklerinin toplanmasında standartlaştırılmış bir işletim prosedürü için kabul edildi.

Deney, akışkanların füyelerle etkileşimlerini ve evreleri anlamak için patlama sırasında gözlemler yapılmasını gerektirdi. Araştırmacılar, füyenin aktivasyonunu yakalamak için yüksek hızlı kamera kullandı. Bu görüntüleme, bir patlamanın meydana gelip gelmediğini gözlemlenmelerini mümkün kıldı. Bir

patlama olduğunda, bunun tam veya kısmi bir patlama olup olmadığına karar verildi. Araştırmacılar saniyede 59.027 kare (fps) hızla çalışan bir Phantom v711 kamera kullandılar. Patlamalar, gölge grafiği veya diğer görüntüleme teknikleri kullanılmadan doğrudan görüntülendi. Şekil 1 ve 2 deney hazırlığını göstermektedir. Video 1 ve 2 deney sonuçlarının bazılarını göstermektedir.

Yüksek hızlı görüntüleme, tam veya kısmi bir patlamanın meydana gelip gelmediğini belirledi, ayrıca tam patlamanın görselleştirilmesini ve karakterizasyonunu sağlayarak füyenin içinde ve patlama sırasında gerçekleşen hassas süreçlere ilişkin

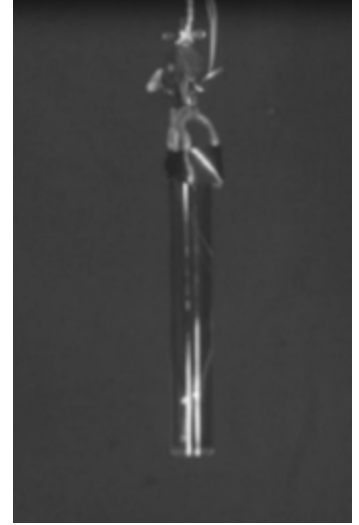
Şekil 1: Deney düzeneği - Yüksek hızlı kamera bölümü



Video 1: Ham petrol ile yapılan deney



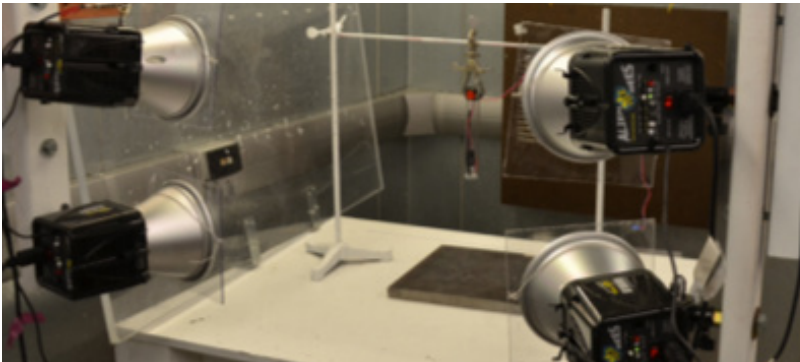
Video 2: Üretilmiş su ile yapılan deney



*Videoyu başlatmak için resme tıklayın.*

*Videoyu başlatmak için resme tıklayın.*

Şekil 2: Deney düzeneği - Numune ve aydınlatma bölümü



## Yüksek Hızlı Görüntüleme Tekniğini Kullanarak Hassas Patlayıcı Analizi

nicel bilgiler ve görsel kanıtlar ortaya koydu. Araştırmacılar, hangi koşulların başarısız duyarsızlaştırmaya neden olduğunu görebildiler ve temizleyici akışkanların, dizel ve beyaz ispirotların fünye performansını gerçekten etkilediğini ve fünyenin doğrudan ikinci patlamada uygulandığında duyarsızlaştığını tespit ettiler. Ek olarak, 200 cm'ye kadar içme suyunun içine tamamen batırıldığında fünyelerin duyarsızlaşmadığını gözlemlidiler. Şekil 3, suyla yapılan testlerin sonuçlarından birini göstermektedir.

### PATLAMA DALGASINI ÖLÇMENİN YENİ YÖNTEMİ

Patlayıcı Madde Üreticileri Enstitüsü (IME), AXPRO araştırmacılarından sanayi fünyelerinin mukavemetini ölçmek için optik bir yöntem geliştirmelerini talep etti. AXPRO, fünye mukavemetini ve performansını doğru şekilde karakterize etmek için kullanılabilen tekrarlanabilir bir prosedür oluşturmak için yüksek hızlı

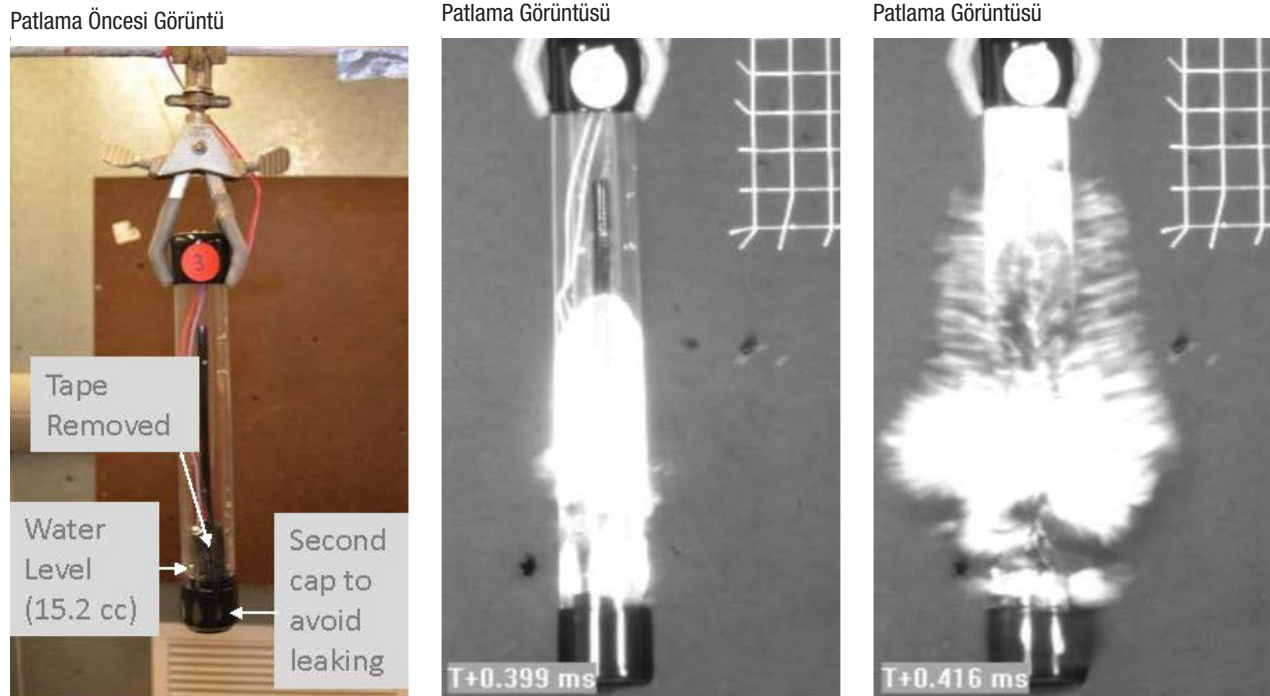
görüntüleme ve gölge grafiğini birleştirdi.<sup>2</sup> Geleneksel olarak, fünye mukavemeti, bir başlatma sisteminin metal çivi yanında kuma gömüldüğü veya metal tespit plakasının yakınında patlatıldığı ve sonuçların analiz edildiği dolaylı ölçüm teknikleriyle karakterize edilir. Fakat, bu yöntemler yanlış olabilir ve zaman kaybına yol açabilir. Belirli bir standart analiz yaklaşımı, üretim konumundan bağımsız olarak, özel olarak üretilen fünyelerin aynı mukavemete sahip olmalarını sağlamaya yardımcı olacaktır ve Birleşmiş Milletler'in karakterizasyon testi standardı olarak kullanılabilir. Standart test yaklaşımı, endüstri standartlarındaki el yapımı fünyelerin mukavemetini karşılaştırma konusunda kolluk kuvvetlerine yardımcı olabilir.

AXPRO tarafından oluşturulan yeni yaklaşım, (1) dijital görüntü korelasyonu (DIC), yer değiştirmenin tam alan nicel analizini sunan bir optik ölçüm tekniği ile (2) şok dalgasının ışıkla etkileşime geçtiği

anda oluşan gölgeyi görüntüleyen özel bir görselleştirme tekniği olan gölge grafiği ile birleştirir. Yaklaşım, tamamen ışıksız bir odada patlayıcıların patlatılmasından, gölge grafiği yöntemiyle yüksek hızlı kamera kullanılarak reaksiyonun yakalanmasından ve ölçüm hesaplamalarının DIC yazılımıyla işlenmesinden oluşur. Sonuçlar olay sırasında şok dalgası basıncını doğrudan ölçen basınç göstergeleri ile kalibre edilir. Bu yöntem, nispeten düşük maliyetli bir şekilde fünyenin enerji çıkışını doğrudan temsil eden ölçümler sağlar ve önceden kullanılan tekniklerle kıyaslandığında yüksek doğrulukta veri elde etmeyi sağlar ve veri analiz süresini azaltır.

Gölge grafiğini gerçekleştirmek için 9.100 fps kare hızına ve 608 X 600 piksel çözünürlüğe sahip olan Phantom v711 yüksek hızlı kamera ve ışık kaynağı olarak tek AlienBees Flash Unit B1600, 5 milimetrelük çubuk ayna ve geri yansıtan perde kullanıldı. Şekil 4, gölge grafiği deney hazırlığının kuş bakışı

Şekil 3: İlk devre dışı bırakma deliğinin altındaki suyla deneyden görüntüler





## Yüksek Hızlı Görüntüleme Tekniğini Kullanarak Hassas Patlayıcı Analizi

görünümünü göstermektedir. Patlayıcılar gibi son derece hızlı olguları yakalamak için kısa bir pozlama süresi ve büyük (f/4.5) diyafram açıklığı kullanılmalıdır. Patlayıcılar, görüntüleri doyurabilecek parlak ışık üretir, ancak bu genellikle yalnızca ilk birkaç çerçeveyi etkiler. Bunu hafifletmek için, araştırmacılar kameranın aşırı dinamik aralık (EDR) modundan yararlandılar. 'EDR' işlevi, son kullanıcının nesnedeki daha koyu alanları açığa çıkarmasına ve ardından doygun hale gelebilecek görüntü bölümleri için ayrı ve bağımsız piksel seviyesi EDR pozlamasını belirlemelerini sağlar ve böylece görüntünün aşırı pozlamaya eğilimli olduğu alanlardaki veriler korunur.

HernekadargölgegrafiğiileilgiliSchlieren teknikleri de dikkate alınmış olsa bile, araştırmacılar Schlieren görüntüleme tekniği için gerekli olan aynaların sadece analiz alanını sınırladığını değil, aynı zamanda gerekli ekipman maliyetini artırdığını da tespit etmiştir. Gölge grafiği ile özel aynalar olmadan nispeten daha ucuz, büyük ve geri yansıtıcı

perde üzerine gölge düşürebildiler. Bu, 40 veya 50 santimetre karelik bir alandan görüntülerin alınmasını sağladı. Bu perdeler, enkazla hasar görürse kolayca tamir edilebilir veya değiştirilebilir. Genelde durağan fotoğrafçılık için kullanılan AlienBees B1600 flaş ünitesi, bu test için yeterli süre boyunca uygun aydınlatma sağladı.

DIC'yi kullanarak ölçümleri hesaplamak için, araştırmacılar art arda karelerde şok dalgasının konumunu izlemek için ImageJ yazılımını kullandılar. ImageJ, Ulusal Sağlık Enstitülerinde geliştirilen, kamuya açık bir Java tabanlı görüntü işleme programıdır. Şok dalgasının radyal genişlemesinin bir görüntüsü elde edildi ve fragmanların hızını ölçmek için kullanıldı. DIC ile en yüksek kalitede veri ve görüntülerin yakalanması, kameranın görüntüleme hedefi ile dikkatli bir şekilde hizalanmasının yanı sıra minimum hata ile ölçeğin belirlenmesini gerektiriyordu. Ayrıca, araştırmacılar genişleyen şok dalgalarını ölçtükleri için, paralel olmayan ışığın düzeltilmesi önemlidir. Şekil 5, 6 ve 7, patlamaların görüntülerini ve ImageJ

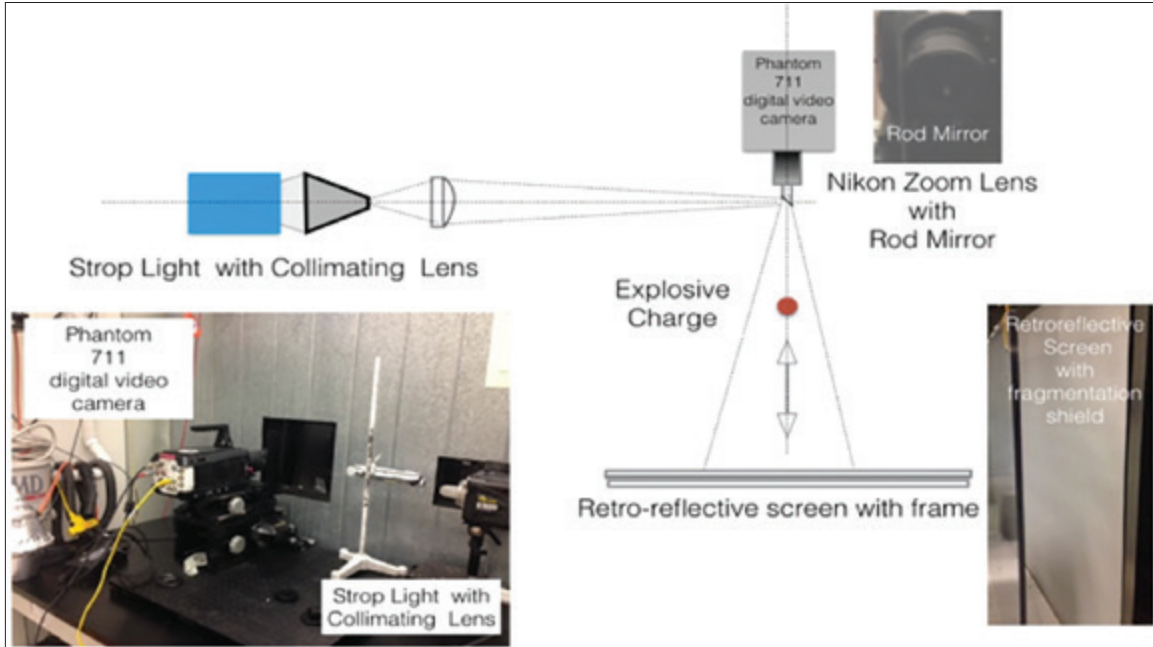
yazılımı ile üretilen yaklaşık patlama dalgasını göstermektedir.

AXPRO araştırmacıları, #6 ve #8 kuvvetindeki elektrikli füyeler ve elektrikli köprülü füyelerin ilk patlama dalgasının görüntülerini oluşturarak kendi yeni tekniklerini test ettiler. Teknikle elde edilen net ve hassas görüntüler patlama performansını yüksek doğrulukla karakterize etmelerine izin verdi. Daha sonra, Mach sayısına karşı mesafeyi hesaplamak için görüntüleri ve elde edilen verileri kullandılar, böylece patlayıcı yükünü çevreleyen kovan ile ilgili tek bir verim katsayısı elde ettiler. Ayrıca, füyenin toplam patlayıcı enerjisini hesaplamak için füyeye fişeği tarafından emilen momentumu kullandılar.

### PATLAYICILARIN GÖRÜNTÜLENMESİ İÇİN DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN AYDINLATMA KOŞULLARI

Patlayıcı görüntülerken uygun aydınlatma sağlanması önemlidir. Patlamanın parlaklığı nedeniyle, görüntüleme için her

Şekil 4: Geri yansıtıcı gölge grafik deney düzeneği (üstten görünüm)



## Yüksek Hızlı Görüntüleme Tekniğini Kullanarak Hassas Patlayıcı Analizi

zaman ek aydınlatmaya gerek duyulmaz. Aslında, patlamayla yayılan ışığı sınırlamak daha önemli bir husustur. Nötr yoğunluklu bir filtre yardımcı olabilir, çünkü ışığın tüm dalga boylarının yoğunluğunu eşit şekilde düşürür ve aşırı pozlanmış resimler oluşturan diyafram açıklığı, pozlama süresi ve sensör hassasiyetinin kombinasyonunu kullanmaya izin verir. Minimum açıklık, kısa pozlama süreleri ve bir kameranın EDR modunun kullanılması, ışığı azaltma açısından faydalı olabilir. Şekil 8, 9 ve 10, parlak bir görüntü elde etmede azaltılmış pozlama süresi ve EDR modunun etkisini göstermektedir.

Bir patlama öncesinde bir nesnenin veya alanın görüntüsü gerekiyorsa, aydınlatma için patlamayla ilgili LED'ler kullanılabilir. Nesneyi aydınlatırken, aydınlatıcı ışık kaynağının ve patlamadan gelen ışığın her ikisinin de kameranın dinamik

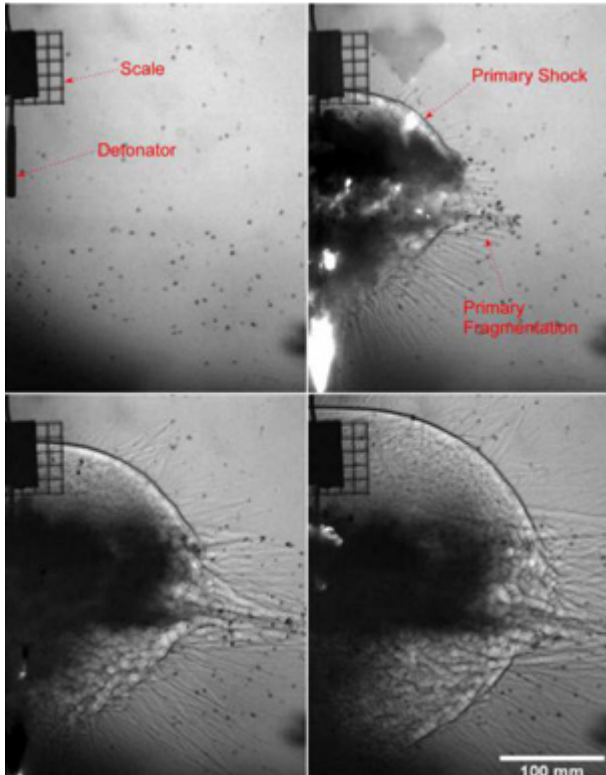
aralığı içerisinde kalması önemlidir. Bu, patlamadan ne kadar ışık geleceğini tahmin etmek için kullanılabilecek yöntemlerin sınırlı olması nedeniyle çok zor olabilir. Temel kural, 1 mikrosaniye veya daha kısa süreli aydınlatma ile başlamak, ardından çok parlak ise diyafram ayarını yapmak veya doğal yoğunluk filtresi kullanmaktır.

Patlama esnasında bir nesnenin görüntülenmesi gerekiyorsa, ateş topunu görmek için bir lazer ve bir çentik filtresi kullanılabilir. Birlikte kullanıldığında, lazer yüksek parlaklık ve dar bantlı ışık ile nesneyi aydınlatırken çentik filtresi yalnızca lazer ışığını geçirir ve patlamadan yayılan geniş bantlı ışığı geri çevirir. Bu, aksi halde parlak ateş topu tarafından engellenecek olan patlamanın ayrıntılarının kamerayla kaydedilmesine olanak tanır. Cavitar Ltd., patlamaları

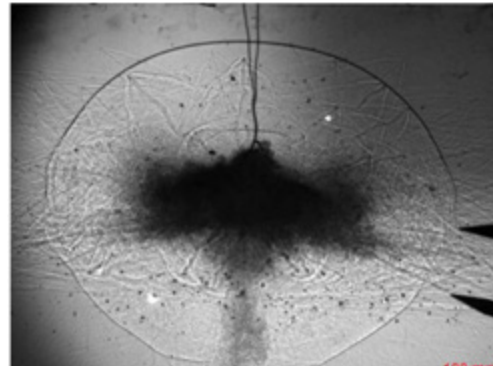
görüntülemek için gerekli olan kısa pozlamalarda yüksek tekrar hızlarını sağlayabilen diyet lazerler sunar. Lazerin yakın kızılötesi dalga boyu, 100.000 fps üzerindeki hızlarda duman yoluyla görüntülemeye yardımcı olur.

Arjon mumları - argon gazı ile dolu kaplar - kısa pozlama süresi ile görüntüleme için yüksek yoğunluklu bir ışık kaynağı olarak kullanılabilir. Bir patlayıcı yükü ışığın çok yoğun kısa süreli patlamasını oluşturmak için argon gazıyla bir şok dalgası oluşturur. Sisteme aynalar eklendiğinde ışığı gölge oluşturmayacak şekilde yönlendirebilir. Bu teknik, kurulumun karmaşıklığından ve elektrik ışık kaynaklarının kolaylıkla elde edildiğinden dolayı nadiren kullanılır (örneğin, MegaSun aydınlatma sistemi, yüksek hızlı görüntüleme fotoğrafçılığı için argon mumlarının yerini alabilir).

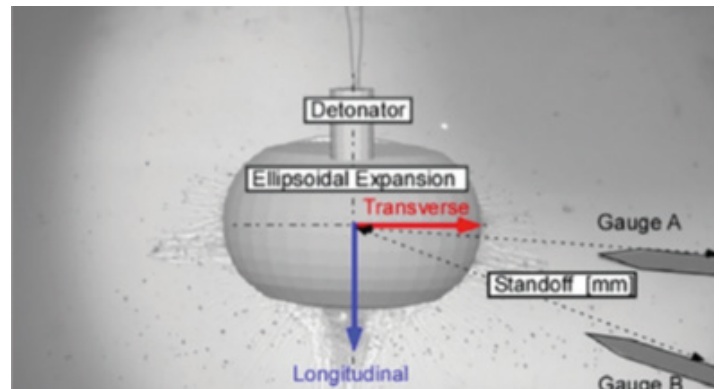
Şekil 5: Basınç dalgasının görüntü sekansı



Şekil 6: Patlama dalgasının görüntüsü

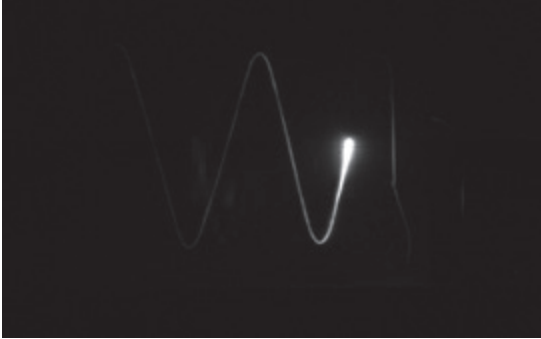


Şekil 7: ImageJ Yazılımı kullanılarak üretilen yaklaşık patlama dalgası



## Yüksek Hızlı Görüntüleme Tekniğini Kullanarak Hassas Patlayıcı Analizi

Şekil 8: 25,000 fps, 1 µs pozlama, 5 µs EDR ile Phantom v2512

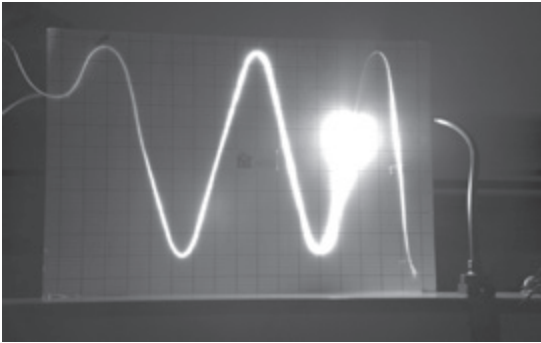


Sonuç olarak, doğru görüntüleme yaklaşımı ve aydınlatma sistemiyle birleştirilen yüksek hızlı görüntüleme tekniğiyle elde edilen yüksek kaliteli veri bilim adamlarının patlayıcılar ve bunların patlama sistemleri üzerinde daha önce mümkün olmayan bir şekilde çalışabilmelerine yardımcı oluyor.

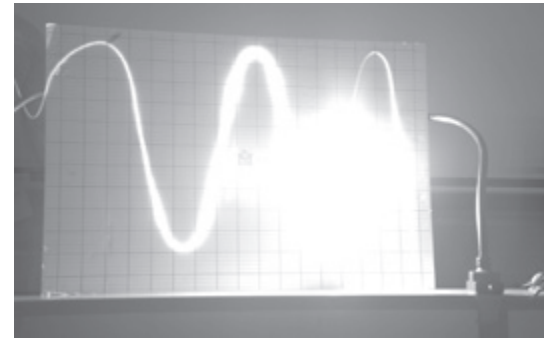
### Referanslar

1. Pioneer Enerji Servisi - Akışkana Duyarsızlaştırılmış Füyeler için Önerilen Güvenli Çalışma Uygulamaları: "Petrol ve Gaz Delme Tabancaları için Başlatma Sistemleri: Endüstride Kullanılan Temizleyici Akışkanlarının A-140F Delme Başlatma Sistemine Etkilerinin İncelenmesi." Yazar: E. Nieczkoski, V. Petr, Ağustos 2015. <http://axpro.mines.edu/documents/Oilstar%20Detonators.pdf>
2. Vision Research Örnek Olay Çalışması: "Standart Fünnye ile Oluşturulan Patlama Dalgası Enerjisini Ölçmek için Gölge Grafiği Optik Tekniği". Yazar: Vilem Petr, Erika Nieczkoski, Eduardo Lozano. <http://axpro.mines.edu/documents/Vision Research Case Study.pdf>

Şekil 9: 25,000 fps, 10 µs pozlama, 5 µs EDR ile Phantom v2512



Şekil 10: 25,000 fps, 39 µs pozlama, 20 µs EDR ile Phantom v2512



**VISION**  
**RESEARCH**

**AMETEK**  
MATERIALS ANALYSIS DIVISION

### VISION RESEARCH HAKKINDA

Vision Research, yüksek hızlı patlamaları görüntülemek ve analiz etmek için kullanılabilen dijital yüksek hızlı kameraları tasarlar ve üretir. Vision Research, AMETEK Inc. Şirketinin Malzeme Analiz Bölümünün iş birimidir.

Phantom v711, ikinci nesil v710 kameradır. Selefi ile aynı güçlü özelliklere sahiptir, ancak daha küçük, daha hafiftir ve kamera üzerinde ve bağlantı kontrollerinde ek donanıma sahiptir. Kamera, tam çözünürlükte saniyede 7.530 kare maksimum hıza sahip. Düşürülmüş çözünürlüklerde, kamera saniyede 680.000 kare (fps) veya FAST (HIZLI) seçeneği ile 1.400.000 fps ye kadar kayıt yapabilir.



AMETEK Vision Research'ün bazı Phantom kameraları ihracat lisansı standartlarını tabidir. Daha fazla bilgi için lütfen şu adrese gidin: [www.phantomhighspeed.com/export](http://www.phantomhighspeed.com/export)



**AXPRO GROUP**  
Advanced Explosive  
Processing Research Group

İşbirlikçiler



**COLORADO SCHOOL OF MINES**  
EARTH • ENERGY • ENVIRONMENT