



DÖNEN PATLAMA MOTORLARINDAKİ OLUŞAN DALGA YAPISININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Osman KOCAASLAN*, Kürşad Melih GÜLEREN**,
Bayındır Hüseyin SARACOĞLU***, Tolga YASA****

*Selçuk Üniversitesi Huğlu Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 42700 Beyşehir, Konya,
okocaaslan@selcuk.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7848-6974

**Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, 26480
Batımeşelik, Eskişehir, kursadmeli.guleren@ogu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3464-7956

**Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Turbomachinery and Propulsion Department, 1640, Rhode-Saint-
Genese, Belçika, saracog@vki.ac.be, ORCID: 0000-0002-3961-3555

****Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü 26555 Tepebaşı, Eskişehir,
tyasa@eskisehir.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7242-2507

(Geliş Tarihi: 22.03.2023, Kabul Tarihi: 06.05.2024)

Özet: Bu çalışmada dönen patlama motorundaki patlama dalgası yapısı ve itki performansı sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmalar iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak deneysel ve sayısal verilerin yer aldığı referans çalışmaya yönelik doğrulama çalışmaları tamamlanmıştır. Deneysel çalışmalarda hidrojen 0.8 mm çapındaki 90 enjektörden, hava ise 0.4 mm genişliğindeki aralıktan patlama kanalına aktarılmaktadır. Referans sayısal çalışmada yer verildiği üzere tek basamaklı tersinmez hidrojen-hava mekanizması doğrulama çalışmalarında kullanılmıştır. Doğrulama analizleri sonrasında patlama dalgasının detaylı olarak incelenebilmesi için 19 basamaklı tersinmez hidrojen-hava reaksiyon mekanizması sayısal çalışmalara tanımlanmıştır. Sayısal çalışmalarda daimi olmayan yoğunluğa dayalı çözücü kullanılmıştır. İkinci aşamada patlama dalga yapısı ve dönen patlama motorunun itki performansı araştırılmıştır. Sonuç olarak patlama dalgasının 1.1 ms sonrasında kararlı yapıya ulaşabildiği belirlenmiştir. Değişen blokaj oranı nedeniyle $t=1.1$ ms öncesinde patlama dalgası yüksekliği sabit kalmamıştır. Kararlı patlama dalgası yüksekliğinin tek basamaklı ve 19 basamaklı çalışmalarında sırasıyla 29 mm ve 27 mm olduğu tespit edilmiştir. Patlama kanalı çıkışındaki itki dağılımının kararlı patlama dalgası ile neredeyse sabit olduğu belirlenmiş ve itki değerinde 678.7 ± 2.3 N aralığında salınımların meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Blokaj Oranı, Dönen Patlama Motoru, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Patlama Dalgası

NUMERICAL INVESTIGATION of WAVE STRUCTURE IN ROTATING DETONATION ENGINES

Abstract: In this study, the detonation wave structure and thrust performance of the rotating detonation engine were investigated numerically. Numerical studies are in two stages. First, validation studies were carried out according to the referenced study. Experimental and numerical studies are included in the reference study. In experimental studies, hydrogen is transferred from 90 injectors with a diameter of 0.8 mm, and the air is transferred to the detonation channel through a gap of 0.4 mm wide. As included in the reference numerical study, one-step irreversible hydrogen-air mechanism was used in validation studies. To examine the detonation wave in detail after the validation analysis, the 19-steps irreversible hydrogen-air reaction mechanism was defined in numerical studies. The transient density-based solver was used for numerical analyses. In the second stage, the detonation wave structure and the thrust performance of the rotating detonation engine were investigated. As a result, it was determined that the detonation wave could reach a stable structure after 1.1 ms. The detonation wave height was not constant due to the blockage ratio changing before $t=1.1$ ms. The stable detonation wave height was found to be 29 mm and 27 mm in one-step and 19-steps reaction mechanism studies, respectively. When the thrust distribution at the exit of the detonation channel was examined, it was determined that it was almost constant with the stable detonation wave and it was observed that oscillations occurred in the range of 678.7 ± 2.3 N in the thrust value.

Keywords: Blokaj Ratio, Rotating Detonation Engine, Computational Fluid Dynamics, Detonation Wave

SEMBOLLER

A	Üstel faktör
b	Sıcaklık üssü
$c_{p,mix}$	Karışım özgül ısı kapasitesi [J/kgK]
E	Toplam enerji [J]
E_a	Karışım fraksiyonu [J]
f	Dalga frekansı [1/s]
F, G	Konvektif akı
$F_{(t)}$	İtki [N]
h_f^0	Standart şartlarda oluşum entalpisi [J/mol]
h_{tot}	Patlama dalgası yüksekliği [mm]
$h_{tot,ave}$	Ortalama patlama dalgası yüksekliği [mm]
H	Toplam entalpi [J]
k_r	Reaksiyon hızı [1/s]
M_{Wk}	K ürününün molekül ağırlığı [kg/kmol]
\dot{m}	Kütlesel debi [kg/s]
n_D	Dalga sayısı
p	Basınç [Pa]
p_{back}	Geri basınç [Pa]
p_{cj}	Chapman-Jouguet basıncı [Pa]
p_{crit}	Kritik basınç [Pa]
p_{det}	Patlama dalgası cephesi basıncı [Pa]
p_w	Enjektör duvarına en yakın hücre basıncı [Pa]
p_0	Toplam basınç [Pa]
Q	Konservatif değişkenler
R	Gaz sabiti [J/kg-K]
\bar{R}	İdeal gaz sabiti [J/kmolK]
S	Kaynak terim
t	Zaman [s]
T	Sıcaklık [K]
T_{cj}	Chapman-Jouguet sıcaklığı [K]
T_0	Toplam sıcaklık [K]
u, \vec{v}	Hız [m/s]
U_D	Dalga hızı [m/s]
Y	Kütle fraksiyonu
P	Yoğunluk [kg/m ³]
Γ	Özgül ısı oranı

KISALTMALAR

İng.	İngilizcesi
DaPM	Darbeli patlama motorları
DoPM	Dönen patlama motorları
C-J	Chapman-Jouguet

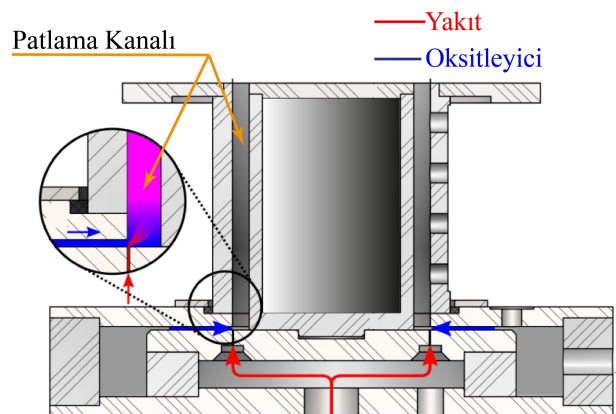
GİRİŞ

Ticari ve savunma odaklı itki sistemlerinde daha yüksek performans ve termal verimlerin elde edilmesi motivasyonu patlama tabanlı motorlara yönelik ilginin artmasını sağlamıştır. Geleneksel havacılık itki sistemlerinde ses altı yanma (İng. deflagration) ile itki üretimi gerçekleştirilmektedir. İdeal Humprey ve Brayton çevrimlerine yönelik başlangıç sıcaklık ve basınç değerlerinin sırası ile 300 K ve 1 atm seçilerek gerçekleştirilen termodinamik analizler, termal verimin Humprey çevrimlerinde %9.8 oranında arttığını göstermiştir (Bigler vd., 2017). Su vd. (2022) dönen patlama motoru beslemeli turbojet motorunun, turbofan motorlarına göre yakıt tüketimi ve itki kazanımlarını

analitik yöntemler ile incelemişlerdir. Orta ve yüksek basınç oranlarında yakıt tüketiminde %20 düşüşlerin elde edilebileceği belirlenmiştir.

Patlama (detonasyon) tabanlı motorlarda, şok dalgası ve kimyasal reaksiyon cephesinin oluşturduğu patlama dalgası cephesi sayesinde itki üretimi gerçekleşmektedir. Şok cephesi önüne gönderilen temiz yakıt-hava karışımının sıcaklık ve basıncı şok cephesi sayesinde ani olarak yükselmektedir. Bunun sonucu olarak hava-yakıt karışımı bölgesinde kimyasal reaksiyonlar başlamakta ve çok kısa sürelerde yüksek enerji salınımları gerçekleşmektedir. Bu enerji salınımı ise patlama dalgasının yayılımını desteklemektedir (Ma vd., 2020; Zhang vd., 2019).

Patlama-tabanlı motorlar genel olarak iki temel sınıf altında incelenmektedir; darbeli patlama motorları (DaPM) (İng. Pulse Detonation Engine) (Zheng vd., 2020) ve dönen patlama motorlarıdır (DoPM) (İng. Rotating Detonation Engine) (Wang vd., 2015; Ma vd., 2018). Darbeli patlamalı motorlarda patlama dalgası (İng. detonation wave) doğrudan patlama dalgası oluşturma (İng. direct detonation initiation), ses altı yanmadan ses üstü yanmaya geçiş ve şokla patlama dalgası oluşturma yöntemleri (İng. shock initiated detonation) ile elde edilmektedir (Driscoll vd., 2015; Alam vd., 2019; Schauer vd., 2015). Bu motorlar içten yanmalı motorlara benzer şekilde birbirini takip eden adımlar ile çalışır. Bu döngüsel çalışma şeklinin beş basamağı bulunmaktadır. Bunlar sırası ile doldurma, ateşleme, ses altı yanmadan ses üstü yanmaya geçiş, genişleme (İng. blow-down) ve soğutma olarak sıralanabilir. Sistemin sürekliliği için her döngüde yeniden ateşlemenin gerçekleşmesi gerekmektedir. Bunun yanında darbeli patlama motorlarında doldurma ve soğutma (İng. fill and purge) basamakları için zamana ihtiyaç duyulduğundan dolayı, bu sistemlerin çalışma frekansları sınırlıdır (Yi vd., 2009).



Şekil 1. Dönen patlama motoru şematik gösterimi (Bach vd., 2021)

DoPM'larda şok tüpleri yerine Şekil 1'de görüldüğü üzere dairesel bir patlama kanalı bulunur. Bu kanala temiz yakıt-hava karışımı çevresel olarak belirli aralıklar ile yerleştirilen enjektörler tarafından beslenir. Bach vd. (2021) deneysel çalışmalarında kullanmış DoPM

konfigürasyonunda da görüldüğü üzere yakıt ve oksitleyici patlama kanalına ayrı kanallardan aktarılmaktadır. Yakıt ve oksitleyici patlama kanalında karıştırılarak, patlama dalgasının yayını için hazır hale getirilmektedir. Patlama cephesinde salınan enerji ile dönen patlama dalgasının (İng. rotating detonation wave) yayını sağlanmaktadır (Lee, 2019). Bu sebeple bu tip motorlarda bir kez ateşlemenin gerçekleşmesi yeterlidir (Lu *vd.*, 2014). Bu sayede, DaPM'daki tekrarlayan ve aralıklı itki üretimi yerine, DoPM'da sabit itki üretimi gerçekleştirilmektedir (Yi *vd.*, 2009).

DoPM enjektör performansının motor performansı üzerine doğrudan bir etkisi vardır. Patlama cephesinin yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında oluşu ve hareket hızının yüksek olması sebebi ile bu konudaki deneysel çalışmalar önemli kısıtlamalara sahiptir. Bu sebeple enjektör performansları çoğunlukla sayısal analiz çalışmaları ile belirlenmektedir. Döner patlama motorlarında gerçek uygulamalarda her ne kadar yakıt, hava ile önceden karışmamış halde patlama kanalına salınsa da, sayısal analizlerde bu durum hem önceden karışmamış (İng. non-premixed) (Sun *vd.*, 2019a; Prakash *vd.*, 2020; Lietz *vd.*, 2020; Zhao *vd.*, 2020; Sun *vd.*, 2019b; Vignat *vd.*, 2024) hem de önceden karışmış (premixed) (Zhang *vd.*, 2018; Zhang *vd.*, 2019; Wu *vd.*, 2014; Sun *vd.*, 2018; Zhang *vd.*, 2020; Xia *vd.*, 2021) olarak modellenmektedir. Sun *vd.* (2019a) farklı hava kanalı genişliğinin (0.4, 1 ve 2 mm) DoPM patlama dalgası üzerine etkisini sayısal olarak incelemiştir. Düşük hava kanalı girişlerinde toplam kütleli debinin artırılması sonrası iki patlama dalgalı moda geçiş gerçekleşmiştir. Hava kanalı genişliğinin artırılması enjeksiyon sürecinin gelişip güçlenmesini sağlamış ve yetersiz reaktanlar nedeniyle patlama dalgasının sönümlenmesine neden olmuştur. Sato ve Raman (2020) gerçekçi bir etilen tabanlı DoPM'nda patlama dalgasının temiz yakıt-hava cephesini sıkıştırmasına yönelik sayısal analizler yürütmüşlerdir. Stempfl *vd.* (2024) hidrojen-hava tabanlı DoPM'da karışimsız (tam ölçekli) ve karışimli enjeksiyon yöntemi ile sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir ve enjeksiyon yöntemlerinin patlama dalgası özellikleri üzerine etkilerini incelemiştir. Zheng *vd.* (2020) patlama dalgasının yayını karakteristiğini önceden karışmamış enjektör konfigürasyonunu döner patlama motorlarında sayısal olarak incelemiştir. Patlama kanalında iki-dalga modu (eşdeğerlilik oranı 0.6, 0.8, 1.0 ve 1.4 tanımlandığında) ve tek-dalga modunun (eşdeğerlilik oranının 1.2'ye eşit olması durumunda) aktif olduğu belirlenmiştir. Yu *vd.* (2023) farklı dalga sayısı modlarında patlama kanalına yerleştirilen soğutma kanallarının patlama dalgası yapısı ve yayını üzerine etkisini incelemiştir. Yakıt ve oksitleyici karışimli olarak patlama kanalına yönlendirilmiştir.

Patlama dalgası cephesi, yayını ve kararlılığının detaylı olarak incelenmesine yönelik sayısal analizlerde basitleştirmeler gerçekleştirilmektedir. Bu basitleştirme uygulamalarından bir tanesi de enjektör konfigürasyonları olmaksızın sayısal modelin oluşturulmasıdır. Önceden karışmış olarak patlama

kanalına aktarılan yakıt-hava karışımını için patlama kanalı girişinde değişken sınır koşulları tanımlanarak enjektörler mikro lüle dağılımı ile modellenmektedir. Bu yaklaşımda izotropik koşullar ile sınır şartları türetilmektedir. Zhang *vd.* (2018) döner patlama motorlarında, patlama dalgalarının kararsızlığını incelemiştir. Yi *vd.* (2011) iki boyutlu sayısal analizler ile DoPM itki performansını araştırmışlardır. Gerçek bir DoPM enjektör aralıklarının da modellenmesi için mikro lüle yaklaşımına ek olarak enjektör duvar yüzeyleri oluşturulmuştur. Mikro lüle yaklaşımı ile sınır şartı hesaplanarak ayrı enjeksiyon modelinin patlama dalgası yapısı üzerine etkileri incelenmiştir (Chen *vd.*, 2018). Yan *vd.* (2021) iki boyutlu olarak modellenmiş patlama kanalında farklı alan oranlarına sahip slot lüle enjeksiyonu ile patlama dalgası özelliklerindeki değişimleri sayısal olarak incelemiştir. Wang ve Weng (2022) kerosen-hava tabanlı DoPM enjeksiyon koşullarının patlama dalgası yayınına etkisine yönelik sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Mikro lüle enjeksiyon modelinin kullanıldığı sayısal çalışmalarda artan kerosen damlacık boyutu ve azalan enjeksiyon basıncının patlama dalgasının sönümlenmesine neden olduğu belirlenmiştir. Ladeinde *vd.* (2023) hidrojen-hava tabanlı DoPM'da patlama kanalını iki boyutlu modelleyerek patlama dalgası yayını süresince ısı akışı gelişimini sayısal olarak incelemiştir. Sayısal çalışmalarda mikro lüle enjeksiyon yöntemi ile yakıt-oksitleyici karışımı patlama kanalına yönlendirilmiştir.

Bu çalışmada DoPM'nun itki performansı ve patlama dalga yapısı araştırılmıştır. Sayısal çalışmalar iki basamakta gerçekleştirilmiştir. İlk olarak referans alınan DoPM'nun deneysel çalışmaları ile doğrulama çalışmaları tamamlanmıştır. Doğrulama analizlerinde mikro lüle yaklaşımı ile patlama kanalı iki boyutlu modellenerek sınır şartları oluşturulmuştur. İkinci basamakta ise patlama dalgasının detaylı irdelenmesi için 19 basamaklı tersinmez hidrojen-hava mekanizması kullanılmıştır (Ó Conaire *vd.*, 2004). Sayısal analiz sonuçları ile patlama dalgasının zamanla gelişimi süresince eğik şok cephesinin gelişimi ve itki performansı üzerine etkisi irdelenmiştir.

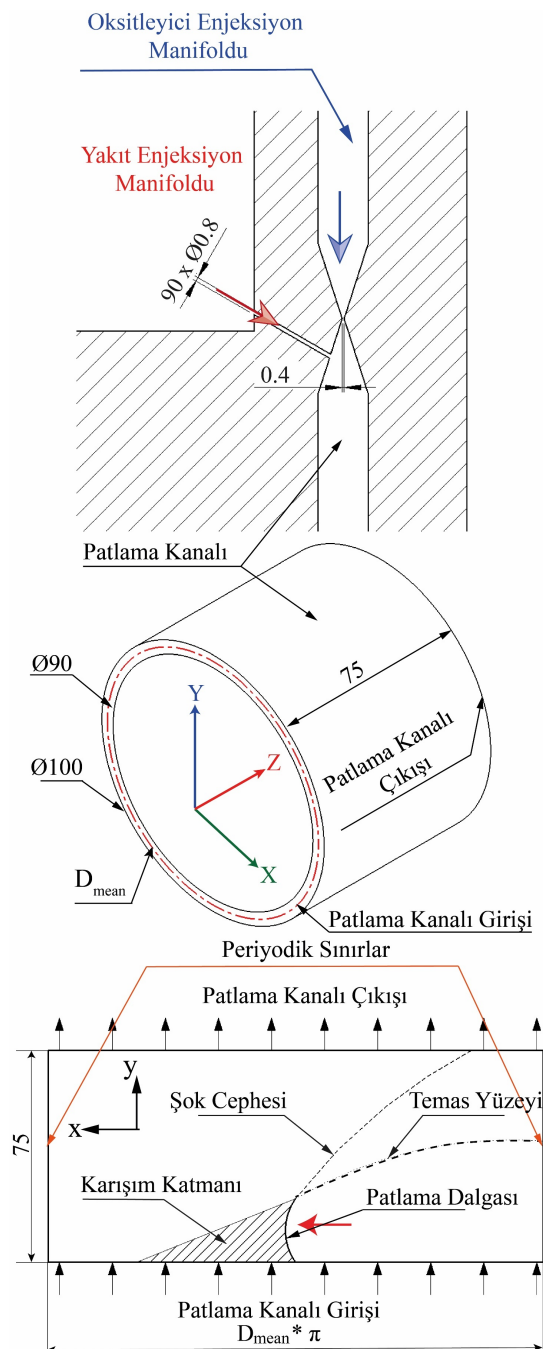
MATERYAL METOD

Fiziksel Model ve Enjeksiyon Koşulları

Sayısal model Liu *vd.* (2012) çalışmalarında yer alan patlama kanalına göre uyarlanmıştır. Şekil 2'de verilen referans çalışma döner patlama motoru konfigürasyonu patlama kanalı giriş ve çıkış çapları ve uzunluğu sırası ile 90, 100 ve 75 mm'dir. Yakıt eşit aralıklarda 0.8 mm çapında 90 enjektörden, hava ise 0.4 mm genişliğinde kanaldan patlama kanalına aktarılmaktadır.

Patlama kanalı uzunluğu ve orta çap değeri, patlama kanalı aralığından oldukça büyük olması nedeniyle literatürde yer alan çalışmalarda patlama kanalı akış hacmi iki boyutlu olarak oluşturulmaktadır (Lei *vd.*,

2020; Zhang *vd.*, 2018; Zhang *vd.*, 2020). Escobar *vd.* (2013) hidrojen-hava tabanlı DoPM'a yönelik patlama kanalı 2D ve 3D olarak modelleyerek sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. 2D ve 3D sayısal çalışmalarında kullanılan hücre sayısı sırası ile 80000 ve 1000000'dur. Hücre sayısındaki yüksek fark ile birlikte 2D akış alanında eğrilik etkilerinin ihmal edilmesine rağmen 3D çalışmalara göre patlama dalgası hızında kayda değer bir değişimin (yaklaşık %4.7) meydana gelmediğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte patlama dalgası yüksekliğindeki farkın da %1 olduğu ifade edilmiştir. Bu nedenle sayısal çalışmalarda, patlama kanalı iki boyutlu ve düzlemsel olarak modellenmiştir. Şekil 2'de görüldüğü üzere iki boyutlu akış alanının oluşturulmasında patlama kanalının orta çap değeri (D_{mean}) referans alınmıştır.



Şekil 2. Akış alanı ve sınır koşulları [Liu *vd.*, 2012]

Dönen patlama dalgası patlama kanalı içerisinde azimutal doğrultuda (x doğrultusu) hareket etmektedir. Bu nedenle akış alanının sağ ve sol kenarları periyodik sınır olarak tanımlanmıştır. Temiz yakıt-hava karışımı önceden karışmış olarak modellenerek akış alanının alt yüzeyinden patlama kanalına giriş yapmaktadır. Yanma sonrası ürünler ise patlama kanalı çıkışından patlama kanalını terk etmektedir.

Giriş sınır koşuluna mikro lüle yaklaşımı kullanılarak kütle akışı tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Mikro lüle yaklaşımında üç enjeksiyon modeli yer almaktadır (Yi *vd.*, 2011). Enjeksiyon modellerinde enjektör duvarına yakın hücrenin basınç değeri (p_w) referans alınmaktadır. Tablo 1'de verilen enjeksiyon modellerinde p_w değeri P_0 (enjeksiyon toplam basıncı) değerinden büyük ise patlama kanalına temiz yakıt-hava karışımı enjekte edilmemektedir. Eğer p_0 değeri p_w 'den ve p_w değeri p_{cr} 'den (kritik basınç) büyük ise sırası ile ses altı ve ses üstü enjeksiyon gerçekleşmektedir.

Tablo 1. Enjeksiyon koşulları ve detayları (Liu *vd.*, 2012)

Enjeksiyon Koşulu	u, T
$p_w \geq p_0$ (Enjeksiyon yoktur.)	N/A
$p_{cr} \leq p_w \leq p_0$ (Ses altı enjeksiyon)	$p = p_w$ $T = T_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$ $u = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} RT_0 \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$ $p_{cr} = p_0 \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$
$p_w \leq p_{cr}$ (Ses üstü enjeksiyon)	$p = p_{cr}$ $T = T_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$ $u = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} RT_0}$

Patlama kanalı çıkış sınır şartı olarak basınç tanımlanmıştır. Çıkış yüzeyinde dalga yansımaları (İng. reflection) gerçekleşmesi halinde temiz yakıt-hava karışım katmanı etkilenmektedir. Patlama dalgası yüksekliğinin artışı patlama dalgasının şiddetini azaltırken, düşüşü ise patlama dalgasının şiddetini artırmaktadır. Bu durum, patlama cephesi ardındaki basınç dağılımının değişimine neden olmaktadır. Patlama dalgası yüksekliğindeki artış ve azalışlar patlama dalgasını kararsız kılmaktadır. Dalga yansımaları için çıkış sınır şartı yanma sonrası ürünlerin patlama kanalını terk etme koşuluna bağlı olarak (ses altı ve ses üstü) tanımlanmıştır. Lokal değişken çıkış basıncının belirlenmesi için çıkış yüzeyine en yakın hücredeki basınç değeri ($p_{w,out}$) referans alınmıştır. Atık gazların hızı ses altı ise çıkış basıncı çevre basıncına ($p_{\infty}=11$ kPa) eşittir ve ses üstü ise Eş. (1)'de verilen

bağıntı ile lokal basınç değeri belirlenmiştir (Lei *vd.*, 2020).

$$p_{out} = (1 - 0.05)p_{w,out} + 0.05p_{\infty} \quad (1)$$

Değişken sınır şartlarının sayısal analizlere aktarılması UDF (User Defined Function) dosyaları ile gerçekleştirilmiştir. Giriş ve çıkış sınır şartları için hazırlanan UDF dosyaları Ansys/Fluent çok amaçlı yazılımına aktarılarak değişken sınır şartları tanımlanmıştır. UDF dosyaları ile giriş ve çıkış yüzeylerine en yakın hücrelerdeki lokal basınç değeri anlık olarak okunarak sınır şartları elde edilmiştir.

Sayısal analizlerde patlama dalgasının başlatılabilmesi için akış alanında küçük bir bölgede C-J basıncı ($p_{cj}=1.565$ MPa) ve sıcaklığı ($T_{cj}=2940.85$ K) tanımlanmıştır (Liu *vd.*,2012). Patlama dalgasının yayını için patlama kanalı önceden karışmış 0.1 MPa basınca ve 300 K sıcaklığa sahip stokiyometrik hidrojen-hava karışımı ile doldurulmuştur. Böylece patlama dalgasının kontrollü bir şekilde başlaması ve yayını sağlanmıştır.

Korunum Denklemleri ve Sayısal Yöntem

Patlama dalgasının yayını süresince viskozite, ısı iletimi ve kütle difüzyonu gibi taşınım özellikleri etkisi konveksiyon terimlerine göre daha düşüktür (Liu *vd.*, 2012). Ayrıca viskoz terimleri şok dalgasının ana özellikleri olan hızı, şiddeti vs. genellikle etkilemediği belirtilmektedir (Wu *vd.*, 2014). Bu nedenle taşınım özellikleri ihmal edilmiştir. Korunum denklemleri için, iki-boyutlu kimyasal reaksiyonlar nedeniyle Euler denklemleri kullanılmıştır (Yi *vd.*, 2011; Heidari *vd.*, 2011; Melguizo-Gavilanes *vd.*, 2011; Wang *vd.*, 2020). Korunum denklemlerinin gösterimi Eş. (2)'de verilmiştir (Yi *vd.*, 2011).

$$\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{G}}{\partial y} = \vec{S} \quad (2)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \\ \rho Y \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uH \\ \rho uY \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vH \\ \rho vY \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{\omega} \end{bmatrix}$$

Eş. (3)'te verilen Q konservatif değişkenler, F ve G konvektif akı ve S ise kaynak terimidir. Y, $\dot{\omega}$, u, v ve w sırasıyla reaktanların kütle fraksiyonu, kütle üretim oranı ve hız bileşenleridir. Bütün ürünler için ideal gaz yaklaşımı kabul edilmiştir. Karışım yoğunluğu ve basıncı Eş. (4) ve Eş. (6)'te te verilen bağıntılar ile belirlenmiştir. Eş. (6)'da \bar{R} ideal gaz sabiti ve Mw_k , k ürünün molekül ağırlığıdır. Toplam enerji denklemi Eş. (7)'de verilmiştir (Escobar *vd.*, 2013).

$$\rho = \sum_{k=1}^{N_s} \rho_k \quad (4)$$

$$\rho_k = \rho Y_k \quad (5)$$

$$p = \sum_{k=1}^{N_s} \rho_k \frac{\bar{R}}{Mw_k} \quad (6)$$

$$E = \int_{T_{ref}}^T c_{p,mix} dT + \sum_{k=1}^{N_s} Y_k h_f^0(T_{ref}) + \frac{|\vec{v}|^2}{2} - \frac{p}{\rho} \quad (7)$$

Sayısal analizlerde zamana ve yoğunluğa dayalı çözücü kullanılmıştır. Viskoz olmayan akı vektörleri Roe-FDS modeli ile ayrıklaştırılmıştır. Gradyanların çözümlenmesi için en küçük kareler (least-square-cell) tabanlı yöntem kullanılmıştır. Hidrojen gibi patlayıcı yakıtların kimyasal reaksiyonları çok kısa sürelerde gerçekleşmektedir. Bu nedenle sayısal analizlere ikinci dereceden ayrıklaştırma tanımlanmıştır. Reaksiyon hızı sabitleri Arrhenius çözümlenmesi ile elde edilmiştir. Eş. (8)'de verilen Arrhenius denkleminde k_f reaksiyon hızı, E_a aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti ve T ise sıcaklıktır (Sun *vd.*, 2019a).

$$k_f = AT^b \exp(-E_a/RT) \quad (8)$$

Döner patlama analizlerinde tek basamaklı (Shao *vd.*, 2010; Wu *vd.*, 2014; Schwer ve Kailasanath, 2011; Yi *vd.*, 2009) ve detaylı hidrojen/hava kimyasal reaksiyon mekanizmaları (Escobar *vd.*, 2013; Ettner *vd.*, 2014; Choi *vd.*, 2000; Sun *vd.*, 2019a) kullanılmaktadır. Kullanılan kimyasal reaksiyon mekanizmaları patlama dalgasının yayını için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle sayısal çalışmalarda tek basamaklı ve 19 basamaklı tersinmez hidrojen/hava kimyasal reaksiyon mekanizması kullanılmıştır. Tek basamaklı reaksiyon mekanizmasında Ma *vd.* (2005) çalışmasında yer alan Arrhenius parametreleri tanımlanmıştır.

BULGULAR

Çözüm Ağı Bağımsızlığı

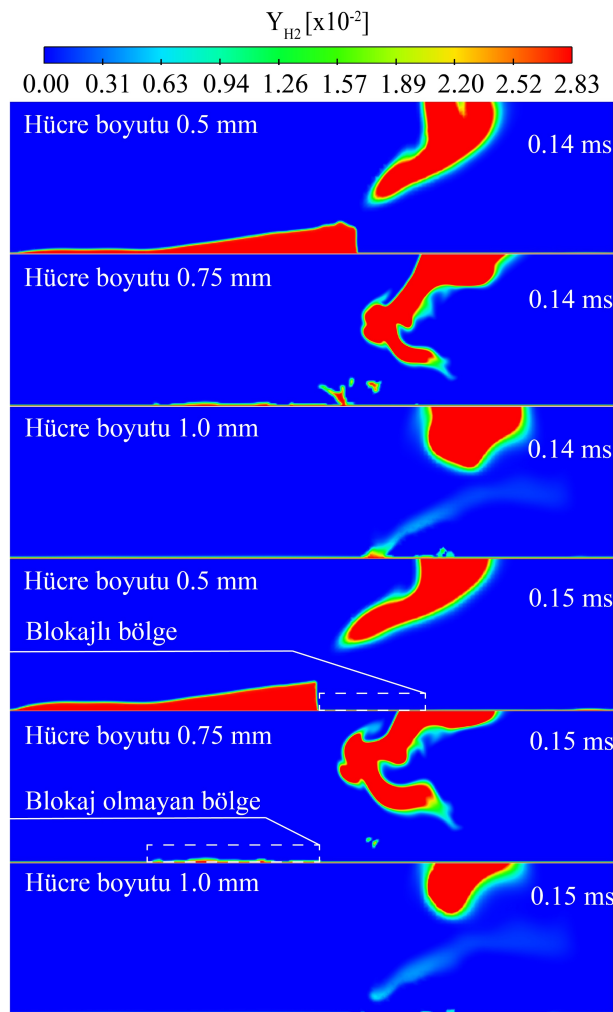
DoPM sayısal çalışmalarında dalganın yapısı ve yayını için uygun hücre yapısının türetilmesi gerekmektedir. Patlama dalgası yapısı ve kararsızlığının yakalanabilmesi için yarı-reaksiyon bölgesinde asgari 20 hücre oluşturulmalıdır (Yi *vd.*, 2011; Wescott *vd.*, 2004). Ayrıca hücre boyutlarının artırılması değişken sınır koşullarının kullanıldığı DoPM analizlerinde, yakıt- hava karışımının patlama kanalına aktarılmasını etkilemekte ve patlama dalgasının sönümlenmesine neden olmaktadır.

Çözüm ağından bağımsızlaştırma çalışmalarında çözüm ağlarında kullanılan en büyük hücre boyutları 0.125 mm, 0.25 mm, 0.5 mm, 0.75 ve 1 mm'dir. Kimyasal reaksiyonların çözüm ağından bağımsızlaştırma çalışmalarına eklenebilmesi için sayısal çalışmalar detaylı kimyasal reaksiyon mekanizması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 2'de sayısal çalışmalardan

elde edilen sonuçlar ve C-J değerlerine göre relatif farklılıklar verilmiştir. Detaylı kimyasal reaksiyon mekanizmasının kullanıldığı sayısal çalışmalarda tek dalga modunun hakim olduğu belirlenmiştir ve hücre boyutlarındaki artış ile kararlı patlama dalgası hızında da artışlar elde edilmiştir. Patlama dalgası hızı ve frekansı relatif farkının 0.5 mm hücre boyutlarında asgari düzeye indirildiği tespit edilmiştir.

Tablo 2. Çözüm ağı hücre boyutlarına göre patlama dalgası özelliklerinin karşılaştırılması

Hücre boyutu [mm]	U_D [m/s]	f [kHz]	U_D Fark [%]
0.125	1886	6.33	4.17
0.25	1949	6.53	1.00
0.5	1963	6.58	0.26
0.75	N/A	N/A	N/A
1.0	N/A	N/A	N/A



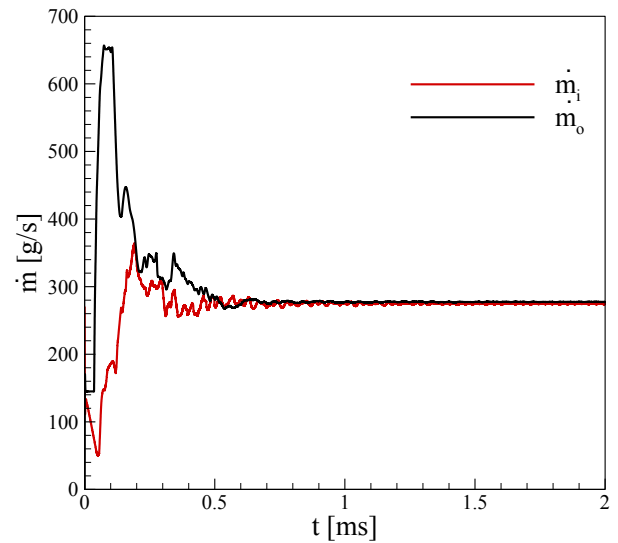
Şekil 3. Hücre boyutlarına göre anlık hidrojen kütle fraksiyon dağılımları

Şekil 3'te verilen hidrojen kütle fraksiyonu dağılımı incelendiğinde 0.75 mm ve 1.0 mm hücre boyutlarının kullanıldığı sayısal çalışmalarda patlama dalgasının $t=0.14$ ms sonrasında ses altı yanma moduna geçiş yaptığı tespit edilmiştir. $t=0.15$ ms anında 1.0 mm hücre boyutunun kullanıldığı sayısal çalışmada patlama kanalı girişi boyunca blokajın meydana geldiği görülmektedir. 0.75 mm hücre boyutunun kullanıldığı çalışmada daha

düşük blokaj oranına elde edilmesine rağmen patlama dalgası cephesinin temiz yakıt-oksitleyici katmanı ile etkileşiminin sonlanması yine ses altı yanma moduna geçişe neden olmuştur. 0.5 mm hücre boyutunun kullanıldığı sayısal çalışmada ise enjektör duvarındaki toplam blokaj oranının % 16 olduğu hesaplanmıştır ve patlama dalgasının yayımına devam ettiği tespit edilmiştir. C-J değerine göre elde edilen doğruluk ve sayısal çözümleme gereksinimleri düşünüldüğünde sayısal çalışmalarda 0.5 mm hücre boyutlarının kullanılması gerekliliği sonucuna varılmıştır. Doğrulama çalışmalarında kullanılan toplam hücre sayısı 89550'dir.

Doğrulama Çalışmaları

Dönen patlama motorlarında patlama dalgası ile eğik şok cephesinin yayımını söz konusudur. Ayrıca, patlama dalgası cephesinde kimyasal reaksiyon kapsamında yeniden oluşumlar ve bozulmalar çok kısa sürelerde meydana gelmektedir. Patlama dalgası cephesindeki yüksek sıcaklık ve basınç değerlerinin bu kısa sürede oluşması sayısal yöntemleri zorlayan ve hatalara yol açan bir unsur olarak karşımızda durmaktadır. Doğrulama analizlerinde Liu vd. (2012) çalışması referans alınmıştır. DoPM kapsamında yapılan sayısal analizlerde yaşanan zorluklar nedeniyle referans sayısal çalışmada hidrojen/hava (bir basamaklı tersinmez) kimyasal reaksiyon mekanizması tercih edilmiştir.

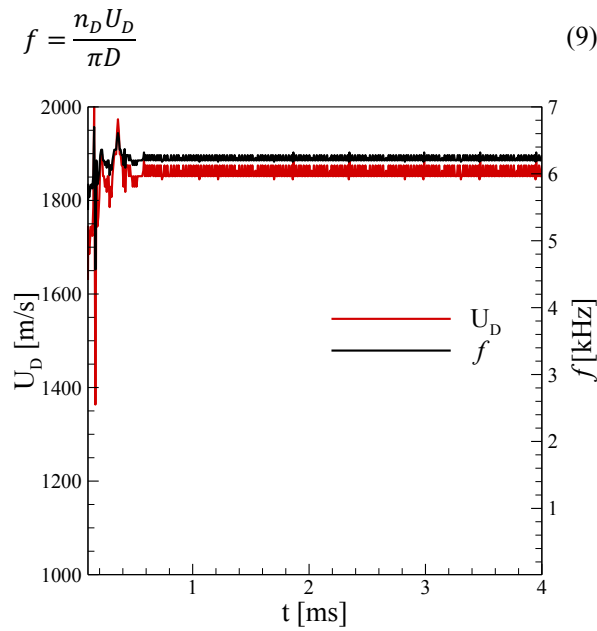


Şekil 4. Kütleli debi değerinin zamanla gelişimi

Patlama dalgasının kararlı yapıya evrimi anına kadar patlama dalgası yüksekliği değerinde salınımlar meydana gelmektedir. Patlama dalgası yüksekliğindeki değişimler patlama dalgası şiddetini etkilemektedir. Dalga yüksekliğinin azalışı patlama dalgası şiddetini artırmaktadır. Bu durum patlama cephesi ve ardında daha yüksek basınç değerlerinin oluşmasına yol açmaktadır. Şekil 4'te verilen patlama kanalı girişindeki kütleli debinin zamanla dağılımı incelendiğinde patlama kanalı girişindeki kütleli debi (\dot{m}_i) değerinin ilk olarak 363.94 g/s değerine ani artış sergilediği ve sonrasında ise yine ani azalış ile 258.46 g/s değerine ulaştığı görülmektedir. Bu durum patlama dalgası ve ardındaki basınç değişimi

ile patlama kanalı girişinde meydana gelen blokaj oranındaki değişimi ortaya koymaktadır. Patlama dalgasının kararlı hale gelmesi ($t=1.1$ ms) sonrasında kütesel debi değerinin neredeyse sabit olduğu görülmektedir. Referans çalışmada yer verilen deneysel çalışma kapsamında patlama kanalı girişindeki toplam kütesel debi değerinin 272.7 g/s olduğu belirtilmiştir (Liu *vd.*, 2012). Bu değer doğrulama çalışmasında patlama dalgasının kararlı yapıya evrilmesi sonrası elde edilen ortalama kütesel debi değeri olan 274.8 g/s değerine yakındır.

Patlama dalgası yayınımlı konusunda patlama dalgasının hızı ve frekansı oldukça önemlidir. Kararlı bir dalga yapısında dalga hızı ve frekansı da neredeyse sabittir. Patlama dalgası frekansı Eş. (9)'da verilen bağıntı ile elde edilmiştir (Zheng *vd.*, 2020). Şekil 5'te verilen patlama dalgası hızı ve frekansı dağılımları incelendiğinde $t=1.1$ ms anına kadar büyük salınımların meydana geldiği görülmektedir. Patlama dalgası kararlı hale geldikten sonra dalga hızı ve frekansı değerlerinin periyodik salınımlar sergilediği belirlenmiştir. Kararlı patlama dalgasının ortalama hızı ve frekansı sırasıyla 1860 m/s ve 6.232 kHz'dir. Referans çalışmada yer verilen sayısal sonuçlarda ortalama dalga hızı ve frekansı değerlerinin sırası ile 1870.1 m/s ve 6.262 kHz'dir. Yapılan analizlerin bu açıdan da referans çalışma ile benzer sonuçlar aldığı söylenebilir.



Şekil 5. Patlama dalgası hızı ve frekansı dağılımı

Tablo 3. Doğrulama çalışması sonuçları (Liu *vd.*, 2012)

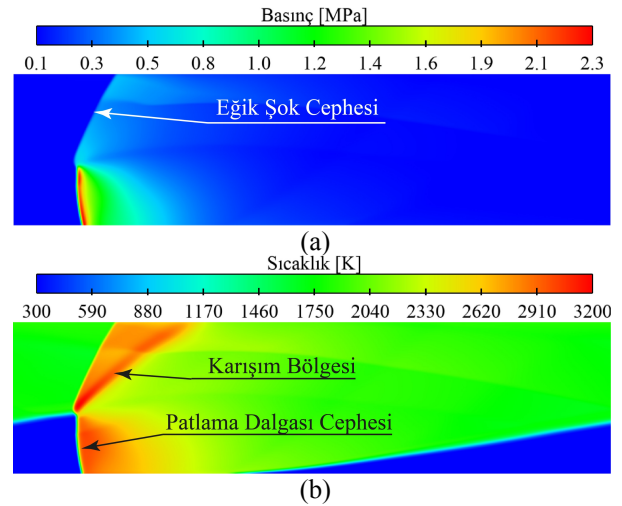
Değişken	Sayısal Sonuçlar	Referans Çalışma	Teorik Değerler
U_D [m/s]	1860	1870.1	1968.12
f [kHz]	6.232	6.266	6.594
P_{det} [MPa]	2.26	2.20	N/A
$\dot{m}_{tot,inlet}$ [g/s]	274.8	272.7	N/A

Doğrulama çalışması sonrasında kararlı patlama dalgasına yönelik elde edilen sonuçlar Tablo 3'te

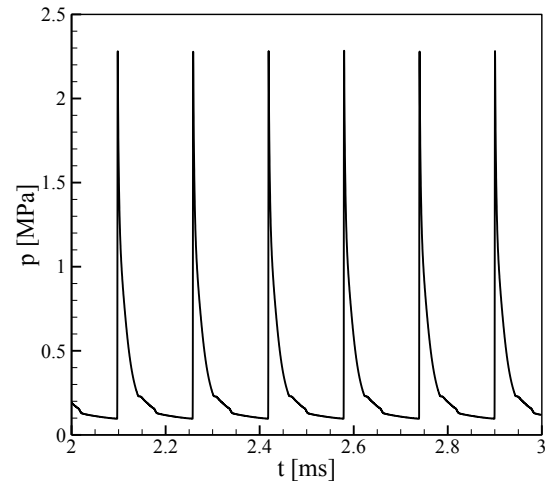
verilmiştir. Doğrulama çalışmalarında kararlı patlama dalgası hızının teorik ve referans çalışma değerlerinin sırasıyla %94.5 ve %99.4'üne eşit olduğu hesaplanmıştır. Patlama dalgası cephesindeki basınç (P_{det}) değerinin doğrulama çalışmalarında 2.26 MPa'ya ulaştığı görülmektedir. Patlama kanalı toplam kütesel debi ve patlama dalgası cephesindeki basınç değerlerinin referans çalışmada belirtilen değerler arasındaki farkın sırası ile %0.7 ve %2.7 olduğu belirlenmiştir.

Patlama Dalgası Yapısı

Patlama dalgası cephesi kimyasal reaksiyon bölgesi ve şok dalgasını barındırmaktadır. Yüksek basınç ve sıcaklığın var olduğu bu bölgede meydana gelen enerji salınımları ile patlama dalgası cephesi yayınımlı desteklenmektedir. Şekil 6'da bir basamaklı tersinmez kimyasal reaksiyon mekanizması kullanılarak gerçekleştirilen sayısal çalışmanın sonucu olarak patlama kanalındaki basınç ve sıcaklık dağılımları verilmiştir. Basınç ve sıcaklık dağılımları incelendiğinde akış yönünde eğik şok cephesinin meydana geldiği görülmektedir. Bunun yanı sıra sıcaklık dağılımları eğik şok cephesinin ardında yanma sonrası ürünlerin karışım bölgesini oluşturduğu belirlenmiştir.

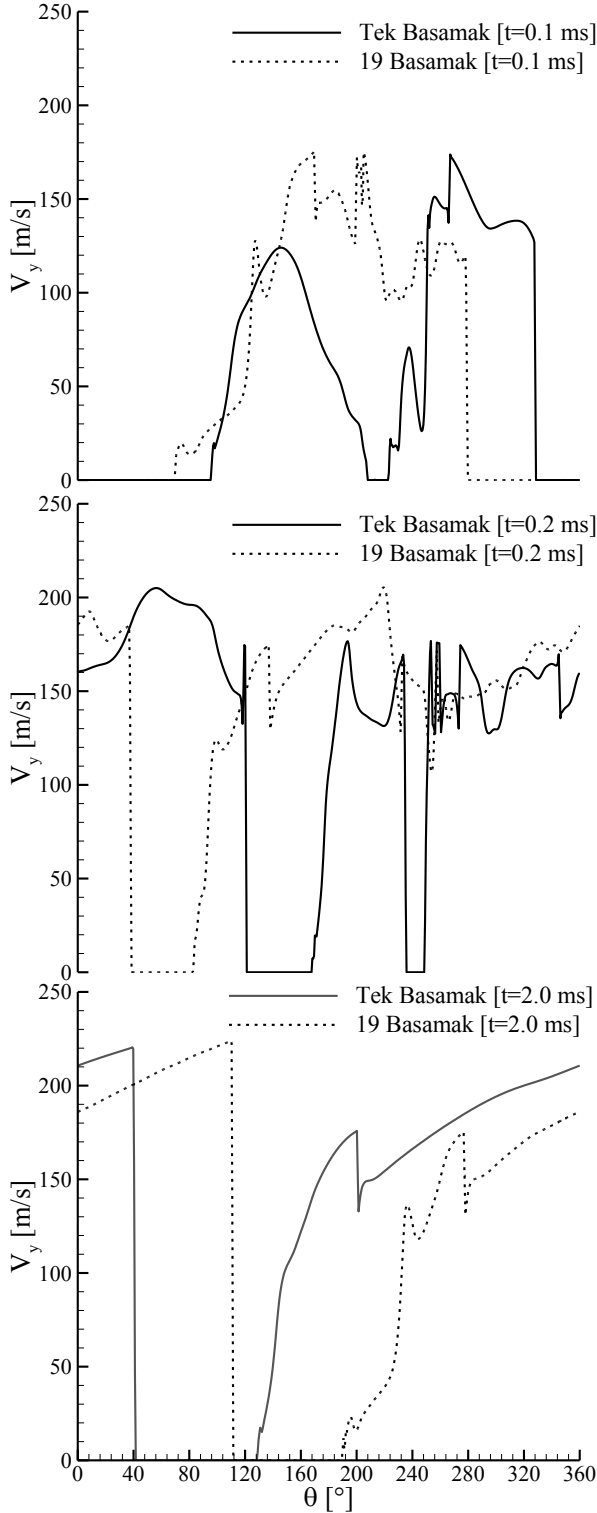


Şekil 6. $t = 2$ ms anında patlama kanalında a) basınç ve b) sıcaklık dağılımı



Şekil 7. $t=2-3$ ms aralığında patlama kanalında basınç gelişimi

Şekil 7’de verilen patlama kanalındaki basınç gelişimi incelendiğinde patlama dalgası cephesindeki basıncın 2.26 MPa değerine ulaştığı ve patlama dalgası ardında ise basınç, ani bir azalış sergileyerek 0.1 MPa değerine indiği görülmektedir. Patlama dalgasının kararlı hale evrilmesi ile periyodik değişimlerin meydana geldiği ve patlama cephesindeki basıncın her bir dalga turunda neredeyse sabit olduğu görülmektedir.

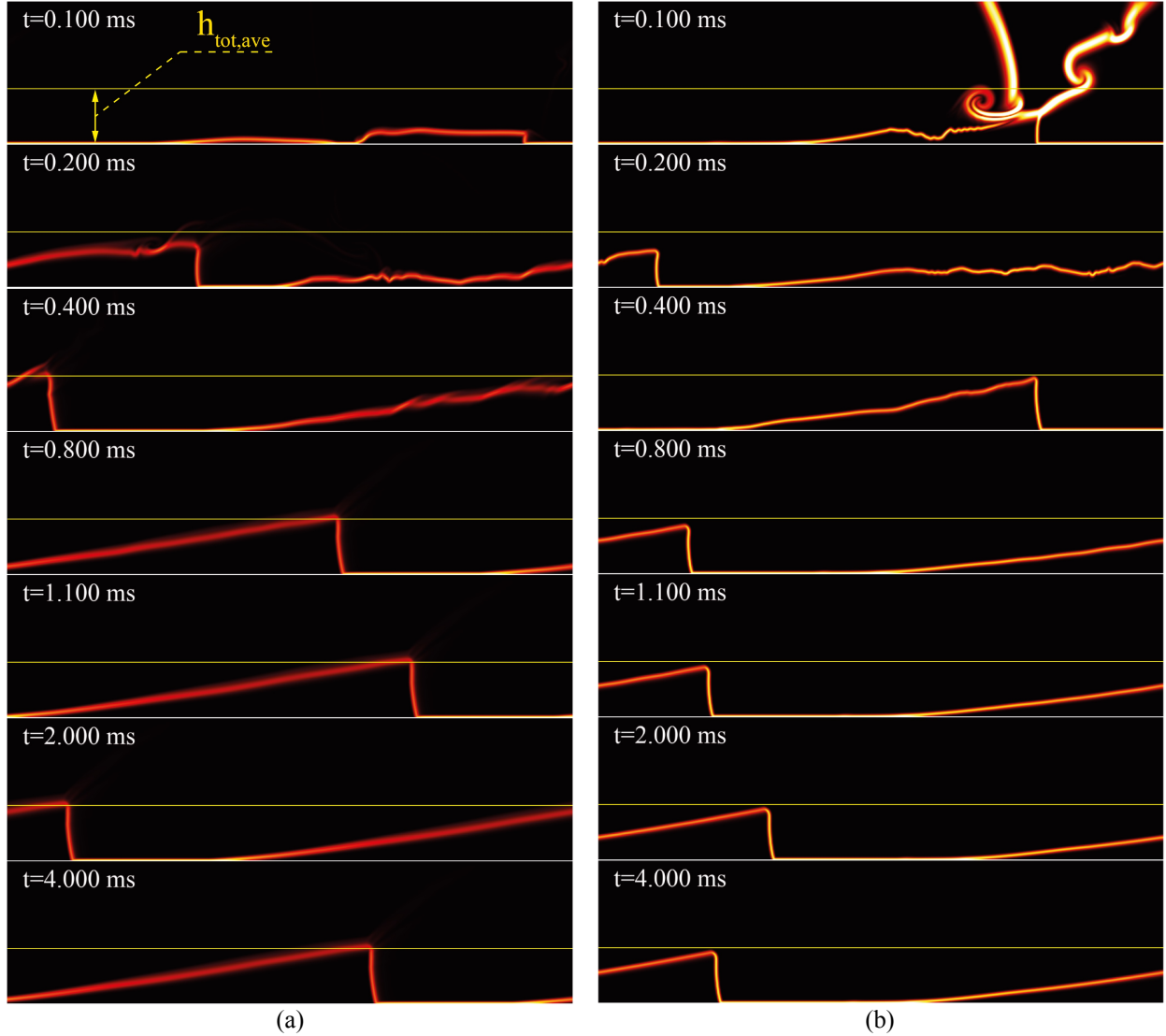


Şekil 8. Patlama kanalı girişi boyunca aksel hız dağılımları

Patlama dalgası cephesinde ve ardında var olan yüksek basınç, temiz yakıt-hava girişini bloke etmektedir. Kararlı patlama dalgasına sahip dönen patlama motorlarında, temiz yakıt-hava karışımı patlama kanalında üçgensel bir bölge oluşturmaktadır ve patlama dalgası yüksekliği neredeyse sabittir. Patlama dalgası cephesi ve ardında var olan yüksek basınç dağılımı nedeniyle enjektör duvarında (patlama kanalı girişi) blokajlar meydana gelmektedir. Bu durum temiz yakıt-hava karışımının patlama kanalına aktarımına engel olmaktadır. Şekil 8’de patlama kanalı girişindeki aksel hız dağılımları verilmiştir. Patlama dalgasının geçişi anında enjektör duvarında görülen ters akışlar bu bölgelerde blokajın meydana geldiğini kanıtlamaktadır. Patlama dalgasının yayınımlı süresince bu blokaj oranı değişkenlik göstermekle birlikte, patlama dalgasının kararlı hale gelmesinin ardından neredeyse sabit bir değere erişmektedir. Patlama dalgasının yayınımlı süresince enjektör blokaj oranını üç farklı süreçte incelemek mümkündür. Patlama dalgasının ilk yayınımlı süreci için $t=0.1$ ms, gelişim süreci için $t=0.2$ ve kararlı süreci için $t=2.0$ ms anı referans alınmıştır. Patlama dalgasının ilk yayınımlı zamanlarında 19 basamaklı ve 1 basamaklı tersinmez reaksiyonlar ile elde edilen sonuçlarda blokaj oranları sırası ile %41 ve %39’dur. Patlama dalgası cephesindeki basıncın patlama dalgası yayınımlı süresince değişkenliği blokaj oranını da etkilemiş ve $t=0.2$ ms anında bu oranın sırası ile %12 ve %16’ya düşmesini sağlamıştır. Patlama dalgasının kararlı sürecinde blokaj oranlarının %21 ve %24 değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir.

Patlama dalgasının yayınımlı ve patlama dalgası yüksekliğinin değişim eğiliminin incelenmesi için patlama kanalındaki hidrojenin kütle fraksiyonu gradyanı dağılımı kullanılmıştır. Bu değişken temiz yakıt-hava bölgesini çevrelemekte ve patlama dalgası yüksekliğindeki değişimlerin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 9’da patlama dalgası yayınımlı ilk evrelerinde ($t=0.1$ ms) patlama dalgası yüksekliğinin (h_{tot}) yaklaşık 5 mm değerine kadar indiği görülmektedir. Bu durum patlama dalgası yüksekliğinin azalması ile patlama dalgası şiddetinin artmasını kanıtlamaktadır. Patlama dalgası şiddetindeki artış, patlama cephesi ve ardındaki basınç dağılımını da artırmakta ve var olan blokaj seviyesini de yükseltmektedir. Benzer eğilim, detaylı kimyasal reaksiyon mekanizması kullanıldığında da meydana gelmiştir. Detaylı kimyasal mekanizmanın kullanılması ile patlama dalgası yüksekliğinin $t=0.1$ ms anında yaklaşık 10 mm olduğu görülmektedir. Patlama dalgası yüksekliği sonraki turlarda artışlar göstererek kararlı haldeki ortalama dalga yüksekliği $h_{tot,ave}=29$ mm seviyesinin üzerine çıktığı belirlenmiştir. Tek basamaklı reaksiyon mekanizmasının kullanıldığı sayısal çalışmadaki patlama dalgası yüksekliğinin zamanla gelişimine benzer eğilimlerin detaylı kimyasal reaksiyon mekanizmasının kullanıldığı çalışmada da meydana geldiği tespit edilmiştir. Bir basamaklı reaksiyon mekanizmasının kullanıldığı çalışmadaki patlama dalgası yüksekliğinin detaylı kimyasal reaksiyon mekanizmasının kullanıldığı çalışmada dalga yüksekliğinden büyük olduğu görülmektedir. Kararlı

patlama dalgası yüksekliği bir basamaklı ve detaylı kimyasal reaksiyon mekanizması kullanıldığı çalışmalarda sırası ile 29 mm ve 27 mm'dir.



Şekil 9. Patlama kanalında hidrojen kütle fraksiyonu gradyanı dağılımı a) 1 basamaklı tersinmez ve b) 19 basamaklı tersinmez kimyasal reaksiyon mekanizması

Döner Patlama Motoru Performansı

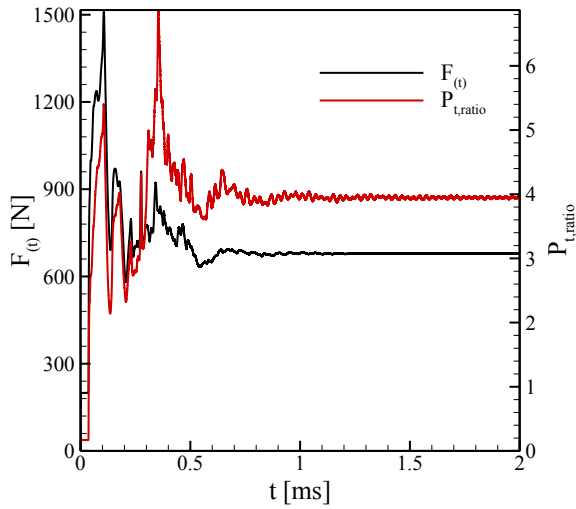
Sayısal çalışmalar sonrası patlama kanalı çıkışındaki itki dağılımının zamanla gelişimi Eş. (10)'da verilen bağıntı ile hesaplanmıştır (Sato ve Raman, 2020). Verilen bağıntıda “u” yüzey normal hızı, “ p_{back} ” ise geri basınç değerini ifade etmektedir.

$$F_{(t)} = \int_{exit} \rho u^2 + (p - p_{back}) dA_{exit} \quad (10)$$

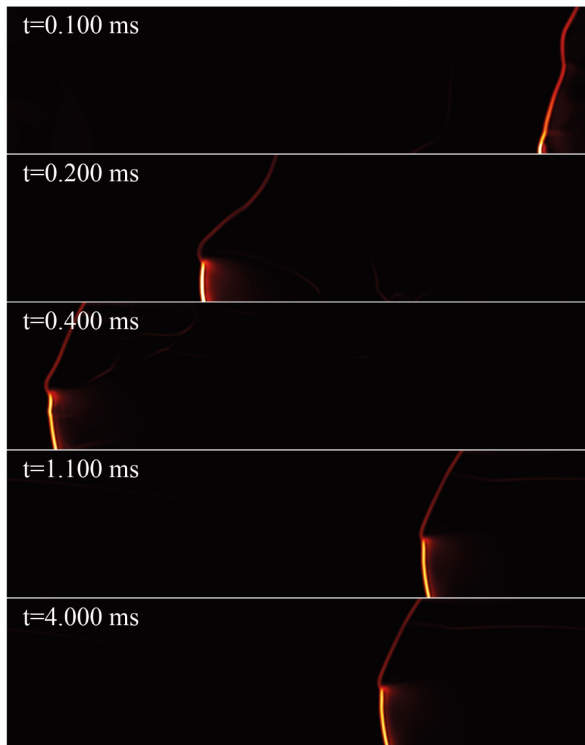
Şekil 10'da verilen itki dağılımı incelendiğinde, patlama dalgasının yüksekliğindeki değişimin eğik şok açısını etkilediği görülmektedir. Şekil 11'de verilen basınç gradyanı, patlama dalgası cephesi ve eğik şok cephesindeki değişimleri sergilemektedir. Patlama dalgasının ilk yayılım zamanlarında ortalama eğik şok açısının en yüksek seviyelere ulaştığı sonrasında ise ani

düşüş sergilediği görülmektedir. Ortalama eğik şok açısı $t=0.1$ ms anında 75° , $t=0.2$ ms anında ise 50° olduğu belirlenmiştir. Patlama dalgasının kararlı yapıya geçişi süresince eğik şok açısının yeniden artışların meydana geldiği görülmektedir. Patlama dalgası kararlı hale gelmesi ile ortalama eğik şok açısının 63° olduğu tespit edilmiştir.

Patlama kanalı çıkışı ve girişindeki toplam basınç oranları DoPM basınç kazanımını açıklar niteliktedir. Şekil 10'da verilen toplam basınç oranları incelendiğinde itki üretim dağılımına benzer bir eğilim söz konusudur. Patlama dalgası kararlı hale gelmeden önce yüksek salınımların meydana geldiği ve kararlı haldeki patlama dalgası sonrası toplam basınç oranlarının da sabit bir değere ulaştığı görülmektedir. Patlama dalgasının kararlı olması ile toplam basınç oranı değerinin 3.95 ± 0.06 olduğu belirlenmiştir.



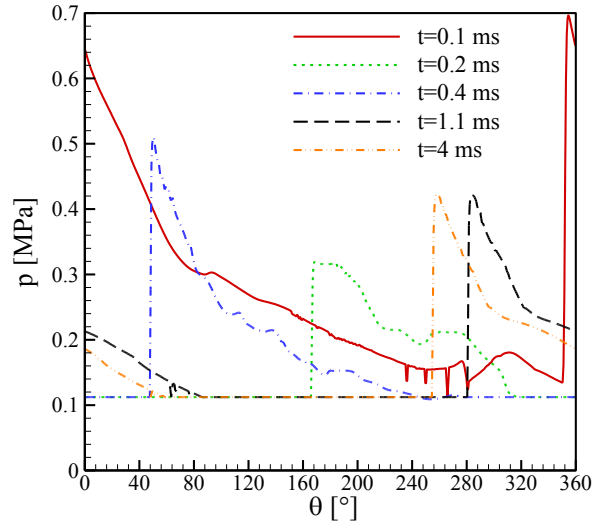
Şekil 10. İtki ve toplam basınç oranı dağılımı



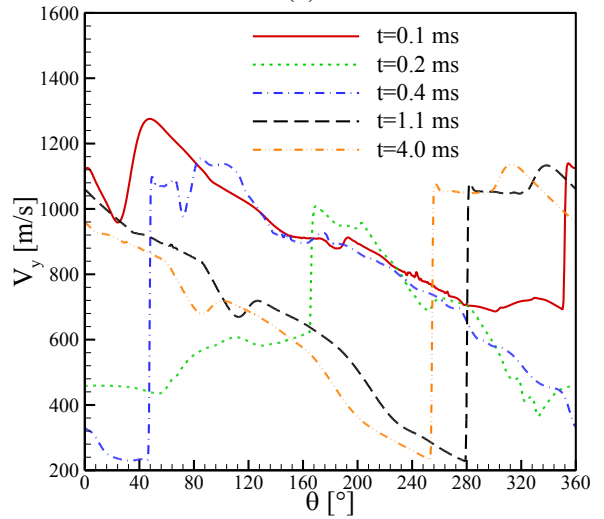
Şekil 11. Patlama dalgası ve eğik şok cephesinin zamana göre değişimi

Eğik şok cephesi ve patlama dalgasındaki değişimler, patlama kanalı çıkışındaki itki dağılımında salınımlara neden olmaktadır. Şekil 12'de tek basamaklı reaksiyon mekanizmasının kullanıldığı çalışmada patlama kanalı çıkışındaki basınç ve eksenel hız dağılımları verilmiştir. Eğik şok cephesi sonrası basınç ve eksenel hız değerlerinde ani artışlar meydana geldiği görülmektedir. Ortalama eğik şok açısının artışı bu akış değişkenlerinin de artışına neden olmaktadır. Patlama dalgasının ilk yayını (t=0.1 ms), geçiş (t=0.2 ms) ve kararlı (t=4 ms) evrelerinde eğik şok cephesindeki basınç değerleri sırası ile 0.69 MPa, 0.31 MPa ve 0.42 MPa'dır. Belirtilen evrelerde eksenel hız dağılımlarının ise sırası ile 1140 m/s, 957 m/s ve 1068 m/s olduğu belirlenmiştir. Bu dağılımlar Şekil 10'da verilen patlama kanalı çıkışındaki itkinin zamanla

gelişim eğilimini de açıklayıcı niteliktedir ve kararlı dalga evresi (t=1.1 ms) sonrasında üretilen itki değerinin 678.7 ± 2.3 N aralığında salınımlar yaptığı belirlenmiştir.



(a)



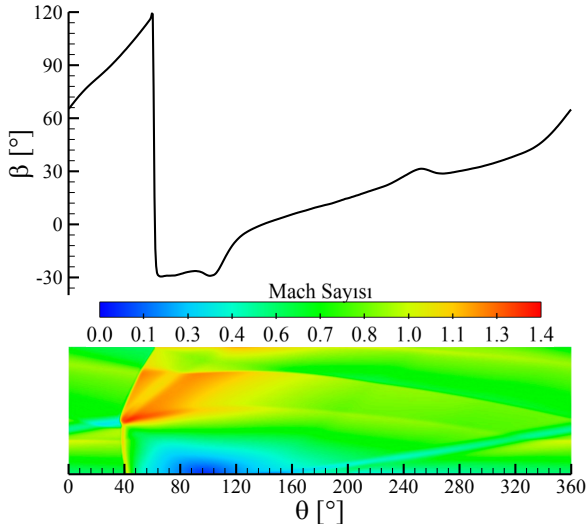
(b)

Şekil 12. Patlama kanalı çıkışında a) basınç ve b) eksenel hız dağılımı

Şekil 13'te tek basamaklı kimyasal reaksiyon mekanizmasının kullanıldığı çalışmada patlama kanalı çıkışındaki Mach sayısı ve patlama kanalı çıkışında akış açısı dağılımı verilmiştir. Mach sayısı dağılımı incelendiğinde, eğik şok ve patlama dalgası cephesi sonrası akışın ses üstü olduğu görülmektedir. Patlama dalgası kararlı yapıya dönüşmesinin ardından patlama kanalı çıkışında ses üstü rejim bölgesi oranının %45'e ulaştığı belirlenmiştir.

Eş. (10)'da verilen itki bağıntısında da görüldüğü üzere patlama kanalı çıkışında momentum itki kazanımı patlama kanalı çıkışı normal hızı (V_y) ile elde edilebilmektedir. Şekil 13'te verilen akış açısı dağılımı incelendiğinde eğik şok cephesi sonrası akış açısı değerlerinde ani bir düşüşün gerçekleştiği görülmektedir. Eğik şok cephesi sonrası azimuthal

momentumun kısmen aksel momentuma dönüştüğünü göstermektedir.



Şekil 13. $t=2$ ms anında Mach Sayısı ve patlama kanalı çıkışında akış açısı

SONUÇLAR

Bu çalışmada DoPM'nun itki performansı ve patlama dalgası yapısı incelenmiştir. Sayısal çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak referans alınan çalışmaya yönelik doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Referans çalışmada yakıt ve oksitleyici olarak hidrojen-hava karışımı kullanılmıştır. Hidrojen 0.8 mm çapında 90 enjektör kanalından, hava ise 0.4 mm genişliğindeki kanaldan patlama kanalına yönlendirilmektedir. Doğrulama çalışmaları için referans çalışmada da belirtildiği üzere bir basamaklı tersinmez hidrojen-hava mekanizması kullanılmıştır. Dalga yapısının daha detaylı irdelenebilmesi için ikinci aşamada 19 basamaklı tersinmez hidrojen-hava kimyasal mekanizması tanımlanmıştır. Doğrulama çalışmaları sonrası patlama dalgasının kararlı hali ve öncesindeki yapısı ile DoPM'nun itki performansı incelenmiştir. Sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Kararlı haldeki patlama dalgası her bir periyodu (t_{det}) yaklaşık 0.159 ms tamamlamaktadır. Patlama dalgasının $t/t_{dej}=6.892$ sonrasında kararlı hale geldiği belirlenmiştir.
- Patlama dalgasının kararlı hale gelmesi ile patlama kanalı girişi ve çıkışındaki kütleli debi değerleri neredeyse sabit değere ulaşmıştır. Referans deneysel çalışmada belirlenen kütleli debi değeri ile sayısal çalışmalardan elde edilen kütleli debi değeri arasında %0.7'lik bir fark olduğu belirlenmiştir.
- Referans sayısal çalışmada kararlı patlama dalgası cephesindeki basınç değerinin 2.2 MPa, sayısal çalışmada ise bu değer 2.26 MPa olduğu belirlenmiştir. Patlama dalgası hızı incelendiğinde teorik ve referans çalışma değerlerinin sırası ile %94.5 ve %99.4'üne eşit olduğu saptanmıştır.

- Doğrulama çalışmaları sonrası patlama dalgası yapısı irdelendiğinde kararlı patlama dalgası yüksekliğinin ve eğik şok açısının değişmediği gözlemlenmiştir. Kararlı patlama dalgası yüksekliği bir basamaklı ve detaylı kimyasal reaksiyon mekanizmalarında sırası ile 29 mm ve 27 mm olduğu belirlenmiştir.
- Patlama kanalındaki aksel hız değerleri incelendiğinde patlama kanalı girişinde ters akışın meydana geldiği bölgeler tespit edilmiştir. Bu durum patlama kanalı cephesindeki ve ardındaki yüksek basınç dağılımları ile gerçekleşmektedir. Blokaj oranının patlama dalgasının kararlı yapıya ulaşmadan önce tek basamaklı ve detaylı kimyasal reaksiyon mekanizmasının kullanıldığı çalışmada sırası ile %41 ve %39'a yükselmiştir. Patlama dalgası kararlı hale gelmesi ile blokaj oranında bir değişimin meydana gelmediği ve sırası ile %21 ve %24'e eşit olduğu belirlenmiştir.
- Patlama kanalındaki Mach sayısı dağılımı incelendiğinde eğik şok ve patlama dalgası cephesi ardında akışın ses üstü olduğu tespit edilmiştir. Kararlı patlama dalgası elde edildiğinde patlama kanalı çıkışının %45'inin ses üstü rejime sahip olduğu belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 123M010 numaralı ve "Enjeksiyon Konfigürasyonu ve Sınır Koşullarının Dönen Patlamalı Motorların Kararlılığına Etkisinin Araştırılması" konulu TÜBİTAK projesi kapsamında desteklenmiştir.

REFERANSLAR

- Alam, N., Sharma, K. K., Pandey, K. M., 2019, Combustion characteristics of hydrogen-air mixture in pulse detonation engines, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(5), 2451-2457, doi:10.1007/s12206-019-0442-7
- Bach, E., Oliver Paschereit, C., Stathopoulos, P., Bohon, M. D., 2021, An empirical model for stagnation pressure gain in rotating detonation combustors, *Proceedings of the Combustion Institute*, 38(3), 3807-3814, doi.org/10.1016/j.proci.2020.07.071
- Bigler, B. R., Paulson, E. J., Hargus, W. A., 2017, Idealized Efficiency Calculations for Rotating Detonation Engine Rocket Applications, *AIAA Propulsion and Energy Forum*, doi: 10.2514/6.2017-5011
- Chen, Y., Liu, X., Wang J., 2018, Influences of Separate Injectors on Rotating Detonation Engines, *2018 Joint Propulsion Conference*, doi:10.2514/6.2018-4785
- Choi, J. Y., Jeung, I. S., Yoon, Y., 2000, Computational Fluid Dynamics Algorithms for Unsteady Shock-

- Induced Combustion, Part 1: Validation. *AIAA Journal*, 38(7), 1179–1187, doi:10.2514/2.1112
- Driscoll, R., Stoddard, W., George, A. S., Gutmark E., 2015, Shock Transfer and Shock-Initiated Detonation in a Dual Pulse Detonation Engine/Crossover System, *AIAA Journal*, 53, 132–139, doi:10.2514/1.j053027
- Escobar, S., Pakalapati, S. R., Celik, I., Ferguson, D. Strakey, P., 2013, Numerical Investigation of Rotating Detonation Combustion in Annular Chambers, *Volume IA: Combustion, Fuels and Emissions*, doi:10.1115/gt2013-94918
- Ettner, F., Vollmer, K. G., Sattelmayer, T., 2014, Numerical Simulation of the Deflagration-to-Detonation Transition in Inhomogeneous Mixtures, *Journal of Combustion*, 2014, 1–15, doi:10.1155/2014/686347
- Heidari, A., Ferraris, S., Wen, J. X., Tam, V. H. Y., 2011, Numerical simulation of large scale hydrogen detonation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 2538–2544, doi:10.1016/j.ijhydene.2010.05.09
- Ladeinde, F., Oh, H., Jacobs, S., 2023, Supersonic combustion heat flux in a rotating detonation engine, *Acta Astronautica*, 203, 226-245, doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.044
- Lee J. H. S., 2010, *The detonation Phenomenon*, Cambridge University Press.
- Lei, Z., Yang, X., Ding, J., Weng, P., Wang, X., 2020, Performance of rotating detonation engine with stratified injection, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 21, 734–744, doi:10.1631/jzus.a1900383
- Lietz, C., Ross, M., Desai, Y., Hargus, W. A., 2020, Numerical investigation of operational performance in a methane-oxygen rotating detonation rocket engine, *AIAA Scitech 2020 Forum*, doi:10.2514/6.2020-0687
- Liu, S.J., Lin, Z. Y., Liu, W. D., Lin, W., Sun, M.B., 2012, Experimental and three-dimensional numerical investigations on H₂/air continuous rotating detonation wave, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 227, 326–341, doi:10.1177/0954410011433542
- Lu, F. K., Braun, E. M., 2014, Rotating Detonation Wave Propulsion: Experimental Challenges, Modeling, and Engine Concepts, *Journal of Propulsion and Power*, 30, 1125–1142, doi:10.2514/1.b34802
- Ma, F., Choi, J. Y., Yang, V., 2005, Thrust Chamber Dynamics and Propulsive Performance of Single-Tube Pulse Detonation Engines, *Journal of Propulsion and Power*, 21, 512–526, doi:10.2514/1.7393
- Ma, J. Z., Luan, M. Y., Xia, Z. J., Wang, J. P., Zhang, S., Yao, S., Wang, B., 2020, Recent Progress, Development Trends, and Consideration of Continuous Detonation Engines, *AIAA Journal*, 58, 4976–5035, doi:10.2514/1.j058157
- Ma, Z., Zhang, S., Luan, M., Yao, S., Xia Z., Wang, J., 2018, Experimental research on ignition, quenching, reinitiation and the stabilization process in rotating detonation engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, doi:10.1016/j.ijhydene.2018.08.06
- Melguizo-Gavilanes, J., Rezaeyan, N., Tian, M., Bauwens, L., 2011, Shock-induced ignition with single step Arrhenius kinetics, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 2374–2380, doi:10.1016/j.ijhydene.2010.04.13
- Ó Conaire, M., Curran, H. J., Simmie, J. M., Pitz, W. J., Westbrook, C. K., 2004, A comprehensive modeling study of hydrogen oxidation, *International Journal of Chemical Kinetics*, 36, 603–622, doi:10.1002/kin.20036
- Prakash, S., Raman, V., Lietz, C., Hargus, W. A., Schumaker, S. A., 2020, High Fidelity Simulations of a Methane-Oxygen Rotating Detonation Rocket Engine, *AIAA Scitech 2020 Forum*, doi:10.2514/6.2020-0689
- Sato, T., Raman, V., 2020, Detonation Structure in Ethylene/Air-Based Non-Premixed Rotating Detonation Engine, *Journal of Propulsion and Power*, 36, 1–11, doi:10.2514/1.b37664
- Shao, Y-T, Liu, M., Wang, JP., 2010, Numerical investigation of rotating detonation engine propulsive performance, *Combustion Science and Technology*, 182, 1586–1597, doi:10.1080/00102202.2010.497316
- Schauer, F., Miser, C., Tucker, C., Bradley, R., Hokell, J., 2005, Detonation Initiation of Hydrocarbon-Air Mixtures in a Pulsed Detonation Engine, *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, doi:10.2514/6.2005-1343
- Schwer, D., Kailasanath, K., 2011, Effect of Inlet on Fill Region and Performance of Rotating Detonation Engines, *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, doi:10.2514/6.2011-6044
- Stempf, P., Dounia, O., Laera, D., Poinot, T., 2024, Effects of mixing assumptions and models for LES of Hydrogen-fueled Rotating Detonation Engines, *International Journal of Hydrogen Energy*, 62, 1-16, doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.033
- Su, L., Wen, F., Wang, S., Wang, Z., 2022, Analysis of energy saving and thrust characteristics of rotating detonation turbine engine, *Aerospace Science and Technology*, 124, 107555, doi.org/10.1016/j.ast.2022.107555

- Sun, J., Zhou, J., Liu, S., Lin, Z., Lin W., 2018, Plume flowfield and propulsive performance analysis of a rotating detonation engine, *Aerospace Science and Technology*, 81, 383-393, doi:10.1016/j.ast.2018.08.024
- Sun, J., Zhou, J., Liu, S., Lin, Z., Lin, W., 2019a, Effects of air injection throat width on a non-premixed rotating detonation engine, *Acta Astronautica*, 159, 189–198, doi:10.1016/j.actaastro.2019.03.0
- Sun, J., Zhou, J., Liu, S., Lin, Z., 2019b, Interaction between Rotating Detonation Wave Propagation and Reactant Mixing, *Acta Astronautica*, 164, 197-203, doi:10.1016/j.actaastro.2019.08.0
- Vignat, G., Brouzet, D., Bonanni, M., Ihme, M., 2024, Analysis of weak secondary waves in a rotating detonation engine using large-eddy simulation and wavenumber-domain filtering, *Combustion and Flame*, 263, 113387, doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113387
- Wang, C., Liu, W., Liu, S., Jiang, L., Lin, Z., 2015, Experimental verification of air-breathing continuous rotating detonation fueled by hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 9530–9538, doi:10.1016/j.ijhydene.2015.05.06
- Wang, F., Weng, C., Wu, Y., Bai, Q., Zheng, Q., Xu H., 2020, Numerical research on kerosene/air rotating detonation engines under different injection total temperatures, *Aerospace Science and Technology*, 105899, doi:10.1016/j.ast.2020.105899
- Wang, F., Weng, C., 2022, Numerical research on two-phase kerosene/air rotating detonation engines, *Acta Astronautica*, 192, 199-209, doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.12.026.
- Wescott, B. L., Stewart, D. S., Bdzil, J. B., 2004, On Self-Similarity of Detonation Diffraction, *Physics of Fluids*, 16, 373–384, doi:10.1063/1.1633552
- Wu, D., Liu, Y., Liu, Y., Wang, J., 2014, Numerical investigations of the restabilization of hydrogen–air rotating detonation engines, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 15803–15809, doi:10.1016/j.ijhydene.2014.07.15
- Xia, Z.-J., Sheng, Z. H., Shen, D. W., Wang, J. P., 2021, Numerical investigation of pre-detonator in rotating detonation engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(61), 31428–31438, doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.013
- Yan, C., Teng, H., Ng, H. D., 2021, Effects of slot injection on detonation wavelet characteristics in a rotating detonation engine, *Acta Astronautica*, 182, 274–285, doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.02.010
- Yi, T. H., Turangan, C., Lou, J., Wolanski, P., Kindracki, J., 2009, A Three-Dimensional Numerical Study of Rotational Detonation in an Annular Chamber, *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, doi:10.2514/6.2009-634
- Yi, T. H., Lou, J., Turangan, C., Choi, J.Y., Wolanski P., 2011, Propulsive Performance of a Continuously Rotating Detonation Engine, *Journal of Propulsion and Power*, 27, 171–181, doi:10.2514/1.46686
- Yu, J., Yao, S., Li, J., Li, J., Guo, C., Zhang, W., 2023, Numerical investigation of the rotating detonation engine with cat-ear-shaped film cooling holes under varying operating modes, *Aerospace Science and Technology*, 142, 108462, doi.org/10.1016/j.ast.2023.108642
- Zhang, L. F., Zhang, S. J., Ma, Z., Luan, M. Y., Wang, J.P., 2019, Three-dimensional numerical study on rotating detonation engines using reactive Navier-Stokes equations, *Aerospace Science and Technology*, 93, 1-10, doi:10.1016/j.ast.2019.07.004
- Zhao, M., Zhang, H., 2020, Large eddy simulation of non-reacting flow and mixing fields in a rotating detonation engine, *Fuel*, 280, 1-16, doi:10.1016/j.fuel.2020.118534
- Zhang, S., Ma, J. Z., Wang, J., 2020, Theoretical and Numerical Investigation on Total Pressure Gain in Rotating Detonation Engine, *AIAA Journal*, 58, 1–12, doi:10.2514/1.j059259
- Zhang, S., Yao, S., Luan, M., Zhang, L., Wang, J., 2018, Effects of injection conditions on the stability of rotating detonation waves, *Shock Waves*, 28, 1079-1087, doi:10.1007/s00193-018-0854-9
- Zheng, H., Meng, Q., Zhao, N., Li, Z., Deng, F., 2020, Numerical investigation on H₂/Air non-premixed rotating detonation engine under different equivalence ratios, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 2289–2307, doi:10.1016/j.ijhydene.2019.11.01