

Instrumentalne analize pri detekciji uzroka nastanka eksplozija

Zoran Milanović, Radovan Radovanović, Snežana Stojičić

Apstrakt—Forenzička istraga nastanka eksplozija je složen i zahtevan proces koji obuhvata mnoge faze, kako na samom mestu događaja, tako i u laboratorijskim uslovima. Rezultati detekcije nastanka uzroka eksplozija umnogome zavise od veština i deriviranih znanja forenzičara, njihove upotrebe naprednih tehnika i tehnologija, kao i primene najnovijih naučnih istraživanja i saznanja.

U radu je dat pregled instrumentalne metode i tehnike za analizu i detekciju uzroka nastanka eksplozija prikupljenih iz više od 90 naučno-stručnih radova koji su se bavili praktičnim iskustvima forenzičkih eksperata za eksplozive. Dobijeni rezultati su zbirno prikazani i ukazuju da su pri analizi uzoraka eksplozija najviše korišćene: kapilarna elektroforeza i Ramanova spektroskopija.

Ključne reči—Eksplozije, forenzičke tehnike, kapilarna elektroforeza i Ramanova spektroskopija.

I. UVOD

Pod pojmom eksplozije podrazumeva se veoma brz fizički, hemijski ili nuklearni proces promene stanja eksplozivnih materija (eksploziva, baruta, raketna goriva i pirotehničke smeše), praćen promenom potencijalne energije materije (hemijske ili mehaničke) u kinetičku energiju elementarnih čestica, odnosno u mehanički rad [1], sa stvaranjem i oslobađanjem gasova pod pritiskom.

Danas, eksplozivi imaju legitimnu primenu od rudarstva do vojnih operacija, međutim, ove materijale često koriste i kriminalci i teroristi da bi ostvarili pretnje, povrede ili izazvali smrt i uništenje. Za nastanak eksplozije potrebna je eksplozivna materija i sredstvo za njeno aktiviranje: plamen, upaljač, detonator... U eksplozivnim napravama se koriste tečnost, prah ili čvrsti eksplozivni materijali, kao npr. dinamit, trinitrotoluen (TNT), C-4, aceton peroksid, koji reaguju brzinom većom od brzine zvuka i izazivaju jaku detonaciju. Najštetnija faza eksplozije je početni (udarni) talas eksplozije koji brzo zrači i čiji talas visoko kompresovanog vazduha nanosi primarnu štetu konstrukcijama i ljudima. Početni udarni talas nasilno izbacuje delove kućišta i gelera kao što su čelične kuglice, delovi metalnog kućišta, ekseri ili šrafovi koji su mogu dodati eksplozivnoj napravi. Pored navedenih efekata, ako je došlo do eksplozije u zgradi ili njenoj blizini,

krhotine stakla velike brzine ili drugog građevinskog materijala mogu biti veliki uzročnici povreda. Eksplozija takođe može proizvesti visoku toplotu i vatrenu loptu koja može izazvati sekundarne požare ili eksplozije. U većini eksplozija, sedište eksplozije bi trebalo da bude očigledno, ali strukturna i fizička oštećenja mogu se koristiti za približnu lokaciju sedišta eksplozije.

II. FORENZIČKE INSTRUMENTALNE TEHNIKE PRI DETEKCIJI EKSPLOZIJA

Ključni uspeh pri detekciji uzroka nastanka eksplozija se nalazi u identifikaciji, prikupljanju i očuvanju dokaza. Poboljšanje uzorkovanja i koncentracije eksploziva predstavlja možda najvažniji aspekt u analizi i detekciji eksploziva.

Veliki deo rada forenzičara u laboratoriji posvećen je korišćenju instrumentalnih tehnika za identifikaciju tragova eksploziva. Kada se radi sa ostacima, preliminarni mikroskopski pregled može biti od pomoći u identifikaciji ostataka, ali oni nisu uvek očigledni među spaljenim i pocrnelim ostacima. Neophodno je uključiti testove skrininga u boji i mikrokristalima, imunotestove, infracrvenu spektrofotometriju, GC-MS i sve više, tečnu hromatografiju (LC-MS). Uobičajene tehnike skrininga uključuju spektrometriju pokretljivosti jona i metode rendgenskog skeniranja. Psi se takođe mogu obučiti da oseče eksploziv i uobičajeni su prizor na aerodromima i događajima koji privlače velike gužve. [2]

Najčešće instrumentalne tehnike za analizu eksplozija prema američkom Nacionalnom institutu za standarde i tehnologiju (NIST – National Institute of Standards and Technology) su [3]:

- Infracrvena spektroskopija – Infrared Spectroscopy i Infracrvena spektroskopija s Fourierovom transformacijom Fourier-transform infrared spectroscopy (IR/FTIR);
- Ramanova spektroskopija – Raman Spectroscopy (RS);
- Gasna hromatografija – Gas Chromatography (GC);
- Gasna hromatografija i masena spektrometrija – Gas Chromatography /Mass Spectrometry (GC/MS);
- Hromatografija visokih performansi – High Pressure Liquid Chromatography (HPLC); Jonska hromatografija – Ion Chromatography (IC) i Kapilarna elektroforeza – Capillary Electrophoresis (CE);
- Fluorescencija X-zraka – X-Ray Fluorescence (XRF);
- Skenirajuća elektronska mikroskopija / energetska disperzivna rendgenska spektroskopija – Scanning Electron Microscope / Energy Dispersive X-ray

Zoran Milanović, Kriminalističko policijski univerzitet Beograd, Cara Dušana 196, Beograd, Srbija (e-mail: zoran.milanovic@kpu.edu.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0002-7265-747X>);

Radovan Radovanović, Kriminalističko policijski univerzitet Beograd, Cara Dušana 196, Beograd, Srbija (e-mail: radovan.radovanovic@kpu.edu.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0001-7302-8328>);

Snežana Stojičić, Ministarstvo unutrašnjih poslova Srbije, Kneza Miloša 101, Beograd, Srbija (e-mail: snezana.stojicic@mup.gov.rs).

Spectrometry (SEM/EDS);

- Difrakcija X-zraka – X-Ray Diffraction (XRD).

Slične, ali nešto detaljnije, tehnike navodi autor Čistin u svom istraživanju [4] koje je sproveo na 49 ispitanika i od njih zatražio da navedu svoj rang učestalosti upotrebe raznih forenzičkih tehnika, prikazane u tabeli 1, gde je: 1 = „Nikad“, a 7 = „Isključivo“.

TABLE I
RANGIRANJE ANALITIČKIH TEHNIKA ZA ANALIZU EKSPLOZIJA [4]

Tehnike	Srednje rangiranje (od 1 do 7)
Analiza paljenja	3.50
IR	3.20
FTIR	3.17
GC-MS	2.88
SEM-EDX	2.83
Ostale:	2.70
Mikrohemijska analiza pomoću stereomikroskopije – <i>Microchemical analysis using stereomicroscopy</i>	2.45
Mikrohemijska analiza korišćenjem PLM – <i>Microchemical analysis using PLM</i>	2.42
Spot testovi za identifikaciju hemijskih supstanci – <i>Spot tests</i>	2.25
IC	2.10
XRF	2.00
Provera eksploziva na terenu – <i>Field explosives screening</i>	1.78
TLC	1.76
Raman spectroscopy	1.57
GC-FID	1.46
HPLC	1.46
XRD	1.46
HPLC/MS	1.46
GC-ECD	1.27
CE	1.26
GC-TEA	1.23
ICP	1.21
HPLC-TEA	1.21
IMS	1.21
NMR	1.13
SEM-WDX	1.11

Razlog za ovakvo rangiranje autor vidi samoj raznolikosti eksplozivnih jedinjenja i smeša za čiju se analizu i određivanje često zahteva upotreba više različitih tehnika.

Tradicionalna, tečna hromatografija LC, kao i HPLC i dalje predstavljaju vitalnu tehniku identifikacije i odvajanja ostataka eksplozije. Pregledni članak Gaurava [5], daje dobar pregled LC tehnika primenjenih na eksplozive. Borovski [6]

razmatra razvoj elektroosmotske pumpe za razvoj LC na mikročipu za detekciju eksploziva. Da bi unapredio selektivnost sistema detekcije za upotrebu sa LC, Fedorovski [7] razmatra fotohemijske reakcione sisteme zajedno sa elektrohemijskom detekcijom. Gaurav [8] ispituje SPME nakon čega sledi LC-UV (ultraviolet) analiza na eksplozive u vodenim uzorcima.

Kod tehnika jonske hromatografije (IC) Džons [9] nudi sistem koji identifikuje 18 anjona i 12 katjona od interesa za analizu posle eksplozije. Pored toga, korisnost ove tehnike je testirana stvarnom analizom materijala i tla nakon eksplozije. Rezultati su potvrđeni kapilarnom elektroforezom (CE). Meng [10] testira pet neorganskih anjona i tri katjona u jednoj hromatografskoj seriji koristeći tehniku hromatografije bez potiskivanja jona. Lang i Bojl [11] primenjuju IC-MS da identifikuju zamenu za crni prah – barut.

Tagliaro i ostali [12] u svom članku o primeni kapilarne elektroforeze (CE) na forenzičku nauku sa delom koji je posebno posvećen eksplozivima. Drugi članci Pikina [13], Pumera [14] [15] ispituju primenu elektroforeze na mikročipu za detekciju eksploziva. Hučinson [16] koristi prenosivi CE za ispitivanje neorganskih anjona i katjona nakon eksplozije. Indirektna fotometrijska detekcija je postignuta korišćenjem minijaturnog LED detektora, pri čemu je izdvojeno i detektovano 15 anjona i 12 katjona od interesa za analizu eksploziva.

Gasna hromatografija (GC) ima posebnu ulogu u odvajanju eksplozivnih jedinjenja iz različitih matrica pre detekcije na različite načine. Li [17] nudi SPME tehniku u kombinaciji sa GC za određivanje DMNB (2,3-dimethyl-2,3-dinitrobutane) agensa za označavanje plastičnih eksploziva. Burleson [18] ispituje ostatke baruta korišćenjem SPME ekstrakcije i GC u kombinaciji sa detektorom azot-fosfora.

Bečanova i saradnici [19] su ispitivali TNT i degradaciju TNT-a sa LC-elektrosprej jonizacijom (ESI) MS.

Šerperel i ostali [20] ispituju bezdimne prahove (barute) sa nanoelektrosprejom jonizacijom i MS (nESI-MS). Tehnika obezbeđuje forenzičku identifikaciju ostataka, ispitivanjem organskih stabilizatora kako bi se identifikovali i razlikovali nesagoreli bezdimni barut od različitih marki municije u analizi ostataka pucnja. Čen i ostali [21] su razmatrali korišćenje EESI-MS za ispitivanje tragova eksploziva na ljudskoj koži. Mulen i ostali [22] su koristili TOF-MS za identifikaciju nitroaromatika i srodnih jedinjenja korišćenjem laserske fotojonizacije. Martinez-Lozano i ostali [23] su koristili sekundarnu elektrosprej jonizaciju (SESI) za identifikaciju eksploziva u stanju pare pri koncentracijama PPT (parts per trillion - 10^{12}). Kolin i saradnici [24] su koristili dve tehnike, GC separaciju sa kvadropolnim analizatorom na principu jonske zamke (QIT) i drugu tehniku sa brzim GC odvajanjem praćenom dinamičkom disocijacijom izazvanom sudarom (DCID).

Song i ostali [25] upoređuju NI-DART (negative ion-direct analysis in real time) sa NI-APPI (negative ion-atmospheric pressure photoionization) za širok spektar jedinjenja uključujući eksplozive. Obe tehnike nude brojne mehanizme jonizacije za širi opseg identifikacije jedinjenja. Mauraker i

saradnici [26] su ispitivali jedinjenja mošus-ketona i utvrdili veliku sličnost sa eksplozivom trinitrotoluenom. Talati i ostali [27] analizirali su eksplozive i uzorke pomoću ambijentalnog DART. Uzorkovanje je obavljeno na licu mesta bez pripreme uzorka i sa širokim spektrom uobičajenih interferentnih jedinjenja. Visok protok uzorka i osetljivost pikograma su prijavljeni za tehniku koja bi se mogla koristiti za bezbednosni skrining. Vels i ostali [28] koristili su terensku prenosivu MS instrumentaciju koristeći DART i DESI jonizaciju. Tim je koristio prenosivi MS sa API interfejsom prilagođen DESI i DART uvodu uzorka za brzu analizu eksploziva i drugih jedinjenja. Huestis [29] i Šram [30] su izmerili potencijale jonizacije za brojna jedinjenja uključujući devet eksploziva da bi istražili da li se jedinjenja potencijalno mogu detektovati putem masene spektrometrije sa analizatorom vremena preleta jednog fotona (SPI-TOFMS).

U članku autor Na i ostali [31] su koristili ambijentalni izvor jona za detekciju eksploziva na čvrstim površinama. Džastis i ostali [32] su koristili sličan izvor za ispitivanje ostataka eksploziva na koži. Viliamsen i ostali [33] daju pregled koji pokriva razloge za korišćenje TOF za LC detekciju i opisuje mnoge metode koje su trenutno u literaturi za kvantifikaciju farmaceutskih proizvoda, zagađivača životne sredine, eksploziva itd. Jonson i ostali [34] su koristili SPME prikupljanje uzoraka sa (GC-ECNI-MS) i kvantifikaciju razblaženja izotopa za analizu nitroaromatičnih jedinjenja u složenim uzorcima na bazi vode. Oksenbein i ostali [35] upoređuju SPME i tehnike direktnog ubrizgavanja za eksplozivna jedinjenja u vodi.

Lok i ostali [36] [37] razmatraju izotopske veze između prekursora i visokoeksplozivnih proizvoda koristeći IRMS (masena spektroskopija odnosa izotopa). Kuirk i ostali [38] korišćenjem IRMS razmatraju karakteristike plastike u ostacima nakon eksplozije. Izvori eksploziva se ispituju korišćenjem IRMS-a i u radu Vidorija i ostalih [39]. Mehanizmi za objašnjenje detonacionih mehanizama proučavani su u radovima Aniskina i ostali [40], [41]. Specifične eksplozive ispituju Gentile i ostali [42], amonijum nitrat i crni barut, a Benson i ostali [43], amonijum nitrat i Benson i ostali [44], TATP (Triacetone Triperoxide) i PETN (Pentaerythritol Tetranitrate).

Mnoge tehnike koje se nude u oblasti spektroskopije spadaju u različite kategorije spektra koje se primenjuju na specifična eksplozivna jedinjenja ili procese. Neke od tehnika se primenjuju za detekciju na terenu, za razliku od primene u forenzičkoj laboratoriji. Uzer i ostali [45] prikazuju spektrofotometrijske tehnike za određivanje RDX (heksogen, eksploziv) u smešama i ostacima. Selektivnu spektrofotometrijsku tehniku za TNT pokriva Ercag sa saradnicima [46] koristeći kolorimetrijski senzor. Tehnike zasnovane na fluorescenciji su predstavili Sančez i ostali [47] za eksplozivne ostatke nitroaromata, nitramina i nitratnih estera. Vang i ostali [48] ispituju laserski indukovanu plazmu na plastici i eksplozivima. Ramos i ostali [49] razmatraju fotohemiju i njenu upotrebu sa šupljom prstenastom spektroskopijom (CRDS – The cavity ring down spectroscopy). Specifičan spektroskopski senzor za TNT

istražuje Deng i ostali [50]. Čaudhari i saradnici [51] u radu primenjuje UV za otkrivanjem TNT-a i RDX-a, kao i Šarma i ostali [52] koji su koristili UV da obezbedi detekciju foto-fragmentacije za TNT. Minei i ostali [53] daju pregled sistema za detekciju zasnovanu na luminiscenciji. Hu i saradnici [54] koriste racimetrijske luminescentne senzore posredovane u blizini IR za detekciju eksploziva putem multimodnih vizuelizovanih analiza eksploziva.

Nado i ostali [55] koriste fluorescentni nanofibrilni film za detekciju eksploziva, a Vudka i Šni [56] koriste komercijalni fluorescentni polimer da naprave niz senzora za detekciju raznih eksploziva u vodi.

Friman i saradnici [57] koriste funkcionalizovane CdSe/ZnS kvantne tačke (sa ligandima koji doniraju elektrone) kao fluorescentne sonde za analizu TNT-a i RDX-a.

Bouhadid i ostali [58] upoređuju tri različita fluorescentna materijala zbog njihove efikasnosti u otkrivanju eksplozivnih para.

U radu Fedorovskog i ostalih [59] HPLC-UV je praćena foto-potpomognutom elektrohemijom detekcijom (PAED) u određivanju RDX-a i njegovih proizvoda razgradnje.

Kuminsa i ostali [60] opisuju korišćenje stacionarne faze poroznog grafitnog ugljenika za HPLC spojenog na elektrosprej masenog spektrometra za analizu neorganskih anjona koji se obično nalaze u eksplozivima nakon eksplozije. Odvajaju šest uobičajenih anjona za pet minuta.

Infracrvena spektroskopija sa Furijeovom transformacijom (FTIR) ima dugi staž u forenzičkoj analizi eksploziva. Banas i ostali [61] upotrebljavaju FTIR u radu o tragovima eksploziva nakon eksplozije, kao i Mous i ostali [62] u radu o upotrebi ATR-FTIR za identifikaciju eksplozivnih čestica sa otisaka prstiju.

Kastro-Suarez i saradnici [63] detekciju eksplozivnih čvrstih materija na metalnim površinama sprovode infracrvenom spektroskopijom sa Furijeovom transformacijom FTIR. Ovo bi takođe moglo biti primenljivo u detekciji zastoja, jer je tehnika održiva na 8 metara.

Najveća pojedinačna primena Ramanove tehnike je u otkrivanju eksploziva. Raman se takođe pokazao korisnim za analizu eksploziva na mestu događaja kao što su otisci prstiju. Emons i ostali [64] i Esam i ostali [65] koristili su konfokalni Raman mikroskop za gledanje eksplozivnih čestica na odeći. Nagli i ostali [66] su posmatrali UN, PETN, TATP, RDX, TNT i PETN i odredili zavisnost Ramanovog poprečnog preseka od energije pobude u spektralnom opsegu 620–248 nm.

Misra i ostali [67] koriste odvojeni Raman spektrometar i kameru od 85 mm za otkrivanje ciljeva na 50 metara. Mete su prekursori eksploziva i mnoge vrste oksidatora uključujući amonijum nitrat, kalijum nitrat, kalijum perhlorat kao i mnoga goriva. Takođe, Zahuber i saradnici [68] opisuju impulsni Ramanov sistem koji su izgradili za kvalitativnu i kvantitativnu detekciju raznih eksploziva.

Korošec i ostali [69] su ispitivali emulzije eksplozive i koristili su TG (termogravimetriju) i DSC (differential scanning calorimetriju) za kvantitativno određivanje

pojedinačnih nitrata i vode „voda u ulju“ u emulzionim eksplozivima.

Fan i ostali [70] prilagođavaju planarni proces mikroekstrakcije čvrste faze (PSPME) na IMS detektoru za brzo otkrivanje TATP-a (triacetone triperoxide), što predstavlja značajno poboljšanje za ovaj analit u odnosu na tradicionalni SPME.

Zhang i ostali [71] koriste senzor nanočestica indijum oksida In_2O_3 (razvijen u jednostepenom procesu uz pomoć glukoze na niskoj temperaturi) za detekciju TATP-a. Takada i saradnici [72] predstavljaju portal za detekciju pomoću masene spektrometrije AR hemijske jonizacije za detekciju TATP pare.

Krespi i ostali [73] opisuju optimizaciju difrakcije rendgenskih zraka disperzije energije (EDXRD) za identifikaciju eksploziva.

Li i ostali [74] u svom radu predstavljaju brzi prenosivi sistem za detekciju i identifikaciju nekoliko organskih eksploziva koristeći UV reflektovani optički senzor i nanolitrske kapljice.

Gunter i ostali [75] predlažu korišćenje pulsne laserske fragmentacije (PLF) i q-komutacijom UV mikročipa za detekciju organskih nitriranih eksploziva na osnovu njihovog odnosa koncentracije $\text{NO}:\text{NO}_2$.

Abdelhamid i saradnici [76] koriste LIBS sa optičkim katapultiranjem za analizu ostataka eksploziva (u obliku čvrstih aerosola) u otiscima prstiju na staklenim površinama. Oni navode prednost u odnosu na tradicionalni LIBS zbog odsustva kontaminacije uzorka i spektralnog doprinosa supstrata.

Nils i ostali [77] proučavaju razne eksplozive i supstrate (75 kombinacija) koristeći direktnu analizu u realnom vremenu (DART) u veoma opsežnom radu.

Brejdi i ostali [78] koriste lasersku elektrosprej masenu spektrometriju (LEMS) (vreme leta) da urade direktnu spektralnu analizu eksploziva pri atmosferskom pritisku na čeličnim površinama. Pri tome istražuju različite eksplozive uključujući DMNB, RDX, HMTD i TATP. Oni takođe pokazuju višedimenzionalnu detekciju eksploziva sa LEMS-om. [79]

Kozol i ostali povezuju IMS detektor tragova eksploziva sa trostrukim kvadrapolnim masenim spektrometrom. [80]

Telez i ostali [81] koriste sekundarnu jonsku masenu spektrometriju (SIMS) za direktno otkrivanje eksploziva nanosenog na lepljivu traku.

Gelman i saradnici [82] su istraživali GC-IRMS za preciznu i tačnu analizu izotopa ugljenika i azota RDX-a, minimalizujući termičku razgradnju RDX.

U radu Sandersa i saradnika [83] je prikazan minijaturizovani DESI instrument koji koristi negativnu hemijsku jonizacionu masenu spektroskopiju za detekciju eksploziva u tragovima (TNT, tetril i HMX).

Dobrohotov i saradnici [84] koriste novu nanotehnologiju tako što koriste nanoopruge silicijum dioksida obložene ZnO i metalnim nanočesticama, da detektuju putem provodljivosti, eksplozive TATP i TNT i zapaljive pare toluena, acetona i etanola.

Park i ostali [85] su detaljno opisali hemirezistivni (za razliku od fluorescentnog) imunosenzor koji koristi ugljenične nanocevi za detekciju nitroaromatika (u ovom slučaju TNT).

Rej i saradnici [86] predstavljaju studiju koja koristi nanostrukturu nanocevi od titanijum dioksida za detekciju TATP-a.

Espi i ostali [87] pišu o poboljšanjima, koristeći NMR i magnetnu rezonancu (MRI) u ultra-niskom polju (ULF) za otkrivanje tečnih eksploziva i drugih tečnosti.

Hudson i ostali [88] razmatraju standardnu infrastrukturu za otkrivanje rasutog eksploziva pomoću skrininga rendgenskog ili gama-zraka. Oni istražuju postojeće bezbednosne standarde i pitanja za snimanje.

Matarozi i ostali [89] su opisali planarnu mikroekstrakciju u čvrstoj fazi IMS sa novim diethoxy-phenylsilane premazom koji su koristili u uzorkovanju TNT, DNT, i EGDN.

Sausa i Kabalo [90] istražuju detekciju TNT-a i RDX-a pomoću lasera (blizu infracrvenog) i praćenje zvuka pomoću fotoakustične spektroskopije (FAS).

Brensinger i ostali [91] koriste perfluorooktansku kiselinu (PFOA) i kao reagens za hromatografiju i kao reagens za kompleksiranje u micelarnoj elektrokromatografiji (MEKC) za odvajanje neutralnih eksploziva kao što su RDX, HMX, tetril i PETN sa spektrometrijskom detekcijom mase u negativnom jon režimu.

Minijaturizovan i prenosiv sistem za posmatranje TATP i DNT opisuju u radu [92] Fudžijama-Novak i saradnici koji su povezali sisteme za predkoncentraciju i odvajanje sa detektorom plazme mikro šupljeg usijanog pražnjenja (MHGD).

Felan i saradnici [93] opisuju sistem za detekciju mina i IED (improvizovana eksplozivna sredstva) koristeći radarski sistem sa ultraširokopojasnim stepenastim frekvencijama.

Kolika je važnost ovih instrumentalnih tehnika za analizu eksploziva, i sprovedenih eksperimenata, ne samo u sferi forenzičkih nauka kada je aktivirana eksplozivna naprava, već i u preventivnim aktivnostima, govori i podatak da danas u svetu postoji više od 100 miliona, zakopanih ili razbacanih po površini, nagaznih mina, pritom se svakodnevno postavlja novih 5000 mina. [94]

III. PREGLED INSTRUMENTALNIH TEHNIKA KORIŠĆENIH ZA UZORKOVANJE I ANALIZU OSTATAKA EKSPLOZIJA

Pregledom izabrane literature utvrđeno je da su od tehnika za uzorkovanje i analizu ostataka eksplozija najviše zastupljene kapilarna elektroforeza i Ramanova spektroskopija. Od ukupno 66 različitih tehnika sa ukupnom frekvencijom pojavljivanja 126, najviše se pojedinačno pojavljuju kapilarna elektroforeza 8 puta i Ramanova spektroskopija 7 puta. Zbirni prikaz svih navedenih tehnika dat je u narednom tekstu.

Tehnika.....	Broj
Analiza paljenja.....	1
ATR-FTIR	1
CE	8
CRDS.....	1
DART	3

DCID	1
DESI	2
DSC	1
EDXRD	1
EESI-MS	1
ESI	1
FAS	1
Field explosives screening	1
Fluorescencija	4
FTIR.....	5
GC.....	5
GC-ECD	1
GCECNI-MS	1
GC-FID.....	1
GC-IRMS.....	1
GC-MS.....	2
GC-TEA.....	1
HPLC.....	3
HPLC/MS	2
HPLC-TEA	1
HPLC-UV	1
IC	3
IC-MS	1
ICP.....	1
IMS	4
IR	3
IRMS	2
LC	5
LC-UV	2
LEMS.....	2
LIBS.....	1
Luminiscencija.....	2
MEKC.....	1
MHGD	1
Microchemical analysis using PLM.....	1
Microchemical analysis using stereomicroscopy	1
MS	2
MSAR.....	1
nESI-MS	1
NI-APPI	1
NI-DART	1
NMR	2
PAED.....	1
PLF	1
PSPME.....	1
QIT.....	1
Raman.....	7
SEM-EDX.....	2
SEM-WDX	1
SESI.....	1
SIMS	1
SPI-TOFMS.....	1
SPME.....	6
Spot tests.....	1
TG.....	1
TLC.....	1
TOF.....	1
TOF-MS	1
UV	4

XRD.....	2
XRF	3

IV. ZAKLJUČAK

Značajan broj instrumentalnih forenzičkih tehnika skrininga je prikazan u radu, a najčešće pojedinačne tehnike koje su zastupljene u radu i koje su autori izdvojili su kapilarna elektroforeza na 8 mesta i Ramanova spektroskopija na 7. Takođe, pored navedenih pojedinačnih, mogu se uvideti veliki broj različitih tehnika koje su korišćene u kombinaciji sa drugim tehnikama, gde se izdvaja masena spektrometrija na 23 mesta u navedenoj literaturi.

Razlog za ovakvo rangiranje autori rada vide u velikoj raznolikosti eksplozivnih jedinjenja i smeša za čiju se analizu i određivanje često zahteva upotreba više različitih tehnika.

LITERATURA

- [1] Radovanović, V. Radovan, "Tehnička sredstva policije, četvrto izmenjeno i dopunjeno izdanje," Beograd, Kriminalističko-policijska akademija, Beograd, 2015, pp. 21.
- [2] Stuart H. James, Jon J. Nordby and Suzanne Bell, "Forensic Science", New York: CRC Press, 2014.
- [3] NIST, "Suggested Guide for Explosive Analysis Training," 21 9 2018. [Online]. Available: https://www.nist.gov/system/files/documents/2018/09/21/twgfex_suggest_guide_for_explosive_analysis_training.pdf.
- [4] C. Chasteen, "Fire and Explosion Investigations and Forensic Analyses: Near- and Long-Term Needs Assessment for State and Local Law Enforcement," 12 2008. [Online]. Available: <https://www.ojp.gov/pdffiles1/nij/grants/225085.pdf>.
- [5] Gaurav, Dhingra; Malik, Ashok Kumar; Rai, P. K., "High-Performance Liquid Chromatographic Methods for the Analysis of Explosives". Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2007, Vol. 37 Issue 4, pp. 227-268.
- [6] Borowsky JF, Giordano BC, Lu Q, Terray A, Collins GE. "Electroosmotic flowbased pump for liquid chromatography on a planar microchip". Anal Chem. 2008 Nov 1;80(21):8287-92.
- [7] Jennifer Fedorowski and William R. LaCourse "A review of post-column photochemical reaction systems coupled to electrochemical detection in HPLC" Analytica Chimica Acta Volume 657, Issue 1,4 January 2010, pp. 1-8.
- [8] Gaurav, Ashok Kumar Malik and P.K. Rai "Development of a new SPME-HPLC-UV method for the analysis of nitro explosives on reverse phase amide column and application to analysis of aqueous samples" Journal of Hazardous Materials Volume 172, Issues 2-3, 30 December 2009, pp. 1652-1658.
- [9] Cameron Johns, Robert A. Shellie, Oscar G. Potter, John W. O'Reilly, Joseph P. Hutchinson, Rosanne M. Guijt, Michael C. Bredmore, Emily F. Hilder, Greg W. Dicinoski and Paul R. Haddad, "Identification of homemade inorganic explosives by ion chromatographic analysis of post-blast residues" Journal of Chromatography A Volume 1182, Issue 2, (Feb 29)2008. pp. 205-214 .
- [10] Hong-Bo Meng, Tian-Ran Wang, Bao-Yuan Guo, Yuki Hashi, Can-Xiong Guo and Jin-Ming Lin "Simultaneous determination of inorganic anions and cations in explosive residues by ion chromatography" Taianta, Volume 76, Issue 2, 15 July 2008, pp. 241-245.
- [11] Lang GH, Boyle KM. "The analysis of black powder substitutes containing ascorbic acid by ion chromatography/mass spectrometry". J Forensic Sci. 2009 Nov; 54(6):1315-22.
- [12] Tagliaro F, Bortolotti F "Recent advances in the applications of CE to forensic sciences (2005-2007)". Electrophoresis, ISSN: 0173-0835, 2008 Jan; Vol. 29 (1), pp. 260-8;.
- [13] Piccin E, Dossi N, Cagan A, Carrilho E, Wang J. "Rapid and sensitive measurements of nitrate ester explosives using microchip electrophoresis with electrochemical detection". Analyst. 2009 Mar;134(3):528-32.
- [14] Pumera M. "Trends in analysis of explosives by microchip electrophoresis and conventional CE. Electrophoresis. 2008. 29(1):269-73."

- [15] Pumera M. "Trends in analysis of explosives by microchip electrophoresis and conventional CE". *Electrophoresis*. 2007 Nov 30.
- [16] Hutchinson, Joseph P.; Evenhuis, Christopher J.; Johns, Cameron; Kazarian, Artashes A.; Breadmore, Michael C.; Macka, Miroslav; Hilder, Emily F.; Guijt, Rosanne M.; Dicoski, Greg W.; Haddad, Paul R., "Identification of Inorganic Improvised Explosive Devices by Analysis of Postblast Residues Using Portable Capillary Electrophoresis Instrumentation and Indirect Photometric Detection with a Light-Emitting Diode". *Analytical Chemistry*, 9/15/2007, Vol. 79, no. Issue 18, pp. 7005-7013.
- [17] Xiujuan Li, Zhaorui Zeng and Yi Zeng "Solid-phase microextraction coupled to gas chromatography for the determination of 2,3-dimethyl-2,3-dinitrobutane as a marking agent for explosives" *Talanta* 72.4 (June 15, 2007): p.1581(5).
- [18] Garrett Lee Bursleson, Brittney Gonzalez, Kelsie Simons and Jorn C.C. Yu "Forensic analysis of a single particle of partially burnt gunpowder by solid phase micro-extraction-gas chromatography-nitrogen phosphorus detector" *Journal of Chromatography A* Volume 1216, Issue 22, 29 May 2009, Pages 4679-4683.
- [19] Jitka Bečanová, Zdeněk Friedl and Zdeněk Šimek "Identification and determination of trinitrotoluenes and their degradation products using liquid chromatography-electrospray ionization mass spectrometry" *International Journal of Mass Spectrometry* Volume 291, no. Issue 3, 15 April 2010, Pages 133-139.
- [20] Aleem, A. Mauracher, P. Sulzer, S. Denifl, F. Zappa, A. Bacher, N. Wendt, T.D. Mark and P. Scheier "Relative partial cross sections for anions formed upon electron attachment to nitrotoluene" *International Journal of Mass Spectrometry* Volume 271, no. Issues 1-3, 2008. pp. 36-44.
- [21] Caroline McEnnis, Yamac Dikmelik and James B. Spicer "Femtosecond laser-induced fragmentation and cluster formation studies of solid phase trinitrotoluene using time-of-flight mass spectrometry" *Applied Surface Science* Volume 254, Issue 2, 2007. pp. 557-562.
- [22] Philipp Sulzer, Andreas Mauracher, Stephan Denifl, Michael Probst, Tilmann D. Mark, Paul Scheier and Eugen Illenberger "Probing dinitrobenzene by low energy electrons Identification of isomers via resonances in dissociative electron attachment" *International Journal of Mass Spectrometry* Volume 266, no. Issues 1-3, 2007. pp. 138-148.
- [23] Alizadeh E., Graupner K., Mauracher A., Haughey S., Edtbauer A., Probst M., Mark T.D., Field T.A. and Scheier P. "Electron attachment to 2-nitro-m-xylene" *International Journal of Mass Spectrometry* Volume 289, Issues 2-3, 15 January 2010, pp. 128-137.
- [24] Scherperel, Gwyneth; Reid, Gavin E.; Smith, Ruth Waddell. "Characterization of smokeless powders using nanoelectrospray ionization mass spectrometry (nESI-MS)". *Analytical & Bioanalytical Chemistry*, Aug2009, Vol. 394 Issue 8, pp 2019-2028.
- [25] Huanwen Chen, Bin Hu, Yan Hu, Yanfu Huan, Zhiquan Zhou and Xiaolin Qiao "Neutral Desorption Using a Sealed Enclosure to Sample Explosives on Human Skin for Rapid Detection by EESI-MS" *Journal of the American Society for Mass Spectrometry* Volume 20, no. Issue 4, April 2009, Pages 719-722.
- [26] Christopher Mullen, Michael J. Coggiola and Harald Oser "Femtosecond Laser Photoionization Time-of-Flight Mass Spectrometry of Nitro-aromatic Explosives and Explosives Related Compounds" *Journal of the American Society for Mass Spectrometry* Volume 20, no. Issue 3, March 2009, Pages 419-429.
- [27] Pablo Martinez-Lozano, Juan Rus, Gonzalo Fernández de la Mora, Marta Hernández and Juan Fernandez de la Mora "Secondary Electrospray Ionization (SESI) of Ambient Vapors for Explosive Detection at Concentrations Below Parts Per Trillion" *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, Vols. Volume 20, Issue 2, February 2009, Pages 287-294.
- [28] Olivier L. Collin, Carolyn M. Zimmermann and Glen P. Jackson "Fast gas chromatography negative chemical ionization tandem mass spectrometry of explosive compounds using dynamic collision-induced dissociation" *International Journal of Mass Spectrometry*. Vols. Volume 279, Issues 2-3, 15, no. January 2009, Pages 93-99.
- [29] Liguang Song, Andrew B. Dykstra, Huifang Yao and John E. Bartmess "Ionization Mechanism of Negative Ion-Direct Analysis in Real Time: A Comparative Study with Negative Ion-Atmospheric Pressure Photoionization" *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, Vols. Volume 20, Issue 1, January 2009, Pages 42-50.
- [30] Mauracher, P. Sulzer, E. Alizadeh, S. Denifl, F. Ferreira da Silva, M. Probst, T.D. Mark, P. Lima-Vieira and P. Scheier "Electron attachment studies to musk ketone and high mass resolution anionic isobaric fragment detection International" *Journal of Mass Spectrometry* Volume 277, Issues 1-3, 1, November 2008, Pages 123-129.
- [31] Talaty N, Mulligan CC, Justes DR, Jackson AU, Noll RJ, Cooks RG. "Fabric analysis by ambient mass spectrometry for explosives and drugs". *Analyst*. 2008 Nov; 133(11): 1532-40.
- [32] Mitchell Wells, Michael J. Roth, Adam D. Keil, John W. Grossenbacher, Dina R. Justes, Garth E. Patterson and Dennis J. Barket Jr. "Implementation of DART and DESI Ionization on a Fieldable Mass Spectrometer" *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, pp. Pages 1419-1424, Volume 19, Issue 10, October 2008.
- [33] Huestis, David L, Mullen, Christopher, Coggiola, Michael J., Oser, Harald "Laser-ionization mass spectrometry of explosives and chemical warfare simulants". *International Journal of High Speed Electronics & Systems*; Mar2008, Vol. 18 Issue 1, p159-165.
- [34] E. Schramm; F. Muhlberger; S. Mitschke; G. Reichardt; R. Schulte-Ladbeck; M. Putz; R. Zimmermann "Determination of the Ionization Potentials of Security-Relevant Substances with Single Photon Ionization Mass Spectrometry Using Synchrotron Radiation" *Applied Spectroscopy*, Feb2008, Vol. 62 Issue 2, p238-247.
- [35] Na N, Zhang C, Zhao M, Zhang S, Yang C, Fang X, Zhang X "Direct detection of explosives on solid surfaces by mass spectrometry with an ambient ion source based on dielectric barrier discharge". *Journal Of Mass Spectrometry: JMS [J Mass Spectrom]*, ISSN: 1076-5174, 2007 Aug; Vol. 42 (8), pp. 1079-85.
- [36] Justes DR, Talaty N, Cotte-Rodriguez I, Cooks RG, "Detection of explosives on skin using ambient ionization mass spectrometry". *Chemical Communications (Cambridge, England) [Chem Commun (Camb)]*, ISSN: 1359-7345, 2007 Jun 7; pp. 2142-4.
- [37] Williamson LN, Bartlett MG "Quantitative liquid chromatography/time-of-flight mass spectrometry". *Biomedical Chromatography: BMC [Biomed Chromatogr]*, ISSN: 0269-3879, 2007 Jun; Vol. 21 (6), pp. 567-76.
- [38] Jönsson S., Gustavsson L. and van Bavel B. "Analysis of nitroaromatic compounds in complex samples using solid-phase microextraction and isotope dilution quantification gas chromatography-electron-capture negative ionisation mass spectrometry" *Journal of Chromatography A* Volume 1164, Issues 1-2, 2007, pp. Pages 65-73.
- [39] Ochsenbein U, Zeh M, Berset JD. "Comparing solid phase extraction and direct injection for the analysis of ultra-trace levels of relevant explosives in lake water and tributaries using liquid chromatography-electrospray tandem mass spectrometry" *Chemosphere*. 2008 Jun;72(6):974-80.
- [40] Claire M. Lock and Wolfram Meier-Augenstein "Investigation of isotopic linkage between precursor and product in the synthesis of a high explosive" *Forensic Science International* Volume 179, Issues 2-3, 6 August 2008, Pages 157-162.
- [41] C. Lock and M. Beardah. "Establishing Links Between Explosives Precursors and Products Using Isotope Ratio Mass Spectrometry". *Science&Justice* Volume 50, Issue 1, March 2010, Page 42.
- [42] Anthony T. Quirk, John M. Bellerby, James F. Carter, Fay A. Thomas and Jenny C. Hill "An initial evaluation of stable isotopic characterisation of postblast plastic debris from improvised explosive devices". *Science & Justice* Volume 49, Issue 2, June 2009, pp. Pages 87-93.
- [43] David Widory, Jean-Jacques Minet and Martine Barbe-Leborgne "Sourcing explosives: A multi-isotope approach" *Science&Justice* Volume 49, Issue 2, June 2009, Pages 62-72.
- [44] Anisichkin, V. F. "Isotope studies of detonation mechanisms of TNT, RDX, and HMX". *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 43.5 Sept 2007: p.580(7).
- [45] Anisichkin, V. F. "Isotope studies of detonation mechanisms of TNT, RDX, and HMX". *Combustion, Explosion, & Shock Waves*, Vol. 43 Issue 5, pp.580-586.
- [46] Gentile N., Siegwolf R.T.W. and Delémont O. "Contribution of isotope ratio mass spectrometry to the investigation of improvised explosives: Isotopic study of black powders and ammonium nitrates" *Science&Justice* Volume 50, Issue 1, March 2010, Page 42.
- [47] Sarah J. Benson, Christopher J. Lennard, Philip Maynard, David M. Hill, Anita S. Andrew and Claude Roux. "Forensic Analysis of Explosives Using Isotope Ratio Mass Spectrometry (IRMS) - Discrimination of Ammonium Nitrate Sources". *Science & Justice* Volume 49, no. Issue 2, June 2009, Pages 73-80.

- [48] Sarah J. Benson, Christopher J. Lennard, Philip Maynard, David M. Hill, Anita S. "Andrew and Claude Roux. Forensic Analysis of Explosives Using Isotope Ratio Mass Spectrometry (IRMS) - Preliminary Study on TATP and PETN" *Science & Justice* Volume 49, Issue 2, June 2009, Pages 81-86.
- [49] Uzer, E. Ergag and R. Apak "Spectrophotometric determination of cyclotrimethylenetrinitramine (RDX) in explosive mixtures and residues with the Berthelot reaction". *Analytica Chimica Acta* Volume 612, Issue 1, 2008, Pages 53-64.
- [50] Erol Erpag, Ayşem Uzer and Reşat Apak "Selective spectrophotometric determination of TNT using a dicyclohexylamine-based colorimetric sensor" *Talanta* Volume 78, Issue 3, 15 May 2009, Pages 772-780.
- [51] Sanchez JC, Toal SJ, Wang Z, Dugan RE, Trogler WC "Selective Detection of Trace Nitroaromatic, Nitramine, and Nitrate Ester Explosive Residues Using a Three-Step Fluorimetric Sensing Process: A Tandem Turnoff, Turn-on Sensor". *J Forensic Sci* Nov2007, Vols. Vol. 52 Issue 6, p1308-1313.
- [52] Qianqian Wang, Peter Jander, Cord Fricke-Begemann and Reinhard Noll. "Comparison of 1064 nm and 266 nm excitation of laser-induced plasmas for several types of plastics and one explosive". *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* Volume 63, Issue 10, October 2008, Pages 1011-1015.
- [53] Christopher Ramos and Paul J. Dagdigan. "Effect of photochemistry on molecular detection by cavity ringdown spectroscopy: case study of an explosive-related compound". *Applied Optics* 46.26 (Sept 10, 2007): pp. 6526(7).
- [54] Changmin Deng, Qingguo He, Jiangong Cheng, Defeng Zhu, Chao He and Tong Un "Unusual spectroscopic properties of RRE/TJOG composite and its sensor response to TNT" *Synthetic Metals* Volume 159, Issues 3-4, February 2009, pp. 320-324.
- [55] Chaudhary K., Rudra A.M., Kumbhakar P. and Bhar G.C. "Generation of coherent tunable deep UV radiation for detection and absorption studies of explosives RDX and TNT". *Journal of Applied Spectroscopy* 74.4 (July 2007): p.571(7).
- [56] Ramesh C. Sharma, Tracy S. Miller, Alexander D. Usachev, Jagdish P. Singh, Fang-Yu Yueh and David L. Monte "Photo-fragmentation cross-section of gaseous 2,4,6-trinitrotoluene at different ultraviolet wavelengths" *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* Volume 72, Issue 3, April 2009, Pages 470-473.
- [57] Meaney MS, McGuffin VL. "Luminescence-based methods for sensing and detection of explosives". *Anal Bioanal Chem.* 2008 Aug;391(7):2557-76.
- [58] Hu, X., Wei, T, Wang, J., Liu, Z., Li, X., Zhang, B., et al., "Near-Infrared-Light Mediated Ratiometric Luminescent Sensor for Multimode Visualized Assays of Explosives". *Analytical Chemistry*, 86(20), 2014, pp. 10484-10491.
- [59] Tammene Naddo, Yanke Che, Wei Zhang, Kaushik Balakrishnan, Xiaomei Yang, Max Yen, Jincui Zhao, Jeffrey S. "Moore and Ling Zang Detection of explosives with a fluorescent nanofibril film". *Journal of the American Chemical Society* 129.22 (June 6, 2007):, pp.6978-6979.
- [60] Woodka MD, Schnee VP, Polcha MP. "Fluorescent Polymer Sensor Array for Detection and Discrimination of Explosives in Water". *Analytical Chemistry* 2010; 82 (23), pp 9917-9924.
- [61] Freeman R, Finder T, Bahshi L, Gill R, Willner I. "Functionalized CdSe/ZnS QDs for the detection of nitroaromatic or RDX explosives". *Advanced Materials* (Deerfield Beach, Fla.) 2012 December 18; 24 (48): 6416-21.
- [62] Bouhadid M, Caron T, Veignal F, Pasquinet E, Ratsimihety A, Ganachaud F, et al. "Ability of various materials to detect explosive vapors by fluorescent technologies: A comparative study". *Talanta* 2012 October 15; 100: 254-261.
- [63] Fedorowski J, LaCourse WR, Lorah MM. "Photo-assisted electrochemical detection (PAED) following HPLC-UV for the determination of nitro explosives and degradation products". *Proceedings of the International Society for Optics and Photonics, (Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XIII)* 2012 May 1; 8358: 83580U.
- [64] Cummins J, Hull J, Kitts K, Goodpaster JV. "Separation and identification of anions using porous graphitic carbon and electrospray ionization mass spectrometry: Application to inorganic explosives and their post blast residues". *Analytical Methods*, pp. 2011 July 8; 3 (7): 1682-1687.
- [65] Banas, K. Banas, M. Bahou, H.O. Moser, L. Wen, P. Yang, Z.J. Li, M., Cholewa, S.K. Lim and Ch.H. Lim "Post-blast detection of traces of explosives by means of Fourier transform infrared spectroscopy" *Vibrational Spectroscopy* Volume 51, Issue 2, 10 November 2009, Pages 168-176.
- [66] Mou, Yongyan; Rabalais, J. Wayne. "Detection and Identification of Explosive Particles in Fingerprints Using Attenuated Total Reflection-Fourier Transform Infrared Spectromicroscopy". *Journal of Forensic Sciences* Jul2009, Vol. 54 Issue 4, p846-850.
- [67] Castro-Suarez JR, Pacheco-London LC, Velez-Reyes M, Diem M, Tague TJ Jr, Hernandez-Rivera SP. Open-Path FTIR Detection of Explosives on Metallic Surfaces Chapter 20. In: Nikolic G, ed. "Fourier Transforms - New Analytical Approaches and FTIR Strategies", InTech; 2011 April 1.
- [68] Emmons ED, Tripathi A, Guicheteau JA, Christesen SD. "Raman chemical imaging of explosive-contaminated fingerprints" *Appl Spectrosc.* 2009 Nov;63(11):1197-203.
- [69] Esam M.A. Ali, Howell G.M. Edwards and Ian J. "Scowen In-situ detection of single particles of explosive on clothing with confocal Raman microscopy". *Talanta* Volume 78, Issue 3, 15 May 2009, Pages 1201-1203.
- [70] Nagli L., Gaft M., Flegler Y. and Rosenbluh M. "Absolute Raman cross-sections of some explosives: Trend to UV". *Optical Materials* Volume 30, Issue 11, July 2008, Pages 1747-1754.
- [71] Misra AK, Sharma SK, Acosta TE, Porter JN, Lucey PG, Bates DE. "Portable standoff Raman system for fast detection of homemade explosives through glass, plastic, and water". *Proceedings of the International Society for Optics and Photonics, (Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XIII)* 2012 May 1; 8358: 835811.
- [72] Zachhuber B, Ramer G, Hobro A, Chrysostom ET, Lendl B. "Stand-off Raman spectroscopy: a powerful technique for qualitative and quantitative analysis of inorganic and organic compounds including explosives". *Analytical & Bioanalytical Chemistry*, 2011 September; 400 (8): 2439-2447.
- [73] Korošec, Romana; Kajič, Petra; Bukovec, P. "Determination of water, ammonium nitrate and sodium nitrate content in 'water-in-oil' emulsions using TG and DSC". *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, Aug 2007, Vol. 89 Issue 2, p619-624.
- [74] Fan W, Young M, Canino J, Smith J, Oxley J, Almirall JR. "Fast detection of triacetone triperoxide (TATP) from headspace using planar solid-phase microextraction (PSPME) coupled to an IMS detector". *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 2012 April; 403 (2), pp. 401-408.
- [75] Zhang WH, Zhang WD, Chen LY. "Highly sensitive detection of explosive triacetone triperoxide by an In2O3 sensor". *Nanotechnology* 2010 Aug 6; 21 (31): 315502.
- [76] Takada Y, Nagano H, Suzuki Y, Sugiyama M, Nakajima E, Hashimoto Y, et al. "High-throughput walkthrough detection portal for counter terrorism: detection of triacetone triperoxide (TATP), vapor by atmospheric-pressure chemical ionization ion trap mass spectrometry". *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 2011 September 15; 25 (17): 2448-52.
- [77] Crespy C, Duvauchelle P, Kaftandjian V, Soulez F, Ponard P. "Energy dispersive X-ray diffraction to identify explosive substances: Spectra analysis procedure optimization". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Physics Resea Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 2010 November 21; 623 (3): 1050-1060.
- [78] Li X, Li Q, Zhou H, Hao H, Wang T, Zhao S, et al. "Rapid, on-site identification of explosives in nanoliter droplets using a UV reflected fiber optic sensor". *Analytica Chimica Acta* 2012 November; 751: 112-118.
- [79] Guenther JU, Bohling C, Mordmueller M, Schade W. "Trace detection of nitrogen-based explosives with UV-PLF". *Proceedings of the International Society for Optics and Photonics* 2010; 7838: 783807-783807-8.
- [80] Abdelhamid M, Fortes FJ, Harith MA, Laserna JJ. "Analysis of explosive residues in human fingerprints using optical catapulting-laser-induced breakdown spectroscopy". *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 2011 July; 26 (7): 1445-1450.
- [81] Nilles JM, Connell TR, Stokes ST, Durst HD. "Explosives Detection Using Direct Analysis in Real Time (DART) Mass Spectrometry". *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 2010 October; 35 (5): 446-451.

- [82] Brady JJ, Judge EJ, Levis RJ. "Identification of explosives and explosive formulations using laser electrospray mass spectrometry". *Rapid Communications In Mass Spectrometry* 2010 June 15; 24 (11): 1659-1664.
- [83] Brady JJ, Flanagan PM, Perez JJ, Judge EJ, Levis RJ. "Multidimensional detection of explosives and explosive signatures via laser electrospray mass spectrometry". *Proceedings of the International Society for Optics and Photonics, (Chemical, Biological, Society for Optics and Ph Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XIII)* 2012 May 1; 8358: 83580X.
- [84] Kozole J, Tomlinson-Phillips J, Stairs JR, Harper JD, Lukow SR, Lareau RT et al. "Characterizing the gas phase ion chemistry of an ion trap mobility spectrometry based explosive trace detector using a tandem mass spectrometer". *Taianta* 2012 September; 99: pp. 799-810.
- [85] Téllez H, Vadillo JM, Laserna JJ. "Secondary ion mass spectrometry of powdered explosive compounds for forensic evidence analysis". *Rapid Communications In Mass Spectrometry: RCM* 2012 May 30; 26 (10): 1203-7.
- [86] Gelman F, Kotlyar A, Chiguala D, Ronen Z. "Precise and accurate compound-specific carbon and nitrogen isotope analysis of RDX by GC-IRMS". *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 2011 December; 91 (14): 1392-1400.
- [87] Sanders NL, Kothari S, Huang G, Salazar G, Cooks RG. "Detection of explosives as negative ions directly from surfaces using a miniature mass spectrometer". *Analytical Chemistry* 2010 June 15; 82 (12): 5313-6.
- [88] Dobrokhoto V, Oakes L, Sowell D, Larin A, Hall J, Kengne A, et al. "Toward the nanospring-based artificial olfactory system for tracedetection of flammable and explosive vapors". *Sensors and Actuators B: Chemical* 2012 June 20; 168: 138-148.
- [89] Park M, Celia LN, Chen W, Myung NV, Mulchandani A. "Carbon nanotubes-based chemiresistive immunosensor for small molecules: Detection of nitroaromatic explosives". *Biosensors and Bioelectronics* 2010 December 15; 26 (4): 1297-301.
- [90] Ray, R.S., Sarma, B., Mohanty, S., and Misra, M., "Theoretical and experimental study of sensing triacetone triperoxide (TATP) explosive through nanostructured TiO₂ substrate". *Taianta*, 118, 2014. pp. 304-311.
- [91] Espy M, Baguisa S, Dunkerley D, Magnelind P, Matlashov A, Owens T, et al. "Progress on Detection of Liquid Explosives Using Ultra-Low Field MRI". *Institute of Electrical and Electronic Engineers Transactions on Applied Superconductivity* 2011 June; 21 (3): pp. 530-533.
- [92] Hudson L, Bateman F, Bergstrom P, Cerra F, Glover J, Minniti R, et al. "Measurements and standards for bulk-explosives detection". *Applied Radiation and Isotopes: including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine* 2012 July; 70 (7): 1037-41.
- [93] Mattarozzi M, Bianchi F, Bisceglie F, Careri M, Mangia A, Mori G, Gregori A., "Planar solid phase microextraction-ion mobility spectrometry: a diethoxydiphenylsilane-based coating for the detection of explosives and explosive taggants". *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 2011 April; 399 (8): 2741-2746..
- [94] Sausa RC, Cabalo JB. "The Detection of Energetic Materials by Laser Photoacoustic Overtone Spectroscopy". *Applied Spectroscopy* 2012 September; 66 (9): 993-998.
- [95] Brensing, K., Rollman, Copper, C., "Novel CE-MS technique for detection of high MEKC and mass spectrometric complexation" pp. 74-79.
- [96] Fujiyama-Novak JH, Gaddam CK, Das D, Vander Wai WL, Ward B. "Detection of explosives by plasma optical emission spectroscopy". *Sensors & Actuators B: Chemical* 2013 January; 176: 985-993.
- [97] Phelan, B.R., Gallagher, K.A., Sherbondy, K.D., Ranney, K.L., and Narayanan, R.M., "Development and performance of an ultrawideband stepped-frequency radar for landmine and improvised explosive device (IED) detection". *Sensing and Imaging*, 2014. 15(1).
- [98] Zoran Milanović, Saša Milić, Radovan Radovanović, "Infracrveni senzori u tehničkim sredstvima specijalne namene", *Zbornik radova, Elektrotehnički institut Nikola Tesla*, Vol. 31 Br. 31, 2021. doi:10.5937/zeint31-35005.