

SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (SEM/EDX) IN FORENSIC SCIENCES: APPLICATION IN THE ANALYSIS OF GUNSHOT RESIDUES

Mitasin Beqiri

American University of Europe – FON, Republic of North Macedonia, mitasin.beqiri@fon.edu.mk

ORCID ID: 0009-0007-0601-6854

Senat Saliu

Independent researcher, Republic of North Macedonia, senat.s@hotmail.com

ORCID ID: 0000-0002-8396-9444

Maja Neshkovska

Republic of North Macedonia, maja.neskovska9@gmail.com

ORCID ID: 0009-0004-1296-0110

Abstract: This scientific paper addresses the importance and development of forensic microscopy as one of the most significant contemporary methods in the field of forensic sciences and criminal investigations. Through a theoretical analysis, the paper presents the concept of forensic science, its historical development, and the role of scientific methods in the process of detection, examination, and interpretation of material evidence. Particular attention is devoted to the application of physicochemical methods, especially the use of scanning electron microscopy (SEM) combined with energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS/EDX), as a modern technique for structural and elemental characterization of materials of different origins. The paper analyzes the operating principle of the scanning electron microscope, its main components, image formation, types of signals, and possibilities of microanalysis. Special emphasis is placed on the application of the SEM/EDS method in the analysis of gunshot residue (GSR), where the determination of morphological characteristics and chemical composition of particles enables the acquisition of valuable evidence in criminal proceedings. The analysis shows that forensic microscopy, particularly the SEM/EDS method, represents an essential tool in modern forensic laboratories and contributes significantly to increasing the accuracy of examinations, identifying perpetrators, and more effectively clarifying criminal offenses.

Keywords: forensic sciences, forensic microscopy, SEM/EDS, microtraces, gunshot residue (GSR).

MIKROSKOPIA ELEKTRONIKE E SKANIMIT (SEM/EDX) NË SHKENCAT FORENZIKE: APLIKIMI NË ANALIZËN E GJURMËVE NGA QITJA

Mitasin Beqiri

American University of Europe – FON, mitasin.beqiri@fon.edu.mk

ORCID ID: 0009-0007-0601-6854

Senat Saliu

Independent researcher, Republic of North Macedonia, senat.s@hotmail.com

ORCID ID: 0000-0002-8396-9444

Maja Neshkovska

Republic of North Macedonia, maja.neskovska9@gmail.com

ORCID ID: 0009-0004-1296-0110

Abstrakt: Ky punim shkencor trajton rëndësinë dhe zhvillimin e mikroskopisë forenzike si një nga metodat bashkëkohore më të rëndësishme në fushën e shkencave forenzike dhe hetimeve kriminalistike. Nëpërmjet analizës teorike paraqitet koncepti i forenzikës, zhvillimi i saj historik dhe roli i metodave shkencore në procesin e zbulimit, ekzaminimit dhe interpretimit të provave materiale. Vëmendje e veçantë i kushtohet aplikimit të metodave fiziko-kimike, veçanërisht përdorimit të mikroskopisë elektronike të skanimit (SEM) të kombinuar me spektrometrinë e shpërndarjes së energjisë së rezeve X (EDS/EDX), si një teknikë moderne për karakterizimin strukturor dhe elementar të materialeve me origjinë të ndryshme. Punimi analizon parimin e funksionimit të mikroskopit elektronik të skanimit, pjesët përbërëse të tij, formimin e imazhit, llojet e sinjaleve dhe mundësitë e mikroanalizës. Një rëndësi e veçantë i kushtohet përdorimit të metodës SEM/EDS në analizën e gjurmëve nga qitja (Gunshot Residue – GSR), ku përcaktimi i karakteristikave morfologjike dhe përbërjes kimike të grimcave mundëson sigurimin e provave të rëndësishme në procedurat penale. Rezultatet e analizës tregojnë se mikroskopia forenzike, veçanërisht metoda

SEM/EDS, paraqet një instrument të domosdoshëm për laboratorët modernë forenzikë dhe kontribuon në rritjen e saktësisë së ekzaminimeve, identifikimin e autorëve dhe zbardhjen më efikase të veprave penale.

Fjalët kyçe: shkencat forenzike, mikroskopia forenzike, SEM/EDS, mikrogjurmët, mbetjet e qitjes (GSR).

1. HYRJE

Që në fillimet e civilizimit, me zhvillimin e gjyqësorit shfaqet edhe nevoja për njohuri dhe aftësitë profesionale të njerëzve të cilët dinë më shumë për përcaktimin e fakteve që janë të rëndësishme në lëndë gjyqësore individuale. Pikërisht për këtë arsye, do të thotë, për shkak të përcaktimit të fakteve, Romakët e lashtë në rast të vdekjes së paqartë i kanë ekspozuar trupat e vdekur në tregun Forum Romanum, me qëllim me bashkëpunim të personave me dije dhe përvojë profesionale të veçanta, ti ndihmohet gjykatës në përcaktimin e arsyes për vdekjen ose në zgjidhjen e çështjeve tjera të rëndësishme për punën e gjyqësorit. Duke pasur parasysh që tregut i është gjykuar, fjala latine forum (treg) në kuptimin figurativ do të thotë edhe gjykatë, dhe nga fjala latine forensis është shfaqur fjala forenzik, e ashtu quajtura gjyqësore.

Me zhvillimin e disiplinave të ndryshme shkencore dhe profesionale, u rrit edhe nevoja për njohuri të veçanta profesionale, të cilat ekspertët i paraqesin para gjykatës me qëllim që të sqarojnë mënyrën dhe mekanizmin e kryerjes së veprës penale, pasojat e shkaktuara, si dhe fakte të tjera juridikisht relevante. Prandaj, në gjyqësorin bashkëkohor dallohen ekspertët e përhershëm gjyqësorë, të emëruar nga gjykata, si dhe ekspertët ad hoc, të cilët gjykata i angazhon sipas nevojës në rastet kur kërkohen njohuri të veçanta profesionale për zgjidhjen e çështjeve gjyqësore individuale.

Në bazë të asaj që u theksua më sipër, shkenca forenzike përfshin të gjitha ato shkenca dhe disiplina shkencore që, përmes metodave të tyre të veçanta, mund t'i ndihmojnë gjykatës në zgjidhjen e çështjeve profesionale, për të cilat gjykatësit, si juristë, nuk disponojnë njohuritë e nevojshme për të dhënë përgjigje. Thënë më thjeshtë, ato janë shkenca me rëndësi për procedurat gjyqësore, pasi, përmes metodave, njohurive dhe ekspertizës profesionale të specialistëve të tyre, i ndihmojnë gjykatës të përcaktojnë faktet relevante për marrjen e një vendimi të drejtë.

2. FORENZIKA: NOCIONI DHE ZHVILLIMI HISTORIK

Që në kohët e hershme, hetimi forenzik u mbështet në vëzhgimin dhe interpretimin e provave fizike. Megjithatë, vetëm në gjysmën e dytë të shekullit XIX këto metoda filluan të zbatoheshin në mënyrë sistematike, duke rritur saktësinë dhe besueshmërinë e përfundimeve hetimore (Eckert, 1996, p. 11). Në këtë periudhë u krijuan edhe njësi të specializuara policore për përpunimin dhe analizimin e provave materiale, ndërsa autoritetet bashkëpunonin me institucione akademike dhe laboratorë të specializuar (Roux et al., 2021).

Zhvillimi i identifikimit kriminalistik kaloi nga metoda antropometrike e Bertillon-it, e shoqëruar me fotodokumentim, te identifikimi përmes gjurmëve të gishtërinjve. Më pas, ekzaminimi forenzik u zgjerua edhe në analizën e njollave biologjike, flokëve, substratit dhe materialeve të tjera të gjetura në vendin e ngjarjes (Hamlin, 2021).

Bazat e shkencës moderne forenzike u konsoliduan në fund të shekullit XIX, duke krijuar premisa për zhvillimet e mëvonshme. Një moment i rëndësishëm ishte themelimi i Akademisë Amerikane të Shkencave Forenzike (AAFS) në vitin 1948, e cila bashkoi disiplina të ndryshme si patologjia, biologjia, toksikologjia, kriminalistika, antropologjia dhe mjekësia ligjore (American Academy of Forensic Sciences [AAFS], 2026).

Zhvillimi i kimisë, fizikës, biologjisë dhe mjekësisë ndikoi në kalimin nga vlerësimet subjektive drejt ekzaminimit shkencor të provave materiale. Fotografia, kimia analitike, mikroskopia dhe patologjia mundësuan dokumentimin dhe analizimin më të saktë të provave, substancave dhe mostrave biologjike.

Zhvillimi i shkencave forenzike ndryshoi ndërmjet vendeve, por në disa shtete evropiane ato u institucionalizuan herët përmes qendrave gjyqësore dhe institucioneve të specializuara. Me avancimin e laboratorëve dhe teknikave shkencore, toksikologjia forenzike dhe serologjia u shndërruan në disiplina të rëndësishme në fillim të shekullit XX (Tomić, 2018., p. 9).

3. APLIKIMI I METODAVE FIZIKE – KIMIKE NË FUSHËN E SHKENCAVE FORENZIKE

Forenzika nënkupton aplikimin e disiplinave shkencore dhe teknologjive të ndryshme për t'iu përgjigjur çështjeve me interes për sistemin e drejtësisë (NIST, 2024). Zhvillimi i teknologjive të avancuara ka ndikuar ndjeshëm në punën forenzike dhe policore, duke mundësuar përdorimin e sistemeve të automatizuara për identifikim, analizën e ADN-së, kromatografinë, spektrometrinë e masës dhe metoda të tjera analitike (NIST, 2024).

Një nga teknologjitë me rëndësi në ekzaminimet forenzike është mikroskopia elektronike skanuese e kombinuar me spektroskopinë me rreze X me shpërndarje të energjisë (SEM/EDX), veçanërisht në analizën e gjurmëve të mbetura nga qitja me armë zjarri. Kjo metodë mundëson vlerësimin e karakteristikave morfologjike dhe përbërjes elementare të grimcave GSR. Megjithatë, prania e GSR në mostrat e një personi nuk dëshmon në mënyrë të pakundërshtueshme

se ai ka qëlluar me armë zjarri, pasi grimcat mund të lidhen edhe me ekspozimin ndaj një mjedisi ku ka ndodhur qitje ose me kontaktin me materiale të kontaminuara (Mršić & Žugaj, 2007, pp. 5–6).

Metodat fiziko-kimike kanë rëndësi të veçantë në identifikimin dhe karakterizimin e provave materiale. Ndër teknikat më të përdorura përfshihen kromatografia e gazit e kombinuar me spektrometrinë e masës (GC-MS), spektroskopia FTIR dhe Raman, SEM/EDS ose SEM/EDX, si dhe difraksioni i rrezeve X (XRD) (Radosavljević-Mihajlović, 2009, p. 223). Zhvillimi shkencor dhe teknologjik ka zgjeruar mundësitë e kriminalistikës për përdorimin e metodave të shkencave natyrore dhe teknike në analizimin e provave dhe identifikimin e autorëve të veprave penale (Maksimović et al., 1998).

Një element thelbësor në hetimin kriminal është sigurimi i vendit të ngjarjes dhe identifikimi, karakterizimi e analizimi i provave materiale me origjinë fizike, kimike ose biologjike (Wüllenweber & Giles, 2021). Vendi i ngjarjes përfshin jo vetëm lokacionin ku ka ndodhur akti kriminal, por edhe hapësirat, personat, objektet dhe gjurmët që lidhen me të (Primorac et al., 2001, p. 79). Ai mund të jetë primar ose sekondar, në varësi të vendit ku ndodhen trupi, mjetet ose provat e lidhura me veprën penale.

Ekzaminimi i vendit të ngjarjes dhe lidhja logjike ndërmjet provave materiale, viktimës dhe autorit të dyshuar janë thelbësore për zgjidhjen e rasteve kriminale (Tomić, 2018, pp. 26–27). Në këtë proces përdoren metoda nga fizika, kimia, kimia fizike, biologjia dhe gjeokimia. Përzgjedhja e metodës analitike varet nga natyra e provës dhe lloji i veprës penale, ndërsa metodat duhet të jenë të verifikuara dhe të pranuar nga komuniteti shkencor. Aplikimi i metodës shkencore kërkon verifikim të vazhdueshëm të fakteve dhe një qasje kritike ndaj hipotezave, të mbështetura në të dhëna të përcaktuara dhe të verifikueshme.

4. MIKROSKOPIA FORENZIKE DHE ANALIZA E MIKROGJURMËVE ME MIKROSKOPIN ELEKTRONIK TË SKANIMIT (SEM/EDS)

Traseologjia është degë e teknikës kriminalistike që merret me studimin, analizimin dhe interpretimin e gjurmëve të krijuara në lidhje me veprën penale. Ajo synon identifikimin, klasifikimin dhe vlerësimin e gjurmëve materiale me rëndësi për zbulimin dhe provimin e veprave penale. Gjurmët mund të japin të dhëna për ekzistencën e veprës, mjetet dhe mënyrën e kryerjes së saj, si dhe për vendin, kohën dhe rrethanat e ngjarjes.

Si prova materiale, gjurmët përfaqësojnë ndryshime në mjedis të shkaktuara nga njeriu, kafsha ose objekte të ndryshme dhe mund të jenë prova direkte ose indirekte. Ato klasifikohen në gjurmë me origjinë njerëzore, shtazore, bimore, të objekteve dhe gjurmë të shkaktuara nga forca të ndryshme.

Mikrogjurmët janë ndryshime mikroskopike që janë të padukshme ose vështirë të dallueshme me sy të lirë, por që mund të mbeten në vendin e ngjarjes. Zbulimi i tyre përfshin këqyrjen vizuale dhe përdorimin e pajisjeve optike, ndërsa fiksimi dhe marrja e tyre përshtaten me natyrën e gjurmës dhe materialin ku ndodhet. Për këtë qëllim mund të përdoren marrja e drejtpërdrejtë e objektit, gërryerja, thithja, lentet ngjitëse dhe mjete të tjera të përshtatshme. Për shkak të ndjeshmërisë së mikrogjurmëve, paketimi dhe transporti duhet të realizohen në mënyrë që të shmangët dëmtimi ose kontaminimi i mostrave (Đukić, 2015).

Për ekzaminimin laboratorik të mikrogjurmëve përdoren metoda bashkëkohore, ndër të cilat rëndësi të veçantë ka mikroskopia elektronike skanuese (SEM), e kombinuar me spektroskopinë me shpërndarje të energjisë së rrezeve X (EDS/EDX). Kjo teknikë mundëson karakterizimin strukturor dhe elementar të materialeve, duke kërkuar vetëm sasi të vogla mostre dhe duke ofruar mundësi të analizës me dëmtim minimal të materialit.

SEM/EDS përdoret në fusha të ndryshme forenzike, përfshirë gjeoforenzikën, arkeologjinë forenzike, ekzaminimin e flokëve dhe tekstileve, mjekësinë forenzike dhe biokiminë. Një aplikim i rëndësishëm është analiza e mbetjeve nga qitja (GSR), ku metoda mundëson karakterizimin morfologjik dhe elementar të grimcave individuale (Martiny et al., 2008).

Në analizën e GSR, SEM/EDS mundëson vlerësimin e morfologjisë dhe përbërjes elementare të grimcave. Karakteristikat morfologjike dhe prania e elementeve si plumbi (Pb), antimoni (Sb) dhe bariumi (Ba) mund të përdoren si tregues në ekzaminimin forenzik të mbetjeve të qitjes. Përbërja elementare dhe karakteristikat fizike të grimcave vlerësohen së bashku për të ndihmuar në karakterizimin e materialit të ekzaminuar.

5. MIKROSKOPI ELEKTRONIK I SKANIMIT (SEM)

Pjesët përbërëse të SEM

Të gjitha pajisjet SEM përbëhen nga disa komponentë kryesorë: kolona elektronike, e cila gjeneron dhe fokuson rrezet e elektroneve; dhoma e mostrës, ku rrezja ndërvepron me kampionin; detektorët, të cilët regjistrojnë sinjalet e krijuara nga ky ndërveprim; si dhe sistemi i përpunimit dhe shfaqjes së imazhit, i cili i shndërron sinjalet në imazhe dhe të dhëna të analizueshme.

Në pjesën e sipërme të kolonës elektronike ndodhet topi elektronik, ku krijohet dhe përshpejtohet rrezja e elektroneve. Ekzistojnë disa lloje të topave elektronikë, ndër të cilët wolfram, LaB₆ (lantan heksaborid) dhe emetimi

nëpërmjet fushës elektrike (field emission). Pavarësisht dallimeve në material dhe parim fizik, të gjithë kanë për qëllim krijimin e një rrezeje elektronike të qëndrueshme dhe të fokusuar për analizimin e sipërfaqes së mostrës. Rrezja elektronike kalon nëpër sistemin e lenteve magnetike dhe diafragmave, të cilat e rikonvergojnë dhe e fokusojnë atë. Më pas, elektromagnetët skanues e devijojnë rrezën në mënyrë të kontrolluar, ndërsa lentja përfundimtare e fokuson në një pikë shumë të vogël mbi sipërfaqen e kampionit. Kjo mundëson skanimin e kontrolluar dhe analizimin e detajuar të sipërfaqes.

Në dhomën e mostrës ndodhet platforma për pozicionimin e kampionit dhe hapësira për vendosjen e detektorëve. Kur rrezja elektronike ndërvepron me kampionin, energjia e elektroneve shkakton emetimin e sinjaleve të ndryshme. Detektorët i regjistrojnë këto sinjale, të cilat më pas përpunohen për krijimin e imazheve dhe të dhënave që përdoren për analizën e mostrës (Mršić & Žugaj, 2007, p. 9).

Parimi i krijimit të fotografisë

Ndryshe nga mikroskopi optik, SEM nuk krijon një imazh të drejtpërdrejtë të kampionit, por ndërton një imazh virtual nga sinjalet e emetuara prej sipërfaqes së tij. Tufa elektronike skanon sipërfaqen vijë pas vije, sipas një modeli të përcaktuar, duke ndriçuar në çdo moment vetëm një pikë të kampionit. Ndryshimet në intensitetin e sinjaleve gjatë skanimit pasqyrojnë ndryshimet strukturore dhe përbërëse të sipërfaqes.

Pajisjet moderne SEM i konvertojnë sinjalet analoge të detektorëve në vlera numerike, të cilat mund të përpunohen dhe analizohen në mënyrë digjitale. Në sistemet tradicionale të shfaqjes përdoret tubi me rreze katodike (Cathode Ray Tube – CRT), i cili përmban një burim elektronesh, elektromagnetë devijues dhe një shtresë fosfori.

Në CRT, tufa elektronike drejtohet dhe skanohet në mënyrë të sinkronizuar me tufën e SEM-it. Shtresa e fosforit e shndërron energjinë e elektroneve në dritë, ndërsa intensiteti i saj përcaktohet nga sinjali i marrë nga kampioni. Në këtë mënyrë, sinkronizimi i skanimit të SEM-it dhe CRT-së mundëson krijimin e imazhit që paraqet sipërfaqen e kampionit (Mršić & Žugaj, 2007, p. 10).

Optika elektronike

Thjerrëzat – Thjerrëzat magnetike në kolonën elektronike funksionojnë në mënyrë të ngjashme me thjerrëzat optike, duke konvergjuar dhe fokusuar tufën elektronike. Ato kanë për qëllim zvogëlimin dhe fokusimin e imazhit të kampionit, duke krijuar një tufë elektronike sa më të ngushtë dhe të kontrolluar për skanimin e sipërfaqes.

Rezolucioni – Rezolucioni tregon aftësinë e SEM-it për të dalluar detaje shumë të vogla dhe për të veçuar dy pika të afërta. Ai shprehet zakonisht në angstrom (Å) ose nanometër (nm), ku një vlerë më e vogël tregon rezolucion më të mirë. Për shembull, 10 Å përfaqëson rezolucion më të lartë se 20 Å.

Madhësia e pikës – Madhësia e pikës së tufës elektronike në sipërfaqen e kampionit ndikon drejtpërdrejt në rezolucionin e SEM-it. Një pikë më e vogël mundëson dallimin e detajeve më të imëta. Ajo ndikohet nga diametri i tufës, distanca e punës, tensioni përshpejtues, lloji i sinjalit, thellësia e depërtimit të elektroneve dhe përbërja e kampionit.

Gama e ndërveprimit – Tufa elektronike depërton në kampion dhe krijon sinjale në një zonë të caktuar të materialit. Kjo zonë quhet gama e ndërveprimit. Madhësia dhe forma e saj varen nga lloji i sinjalit, përbërja e kampionit dhe energjia përshpejtuese e elektroneve. Meqenëse kjo zonë zakonisht është më e madhe se pika elektronike, ajo ndikon në kufirin real të rezolucionit të SEM-it.

Përshpejtimi i elektroneve sipas tensionit – Tensioni përshpejtues përcakton energjinë e elektroneve primare dhe thellësinë e depërtimit të tyre në kampion. Rritja e energjisë mund të zgjerojë gamën e ndërveprimit dhe të ndikojë në rezolucion, por në kushte të caktuara mund të përmirësojë fokusimin duke reduktuar devijimet në kolonën elektronike. Efekti përfundimtar varet nga karakteristikat e kampionit, kushtet e punës së SEM-it dhe lloji i sinjalit të analizuar (Mršić & Žugaj, 2007, p. 10).

Llojet e sinjaleve

Elektronet sekondare (SE) – Elektronet sekondare çlirohen nga atomet e kampionit si rezultat i ndërveprimit me tufën elektronike primare. Me energji shumë të ulët, ato dalin vetëm nga një shtresë shumë pranë sipërfaqes dhe mundësojnë imazhe me rezolucion të lartë. Kontrasti i imazhit lidhet kryesisht me topografinë e sipërfaqes; pjesët e ngritura shfaqen më të ndritshme, ndërsa zonat e thelluara më të errëta. Për këtë arsye, SE japin informacion të detajuar mbi strukturën dhe morfologjinë e sipërfaqes.

Elektronet e shpërhapura mbrapsht (BSE) – BSE janë elektrone primare që kthehen pas ndërveprimit me bërthamat atomike të kampionit. Kanë energji më të lartë dhe krijojnë një zonë më të madhe ndërveprimi, çka mund të ulë rezolucionin. Kontrasti i imazhit lidhet kryesisht me numrin atomik të elementeve: materialet me numër atomik më të lartë shfaqen më të ndritshme, ndërsa ato me numër më të ulët më të errëta. Prandaj, imazhet BSE janë veçanërisht të dobishme për vlerësimin e përbërjes elementare dhe heterogjenitetit të kampionit.

Thellësia e fushës – SEM karakterizohet nga një thellësi fushe dukshëm më e madhe se mikroskopët optikë. Ajo përcakton intervalin brenda të cilit imazhi mbetet i fokusuar dhe i qartë. Thellësia e madhe e fushës mundëson paraqitjen e detajuar të sipërfaqeve të ndërlikuara dhe strukturave tredimensionale.

Ndryshe nga mikroskopët optikë, ku rritja e zmadhimit zakonisht zvogëlon thellësinë e fushës, SEM mundëson një ndarje më të madhe ndërmjet zmadhimit dhe thellësisë së fushës. Kjo lidhet me këndin shumë të vogël të divergjencës së tufës elektronike dhe me distancën e punës ndërmjet lentes përfundimtare dhe sipërfaqes së kampionit. Si rezultat, SEM ofron imazhe të qarta dhe me karakteristika tredimensionale të sipërfaqeve komplekse.

Mikroanaliza

Rrezet X karakteristike – Rrezet X krijohen kur tufa elektronike primare e SEM-it largon një elektron nga një shtresë e brendshme e atomit të kampionit. Një elektron nga një shtresë më e jashtme kalon për të plotësuar zbrazëtinë dhe diferenca e energjisë çlirohet si foton i rrezatimit X. Meqenëse energjitë e niveleve elektronike janë karakteristike për çdo element, rrezet X mundësojnë identifikimin dhe përcaktimin e përbërjes elementare përmes EDS/EDX.

Spektrometri i rrezeve X – Spektrometri mbledh dhe klasifikon rrezet X sipas energjisë së tyre. Spektri paraqet numrin e sinjaleve në raport me energjinë, ndërsa majat karakteristike tregojnë elementet e pranishme në kampion. Pozicioni i majës identifikon elementin, ndërsa intensiteti i saj jep informacion mbi përqendrimin relativ të tij.

Linjat e rrezeve X – Elementet mund të emetojnë rreze X me energji të ndryshme, të lidhura me kalimet ndërmjet niveleve elektronike K, L, M etj. Këto linja karakteristike janë të rëndësishme për identifikimin dhe analizën elementare të materialeve me EDS/EDX të kombinuar me SEM.

Harta e rrezeve X – Për shkak të gamës më të madhe të ndërveprimit, imazhet e krijuara nga rrezet X kanë rezolucion më të ulët se ato të elektroneve SE dhe BSE. Ato paraqiten kryesisht si harta elementare, të cilat tregojnë shpërndarjen hapësinore të një elementi në kampion. Sistemet moderne EDS/EDX mund të krijojnë edhe harta në shkallë gri që paraqesin intensitetin relativ të sinjalit.

Analiza e rrezeve X – Rrezet X përdoren kryesisht për analizë elementare cilësore dhe sasiore. Analiza cilësore përcakton praninë e elementeve përmes majave karakteristike në spektër, ndërsa analiza sasiore vlerëson përqendrimin relativ të tyre. Kjo e fundit është më komplekse për shkak të ndërveprimeve të ndryshme ndërmjet rrezeve X dhe materialit të kampionit. Megjithatë SEM ofron rezolucion të lartë dhe mundësi të avancuara mikroanalitike, funksionimi i tij konvencional kërkon ruajtjen e vakumit të lartë në dhomën e kampionit (Mršić & Žugaj, 2007, p. 10).

Analiza e gjurmëve nga qitja me metodat SEM/EDX

Gjurmët materiale nga qitja përbëhen nga komponentë të ndryshëm, ndër të cilët përfshihen grimcat e bërthamës së plumbit dhe të këmishës së plumbit, grimcat e barutit të djegura dhe pjesërisht të djegura, mbetjet e blozës, vajrat dhe lubrifikantët, si dhe grimcat që rrjedhin nga përbërja e kapsulës iniciuese. Shumica e këtyre komponentëve nxirren nga tyta e armës së zjarrit me shpejtësi të madhe, duke formuar një re grimcash. Një pjesë tjetër e tyre mund të dalë nga pjesët përbërëse të armës së zjarrit, siç janë lidhja ndërmjet tytës dhe cilindrit rrotullues të revolverit, nxjerrësi i gëzhgojave të armët automatike dhe gjysmëautomatike, si dhe pjesë të tjera mekanike të armës. Pas daljes nga arma e zjarrit, grimcat humbasin gradualisht shpejtësinë për shkak të rezistencës së ajrit dhe një pjesë e tyre depozitohet në sipërfaqe të ndryshme, përfshirë duart e personit që ka kryer qitjen ose të personave të tjerë që kanë qenë në afërsi të drejtpërdrejtë gjatë procesit të qitjes.

Në hetimin dhe sqarimin e veprave të ndryshme penale, në të cilat arma e zjarrit paraqet mjetin e kryerjes së veprës penale (si: vrasje, tentim vrasjeje, plagosje, grabitje të armatosur, vetëvrasje etj.), zakonisht parashtrihen dy pyetje themelore të cilave duhet t'u jepet përgjigje: A ka qëlluar i dyshuari me armë zjarri dhe cila ka qenë distanca e qitjes? Ekspertët forenzikë në mbarë botën përpiqen të japin përgjigje sa më të besueshme për këto pyetje, megjithatë deri më sot nuk është arritur një përcaktim absolut dhe plotësisht i sigurt në çdo rast individual. Një rëndësi të veçantë në përcaktimin e faktit nëse një person ka qëlluar me armë zjarri ka zbulimi dhe analiza e gjurmëve të qitjes, të ashtuquajturat grimca GSR (Gunshot Residue), të cilat mund të gjenden në duart, veshjet ose objektet e tjera që kanë qenë në kontakt me procesin e qitjes. Deri në periudhën e zhvillimit të metodave moderne analitike, një nga metodat tradicionale për zbulimin e mbetjeve të barutit në duar ka qenë Testi i Gonzalez-it (Teodoro González, Los Angeles, SHBA), i njohur në praktikën tonë si “doreza e parafinës”. Kjo metodë bazohej në aplikimin e parafinës së shkrirë mbi pëllëmbën e personit dhe më pas në heqjen e shtresës së ftohur dhe të ngurtësuar të parafinës, e cila formonte një lloj “doreze” ku mund të mbeteshin gjurmët e substancave të dyshuara. Zbulimi i grimcave të barutit kryhej më tej në laboratorët ekspertues të balistikës, ku në sipërfaqen e parafinës së përgatitur aplikoheshin reagenti i difenilaminës. Ky reagent përdorej për identifikimin e nitrateve, të cilat janë përbërës të rëndësishëm të barutit të përdorur në municionet moderne. Nëse difenilamina binte në kontakt me nitratat e mbetura nga baruti, zhvillohej një reaksion kimik me ndryshim karakteristik të ngjyrës, duke treguar praninë e mundshme të mbetjeve të qitjes. Megjithatë, për shkak të specifikës së ulët dhe mundësisë së rezultateve jo të sakta, kjo metodë është zëvendësuar gradualisht nga teknika më bashkëkohore dhe më të besueshme, si analiza e grimcave GSR me mikroskop elektronik skanues të kombinuar me spektrometrinë me shpërndarje të energjisë (SEM/EDS).

Megjithatë, përveç barutit, nitratat gjenden edhe në sërë substanca të tjera, si hiri, urina, birra, llaqet nitro, detergjentët, kremrat kozmetikë, kremrat dezinfektues, dezinfektuesit etj. Eksperti i balistikës, në bazë të përvojës, sipas formës së grimcës së ngjyrosur, duhet të dallojë nëse bëhet fjalë për nitrat me origjinë nga baruti apo ndonjë lëndë tjetër, që do të thotë se gabimet janë të mundshme dhe në raste të tilla rreziku i gabimeve është i papranueshëm, sepse ka të bëjë me fatet njerëzore.

Megjithatë, përveç barutit, nitratat mund të gjenden edhe në një numër të madh substancash të tjera, si hiri, urina, birra, llaqet nitro, detergjentët, kremrat kozmetikë, kremrat dezinfektues, dezinfektuesit dhe materiale të tjera të ndryshme. Për këtë arsye, eksperti i balistikës, duke u bazuar në përvojën profesionale dhe në karakteristikat e grimcave të zbuluara, veçanërisht në formën dhe mënyrën e ngjyrosjes së tyre, duhet të vlerësojë nëse bëhet fjalë për nitrat me origjinë nga mbetjet e qitjes apo për nitrat që kanë ardhur nga burime të tjera. Kjo tregon se metoda paraqet mundësi për gabime në interpretim, ndërsa në praktikën forenzike një rrezik i tillë është i papranueshëm, pasi rezultatet e ekspertimit mund të kenë ndikim të drejtpërdrejtë në fatin e personave të përfshirë në procedurat penale.

Në dallim nga metodat e tjera të analizës së gjurmëve të qitjes, të cilat bazohen në identifikimin e nitrates dhe nitrateve të pranishme në grimcat e barutit duke përdorur tregues të ndryshëm, kryesisht me karakter shkatërrues, metoda e analizimit të gjurmëve të qitjes me mikroskop elektronik skanues (SEM) dhe detektor me rreze X me shpërndarje të energjisë (EDX/EDS) bazohet në zbulimin dhe karakterizimin e grimcave metalike që burojnë nga kapsula iniciuese e municionit. Deri më sot, praktika shkencore dhe forenzike ka treguar se asnjë metodë analitike nuk është plotësisht ideale dhe pa kufizime. Megjithatë, metoda që kombinon SEM me EDX/EDS paraqet një përparësi të dukshme krahasuar me metodat tradicionale, pasi mundëson përcaktimin njëkohësisht të karakteristikave morfologjike dhe përbërjes elementare të grimcave individuale të mbetjeve të qitjes (GSR). Për këtë arsye, kjo metodë konsiderohet ndër teknikat më të besueshme dhe më të avancuara për ekzaminimin forenzik të gjurmëve të armës së zjarrit.

Metoda e analizës së grimcave GSR me ndihmën e pajisjeve SEM/EDX paraqet përparësi të konsiderueshme krahasuar me metodat e tjera të analizës së gjurmëve nga qitja, pasi për secilën grimcë të analizuar mundëson marrjen e njëkohshme të dy informacioneve shumë të rëndësishme: karakteristikave morfologjike (formës dhe pamjes së grimcës) dhe përbërjes së saj kimike.

Në këtë mënyrë, një grimcë tipike e mbetjes së qitjes (GSR – Gunshot Residue) karakterizohet zakonisht nga forma sferike, me madhësi që varion afërsisht nga 0.5 deri në 50 mikrometra (μm) dhe përmban elemente karakteristike të dala nga procesi i qitjes, veçanërisht plumbin (Pb), antimonin (Sb) dhe bariumin (Ba). Prania e njëkohshme e këtyre elementeve, së bashku me karakteristikat morfologjike të grimcës, përbën një tregues të rëndësishëm për identifikimin e mbetjeve të qitjes dhe lidhjen e tyre me përdorimin e armës së zjarrit (Tomić, n.d., p. 71).

6. PËRFUNDIM

Që në kohët më të hershme, vëzhgimi dhe interpretimi i provave fizike kanë qenë mjete të rëndësishme në hetimet forenzike. Megjithatë, vetëm në gjysmën e dytë të shekullit XIX këto metoda filluan të aplikoheshin në mënyrë sistematike, duke rritur saktësinë dhe besueshmërinë e përfundimeve të nxjerra nga autoritetet kompetente.

Shkenca moderne forenzike u zhvillua më intensivisht gjatë shekullit XIX, si rezultat i përparimit të kimisë, fizikës, biologjisë dhe mjekësisë. Para kësaj periudhe, ekzaminimi i provave materiale mbështetej kryesisht në vlerësime subjektive, të cilat shpesh shkaktonin pasiguri dhe sfida gjatë proceseve gjyqësore. Me zhvillimin e saj, forenzika përfshiu fusha të shumta, si patologjia, biologjia, toksikologjia, kriminalistika, antropologjia, mjekësia ligjore, stomatologjia dhe psikiatria forenzike, si dhe inxhinierinë, gjeologjinë dhe mikroskopinë.

Forenzika nënkupton aplikimin e disiplinave shkencore dhe teknologjive bashkëkohore për zgjidhjen e çështjeve me rëndësi për sistemin e drejtësisë. Në këtë kuadër, një rol gjithnjë e më të rëndësishëm në ekzaminimet forenzike ka marrë mikroskopi elektronik skanues i kombinuar me spektroskopinë me shpërndarje të energjisë së rrezeve X (SEM/EDX), veçanërisht në analizën e gjurmëve nga qitja me armë zjarri.

Në kuptimin mikroskopik, çdo objekt, gjurmë ose material që lidhet me skenën e krimit mund të konsiderohet provë materiale. Për zgjidhjen e rasteve kriminale kërkohet ekzaminimi i tyre dhe vendosja e një lidhjeje logjike ndërmjet provave, viktimës, autorit të mundshëm dhe rrethanave të veprës penale.

Traseologjia, si pjesë e teknikës kriminalistike, merret me studimin, zbulimin dhe interpretimin e gjurmëve që lidhen me veprën penale. Gjurmët mund të japin informacion mbi ekzistencën e veprës, mënyrën dhe mjetet e kryerjes së saj, si dhe mbi vendin, kohën dhe rrethanat e ngjarjes. Në këtë kuadër, rëndësi të veçantë kanë mikrogjurmët, të cilat janë ndryshime të vogla dhe shpesh të padukshme me sy të lirë, por që mund të mbeten në vendin e ngjarjes dhe të ofrojnë të dhëna të rëndësishme për hetimin.

Mikroskopi elektronik skanues (SEM), i kombinuar me EDS/EDX, përdoret për karakterizimin morfologjik dhe elementar të materialeve të ndryshme. Kjo metodë kërkon sasi të vogël të mostrës dhe ka ndikim minimal mbi të,

duke e bërë atë një teknikë të rëndësishme në laboratorët forenzikë. Një nga aplikimet më të rëndësishme është analiza e mbetjeve nga qitja (GSR – Gunshot Residue), ku për secilën grimcë mund të përcaktohen njëkohësisht karakteristikat morfologjike dhe përbërja kimike.

Pajisjet SEM përbëhen kryesisht nga kolona elektronike, dhoma e mostrës, detektorët dhe sistemi i përpunimit e shfaqjes së imazhit. Në analizën e GSR-së, një grimcë tipike zakonisht paraqitet me formë sferike dhe përmban elemente karakteristike të kapsulës iniciuese, veçanërisht antimon (Sb), barium (Ba) dhe plumb (Pb). Kjo mundëson një vlerësim më të detajuar të natyrës dhe karakteristikave të mbetjeve të qitjes.

Në përfundim, përdorimi i metodave bashkëkohore mikroskopike, veçanërisht SEM/EDS, rrit kapacitetin për identifikimin dhe dokumentimin e provave materiale në hetimet kriminale. Për këtë arsye, rekomandohet modernizimi i laboratorëve forenzikë, investimi në pajisje të avancuara, trajnimi i vazhdueshëm i ekspertëve dhe forcimi i bashkëpunimit ndërmjet institucioneve të zbatimit të ligjit, laboratorëve dhe institucioneve akademike. Standardizimi i procedurave për mbledhjen, ruajtjen, analizimin dhe interpretimin e mikrogjurmëve do të kontribuonte në rritjen e besueshmërisë së provave dhe në përmirësimin e cilësisë së hetimeve penale.

REFERENCAT

- American Academy of Forensic Sciences. (2026). About the American Academy of Forensic Sciences. AAFS.
- Đukić, V. (2015). Kriminalistika [Skriptë]. <http://documents.tips/documents/kriminalistika-vedran-dukic.html>
- Eckert, W. G. (1996). Introduction to forensic sciences (2nd ed.). CRC Press.
- Hamlin, C. (2021). What's scientific about forensic science? Three versions of American forensics, 1903–1965, and one modest proposal. *Historical Studies in the Natural Sciences*, 51(1), 24–40. <https://doi.org/10.1177/1925362121999414>
- Maksimović, R., Bošković, M. V., & Todorčić, U. (1998). Metode fizike, hemije i fizičke hemije u kriminalistici. Policijska akademija.
- Martiny, A., Campos, A. P. C., Sader, M. S., & Pinto, A. L. (2008). SEM/EDS analysis and characterization of gunshot residues from Brazilian lead-free ammunition. *Forensic Science International*, 177(1), e9–e17. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2007.07.005>
- Mršić, G., & Žugaj, S. (2007). Analiza GSR čestica upotrebom elektronskog mikroskopa (SEM/EDX). *Policijska i sigurnost*, 16(3–4), 179–200. <https://hrcak.srce.hr/79261>
- National Institute of Standards and Technology. (2024). Forensic science. U.S. Department of Commerce. <https://www.nist.gov/forensic-science>
- Primorac, D., et al. (2001). Primjena analize DNA u sudskoj medicini i pravosuđu. Nakladni zavod Matice hrvatske.
- Radosavljević-Mihajlović, A. (2009). Primena fizičko-hemijskih metoda u oblasti forenzičkih nauka. *NBP – Žurnal za kriminalistiku i pravo*, 14(3), 215–226. https://www.kpa.edu.rs/cms/data/akademija/nbp/nbp_2009_3.pdf
- Roux, C., Willis, S., & Weyermann, C. (2021). Shifting forensic science focus from means to purpose: A path forward for the discipline? *Science & Justice*, 61(6), 678–686. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2021.08.005>
- Tomić, K. (2018). Forenzički sadržaj materijalnih i personalnih dokaza. Panevropski univerzitet Apeiron, Fakultet pravnih nauka.
- Wüllenweber, M., & Giles, S. (2021). Crime scene management within forensic science. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-4091-9>