

2007\_357

**TÜBİTAK** zk

**TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK ARAŞTIRMA KURUMU**  
THE SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

**Mühendislik Araştırma Grubu**  
Engineering Sciences Research Grant Group

Q 91244

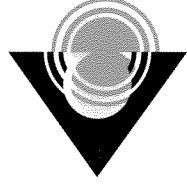
**Proje No: 105M333**

**VAKUMLU BUHARLAMA İŞLEMLERİNİN İPLİK  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Prof.Dr. Özcan ÖZDEMİR  
Doç.Dr. Mehmet KANIK  
Arş.Gör. Sibel ŞARDAĞ

Temmuz 2007

**BURSA**



2008\_112

**TÜBİTAK**

**TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK ARAŞTIRMA KURUMU**  
THE SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

**Temel Bilimler Araştırma Grubu**  
Basic Sciences Research Grant Group

Q 93026

**Proje No: 106T705**

**Gaz Akımında Sürekli Optik Deşarj Özelliklerinin Nümerik  
İncelemesi**

Y. Doç. Dr. İsmail RAFATOV  
Dr. Burak YEDİERLER

ŞUBAT 2008  
ANKARA

## ÖNSÖZ

Proje konusu hava akısında Sürekli Optiksel Deşarjın (SOD) nümerik modellemesidir.

SODU'un incelenmesi, değişik bilimsel ve teknolojik uygulamalar açısından önem taşımaktadır.

Bu uygulamalardan etkili bir şekilde yararlanabilmek için plazma parametrelerinin kontrolü ve bir gaz akısı içerisindeki SOD un kararlılık özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Bu projede, radyasyon gaz dinamiği ve termal fiziğe dayanan SOD'ın kuazi-optiksel yaklaşım çerçevesinde iki boyutlu nümerik modeli oluşturulmuştur. Bu modele dayanarak, SOD'ın serbest hava atmosferinde kararlı yanma şartları, lazer ışınının enerjik ve geometrik özellikleri, gaz dinamik akımların fiziksel parametrelere etkileri gibi dış faktörler incelenmiştir.

TÜBİTAK tarafından (1006T705 araştırma projesi) desteklenen araştırma projesinin süresi (01.01.2007 – 01.01.2008) bir yıldır ve bu proje ODTÜ Fizik Bölümünde iki araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiştir.

1.1. Amaçlar, Kapsam ve Tanımlar

1.2. Genel Deneyi Tanımlama ve Kurulum

1.3. Simülasyonlar

1.4. Tartışma

1.4.1. Nükleonlar

1.4.2. Nükleonlar

1.4.3. Enerji ve Momentum

1.4.4. Enerji ve Momentum

1.4.5. Enerji ve Momentum

Referanslar

## İÇİNDEKİLER

Önsöz .....	2
İçindekiler .....	3
Tablo ve şekil listeleri .....	4
Özet .....	5
Abstract .....	6
1. Giriş .....	7
2. Model ve Yöntem .....	9
2.1. Modeli Oluşturan Denklemler .....	9
2.2 Geometrical Optics Approximation .....	11
2.3 Sınır Şartları .....	11
2.4 Yöntem .....	12
2.4.1 Nümerik Yöntem .....	12
2.4.2 Nümerik Süreç .....	13
2.4.3 Software ve Hardware .....	13
3. Hesaplama Sonuçları .....	14
4. Sonuç ve Öneri .....	15
Referanslar .....	24

## ŞEKİL LİSTESİ

**ŞEKİL 1:** Gaz akısında SOD'un nümerik hesaplama alanı şeması.

ŞEKİL 1: Gaz akısında SOD'un nümerik hesaplama alanı şeması.

**ŞEKİL 2:** Plazma sıcaklığı  $T$  (a), lazer radyasyon şiddeti  $I$  (b), hızın aksiyal bileşeni  $u$  (d), ve  $z$ -ekseni boyunca 'steady state' plazma yaratan değişik gaz akım süratlerinde  $U_0 = 0.6, 0.8, 1.0$  m/s  $P=3$  kW lazer gücü için  $p=1$  atm basınçta SOD.

ŞEKİL 2: Plazma sıcaklığı  $T$  (a), lazer radyasyon şiddeti  $I$  (b), hızın aksiyal bileşeni  $u$  (d), ve  $z$ -ekseni boyunca 'steady state' plazma yaratan değişik gaz akım süratlerinde  $U_0 = 0.6, 0.8, 1.0$  m/s  $P=3$  kW lazer gücü için  $p=1$  atm basınçta SOD.

**ŞEKİL 3.** Şekil 2 de verilen koşullar ve gaz akım sürati  $U_0=1$  m/s için: plazma sıcaklığı  $T$  (a), basınç  $p$  (b), eksensel hız  $u$  (c) ve radyal hız  $v$  (d) bileşenleri, elektrik alan büyüklüğü  $|E|$  (e) değerlerinin uzaysal dağılımları.

ŞEKİL 3: Şekil 2 de verilen koşullar ve gaz akım sürati  $U_0=1$  m/s için: plazma sıcaklığı  $T$  (a), basınç  $p$  (b), eksensel hız  $u$  (c) ve radyal hız  $v$  (d) bileşenleri, elektrik alan büyüklüğü  $|E|$  (e) değerlerinin uzaysal dağılımları.

**ŞEKİL 4.**  $U_0 = 1$  m/s gaz akımında SOD için (a) Sıcaklık alanı (komşu konturlar arası artış 2 kK dır) ve gaz akış çizgileri  $G/G_{max}$  ( $G_{max}=0.73$  g/s). Noktalı eğri lazer ışını sınırlarını belirlemektedir. Grafikler Şekil 2 de verilen değerler için çizilmiş ve grafiğin büyütülmüş hali (a) panelinde gösterilmiştir.

ŞEKİL 4:  $U_0 = 1$  m/s gaz akımında SOD için (a) Sıcaklık alanı (komşu konturlar arası artış 2 kK dır) ve gaz akış çizgileri  $G/G_{max}$  ( $G_{max}=0.73$  g/s). Noktalı eğri lazer ışını sınırlarını belirlemektedir. Grafikler Şekil 2 de verilen değerler için çizilmiş ve grafiğin büyütülmüş hali (a) panelinde gösterilmiştir.

**ŞEKİL 5.** Şekil 2 de verilen değerler için  $z$ -ekseni boyunca  $P=2.5$  ve  $P=3$  kW lazer güçleri için Plazma Sıcaklığı  $T$  (a), Lazer Radyasyon Şiddeti  $I$  (b), elektrik alan büyüklüğü  $|E|$  (c), hızın eksensel bileşeni  $u$  (d), ve basınç (e) ( $U_0 = 1.0$  m/s)

ŞEKİL 5: Şekil 2 de verilen değerler için  $z$ -ekseni boyunca  $P=2.5$  ve  $P=3$  kW lazer güçleri için Plazma Sıcaklığı  $T$  (a), Lazer Radyasyon Şiddeti  $I$  (b), elektrik alan büyüklüğü  $|E|$  (c), hızın eksensel bileşeni  $u$  (d), ve basınç (e) ( $U_0 = 1.0$  m/s)

ŞEKİL 5: Şekil 2 de verilen değerler için  $z$ -ekseni boyunca  $P=2.5$  ve  $P=3$  kW lazer güçleri için Plazma Sıcaklığı  $T$  (a), Lazer Radyasyon Şiddeti  $I$  (b), elektrik alan büyüklüğü  $|E|$  (c), hızın eksensel bileşeni  $u$  (d), ve basınç (e) ( $U_0 = 1.0$  m/s)

## ÖZET

Proje konusu hava akısında (literatürde Lazer ile Desteklenen Yanma Dalgası olarak bilinen) Sürekli Optiksel Deşarjın (SOD) incelenmesidir. Plazmanın lazer radyasyonu ile oluşturulabilmesini teorik olarak Yu.P.Raizer 1970 de ortaya atmıştır. Aynı yıl, SOD Rusya Bilimler Akademisinin Mekanik Problemler Enstitüsünde deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Bu gelişmelerin hemen akabinde Almanya, Amerika Birleşik Devletleri ve Polonya da SOD çalışmaları başlamıştır.

SOD, değişik bilimsel ve teknolojik uygulamalar açısından önemli olmasının yanısıra; savunma sanayi ve askeri uygulamalar gibi konular için kritik önem taşımaktadır. SOD uygulamalarından etkili bir şekilde yararlanabilmek için plazma parametrelerinin kontrolü ve bir gaz akısı içerisindeki SOD un kararlılık özelliklerinin bilinmesi gereklidir.

Bu projede, SOD'un radyasyon gaz dinamiği ve termal fiziksel iki boyutlu modelini oluşturarak, serbest hava atmosferinde karalı yanma şartlarını lazer ışınının enerjik ve geometrik özellikleri, gaz dinamik akımların parametrelere etkileri gibi dış faktörler cinsinden incelenmiştir. SOD'ın incelemelerinde kullanılan daha önceki yaklaşımlardan farklı olarak, bu çalışmada lazer radyasyonun taşınması probleminde daha doğru ve daha fiziksel sonucun elde edilmesini sağlayan radyasyon kırınımının hesaba katıldığı kuazi-optiksel yaklaşım kullanılmıştır.

Süresi 1 yıl olan proje, iki araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiştir. İlk etapta, SOD'un modelini oluşturan, Elektromanyetik, Gas-Dinamik, ve Termal Fizik modülleri ayrı ayrı hazırlanmıştır. Deneylemelerden sonra bu modüller bir araya getirilip SOD'un nümerik modeli oluşturulmuştur. İkinci etapta, elde edilen nümerik modele dayanarak, SOD'ın incelenmesi yapılmıştır.

### Anahtar Kelimeler:

Gaz deşarjı, gaz dinamiği, lazer-plazma etkileşimi, modelleme, radyasyon ısı geçişi



## ABSTRACT

Çoklu Optik Dalgaları (COD) ile Desteklenen Sürekli Akış Discharge ve Laser Desteklenen Yanma Dalgası (Laser-Supported Combustion Wave) kavramları, lazer radyasyonu ile gaz plazması etkileşimlerinin araştırılması amacıyla, 1970-1971 yılları arasında gerçekleştirilmiştir.

The project deals with the investigation of the continuous optical discharge (COD) (known also as Laser-Supported Combustion Wave) in air flow. Possibility to sustain the plasmas by laser radiation was predicted theoretically by Yu.P. Paizer in 1970 and COD was obtained experimentally in the Institute of Mechanics Problems of Russian Academy of Sciences in the same year. Immediately after that some countries like Germany, USA and Poland have started research on the COD concept.

Investigation of a COD is of considerable interest, which is stimulated by various scientific, technological and military applications. The efficient adoption of COD as sources of plasma for these applications depends on the ability of, first, to control the COD plasma properties, and secondly, to ensure the conditions under which a stable COD may exist in a gas flow.

The aim of the project was to construct the two-dimensional radiative gas-dynamics and thermal physics model of COD, and, on the basis of this model, to determine the conditions for stable combustion of COD in free air atmosphere depending on external factors like energetic and geometric characteristics of the laser beams, properties of the external gas dynamic flows. In contrast to the former approaches used in the COD investigations, physically more reliable quasi-optical approximation that takes refraction of the laser radiation into account, was used to model the radiation transfer.

The duration for the project was one year. Two researchers participated the project. At the first stage, from separately developed Electromagnetic, Gas-Dynamic, and Thermal Physics modules, the computational model for COD was assembled. Afterwards, on the basis of the developed computational model, numerical investigation of COD properties were performed.

ÖZET

Çoklu optik dalgaları (COD) ile desteklenen sürekli akış discharge ve lazer desteklenen yanma dalgası kavramları, lazer radyasyonu ile gaz plazması etkileşimlerinin araştırılması amacıyla, 1970-1971 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Bu dönemde gerçekleştirilen COD çalışmaları, lazer radyasyonu ile gaz plazması etkileşimlerinin araştırılması amacıyla, 1970-1971 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Bu dönemde gerçekleştirilen COD çalışmaları, lazer radyasyonu ile gaz plazması etkileşimlerinin araştırılması amacıyla, 1970-1971 yılları arasında gerçekleştirilmiştir.

### Keywords:

Gas dynamics, modeling, radiative heat transfer, gas discharge, laser-plasma interactions

## 1. GİRİŞ

Sürekli Optiksel Deşarj (SOD) (literatürde 'Continuous Optical Discharge' veya 'Laser-Supported Combustion Wave', Lazer Destekli Yanma Dalgası şeklinde geçer), uygulanan lazer radyasyonunun soğurulmasıyla yanar (GENERALOV, 1979, 1971), ve diğer elektrik deşarjlarla nazaran kimi özellikleri açısından tektir: yüksek sıcaklığı (atmosfer havasında 18000~20000 K), deşarj plazmasının spektral temizliği (enerjinin plazmaya yetiştirmesi elektrot, induktor, waveguide gibi aletler kullanmadan yapıldığı için), küçük boyu (lazer ışınına dik yönde deşarj boyu ~1 mm), atmosferde hareket ettirebilme olanağı, vb. (RAIZER, 1980, 1981, BUFETOV, 1988, FOWLER, 1975). Pratikte gerçekleştirilen SOD'ı yandırma şemaları lazer radyasyonunun dalga boyu ve odaklandırmasıyla, dış gaz akımlarının yapıları ve gaz akışı yönlerine göre farklılık gösterirler (RAIZER, 1980, BUFETOV, 1988, FOWLER, 1975, KEEFER, 1975, WELLE, 1987, KOZLOV, 1987, GERASIMENKO, 1979, 1982).

SOD'ın deneysel araştırmalarında serbest hava atmosferinde bulunan deşarjın sıcaklık dağılımları (KEEFER, 1975) ortaya konulmuştur. Lazer plazma üretici rejiminde (WELLE, 1987, KOZLOV, 1987) deşarjın kararlı yanmasının parametrik alanı ortam gazının türü ve basıncı, lazer ışınının dalga boyu ve gücü, dış gaz akımlarının hızı ve yapısı, odak mesafesi ve herhangi bir katı hedefin ortamda bulunup bulunmamasına göre değerlendirilmiştir (GERASIMENKO, 1979, 1982, GENERALOV, 1986, VVEDENOV, 1985).

SOD'da yer alan süreçlerin teorik incelenmesi bir boyutlu ve kuazi bir boyutlu modellere dayanarak (RAIZER, 1970, 1991) yapılmıştır. Adı geçen yaklaşım (RAIZER, 1984, 1985) optiksel lazer plazma üreticinin ve (GLADUSH, 1983) SOD'ın kolay erimeyen bir hedefin yakınında yanmasının analizleri için kullanılmıştır. (GLADUSH, 1985, RAIZER, 1986, SILANTEV, 1986) SOD lazer ışınının kırınımı hesaba alınarak kuazi-optiksel yaklaşımla araştırılmıştır. SOD'un sabit olmayan rejimleri (KOZLOV, 1978, GUROVICH, 1980) incelenmiştir. Birbirinden bağımsız, Navier-Stokes denklemlerine dayanan SOD'un iki boyutlu gaz-dinamik modelleri (RAIZER, 1986, JENG, 1986, KULUMBAEV, 1986) geliştirilmiştir.

Odaklanan lazer ışınına paralel gaz akımında gerçekleştirilen SOD'ın teorik incelemesi deşarj önündeki akımın iki boyutlu olduğunu gösterir (BUFETOV, 1988, RAIZER, 1986, KULUMBAEV, 1986, JENG, 1987). Bu, deneylerde gözlemlenen SOD' burnunun radyasyona doğru hareket hızının lazer plazmasının 'yavaş yanmasının' normal hızından neden farklı olduğunu açıklanmıştır. (GUS'KOV, 1990) de gazın sıcak kürenin etrafından akmasına dayanan gaz-dinamik mekanizması göz önüne alınmıştır. SOD'ın ND-YAG lazerinin paralel ışınında sabitlenmiş kararlı hareketinin sayısal incelenmesi (CONRAD, 1996) gazın genelde deşarj plazmasının sıcak bölgeden kaçarak aktığını gösterir. Ayrıca, buradaki sonuçlar, deney (BUFETOV, 1988) de ki deşarj burnu hızının lazer radyasyonu şiddeti ile bağımlılığı açısından tutarlıdır ve deşarj burnu önündeki gaz hareketinin homojen olmadığını göz önüne alan 'yavaş yanma' gaz-dinamik yaklaşımına dayanır.

(GENERALOV, 1986) deki deneyde, atmosferde CO<sub>2</sub> lazerinin odaklanmış ışınının etkisiyle gerçekleştiren SOD'ın kararlılığına homojen hava akımının hız ve yön etkileri incelenmiştir. Sonuçlara göre, akım lazer ışını yönünde veya ışın yönüne dik olduğunda deşarj kararlı, akım lazer ışınına ters

olduğunda kararsızdır. Akımın hızı büyüdükçe, deşarjın boyu küçülür ve deşarj kaustik bölgesine kayar. Hava akımı boyunca bulunan SOD'ın iki boyutlu (SURZHİKOV, 1996) hesapları sonucunda, deney (GENERALOV, 1986) ile tutarlı olarak, deşarj gerçekleşme parametrik alanı "lazer gücü – akım hızı" değişkenleri cinsinden belirlenir.

İki ve üç boyutlu radyasyon gaz-dinamiği denklemlerine dayanarak; dönen gaz akımında, yerçekimi alanında, dikey akımlarda ve kesişen lazer ışınları şartlarında SOD'ın özellikleri incelenmiştir (KULUMBAEV, 1999, 2000, 2003, 2006, SURZHİKOV, 2000). SOD'un bazı uygulamaları (WANG, 2003, MOSCICKI, 2005) ve optik plazma jeneratör (plazmatron) konuları (CONRAD, 1996, SURZHİKOV, 2005) tartışılmıştır.

Sonuç olarak, literatür analizine göre:

- Radyasyon gaz-dinamik modelleri optiksel deşarjda yer alan fiziksel süreçleri yeterli doğru şekilde ifade eder. Bu modeller, SOD'ın kararlı yanma koşullarının belirlenmesi ve tahmin edilebilmesi için kullanılabilir.
- Boylam ve dikey soğuk gaz akımlarında gerçekleştirilen SOD'ın kararlı şekilde yanması, ayrıca gazın deşarjın yüksek dereceli çekirdeğinin etrafından akması ve böylece deşarjın 'quasi-solid' cisim özelliğini taşıdığı görülmektedir.

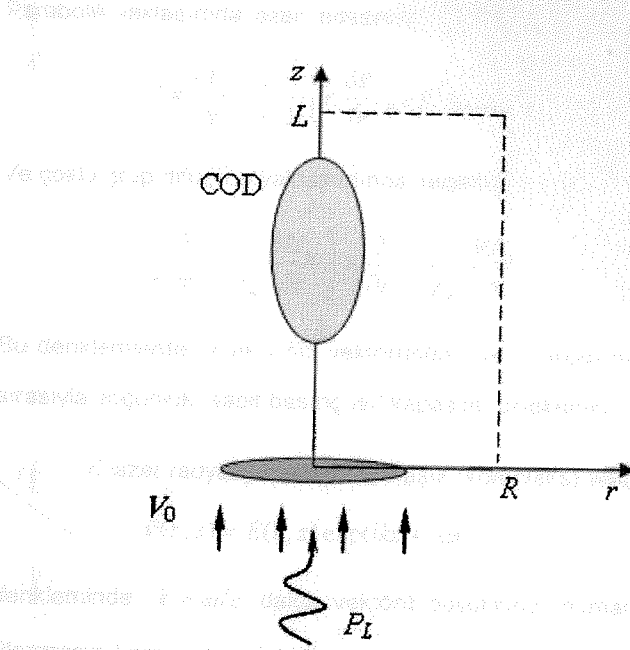
Ancak,

- Modelin kullanma alanının daha geniş olabilmesi için kuazi-optiksel yaklaşımı çerçevesinde lazer radyasyonu kırınımının ve geometrik optik yaklaşımı çerçevesinde ışın ekseninin bükülmesinin hesaba katılmaları gereklidir.
- Çözümü uygulamalar için önem taşıyan SOD'ın kontrol edilebilme problemine literatürde rastlanmamıştır.
- Uygulamalar için (lazer motor vs.) önemli görünen SOD'ın plazma-nozzle oluşturabileceği incelenmemiştir.

Bu boşluğu doldurmak üzere, bu proje çalışması gerçekleştirilmiştir. Lazer radyasyonu kırınımının ve ışın ekseninin bükülmesinin hesaba katıldığı ve böylece daha gerçekçi fiziksel sonuçlar sağlayan 'quasi-optics' yaklaşımı çerçevesinde yapılan SOD'ın iki boyutlu radyasyon gaz-dinamik modelleme sonuçları (RAFATOV, 2007, 2008) sunulmuş ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

## 2. MODEL VE YÖNTEM

Proje çerçevesinde kullanılan yaklaşım, radyasyon gaz dinamiği ve termal fizik denklemlerini temel alan matematiksel ve sayısal modelleme yöntemlerine dayanır.



ŞEKİL 1: Gaz akısında SOD'un nümerik hesaplama alanı şeması.

### 2.1. Modeli Oluşturan Denklemler

SOD parametreleri aşağıda sıralanan denklem grubunun çözümlenmesi ile bulunur. Bu denklemler sırasıyla süreklilik denklemi,

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u) = 0, \quad (1)$$

Navier-Stokes denklemleri,

$$\rho \left( v \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \eta \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{2\eta v}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \eta \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{2}{3} \eta \left( \frac{1}{r} \frac{\partial r v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right], \quad (2)$$

$$\rho \left( v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \eta \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{2}{3} \eta \left( \frac{1}{r} \frac{\partial r v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right], \quad (3)$$

enerji dengesi denklemi,

$$\rho C_p \left( v \frac{\partial T}{\partial r} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_L - Q_R, \quad (4)$$

Parabolik yaklaşımda lazer radyasyon denklemi,

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial E}{\partial r} \right) + k^2 (\epsilon_c - 1) E, \quad (5)$$

Ve çoklu grup difüzyon yaklaşımında seçilmiş radyasyon iletimi denklemi

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r}{3\chi_m} \frac{\partial U_m}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{3\chi_m} \frac{\partial U_m}{\partial z} \right) = \chi_m (U_m - U_{mp}), \quad m=10. \quad (6)$$

Bu denklemlerde,  $v$  ve  $u$  hız vektörünün  $r$  ve  $z$  bileşenleri olup,  $T$  sıcaklık,  $p$  basınç,  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $\eta$  ve  $\lambda$  sırasıyla yoğunluk, sabit basınç ısı kapasite, akışkanlık (viskozite), ve termal iletkenliklerdir.

$E$  lazer radyasyonunun karmaşık (kompleks) elektrik alan şiddeti olmak üzere,

$$\mathcal{E}(r, z) = E(r, z) \exp(ikz + i\omega t),$$

denkleminde,  $k = \omega/c$  dalga vektörü büyüklüğü (numarası),  $\omega$  açısal frekans ve  $c$  de ışık hızıdır.

Plazmanın karmaşık dielektrik geçirgenliği  $\epsilon_c$  aşağıdaki gibi tanımlandığında

$$\epsilon_c = 1 - \frac{n_e}{n_c} - i \frac{\mu}{k},$$

$\mu$  hacimsel lazer soğurulması katsayısıdır.

$$\mu = \frac{2.82 \times 10^{-29} n_e^2}{T^{3/2}} \lg \frac{2.17 \times 10^3 T}{n_e^{1/3}}$$

( $n_e \text{ cm}^{-3}$  olarak,  $T$  K cinsinden ve  $\mu \text{ cm}^{-1}$  olarak verilir),  $n_c$  dengede elektron yoğunluğudur ve Saha denkleminin çözülmesiyle bulunur.  $n_c$  dielektrik geçirgenliğin sıfırlandığı kritik plazma yoğunluğudur ve

$$n_c = \frac{\epsilon_0 m_e \omega^2}{c^2}.$$

olarak verilir.

$Q_L$  plazma içerisine aktarılarak harcanan radyasyon güç yoğunluğu'nu açıklar.

$$Q_L = \mu \frac{\epsilon_0 E^2}{2} c, \quad (7)$$

burada  $\epsilon_0$  vakum geçirgenlik katsayısıdır.

Aynı şekilde,  $\chi_m$ ,  $U_m$ , ve  $U_{mp}$ ,  $m=10$  olmak üzere  $N_m$  spektral aralıklarda hacimsel soğurum katsayısı ile plazma ve ideal karacisim radyasyon yoğunluklarıdır.

$$Q_R \approx \sum_{m=1}^{N_m} c \chi_m (U_{mp} - U_m), \quad (8)$$

burada

$$U_{mp} = \frac{4}{c} \sigma_m (T, \nu_m, \nu_{m+1}) T^4$$

ile

$$\sigma_m (T, \nu_m, \nu_{m+1}) = \frac{2\pi k_B^4}{c^2 h^3} \left[ \sigma \left( \frac{h\nu_{m+1}}{k_B T} \right) - \sigma \left( \frac{h\nu_m}{k_B T} \right) \right],$$

Bir not olarak  $h$  Plank sabiti ve  $k_B$  Boltzmann sabitidir.

## 2.2 Geometrik Optik Yaklaşımı

Lazer ışını kırınımı ihmal edilebilecek düzeyde ve lazer ışını Gaussian şekilde ise, radyasyon güç yoğunluğu  $Q_L$  aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Q_L = \frac{\mu P_L}{\pi R_L^2} \exp\left(-\frac{r^2}{R_L^2}\right) \exp\left(-\int_0^z \mu dz\right), \quad (9)$$

burada  $P_L$  ve  $R_L$  lazerin gücü ve lazer ışın yarıçapıdır.

## 2.3 Sınır Şartları

Hesaplama bölgesini çevreleyen dikdörtgen kontur üzerindeki sınır şartları aşağıda verilmiştir. Giriş sınırındaki ( $z=0$ ,  $0 < r < R$ ) şartlar,

$$u = u_0(r), \quad v = 0, \quad T = T_0, \quad E = E(r), \quad U_m = U_{mp}. \quad (10)$$

Çıkıştaki silindirik yüzeydeki ( $0 < z < L$ ,  $r = R$ ) şartlar

$$u = u_0(z), \quad v = 0, \quad T = T_0, \quad E = 0, \quad U_m = U_{mp}. \quad (11)$$

olarak alınmıştır. Bu sisteme  $z$  ekseninde ( $r = 0$ ,  $0 < z < L$ ) simetri koşullarını uyguladık.

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0, \quad v = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial U_m}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial r} = 0. \quad (12)$$

Çıkış sınırındaki koşullar ( $z = L$ ,  $0 < r < R$ ) tek boyutlu gaz akımına karşılık gelir.

$$\frac{\partial \rho u}{\partial z} = 0, v = 0, p = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial U_m}{\partial z} = 0, \frac{\partial E}{\partial z} = 0. \quad (13)$$

## 2.4 Yöntem

Yukarıda anlattığımız teorik modeli fiziksel değişkenlere göre nümerik uygulamasını geliştirdik.

### 2.4.1 Nümerik Yöntem

Bu yöntemde iki farklı grid (ağ) kullandık:

Bunlardan bir tanesi, Navier-Stokes, enerji dengesi ve radyasyon taşınımı denklemlerini içeren sistemin hidrodinamik kısmın için kullanılmaktadır. Hidrodinamik denklemler için, finite difference tekniği ve bu tekniğe dayanan Patanakar'ın SIMPLE (PATANKAR, 1980) algoritması kullanılmıştır. Sonlu-fark denklemlerin hesabında SIP iterasyon yöntemi (FERZİGER, 2002) kullanılmıştır. Bu kısımda kullanılan grid,  $r$  ve  $z$  eksenlerinde düzgün olmayan bir yapıdadır. Şekil 2-6 da gösterildiği üzere sonuçlar 64 ( $r$  yönünde)  $\times$  192 ( $z$  yönünde) üzerinde elde edilmiştir.

Lazer radyasyonu denklemi düşünüldüğünde çözümünün özel bir yaklaşım gerektirmesinden ortaya çıkar. Model problem üzerinde denklem (5) in vakumdaki analitik çözümünü temel alan nümerik deneyler bize bu durumda klasik sonlu farklar yöntemlerinin uygun olmadığını göstermiştir. Bunun nedeni ise lazer ışının odaklanma noktasında doğru elektrik alanının (electric field amplitude  $|E|$ ) aşırı eğimidir. Bunun için  $z$  yönünde nümerik ağ adımı  $|E|$  eğimine göre ayarlanmalıdır. İkinci neden ise, dalga boyunun ( $\text{CO}_2$ -lazer için  $10.6\text{E}-6$  m) hesaplama alan boyutlarına göre aşırı küçük olmasıdır. Bu  $r$  yönünde aşırı node (sayısal düğüm) sayısını gerektirir (Örneğin, aldığımız alan boyutu  $r$  yönde 2 cm olduğuna göre, dalganın doğru açıklanması için  $2\text{E}-2/10.6\text{E}-6=1887$ nin katları gibi olağanüstü büyük sayıda node olmasını gerekmektedir).

Bu problem için, "method of lines" (HUNSDORFER, 2003) dayanan bir yöntem geliştirilmiştir. İlk etapta, denklem (5) ODE denklemler sistemine dönüştürülerek

$$2ik \frac{\partial E_i}{\partial z} = F(r_i, E(r_i)), \quad i = 1, \dots, n \quad (14)$$

elde edilen ODE sistemi, belirli doğruluğu sağlayacak şekilde ayarlanan adımlarıyla, evrimsel problemi gibi  $z$  yönde adım adım hesaplanır. Burada  $F(r_i, E(r_i))$  (5)in sağ tarafının sonlu farklar yaklaşımıdır,  $n$  ise  $r$  yönünde node sayısıdır. Her iterasyonlar sırasında denklem (5) in çözümünün (elektrik alan  $E$ ) doğrusal interpolasyon kullanılarak hidrodinamik grid üzerine izdüşümü hesaplanıyor.

Hesaplamalarda kullanılan havanın termal fizik, taşınım ve optik ( $N_m = 10$ ) özellikleri (PREVDODİTELEV 1959, 1960, BACRİ, 1989, AVILOVA, 1970) referanslardan alınmıştır.

## 2.4.2 Nümerik Süreç

SOD'ın sayısal modelinin program kodu, modelin ilerideki geliştirmesini sağlayabilecek ve değişik benzer problemlerin araştırılmasına uygulanabilmesini kolaylaştıracak şekilde modüller şeklinde hazırlanmıştır.

Üç ana modül:

- (1) Gaz-dinamiği modülü,
- (2) Enerji Balans modülü, ve
- (3) Lazer Radyasyon Taşıma modülüdür.

Program kod o şekilde hazırlanmıştır ki bunlar biri birinden bağımsız da çalıştırabilir. Mesela, belirli sıcaklık  $T(r, z)$  alanı için yalnız gaz-dinamik denklemlerin çözümü bulunabilir, veya yalnız lazer radyasyon taşıma denklemi çözülebilir. Veya belirli gaz-dinamik akımlar için ve lazer radyasyon şiddeti için yalnız enerji balan problemin çözümü bulunabilir, vs.

Hesaplama üç iterasyon döngüsünden oluşuyor. Hesaplama aşamaları şunlardır.

- (1) İlk (initial) plazma oluşumu sıcaklığı  $T(r, z)$  dağılımı için Lazer Radyasyon Taşıma problemi (denklem (5)) çözülüyor ve böylece lazer şiddetinin dağılımı bulunuyor
- (2) Navier Stokes (1)-(3) denklemleri çözülüyor ve böylece gaz-dinamik akımların şekli bulunuyor,
- (3) Elde edilen lazer şiddeti ve gaz-dinamik akımlar için enerji balans (4) ve 'heat radiation transport' (6) denklemleri hesaplanıyor ve böylece sıcaklığın yeni yaklaşımı bulunuyor.

'Convergence' sağlanana kadar bu şekilde devam etmektedir.

## 2.4.3 Software ve Hardware

SOD'ın sayısal modelini fortran 90'da hazırlanmıştır. Hesaplamalarda Intel Fortran Compiler 9.0 .kullanılmıştır.

Bazı özel sayısal deneyler için COMSOL Multiphysics 3.3 paketi kullanılmıştır.

Hesap sonuçlarının görüntülenmesi ve değerlendirmesi için Matlab 7.1 paketi kullanılmıştır.

Hesaplamalar ODTÜ Fizik Bölümünde mevcut sunucu

newton.physics.metu.edu.tr, 4 x Intel(R) Xeon(TM) CPU 3.06GHz, 1 GB memory)

ve Enformatik Enstitüsünün

METU HPC (High Performace Computing Center) klasterinde (IBM BladeCenter H-14

Intel Xeon Dual Core 3.00 GHz CPUs)

klasterında yapılmıştır.



#### 2.4.2 Nümerik Süreç

SOD'ın sayısal modelinin program kodu, modelin ilerideki geliştirmesini sağlayabilecek ve değişik benzer problemlerin araştırılmasına uygulanabilmesini kolaylaştıracak şekilde modüller şeklinde hazırlanmıştır.

Üç ana modül:

- (1) Gaz-dinamiği modülü,
- (2) Enerji Balans modülü, ve
- (3) Lazer Radyasyon Taşıma modülüdür.

Program kod o şekilde hazırlanmıştır ki bunlar biri birinden bağımsız da çalıştırabilir. Mesela, belirli sıcaklık  $T(r, z)$  alanı için yalnız gaz-dinamik denklemlerin çözümü bulunabilir, veya yalnız lazer radyasyon taşıma denklemi çözülebilir. Veya belirli gaz-dinamik akımlar için ve lazer radyasyon şiddeti için yalnız enerji balan problemin çözümü bulunabilir, vs.

Hesaplama üç iterasyon döngüsünden oluşuyor. Hesaplama aşamaları şunlardır.

- (1) İlk (initial) plazma oluşumu sıcaklığı  $T(r, z)$  dağılımı için Lazer Radyasyon Taşıma problemi (denklem (5)) çözülüyor ve böylece lazer şiddetinin dağılımı bulunuyor
- (2) Navier Stokes (1)-(3) denklemleri çözülüyor ve böylece gaz-dinamik akımların şekli bulunuyor,
- (3) Elde edilen lazer şiddeti ve gaz-dinamik akımlar için enerji balans (4) ve 'heat radiation transport' (6) denklemleri hesaplanıyor ve böylece sıcaklığın yeni yaklaşımı bulunuyor.

'Convergence' sağlanana kadar bu şekilde devam etmektedir.

#### 2.4.3 Software ve Hardware

SOD'ın sayısal modelini fortran 90'da hazırlanmıştır. Hesaplamalarda Intel Fortran Compiler 9.0 kullanılmıştır.

Bazı özel sayısal deneyler için COMSOL Multiphysics 3.3 paketi kullanılmıştır.

Hesap sonuçlarının görüntülenmesi ve değerlendirilmesi için Matlab 7.1 paketi kullanılmıştır.

Hesaplamalar ODTÜ Fizik Bölümünde mevcut sunucu

newton.physics.metu.edu.tr, 4 x Intel(R) Xeon(TM) CPU 3.06GHz, 1 GB memory)

ve Enformatik Enstitüsünün

METU HPC (High Performace Computing Center) klasterinde (IBM BladeCenter H-14

Intel Xeon Dual Core 3.00 GHz CPUs)

klasterinde yapılmıştır.

IBM BladeCenter H bilgisayarını kullanarak, 2.4.1'de verilen grid için yapılan hesaplamaların bir dış iterasyon döngüsü ortalama 1.6 saat alabiliyor. Kabul edilebilir doğrulukta çözüm ortalama 80-120 dış iterasyon sonunda sağlanıyor. Buna göre, belli parametreler için hesaplama ortalama 160 saat (yani yaklaşık bir hafta) zaman alabiliyor.

### 3. HESAPLAMA SONUÇLARI

Geliştirilen ve doğrulanan hesaplama modeli temelinde, değişik lazer geometrileri ve lazer güçleri  $P_L$  için SOD'un aksensel gaz akımında kararlı yanma özellikleri sistematik bir şekilde incelenmiştir.

Hesaplamalarımız, deneysel (KEEFER, 1975 KEEFER, 1985, 1986, WELLE, 1987) ve teorik (RAIZER, 1986, 1987, CONRAD, 1996) çalışmalarda işaret edilen lazer ışını tarafından yaratılan plazma içerisinde ışının kırınıma uğraması nedeniyle plazma odak noktasının lazer ışını odak noktasından radyasyon kaynağına doğru kaydığı bulgularını ispatlar niteliktedir. Söz konusu kayma kolektif bir yapı içerisinde odak noktasının kendisinin kayması olarak ortaya çıkar ve lazer radyasyon şiddetinin azami olduğu bölgede tutulur. Eğer, SOD ışın içerisinde, lazer şiddetinin kendisini tutamayacağı kadar düşük olduğu bir noktaya doğru kayarsa yok olacaktır. Bu nedenle, SOD yönüne aksi yönde olan başlangıç gaz akımı SOD u kararlı hale getirir. Hesaplamalarımızda yukarıda anılan durumu sağlayan gaz akımı süratleri seçildiğinde özel bir durum olan "laser supported combustion wave" yaratılarak yarı kararlı olan SOD'un kararlı hale geldiği gösterilmiştir.

Geliştirdiğimiz teorik ve nümerik model sonuçlarını görüntülemek için,  $P_L = 3$  kW lazer gücü, "soğuk" ( $T_0 = 300$  K) "parabolik" hava akımının azami süratleri olarak  $u_0 = 0.6, 0.8,$  and  $1$  m/s parametreleri kullanılmıştır. Lazer ışınının spot büyüklüğü  $a_0 = 0.05$  mm, ve odak noktası  $z_F = 50$  mm olarak alınmıştır. Bu değerler bize başlangıç ışın yarı çapı olarak  $R_0 = a_0 \sqrt{1 + (z_F / ka_0^2)^2} = 1.69$  mm değerini verir. Hesaplama alanı ebatları  $20$  mm  $\times$   $100$  mm dir ve bunlara göre hesaplanan SOD un sıcaklık ve gaz dinamik yapısı Şekil 2 – Şekil 5 te sunulmuştur.

Sekil 2, Plazma sıcaklığı  $T$  (a), lazer radyasyon şiddeti  $I$  (b), hızın aksiyal bileşeni  $u$  (d), ve z-ekseni boyunca 'steady state' plazma yaratan değişik gaz akım süratlerinde  $U_0 = 0.6, 0.8, 1.0$  m/s  $P=3$  kW lazer gücü için  $p=1$  atm basınçta SOD yapısını gösterirken; Şekil 3, Şekil 2 de verilen koşullar ve gaz akım sürati  $U_0=1$  m/s için: plazma sıcaklığı  $T$  (a), basınç  $p$  (b), aksensel hız  $u$  (c) ve radyal hız  $v$  (d) bileşenleri elektrik alan büyüklüğü  $|E|$  (e) değerlerinin uzaysal dağılımlarını vermektedir. ŞEKİL 4 te,  $U_0 = 1$  m/s gaz akımında SOD için (a) Sıcaklık alanı (komşu konturlar arası artış 2 kK dir) ve gaz akış çizgileri  $G/G_{max}$  ( $G_{max}=0.73$  g/s). Noktalı eğri lazer ışını sınırlarını belirlemektedir. Grafikler Şekil 2 de verilen değerler için çizilmiş ve grafiğin büyütülmüş hali (a) panelinde gösterilmiştir. Son olarak ŞEKİL 5, Şekil 2 de verilen değerler için z-ekseni boyunca  $P=2.5$  ve  $P=3$  kW lazer güçleri için Plazma Sıcaklığı  $T$  (a), Lazer Radyasyon Şiddeti  $I$  (b), elektrik alan büyüklüğü  $|E|$  (c), hızın aksensel bileşeni  $u$  (d), ve basınç. ( $U_0 = 1.0$  m/s) değerlerini göstermektedir.

Başlangıçtaki gaz akımının temelde yüksek sıcaklıktaki SOD deşarj alanı merkezine doğru hareket ettiği ve termal ve gaz dinamik yollar oluşturduğu gözlenmiştir. Bu oluşan yapıya sadece soğuk gazın küçük bir kısmı girebilmektedir (Şekil 4). Bunun sonucunda deşarj bölgesindeki gaz ısınarak genişlemekte ve tüm yüksek sıcaklık bölgesini kaplamaktadır. Bulgularımız sonucunda SOD un önemli bir uygulaması olan plazma-nozzle oluşturabilme kabiliyeti doğrulanmış olmaktadır.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİ

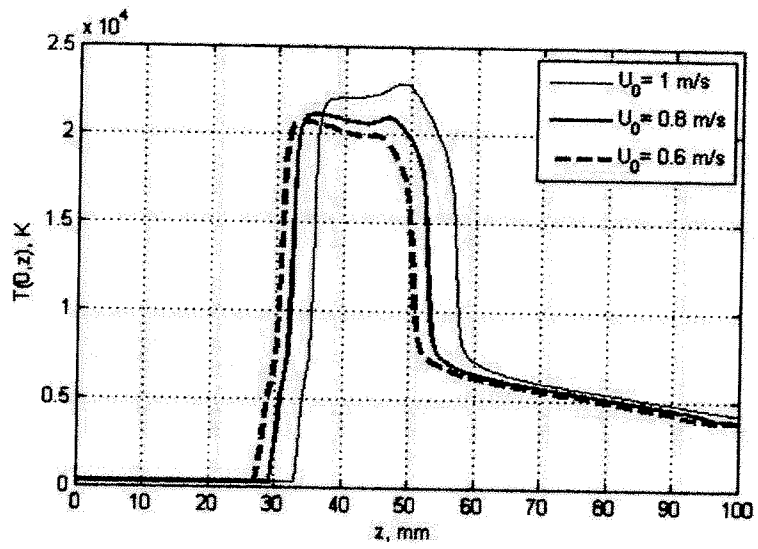
Bu proje çalışmasında, lazer ışını yayılımını gerçekçi bir şekilde ifade eden quasi-optiksel yaklaşım çerçevesinde ele aldığımız SOD un iki boyutlu radiasyon gaz-dinamiği modeli geliştirilmiş ve denenmiştir.

Geliştirdiğimiz modelimiz doğrultusunda konsantrite olduğumuz araştırmalar atmosferik basınç altında farklı giriş akımları ve değişik lazer geometri ve güçleri parametrelerinin uygulanıp incelenmesine yoğunlaşmıştır.

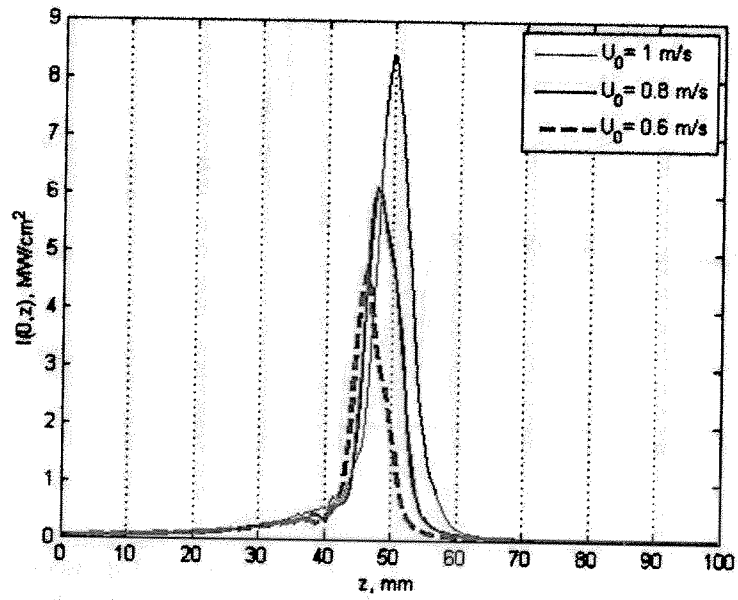
Model ve çözümler literatürde benzer şartlar altında yapılan teorik ve deneysel bulguları doğrular niteliktedir. Özellikle laboratuvar ortamı plazmaları için gerçekçi ebat, şekil ve sıcaklık dağılımlarını ortaya koymuştur. Hesaplamalarımız sonucunda var olan uygulamalı ve kuramsal sonuçların ortaya attığı deşarjın ve etken odak noktasının azami radyasyon şiddeti bölgesine doğru kayması olasılığını doğrulamış ve odağın kesinlikle azami radyasyon şiddeti noktasında olacağını ispatlamıştır.

SOD'ın sayısal modelinin program kodu, modelin geliştirilmesini sağlayabilecek ve değişik benzer problemlerin araştırmasına uygulanabilmesini kolaylaştıracak şekilde modüller şeklinde hazırlanmıştır.

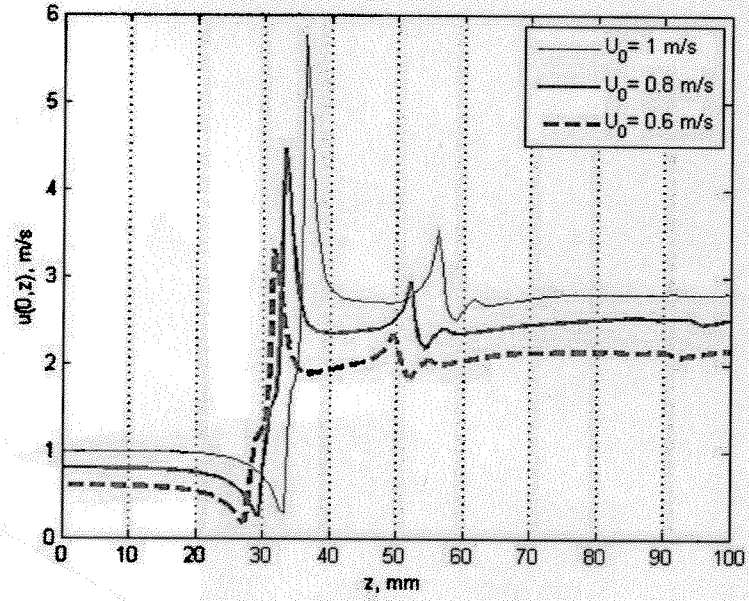
Bu çalışmamızın devamı olarak, elde ettiğimiz sayısal modelin, hem teorik hem uygulamalı fizik yönünden yeni perspektifler açabilecek (SOD'ın fiziksel özelliklerinin ve dinamiğinin dış ayarlanabilir parametrelere göre kontrol yapma problemi, SOD'ın plazma-nozzle oluşturabileceği, lazer motor vs.) **kesişen çoklu lazer ışınlarıyla desteklenen SOD probleminin incelenmesi için geliştirilmesi** planlanmıştır.



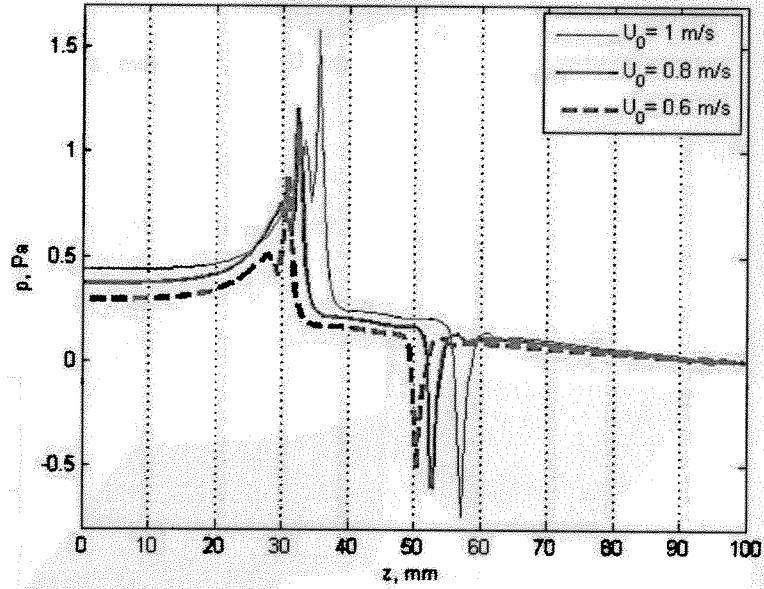
(a)



(b)

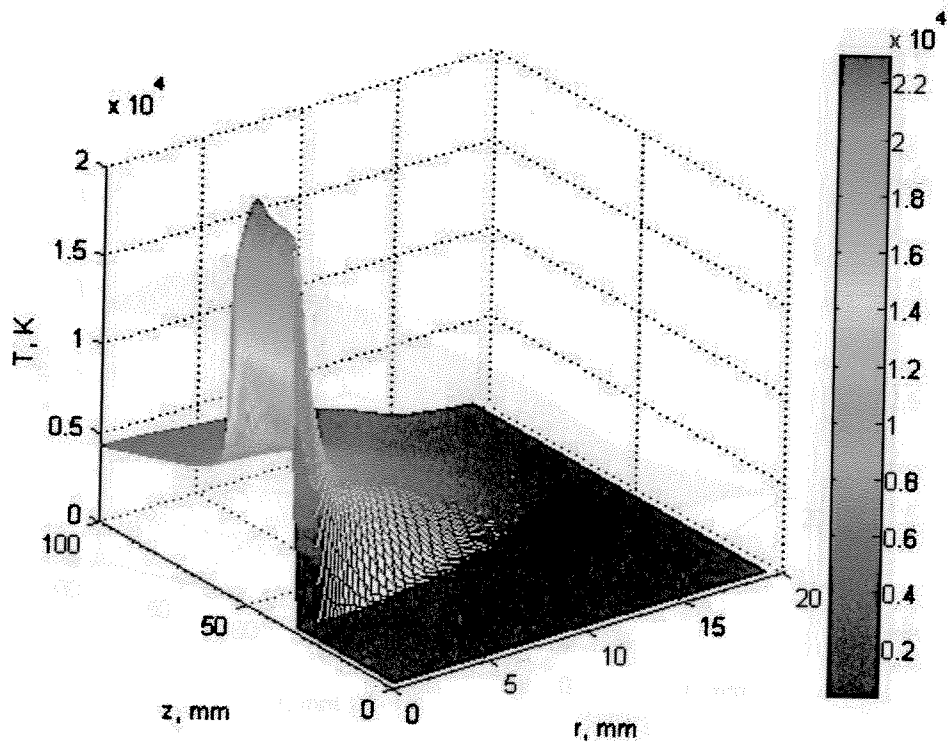


(c)

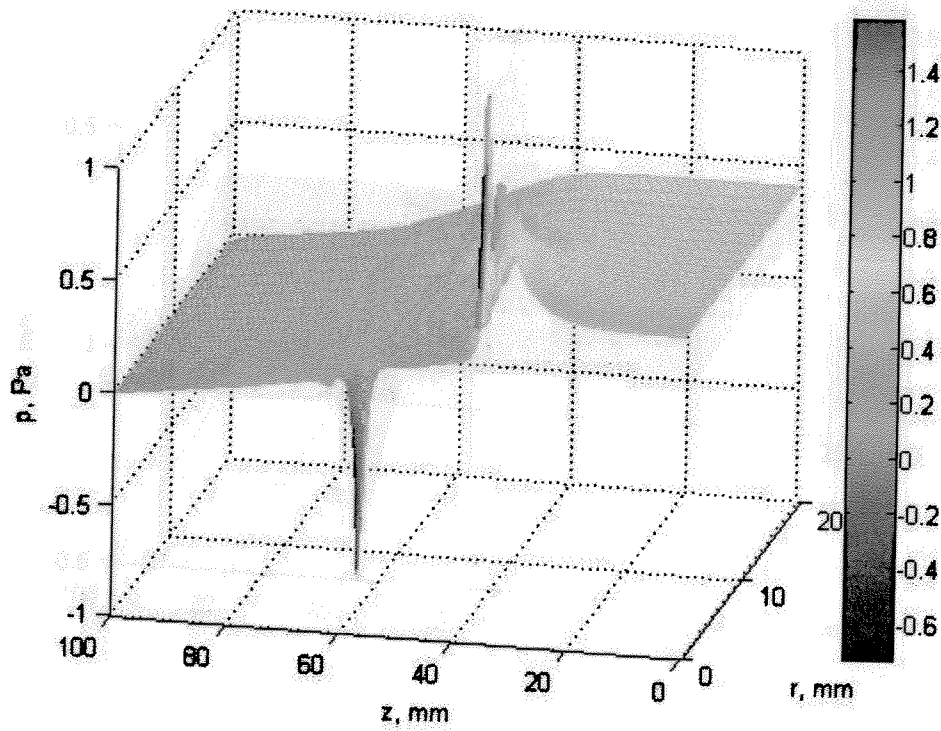


(d)

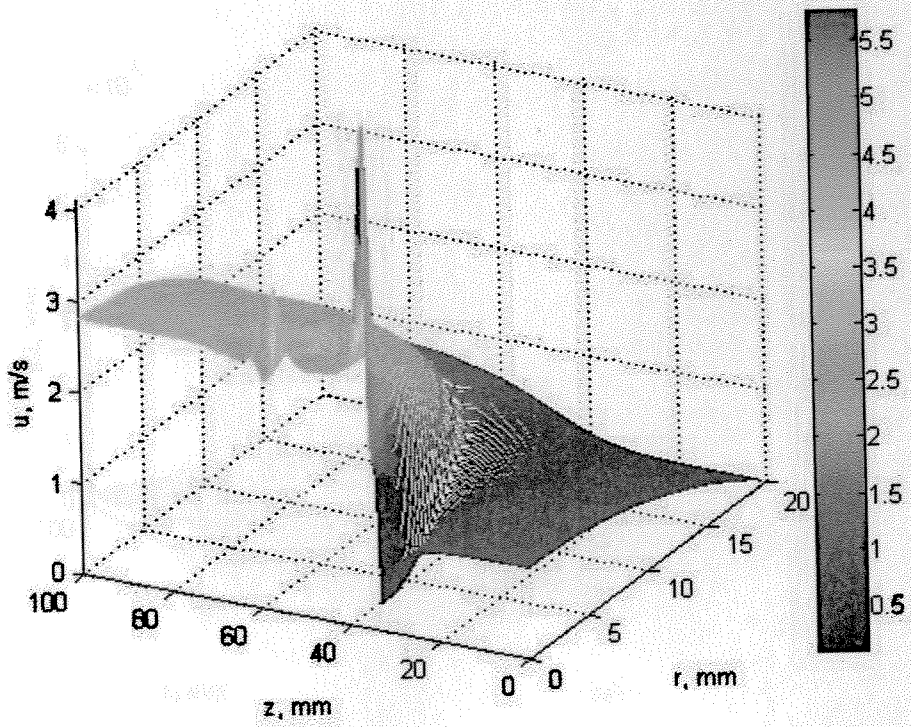
**ŞEKİL 2:** Plazma sıcaklığı  $T$  (a), lazer radyasyon şiddeti  $I$  (b), hızın aksiyal bileşeni  $u$  (d), ve z-ekseni boyunca steady state plazma yaratan değişik gaz akım süratlerinde  $U_0 = 0.6, 0.8, 1.0$  m/s  $P=3$  kW lazer gücü için  $p=1$  atm basınçta SOD.



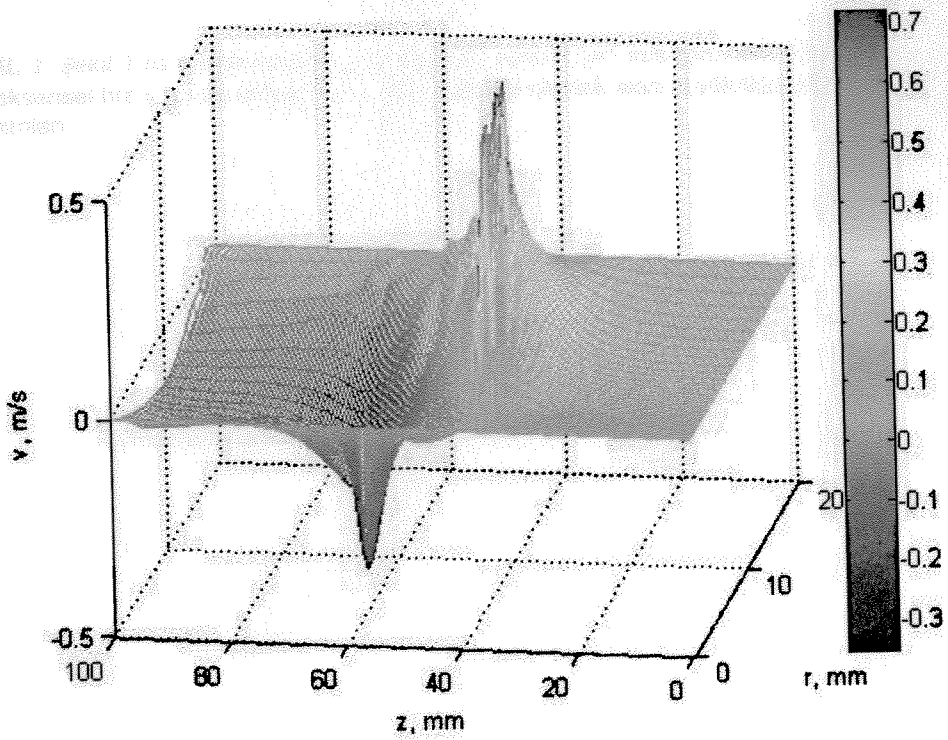
(a)



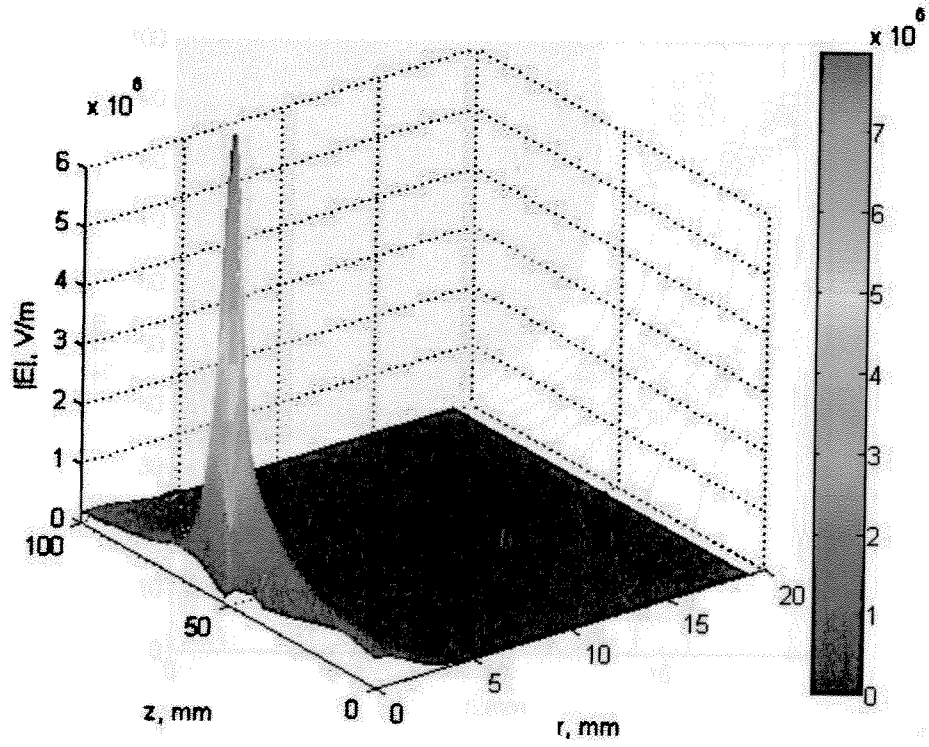
(b)



(c)

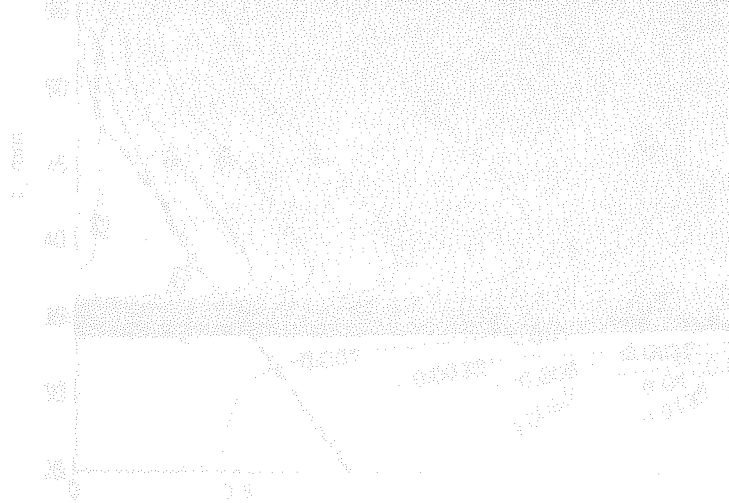


(d)



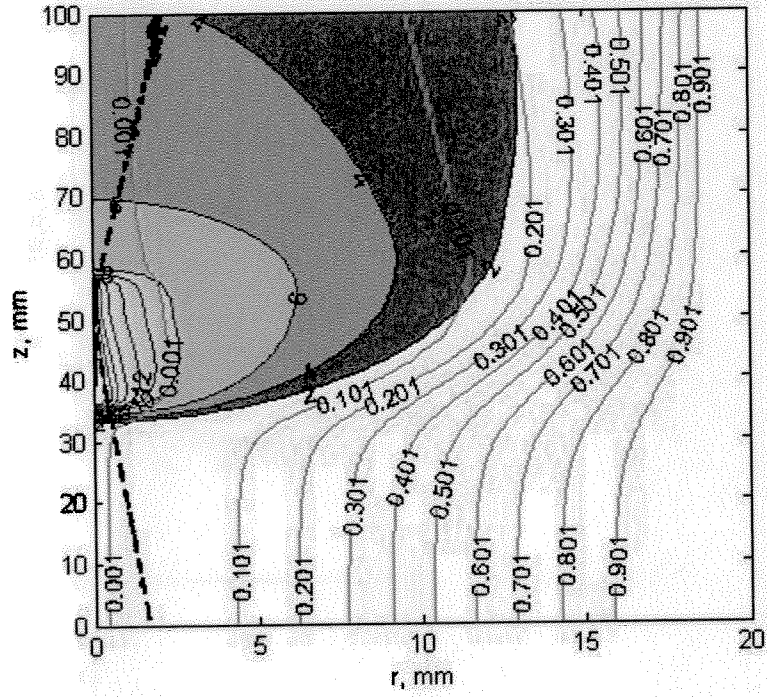
(e)

**ŞEKİL 3.** Şekil 2 de verilen koşullar ve gaz akım sürati  $U_0=1$  m/s için: plazma sıcaklığı  $T$  (a), basınç  $p$  (b), eksensel hız  $u$  (c) ve radyal hız  $v$  (d) bileşenleri elektrik alan büyüklüğü  $|E|$  (e) değerlerinin uzaysal dağılımları.

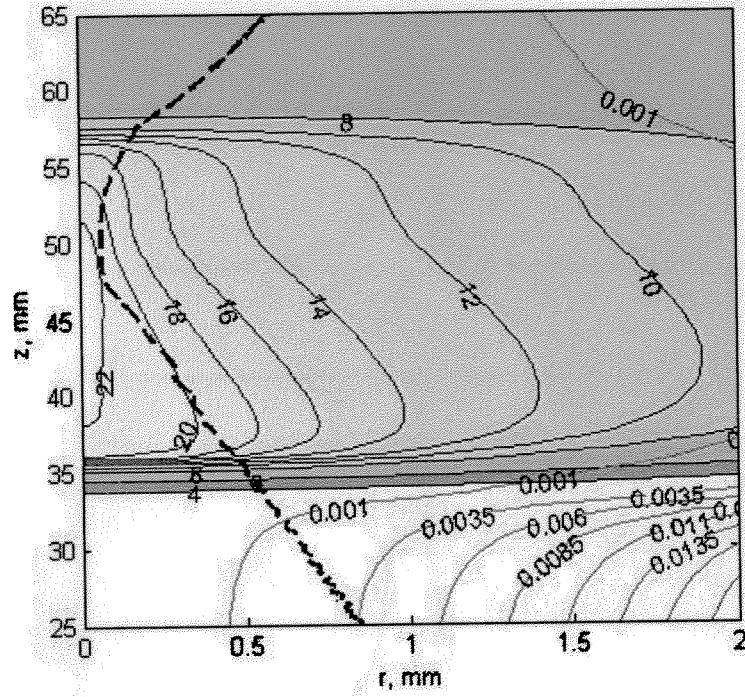


**ŞEKİL 4.** Şekil 2 de verilen koşullar ve gaz akım sürati  $U_0=1$  m/s için: plazma sıcaklığı  $T$  (a), basınç  $p$  (b), eksensel hız  $u$  (c) ve radyal hız  $v$  (d) bileşenleri elektrik alan büyüklüğü  $|E|$  (e) değerlerinin uzaysal dağılımları.



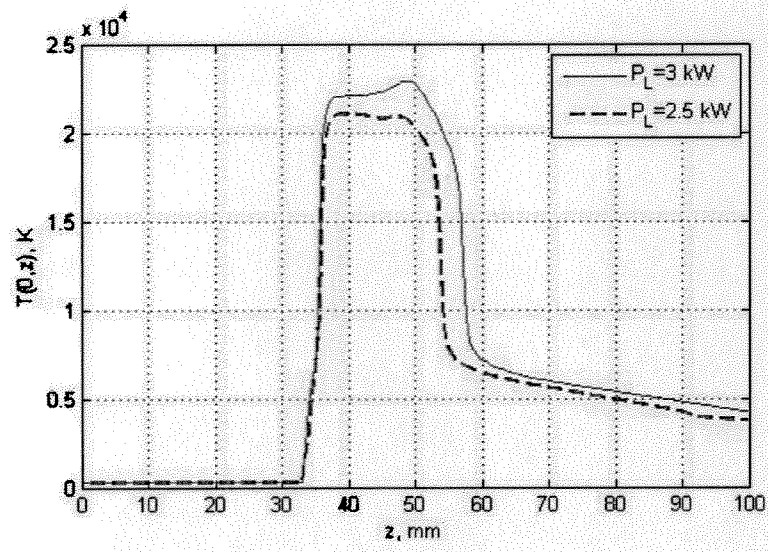


(a)

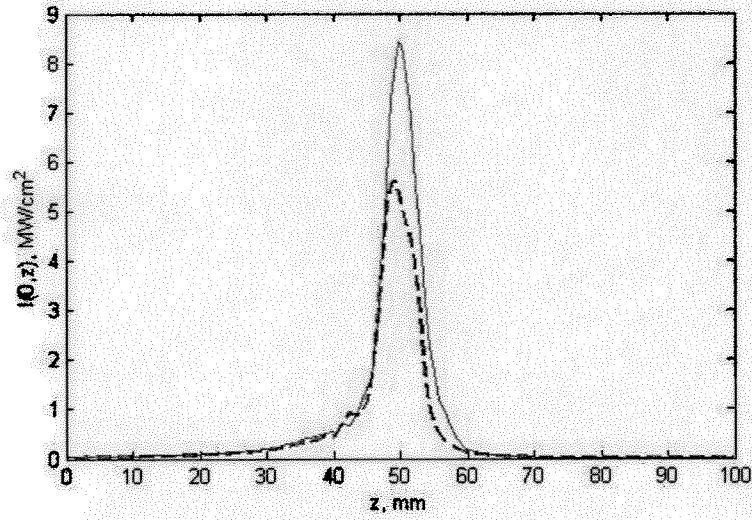


(b)

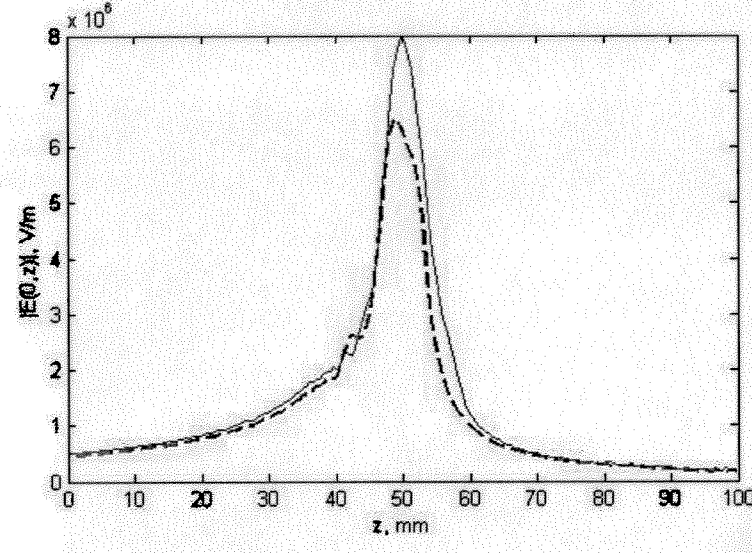
**ŞEKİL 4.**  $U_0 = 1$  m/s gaz akımında SOD için (a) Sıcaklık alanı (komşu konturlar arası artış 2 kK dır) ve gaz akış çizgileri  $G/G_{max}$  ( $G_{max}=0.73$  g/s). Noktalı eğri lazer ışını sınırlarını belirlemektedir. Grafikler Şekil 2 de verilen değerler için çizilmiş ve grafiğin büyütülmüş hali (a) panelinde gösterilmiştir.



(a)

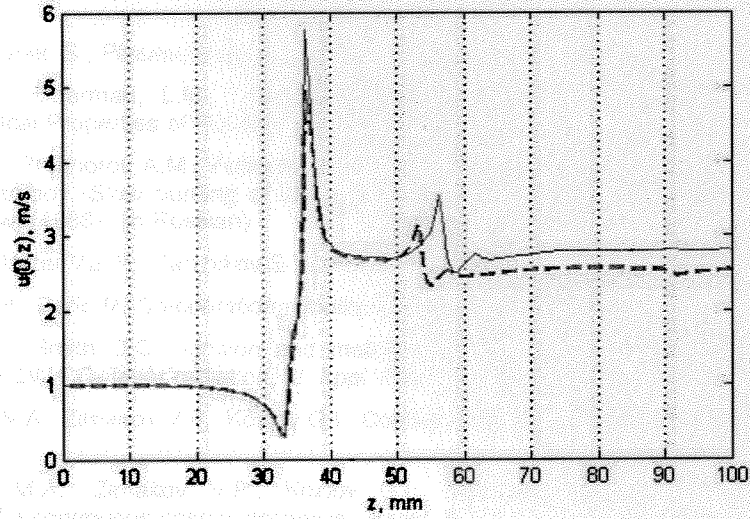


(b)

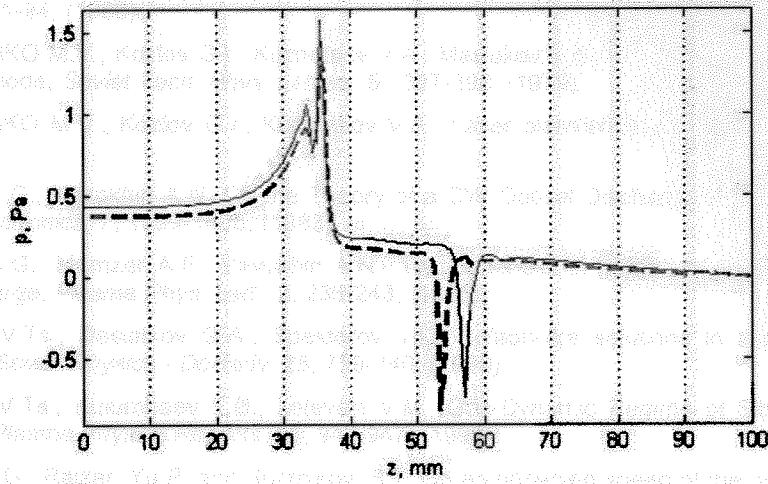


(c)

SCIENCE & TECHNOLOGY  
 ON THE EDGE OF  
 (a) we believe in



(d)



(e)

**ŞEKİL 5.** Şekil 2 de verilen değerler için z-ekseni boyunca  $P=2.5$  ve  $P=3$  kW lazer güçleri için Plazma Sıcaklığı  $T$  (a), Lazer Radyasyon Şiddeti  $I$  (b), elektrik alan büyüklüğü  $|E|$  (c), hızın eksensel bileşeni  $u$  (d), ve basınç (e). ( $U_0 = 1.0$  m/s)

KESPER D.P., HERRICKEN D.H., BRANNON J.P., *Optical Diagnostics of Laser-Driven Plasmas*, *J. Appl. Phys.*, 61, 1990, 1981-1991.

KESPER D.P., CROWDER H., *Optics of Laser-Driven Plasmas*, *Optics*, 1991, 1-10.

KESPER D.P., ARATA P., *Optics of Laser-Driven Plasmas*, *Optics*, 1991, 11-20.

KOZLOV S., *Optics of Laser-Driven Plasmas*, *Optics*, 1991, 21-30.

KOZLOV S., *Investigation of a continuous-wave laser plasma*, *Optics and Spectroscopy*, 1979, 2, 389-392, 1979.

## REFERANSLAR

- BACRÍ J., Raffanel, S., *Plasma Chem. Plasma Process*, 1, 133, (1989).
- AVILOVA, I.V., Biberman, L.M., Vorob'ev, V.S., *et al.*, Eds., *Opticheskie svoistva goryachego vozdukha* (Optical Properties of Hot Air), Moscow, Nauka, (1970).
- BUFETOV I.A., Prokhorov A.M., Fedorov V.B., and Fomin V.K., *Medlennoe gorenje lazernoy plazmy i opticheskie razryady* (Slow burning of laser plasma and optical discharges), IOFAN Trans., Vol: 10, Nauka, Moscow, (1988). (in Russian)
- CONRAD R., Raizer Yu. P., Sarzhikov S.T., *AIAA Journal*, 8, 1584-1588, (1996).
- FERZIGER J. H., Peric M., *Computational methods for fluid dynamics*, Springer, New York, (2002).
- FOWLER M.S., Smith D.C., Ignition and maintenance of subsonic plasma waves in atmospheric pressure air by CW CO<sub>2</sub> laser radiation, *J. Appl. Phys.*, 1, 138-150, (1975).
- GENERALOV N.A., Zimakov V.P., Kozlov G.I., Continuous optical discharge, *JETP Letters*, 9, 447-449, (1970).
- GENERALOV M.A., Zimakov V.P., Kozlov G.I., Masyukov V.A., Raizer Yu.P., Experimental investigation of a continuous optical discharge, *Soviet JETP*, 1, 434-1446, (1971).
- GENERALOV, N.A., Zakharov, A.M., Kosynkin, V.D., and Yakimov, M.Yu., *Combust. Expl. Shock Waves*, 2, 91-94, (1986).
- GERASIMENKO M.V., Kozlov G.I., Kuznetsov V.A., Masiukov V.A., CW optical discharge in the laser-plasmatron mode, *Soviet Tech. Phys. Letters*, 5, 397-398, (1979).
- GERASIMENKO M.V., Kozlov G.I., Kuznetsov V.A., Laser plasmatron, *Quantum Electronics*, 4, 709-717, (1982).
- GLADUSH G.G., Yavokhin A.N. On the Theory of a CW Optical Discharge in the Vicinity of a Target, *Quantum Electronics*, 7, 1399-1405, (1983).
- GLADUSH G.G., Mamzer A.F., Yavokhin A.N., Two-dimensional numerical analysis of a continuous optical discharge, *Plasma Phys. Lett.*, 2, 236-243, (1985).
- GUROVICH V.Ts., Desiatkov G.A., Spektorov V.L., Soliton-like solutions in a model of slow laser combustion, *Soviet Physics - Doklady*, 25, 739-740, (1980).
- GUROVICH V.Ts., Kulumbaev E.B., Lelevkin V.M., Gas-Dynamic Regime of Slowly Burning Optical Discharges, *Plasma Physics Reports*, 11, 943-947, (1998).
- GUS'KOV, K.G., Raizer, Yu.P. and Surzhikov, S.T. On an observed speed of the optical discharge slow propagation, *Quantum Electronics*, 7, 937-942, (1990).
- HUNSDORFER W., Verwer J. G., *Numerical Solution of Time- Dependent Advection-Diffusion-Reaction Equations*, Springer Series in Computational Mathematics, vol: 33, Springer, Berlin, (2003).
- JENG S.-M., Keefer D.R., Theoretical Investigation of Laser-Sustained Argon Plasmas, *J. Appl. Phys.*, 7, 2272-2279, (1986).
- JENG S.-M., Keefer D., Welle R., Peters C., Laser-Sustained plasmas in forced convective argon flow. Part 2. Comparison of numerical model with experiment, *AIAA Journal*, 25, 1224-1230, (1987).
- KEEFER D.R., Henriksen B.B., Braerman W.F., Experimental study a stationary laser-sustained plasma, *J. Appl. Phys.*, 46, 1080-1083, (1975).
- KEEFER D.R., Crowder H., Peters C., *AIAA*, 85, 0388, (1985).
- KEEFER D.R., Welle R., Peters C., *AIAA*, 85, 1552 (1986).
- KOZLOV G.I., Laser plasmatron with gas flow, *Soviet Tech. Phys. Letters*, 10, 586-589, (1978).
- KOZLOV G.I., Selezneva I.K., Numerical investigation of the propagation of laser spark and of the formation of continuous optical discharge in a focused laser beam, *Soviet Physics - Technical Physics*, 2, 386-392, (1978).

- KULUMBAEV E.B., Lelevkin V.M., Otorbaev D.K. Calculation of the characteristics of the optical plasmatron, *Izv. AN Kyrg. SSR*, 6, 35-41, (1986).
- KULUMBAEV E.B., Lelevkin V.M., Continuous Optical Discharges in a Rotating Gas Flow, *Plasma Physics Reports*, 2, 183-186, (1999).
- KULUMBAEV E.B., Lelevkin V.M., Continuous Optical Discharge in a Transverse Gas Flow, *Plasma Physics Reports*, 6, 517-521, (1999).
- KULUMBAEV E.B., Lelevkin V.M., Continuous Optical Discharges in a gravitational field, *Plasma Physics Reports*, 7, 621-625, (2000).
- KULUMBAEV E.B., Lelevkin V.M., Continuous Optical Discharges in a crossed beams, *Plasma Physics Reports*, 7, 617-620, (2000).
- KULUMBAEV E.B., Lelevkin V.M., Numerical Analysis of the Characteristics of Continuous Optical Discharges, *Analytical and Approximate Methods*, Shaker-Verlag, Aachen, Germany, (2003). Pp: 145-156.
- KULUMBAEV E.B., Lelevkin V.M., Semenov V.F., Modeling and numerical analysis of electric discharges, in 'Encyclopedia of low temperature plasmas', Applied plasma chemistry Series, Vol: XI-5, Yanus-K, Moscow, (2006). Pp: 437 – 501 (in Russian)
- MOSCICKI T., Hoffman J., Szymanski Z, 2006, Modelling of plasma plume induced during laser welding, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 39, 685-692, (2006).
- PATANKAR S., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corp., New York, (1980).
- PREDVODITELEV, A.S., Stupochenko, E.V., Pleshakov, A.S., et al., Eds., *Tablitsy termodinamicheskikh funktsii vozdukha* (Tables of Thermodynamical Functions of Air), Moscow, Computer Center, Acad. Sci. of the USSR, (1959)
- PREDVODITELEV, A.S., Stupochenko, E.V., Ionov, V.P., et al., Eds., *Termodinamicheskie funktsii vozdukha* (Thermodynamical Functions of Air), Moscow, Akad. Nauk SSSR, (1960).
- RAIZER, Yu.P., *Gas Discharge Physics*, Springer-Verlag, Berlin, (1991).
- RAIZER Yu.P., Optical discharges, *Physics-Uspekhi*, 3, 449-581, (1980).
- RAIZER Yu.P., *Soviet JETP Letters*, 3, 195-199, (1970).
- RAIZER Yu.P., Surzhikov S.T., Numerical investigation of processes in an optical plasmatron, *Quantum Electronics*, 11, 2301-2310, (1984).
- RAIZER Yu.P., Surzhikov S.T., Numerical study of a continuous optical discharge in atmospheric air in the framework of a one-dimensional model, *High Temperature*, 1, 28-34, (1985).
- RAIZER Yu. P., Silant'ev Yu., The Two-Dimensional Calculation of the Temperature Field of a Continuous Optical Discharge in Air, *Quantum Electronics*, 3, 593-600, (1986).
- RAIZER Yu. P., Silantev Yu., Surzhikov S.T., Subsonic vortex motion of a gas under conditions of intense energy release in an optical plasmatron, *Soviet Tech. Phys. Letters*, 3, 134-138, (1986).
- RAIZER Yu. P., Surzhikov S.T., Thermo-gravitational convection in a continuous optical discharge, *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, 4, 124-129, (1989).
- RAFATOV I., E. Kulumbaev, and B. Yedierler, "Modelling of a Continuous Optical Discharge in a Gas Flow: Quasi-Optical Approximation", *Türk Fizik Derneği 24. Uluslararası Fizik Kongresi*, 28-31 Ağustos, Malatya, Türkiye, (2007).
- RAFATOV I., Kulumbaev E., Yedierler B., Modelling of a continuous optical discharge stabilized by a gas flow in quasi-optical approximation, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, (2007) (submitted).
- RAFATOV I., Kulumbaev E., Numerical approach for laser radiation transport in quasi-optics approximation, *J. Comp. Physics*, (2007) (to be submitted).
- SILANTEV A. Yu., *Soviet Physics - Technical Physics*, 9, 1811-1813, (1986).
- SURZHIKOV S.T., Subsonic radiation gas dynamics in a laser plasma generator channel, *Fluid Dynamics*, 3, 446-461 (2005).

SURZHIKOV S.T., Chentsov A.A., *Plasma Physics Reports*, 22, 957, (1996).

SURZHIKOV S.T., Numerical analysis of subsonic laser-supported combustion waves, *Quantum electronics*, 5, 416-420, (2000).

VVEDENOV, A.A., Gladush, G.G., *Fizicheskie protsessy pri lazernoi obrabotke materialov (Physical Processes in Laser Treatment of Materials)*, Energoatomizdat, Moscow, (1985). (in Russian)

WANG H-X, Chen X, Three-dimensional modeling of the laser-induced plasma plume characteristics in laser welding, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 36, 628-639, (2003).

WELLE R., Keefer D., Peters C., Laser-sustained plasmas in forced argon convective flow. Part 1. Experimental studies, *AIAA Journal*, 8, 1093-1099 (1987).

**TÜBİTAK  
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

<b>Proje No:</b> 106T705
<b>Proje Başlığı:</b> Gaz Akımında Sürekli Optik Deşarj Özelliklerinin Nümerik İncelemesi
<b>Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar:</b> Y. Doç. Dr. İsmail RAFATOV, Dr. Burak Yedierler
<b>Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:</b> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü, 06531 Ankara
<b>Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:</b>
<b>Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:</b> 01.01.2007 – 01.01.2008
<b>Öz (en çok 70 kelime)</b> <p>Proje konusu hava akısında Sürekli Optiksel Deşarjın (SOD) incelenmesidir. SOD'un incelenmesi, değişik bilimsel ve teknolojik uygulamalar açısından önem taşımaktadır. Ancak SOD uygulamalarından etkili bir şekilde yararlanabilmek plazma parametrelerinin kontrolü ve bir gaz akısı içerisindeki SOD'un kararlılık özelliklerinin bilinmesi ile mümkündür.</p> <p>Bu projede, radyasyon gaz dinamiği ve termal fiziğine dayanan SOD'nin iki boyutlu nümerik modeli oluşturulmuştur.</p> <p>Bu modele dayanarak, SOD'nin serbest hava atmosferinde karalı yanma şartlarını lazer ışınının enerji ve geometrik özellikleri, gaz dinamik akımların parametreleri etkileri gibi dış faktörler cinsinden incelenmiştir.</p> <p>SOD'nin incelemelerinde kullanılan daha önceki yaklaşımlardan farklı olarak, projede lazer radyasyonun taşınması daha doğru ve fiziksel sonuçun elde edilmesini sağlayabilecek radyasyon kırınımının hesaba katılacağı kuazi-optiksel yaklaşım kullanılmıştır.</p>
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Gaz deşarjı, gaz dinamiği, lazer-plazma etkileşimi, modelleme, radyasyon ısı geçişi
<b>Projeden Yapılan Yayınlar:</b> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Rafatov I., E. Kulumbaev, and B. Yedierler, "Modelling of a Continuous Optical Discharge in a Gas Flow: Quasi-Optical Approximation", Türk Fizik Derneği 24. Uluslararası Fizik Kongresi, 28-31 Ağustos, Malatya, Türkiye, (2007).</li><li>2. Rafatov I., Kulumbaev E., and Yedierler B., Modelling of a continuous optical discharge stabilized by a gas flow in quasi-optical approximation, <i>J. Phys. D: Appl. Phys.</i>, (2007) (submitted).</li><li>3. Rafatov I., Kulumbaev E., Numerical approach for laser radiation transport in quasi-optics approximation, <i>J. Comp. Physics</i>, (2007) (to be submitted).</li><li>4. Rafatov I., Kulumbaev E., and Yedierler B., Numerical analysis of a continuous optical discharge in a forced convective air flow, 19th Europhysics Conference on the Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases, Granada-Spain (2008).</li></ol>