

Učestalost primene naprednih forenzičkih tehnika u utvrđivanju uzroka požara

Zoran Milanović, Radovan Radovanović, Maja Milosavljević

Apstrakt — Požari predstavljaju energetske događaje sa potencijalom da izazovu masovno uništenje života i imovine. Vitalni deo istrage požara čine forenzičke analize. S tim u vezi, već duže vreme, forenzička zajednica traži načine da poboljša istragu požara, a posebno zbog toga što vatra i sredstva za njeno gašenje uništavaju dokaze o uzroku nastanka. Sveobuhvatnu analizu ostataka požara vrše stručna lica i kompanije akreditovane za te poslove. Najčešće to su forenzičke laboratorije koje poseduju opremu i alate za identifikaciju i prikupljanje uzoraka, njihovo čuvanje i analiziranje.

Primarni cilj rada je da se prikažu napredne forenzičke metode i tehnike primenjene kod prikupljanja i analize ostataka od požara sa stanovišta najbolje prakse, a koji su bili predmet istraživanja brojnih stručnih radova, kao i da se utvrdi učestalost pojavljivanja najzastupljenijih metoda i tehnika. Rezultati istraživanja ukazuju da su dve najčešće primenjivane tehnike gasna hromatografija i masena spektrometrija.

Ključne reči — Požari, forenzičke tehnike, gasna hromatografija i masena spektrometrija.

I. UVOD

Istraživači požara moraju imati širok spektar znanja, iskustava, biti kompetentni i obučeni o temama kao što su nauka o požaru, hemija požara, termodinamika, termometrija, dinamika požara, dinamika eksplozije, kompjutersko modelovanje požara, forenzičke nauke, analiza požara, naučna metodologija, fotografija, opasni materijali, konstrukcija zgrada, komunalni sistemi za gas i električnu energiju, ljudsko ponašanje (u vezi sa evakuacijom, žrtvama, podmetanjem požara, svedocima i informacijama), forenzičkim laboratorijskim analizama, analizama kvarova, krivično-građanskim pravom, analitički alati i mnogim drugim aspektima sa kojima se mogu susresti na terenu.

Prikupljanje činjenica, kao i njihovu analizu, treba izvršiti objektivno, prikazati istinito, nepristrasno i bez predrasuda. Iako postoji pritisak da se što pre definiše priroda požara da bi se pokrenula krivična istraga, osnovna metodologija uviđaja požara treba da se oslanja na korišćenje sistematičnog pristupa i sa posebnom pažnjom na sve relevantne detalje. Upotreba sistematičnog pristupa često otkriva nove činjenične za analizu, što može zahtevati ponovnu procenu prethodnih zaključaka. Uz nekoliko izuzetaka, odgovarajuća

metodologija za istragu požara je da se prvo utvrdi poreklo (lokacija gde su se izvor paljenja i gorivo spojili da bi izazvali požar), a zatim da se ispita uzrok tj. okolnosti ili uslovi koji su izazvali ili doprineli pojavi incidenta. Šta je dovelo do požara i spojilo izvor paljenja, gorivu materiju i kiseonik, kao i proceniti razvoj i širenje požara. U nekim slučajevima utvrditi odgovornost za požar, npr. da li je to uključivalo nemar neke strane ili namernu aktivnost.

Analiza uzroka požara se tradicionalno sprovodi u okviru uviđaja požara definisanjem tehničkih i strukturnih grešaka i kvarova, fotografisanjem i uzimanjem hemijskih i tehničkih uzoraka za laboratorijsku analizu, jer veoma je važno pravilno utvrditi područje nastanka požara.

II. UOPŠTENO O NASTANKU POŽARA

Napredak i razvoj tehnologija, gradova, naselja, infrastrukture i industrije uslovljavaju, između ostalog, i povećanu opasnost od požara, eksplozija, nezgoda i havarija. Zajednička karakteristika za požare i eksplozije je da nanose materijalnu štetu i ugrožavaju ljudske živote, a ono što ih razlikuje je brzina kojom se reakcija dešava.

Dok požar predstavlja nekontrolisano gorenje koje se definiše kao brzi proces oksidacije sa razvojem toplote i svetlosti, za podmetanje požara kao jedne od najčešćih kriminalnih aktivnosti se može reći da predstavlja svesno paljenje vatre, izvršeno sa zločinačkom namerom. Komponente neophodne za požar najbolje opisuje vatreni tetraedar koji se sastoji od četiri komponente: gorive materije, toplote (plamen, varnica, udar i trenje), kiseonika i neinhibiranih hemijskih lančanih reakcija. Na ponašanje požara može uticati dodavanje ili oduzimanje bilo koje komponente tokom napredovanja ili suzbijanja požara. Goriva materija je svaka supstanca koja sagoreva ili podržava sagorevanje i nalazi se u tri osnovna stanja: čvrstom, tečnom ili gasovite pare. Primer čvrstog goriva je drvo; tečnog, benzin; i gasovitog, para, prirodni gas itd. Iako goriva materija može postojati u tri različita stanja, one se isparavaju i pale samo u stanju pare, to znači da drvo ne gori, već para koja izlazi iz drveta. Sagorevanje čvrstih i tečnih goriva odvija se na površini gorive materije tj. iznad nje, u oblasti gde su se stvorile pare koje su došle u kontakt sa toplotom i zapalile. [1]

Utvrdjivanje uzroka i na kraju odgovornosti za požar podrazumeva prepoznavanje stepena ljudske intervencije (faktora). Skoro svi požari imaju neku vrstu ljudskog učešća, bilo namerno ili slučajno. Zato pri rešavanju ovih slučajeva treba naći odgovor na sledeća zlatna pitanja forenzike: „Šta su uradili?“ „Kada su to uradili?“ „Gde je obavljen posao?“

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>);

Maja Milosavljević, Lidl Srbija KD, Prva južna radna 3, Nova Pazova, Srbija (e-mail: milosavljevic_maja@yahoo.com).

„Zašto su obavili posao?“ "Kako su obavili posao?" Konačno, utvrđivanje uzroka i odgovornosti za požar može da identifikuje okolnosti i faktore koji su bili neophodni da bi do požara došlo. Ako je više od jedne oblasti ili tačke porekla to može biti pokazatelj namerno podmetnutog požara (zapaljivača). [2] Na rešavanje navedenih pitanja posebno utiče napredak analitičke hemije, digitalne slike, termovizije, robotike i kreiranje baza podataka relevantnih za analizu ostataka požara, kao i svakodnevni razvoj novih alata i tehnika.

Mesto događaja požara, kako se može i očekivati, predstavlja opasno mesto. Zbog razorne moći vatre, kao i mogućnosti postojanja i aktiviranja drugih eksplozivnih naprava istraživači moraju biti svesni svog okruženja i mogućih opasnosti koje ih vrebaju. Istraživači požara imaju dužnost i odgovornost prema sebi i drugima da pri sprovođenju uviđaja rade u parovima i primene sve neophodne i raspoložive mere lične bezbednosti nošenjem odgovarajuće zaštitne odeće, obuće i opreme (zaštitne maske sa filterom za čestice i specijalne zatvorene sisteme za disanje). Na primer, materijali koji sadrže azbest i koji se mogu naći kod nekih brodova, pri sagorevanju oslobađaju azbestna vlakna u vazduhu koja pri udisanju mogu biti veoma štetna za istraživače koji ne nose zaštitnu opremu. Inače, azbestna vlakna se mogu smanjiti vlaženjem površine.

Zatim, istraživači moraju znati koje informacije treba prikupiti tokom pregleda mesta događaja, kao i ako su u prilici, da očuvaju i zaštite mesto događaja tokom gašenja požara i nastavka uviđaja. Takođe, moraju znati i razumeti kako spoljašnji uslovi izgorele strukture mogu uticati na ispitivanje incidenta. Konačno, istraživači moraju razumeti odnos između fizičkog stanja konstrukcije i identifikacije motiva.

Zbog složene prirode događaja, gde vatra često deformiše ili iskrivljuje dokaze, kao i samo gašenje vatre gde radni fluid (voda, pena...) uništi određene dokaze, može se reći da istraživanje požara predstavlja jednu od najtežih forenzičkih nauka za praktikovanje. Ne znajući da li je požar namerno podmetnut, istraživači moraju da preduzmu određene tehnike za detekciju i tako dokažu ili opovrgnu sve optužbe ili sumnje, kao i da spoje događaje pre i posle požara. Ako istraga pokaže da je požar namerno podmetnut, razumni slučajni uzroci požara moraju biti procenjeni i eliminisani.

III. INSTRUMENTALNE TEHNIKE I METODE PRIMENJENE NA MESTU DOGAĐAJA I U LABORATORIJI

Istraga požara je kompleksna oblast forenzičkih nauka, jer uključuje ispitivanje mesta događaja (na terenu) kao glavnu komponentu i laboratorijsku analizu kao sporednu komponentu. Paradoksalno je to, što je mnogo veći broj naučnih članaka objavljen sa temama iz laboratorije nego sa mesta događaja. Složenost uviđaja požara proizilazi i iz činjenice da uviđaj uglavnom vrše islednici požara koji nemaju formalno naučno obrazovanje, iako primenjuju naučni metod. Naprotiv, laboratorijska ispitivanja sprovode forenzičari, koji nemaju veliko iskustvo u istrazi požara, ali

često imaju formalno obrazovanje iz hemije. Literatura odražava ovu dihotomnu situaciju, jer istraživači požara vrlo malo objavljuju u određenim časopisima, a forenzičari svoju literaturu pune člancima o laboratorijskim aspektima istrage požara u prilično nespecifičnim časopisima. Tako, postoji samo nekoliko publikacija koje pokrivaju čitavo polje istraživanja požara, od događaja do laboratorije. [3]

Požari sa fatalnim ishodom za ljude mogu biti: slučajni, objašnjivi (može uključivati radnje iz nemara); prirodni, prirodni čin (munja, udar groma, zemljotres, sunce); zapaljivi, nameran čin podmetanja požara i neutvrđeni, uzrok nepoznat, ne može se identifikovati. Slučajni se javljaju usled ljudske nepažnje, nehata, nemara, kod neispravnih elektro i gasnih instalacija, kod neadekvatne upotrebe plinskih boca, kod nekontrolisanog bacanja opušaka od cigareta i drugih paljenja vatre, dečije igre, sudara motornih vozila... Namerni požari su najčešće samoubistvo (samospaljivanje) ili ubistvo (podmetanje požara). Razlika između prirodne i neprirodne smrti zasniva se na pažljivom prikupljanju i pravilnom tumačenju forenzičkih nalaza, gde forenzičari moraju razumeti požar i njegove nuspojave, kao i kako one utiču na ljudsko telo. Preporuke su da se telo, uz svo poštovanje prema poginulom, pregleda na mestu događaja požara kako se ne bi izgubio neki ključni dokaz. Dokumentovanje ostataka požara pronađenih iznad i ispod tela su takođe neophodni zbog utvrđivanja zašto i šta se desilo žrtvi. Druga oblast su toksični gasovi koji se oslobađaju tokom požara i ispod temperature sagorevanja od 200°C. Obično se pretpostavlja da je ugljen monoksid uzrok gušenja i stoga se drugi gasovi zanemaruju. Azot, ugljen monoksid (SO) i cijanovodonik (HCN) iz poliuretana se identifikuju pomoću kriogenog načina GC-MS. [4]

Autor Borušević u radu [5] kod analize uzorka podmetnutog požara, u cilju identifikacije potencijalnih ubrzivača navodi dve faze i to: prva faza, izolacija analita i utvrđivanje njihove koncentracije i druga, hromatografsko razdvajanje jedinjenja, analiza i identifikacija potencijalnog ubrzivača. Efikasnost prve faze određuje rezultat čitavog procesa i mogućnost ubrzane identifikacije. Autor navodi da se do nedavno, koristila pasivna adsorpcija na karbonskoj traci i da je trenutno zamenjena mikro-ekstrakcijom čvrste faze (SPME – solid phase micro-extraction). Takođe, isti autor, tehnike koje se koriste za izolaciju i koncentraciju ubrzivača deli na:

- vakuum destilacija;
- destilacija vodenom parom;
- tačno-tečna ekstrakcija;
- head-space analiza:
 - direktna (zagrejana) i
 - statička (ravnotežna), gde spadaju:
 - metoda karbonske trake,
 - mikro-ekstrakcija čvrste faze (SPME),
 - drugi adsorbenti smešteni u hermetički zatvorene kontejnere kontrolisani termostatom i koji se koriste za head-space analizu;
 - dinamička head-space analiza (analiza pražnjenja)

i hvatanja). [5]

Grupa autora u knjizi [2] naglašavaju da je isparljivost ubrzivača važan faktor u procesu sagorevanja, određujući koliko će ostataka ostati i koliko brzo će ispariti nakon što se vatra ugasi. Vezano za isparljivost je tačka paljenja, definisana kao temperatura na kojoj će tečnost ispuštiti dovoljno pare da formira zapaljivu smešu. Na mestu požara, prisustvo ubrzivača se može utvrditi na nekoliko načina, uključujući obučene pse, hemijske testove boje i prenosive instrumente i senzore. Materijali kao što su drvo i tepih upijaju tečne ubrzivače, tako da uzorci ovih materijala mogu sadržati vredne dokaze.

Takođe, isti autori navode i mnoge metode koje se rutinski koriste za laboratorijsku analizu dokaza o ostacima požara. Primarni alat koji se koristi za detekciju i identifikaciju tečnih ubrzivača je gasna hromatografija (GC) povezana sa jonizacionim detektorom plamena (FID) ili masenim spektrometrom (MS). Analiza korišćenjem bilo kog instrumenta daje izlaz koji je karakterističan za većinu uobičajenih destilata nafte. Obrasci se identifikuju upoređivanjem sa standardima poznate kompozicije, procesom koji se naziva podudaranje obrazaca. Na obrasce dobijene iz dokaza mogu uticati vremenske prilike i mikroba aktivnost, posebno ako je uzorak na zemljištu ili vegetaciji. Vremenske prilike i proteklo vreme pre sakupljanja uzorka su veoma važni, jer komponente ubrzivača isparavaju i što je uzorak duže stajao pre sakupljanja to su manje šanse da se prikupe relevantnih uzorci.

Sastav i uticaj vremena na uzorak goriva analiziraju se na osnovu IR, GCFID i GC-MS analiza [6], i dalje pomoću visokotemperaturne dvodimenzionalne gasne hromatografije HT-GC x GC. [7] U japanskoj studiji, detekcija ukupnog sumpora u gorivima je pokazala da se različite vrste goriva mogu razlikovati korišćenjem gasne hromatografije sa detekcijom atomske emisije (GC-AED). Zbog visokog stepena selektivnosti i osetljivosti u GC-AED i detekcije karakterističnih elemenata u jedinjenjima, moguća je detekcija tragova supstanci u uzorcima požarnog otpada. Štaviše, iako su se karakteristike destilacije promenile, opažanje vrsta goriva je bila uspešnija. [8] Novi koncept analize količine izomera (IAA - isomer abundance analysis) supersoničnom gasnom hromatografijom – masenom spektrometrijom (GC-MS), korišćen je da bi se proširio opseg analize goriva i ugljovodonika. Metoda otkriva molekularne jone u svim ugljovodonicima i to pomaže da se dobije njihova distribucija izomera i obezbedi njihova identifikacija. Zbog količine goriva u tragovima prikupljenih sa požarišta, osetljivost metode je važna.

Drugi tip kapaciteta separacije se razmatra kada se GC-MS koristi u analizi alkil-cikloheksana. Svrha metode je bila da se utvrdi da li su ostaci pronađeni u ostacima požara na bazi kerozina, gasnog ulja ili plastike. [9]

Još jedna predložena metoda za karakterizaciju uzoraka benzina je multidimenzionalna GC – Furierova transformacija - jon rezonantna ciklotronska MS analiza (GC-FT-ICRMS). Studija se odnosi na uzimanje uzoraka sirove nafte i rafiniranih naftnih derivata. [10] Procenjena je i razvijena druga vrsta detektora za forenzički rad, spektrometrija

pokretljivosti jona (IMS). Očekuje se da će ovaj metod igrati značajnu ulogu u istragama o zapaljivim tečnostima i paljevinama. [11], [12] Pored pomenute studije, napravljene su još dve studije koje su bile uspešne u forenzičkoj analizi ostataka požara. Prvo, primena gasne hromatografije i diferencijalne spektrometrije pokretljivosti (GC-DMS) sa dvosmernom klasifikacijom zapaljivih tečnosti u ostacima požara. GC-DMS obezbeđuju jedinstvene profile za različite zapaljive tečnosti i u kombinaciji sa ekspertskim sistemom za izgradnju fuzzy pravila (FuRES) na dvosmernim objektima podataka. Takođe, metoda je korišćena i za otkrivanje na licu mesta kod istrage podmetanja požara. [13] Isti autor je objavio poređenje različitih metoda detekcije kako bi procenio njihove performanse u klasifikaciji zapaljivih tečnosti korišćenjem gasne hromatografije u kombinaciji sa spektrometrijom diferencijalne mobilnosti ili masenom spektrometrijom, GC-DMS i GC-MS respektivno.

Proučavana je detekcija benzina i razređivača boje direktno iz uobičajenog materijala za domaćinstvo. Metoda analize je direktna analiza masene spektrometrije u realnom vremenu (DART). Metoda ne zahteva prethodnu obradu uzorka. Uzorci se unose pod atmosferskim pritiskom i stavljaju u mlaz izlaznog gasa iz kojeg se analiti desorbuju i jonizuju. Pokazalo se da je metoda osetljiva i da se dobijaju hemijski otisci prstiju, ali samo ako su uzorci analizirani u roku do 24 časa nakon uzimanja uzorka. Dalje se predlažu studije koje razmatraju matrice i srodne efekte za detekciju. [14] U preglednom članku o forenzičkim primenama metoda jonizacije u okruženju se takođe pominje DART. Metoda je sposobna da detektuje jedinjenja u širokom opsegu uz minimalnu obradu uzorka, ali je vreme analize kratko. Takođe, ovde je razvoj tehnike od ključnog značaja za njenu široku upotrebu. [15]

Martin-Alberka i drugi [16] sprovedli su analizu zakiseljenih uzoraka vatrenih ostataka, odnosno uzoraka koji potiču iz molotovljevih koktela u kojima se koristi mešavina benzina ili dizel goriva sa sumpornom kiselinom. Koristeći SPME-GC-MS, identifikovali su ostatke benzina i dizel goriva od zakiseljenih ostataka požara. Oni su zaključili da je prisustvo terc-butil jedinjenja definitivno pokazatelj prisustva zakiseljenih ostataka. Isti autori su koristili Ramana za analizu zakiseljenih zapaljivih tečnosti kroz staklo za flaše [17]. Oni su potvrdili da je Raman veoma korisna tehnika za brzu, neinvazivnu analizu zapaljenih sredstava.

Autor Ker i ostali [18] su istraživali upotrebu Ramana i ATR-FTIR spektroskopije za identifikaciju polimera među uzorcima ostataka požara. Oni su pokazali da su obe tehnike komplementarne i da je sa ovom kombinacijom bilo moguće identifikovati HDPE, LDPE, PVC, PMMA i pamuk među spaljenim ostacima.

Jadav i ostali [19] su razmatrali upotrebu infracrvene i Ramanove spektroskopije u ispitivanju uzoraka vatrenih ostataka. Članak se prvenstveno fokusirao na korišćenje ovih tehnika za identifikaciju polimera u ostacima, a ne na zapaljivim tečnostima.

Martin-Alberka i drugi [20] su takođe proučavali upotrebu ATR-FTIR za identifikaciju čistih i zakiseljenih zapaljivih

tečnosti.

Falsifikovanje benzina je identifikovano korišćenjem sveobuhvatne dvodimenzionalne gasne hromatografije GCxGC. Autor Pedrosa i ostali [21] razvili su generičku metodu u cilju procene falsifikovanja benzina čiji metod analize može biti moćno oruđe u rešavanju sličnih analitičkih problema sa složenim smešama.

Za klasifikaciju 12 različitih benzina korišćena tehnika je GC-MS, a podaci su obrađeni softverom Agilent Chemstation. [22]

Zang i Jang [23] su proučavali sastav dima od sagorevanja različitih zapaljivih tečnosti, posebno benzina, dizel goriva i razređivača boja. Zbog tumačenja hromatografskih podataka koji nisu u skladu sa ASTM standardima, značenje rezultata je teško razumeti, ali autori iznose zaključak da je dim benzina, dizel goriva i razređivača različitih boja i da se sastoje od mnogih komponenti.

Svirčinski i ostali [24] posipali su benzinom materijale u domaćinstvu, zatim pustili da se osuše u određenom vremenskom periodu, a zatim ih ekstrahovali korišćenjem mikroekstrakcije čvrste faze (SPME) i gasne hromatografije-masene spektrometrije (GC-MS). Benzin je otkriven u pamučnoj tkanini do sedam dana nakon sušenja, pri čemu su karton i tepih zadržavali benzin više od tri nedelje.

Dabah [25] je pregledao spaljenu i nesagorelu tkaninu natopljenu benzinom da bi odredio koliko dugo se zapaljiva tečnost može otkriti korišćenjem SPME i GC-MS. Rezultati su pokazali da se benzin duže zadržava (do 4 h) na nesagoreloj sintetičkoj tkanini (najlon i poliestar) nego na pamuku ili vuni. Ostaci na spaljenim tkaninama nisu bili detektovani nakon 2 h.

Guerar i ostali [26] analizirali odeću i proizvode za telo da bi utvrdili da li bi prisutna jedinjenja ometala analizu zapaljive tečnosti. Uzorci nošene i nenošene odeće i raznih proizvoda za telo analizirani su korišćenjem PHC i GC-MS. Neki proizvodi za telo proizveli su uzorke slične teškim destilatima nafte. Ispitana odeća je sadržala jedinjenja koja se često primećuju u zapaljivim tečnostima, međutim, iako oni mogu ometati identifikaciju zapaljive tečnosti, obučeni forenzičar bi mogao da utvrdi razliku između doprinosa supstrata i zapaljive tečnosti.

Barnet i ostali [27] su koristili direktnu analizu u masenoj spektrometriji u realnom vremenu (DART-MS) za identifikaciju zapaljivih tečnosti na podlogama. DART-MS je generisao masene spektre sa više pikova u opsegu veće mase nego obični GC-MS, što je poboljšalo detekciju manje isparljivih jedinjenja.

Zang i ostali [28] su simulirali požar u autobusu korišćenjem dizel goriva i analizirali uzorke na prisustvo zapaljivih tečnih ostataka korišćenjem ekstrakcije rastvaračem i analize prostora iznad, praćene GC-MS.

Patel i Luri [29] dali su pregled prenosnih uređaja za odvajanje koji se koriste u forenzici. Navedeni su članci koji govore o nedavnoj upotrebi prenosnih GC i GC-MS sistema za uzorke vatrenog otpada. Iako analiza isparljivih materija pomoću prenosivih sistema može biti brža i obezbediti veće temperaturne opsege, veća su i ograničenja detekcije.

Sudol i ostali [30] su napravili sveobuhvatni pregled GC i GCxGC tehnike i hemometrije koje su koristili za forenzičku analizu naftnih derivata. Oni ističu da se GCxGC pokazao kao analitički superioran u odnosu na GC po tome što pruža znatno više hemijskih informacija, ali zahteva upotrebu hemometrijskih alata većih dimenzija za pomoć u tumačenju podataka, što ga čini izazovom za primenu u većini forenzičkih laboratorija.

Često, mlazna goriva se klasifikuju korišćenjem brze gasne hromatografije u kombinaciji sa brzim skenirajućim masenim spektrometrom za kvadrupolne jone (gas chromatography – quadrupole ion mass spectrometer (GC-QIT MS)). [31]

Upotreba baznih ulja u motornim uljima ima veliku primenu, kao i znatna verovatnoća povezanosti motornog vozila sa paljenjem. Rirdon i ostali [32] su sprovedi određena istraživanja u poređenju lož ulja i motornih ulja. Razlikovanje nekoliko različitih marki i klasa ulja, jednih od drugih, moguće je korišćenjem masene spektrometrije i gasne hromatografije visoke temperature (HTGC-MS) i injektora (mlaznice) sa programabilnim isparivačem temperature (PTV).

Zatim, metod detekcije pomoću reakcione masene spektrometrije sa prenosom protona (PTR-MS). Tehnika je razvijena skoro isključivo za detekciju gasovitih organskih jedinjenja u vazduhu, ali je i prikazana mogućnost detekcije ubrzivača požara na licu mesta. Takođe, moguće je identifikovati supstance nakon dužeg skladištenja sagorelog materijala sa karakterističnim spektrom mase, zajedno sa analizom glavnih komponenti. [33]

Izvan okvira opštih metoda analize, urađena je studija o benzinima i njihovim modifikacijama tokom isparavanja i sagorevanja pomoću tačne hromatografije visokih performansi (HPLC). Zadatak je bio da se utvrdi policiklični aromatični ugljovodonici, jer su manje podložni izmenama tokom požara. Areni su identifikovani ne samo po vremenu zadržavanja, već i po distribuciji apsorpcionih spektralnih linija na vršnim tačkama. Eksperimentalno je dobijena relativna koncentracija alkilarena. [34]

Konačno, istraživači su dosta pažnje posvetili klasifikaciji zapaljivih tečnosti i određivanju izvora porekla. Različite vrste statističkih pristupa su suštinski deo studija u ovoj oblasti. U mnogim slučajevima za identifikaciju i klasifikaciju ubrzivača požara u ostacima paljenja, posebno zapaljivih tečnosti, je korišćena rutinska metoda GC-MS u kombinaciji sa različitim tipovima rukovanja podacima. Na primer, sveobuhvatna dvodimenzionalna gasna hromatografija u kombinaciji sa masenom spektrometrijom je poželjna tehnika za analizu složenih isparljivih i poluisparljivih smeša. Takođe, svež benzin različitih marki analiziran SPME-GC-MS metodom, čiji su podaci zatim podvrgnuti analizi glavnih komponenti (PCA) i diskriminantnoj analizi (DA) su doprineli da se utvrdi razlike naziva brendova. U stvari, do klasifikacije su dovele multivarijantne tehnike analize: PCA, PPMC i HCA koje su primenjene zajedno sa GC-MS dale rezultate za identifikaciju zapaljivih tečnosti iz njihovih ostataka uprkos efektima izazvanim sagorevanjem, vremenskim uticajem i pozadinskom matricom [35]. Mapa

samoorganizujućih karakteristika (SOFM) [36] i Bajesova meka klasifikacija [37] su primenjene u istu svrhu. Metode statističke analize postale su važan deo analize uzroka požara.

Suštinski deo identifikacije zapaljivih tečnosti je procena promena u konzistenciji jedinjenja zapaljive tečnosti koja se analizira, kao na primer, vreme u kome je zapaljiva tečnost podvrgnuta vremenskim uticajima, tj. vreme izlaganja isparljivim uslovima ili mikrobnjogradaciji. Ova dva odvojena procesa se lako mogu razlikovati pomoću PCA. Jedinjenja koja imaju nižu tačku ključanja od 155°C podložna vremenskim uticajima, dok su manje supstituisani aromati i dugolančani alkani podložni mikrobnjogradaciji. [38]

Laserski indukovana termička desorpcija (LITD) u kombinaciji sa Furierovom transformacionom masenom spektrometrijom (FTMS) korišćena [39] je kao metoda u analizi uzoraka čađi. Svrha studije je bila da se pronađu optimalni uslovi uzorkovanja za analizu čađi od sagorevanja benzina.

Alkasim i ostali [40] proučavali su degradaciju betona izloženog vatri koristeći difrakciju rendgenskih zraka (XRD), petrografski pristup i termogravimetrijsku analizu (TGA). Oni su pokazali da je beton pretrpeo dve glavne nepovratne degradacije, prvu između 70 i 120°C, što je odgovaralo gubitku vode, i ponovo između 650-700°C, što je odgovaralo dekarbonizaciji kalcijum karbonata. Kombinujući različite tehnike, autori su ukazali na to da bi istraživači trebali da budu u stanju da odrede temperaturu koju postiže beton.

Utvrdjivanje uzroka požara kod električnih instalacija gde je došlo do topljenja izolacije elektrodistributivnih žica opisano je u radu [41]. Otopljene razvodne žice su podvrgnute analizi sastava i mikrostrukture korišćenjem rendgenske fotoelektronske spektroskopije (XPS), video mikroskopa i optičkih mikroskopa. Sveobuhvatna analiza je pokazala da običan vizuelni pregled nije uvek bio najtačniji način da se utvrdi kakvu je ulogu otopljena žica imala u požaru. Metode su korišćene za detaljnije utvrđivanje konzistencije otopljene žice i na osnovu tih podataka moglo se zaključiti da li je požar izazvan otopljenim tragovima ili su samo izazvani plamenom. U drugoj studiji, otopljeni tragovi bakra su analizirani pomoću optičke mikroskopije (OM) i mikroskopije atomske sile (AFM) [42], dok se otopljeni tragovi obično ispituju pomoću OM i elektronske mikroskopije (SEM). Razlog za eksperimentisanje AFM-om je bio taj što se ovom metodom mogu napraviti 3D slike čak i veoma malih mikrostrukture. Rezultati su pokazali da AFM dobro odgovara za analizu tragova rastopljenog bakra zbog svoje posebno dobre rezolucije.

IV. ZBIRNI PRIKAZ INSTRUMENTALNIH TEHNIKA KORIŠĆENIH ZA UZORKOVANJE I ANALIZU OSTATAKA OD POŽARA

U radu je dat zbirni prikaz 34 naprednih forenzičkih tehnika i učestalost njihovog razmatranja u navedenoj stručnoj literaturi, pri čemu se GC-MS – gasna hromatografija i masena spektrometrija zajedno pojavljuju 16 puta, a u kombinaciji sa drugim tehnikama gasna hromatografija i masena spektrometrija se pojavljuje 11 puta. Zbirni prikaz

svih navedenih tehnika dat je u narednom tekstu.

Tehnika.....	Broj
AED.....	2
ATR-FTIR.....	2
DART.....	2
DART-MS.....	1
FID.....	1
FTMS.....	1
GC.....	4
GC-AED.....	1
GC-DMS.....	2
GC-FID.....	1
GC-FT-ICR-MS.....	1
GC-MS.....	16
GC-QIT-MS.....	1
GCxGC.....	1
HCA.....	1
HPLC.....	1
HT-GC.....	1
HTGC-MS.....	1
IMS.....	1
IR.....	1
LITD.....	1
MS.....	1
OM.....	1
PCA.....	2
PHC.....	1
PPMC.....	1
PTR-MS.....	1
Raman.....	3
SEM.....	1
SPME.....	3
SPME-GC-MS.....	1
TGA.....	1
XPS.....	1
XRD.....	1

V. ZAKLJUČAK

Uspešna prezentacija dokaza sa mesta požara zavisi od sposobnosti da se takvi dokazi pravilno identifikuju na mestu događaja. Dokazi koji nisu prikupljeni ili sa kojima se ne postupa pravilno, ili nisu pravilno dokumentovani ozbiljno će ugroziti svaku istragu. Prikupljanje i čuvanje dokaza je jedan od najvažnijih zadataka u vezi sa istraživanjem požara. Da bi dokazi bili prihvaćeni na sudu, mora se dokazati da su relevantni za nastali požar. Odgovornost forenzičara za požare je da dokažu da lanac čuvanja nije kompromitovan od trenutka otkrivanja do datuma kada je predstavljen na sudu. Odgovarajuća dokumentacija kroz video snimke, fotografije, skice i odgovarajuće procedure prikupljanja dokaza su odgovornost forenzičara za požare. Propust da se dokumentuje jedan korak u ovom procesu obično dovodi do toga da dokazi budu neprihvatljivi na sudu.

Iako su mnoge nove tehnike i metode za detekciju požara evoluirale decenijama od prilično rudimentarnih alata do izuzetno sofisticiranih instrumenata, inženjeri i naučnici koji se bave požarima moraju da poseduju široki spektar znanja od fundamentalnih nauka (fizike, hemije, metalurgije,

biologije, nauke o životnoj sredini...) do budućih inženjerskih primena i praktičnih testova koji bi mogli predvideti određene situacije kod utvrđivanja porekla i uzroka nastanka požara.

Na osnovu analiziranih stručnih radova koji su se bavili izučavanjem instrumentalnih tehnika za analizu ostataka od požara može se zaključiti da su dve tehnike, gasna hromatografija i masena spektrometrija, pojedinačno i u kombinaciji sa drugim tehnikama bile najviše eksploatisane. Za ove dve tehnike se može zaključiti da predstavljaju zlatni standard u analizi ostataka od požara sa stanovišta najbolje prakse.

LITERATURA

- [1] Stuart H. James, Jon J. Nordby i Suzanne Bell, "Forensic Science", New York: CRC Press, 2014.
- [2] Chasteen C., "Fire and Explosion Investigations and Forensic Analyses: Near- and Long-Term Needs Assessment for State and Local Law Enforcement," 12 2008. [Na mreži]. Available: <https://www.ojp.gov/pdffiles1/nij/grants/225085.pdf>.
- [3] Éric Stauffer, "Fire investigation and debris analysis, 2013 to 2016" 18th INTERPOL International Forensic Science Managers Symposium Lyon, France, Switzerland, 2016, pp. 163.
- [4] Hertzberg T, Blomqvist P, i Tuovinen H., "Reconstruction of an arson hospital fire", *Fire and Materials*, 31(4):225 - 240, 2007.
- [5] Rafał Borusiewicz, "Fire Debris Analysis – a Survey of Techniques Used for Accelerants Isolation and Concentration", 10, 2002. [Na mreži]. Available: https://www.researchgate.net/publication/259502748_Fire_Debris_Analysis_a_Survey_of_Techniques_Used_for_Accelerant_Isolation_and_Concentration. [Poslednji pristup 1.5.2023.].
- [6] Fernandez-Varela R, Ramirez-Villalobos F., "The comparison of two heavy fuel oils in composition and weathering pattern, based on IR, GC-FID and GC-MS analyses: Application to the prestige wreckage", *Water Research*, 2009, 43, (4): 1015-26.
- [7] Dutriez T, Courtiade M, Thiébaud D, Dulot H, Hennion MC, "Improved hydrocarbons analysis of heavy petroleum fractions by high temperature comprehensive two-dimensional gas chromatography", *Fuel*, 2010, 89, (9):2338-45.
- [8] Kaneko T, Yoshida H, Suzuki S. "The determination by gas chromatography with atomic emission detection of total sulfur in fuels used as forensic evidence", *Forensic Science International*, 2008,177, (2-3):112-9.
- [9] Kurata S, Ioyzumi T, Hirano H, Nagai M., "Discrimination between residues from kerosene or gas oil and plastics in fire debris", *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 2007, 50, (2):69-78.
- [10] Luo Z, Heffner C, Solouki T., "Multidimensional GC-fourier transform ion cyclotron resonance MS analyses: Utilizing gas-phase basicities to characterize multicomponent gasoline samples", *Journal of Chromatographic Science*, 2009, 47, (1):75-82.
- [11] Guharay SK, Dwivedi P, Hill HH Jr., "Ion mobility spectrometry: Ion source development and applications in physical and biological sciences", *Transactions on Plasma Science*, 2008, 36, (4): 1458-70.
- [12] Kanu AB, Hill HH Jr., "Ion mobility spectrometry detection for gas chromatography", *Journal of Chromatography A*, 2008,1177, (1):12-27. 10.
- [13] Lu Y, Harrington PB. "Forensic application of gas chromatography - differential mobility spectrometry with two-way classification of ignitable liquids from fire debris", *Analytical Chemistry*, 2007, 79, (17):6752.
- [14] Coates CM, Coticone S, Barreto PD, Cobb AE, Cody RB, Barreto JC. "Flammable solvent detection directly from common household materials yields differential results: An application of direct analysis in real-time mass spectrometry", *Journal of Forensic Identification*, 2008, 58, (6):624-31.
- [15] Ifa DR, Jackson AU, Paglia G, Cooks GR. "Forensic applications of ambient ionization mass spectrometry", *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2009, 394, (8).
- [16] Martin-Alberca C, Garcia-Ruiz C and Delemont O. "Study of acidified ignitable liquid residues in fire debris by solid-phase microextraction with gas chromatography and mass spectrometry". *Journal of separation science*, 2015, 38(18):3218-27.
- [17] Martin-Alberca C, Lopez-Lopez M and Garcia-Ruiz C. "Analysis of pre-ignited improvised incendiary devices using portable Raman". *Talanta*. 2015, 144:612-8.
- [18] Kerr TJ, Duncan KL and Myers L. "Application of vibrational spectroscopy techniques for material identification from fire debris". *Vibrational Spectroscopy*. 2013. 68:225-35.
- [19] Yadav V. K., Nigman K. i Srivastava A., "Forensic investigation of arson residue by infrared and Raman spectroscopy: from conventional to non-destructive techniques", *Med. Sci. Law*, 60 (3), pp. 206-215, (2020).
- [20] Martin-Alberca C, Ojeda FE and Garcia-Ruiz C. "Study of Spectral Modifications in Acidified Ignitable Liquids by Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy". *Applied spectroscopy*. 2016. 70(3):520-30.
- [21] Pedroso MP, de Godoy LA, Ferreira EC, Poppi RJ, Augusto F. "Identification of gasoline adulteration using comprehensive two-dimensional gas chromatography combined to multivariate data processing", *Journal of Chromatography A*, 2008, 1201, (2):176-82.
- [22] Sandercock PML. "A survey of Canadian gasolines", *Journal of the Canadian Society of Forensic Science*, 2007, 40, (3): 105-30.
- [23] Zhang J. and Yang Q. "GC/MS analysis on combustion smoke of different flammable liquids". *Procedia Engineering*. 2014. 71:139-44.
- [24] Swierczynski M. J., Grau K., Schmitz M. i Kim J., "Detection of gasoline residues present in household materials via headspace-solid phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry" *J. Anal. Chem.*, 75 (1), pp. 44-55, (2020).
- [25] Dhabbah A., "Detection of petrol residues in natural and synthetic textiles before and after burning using SPME and GC-MS", *Aust. J. Forensic Sci.*, 52 (2), pp. 194-207, (2020),.
- [26] Guerrero G., Chen E., Powers R. i Kammrath B. W., "The potential interference of body products and substrates to the identification of ignitable liquid residues on worn clothing", *Foren. Chem.*, 12, pp. 46-57, (2019).
- [27] Barnett I., Bailey F. C. i Zhang M., "Detection and classification of ignitable liquid residues in the presence of matrix interferences by using direct analysis in real time mass spectrometry", *J. Forensic Sci.*, 64 (5), pp. 1486-1494, (2019).
- [28] Zhang Y., Zhu X., Zhao C., Peng B. , Yang S. i Xi L., "Study of diesel residues from fire debris in a bus arson experiment", 2019. 9th International Conference on Fire Science and Fire Protection Engineering, (2019).
- [29] Patel S. V. i Lurie I. S., "The use of portable separation devices for forensic analysis: a review of recent literature", *Foren. Chem.*, 26, (2021).
- [30] Sudol P. E., Pierce K. M., Prebhalo S. E., Skogerboe K. J., Wright B. W. i Synovec R.E., "Development of gas chromatographic pattern recognition and classification tools for compliance and forensic analyses of fuels: a review", *Anal. Chim. Acta*, 1132, pp. 157-186, (2020).
- [31] Sun X., Zimmermann C.M., Jackson G.P., Bunker C.E., Harrington P.B., "Classification of jet fuels by fuzzy rule-building expert systems applied to two-way data by fast gas Chromatography—Fast scanning quadrupole ion trap mass spectrometry", *Talanta*, 2010, in press, DOI:10.1016/j.talanta.2010.05.063.
- [32] Reardon M.R., Allen L., Bender E.C., Boyle K.M., "Comparison of motor oils using high-temperature gas chromatography-mass spectrometry", *Journal of Forensic Sciences*, 2007, 52, (3):656-63.
- [33] Blake R.S., Monks P.S., Ellis A.M., "Proton-transfer reaction mass spectrometry", *Chemical Reviews*, 2009, 109, (3):861-96.
- [34] Temerdashev Z.A., Kolychev I.A. "Study and analysis of gasolines modified during evaporation and burning", *Inorganic Materials*, 2009, 45, (14):4-8.
- [35] Baerncopf J.M., McGuffin V.L, Smith R.W., "Association of Ignitable Liquid Residues to Neat Ignitable Liquids in the Presence of Matrix Interferences Using Chemometric Procedures". *Journal of Forensic Sciences* 2011 January; 56 (1) :70-81.
- [36] Mat-Desa W.N.S., NicDačić N., Ismail D., Savage K., "Application of Unsupervised Chemometric Analysis and Self-organizing Feature Map (SOFM) for the Classification of Lighter Fuels". *Analytical Chemistry* 2010 August; 82 (15):6395-6400.
- [37] Williams M.R., Sigman M.E., Lewis J., McHugh Pitan K. "Combined target factor analysis and Bayesian soft-classification of interference-

- contaminated samples: Forensic Fire Debris Analysis". Forensic Science International 2012. August; 222: 373-386.
- [38] Turner D.A., Goodpaster J.V., "Comparing the effects of Weathering and Microbial Degradation on Gasoline Using Principal Component Analysis". Journal of Forensic Sciences 2012 January; 57 (1):64-69.
- [39] Hutches K.D., Wang D., Land D.P., "The Effect of Laser Power Density on the Observed Products of Combustion of Gasoline Using Laser-Induced Thermal Desorption with Fourier Transform Mass Spectrometry". Journal of Forensic Sciences 2013 January; 58(S1): S192-S198.
- [40] Alqassim M.A., Jones M.R., Berlouis L.E., Daeid. N. Nic, "A thermoanalytical, X-ray diffraction and petrographic approach to the forensic assessment of fire affected concrete in the United Arab Emirates". Forensic science international 2016, 264:82-8.
- [41] Wu Y., Han D., "Metallurgical and composition analysis of melted marks due to electrical failures". Mechanics 2012; 18(2): 227-232.
- [42] Gao A., Zhao C.Z., Di M., Gao W., Zhang M., Xia D.W., "Microscopic Investigation of a Copper Molten Mark by optical Microscopy (OM) and Atomic Force Microscopy (AFM)". Procedia Engineering 2011; 11: 100-106.