

Remote Spectrometry and detection of organic and explosive materials through the generation of DC plasma

Elham Pouyanimehr¹, Mohammad Sabaeian^{1,2,*}, Roya Azadi³, Fatemeh Matroudi^{1,2}

¹Department of Physics, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

²Center for Research on Laser and Plasma, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

³Department of Chemistry, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received: 31.05.2017 Final revised: 13.06.2021 Accepted: 03.08.2021

Doi link: [10.22055/JRMBS.2021.17013](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2021.17013)

Abstract

Remote spectroscopy of material plasmas can be used well to detect and identify the material identity especially the explosive and organic materials. The plasma can be generated either through the applying high power density laser radiations or high DC voltages in the vacuum circumstance. In this paper, to generate the material plasmas, a high DC voltage of 2 kV was applied in the T-shaped lamp with argon atmosphere. The plasmas of two explosive materials of TNT and picric acid and two organic materials of 4-nitrobenzoic acid and 3,5-dinitrobenzoic acid in quantities of 35 mg were at first generated and then their spectra were measured from distances of 1.55, 2, and 2.31 meters. The spectra of material plasmas ranged from 200 nm to 800 nm consisting of lines C₂, H, O, N, and Ar. The limit-of-detection from a distance of 2 m was determined consequently. Finally, with the use of two methods, the explosive materials were distinguished from the organic ones and the calibration curve was also prepared.

Keywords: Stand-off spectroscopy, explosive materials, DC plasma



طیف‌سنجی و آشکارسازی مواد منفجره و آلی از راه دور از طریق تولید

پلاسمای جریان مستقیم

الهام پویانی مهر¹، محمد صبائیان^{1,2*}، رویا آزادی³، فاطمه مطرودی^{1,2}¹گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران²مرکز تحقیقات لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران³گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

دریافت: 1396/03/10 ویرایش نهایی: 1400/03/23 پذیرش: 1400/05/12

Doi link: [10.22055/JRMBS.2021.17013](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2021.17013)

چکیده

روش "طیف‌سنجی از راه دور پلاسمای مواد" می‌تواند برای آشکارسازی و تشخیص مواد زیان‌بار به‌ویژه مواد منفجره، از فواصل دور مورد استفاده قرار گیرد. پلاسمای مواد را می‌توان از طریق تابش پرتو لیزر با چگالی توان به‌اندازه کافی بالا یا از طریق اعمال ولتاژ بالا ایجاد کرد. در این مقاله، برای تولید پلاسمای مواد، از ولتاژ مستقیم و در حدود 2kV درون لامپ‌های T-شکل در اتمسفر آرگون استفاده شده است. دو ماده منفجره، 2 و 4 و 6-تری نیترو تولوئن و پیکریک اسید و دو ماده آلی، 3 و 5-دی‌نیتروبنزویک اسید و 4-نیتروبنزویک اسید با مقادیر 35 mg، پس از تولید پلاسما، از فواصل مختلف 1.55، 2 و 3.1 متر از طریق طیف‌سنجی، آشکارسازی شدند. طیف پلاسمای این مواد در ناحیه 200 تا 800 نانومتر شامل انواع خطوط گسیل C₂، H، O، N، Ar است. حد آشکارسازی این مواد، در فاصله 2 متری تعیین شد. در نهایت، با استفاده از دو روش، مواد آلی از مواد منفجره تفکیک شدند و نمودار کالیبراسیون آن‌ها تهیه شد.

کلیدواژگان: طیف‌سنجی دور ایستا، مواد منفجره، پلاسمای جریان مستقیم

مقدمه

ذکر شده، تشخیص مواد آلی از مواد منفجره مورد ضروری است [4].

در حال حاضر، روش‌هایی نظیر الکترون ربایی¹، سوانگاری گازی²، طیف‌سنجی جرمی، طیف‌سنجی تحریک یونی، حسگرهای زنده و فوتوآکوستیک لیزری و اخیراً طیف‌سنجی لیزری برای تشخیص مواد از راه دور مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفته‌اند [5]. با این وجود، آشکارسازی چنین موادی همواره سخت بوده است. مشکلاتی که در آشکارسازی این مواد باید بر آن‌ها فائق آمد، شامل فشار بخار پایین مواد خاص، مدت زمان مورد نیاز برای تشخیص، مقدار کم ماده، جداسازی ماده مورد نظر با اطمینان زیاد و ابقاء تمام

آشکارسازی و تفکیک مواد آلی، به‌ویژه مواد منفجره از اهمیت بالایی برخوردار است. در علوم جنایی، آشکارسازی مواد منفجره و محصولات تخریبی آن‌ها می‌تواند برای شناسایی افراد و اشیایی که با تجهیزات و مواد منفجره تماس داشته‌اند، مورد استفاده قرار گیرد [2و1]. در شیمی محیط‌زیست، حضور مواد منفجره و یا آلی خطرناک، در سطح و یا زیر زمین، می‌تواند موجب ورود آن‌ها به آب‌های زیرزمینی شود که تهدیدی برای محیط زیست است [3]. در هرکدام از زمینه‌های

²gas chromatography¹ electron capture

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.

این مقاله تحت مجوز کپی‌رایت کامنز تخصصی 4.0 بین‌المللی می‌باشد



طیف‌سنجی تراهرتز و موج میلی‌متری از جمله روش‌های آشکارسازی مقادیر توده‌ای مواد منفجره هستند. این روش‌ها خیلی گزینش‌پذیر نیستند و تنها احتمال تهدید را مشخص می‌کنند.

2- آشکارسازی مقادیر بسیار کم³: در این گروه از روش‌ها، آشکارسازی با جمع‌آوری و پیش‌تغلیظ بخارات یا ذرات بسیار ریز مواد منفجره انجام می‌گیرد [8]. برای آشکارسازی مقادیر بسیار کم بخارات مواد منفجره، روش استشمام حیوانی [8]، روش‌های مختلف سوانگاری گازی و آشکارسازهای الکترون ربا [9]، بینی‌های الکترونیکی⁴ [8]، روش‌های طیف‌سنجی از قبیل طیف‌سنجی رامان [10]، طیف‌سنجی تحرک یونی [11]، طیف‌سنجی جرمی [8]، حسگرهای جرمی و نوری [12] ارائه شده است.

3- آشکارسازی دور ایستا (از راه دور)⁵: این روش شامل استفاده از تابش‌های لیزری [13]، مادون‌قرمز و امواج تراهرتز [14] می‌باشد و تحلیل بازتابش‌ها برای تشخیص وجود مواد منفجره از فواصل دور به کار می‌رود. این دسته از روش‌ها، در مراحل اولیه توسعه قرار دارند.

یکی از روش‌های موفق لیزری برای آشکارسازی مواد منفجره و آلی از راه دور، طیف‌سنجی فروشکست القایی لیزر (LIBS)⁶ می‌باشد. LIBS یک روش تجزیه‌ای برای تعیین ترکیب عنصری مواد بر مبنای ثبت طیف گسیل پلاسمای مواد است. مزیت این روش به‌عنوان یک روش تحلیل عنصری، آنی بودن آن و عدم نیاز به آماده‌سازی نمونه، قابلیت آن در آنالیز هم‌زمان چند عنصری، سریع و غیرمخرب بودن آن و قابل

شرایط محیطی دستگاه می‌باشد. امروزه با استفاده از انواع روش‌های فیزیکی و شیمیایی، مخصوصاً روش‌های مبتنی بر طیف‌سنجی، امکان آشکارسازی مواد منفجره از مسافت‌های 10 تا 90 متری میسر شده است [6].

اگرچه مواد منفجره جزء مواد آلی به‌حساب می‌آیند، با این وجود در این مقاله، برای تمایز مواد آلی منفجرشونده از مواد آلی غیر انفجاری، به‌ترتیب از لفظ مواد منفجره و مواد آلی استفاده شده است. به‌طور کلی، مواد منفجره به‌دو دسته تقسیم می‌شوند: 1- ترکیباتی که دارای گروه نیترو هستند، مانند نیتروگلیسرین (NG)، 2 و 4 و 6-تری‌نیتروتولوئن (TNT) و 1 و 3 و 5-تری‌نیتروپروپیلیدرو-1 و 3 و 5-تری‌آزین (RDX)؛ 2- ترکیباتی که فاقد گروه نیترو هستند، مانند تری‌استون تری‌پراکسید (TATP)، پرکلرات‌ها و آزیدها. مواد منفجره‌ای که تاکنون بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، شامل نیترو آروماتیک‌ها از قبیل TNT، نیتروآمین‌ها از قبیل RDX و استرهای نیترودارشده از قبیل PETN¹ می‌باشد [7].

روش‌های آشکارسازی مواد منفجره شامل سه دسته هستند:

1- آشکارسازی مقادیر توده‌ای²: در این روش، مواد منفجره زیاد، اغلب به‌طور مستقیم توسط عکس‌برداری به‌وسیلهٔ پیمایش‌گرهای اشعهٔ ایکس یا دستگاهی مشابه مورد شناسایی قرار می‌گیرند. این روش، برای بازرسی محموله‌های غیرزنده مناسب است، ولی برای بازرسی موجودات زنده، خطرآفرین می‌باشد. روش‌های تصویربرداری اشعهٔ ایکس، روش‌های مغناطیسی،

⁴electronic noses

⁵stand-off detection

⁶laser-induced breakdown spectroscopy

¹ Pentaerythritol tetranitrate

²bulk detection

³trace detection

می‌شوند. با گذشت زمان‌های بعدی، وقتی پلاسما سرد می‌شود، طیف گسیل مولکولی C_2 و CN نیز ممکن است مشاهده شود [20].

در این مقاله، از روش اعمال ولتاژ مستقیم بالا بر مواد در شرایط خلأ از مرتبه 50 Torr و در محیط گاز آرگون برای تولید پلاسما استفاده می‌شود. هدف از این کار، امکان طیف‌سنجی و شناسایی مواد از راه دور است. پس از ایجاد پلاسمای مواد، نور گسیل شده توسط یک تلسکوپ جمع‌آوری شده و توسط یک سیستم اپتیکی به طیف‌سنج مرئی و کامپیوتر داده می‌شود. سپس با تحلیل داده‌ها، کار تشخیص مواد انجام می‌شود.

کارهای آزمایشگاهی

مواد منفجره مورد آزمایش در این مقاله، TNT، پیکریک اسید (PA)² و مواد آلی مورد استفاده، دو ماده 3 و 5-دی‌نیتروبنزوئیک اسید (DNB)³ و 4-نیتروبنزوئیک اسید (NB)⁴ در مقادیر 35 mg می‌باشند. چیدمان مورد استفاده در شکل 1 الف و ب نشان داده شده است. مطابق شکل 1 الف، از یک منبع ولتاژ بالای مستقیم، یک لامپ T شکل شیشه پیرکس با دو الکترود در طرفین، یک پمپ خلأ مدل VE115N، یک مقاومت توان بالا، آمپرتر و کپسول آرگون با خلوص 99/99٪ برای تولید و کنترل پلاسمای مواد استفاده شده است. شکل 1 ب، چیدمان جمع‌آوری و متمرکز کردن نور پلاسمای مواد به درون طیف‌سنج را نشان می‌دهد. تلسکوپ در فواصل افزایش یافته 1،55، 2 و 2،31 قرار داده می‌شود و طیف گسیلی مواد ثبت می‌شود.

در این کار، ابتدا مواد منفجره جامد در وسط لامپ شیشه‌ای T شکل (مطابق شکل 2 الف تا ث) قرار داده

استفاده بودن در انواع حالت‌های مواد می‌باشد [15 و 16]. لویز و همکاران [17] از این روش برای آشکارسازی مواد منفجره در فاصله‌های 30 متری استفاده کرده‌اند. با توجه به اینکه عناصر تشکیل‌دهنده اکثر مواد منفجره حاوی گروه نیترو، نیتروژن، اکسیژن، کربن و هیدروژن می‌باشد، از نسبت‌های شدت گسیلی این اتم‌ها برای شناسایی مواد منفجره استفاده می‌شود. تابش پلاسمایی، حاوی اطلاعاتی درباره ترکیب مواد سازنده اصلی می‌باشد؛ چراکه اتم‌ها و یون‌های هر جزء، مجموعه معینی از خطوط طیفی مشخصه گسیل می‌کنند. در کل، با تعیین مقدار عناصر N و O در هر نمونه نسبت به دیگر عنصرها، می‌توان به تشخیص مواد، به‌ویژه مواد منفجره پرداخت [18]. حضور N و O در جو و اثر آن بر پلاسمای القایی لیزر، شناسایی مواد منفجره را دشوار می‌کند [19]. بنابراین در این روش، به طیف‌سنج‌های ویژه با قدرت تفکیک و حساسیت بالا نیاز است. در اغلب این موارد، استفاده از ICCD¹ ها معمول است که باعث افزایش هزینه آزمایش می‌شود. غالب تابش‌های پلاسمایی در زمان‌های اولیه، تابش ترمزی الکترون‌های گرم و تابش‌های بازترکیب الکترون‌های آزاد با یون‌ها هستند. تابش‌های پیوستار فاقد اطلاعات خاصی از عناصر نمونه می‌باشند؛ اما پس از گذشت حدود یک میکروثانیه، این تابش‌ها فروکش می‌کنند و خطوط گسیلی یونی و اتمی غالب می‌شوند. با بررسی شدت و طول‌موج این خطوط، نوع عناصر موجود در نمونه و فراوانی آن‌ها به دست می‌آید. به‌طور کلی، می‌توان گفت در لحظات اول که پلاسما گرم است، بازترکیب الکترون آزاد و یون رخ داده و طیف پیوسته ایجاد می‌شود. با گذشت زمان، اتم‌های خنثی برانگیخته‌شده و خطوط گسیلی یونی و اتمی گسیل

³3,5-dinitrobenzoic acid

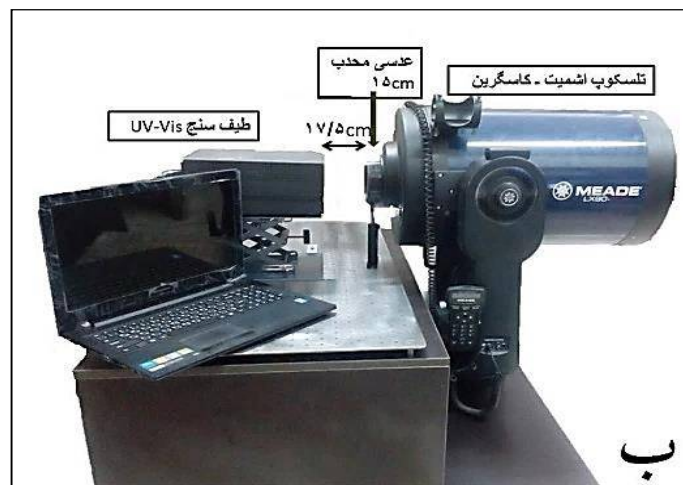
⁴4-nitrobenzoic acid

¹intensified charge-coupled device

²picric acid

آرگون به‌رنگ ارغوانی دیده شد. پس از چند لحظه، پلاسمای مواد منفجره و آلی در لامپ تشکیل شد که به رنگ نارنجی و یا زرد بودند (شکل 2 الف تا ث).

شدند و لامپ توسط پمپ خلأ تک مرحله‌ای خلأ شد (در مدت زمان 30s). هم زمان، گاز آرگون با شار 500 sccm و فشار نسبی 50 Torr در لامپ جریان داده شد. با اعمال ولتاژ حدود 2 kV، ابتدا پلاسمای گاز



شکل 1. الف: چیدمان آزمایشگاهی برای تشکیل پلاسمای مواد منفجره و آلی تحت منبع تغذیه ولتاژ بالا و ب: چیدمان آزمایشگاهی برای جمع‌آوری و متمرکز کردن نور پلاسمای مواد به درون طیف‌سنج.

قله‌های آرگون هستند. در مقایسه با جدول‌ها و داده‌های استاندارد، طیف ثبت شده در این آزمایش، تطابق بسیار خوبی دارد. در جدول 2، مشخصات طیفی خطوط گسیل شده مورد استناد آورده شده است. مشخصات خطوط گسیلی با احتمال گذار قوی که در جدول 2 مشاهده می‌شود، از پایگاه اطلاعاتی طیف‌سنجی اتمی NIST¹³ و مراجع [21-23] تهیه شده‌اند.

در سایر کارهای انجام شده، برای ایجاد پلاسما از لیزر استفاده شده است که به روش LIBS معروف است [17]. انواع خطوط گسیل H، N، O، C₂ و سایر خطوط شامل Ca، Na و K که مربوط به پلاسمای زیر لایه فلزی است، در پلاسمای شکل گرفته تحت لیزر دیده می‌شوند [17]. چون در پژوهش حاضر، پلاسمای مواد منفجره تحت جو گاز آرگون در لامپ خلأ شکل می‌گیرد، خطوط اصلی H، N، O، C₂ به همراه خطوط گسیل آرگون در طیف‌ها ثبت شده‌اند. خطوط اصلی مشاهده شده در طیف‌های به دست آمده در این آزمایش نیز در محدوده مقادیر به دست آمده در مرجع [17] می‌باشند.

در ادامه، برای آشکارسازی طیف مواد از فواصل دورتر، روزنه ورود نور به داخل طیف‌سنج را باز کردیم. این کار به افزایش حساسیت دستگاه طیف‌سنج کمک مؤثر کرد و توانستیم پرتوهای بسیار ضعیف را نیز آشکارسازی کنیم؛ با این وجود، قدرت تفکیک دستگاه کاهش یافت. به علت پایین بودن قدرت تفکیک دستگاه طیف‌سنج و تشکیل پلاسمای مواد در هاله‌ای از پلاسمای گاز آرگون، خطوط N و O باهم ادغام شدند.

نور گسیلی پلاسمای مواد، توسط تلسکوپ اشمیت کاسگرین جمع‌آوری و توسط یک عدسی محدب 15 cm به درون روزنه طیف‌سنج گسیلی فرابنفش مرئی با آشکارساز آرایه‌ای، متمرکز شد. داده‌ها در روشنائی آزمایشگاه 6lux اندازه‌گیری شدند. شمای کلی چیدمان آزمایش در فواصل مختلف آشکارسازی در شکل 3 نمایش داده شده است.

نتایج و بحث

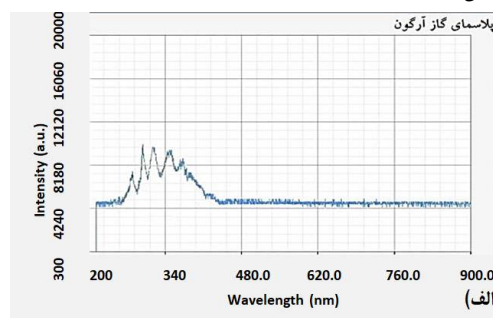
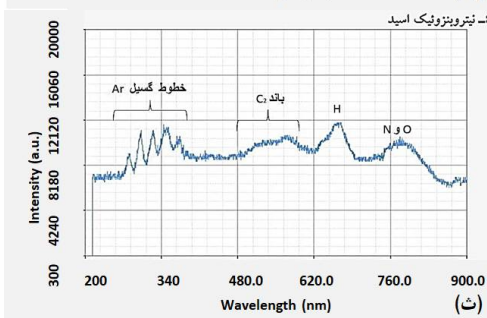
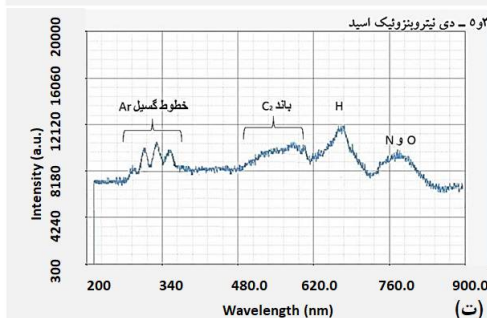
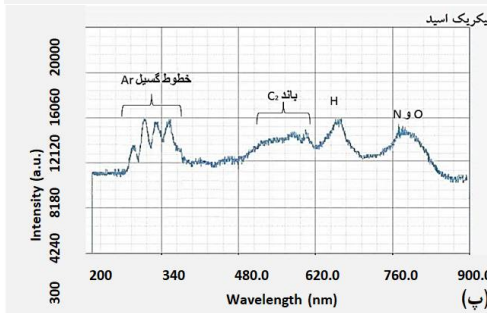
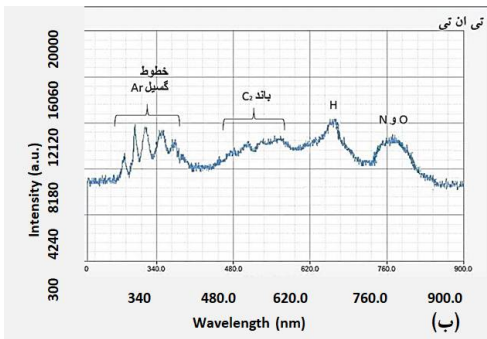
ساختار و فرمول مولکولی مواد مورد استفاده در این کار در جدول 1 نمایش داده شده است. شکل 4، طیف‌های حاصل از آزمایش را نمایش می‌دهد. در شکل 4 الف تا ت، به ترتیب طیف گسیلی گاز آرگون، دو ماده انفجاری و دو ماده آلی مورد آزمایش، نمایش داده شده‌اند. چون پلاسمای مواد انفجاری در زمان‌های کوتاهی تشکیل می‌شود و به یکباره طیف پرشدت آنها مشاهده می‌شود، از یک نرم‌افزار تصویربرداری برای ثبت طیف متغیر با زمان مواد استفاده شد. تصاویر تهیه شده از فیلم، در شکل 4 الف تا ت آورده شده‌اند. طیف زمینه در این طیف‌ها، به دلیل تابش‌های پیوستار است. مطابق با آنچه ثبت شد، پس از گذشت اندک زمانی از تولید پلاسما، تابش‌های زمینه کمتر شده و خطوط گسیلی یونی و اتمی غالب شدند. در نهایت، با سرد شدن پلاسما، خطوط مولکولی نیز دیده شدند. از آنجایی که عناصر اصلی تشکیل دهنده مواد مورد آزمایش C، H، N و O می‌باشند و پلاسمای این مواد تحت اتمسفر گاز آرگون تولید می‌شوند، طیف گسیلی این مواد شامل خطوط گسیلی C₂، H، N، O و Ar می‌باشد. خطوط گسیلی اتمی و مولکولی مواد شامل خطوط (ارتعاشی) C₂ از 510 تا 555 نانومتر، N در 777 nm، O، 781 nm و H در 656 nm به همراه

¹³ National Institute of Standard and Technology

جدول 1. ساختار شیمیایی و فرمول مولکولی مواد منفجره و آلی مورد آزمایش.

فرمول مولکولی	ساختار هندسی	نام مواد منفجره و آلی
$C_7H_5N_3O_6$		تی ان تی
$C_6H_3N_3O_7$		پیکریک اسید
$C_7H_5NO_4$		4-نیترو بنزویک اسید
$C_7H_4O_6N_2$		2,4-دی نیترو بنزویک اسید

در ادامه، حد آشکارسازی، اندازه‌گیری شد. حد آشکارسازی معیاری برای سنجش حداقل میزان ماده برای طیف‌گیری در یک فاصله مشخص است. مقادیر حد آشکارسازی برای مواد مورد آزمایش در فاصله 2 متری در جدول 3 آورده شده است. حد آشکارسازی با چیدمان و شرایط این مقاله، کمترین مقدار ماده‌ای است که در فاصله 2 متری با زمان طیف‌گیری 150ms قابل طیف‌گیری است.



شکل 4. طیف گسیلی پلاسمای الف: گاز Ar، ب: TNT، پ: PA، ت: DNB و ث: NB استخراج‌شده در این کار.

جدول 2. مشخصات طیفی خطوط گسیل مشاهده شده در طیف مواد مورد آزمایش [21-23].

تراز بالا cm ⁻¹	تراز پایین cm ⁻¹	احتمال گذار (s ⁻¹)	طول موج (nm)	
3d 97492.35	2p 82259.28	6.46×10 ⁷	656.28	H
2s ² 2p ⁴ (4S°)3p 86 631.45	2s ² 2p ⁴ (4S°)3s 73 768.20	3.69×10 ⁷	777.19	O
2p2(3P)3s 594 538	2s2p(1P°)3d 743581	7.45×10 ⁴	781.34	OIII
2s ² 2p ⁴ (3P)3p 96 750.84	2s ² 2p ⁴ (3P)3s 83 364.62	1.96×10 ⁷	746.83	N
3s23p4(3P)4d 183 797.4473	3s23p4(3P)4p 155 043.1619	1.25×10 ⁸	347.67	Arl
3s23p4(1D)4d 199 982.0244	3s23p4(1D)4p 172 816.2926	1.2×10 ⁸	368.00	Arl
3s23p4(3P)4p 161 048.7411 cm ⁻¹	3s23p4(3P)4s 135 085.995	3.87×10 ⁷	385.05	Arl
3s23p4(1D)4p 172 816.2926	3s23p4(1D)4s 148 620.1414	8.5×10 ⁷	413.17	Arl

نمودار نسبت مساحت زیر نمودار SC₂/H برحسب نسبت فرمول مولکولی MC₂/H در شکل 5 آورده شده است. نمودار به دست آمده یک نمودار خطی با معادله مشخص می‌باشد. این نمودار، نمودار کالیبراسیون طیف‌سنج مرئی-فرابنفش آرایه‌ای و با شرایط و چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده در این آزمایش می‌باشد که برای شناسایی مواد منفجره و آلی بکار رفته است. به عنوان مثال، با این چیدمان و طیف‌سنج، طیف یک ماده مجهول را به دست آورده و نسبت مساحت زیر نمودار C₂ به H را محاسبه می‌کنیم. سپس از روی نمودار و یا معادله کالیبراسیون، نسبت فرمول مولکولی ماده مجهول به دست می‌آید. این روش برای شناسایی تعداد کم و مشخص مواد قابل استفاده می‌باشد. برای تعداد نمونه‌های بیشتر و ترکیبی، معمولاً از روش‌های آماری استفاده می‌شود [24].

در روش دوم، با استفاده از یک الگوریتم طراحی شده شامل دو شرط، به تفکیک مواد منفجره از مواد آلی پرداختیم. در این روش، از روی شدت قله‌های خطوط گسیلی C₂ نسبت به خطوط N و یا O، مواد تفکیک می‌شوند. دو شرط اصلی در این الگوریتم به این صورت می‌باشند: الف: هر ترکیب آلی توسط باندهای C₂ در 510nm، H در 656/2nm و O در 777/2nm آشکارسازی می‌شود؛ ب: مواد منفجره از دیگر مواد آلی توسط وجود باند N در محدوده 742nm و 746nm و با مقایسه شدت پایین‌تر باند C₂ نسبت به خطوط گسیل N و یا O تفکیک می‌شوند [25]. شرط اول در دو ماده آلی شکل 4 ت و ث قابل مشاهده است، چون هر سه خط گسیل C₂، H و O را دارا می‌باشند. شرط دوم نیز در دو طیف مواد انفجاری به دست آمده رعایت شده است، چون باند C₂ نیز دارای شدت کمتری نسبت به H، N و O می‌باشد. در نهایت به این روش، مواد منفجره از دیگر مواد آلی شناسایی و تفکیک شدند.

در ادامه با استفاده از دو روش، به تفکیک و شناسایی مواد منفجره از طریق طیف گسیلی آنها پرداختیم. در روش اول، اگر فرض کنیم که SC₂ مساحت زیر نمودار باند C₂ باشد و S_H مساحت زیر نمودار قله H باشد، آنگاه نسبت مساحت C₂ به H را با SC₂/H نمایش می‌دهیم. این نسبت برای چهار ماده مورد آزمایش محاسبه شد. علاوه بر این، با توجه به جدول 1 و فرمول مولکولی مواد مورد آزمایش، نسبت تعداد اتم‌های کربن به هیدروژن محاسبه و با MC₂/H مشخص شد. به عنوان مثال، این عدد برای TNT برابر 3/5 می‌باشد. مقادیر محاسبه شده برای سایر مواد در جدول 4 آورده شده است.

جدول 3. حد آشکارسازی مواد مورد آزمایش در فاصله 2متری.

نام ماده	حد آشکارسازی (mg)
4 - نیتروبنزوتیک اسید	23
3 و 5 - دی‌نیتروبنزوتیک اسید	27
پیکریک‌اسید	30
TNT	36

شامل خطوط C_2 ، N ، O ، H و Ar بود. حد آشکارسازی این مواد نیز در فاصله 2 متری به دست آمد. در نهایت با استفاده از دو روش به تفکیک مواد منفجره از مواد آلی پرداخته شد.

مرجع‌ها

[1] J.R. Lakowicz, principles of fluorescence spectroscopy, *Plenum Press* (1983) 111-150.

[2] S. Casamento, B. Kwok, C. Roux, M. Dawson, P. Doble, Optimization of the separation of organic explosives by capillary electrophoresis with artificial neural networks, *Journal of Forensic Sciences* **48** 5 (2003) 1075-1083.

[3] F. Gholamian, M. Chalooosi, W.S. Husain, Separation of conformers of nitramines by high performance liquid chromatography (HPLC), *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* **27** 1 (2002) 31-33.

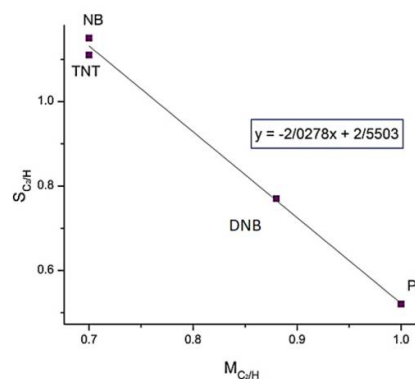
[4] X.Lu, H. Qi, X. Zhang, Z. Xue, J. Jin, X. Zhou, X. Liu, Highly dispersive Ag nanoparticles on functionalized graphene for an excellent electrochemical sensor of nitroaromatic compounds, *Chemical Communications* **47** 46 (2011) 12494-12496. DOI: [10.1039/c1cc15697g](https://doi.org/10.1039/c1cc15697g)

[5] C.L. Rhykerd, D.W. Hannum, D.W. Murray, J.E. Parmeter, Guide for the Selection of Commercial Explosives Detection Systems for Law Enforcement Applications Series: Law Enforcement and Corrections Standards and Testing Program, *National Contest Journal* **20531** (1999).

[6] J.L. Gottfried, F.C. De Lucia Jr, Laser-induced breakdown spectroscopy: Capabilities and Applications, *Army research lab aberdeen proving ground md weapons and materials research directorate* (2010) (No. ARL-TR-5238).

جدول 4. نسبت‌های محاسبه‌شده برای مساحت‌های زیر نمودار و فرمول مولکولی C_2 به H مواد مورد آزمایش.

نسبت فرمول مولکولی C_2/H	نسبت مساحت زیر نمودار C_2/H	نام مواد آلی و منفجره
0,7	1,11	TNT
1	0,52	پیکریک‌اسید
0,7	1,15	4- نیتروبنزوتیک اسید
0,88	0,77	3و5- دی‌نیتروبنزوتیک اسید



شکل 5. نمودار کالیبراسیون طیف‌سنج آرایه‌ای مرئی فرابنفش با چیدمان آزمایشگاهی شکل 3.

نتیجه‌گیری

در این کار، از روش تولید پلاسماهای مواد منفجره در شرایط خلأ و با استفاده از ولتاژ بالا و مستقیم، برای شناسایی مواد آلی و منفجره استفاده شد. پلاسماهای دو ماده منفجره و دو ماده آلی حاوی گروه نیترو در لامپ‌های T-شکل تحت منبع تغذیه با ولتاژ 2kV به‌رنگ نارنجی مشاهده شدند. طیف گسیلی مواد منفجره تی‌ان‌تی، پیکریک‌اسید و مواد آلی 3 و 5-دی‌نیتروبنزوتیک اسید و 4-نیتروبنزوتیک اسید در مقادیر 35mg در فواصل افزایش‌یافته 1/55، 2 و 2/31 متری به دست آمدند. چون پلاسماهای این مواد تحت اتمسفر گاز آرگون تولید شدند، طیف گسیلی آن‌ها

- [14] O.M. Primera-Pedrozo, N. Rodríguez, L. Pacheco-Londoño, S.P. Hernández-Rivera, Detection of 2, 4, 6-trinitrotoluene on non-traditional surfaces using fiber optic coupled grazing angle probe: FTIR, *In Defense and Security Symposium International Society for Optics and Photonics* (2007) 65423J-65423J. DOI: [10.1117/12.720405](https://doi.org/10.1117/12.720405)
- [15] D.A. Cremers, A.K. Knight, *Handbook of Laser Induced Breakdown Spectroscopy*, Chichester, Wiley (2006).
- [16] J.P. Singh, S.N. Thakur, *Laser-induced breakdown spectroscopy*, Elsevier (2007).
- [17] J.L. Gottfried, F.C. De Lucia, C.A. Munson, A.W. Miziolek, Laser-induced breakdown spectroscopy for detection of explosives residues: a review of recent advances, challenges and future prospects, *Analytical and Bioanalytical Chemistry* **395** 2 (2009) 283-300.
- [18] J. Yinon, *Forensic and Environmental Detection of Explosives*, John Wiley and Sons (1999).
- [19] J. Sneddon, Y.I. Lee, Novel and recent applications of elemental determination by laser-induced breakdown spectrometry, **32** (1999) 2143-2162.
- [20] D.A. Cremers, L.J. Radziemski, *History and fundamentals of LIBS*, A.W. Miziolek, V. Palleschi, I. Schechter, Cambridge University Press (2006).
- [21] S.J. Mousavi, M.H. Farsani, S.M.R. Darbani, N. Asadorian, M. Soltanolkotabi, A.E. Majd, Identification of atomic lines and molecular bands of benzene and carbon disulfide liquids by using LIBS, *Applied Optics* **54** 7 (2015) 1713-1720.
- [22] M. Dong, J. Lu, S. Yao, Z. Zhong, J. Li, J. Li, W. Lu, Experimental study on the characteristics of molecular emission spectroscopy for the analysis of solid materials containing C and N, *Optics express* **19** 18 (2011) 17021-17029.
- [7] J.I. Steinfeld, J. Wormhoudt, Explosives detection: a challenge for physical chemistry, *Annual Review of Physical Chemistry* **49** 1 (1998) 203-232. DOI: [10.1146/annurev.physchem.49.1.203](https://doi.org/10.1146/annurev.physchem.49.1.203)
- [8] J.L. Anderson, A.A. Cantu, A.W. Chow, P.S. Fussell, R.G. Nuzzo, J.E. Parmeter, W. Trogler, Existing and potential standoff Explosives Detection Techniques, National Research Council of the National Academies, The National Academies Press, Washington, (2004).
- [9] M.E. Walsh, determination of nitroaromatic, nitroamine and nitrate ester explosive in soil by gas chromatography and electron capture detector, *Talanta* **54** (2001) 427-483. DOI: [10.1016/s0039-9140\(00\)00541-5](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(00)00541-5)
- [10] J.C. Carter, S.M. Angel, M. Lawrence-Snyder, J. Scaffidi, R.E. Whipple, J.G. Reynolds, Standoff detection of high explosive materials at 50 meters in ambient light conditions using a small Raman instrument, *Applied Spectroscopy* **59** 6 (2005) 769-775 DOI: [10.1366/0003702054280612](https://doi.org/10.1366/0003702054280612).
- [11] R.G. Ewing, D.A. Atkinson, G.A. Eiceman, G.J. Ewing, A critical review of ion mobility spectrometry for the detection of explosive related compounds, *Talanta* **54** (2001) 515-529. DOI: [10.1016/s0039-9140\(00\)00565-8](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(00)00565-8)
- [12] C.L. Rhykerd, D.W. Hannum, D.W. Murray, J.E. Parmeter, Guide for the selection of commercial explosive systems for low enforcement application, *National Institute of Justice* (1999).
- [13] J. Cabalo, R. Sausa, Detection of hexahydro-1, 3, 5-trinitro-1, 3, 5-triazine (RDX) by laser surface photofragmentation-fragment detection spectroscopy, *Applied spectroscopy* **57** 9 (2003) 1196-1199. <https://doi.org/10.1366/00037020360696099>

[23] A.H. Farhadian, M.K. Tehrani, M.H. Keshavarz, S.M. Darbany, M. Karimi, A.H. Rezayi, Application of laser induced breakdown spectroscopy as a nondestructive and safe analysis method for composite solid propellants, *Chemistry: Bulgarian Journal of Science Education* **24** 5 (2015).

[24] C.A. Munson, F.C De Lucia, T. Piehler, K.L. McNesby, A.W. Miziolek, Investigation of statistics strategies for improving the discriminating power of laser-induced breakdown spectroscopy for chemical and biological warfare agent simulants, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* **60** 7 (2005) 1217-1224.

[25] C. Lopez-Moreno, S. Palanco, J.J. Laserna, F. De Lucia Jr, A. W. Miziolek, J. Rose, A.I. Whitehouse, Test of a stand-off laser-induced breakdown spectroscopy sensor for the detection of explosive residues on solid surfaces, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* **21** 1 (2006) 55-60.