

# Sinhronizacija mernih podataka u bežičnim senzorskim mrežama

Miodrag Malović

**Apstrakt**—Početkom dvadesetprvog veka, unapređenje a posebno pojeftinjenje mikroelektronskih komponenti dovelo je do značajne ekspanzije bežičnih tehnologija. Često imamo potrebu da fizički odvojeni uređaji koriste istu (odnosno, što približniju) vremensku skalu za označavanje veličina i događaja koje prate. Ovo je netrivialan zadatak budući da su uređaji baterijski napajani i moraju svesti razmenu poruka (koje zahtevaju upotrebu energetski zahtevnog radio interfejsa) na minimum. U tu svrhu osmišljen je veliki broj algoritama i protokola koji se bave problemom usklađivanja satova na bežičnim uređajima u okviru mreže. U ovom radu prikazana su i klasifikovana neka uobičajena rešenja.

**Ključne reči**—sinhronizacija, vreme, frekvencija, bežične senzorske mreže, merenja

## I. UVOD

Bežične senzorske mreže (WSN - *wireless sensor networks*) su sa razvojem mikroelektronskih komponenti niske potrošnje dobile važno mesto u mnogim oblastima nauke i svakodnevnog života. Najčešće oblasti njihove primene su građevina (ispitivanje stanja kapitalnih građevinskih objekata), medicina (daljinski nadzor pacijenata), meteorologija (prikupljanje podataka), saobraćaj (kontrola; nadzor zagađenja), prevencija nepogoda (požara, poplava, raznih havarija), industrijska i kućna automatika, itd. U heritologiji, bežični senzorski sistemi se koriste kako u permanentnom bezbednosnom nadzoru lokaliteta (zaštiti od prirodnih nepogoda i od provalnika) tako i za evaluaciju stanja objekata: snimanje pukotina u zidovima, detekciju vlažnosti i prokišnjavanja, vibracija, i drugih veličina.

Jedan od važnih ciljeva u realizaciji praktično svakog bežičnog mernog sistema jeste postizanje odgovarajuće vremenske sinhronizacije između mernih podataka koji potiču iz različitih tačaka, a koja je primerena za datu svrhu. I dok se kod nekih vrsta merenja, kao što su merenja zagađenja u saobraćaju, praćenje nivoa podzemnih i nadzemnih voda, merenja u meteorologiji, biologiji i sl. ne zahteva velika sinhronizovanost, već je bitno da su podaci obeleženi od strane lokalnog časovnika realnog vremena koji ne mora biti striktno održavan, kod merenja brzih procesa u nekim tehničkim disciplinama kao što su mašinstvo ili građevina, bitna je usaglašenost podataka izmerenih različitim sensorima u različitim tačkama u prostoru, koja mora biti na nivou

zanemarljivog dela periode najviših harmonika oscilacija koje se proučavaju. Ove mogu biti reda veličine i preko 100 Hz, mada su najčešće u upotrebi frekvencije od najviše dvadesetak. Razvoj elektronike je zaista omogućio da se ove pojave mogu pratiti sa garantovanom sinhronizacijom znatno boljom od 1 ms, što je dovoljno za opisivanje većine mehaničkih pojava (ne treba zaboraviti da pretvaranje neelektričnih veličina u električne takođe unosi nekakvu dinamiku u proces merenja, te da sami senzori mehaničkih veličina teško mogu da daju odziv sa vremenskom pouzdanošću znatno boljom od milisekunde).



Sl. 1. *Torre Rognosa* u Toskani (centralna Italija), uvršćen u Uneskovu listu svetske baštine (*world heritage sites*), na kome je vršen višemesečni nadzor stanja mrežom bežičnih senzora [1].

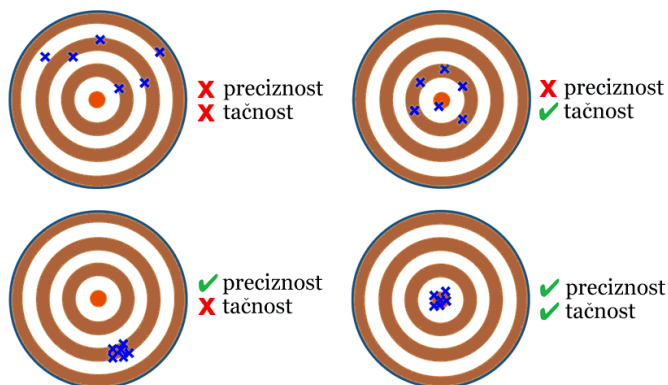
Dok kod žičanih mreža sinhronizaciju nije teško izvesti jer se isti signal iz zajedničkog izvora vremena može sa zanemarljivom neodređenošću (reda veličine ns) sprovesti na različite uređaje, kod bežičnih mreža situacija se komplikuje. Ove najčešće koriste kompleksne radio modeme, koji imaju sopstvene procesore i operativne sisteme (*embedded RTOS*) koji unose ne sasvim određeno kašnjenje u prenos poruke, a priroda veze, podložna smetnjama iz brojnih izvora, uslovljava slanje podataka u više paketa čiji prenos može uspeti iz prve ili biti podložan određenom broju ponovnih pokušaja. Takođe, ovi paketi mogu zahtevati isporuku preko relejnih uređaja jer ne postoji garancija direktne veze između pošiljaoca i primaoca (čak, topologija cele mreže može biti podložna rekonfiguraciji u vremenu). Zato je sinhronizacija mernih podataka u bežičnim mrežama senzora postala ozbiljna naučna disciplina.

## II. SATOVI (TAJMERI) I NJIHOVE NESAVRŠENOSTI

Iako se reči tajmer i kaunter ponekad koriste naizmenično, ispravno je za uređaj za merenje vremena koristiti reč koja je

Miodrag Malović – Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Karnegijeva 4, 11120 Beograd (e-mail: ofiss@malovic.in.rs) (<https://orcid.org/0000-0002-0691-4626>).

izvedena iz reči za vreme, a to je tajmer. Kaunter je po definiciji uređaj za brojanje električnih impulsa (silaznih ili uzlaznih ivica nekog signala). Ukoliko kaunter vežemo sa oscilatornim kolom baziranim na (najčešće) piezoelektričnom kristalu, koje daje takt procesoru i drugim čipovima na mernom uređaju, dobijamo tajmer. Generalno, kategorija „kaunter“ je šira (kaunteri se mogu koristiti u različite svrhe brojanja koje nemaju veze sa merenjem vremena).



Sl. 2. Grafički prikaz razlike između preciznosti i tačnosti.



Sl. 3. Pendulum CNT-91 precizni kaunter/tajmer (prednja i zadnja strana) [2]. Ovaj i slični uređaji se koriste za merenje vremena i frekvencije, kao i generisanje signala stabilne frekvencije, u eksperimentima vezanim za proveru sinhronizovanosti.

Karakteristike tajmera su određene kvalitetom piezoelektričnih kristala (mada se u novije vreme koriste i MEMS oscilatori koji ne moraju biti piezoelektrične prirode) i prateće elektronike koja čini oscilatorno kolo. Pojmovi koji se koriste u opisivanju kvaliteta oscilatora odnosno tajmera se

lako mogu pobrkati pa nije na odmet navesti njihove definicije. Greška ili odstupanje predstavlja razliku između tačne i nominalne vrednosti frekvencije. Da bi greška bila definisana, potrebno je da poznamo tačnu vrednost, što često nije slučaj. Najčešće se pod greškom podrazumeva razlika između nominalne (negde deklarirane) frekvencije i vrednosti koja se izmeri kvalitetnijim (etalonskim) uređajem. Tačnost je inverzno određena ovim odstupanjem. Preciznost se odnosi na ponovljivost frekvencije. Preciznost je sinonim za stabilnost, a ne tačnost. Frekvencija može odstupati od nominalne a biti slabo promenljiva, što uređaj čini preciznim, ali ne i tačnim. Ilustracija ovoga je data na Sl. 2.

Postoje dva glavna izvora greške vremenske sinhronizacije u distribuiranim sistemima. Prvo, vreme propagacije poruka nije dovoljno determinisano kada se koristi radio komunikacija između udaljenih uređaja (jedini način komunikacije kod bežičnih senzorskih mreža, ako ne računamo druge oblasti frekvencija koje ne spadaju u radio, ali je princip rada isti). Drugo, stabilnosti tajmera su limitirane brojnim fizičkim faktorima, pa čak i u slučaju da su njihove frekvencije perfektno kalibrisane u jednom trenutku, pomeranja (driftovi) moraju da se dogode u nekoj meri pre ili kasnije, i odstupanje pokazivanja (ofset) se akumulira sa vremenom, uslovljavajući potrebu za razmenom novih poruka da bi se uređaji međusobno ponovo sinhronizovali.

Mrežni protokoli koji se bave problemom sinhronizacije satova izvode serije akcija koje su bazirane na distribuciji vremenskih žigova iz referentnih izvora, što se naziva ofset sinhronizacija, i štelovanju dinamičkih koeficijenata koji se koriste za kalibraciju satova, što se naziva sinhronizacija brzine [3]. Uobičajena podela ovih akcija ne neke kategorije je data u nastavku, a zatim su predstavljene neki postojeći protokoli sinhronizacije.

### III. IMPLICITNA I EKSPPLICITNA SINHRONIZACIJA

Kontinualna ili implicitna sinhronizacija znači da se paketi podataka koji su vezani za sinhronizaciju dodaju na postojeće pakete koji se sve vreme (odakle naziv *kontinualna*) šalju kroz mrežu (i nezavisno procesiraju na uređajima, u skladu sa algoritmom rada mreže). Ovo dodavanje sinhronizacionih parametara u regularne pakete se u literaturi označava kovanicom *piggy-backed*, što u doslovnom prevodu znači „na krkače”.

Suprotnost kontinualnoj sinhronizaciji je sinhronizacija na zahtev, koja se takođe naziva i eksplicitna, ili *event-triggered* (inicira se nekim događajem odnosno okidačem ili triggerom, koji može biti automatski detektovan ili dat od strane korisnika). Eksplicitna sinhronizacija zahteva dodatne komunikacione pakete koji služe isključivo (ili barem primarno) u ove svrhe. Ona je zato zahtevnija u smislu energetske potreba, što je značajno kod bežičnih uređaja, koji su obično energetski ograničeni jer su baterijski napajani, a baterije se moraju ručno menjati ili dopunjavati iz izvora ograničenog kapaciteta, kao što su solarne ćelije, induktivni mikrogeneratori, termogeneratori na bazi termoparova ili piroelektričnih materijala, itd.

#### IV. INTERNA I EKSTERNA SINHRONIZACIJA

Interna sinhronizacija je algoritam sinhronizacije u kome ne postoji nikakvo spoljašnje referentno vreme. Cilj interne sinhronizacije je da pokazivanja svih satova unutar mreže budu što sličnija [4], a po mogućstvu se vodi računa i o međusobnoj razlici njihovih frekvencija, radi naknadne (tzv. post-facto) korekcije.

Eksterna sinhronizacija se bazira na jednom referentnom satu, bez obzira da li dolazi sa jednog uređaja unutar mreže (u kom slučaju reč eksterna ne treba bukvalno da se shvati) ili ne. Cilj eksterne sinhronizacije je da učini da svi satovi u mreži pokazuju koliko je moguće blizu referentnom satu.

#### V. UNIDIREKSIONA I BIDIREKSIONA SINHRONIZACIJA

Unidirekciona sinhronizacija je procedura u kojoj se sat ciljnog uređaja podešava prema satu izvornog uređaja, dakle postoji jasan smer kretanja informacije. Tipično transmisiono vreme se oduzima od vrednosti po prijemu. Unidirekciona sinhronizacija ne znači da se ista poruka šalje na samo jednu prijemnu adresu, već samo da nema dvosmerne razmene informacija. Na ovaj način se može sinhronizovati više uređaja u okolini izvora.

Bidirekciona, često zvana i *pairwise* (po parovima, ili parska) sinhronizacija je bazirana na proračunu takozvanog *round-trip* kašnjenja, odnosno vremena potrebnog da poruka otputuje sa izvornog uređaja do ciljnog i da se povratna poruka detektuje na izvornom uređaju (kružno putovanje). Prednost je što se meri stvarno fizičko vreme (naravno, ograničeno preciznošću lokalnog sata), što je inače nemoguće u dve odvojene tačke (kod unidirekcionih sinhronizacija). Iako se ne može odrediti tačna raspodela vremena i nesigurnosti vremena putovanja između smerova, za povratnu putanju može se tačno odrediti i srednja vrednost i standardno i maksimalno odstupanje vremena propagacije (*round-trip*). Pošto se obično radi sa uređajima istog tipa, za tipično vreme propagacije uzima se polovina *round-trip* vremena. I drugi uređaji u mreži mogu imati koristi od bidirekcionih sinhronizacionih poruka između dva čvora. Oni mogu da koriste razmenjene vremenske žigove da bi sinhronizovali svoje satove bez bilo kakve dodatne transmisije podataka (utroška energije), samo prijemom, tj. uvidom u otvorenu komunikaciju parova koji se sinhronizuju bidirekciono. Ovakva procedura je česta i naziva se *eavesdropping* (prisluškiavanje) [5].

#### VI. TRANSFORMACIJA VREMENSKE SKALE

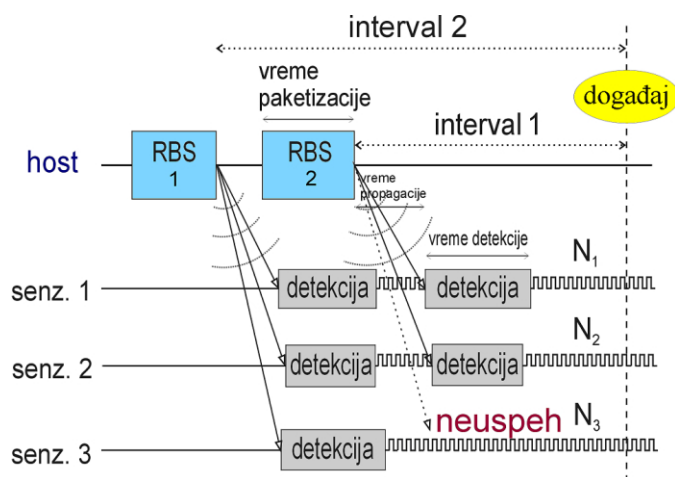
Transformacija vremenske skale spada u *backwards*, odnosno post-facto ili naknadne (unazad) sinhronizacione tehnike. Satovi nisu sinhronizovani za vreme događaja koji se posmatra, ali se sinhronizacija skupljenih podataka vrši naknadno u zavisnosti od relevantnih parametara (ustanovljenih frekvencija tajmera i međusobnih ofseta). Iako zahteva manje energije (manje dodatne komunikacije nego u slučaju sinhronizacije na zahtev), povećava potrebu za procesiranjem podataka, i najbolje je izvršiti je na sistemu visokog nivoa, kao što je PC računar, koji često predstavlja

baznu stanicu (*hub*) bežične mreže. Post-facto sinhronizacija se nekada naziva i reaktivnom ili a-posteriori, što je suprotno od proaktivne sinhronizacije koja se vrši unapred, ili a-priori [6]. Proaktivna i reaktivna sinhronizacija se kombinuju u nekim protokolima.

Kao što ime govori, transformacija vremenske skale je doterivanje vremenskih žigova u skladu sa poznatim odnosima između frekvencija satova na uređajima (doterivanje „nagiba“, odnosno brzine) i poznatim trenucima simultanih događaja (doterivanje ofseta).

#### VII. RBS, MULTIKAST, I UNIKAST

*Reference Broadcast Synchronization* (RBS) [7] ili sinhronizacija putem referentnog ili prozivnog signala je termin koji se asocira isključivo sa bežičnim mrežama. Spada u unidirekcionih sinhronizacionih tehnika. Centralni server emituje referentni signal (poznat i pod nazivom *beacon*, odnosno „signal za navođenje“, po analogiji sa signalima koji se koriste u navigaciji) a prijemni uređaji usklađuju svoje tajmere po prijemu. Sl. 4 prikazuje vremenski dijagram povorke od dva RBS-a koji prethodi detekciji događaja od strane više senzorskih uređaja.



Sl. 4. Prikaz uspele i delimično uspele sinhronizacije pri slanju povorke od dva RBS-a; u slučaju uspeha, neodređenost vremena označavanja događaja zavisi od neodređenosti vremena detekcije i neodređenosti frekvencije kojom se mere  $N_1$  i  $N_2$ , dok se u slučaju parcijalnog neuspeha (senzor 3) dodaje i neodređenost vremena paketizacije modema hosta [8].

Ovaj tip poruke se naziva *multicast* (šire raspoređen, odnosno za više primaoca), što je suprotno *unicast* porukama (koje imaju jednog pošiljaoca i jednog primaoca). Propagacione neodređenosti, vezane za transmisiju poruke (izlazno vreme kroz fizički sloj, koji se sastoji od interfejsa između procesora i komunikacionog modula, modema ili transsivera, i antene) se potiru jer se radi o istom signalu za sve primaoca. Neodređenosti vezane za prijem poruke su obično za red veličine manje i na ovaj način se ofset između čvorova praktično potire. Logičko vreme je na ovaj način nešto bolje sinhronizovano nego fizičko vreme. Logičko vreme predstavlja „relativno“ vreme unutar nekog posmatranog perioda, kao što je merni ciklus, dok fizičko

vreme predstavlja stvarno vreme u spoljnom svetu. Sekundarne RBS procedure se mogu ponavljati u multihop<sup>1</sup> mrežama (gde ne postoji direktna veza između izvora RBS-a i svih uređaja), gde sinhronizovani uređaji služe kao habovi (centralne stanice) lokalnih klastera (grupa u kojima su uređaji „nižeg nivoa“). Pouzdanost sinhronizacije naravno opada sa brojem hopova (novih transmisija RBS-a).

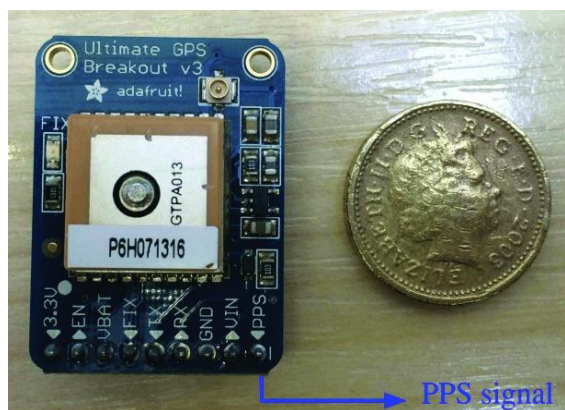
### VIII. GPS I PPS

Puls u sekundi (PPS) globalnog sistema za pozicioniranje (GPS) predstavlja odličan izvor vremenskih žigova visoke tačnosti [9]. Kako se očekuje da cene GPS prijemnika padaju u doglednoj budućnosti, ovaj metod će verovatno dobiti na popularnosti. Ipak, u ovom trenutku, osim zahteva da se jeftini bežični senzorski uređaji opreme dodatnim hardverom čija cena nije zanemarljiva, postoji ozbiljan problem dostupnosti signala unutar građevina i drugih zatvorenih prostora, tako da se ovo inače efektivno rešenje uglavnom izbegava. Ovaj signal se emituje iz satelita, ograničenom snagom. Čak i malo gušće krošnje drveća mogu da budu prepreka za njega.

PPS signali su odlični za dugoročnu sinhronizaciju vremena. Informacija o protoku vremena se konstantno usklađuje sa referentnim laboratorijama najvišeg nivoa tačnosti na zemlji. Ovaj signal, nažalost, ne sadrži informaciju o fizičkom vremenu (vreme-datum).

U nekim praktičnim realizacijama bežičnih mreža koristi se jedan ili nekoliko referentnih uređaja sa GPS prijemnikom, koji se sinhronizuju putem PPS-a, i dalje prosleđuju informaciju uređajima „nižeg nivoa“ u mreži, koji mogu biti u zatvorenim prostorijama ili ispod vegetacije, ili naprosto nemaju GPS prijemnike radi uštede.

Na Sl. 5 prikazan je GPS modul za platformu Arduino [10].



Sl. 5. GPS modul za Arduino [10], cene \$30, 2021.

### IX. KLASIČNI MREŽNI ALGORITMI SINHRONIZACIJE

Prve kompjuterske mreže koristile su dve varijacije sinhronizacije putem centralizovanog servera, poznate kao Kristijanova i Berkli sinhronizacija. Hab sistema (centralna stanica) šalje vremenske žigove uređajima u mreži na zahtev.

<sup>1</sup> putovanje paketa u više predajno-prijemnih koraka, odnosno putem releja, kada ne postoji direktna veza između pošiljaoca i primaoca; *hop* označava jedan „skok“ odnosno putovanje poruke između dva čvora

Očekivano vreme propagacije se oduzima prilikom prijema. Alternativno, višestruki paketi sa vremenskim žigovima se šalju u odgovoru na jedan zahtev, i najbrže pristigli paket se uzima u obzir (da bi se izbegla mogućnost povremenih nepredviđenih zastoja). U Kristijanovoj varijaciji algoritma, hab služi kao izvor vremena (njegov sat se uzima kao referentni eksterni izvor), dok se u Berkli varijaciji podaci skupljaju sa različitih čvorova usrednjavaju (opciono sa težinskim faktorima), i usrednjena informacija se šalje nazad.

Jedna od najčešće korišćenih metoda u savremenim kompjuterskim mrežama jeste mrežni vremenski protokol ili NTP (*network time protocol*) [11]. Čvorovi mreže se dele u različite slojeve (*layers*), počevši od referentnih satova koji su na vrhu (takozvani „stratum 0“ sloj, u koji spadaju nacionalne laboratorije i GPS sateliti). Mrežni čvorovi nižeg nivoa sinhronizuju se na bazi poruka koje primaju sa uređaja istog ili višeg nivoa. Razmena poruka unutar mreže ne sadrži samo vremenske žigove, već i razne druge podatke, kao što su preciznost tajmera na uređaju, vreme njegove poslednje sinhronizacije, pouzdanost njegove poslednje sinhronizacije, i očekivano vreme putovanja poruke. Ciljni uređaj odlučuje da li da izvrši korekciju svog sata, i za koliko, ili ne, bazirano ne samo na zadnjoj primljenoj poruci već ispitujući set poruka pristiglih u dužem vremenskom intervalu. NTP poruke se testiraju na smislenost i one koje izgledaju kao gruba greška se odbacuju u procesu interpolacije, tako da je algoritam robusan.

Precizni vremenski protokol ili PTP (*precision time protocol*), poznat i kao IEEE-1588 [12], je kompleksniji protokol baziran na istom principu. Veći broj tipova poruka se koristi, veći broj parametara se prosleđuje, i uređaji imaju različite funkcije, a ne samo klijent, server, ili klijent-i-server, što je slučaj u NTP-u. Ipak, glavna prednost ovog protokola nisu kompleksne softverske metode već „hardverska asistencija“. To znači da postoji specijalizovani hardver koji se instalira na mrežne kartice i druge uređaje, koji određuje precizna (ispod mikrosekunde) vremena fizičke emisije poruka (tzv. prolaska kroz „fizički sloj“ mreže), koja bi inače bila nedostupna glavnim procesorima mrežnih uređaja. Dok tipičan NTP klijent ostvaruje preciznost sinhronizacije reda veličine milisekunde, kod PTP-a su sinhronizacije reda veličine ispod mikrosekunde.

### X. PROTOKOLI SINHRONIZACIJE U BEŽIČNIM MREŽAMA

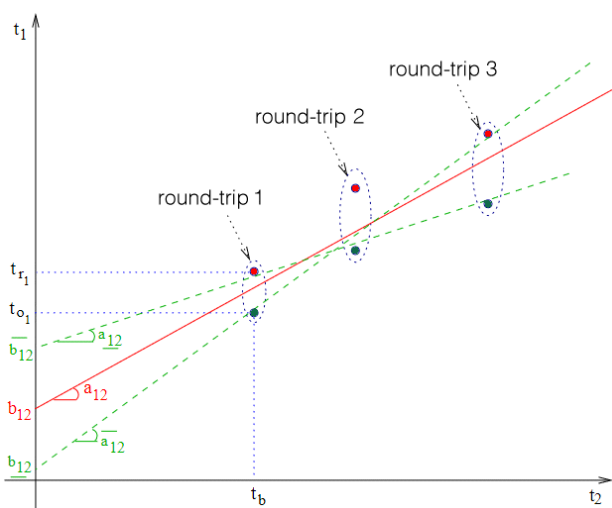
Veliki broj protokola je osmišljen radi upotrebe isključivo u bežičnim senzorskim mrežama. Navešćemo neke od osnovnih, uz kratak opis načina rada.

Sinhronizacija putem vremenskog žiga ili vremenskog označavanja (*time-stamp synchronization* ili TSS) je metod promene vremenskih žigova poruka koje prolaze kroz multihop mrežu, bazirano na vremenu prijema, procenjenom vremenu puta, i vremenu koje poruka provede u „redu“ (lokalnom baferu, odnosno steku, za prijem pristiglih paketa), odnosno *queue*-u, pre nego što se prosledi. Satovi nisu stvarno sinhronizovani tako da se ovde radi o formi *post-facto* odnosno naknadne sinhronizacije. Varijacija na ovu temu je

RITS (*routing integrated time synchronization*) [13], kod koga se izvodi dodatna kompenzacija zbog razlike u brzinama rada različitih tajmera. Ova razlika se procenjuje na osnovu istorije razmenjenih poruka sa vremenskim žigovima iz bidirekciono komunikacije (gde se mogu uporediti *round-trip* vremena proračunata na različitim čvorovima).

Laka vremenska sinhronizacija (*lightweight time synchronization* ili LTS) i *timing-sync* protokol za senzorske mreže (TPSN) su bazirani na bidirekcionoj sinhronizaciji parova uređaja koji razmenjuju poruke unutar multihop mreže, gde postoji jedna ili više referentnih tačaka (čiji su tajmeri deklarirani kao referentni) [14]. Uređaji na nižim nivoima (više hopova udaljeni od referenci), upućuju zahteve za sinhronizacijom prema uređajima na višem nivou. Kod LTS-a, uređaji proveravaju da li drugi uređaji na istom nivou imaju aktuelne zahteve koji nisu izvršeni (*pending requests*), i sinhronizuju se sa njima umesto da šalju nove multihop zahteve. Kod TPSN-a, uređaji na nižem nivou prisluškuju (*eavesdrop*) sinhronizaciju uređaja na višem nivou, i zatim šalju zahtev za sinhronizacijom u prigodnom momentu.

Tiny-sync i Mini-sync [15] takođe rade na principu bidirekciono sinhronizacije. Oni koriste statistiku da porede vremenske žigove koji se razmenjuju između parova uređaja. Vremenski žigovi odstupaju sve više tokom vremena, zbog razlika u brzinama satova (koje su dodatno podložne varijacijama usled promene različitih fizičkih parametara), tako da se odnos frekvencija i inicijalni ofset mogu proceniti kreiranjem optimalne prave bazirane na većem broju parova vremenskih žigova sa oba uređaja (tzv. linearna regresija; ilustracija je data na Sl. 6). Različiti algoritmi se koriste da procene najverovatniji odnos frekvencija i ofset.



Sl. 6. Linearna regresija  $t_1(t_2)$  gde donje tačke u paru predstavljaju emisiju signala, a gornje prijem odgovora kod round-tripa, u funkciji žiga na drugom uređaju;  $a$  označava minimalni, srednji i maksimalni odnos brzina satova, a  $b$  minimalni, srednji i maksimalni ofset [15].

Fleksibilna laka vremenska sinhronizacija (*scalable lightweight time-synchronization protocol*, ili SLTP) [16], koristi metod takozvanog pasivnog grupisanja (*passive clustering*) kao prvi korak, a zatim izvodi sinhronizaciju

slično LTS-u. Na zahtev, kreira se topologija mreže (pasivno grupisanje, odnosno trasiranje), pri čemu se uređaji dele na grupe (klustere) i dodeljuju im se funkcije habova klastera (referentnih tačaka, koje dakle nisu fiksne kao kod originalnog LTS-a), članova klastera, ili *gateway*-a odnosno kapija između klastera. Upotrebljava se i linearna regresija, kao kod tiny-synca i mini-synca, za poređenje i usklađivanje satova prilikom bidirekciono komunikacije.

Tsync protokol [17] koristi dve tehnike koje se nazivaju hijerarhijsko referenciranje (*hierarchy referencing time synchronization* ili HRTS) i individualni vremenski zahtevi (*individual-based time request* ili ITR). Glavni uređaj emituje RBS signal koji primaju uređaji najvišeg nivoa (lejera). Jedan od njih se slučajno izabira za bidirekcionu razmenu vremenskih žigova. Propagaciono kašnjenje se procenjuje na osnovu ovog procesa i novi RBS od strane centralnog uređaja se šalje dajući ciljnim uređajima referentnu vrednost vremena i pretpostavljeno vreme propagacije (smatra se da su uređaji hardverski identični te se očekuje približno isto vreme propagacije). Kada se proces završi, uređaji iz prvog nivoa ponavljaju proceduru prema klasterima nižeg nivoa. Proces se rekurzivno ponavlja dok svi uređaji u mreži nisu sinhronizovani. ITR je komplementarni mehanizam u Tsync-u, koji se koristi za sinhronizaciju na zahtev, bilo jednog uređaja bilo grupe. Uređaji koji zahtevaju sinhronizaciju šalju zahtev koji se multihop prenosi do centralne stanice (glavnog uređaja) i referentni vremenski žig se prenosi nazad istim putem. HRTS i ITR u originalnom obliku koriste dva različita kanala za razmenu poruka, ali moguća je implementacija i na jednom kanalu, sa nešto lošijom performansom.

Intervalska sinhronizacija (*interval based synchronization* ili IBS) [18] koristi procenu granica brzine satova (njihovih minimalnih i maksimalnih vrednosti) da odredi granice u kojima se vreme nalazi. Umesto razmene vremenskih žigova, čvorovi komuniciraju razmenjujući podatke o minimalnom i maksimalnom vremenu (tzv. *interval stamps* ili intervalski žigovi, bazirani na najgorem slučaju devijacije frekvencije sata). Ovo se naziva i intervalski model, koji je suprotan instant (tačkastom) modelu. Iako neki autori tvrde da je kombinacija „garantovanih“ granica za lokalne satove optimalnija nego upotreba pojedinačnih vremenskih žigova uz estimaciju njihovog kvaliteta (procenu distribucije verovatnoće i standardne i maksimalne devijacije), suština oba metoda je ista, a u stvarnosti ne postoje stopostotne garancije za granice kod *bounded-drift* modela sata (modela limitarnog odstupanja odnosno limitiranog drifta frekvencije).

Asinhrona difuzija [19] je protokol kod koga svi uređaji periodično šalju signal susedima tražeći pokazivanja njihovih satova (vremenske žigove). Slično kao kod Berkli algoritma, vrši se usrednjavanje ovih vrednosti i one se putem RBS-a prosleđuju susedima (svim uređajima u dometu ili unutar klastera), koji vrše sinhronizaciju na novu vrednost. Proces se ponavlja širom mreže.

Protokol sinhronizacije putem preplavlivanja (*flooding time synchronization protocol* ili FTSP) [20] koristi tzv. preplavlivanje (*flooding*) mreže odnosno slanje velikog broja

paketa (slično RBS-u) sa referentnog uređaja, u kombinaciji sa pamćenjem parova vremenskih žigova i linearnom regresijom koja se koristi kod tiny-sync-a. PulseSync je sličan protokol, baziran na plavljenju mreže velikom brzinom, da se ne dozvoli akumulacija nagiba (*skew*) [21]. *Skew* označava akumuliranu grešku sata baziranu na driftu frekvencije tajmera (odstupanju tokom posmatranog vremena). I dok oba protokola imaju preciznost koja opada sa brojem hopova, PulseSync preciznost opada nešto sporije.

Kod protokola vremenske difuzije (*time diffusion protocol* ili TDP) [22], referentni uređaj šalje primarni RBS signal, a susedi u dometu vraćaju informaciju koja sadrži procenjenju stabilnost sopstvene frekvencije tajmera, na bazi ranije razmenjenih vremenskih žigova. Referentni uređaj odlučuje koji susedi mogu da budu izvori sekundarnih RBS signala (centri klastera nižeg nivoa), i šalje sinhronizacioni RBS. Procedura se rekursivno ponavlja kroz multihop mrežu sve dok svi uređaji nisu primili bar jednu poruku ovog tipa. Uređaji koji su primili višestruke sinhronizacione naredbe sinhronizuju se na srednju vrednost, uz korišćenje težinskih koeficijenata (baziranih na proceni stabilnosti frekvencije i nivou izvora). Sličan protokol pod nazivom GTSP (*gradient time synchronization protocol*) [23] ne zahteva centralni referentni čvor, definisanu topologiju, niti stalnu operaciju svih uređaja. Opisane dvofazne RBS procedure se ponavljaju kroz mrežu bez definisane hijerarhije.

Konsenzus sinhronizacija (*consensus clock synchronization* ili CCS) [24] je tipična interna sinhronizaciona metoda. Svi uređaji emituju unidirekzione poruke sa vremenskim žigovima i primajući uređaji pokušavaju da procene koliko iznosi vrednost „dogovorenog” vremena u mreži. Procena se donosi na bazi pamćenja većeg broja prethodnih poruka sa različitih uređaja.

Kao što vidimo, opisane metode, kao i mnoge druge koje postoje, nisu strogo razdvojene, već se prilično preklapaju i teško je povući granicu između njih i razvrstati algoritme striktno po kategorijama.

## XI. ZAKLJUČAK

Bežične senzorske mreže (WSN) predstavljaju skup (najčešće minijaturnih) elektronskih senzorskih uređaja, koji služe za nadgledanje različitih pojava u fizičkom svetu. Uređaji u mreži komuniciraju putem radio talasa. Ovim putem se razmenjuju i informacije o vremenu, odnosno održava sinhronizacija satova unutar mreže. Sinhronizacija (na nivou određenom mernim zadatkom) je neophodna za ispravno vremensko označavanje mernih uzoraka u distribuiranim merenjima u mašinstvu, građevini, i drugim tehničkim disciplinama, uključujući heritologiju. U ovom članku dat je prikaz uobičajenih algoritama i protokola za minimizaciju razlika pokazivanja satova unutar bežične senzorske mreže.

## ZAHVALNICA

Autor se zahvaljuje za podršku Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (ugovor 451-03-68/2022-14/200287).

## REFERENCE

- [1] A. Mecocci, A. Abrardo, "Monitoring architectural heritage by wireless sensors networks: San Gimignano - a case study," *Sensors*, vol. 14, no. 1, pp. 770-778, Jan. 2014.
- [2] *Pendulum Instruments CNT-91/91R Advanced Frequency & Time Interval Analyzer*, [Online]. <https://pendulum-instruments.com/products/frequency-counters-analyzers/cnt-91-91r-advanced-frequency-time-interval-analyzer/>
- [3] S. Rahamatkar, A. Agarwal, N. Kumar, "Analysis and comparative study of clock synchronization schemes in wireless sensor networks," *Int. J. Comput. Sci. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 536-541, Apr. 2010.
- [4] S. Khediri, N. Nasri, M. Samet, A. Wei, A. Kachouri, "Analysis study of time synchronization protocols in wireless sensor networks," *Int. J. Distrib. Parallel Syst.*, vol. 3, no. 3, pp. 155-165, Jun. 2012.
- [5] C. Liu, H. Pang, N. Cao, X. Li, D. Xu, "Wireless Sensor Network Time Synchronization Algorithm Overview," in Proc. of International Symposium on Intelligence Computation and Applications, Singapore, pp. 552-561, Nov. 2017.
- [6] J. Funck, C. Gühmann, "Comparison of approaches to time-synchronous sampling in wireless sensor networks," *Meas.*, vol. 56, pp. 203-214, Oct. 2014.
- [7] F. Zhang, G. Y. Deng, "Probabilistic time synchronization in wireless sensor networks," in Proc. of IEEE 2005 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Wuhan, China, vol. 2, pp. 980-984, Sep. 2005.
- [8] M. Malović, Lj. Brajović, Z. Mišković, T. Šekara, "Simultaneity Analysis in a Wireless Sensor Network," *Metrol. Meas. Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 275-288, Jun. 2015.
- [9] R. Kim, T. Nagayama, H. Jo, B. F. Spencer Jr, "Preliminary study of low-cost GPS receivers for time synchronization of wireless sensors," in Proc. of SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, San Diego, CA, USA, vol. 8345, p. 83451A, Apr. 2012.
- [10] K. Y. Koo, D. Hester, S. Kim, "Time synchronization for wireless sensors using low-cost GPS module and Arduino," *Front. Built Environ.*, vol. 4, art. 82, Jan. 2019.
- [11] D. L. Mills, "Internet time synchronization: the network time protocol," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 39, no. 10, pp. 1482-1493, Oct. 1991.
- [12] R. Exel, G. Gaderer, N. Kerö, "Physical Layer Ethernet Clock Synchronization," in Proc. of 42nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, Reston, VA, USA, pp. 77-87, Nov. 2010.
- [13] J. Sallai, B. Kusý, A. Lédeczi, P. Dutta, "On the scalability of routing integrated time synchronization," in Proc. of 3rd European Workshop on Wireless Sensor Networks, Zürich, Switzerland, pp. 115-131, Feb. 2006.
- [14] F. Sivrikaya, B. Yener, "Time synchronization in sensor networks: a survey," *IEEE network*, vol. 18, no. 4, pp. 45-50, Jul. 2004.
- [15] S. Yoon, C. Veerarittiphan, M. L. Sichitiu, "Tiny-sync: Tight time synchronization for wireless sensor networks," *ACM Trans. Sens. Netw.*, vol. 3, no. 2, pp. 1-33, Jun. 2007.
- [16] S. Nazemi Gelyan, A. N. Eghbali, L. Roustapoor, S. A. Yahyavi Firouz Abadi, M. Dehghan, "SLTP: scalable lightweight time synchronization protocol for wireless sensor network," in Proc. of International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks, Beijing, China, pp. 536-547, Dec. 2007.
- [17] H. Dai, R. Han, "TSync: a lightweight bidirectional time synchronization service for wireless sensor networks," *ACM SIGMOBILE Mob. Comput. and Commun. Rev.*, vol. 8, no. 1, pp. 125-139, Jan. 2004.
- [18] L. Meier, "Interval-based Clock Synchronization for Ad-Hoc Sensor Networks," in 4. *GI/ITG KuVS Fachgespräch »Drahtlose Sensornetze«*, Zürich, Switzerland, ETH Zürich, 2005, ch. 2, pp. 25-28
- [19] Q. Li, D. Rus, "Global clock synchronization in sensor networks," *IEEE Trans. Comput.*, no. 55, no. 2, pp. 214-226, Jan. 2006.
- [20] L. Gheorghe, R. Rughiniş, N. Tăpuş, "Fault-tolerant flooding time synchronization protocol for wireless sensor networks," in Proc. of 6th International Conference on Networking and Services, Cancun, Mexico, pp. 143-149, Mar. 2010.
- [21] K. S. Yildirim, A. Kantarci, "Time synchronization based on slow-flooding in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 244-253, Feb. 2013.

- [22] W. Su, I. F. Akyildiz, "Time-diffusion synchronization protocol for wireless sensor networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 13, no. 2, pp. 384-397, Apr. 2005.
- [23] P. Sommer, R. Wattenhofer, "Gradient clock synchronization in wireless sensor networks." in Proc. of 8<sup>th</sup> IEEE/ACM International Conference on Information Processing in Sensor Networks, San Francisco, CA, USA, pp. 37-48, Apr. 2009.
- [24] M. K. Maggs, S. G. O'Keefe, D. V. Thiel, "Consensus clock synchronization for wireless sensor networks," *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 6, pp. 2269-2277, Feb. 2012.

exchange messages from time to time, using radio interface. In order to preserve limited energy reserves (devices are battery powered), this exchange must be kept to a minimum. Proper fusion of data from different nodes requires certain level of synchronization of their clocks, depending on the particular measurement task. So the clocks synchronization is one of the primary concerns in many WSN. This paper reviews the most common techniques and protocols used for this purpose.

#### ABSTRACT

Advances in microelectronics in the past decades have lead to widespread use of wireless sensor networks (WSN). Sensor devices in these networks are not connected permanently, but are only able to

#### **Synchronization of measurement data in wireless sensor networks**

Miodrag Malović

# Primer kombinovanja raspodela atmosferskih aerosola po veličinama dobijenih metodom merenja električne pokretljivosti i optičkom metodom

Miloš Davidović, Milena Davidović, Sonja Dmitrašinović, Milesa Srećković, Milena Jovašević-Stojanović

**Apstrakt**—Atmosferski aerosoli u urbanim sredinama se sastoje od čestica različitih dijametara, koje mogu imati veličinu od par nanometara do par mikrometara. Stoga je za merenje koncentracije aerosola često neophodno koristiti više instrumenata, sa principijelno različitim metodama merenja. U ovom radu su korišćene metode zasnovane na merenju električne pokretljivosti čestica, za opseg dijametara od 10nm do 420nm, i merenju ekvivalentnog optičkog dijametara, za opseg dijametara od 300nm do 10um. Kao glavni rezultat, prikazani su primeri kombinovanja spektara veličina čestica koji su dobijeni pomoću ove dve komplementarne metode merenja. U procesu kombinovanja spektara veličina čestica moguće je modifikovati raspodelu dobijenu optičkim merenjima traženjem optimalne vrednosti indeksa prelamanja čestica tako da se dobije što bolje slaganje sa raspodelom dobijenom merenjem električne pokretljivosti. Kao ulazni podaci su korišćeni rezultati merenja iz kampanje mobilnog monitoringa u Novom Sadu 2022.

**Ključne reči** — električna mobilnost; ekvivalentni optički dijametar; Mijevo rasejanje; log normalna raspodela.

## I. UVOD

Raspodela čestica po veličinama je jedan od ključnih parametara za određivanje rizika koje mogu nositi po zdravlje, i ovo je utvrđeno u velikom broju studija koje se bave zdravljem ljudi. Videti npr. [1] gde se opisuje mogućnost nanošenja nanočestica u pluća, njihovog jakog upalnog potencijala i prenošenja dalje u organizam, a takođe i njihova pojačana biološka aktivnost usled velike površine u odnosu na

Miloš Davidović – Institut za nuklearne nauke "Vinča", Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Mike Petrovića Alasa br. 12-14, Beograd - Vinča, 11351 Beograd (e-mail: davidovic@vin.bg.ac.rs).

Milena Davidović – Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: milena@grf.bg.ac.rs).

Sonja Dmitrašinović – Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21102 Novi Sad (e-mail: dmitrasinovic@uns.ac.rs).

Milesa Srećković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: esreckov@etf.bg.ac.rs).

Milena Jovašević-Stojanović – Institut za nuklearne nauke "Vinča", Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Mike Petrovića Alasa br. 12-14, Beograd - Vinča, 11351 Beograd (e-mail: mjovst@vin.bg.ac.rs).

masu [2]. Takođe, veličina čestice predstavlja važan parametar koji opisuje česticu aerosola budući da od veličine zavise koeficijenti rasejanja i apsorpcije, sposobnost da čestica veže vodu i dr. što je bitno za karakterizaciju atmosferskih procesa. Usled toga je najčešće i ujedno najznačajnije merenje koje se vrši na aerosolima određivanje raspodele broja čestica po njihovoj veličini.

Sa druge strane, utvrđivanje ove raspodele u nekoj urbanoj sredini nije jednostavan zadatak. Regulatorne mreže za monitoring aerozagađenja često daju informaciju koja je niske vremenske rezolucije, a često postoji i problem malog broja mernih stanica u ovim mrežama. Stoga se ovakvi javno dostupni podaci, moraju dopunjavati kroz dodatne kampanje merenja aerozagađenja.

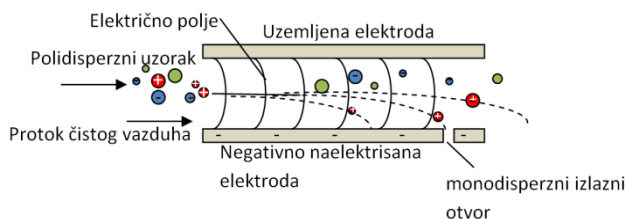
Za merenje i karakterizaciju čestičnog zagađenja, koje se za aerosole uopšte, i naravno aerosole u urbanim sredinama, sastoji od čestica različitih dijametara, u veoma širokom opsegu dijametara čestica (od par nanometara do 10 um) koristi se obično više instrumenata, pa se njihovi spektri (izmerene raspodele veličina čestica) kombinuju. Neophodnost korišćenja više instrumenata, sa principijelno različitim metodama merenja, proističe iz nemogućnosti pokrivanja celokupnog relevantnog opsega sa samo jednom metodom, npr. optička metoda se ne može koristiti za najmanje nanometarske čestice. Stoga se za ovakva sveobuhvatna merenja i karakterizaciju aerosola koriste i kombinuju metode zasnovane na različitim fizičkim principima kao što su optičke metode, metode zasnovane na merenjima električne pokretljivosti, metode zasnovane na posmatranju uzorkovanog aerosola pomoću mikroskopa, metode zasnovane na merenju aerodinamičkog prečnika čestica i druge. Budući da zbog različitog principa merenja navedene metode imaju drastično različite vremenske rezolucije (od merenja u realnom vremenu do metoda koje podrazumevaju uzorkovanje i naknadnu laboratorijsku analizu) i pokrivaju različite opsege veličina čestica, a da je cilj kampanja merenja koje smo izvršili bila karakterizacija urbanih aerosola u realnom vremenu u ovom radu se kombinuju metoda zasnovana na merenju električne pokretljivosti za opseg dijametara od 10nm do 420nm i metoda zasnovana na merenju intenziteta rasejane svetlosti tj. optičkim merenjima za opseg dijametara od 300nm do 10um,



koje omogućavaju visoku vremensku rezoluciju. Teorijska osnova optičke metode je teorija Mijevog rasejanja.

Za analizirane primere kombinovanja spektara će biti korišćeni rezultati merenja iz kampanje mobilnog monitoringa u Novom Sadu 2022.

## II. FIZIČKE OSNOVE I PRINCIPI RADA KORIŠĆENIH MERNIH INSTRUMENTATA



Sl. 1. Princip odabira čestica na osnovu njihove električne pokretljivosti. Šematski detalj radikalnog diferencijalnog analizatora pokretljivosti (engl. radial differential mobility analyzer RDMA)

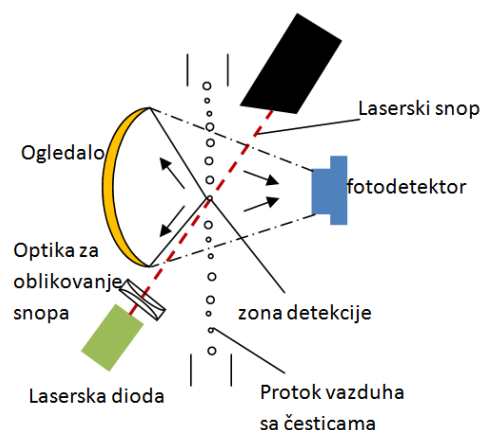
U ovoj sekciji ćemo ukratko prikazati fizičke osnove i principe rada dva korišćena instrumenta za merenje čestičnog zagađenja. Prvi korišćeni instrument, TSI Nanoscan SMPS 3910, razlikuje čestice po njihovoj električnoj pokretljivosti. Na taj način uređaj može da diskriminiše čestice dijametara od 10nm do 420nm u 13 kanala. Za tu svrhu se koristi deo uređaja koji je šematski prikazan na Sl. 1. U sklopu uređaja veličina čestice se procenjuje pomoću radikalnog diferencijalnog analizatora pokretljivosti, koji je zbog kompaktnosti pogodan za korišćenje u prenosivom instrumentu. Čist vazduh bez čestica ulazi u kružni kanal sa donje spoljne ivice RDMAa prethodno je tretiran kako bi se postiglo laminarno strujanje. Sa gornje strane se takođe tangencijalno uvodi vazduh sa česticama različite veličine (uzorkovani polidisperzni aerosol). Gornja elektroda RDMA je uzemljena, a donja elektroda priključena na negativan napon, tako da se između elektroda stvara električno polje. Na pozitivno naelektrisane čestice deluje električna sila usled koje se kreću ka negativnoj elektrodi. Na čestice deluje i Stoksova sila otpora vazduha. Kroz izlazni otvor na katodi za određenu vrednost primenjenog napona prolaze aerosoli klasifikovani po električnoj pokretljivosti (a time i po veličini) i dalje idu ka brojaču čestica. Preostali vazduh i čestice vraćaju se da cirkulišu u uređaju optimizujući laminarnost strujanja. Jednačina kretanja čestice pod dejstvom električnog polja i Stoksove sile otpora, a koja je suspendovana u vazduhu koji struji brzinom  $\vec{u}$ , je data sa

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{3\pi\mu D_p}{c} (\vec{u} - \vec{v}) + q\vec{E} \quad (1)$$

gde je  $m$  masa čestice,  $\vec{v}$  njena brzina,  $D_p$  je dijametar čestice,  $\mu$  koeficijent viskoznosti vazduha,  $C$  korekcionni slip faktor,  $q$  naelektrisanje čestice, i  $\vec{E}$  jačina električnog polja. Terminalna brzina u pravcu električnog polja čestice se postiže veoma brzo, u momentu kada je rezultatna sila jednaka nuli i data je sa

$$\frac{3\pi\mu D_p}{c} v_e = qE \quad (2)$$

Na osnovu jednačine (2) moguće je napisati izraz za električnu mobilnost kao  $\vec{v}_e = B_e \vec{E}$  gde je  $B_e = \frac{cq}{3\pi\mu D_p}$ .



Sl. 2. Princip odabira čestica na osnovu njihovih optičkih svojstava. Šematski detalj optičke komore u kojoj se laserom obasjavaju uzorkovane čestice.

Drugi korišćeni instrument, TSI OPS 3330, razlikuje čestice po njihovim optičkim svojstvima. Na taj način uređaj može da diskriminiše čestice dijametara od 300nm do 10um u 16 kanala. Princip rada je sledeći. Čestice obuhvaćene i vođene strujanjem čistog vazduha nailaze u malu zonu detekcije koja je obasjana laserskom svetlošću. Sistem je konstruisan tako da se u zoni detekcije ne nalazi više od jedne čestice istovremeno, osim u slučaju veoma visokih koncentracija čestica, pri čemu dolazi do greške koincidencije. Laserska svetlost rasejava se na pojedinačnim česticama i nakon refleksije od zakrivljenog ogledala dolazi do fotodetektora. Veličina čestice se određuje poređenjem izmerenog intenziteta na fotodetektoru i standardne kalibracione krive dobijene merenjima izvršenim sa skupom uniformnih čestica poznatog dijametra i indeksa prelamanja. U optičkim meračima ovog tipa seza kalibraciju najčešće koriste bele polistiren lateks čestice. Teorijske kalibracione krive izračunavaju se korišćenjem Mijevog teorije rasejanja na sfernim česticama. Ključni parametri koji određuju rasejanje i apsorpciju svetlosti na čestici su talasna dužina upadne svetlosti, veličina čestice koja se obično uvodi preko bezdimenzionog parametra  $\alpha = \frac{\pi D_p}{\lambda}$ , gde je  $D_p$  dijametar čestice a  $\lambda$  talasna dužina svetlosti i kompleksni indeks prelamanja čestice normalizovan na indeks prelamanja okolne sredine (vazduha)  $m = \frac{N}{N_0} = \frac{n+ik}{N_0}$ . Iz izmerenog intenziteta svetlosti rasejanog pod uglom  $\theta$ ,  $I(\theta, \alpha, m)$  ukoliko nam je poznat indeks prelamanja čestice sferne možemo dobiti njen tačan dijametar. Vrednosti dijametra koje se dobijaju merenjima pomoću optičkih merača veličine bile bi tačne samo ako je indeks prelamanja čestica veoma blizak indeksu prelamanja kalibracionih čestica.

Optički dijametar i dijametar dobijen merenjem pokretljivosti su međusobno usaglašeni za kalibracione sferne čestice, ukoliko čestice nisu sferne ili im se indeks prelamanja razlikuje od indeksa prelamanja kalibracionih čestica potrebno je naknadno usaglašavanje izmerenih spektara.

## III. METOD

Kombinovanje dva spektra veličina čestica, koji su dobijeni pomoću merenja kvalitativno različitim metodama, podrazumeva određeni nivo modelovanja, tj. uvođenja pretpostavki za modelovanje. Pretpostavka koja motiviše modelovanje proističe iz činjenice da se podjednako i istovremeno koriste obe vrste merenja (sa izabranim težinskim koeficijentima), što je poboljšanje u odnosu na pojedinačno korišćenje metoda, pre svega u minimizaciji greške usled nepreciznosti pojedinačnog instrumenta. U nastavku ćemo opisati dva moguća metoda kombinovanja spektra veličina čestica.

Prvi metod je zasnovan na interpolaciji spektara, pri čemu se za svaki pojedinačni spektar, prikazan u  $\frac{dN}{d \log D_p}$  gustini, nameće broj modova od 1 do 2, a za kombinovani spektar se nameće broj modova od 1 do 3. Takođe, kanali dva instrumenta koji se preklapaju, i vrednosti koje su izmerene u tim kanalima se kombinuju u jednu interpolacionu tačku, sa izabranim težinskim koeficijentom. Svaki od modova, koji se koriste pri interpolaciji, je oblika Gausijana, ili zasećenog Gausijana. Ovu metodu je moguće koristiti i za brojčane i za masene koncentracije.

Drugi metod je nešto složeniji i kombinuje dva spektra veličina čestica tako što korekcijama indeksa prelamanja čestica i faktora oblika čestica (engl. shape factor) nastoji da smanji razliku između dva spektra u intervalu njihovog preklapanja. Na ovaj način se dobija uz kombinovani spektar dobija, informacija o indeksu prelamanja čestica kao i faktoru oblika čestica. Oba metoda su dostupna u softveru Multi Instrument Manager 2.0 [3], koji se standardno isporučuje uz dva instrumenta. Ovu metodu je moguće koristiti samo za brojčane koncentracije.

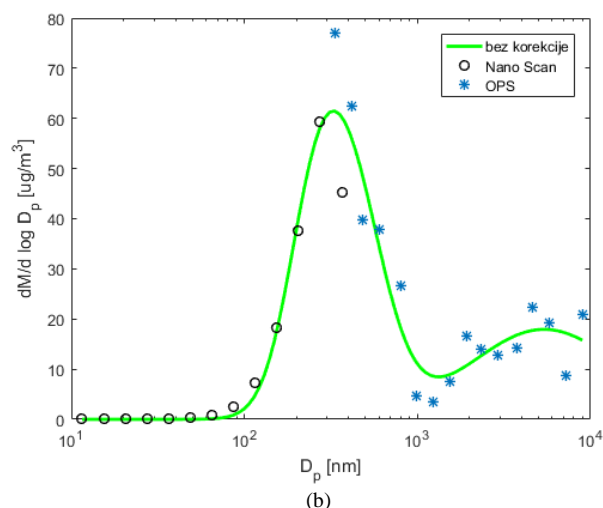
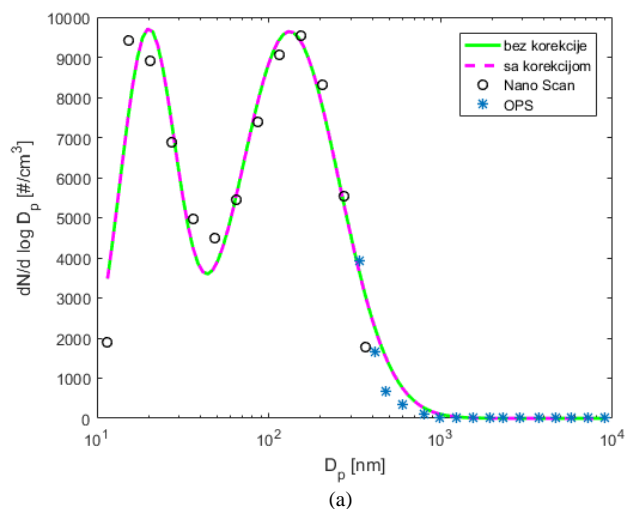
Podaci koje ćemo koristiti za primenu dva metoda su prikupljeni u zimskoj kampanji merenja 2022 na teritoriji grada Novog Sada pomoću instrumenata TSI Nanoscan SMPS 3910 i TSI OPS 3330, iz vozila u pokretu. Svako merenje je bilo geolocirano, a za potrebe ovog rada podaci su usrednjeni na 1 minut.

## IV. REZULTATI

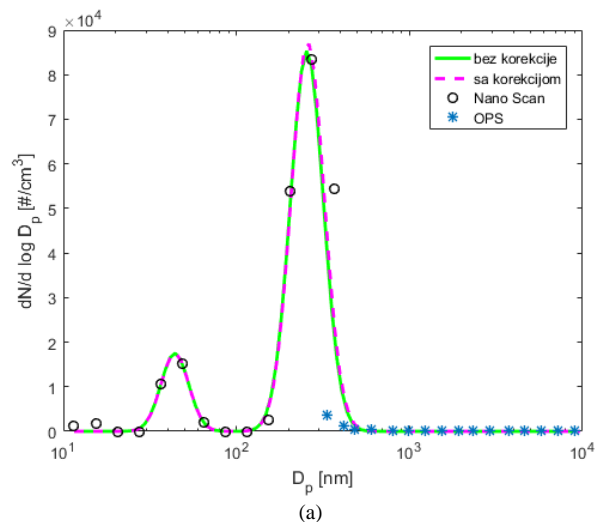
U ovoj sekciji ćemo prikazati nekoliko karakterističnih primera spajanja spektara pomoću dve opisane metode. Prva metoda je na slikama označena sa "bez korekcije", dok je druga metoda, u kojoj se vrši korekcija indeksa prelamanja označena "sa korekcijom".

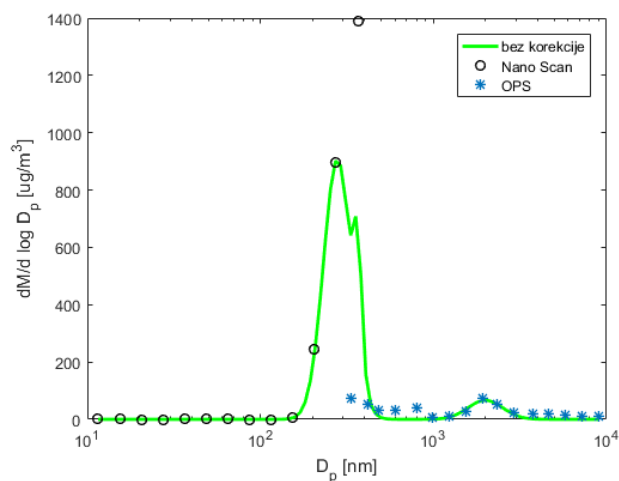
Na slici 3 je prikazan uzorak 6, izmeren 04-Mar-2022 12:03:00. Sa slike 3a je evidentno da dve metode daju gotovo identične kombinovane spektre. Položaj modova je za prvi mod  $D_p = 19,74 \text{ nm}$ ,  $\frac{dN}{d \log D_p} = 9705 \frac{\#}{\text{cm}^3}$  i za drugi mod  $D_p = 129,5 \text{ nm}$ ,  $\frac{dN}{d \log D_p} = 9641 \frac{\#}{\text{cm}^3}$ . Brojčani udeo po frakcijama iznosi  $PN_{0.1}$ : 6217.60,  $PN_{0.5}$ : 10590.32,  $PN_1$ : 10729.67,  $PN_{2.5}$ : 10737.26,  $PN_4$ : 10737.29 i  $PN_{10}$ : 10737.30  $\#/\text{cm}^3$ . Ono što je međutim dodata vrednost drugog metoda je da koristi drugačiju metodologiju, pa da uz kombinovani

spektar dobijamo i informaciju o indeksu prelamanja i odstupanju čestica od sferičnih. U ovom primeru (uzorak 6) je indeks prelamanja 1.5941 i faktor oblika 1.0009.



Sl. 3. Uzorak 6: 04-Mar-2022 12:03:00 a) primer spajanja spektara brojčane koncentracije pomoću dve metode. b) primer spajanja spektara masene koncentracije





Sl. 4. Uzorak 26: 04-Mar-2022 12:23:00 a) primer spajanja spektara brojčane koncentracije pomoću dve metode. b) primer spajanja spektara masene koncentracije

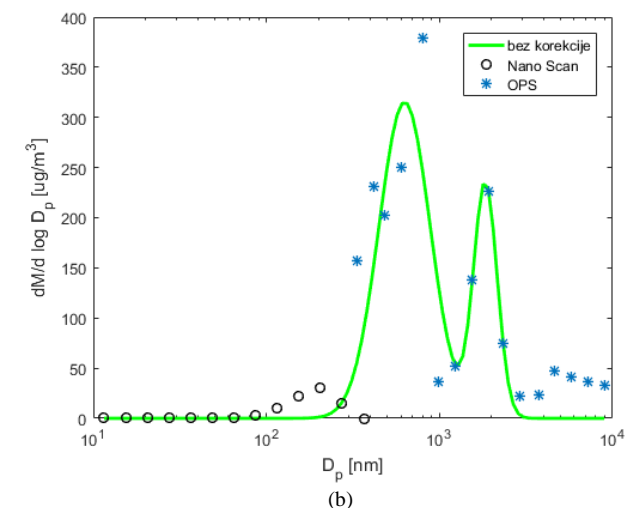
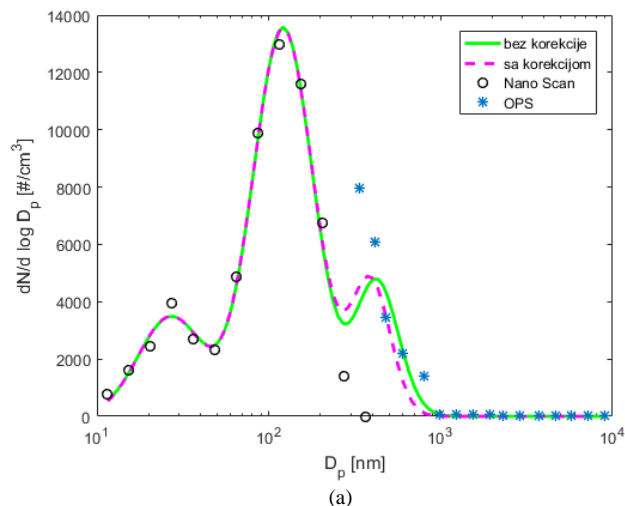
Na slici 3b je prikazan kombinovani spektar masene koncentracije. Uočljiv je standardni fenomen da čestice većeg dijametra znatno više utiču na masu, pa stoga uočavamo da su dominantni drugi modovi u kombinovanom spektru. Ovo je evidentno i iz masenog udela po frakcijama je  $PM_{0.1}$ : 0.18,  $PM_{0.5}$ : 27.15  $PM_1$ : 34.44  $PM_{2.5}$ : 38.49  $PM_4$ : 41.70 i  $PM_{10}$ : 47.77  $\mu g/m^3$ .

Na slici 4 je prikazan uzorak 26, izmeren 04-Mar-2022 12:23:00. Sa slike 4a je evidentno da dve metode i u ovom primeru daju gotovo identične kombinovane spektre, ali da su sada dominantna druga 2 moda, naime položaj modova je za prvi mod  $D_p = 44,92 \text{ nm}$ ,  $\frac{dN}{d \log D_p} = 1,743 \cdot 10^4 \frac{\#}{cm^3}$  i za drugi mod  $D_p = 263,2 \text{ nm}$ ,  $\frac{dN}{d \log D_p} = 8,691 \cdot 10^4 \frac{\#}{cm^3}$ .

Brojčani udeo po frakcijama iznosi  $PN_{0.1}$ : 3510.58,  $PN_{0.5}$ : 23832.11,  $PN_1$ : 23844.91,  $PN_{2.5}$ : 23844.91,  $PN_4$ : 23844.91 i  $PN_{10}$ : 23844.91  $\#/cm^3$ . U ovom primeru (uzorak 26) je indeks prelamanja 1.4046 faktor oblika 1.05. Na slici 4b je prikazan kombinovani spektar masene koncentracije. Uz standardni fenomen da čestice većeg dijametra znatno više utiču na masu, uočavamo i ograničenja korišćenog algoritma budući da neki modovi nisu uračunati u kombinovani spektar, zbog ograničenja na maksimalno 3 interpolirana moda. Takođe dominantni mod, zbog veće razlike u izmerenoj masi između dva instrumenta u kanalu koji se preklapa u interpolaciji nije blizak sa merenjima dva instrumenta. U ovakvim situacijama, konzervativna procena koncentracije aerozagađenja bi uzela u obzir veću koncentraciju, što bi se u algoritmu moglo primeniti većim težinskim koeficijentom primenjenim na odgovarajući instrument. Maseni udeo po frakcijama je  $PM_{0.1}$ : 0.18,  $PM_{0.5}$ : 203.63  $PM_1$ : 203.74  $PM_{2.5}$ : 218.22  $PM_4$ : 220.35 i  $PM_{10}$ : 220.36  $\mu g/m^3$ .

Na slici 5 je prikazan uzorak 39, izmeren 04-Mar-2022 12:36:00. Sa slike 5a je evidentno da u ovom primeru postoji razlika između kombinovanih spektara za dve metode, i da u odnosu na prethodna dva primera u ovom slučaju postoje 3 moda u kombinovanom spektru. To su modovi  $D_p = 27.1 \text{ nm}$ ,  $\frac{dN}{d \log D_p} = 3498 \frac{\#}{cm^3}$ , zatim drugi mod na  $D_p =$

$115.1 \text{ nm}$ ,  $\frac{dN}{d \log D_p} = 1.344 \cdot 10^4 \frac{\#}{cm^3}$  i treći mod na  $D_p = 401.2 \text{ nm}$ ,  $\frac{dN}{d \log D_p} = 4820 \frac{\#}{cm^3}$ . Brojčani udeo po frakcijama iznosi  $PN_{0.1}$ : 3693.81,  $PN_{0.5}$ : 9591.06,  $PN_1$ : 11301.75,  $PN_{2.5}$ : 11372.78,  $PN_4$ : 11372.78 i  $PN_{10}$ : 11372.78  $\#/cm^3$ . U ovom primeru (uzorak 39) je korigovani indeks prelamanja 1.9577 i faktor oblika 0.8787.



Sl. 5. Uzorak 39: 04-Mar-2022 12:36:00 a) primer spajanja spektara brojčane koncentracije pomoću dve metode. b) primer spajanja spektara masene koncentracije

Na slici 5b je prikazan kombinovani spektar masene koncentracije. Uz standardni fenomen da čestice većeg dijametra znatno više utiču na masu, ponovo uočavamo i ograničenja korišćenog algoritma budući da neki modovi nisu uračunati u kombinovani spektar. Takođe i u ovom slučaju postoji znatna razlika između merenja dva instrumenta u kanalu koji se preklapa, tako da bi za konzervativnu procenu bilo potrebno korigovati težinske koeficijente tako da više uzimaju u obzir instrument koji je izmerio višu vrednost. Maseni udeo po frakcijama je  $PM_{0.1}$ : 0.18,  $PM_{0.5}$ : 33.16  $PM_1$ : 108.61  $PM_{2.5}$ : 156.68  $PM_4$ : 157.26 i  $PM_{10}$ : 157.26  $\mu g/m^3$ .

## V. ZAKLJUČAK

U ovom radu je ilustrovana primena dva metoda

kombinovanja spektara koji su dobijeni pomoću dve komplementarne metode merenja. Na nekoliko karakterističnih primera je pokazano kako se razlikuju spektri brojčane i masene koncentracije, i ukazano je na prednosti i nedostatke metoda spajanja spektara. U slučaju da dve opisane metode spajanja spektara daju sličan rezultat, korišćenjem metode sa korekcijom indeksa prelamanja se uz konačni spektar može dobiti i sadržajan podatak o indeksu prelamanja i faktoru oblika čestice. Budući da se u praksi prilikom merenja prikupi jako velik broj podataka, spajanje spektara bi bilo najpogodnije automatizovati, što trenutna implementacija algoritma ne dozvoljava, već je neophodno ručno zadavanje broja modova koji je ograničen na maksimalno 3 moda u konačnom spektru, kao i ručni odabir težinskog faktora sa kojim ulaze merenja instrumenata u preklapajućem opsegu veličina čestica. Jedan od mogućih načina automatizacije je automatska korekcija težinskih koeficijenata, tako da kombinovani spektar više uzima u obzir instrument koji je izmerio veću koncentraciju u kanalu koji se preklapa u dva spektra. Na ovaj način bi bilo moguće kreirati mape visoke rezolucije koje bi kao ulazne podatke imale konzervativno procenjen kombinovani spektar.

#### ZAHVALNICA

Zahvaljujemo se projektima: H2020 VIDIS, br. 952433 u okviru programa Evropske unije za istraživanje i inovacije HORIZON 2020 (<https://vidis-project.org/>), zatim projektu ‘Prostorno-vremenske varijacije nivoa respirabilnih čestica u urbanoj zoni Novog Sada – mobilni monitoring, modelovanje i kreiranje mapa visoke rezolucije’ delimično finansiranom od gradske uprave grada Novog Sada kao i Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

#### LITERATURA

- [1] Oberdörster G, Oberdörster E and J. Oberdörster, Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect*, 11: 823-839, 2005.
- [2] Gurr, J.R., Wang, A.S.S., Chenb, C-H. and K.Y. Jan, Ultrafine titanium dioxide particles in the absence of photoactivation can induce oxidative damage to human bronchial epithelial cells. *Toxicology*, 213: 66-73, 2005.
- [3] Multi-instrument manager (MIM™) software for SMPS™ spectrometers and OPSs sizers user’s guide (version 2.0) p/n 6007798, revision A april 2014, TSI Incorporated

#### ABSTRACT

Atmospheric aerosols in urban environments consist of particles of different diameters, which can range in size from a few nanometers to a few micrometers. Therefore, it is often necessary to use several instruments to measure the aerosol concentration, with fundamentally different underlying measurement principles. In this paper, methods based on measuring the electrical mobility of particles, for the diameter range from 10nm to 420nm, and measuring the equivalent optical diameter, for the diameter range from 300nm to 10um, were used. As a main result, examples of combining particle size spectra obtained using these two complementary measurement methods are presented. In the process of combining the particle size spectra, it is possible to modify the distribution obtained by optical measurements by searching for the optimal value of the particle refractive index so as to obtain the best possible agreement with the distribution obtained by measuring electrical mobility. The results of measurements from the mobile monitoring campaign in Novi Sad 2022 were used as input data.

#### **An example of combining the distribution of atmospheric aerosols obtained by the method utilizing electrical mobility and the optical method**

Miloš Davidović, Milena Davidović, Sonja Dmitrašinović,  
Mileša Srećković, Milena Jovašević-Stojanović

# Integracije naučnih znanja u primeni veštačke inteligencije u heritološkim problemima

Suzana Polić, Milesa Srečković, Zoran Stević, Slobodan Bojanić, Željka Tomić

**Apstrakt**— Primena veštačke inteligencije u zaštiti kulturne baštine, na ovom stepenu razvoja, odnosi se prevashodno na domen akvizicije podataka, koji mogu biti od značaja za stvaranje šire slike o sredstvima i metodama realizacije umetničkih dela. U ovom radu, istražuje se pitanje integracije naučnih znanja u kontekstu primene veštačke inteligencije, u vezi sa delima velikih formata, i to u domenima specifikuma organizacije materije, diferencijacije komponenti i njihovih elemenata, strukturnih planova i matrica koje daju kvalitet unutrašnje koherencije i grade performativnu snagu dela. Multidisciplinarna opservacija treba da doprinese procesu objektivizacije znanja, do koje se, prirodom predmeta istraživanja, može doći samo integracijom elemenata više nauka i naučnih disciplina.

**Ključne reči**— naučna znanja, veštačka inteligencija, heritološki problemi

## I. UVOD

Upotreba lasera i lidara, uz podršku veštačke inteligencije, obeležava naučni rad u zaštiti kulturnog nasleđa na početku treće decenije XXI veka. Reč je o primenama u vezi sa procenama oštećenja površina objekata, putem analiza *oblaka tačkaka*, uz korišćenje rezultata dobijenih nedestruktivnim i beskontaktnim metodama istraživanja [1], a takođe je reč i o kreiranju algoritama za klastere *Lidar Point Cloud* podataka [2], gde se raspoložuje informacijama o karakteristikama objekata, do nivoa detalja veličine milimetra [3].

Ove primene već su dale rezultate u istraživanjima zaštite značajnog kulturnog nasleđa, kao što je to *Palazzo Vecchio* u Firenci (gde je primenjen *OPTICS clustering method*) [4] ili katedrala *Notre Dame* u Parizu, za koju je laserskim skeniranjem prikupljeno preko milijardu tačkaka [5]. Posebno je značajno to, što neuronske mreže pomažu u utvrđivanju

Suzana Polić – Narodni muzej Srbije, Trg Republike 1a, 11000 Beograd (email: [suzanapolic64@gmail.com](mailto:suzanapolic64@gmail.com))

Milesa Srečković – Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd (e-mail: [esreckov@etf.bg.ac.rs](mailto:esreckov@etf.bg.ac.rs))

Zoran Stević – Narodni muzej Srbije, Trg Republike 1a, 11000 Beograd; Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd; Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor (<https://orcid.org/0000-0002-1867-9360>)

Slobodan Bojanić – Universidad Politécnica de Madrid, P.º de Juan XXIII, 11, 28040 Madrid (email: [slobodan.bojanic@upm.es](mailto:slobodan.bojanic@upm.es))

Željka Tomić – ATSSB, Nade Dimić 4, 11080 Zemun (e-mail: [ztomic@tehnikum.edu.rs](mailto:ztomic@tehnikum.edu.rs) ili [zeljak@gmail.com](mailto:zeljak@gmail.com))

defekata upotrebom lidar sistema, uz integrisanje rezultata numeričkih simulacija, u cilju utvrđivanja šteta nastalih na objektima [6, 7] kao posledicama katastrofa koje su zahvatile viševekovno kulturno nasleđe. U okolnostima u kojima se zahteva brza obnova ovih objekata, a bez raspoložive detaljne originalne dokumentacije, u upotrebi su i sofisticirane analize podataka, zasnovane na metodi *linearne regresije*, odnosno na znanjima iz oblasti teorije verovatnoće, matematičke statistike, linearne algebre i multivarijabilnih analiza [8].

Izvan područja detekcije i opservacije oštećenja na predmetima i objektima kulturnog nasleđa, veštačka inteligencija dala je i značajan doprinos u novoj oblasti konzervacije – restauracije, u cilju integralnog razumevanja autorskih dela, gde se veštačka inteligencija koristi za rekonstrukciju delova umetničkih dela koji nedostaju, koji iz različitih razloga nisu sačuvani. Delotvornost ove metode potvrđena je, u do sada najvećem projektu savremenih naučnih muzejskih istraživanja, u restauraciji Rembrantovog remek-dela *Noćna straža (De Nachtwacht)* iz 1642. godine, koje se nalazi u kolekciji *Rijksmuseum* u Amsterdamu. Posle završenog projekta *Operation Nightwatch*, u vezi sa ovim umetničkim delom, raspoložuje se sa 717 biliona piksela, a veštačka inteligencija pomogla je u spajanju 8.439 pojedinačnih fotografija delova ove slike, snimljenih sa iste udaljenosti od 13 cm. Sve je smešteno na prostoru od 5,6 terabajta. Na taj način su stvoreni preduslovi za rekonstrukciju nestalih delova slike ovog velikog formata (3,63 m x 4,37 m), koji se sada može, prvi put posle 300 godina, videti u originalnoj veličini, budući da je delo 1715. godine skraćivano zbog postavljanja u Gradsku kuću u Amsterdamu, kako bi moglo da bude uneseno kroz vrata (!?!). Tada je na slici odsečeno 60 cm sa leve strane, 22 cm od gornje ivice, 12 cm od donje ivice i 7 cm sa desne strane slike. Na osnovu svih prikupljenih podataka, uz specijalno kreirani softver, a prema kopiji ovog dela, koju je uradio Rembrantov savremenik Gerrit Lundens (1622 – 1686), veštačka inteligencija dala je ključan doprinos u rekonstrukciji *Noćne straže*, ne samo u materijalnom vidu dela, posebno stratigrafiji bojenih slojeva, već i u razumevanju autorske ideje, budući da ova rekonstrukcija pokazuje novo dimenzionalno težište slike, što pomera i konstelaciju prikazanih ljudskih figura koju je umetnik izvorno kreirao [9].

Navedeni primeri ukazuju na složenost upotrebe veštačke inteligencije u savremenoj zaštiti nasleđa, u kojoj rezultati korišćenja laserske tehnike u dijagnostici stanja predmeta i

objekata [10], uz primenu robotike i uz razvoj elektronske ličnosti [11], stvaraju novo polje integracije sa podacima koje daju komplementarne discipline prirodnih i tehničkih nauka, kao i pomoćne naučne discipline povezane za istorijom umetnosti i arheologijom [12]. Imajući u vidu da se najveći obim istraživanja posvećuje pitanju, *šta veštačka inteligencija može da učini u zaštiti nasleđa*, a da postoji izraženi nedostatak istraživanja posvećenih pitanju, *kako u tom cilju integrisati neophodna znanja u primeni veštačke inteligencije*, to je predmet ovog rada upravo pitanje načina integracije znanja, posebno sa stanovišta intenzivnih promena, koje u zaštiti kulturnog nasleđa, inicira primena novih tehnologija [13], u skladu sa duhom tehnološkog vremena [14].

## II. DOKTRINA POLIFONIJSKOG MIŠLJENJA

Heritološko znanje, u kojem se uz pomoć novih tehnologija otvaraju novi pravci istraživanja, pokazuje kompleksnost multidisciplinarnog promišljanja [15,16], baziranog na *polifonijskom mišljenju*, koje danas multidisciplinarno, metodološki, osim heritologije, obeležava i filozofsku granu tehnofilozofije [17]. U dugoj tradiciji razvoja doktrine polifonijskog mišljenja (sa akcentom na različitosti između naučnog znanja i znanja o nauci), gde se doktrina kao sistem učenja razvija praktično od I veka n.e., kada teoretičar Guido d'Arezzo piše traktate *Micrologus* i *Epistola*, polifonijsko mišljenje dostiže vrhunac u vreme renesanse, da bi stupanjem prosvetiteljstva na istorijsku scenu, polifonijsko mišljenje bilo gotovo zaboravljeno u nauci, opstajući prevashodno u umetnosti. Posle perioda viševjekovnog razvoja pojedinačnih, uskih specijalnosti u različitim naukama, danas u XXI veku, dostignuta je svest o tome, da je polifonijsko mišljenje zapravo *tehnika*, odnosno kanon (u smislu pravila / normi), čije se funkcionisanje, kako to konstatuje metodičar Pavel Rojko, lako može ustanoviti, ali da i dalje nema odgovora na pitanje, kako je i zašto ta *tehnika* prešla u *umetnost* [18]. Ovo pitanje aktuelno je u svetlu činjenice, da multidisciplinarnost u svojoj suštini praktično nije ostvarljiva bez polifonijskog metodološkog mišljenja.

Keplerovo delo *Harmonices mundi libri V* iz 1619. godine, u kojem je reč o *kontrapunktu univerzalnih harmonija svih planeta*, primer je koji ukazuje na svu složenost održanja polifonijskog mišljenja u nauci, budući da je za razvoj kanona neophodno permanentno uključivanje novih naučnih dostignuća. Sa druge strane, umetnost, koja svih prethodnih vekova nije odustajala od polifonijskog mišljenja, dostigla je takvu prohodnost kroz vreme, da se univerzalnost polifonijskog mišljenja održava kao standard. Primer je delo Fjodora Mihajloviča Dostojevskog, kao inovatora, čiji opus ukazuje na ideografska i paradigmatička čvorišta u teorijskoj i primenjenoj ravni, značajna u proučavanju linija sinhronije / dijahronije, u prikazivanju načina na koji *celina* oblikuje *strukturu*, i gde, kako to promišlja Bahtin, „...svaki smisao otkriva svoju dubinu kada se sretne i dodirne sa drugim i drugačijim smislom“ [19], kao što je to, kako pokazuje istorija, u srednjovekovnoj teoriji ustanovio princip *punctum contra punctum* (kontrapunkt), odnosno u savremenoj upotrebi

laserske tehnike, *Lidar Point Cloud*.

To pokazuje da je neophodno da se polifonijsko metodološko mišljenje u zaštiti baštine, bazira na svim univerzalno konstituisanim normama, koje važe i u naučnom i u umetničkom domenu i bez obzira na tradicionalno distancirane diskurse, imajući u vidu da ta vrsta distance nema značaja u primeni veštačke inteligencije, a što je sasvim u skladu sa revolucionarnim Šenbergovim filozofsko-estetičkim principom polifonije, koji je „...nešto što je heteronomno emancipovanoj harmoniji i što s njom svakom prilikom tek treba da se izmiri“ [20], ili preneto u domen primene veštačke inteligencije u heritologiji, nešto što svakom prilikom egzaktno treba da se potvrdi.

Imajući u vidu navedene postavke, kao i činjenicu da veštačka inteligencija „učič“ na način koji kreira čovek, u ovom istraživanju tragalo se za mogućim razvojnim linijama u izgradnji *polifonijskog mišljenja*, koje bi ukazivale na izvore nauke, odnosno mišljenja o kontrapunktu / polifoniji, na način da mogu da budu pogodne za algoritam „učenja“ veštačke inteligencije. Analiza različitih razvojnih linija, pokazala je da ovakvo učenje treba da se konstituiše polazeći od naučnog dokaza Knuta Jepesna (Knud Jeppesen), da je učenje o kontrapunktu tek u XVI veku dobilo tako čvrstu organizaciju, „...da je svoju egzistenciju nastavilo nezavisno od prakse“ [21], što je i ovde prezentovani model ograničilo na navedeni period. Kao što se može videti, tabelarno su prikazani traktati polihistora, koji u sebi sadrže začetke polifonijskog mišljenja (matematičara, fizičara, muzičkih teoretičara, metafizičara, filozofa, astronoma, kompozitora, pesnika, državnika, diplomata i slikara), upravo zbog rudimentarnosti i nedovoljne konstituisanosti, što u procesu razvoja veštačke inteligencije, omogućava različita tematsko-strukturalna račvanja [22 -37], pogodna za učenje neuralnih mreža.

TABELA I  
JEDAN MODUS LINIJE RAZVOJA KA POLIFONIJSKOM MIŠLJENJU [22 -37]

Autor	Traktati i druga dela
Guido d'Arezzo (s. 991-992 – s. 1033)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Micrologus de disciplina artis musicae</i>;</li> <li>● <i>Epistola ad Michaellem</i></li> </ul>
Franco of Cologne (13. vek)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Ars cantus mensurabilis</i>;</li> <li>● <i>Compendium discantus</i></li> </ul>
Johannes de Garlandia (s. 1270 – 1320), ur.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>De musica mensurabili positio</i>;</li> <li>● <i>Introductio in contrapunctu pro ruribus</i></li> </ul>
Johannes de Muris (s.1290 - s.1355)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>De discantu et consonantiis</i>;</li> <li>● <i>Musica speculativa</i>; ● <i>Musica practica</i>;</li> <li>● <i>Libelus practica cantus mensurabilis</i>;</li> <li>● <i>Ars novae musicae</i>;</li> <li>● <i>Ars contrapuncti</i>;</li> <li>● <i>Ars discantus</i>;</li> <li>● <i>Quilibet affectans (prva didaktika kontrapunkta)</i></li> </ul>

Walter of Evesham (? - ?1330)	• <i>Summa de speculatione musicae</i>
Philippe de Vitry (1291-1361)	• <i>Ars contrapunctus</i> ; • <i>Ars perfecta in musica</i> ; • <i>Ars novae</i>
Petrus frater dictus Palma ociosa (s. 1291-s. 1356)	• <i>Contrapunctus diminutus and prolongation</i> ; • <i>Compendium de discantu mensurabili</i>
Guillame de Machault (1300-1377)	• <i>The Debate Series: Le Jugement douroy de Behaingne (Judgment of the King of Bohemia) &amp; Le Jugement dou roy de Navarre (Judgment of the King of Navarre)</i>
Prosdocius de Beldemandis (? – 1428)	• <i>Algorismus de integris sive pratica arismetrice de integris (1410)reprinted Federicus Delphinus ed. (Venice, 1483 and 1540)</i> ; • <i>Expositiones tractatus Praticae cantus mensurabilis Johannis de Muris (c. 1404)</i> ; • <i>Tractatus pratique cantus mensurabilis (1408)</i> ; • <i>Brevis summula proportionum quantum ad musicam pertinet (1409)</i> ; • <i>Contrapunctus (1412)</i> , edited by Jan Herlinger, 1984; • <i>Tractatus pratique cantus mensurabilis ad modum Ytalicorum (1412)</i> ; • <i>Tractatus plane musice (1412)</i> , edited by Jan Herlinger, 2008; • <i>Parvus tractatulus de modo monacordum dividendi (1413)</i> , edited by Jan Herlinger; • <i>Tractatus musice speculative (1425)</i> , Edited by Jan Herlinger, 2008.
Jehan Le Taintenier (s. 1435 - 1511)	• <i>Liber de arte contrapuncti (1477)</i> ; • <i>Liber de natura et proprietate tonorum</i>
Gioseffo Zarlino (1517–1590):	• <i>Le Institutioni Harmoniche (1558)</i> ; • <i>Dimostrationsi harmoniche (1571)</i>
Vincenzo Galilei (s. 1520-1591)	• <i>Il primo libro della pratica del contrapunto intorno all'uso delle consonanze</i> ; • <i>Discorso intorno all'uso delle dissonanze</i> ; • <i>Discorso intorno all'uso dell' enharmonio, et di chi fusse autore del cromatico</i> ; • <i>Dubii intorno a quanto io ho detto dell' enharmonio con la solutione di essi (apendix)</i> ; • <i>Dialogo della musica antica e della moderna</i>

Za potrebe razvoja veštačke inteligencije u heritologiji, analiza prikazane razvojne linije ukazuje na neophodnost da se u primeni veštačke inteligencije u heritologiji, procesualno i u kontinuitetu razrešava problem fenomena *presupozicije* (termin preuzet iz oblasti pragmatike) [38,39], koji polifonijski korespondira sa *implikaturom*, kao i *semantičkom ili logičkom implikacijom*, na polju razumevanja komunikacija između različitih naučnih oblasti i umetnosti. *Presupozicija*, kao tvrdnja uslovljena kontekstom, čija se istinitost ne dovodi u

pitanje (u ovom slučaju tehničke provenijencije), a koju odlikuje postojanost pod negacijom, u odnosu na *implikaturu*, kao zaključak o značenju koje nije izrečeno i egzistira van zajedničkog konteksta (u ovom slučaju iz domena izvan empirijskog znanja), zahteva softversku izgradnju modaliteta uzajamnih povezanosti, u težnji ka stvaranju što preciznijih *semantičkih implikacija*.

Na ovom polju, kako pokazuje istraživanje sprovedeno u ovom radu, od pomoći je *aporetika*, kao disciplina u kojoj se prepoznaje usmerenost na *obradu i isticanje dosega problema*, kako to formuliše Hartman [40], gde posebno treba imati u vidu razlikovanje posmatranja slojeva umetničkog dela [41], kao i u širem okviru, stanovište Ingartena, da u istraživanju načina postojanja umetničkog dela treba primenjivati čisto percipitivan način prilaza suštini stvari, dakle „zauzimati stav fenomenologa“ [42].

### III. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati istraživanja modusa za integraciju znanja neophodnog u primeni veštačke inteligencije u heritologiji, u funkciji podrške primeni lasera, lidara i drugih tehnologija koje danas čine osnovu za razvoj konzervacije-restauracije kulturnog nasleđa. Istraživanjem doktrine polifonijskog mišljenja, od vremena *artes liberales* i u različitim razdobljima, ovde je u fokusu bio mogući model za razvoj polifonijskog mišljenja, a prema potrebama primene veštačke inteligencije u heritologiji. Sprovedene analize pokazale su, da se to može realizovati pod uslovima uvažavanja pragmatičkih i aporetičkih uzusa, na osnovu čega je i formiran model, kao predlog koji polazi od spekulativnih postavki prikazuje razvojnu liniju ka složenijim zahtevima za analitičko poznavanje kontrapunkta, što ga i čini pogodnim za uvođenje i razvoj veštačke inteligencije. Istovremeno, ovaj predlog treba da pomogne u očekivanom daljem razvoju i promišljanju ovako složene problematike.

### ZAHVALNICA

Istraživanje prezentovano u ovom radu obavljeno je zahvaljujući podršci Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (ugovori 451-03-68/2022-14/200026 i 451-03-68/2022-14/200287), kao i zahvaljujući podršci Ministarstva kulture i informisanja Republike Srbije.

### REFERENCE

- [1] J. M. E. Mohammadi, "Point Cloud Analysis for Surface Defects in Civil Structures", Ph.D. Thesis, University of Nebraska-Lincoln, Department of Civil Engineering, Lincoln, Nebraska, USA, 2019.
- [2] J. B. Haurum, M. M. J. Allahham, M. S. Lyng, K. S. Henriksen, I. A. Nikolov, T. B. Moeslund, "Sewer Defect Classification using Synthetic Point Clouds", Proc. of the 16<sup>th</sup> International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP), Vienna, Austria, 8–10 February 2021.
- [3] T. C. Hou, J. W. Liu, Y. W. Liu, "Algorithmic clustering of LiDAR point cloud data for textural damage identifications of structural elements", *Measurement*, 108, 2017, pp. 77–90.
- [4] R. L. Wood, M. E. Mohammadi, "Feature-Based Point Cloud-Based Assessment of Heritage Structures for Nondestructive and Noncontact Surface Damage Detection", *Heritage*, 4, No. 2, 2021., pp. 775-793.

- [5] T. Nace, "We Have Beautiful 3-D Laser Maps of Every Detail of Notre Dame", <https://www.forbes.com/sites/trevornace/2019/04/16/we-have-beautiful-3d-laser-maps-of-every-detail-of-notre-dame/?sh=4e3e887226e6> (accessed on 31 March 2021).
- [6] M. Nasrollahi, N. Bolourian, A. Hammad, "Concrete surface defect detection using deep neural network based on lidar scanning", Proc. of the CSCE Annual Conference, Laval, QC, Canada, 12–15 June 2019.
- [7] R. Napolitano, M. Hess, B. Glisic, "Integrating non-destructive testing, laser scanning, and numerical modeling for damage assessment: The room of the elements", *Heritage*, 2, 12, 2019., pp. 151-168
- [8] C. R. Shalizi, "Advanced Data Analysis from an Elementary Point of View", Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013.
- [9] <https://www.rijksmuseum.nl/en/whats-on/exhibitions/operation-night-watch>
- [10] S. Polić, „Primena lasera u obradi, zaštiti i dijagnostiranju materijala predmeta kulturne baštine”, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, 2007.
- [11] S. Polić, "Dictionary of Technology and Electronic Personality", in: Orthodoxy & Artificial Intelligence - Dictionary of Technology and double logos: A Contribution to the Dialog between Science and Religion, Institute of Historical Research, National Hellenic Research Foundation, Athens, Greece, 2019., pp. 61-79
- [12] S. Polić, „Upravljanje znanjem i nematerijalno kulturno nasleđe”, Zbornik radova Primena digitalizacije u kulturi i nauci, 16. novembar 2018. u Beogradu, SANU i Institut za uporedno pravo, Beograd, 2019., str. 137-146.
- [13] S. Polić, "Challenges for engineering in the heritage protection of the 21<sup>st</sup> century", Proc. 211<sup>th</sup> The IIER International Conference, Rome Italy, 20<sup>th</sup>-21<sup>st</sup> December 2018., p. 51.
- [14] S. Polić, "Materials Science and *zeitgeist* as a basis for the preservation and restoration of cultural heritage", Proc. 20<sup>th</sup> World Congress on Materials Science and Engineering, June 24-26, 2019, Vienna, Austria; Journal of Material Sciences & Engineering, Vol. 08, 2019., p. 56
- [15] S. Polić, D. Simeunović, "The importance of multidisciplinary research in the protection of cultural heritage, Conference of the International Journal of Arts and Science", Ca' Foscari University of Venice, Venice, Italy, 20 to 23 June 2017, CD – ROM, pp. 333-334, 2017.
- [16] S. Polić, „Opus citatum: robotika i veštačka inteligencija u zaštiti kulturnog nasleđa”, CIK, NANT & ETIKTON, Beograd, 2018 [el. izvor], ISBN 978-86-6179-068-3 (CIK)
- [17] S. Polić, „Od inženjerstva do tehnofilozofije u obrazovanju inženjera za zaštitu kulturnog nasleđa”, u: Tematski zbornik radova XXVI naučnog skupa međunarodnog značaja „Tehnologija, kultura i razvoj“, Beograd 2 – 3.12.2019., ISBN 978-86-82183-18-1 (IMP), str. 133-151.
- [18] P. Rojko, „Glazbeno pedagoške teme”, Vlastita naklada Jakša Zlatar, Zagreb, 2012., p.377
- [19] M. M. Бахтин, „Эстетика словесного творчества”, Искусство, Москва, 1979.
- [20] D. Bužarovski, „Istorija estetike muzike”, Fakultet umetnosti, Niš, 2013.
- [21] K. Jeppesen, "Counterpoint: The Polyphonic Vocal Style of the Sixteenth Century", translated by Glen Haydn, Prentice – Hall, 1939, reprint Dover Publications, New York, 1992.
- [22] C. Ruini, "Guido d'Arezzo", in: Dizionario biografico degli italiani, vol. 61, Istituto dell'Enciclopedia Italiana, Roma, Italia, 2004.
- [23] D. Daolmi, "Storia della musica medioevale e rinascimentale", in: Temporum Stirpis Musica, Dipartimento di Beni culturali e ambientali, Università degli Studi di Milano, Milano, Italia, <https://www.examenapium.it/meri> (Retrieved March 2022)
- [24] C. V. Palisca, "Consonance, §1", in: The New Grove Dictionary of Music and Musicians, Ed. Stanley Sadie, John Tyrrell, VI, Oxford University Press, Oxford, New York, 2001.
- [25] R. H. Hoppin, "Medieval Music", W. W. Norton & Co., New York, USA, 1978.
- [26] J. Herlinger, "Prodocimus de Beldemandis", in: Sadie, Stanley; Tyrrell, John (eds.), The New Grove Dictionary of Music and Musicians (2nd ed.), Macmillan, London, GB, 2001.
- [27] Ch. M. Atkinson, "Franco of Cologne on the Rhythm of Organum Purum", in: Early Music History, Cambr.Univ. Press, Vol. 9, 1990, pp. 1–26.
- [28] L. Gushee, "New Sources for the Biography of Johannes de Muris", *Journal of the American Musicological Society*, Vol. 22, Issue 1, CA, USA, 1969, pp. 3–26
- [29] D. Leech-Wilkinson, "Contrapunctus diminutus and prolongation, (unpublished conference paper, 1984/5), [https://www.academia.edu/32663077/Contrapunctus\\_diminutus\\_and\\_prolongation](https://www.academia.edu/32663077/Contrapunctus_diminutus_and_prolongation) (Retrieved March 2022)
- [30] A. W. Robertson, "Guillaume de Machaut and Reims: Context and Meaning in His Musical Works", Cambridge, Cambridge University Press, England, 2002.
- [31] J. Tinctoris, "Opera Omnia", in: Corpus Mensurabilis Musicae 18, ed. William Melan, American Institute of Musicology, USA, 1976.
- [32] "Gioseffo Zarlino", in: The New Grove Dictionary of Music and Musicians, ed. Stanley Sadie, vol. 20 Macmillan Publishers Ltd., London, GB, 1980.
- [33] S. Sadie, ed., "Vincenzo Galilei", in: The New Grove Dictionary of Music and Musicians, Vol. 20, London, Macmillan Publ. Ltd., GB, 1980.
- [34] W. T. Atcherson, "Key and Mode in Seventeenth – Century Music Theory Books", *Journal of Music Theory*, New Haven, Yale University Press, Vol. 17, no. 2, USA, 1973.
- [35] D. de la Motte, "Kontrapunkt", Kassel: Bärenreiter-Verlag Karl Vöterle GmbH & Co., Kassel, Deutschland, 1981.
- [36] K. Jeppesen, "Counterpoint: The Polyphonic Vocal Style of the Sixteenth Century", Dover Publications, New York, USA, 1992.
- [37] H. Sanders, "Counter point revolutionized", *The Musical Quarterly*, Vol. 5, N° 3, 1919., pp. 338-347.
- [38] D. Beaver, B. Geurts, "Presupposition", in: The Stanford Encyclopedia of Philosophy, Winter 2014 Edition, <http://plato.stanford.edu> (Accessed: March 2022)
- [39] M. Simons, "Presupposition and Relevance", [http://web.mit.edu/24.954/www/files/simons.presupposition\\_relevance.pdf](http://web.mit.edu/24.954/www/files/simons.presupposition_relevance.pdf) (Accessed: March 2022)
- [40] T. W. Adorno, "Philosophy of New Music", Univ. of Minnesota Press, USA, 2006.
- [41] N. Hartman, „Estetika”, Dereta, Beograd, 2004.
- [42] R. Ingarden, „O književnom delu”, prev. R. Đokić, Foto Futura, Beograd, 2006.

#### ABSTRACT

The application of artificial intelligence in cultural heritage, at this degree of development, refers primarily to the domain of data acquisitions that may be important for the creation of a wider image on the funds and methods of the implementation of works of art. In this paper, the issue of integration of scientific knowledge is investigated in the context of the application of artificial intelligence regarding the works of large formats. It is the domains of the specifics of the organization of matter, the differentiation of components and their elements, structural plans and matrix that give the quality of internal coherence and build the performative power of the work. Multidisciplinary observation should contribute to the process of objectifying the knowledge, to which the nature of the course of research, can only be reached by the integration of elements of several sciences and scientific disciplines.

#### Integration of scientific knowledge in the application of artificial intelligence in heritological problems

Suzana Polić, Mileša Srećković, Zoran Stević, Slobodan Bojanić, Željka Tomić



# Problem heritološke abdukcije u vezi sa instrumentalnim analizama materijala kulturne baštine

Suzana Polić, Milesa Srećković, Zoran Stević, Miodrag Malović, Miloš Đurić

**Apstrakt**—Heritološki fenomeni u oblasti istraživanja kompozitnih umetničkih dela, u vezi sa raznovrsnošću pristupa u kvalitativnim i kvantitativnim kriterijumima za izbor materijala, postavljaju složene zadatke u primeni instrumentalnih metoda, koje prethode izradi protokola za konzervaciju-restauraciju predmeta kulturne baštine. U ovom radu u fokusu je problem heritološke abdukcije, u heurističkoj proceni broja neophodnih analiza, odnosno deficita podataka u fragmentarnim strukturama koje su izraz umetničkog spontaniteta, a sa akcentom na fenomen *praemissa minor* u traganju za metodološki čvrstom platformom za interpretaciju podataka.

**Ključne reči**—spektroskopske analize, kulturna baština, heritološka abdukcija.

## I. UVOD

Savremene metode istraživanja materijala kulturne baštine, koje su uvođenjem laserskih tehnika unapređene u domenu osetljivosti i preciznosti u identifikaciji materijala, omogućavaju analize različitih slojeva umetničkih slika, od podloga, odnosno nosilaca slika, do izvedenih retuša (Tabela I). Ove metode obuhvataju [1-10]:

- XRF (X-ray fluorescence analysis)
- XRD-CT (X-ray diffraction computed tomography)
- PIXE (Particle-induced X-ray emission)
- PIGE (Particle induced Gamma-ray Emission)
- RBS (Rutherford backscattering spectrometry)
- NAA (Neutron activation analysis)
- FTIR (Fourier-transform infrared spectroscopy)
- ATR-FTIR (Attenuated total reflection - Fourier-transform infrared spectroscopy)
- RS (Raman spectroscopy)
- GC-MS (Gas chromatography-mass spectrometry)

Suzana Polić – Narodni muzej Srbije, Trg Republike 1a, 11000 Beograd (e-mail:suzanapolic64@gmail.com)

Milesa Srećković – Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd (e-mail: esreckov@etf.bg.ac.rs)

Zoran Stević – Narodni muzej u Beogradu, Trg Republike 1a, 11000 Beograd; Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd; Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Vojске Jugoslavije 12, 19210 Bor (<https://orcid.org/0000-0002-1867-9360>).

Miodrag Malović – Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Karnegijeva 4, 11120 Beograd (email: ofiss@malovic.in.rs) (<https://orcid.org/0000-0002-0691-4626>).

Miloš Đurić – Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd (e-mail: djuric@etf.bg.ac.rs)

- LIBS (Laser-induced Breakdown Spectroscopy)
- SRN (Synchrotron radiation and neutrons)
- HR-ICP-MS (High-resolution inductively coupled plasma mass spectrometry)

Neophodna komplementarnost u primeni ovih tehnika, pomaže u kvalitetu identifikacije pigmenata, veziva i dodataka koji se mogu naći na umetničkim delima u slikarstvu, što ukupno omogućava različite postupke u očuvanju kulturne baštine putem aktivnosti utvrđivanja porekla i datiranosti, otkrivanja podcrteža i preslika, kao i autentičnosti dela i autorskih umetničkih rukopisa.

Složenost problematike heurističke procene, koja se prevashodno zasniva na temeljnom iskustvu u zaštiti nasleđa, odnosi se, kako na pristupe u domenu istraživanja u oblasti tehnologije materijala [11,12], tako i na specifičnu kontekstualizaciju istraživanja na polju izvan empirijskog rezonovanja, u skladu sa istorijskim izvorima i starim recepturama (što obuhvata i u istoriji zabeležene *tajne* ili nikada razrešene slikarske recepture) u primeni materijala tokom stvaralačkih procesa u umetnosti [13]. Budući da nam istorija razvoja oblasti konzervacije-restauracije pokazuje da problemi i dileme u izboru optimalnih materijala i pristupa u zaštiti umetničkih i arheoloških artefakata, čine konstantu u ovoj kompleksnoj oblasti, rasprave o načinu rada, protokolima i metodološkim prilazima, u kontinuitetu traju do danas, zbog činjenice da je reč o jedinstvenosti i ekskluzivnosti zadataka rada na delima visokih umetničkih ili kulturoloških vrednosti.

TABELA I  
Približne dubine prodiranja zračenja kroz tipičnu sliku

Ultraljub. zračenje	Vidljiva svetlost	Infracrv. zračenje	X zračenje	slojevi standardne slike na platnu
UV→	VS→	IC→	X →	retuš
	VS→	IC→	X →	lak
	VS→	IC→	X →	glazur
	VS→	IC→	X →	glavna boja 2
		IC→	X →	glavna boja 1 (pripremna sl)
		IC→	X →	imprimatura
		IC→	X →	pripremni crtež
		IC→	X →	preparatura
			X →	impregnacija
			X →	podloga (nosilac slike)

Imajući u vidu savremenu dinamiku unapređenja instrumentalnih metoda, uočava se da je pitanje primene ovih metoda u kontekstima izvan empirijskog rezonovanja manje istražena oblast, pa je stoga u ovom radu u fokusu upravo tematizacija mišljenja u sferi logičkih nužnosti u postupcima zaštite kulturnog nasleđa, od problema silogizama u pristupima analizi materijala u slikarstvu, do problema heritološke abdukcije u savremenom kompozitnom slikarstvu.

## II. LOGIČKI PRISTUPI: MEKLAREN, VERNER I BRANDI

Oblast istraživanja logičkih pristupa u upotrebi materijala u heritologiji, može se pratiti praktično od vremena prvih receptura u starom slikarstvu, a značajna metodološka prekretnica, dogodila se tokom naučne polemike vođene 1949. i 1950. godine u britanskom *Burlington Magazine* i italijanskom *Bolletino dell'Istituto Centrale del Restauro*. Polemiku je izazvao naučni rad uglednog italijanskog istraživača i direktora Centralnog instituta za restauraciju u Rimu, dr Čezara Brandija, pod nazivom „Čišćenje slika u odnosu na patinu, lak i lazure” [14], na koji su reagovali istraživači *The National Gallery* iz Londona, kustos Nil Meklaren i hemičar Entoni Verner, u tekstu „Neka činjenična razmatranja o lakovima i lazurama” [15]. Ocenjujući da je ova reakcija pokušaj da britanska strana *in articulo mortis*<sup>1</sup> odbrani konzervatorske postupke izvedene u Nacionalnoj galeriji u Londonu, koji su, kako je smatrao Brandi, „doživeli smrtni udarac” njegovim člankom, ovaj istraživač pristupa široj i veoma kompleksnoj razradi polemike, pod istim, britanskim naslovom, *Some factual observation about varnishes and glazes*, ovoga puta, u italijanskom glasilu Centralnog instituta za restauraciju u Rimu [16]. Pokazalo se, da je ova neprijatna epizoda za nauku bila veoma korisna u smislu rasvetljavanja suštine naučnog problema, jer je Čezare Brandi pokazao, da se spor samo naizgled odnosio na oblast čišćenja slika, a da je suština u problemu logičkog pristupa, koji čini razliku između dve škole mišljenja, od kojih se jedna zalaže za radikalni pristup čišćenju materijala umetničkog dela, dok druga, kojoj pripada i sam Brandi, zastupa „koncept patine”.

Britanska strana, kako je Brandi naglašavao, u stvari je zamagljivala i skrivala teorijske premise problema, koje „opstaju uprkos empirijskom rezonovanju”, te da „prećutkujući najveću premisu silogizma”, oni veruju da su potisnuli „logičku nužnost” i teže da od nje odvrate pažnju. Ali, *entimema*, koju tako stvaraju, transformišu se ni manje ni više, nego u poznati sofizam „lažne pretpostavke”<sup>2</sup>. Drugim rečima, Brandi je smatrao da je na delu „nepotpuni silogizam”, kao skraćeni zaključak izveden samo iz jedne premise, dok je druga premisa bila neizrečena (*sylogismus imperfectus*).

U viđenju britanske strane, reč je o principu: „cilj je konzervacije i restauracije slika da budu prezentovane što je moguće bliže stanju u kojem je umetnik želeo da one budu

viđene”. Ovo stanovište i do danas zastupaju različite zapadne škole konzervacije, pa se u muzejima neretko mogu videti dela iz prethodnih vekova, koja izgledaju kao da su upravo izašla iz umetnikovog ateljea. A svakako jedan od najsvježijih primera je i velika izložba slika Rembranta i njegovih savremenika, iz njujorške *The Leiden Collection*, prikazana u Puškinovom muzeju u Moskvi 2018. godine, na izložbi pod nazivom *The Age of Rembrandt and Vermeer: Masterpieces of The Leiden Collection* [17], čija je konzervacija – restauracija obavljena u SAD. Čezare Brandi, međutim, ovo „totalno čišćenje” naziva istorijskim apsurdom, kojim se traži, da se delo učini „reverzibilnim u vremenu, kao jedan komad oksidirane materije, kome treba povratiti fizičku čistoću i sjaj prvobitnog stanja”. Pozivajući se na logički pristup koji izvire iz „koncepta patine”, Baldinučijevog Rečnika (*Vocabolario toscano dell'Arte del disegno*) iz 1681. godine, Brandi ističe dve osnovne ideje ovog koncepta: prepoznavanje „znaka vremena” na delu i „estetsku vrednost patine”. Konkretno, mora se voditi računa „o istorijskoj strani umetničkog dela, kao istorijskog dokumenta” i treba maksimalno izbeći „one suštinske modifikacije, koje samo *salus publica* ili spasavanje dela, može opravdati kao *suprema lex*”, u skladu sa principom da je javno dobro najviši zakon (*salus publica suprema lex*).

Ističući razliku između „fizičke boje” i boje „umetničke predstave”, gde „materijalnost” boje mora da iščezne utapanjem u umetničku predstavu, Brandi u estetskom domenu koncept patine povezuje sa željom da se priguši „arogancija materije, u korist onoga što nazivamo nematerijalnost umetničke predstave”, citirajući reči iz klasične antike, o svođenju boja na mirniju ravnotežu, kao anticipiranje onoga što će se dešavati tokom vremena, a što Brandi eksplicitno izražava Plinijevim rečima *ne claritas solorum aciem offenderet*: „ni da jačina oštine boja ne vredi”. Otuda i ukazivanje da se logički pristup u primeni materijala kontekstualizuje u komplementarnim domenima. Iz veoma obimne Brandijeve argumentacije, ovde je obavljeno analitičko raščlanjivanje baze ovog složenog konteksta, i to na osnovne logičke i komplementarne premise (Tabela II).

TABELA II  
LAK KAO MATERIJAL, U KOMPLEMENTARNIM KONTEKSTIMA, NA OSNOVU BRANDIJEVE ARGUMENTACIJE

Logički iskaz	• Lak nije nužno rastvor smole u organskom rastvaraču
Semantički iskaz	• Lak je samo tečni pokrivač: čak ni transparentnost ne mora nužno da se povezuje sa semantičkim prostorom laka
Tehnološki iskaz	• Tečni lak je usitnjena ambra (čvrsta smola) dodata toplom orahovom ili lanenom ulju
Istorijski iskaz (od kasne antike do srednjeg veka)	• Evstatije u XII veku, u komentarima Homera, navodi da su Grci nazivali ambro <i>veronico</i> (βερωνιχη)
Etimološki iskaz	• βερωνιχη → <i>vernice liquido</i> (tečni lak)

<sup>1</sup> latinski: u samrtnom času

<sup>2</sup> prevodi Brandijevih tekstova u ovom radu, preuzeti su iz apendiksa br. 6 u „Teorija restauracije” [13], urednik i prevodilac Branka Šekarić

(posle sred. veka)	
Konzervatorski iskaz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>vernice liquido</i> ne označava jedan stalan tip laka, već razliku između suve rezine i njenog rastvora</li> <li>• stepen rastvorljivosti jednog rastvarača je izmišljen kriterijum, jer, po eksplicitnom priznanju Mecklarena i Venera, „posle jedanaest godina lak od lanenog ulja je isto tako rezistentan na rastvarače, kao lak star 400 godina“</li> </ul>

Držeći se filološke determinacije, Čezare Brandi kroz izvođenje paralelne istorije dvaju reči, francuske *glacis* i italijanske *velatura*, demonstrira logiku zaključivanja, ukazujući na činjenicu, da se nazivi koji se ne javljaju u istim epohama, određuju prema autorima „u različitim vremenskim periodima i kulturnim prostorima i različitom lingvističkom upotrebom“, pa tako upozorava i da greškom zanemareni veznici mogu odrediti da je reč o pridevima, a ne o terminima u strogom značenju, sve u vezi sa raspravom o distinkcijama između naziva u različitim starim recepturama (*tečni lak / blagi tečni lak / običan lak / veoma fini i suvi lak / izvanredni svetao i sušiv lak / lak postojanog sastava / veoma lep i redak lak / lak koji će se odmah osušiti / najfiniji lak i najsjajniji od svih drugih*, i slično), naglašavajući opasnost od dvosmislenih značenja: „jedna stvar je obojenost laka, a druga njegova nečistoća; da bi lak bio transparentan i svetao, ne znači da treba da bude bezbojan“. Za ovu liniju Brandijeve argumentacije, ovde je obavljeno analitičko raščlanjivanje dokaznog postupka u Tabeli III.

Brandi u [14] kaže: „Šta je to *lazura*? Jasno je da je reč o jednoj fazi u dovršavanju slike, tankom sloju boje, koji služi da koriguje ili modifikuje kako lokalni tako i opšti tonalitet slike. To je, ako hoćete, trik, postupak koji se izvodi u zadnji čas, unutrašnji i tajni sastojak. Pošto je trik, nije mogao da bude lako priznat. Izlazi izvan oficijelne prakse slikarstva... Još početkom 19. veka, veoma dobro se znalo šta su to *lazure* i kako su ih koristili Venecijanci i Rubens. Ko onda može, čisteći jednog Rubensa, stavljajući na uvid golu i sirovu boju do kraja, da ne bude potom uveren da ju je zauvek uništio?“

TABELA III  
LAZURA [GLACIS (FRA) / VELATURA (ITA) / GLAZE (ENG)<sup>3</sup>]

Izvor	Brandijeve logički iskazi o tereminologiji u starim slikarskim recepturama
Roger de Piles, <i>Eléments de la Peinture pratique</i> , Paris 1766.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Izrazi <i>glacis</i> i <i>velatura</i> nisu oduvek pokrivali isti semantički prostor</li> <li>• U glagolu <i>glacer</i> fiksira se onaj posebni fizički fenomen tečnosti koja prelazi u čvrsto stanje ostajući transparentna i sjajna</li> <li>• Glagol <i>velare</i> govori o parcijalnom</li> </ul>

<sup>3</sup> *glaze* kada je reč o tamnom sloju na svetlom, odnosno *scumble* kada je reč o svetlom sloju na tamnom [Branka Šekarić]

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• prepokrivaju</li> <li>• Pravljenje ravnoteže između <i>glacis</i> i <i>velatura</i> pripada savremenom dobu</li> </ul>
Andre Félibien, <i>Des principes de l'Architecture</i> , Paris, 1690.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reč <i>glacis</i> na starofrancuskom jeziku je termin vojne arhitekture (u značenju blage padine ili škarpe nekog utvrđenja)</li> <li>• Termin <i>glacis</i>, nije čak ni zabeležen u de Pilevom malom rečniku slikarskih termina, (<i>Termes de peinture</i>) rađenom za „Razgovore o poznavanju slikarstva“ (<i>Conversations sur la connaissance de la Peinture</i>) iz 1677.</li> </ul>
Pierre Lebrun, <i>Recueil des essais Des Merveilles</i> , 1635.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „glace(r) je postavljanje završnih ublažavanja i poslednjeg finog sloja koji daje sjaj sjajno-belom, ili sjajno-purpurnom, sjajno-zelenom, sjajno-žutom...“</li> </ul>
Dufresnoy, <i>De Arte graphica</i> , 1673, prevod Roger de Piles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „lazurne boje imaju živost koja nikada ne može da se podražava ni najživljim niti najsjajnijim bojama...“</li> </ul>
F. Baldinucci, <i>Vocabolario toscano dell'Arte del disegno</i> , Firenze, 1681.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• U prvom eksplicitnom pominjanju lazura (<i>velatura</i>), postupak prepokrivanja (<i>velare</i>) opisan je u odnosu na prijatan efekat koji stvara</li> </ul>
Dokazni postupak	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reč <i>velatura</i> u italijanskom jeziku nema istoriju različitu od one koju <i>glacis</i> ima u francuskom jeziku</li> <li>• <i>Velatura</i> i <i>glacis</i> imaju suprotna polazišta</li> <li>• Francuskim glagolom <i>glacer</i> ukazuje se na transparentnost gotovo dragog kamena</li> <li>• Italijanskim glagolom <i>velare</i> podrazumeva se obrnuto – ugasiiti zvuk boje, prigušiti ga</li> <li>• Dodirna tačka za francuski <i>glacer</i> i italijanski <i>velare</i> je transparentnost</li> <li>• Činjenica da dva jezika semantički akcentuju dva različita smisla, ne isključuje drugačije namere u pogledu boje</li> </ul>
<i>Praemissa major</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Više sa estetskog, nego sa tehničkog stanovišta, <i>velatura</i> se mogla povezati sa teorijom i praksom francuskog <i>glacis</i></li> </ul>

Iz navedenog dokaznog postupka, kojim se dominantno tehnološko pitanje izmešta na polje kauzalnosti i transformacije, kojem inače pripadaju, ne samo

instrumentalne tehnike, već i sam proces umetničkog stvaralaštva, može se uočiti da Brandi demonstrira logički postupak koji je praktično pandan Laplasovoj transformaciji, koja, kako je poznato, kauzalnu funkciju transformiše u drugi (spektralni) domen. Preneto na problem prikazane polemike, Brandi najviše zamera Meklarenu i Verneru, karakterišući kao obmanu, činjenicu da „ni jednog trenutka ne obaveštavaju čitaoca da se ništa ne zna o tome kako su izvođene *velature* ili *glacis*, barem do XVIII veka, ali verni sofizmu „lažne pretpostavke“, smatraju dokazanim ono što treba dokazati, to jest, da je postojala nedvosmislena i stalna praksa lazura...“, zaključujući da britanski autori nisu umeli da pristojno prezentuju, čak ni jedan tekst o metodu primene *glacis* ili *velatura* pre XVIII veka.



Sl. 1. Coppo di Marcovaldo, Madonna col Bambino, 1261., basilica dei Santa Maria dei Servi, Siena [Wikipedia]

Iz perspektive primene savremenih instrumentalnih metoda, u tematizaciji pitanja *merituma* u analizama materijala, značajna je ilustracija, na koji način se takav logički pristup reperkutuje na rešavanje konkretnih problema. Povodom detalja na slici *Madona*, iz 1261. godine, autora Kopa di Markovalda (Coppo di Marcovaldo, s. 1225 – s. 1276, na Sl. 1), gde je primena bojenog i transparentnog laka „koji je postavljan preko lista kalaja ili srebra, da bi se postigao onaj sjaj tona, za koji, četiri veka kasnije, jedan Lebrun (Lebrun) i jedan De Pil priznaju da ga je moguće postići - *nunc et semper* - samo sa lazurama“, Brandi prigovara Meklarenu i Verneru, da čak nisu ni zapazili „male ali nesumnjivo prisutne ostatke crvenog transparentnog laka, koji je Kopo koristio kod senki jastuka – *supedaneuma*<sup>4</sup>, da bi im dao određenu zaobljenost,

<sup>4</sup> latinski: podrška za noge na krstu koji se koristi za raspeće

bez menjanja kvadratne osnove naslikane tkanine“. Tako je, kako ističe ovaj autor, umetnik lazurama, a ne prozračnim lakovima, naslikao i drugi jastuk, na kojem sedi Madona, kao i nabore tkanina na pozadini trona, na osnovu čega Brandi i upozorava da je ovde jedino reč o tome da je potrebno „znati čitati“ sliku!

### III. ABDUKCIJA I KOMPOZITNA SLIKA

Nekoliko decenija posle ovde prikazane polemike, u savremenom tehnološkom okruženju, u kome razmatramo polje delovanja instrumentalnih tehnika, metodološka problematizacija usmerena je na problem kompozitne slike / instalacije (Sl. 2), koja doslovno terminološki označava kompozitno kao „sasvim drugo“, obeležavajući savremeno doba drugačije vrste kompleksnosti, usled primene novih i brojem neograničenih materijala, kombinovanih bez ikakvih standardno propisanih procedura, a koji i kada su u celini poznati, mogu da budu podvrgnuti različitim, nestandardnim postupcima u procesu umetničke invencije, čiji se ciljevi i dometi mogu sublimirati u promišljanju Sergeja Ajzenštajna: „Dva susedna dela bivaju nužno spojena u jednu sliku, koja se iz njihovog suprotstavljanja razvija kao novi kvalitet“.



Sl. 2. Fabio Mauri, Il Muro Occidentale o del Planto, 1993. (koferi, torbe, zvučnici, kožne obloge, platno, drvo) [www.fabiomauri.com]

Imajući posebno u vidu, da se posredovanje empirijskih metoda, zbog potrebe uključivanja znanja o „čitanju slika“ ne može smatrati samoreferencijalnim sistemom distinktivnih oznaka, već pre pomoćnim aparatom za dešifrovanje sredstava transponovanja unutrašnje slike na spoljašnje strukture kompozitnih slika / instalacija, može se govoriti o usklađivanju linija *plastičnog logosa* [18], sa referentnim linijama logičkih analiza, uz prisustvo razumevanja da „autentični umetnički izraz ne poseduje racionalno tumačenje, već emotivne karakteristike, koje ne podležu jednoznačnom dešifrovanju“ kako to formuliše Tarkovski [19], odnosno da postoji „jedan sasvim drugačiji *meritum* od iluzije vlasti nad objektivizovanim predstavama stvarnosti“ [20].

Stoga nas, utvrđivanje operativnog analitičkog instrumentarijuma, bez koherentne metodološke podloge, dovodi na polje *abdukcije*, kao vrste silogizma, u kojem je

jedna od dvaju premisa tek *verovatna*, jer je *praemissa minor* objektivna posledica složenosti likovnih problema, u logičkoj ekspoziciji, koja je izvan polja empirijskog rezonovanja. Na polju *strukturalne dualnosti*, o kakvoj piše Rajner Keler [21], stoga je potrebno ispitati moguće usmerenje na *diskurzivne strukturacije*, pre nego na singularne jezičke radnje, koje se uočavaju kod Brandija.

Sa druge strane, uprkos složenosti tumačenja u izazovima brojnih neodređenosti i finesa dinamičkih karakteristika jezika, na koje ukazuje antologijska Brandijeva rasprava (čiji je ovde samo osnovni deo predstavljen za potrebe eksplikacije logičke analize u upotrebi materijala na osnovu opisa iz starih receptura), pitanje merituma u metodološkim zahtevima nešto je što se prepoznaje u kontinuitetu razvoja civilizacije, od sublimacije iskazane u Horacijevim stihovima (Quintus Horatius Flaccus, 65-8. p.n.e), istaknutim i na naslovnoj strani prve Didroove enciklopedije, *Tantum series juncturaque pollet, tantum de medio sumptis accedit honoris!* („eto takva je moć celine i sklada, obradom dobrom toliko da i banalna tema zablista!“<sup>5</sup>) [22, 23], pa do jedne od čuvenih teza Praškog lingvističkog kružoka, o jeziku koji nije gotov statički sistem, već stvaralačka energija [24] i tako sve do filozofije Rolana Barta<sup>6</sup>, o proizvođenju značenja i strukturisanosti reči i predmeta da istovremeno nešto saopštavaju, u sistemu „varljivog označavanja“ [25], što je u našem vremenu kompozitne umetnosti, posebno prisutno. U skladu sa tim, polariteti u terminologiji starih receptura, koje ukazuju na tehnološke osobine materijala, u ovom vremenu prepoznavamo kao pandan ideji polarne suprotstavljenosti i pojačavanja (*Polarität und Steigerung*), u jedinstvenom razumevanju i sposobnosti za otkrivanje frekvencije i semantike pojedinih reči, kao kod kod Džeralda Menlija Hopkina<sup>7</sup>, koji govori o „razlogu za iznenađenje nad idućom razlikom“, kako nas na to upućuje Edvard Stankjevič [26].

#### IV. ZAKLJUČAK

Istraživanje prezentovano u ovom radu, imalo je za cilj da analitički utvrdi način na koji se logički pristup u primeni materijala kontekstualizuje u raznovrsnim, komplementarnim domenima, koji čine metodološku osnovu za primenu instrumentalnih analiza u problemima koje karakteriše obaveza uključivanja mišljenja koje je izvan *empirijskog rezonovanja*.

Istraživanje je metodološki sprovedeno na studiji slučaja posvećenoj starom slikarstvu, analizom logičkog postupka i argumentacije za opovrgavanje prakse totalne intervencije na materijalima umetničkih dela, a u korist *koncepta patine*. Na osnovu utvrđenih premisa logičkog postupka, u vezi sa kompozitnom slikom / instalacijom, komparativno je razmotren problem logičkog zaključivanja, prirodom likovnih problema iznuđene *abdukcije*, koja direktno utiče na

razumevanje uloge i dometa savremenih instrumentalnih metoda koje se mogu primeniti u analizi materijala umetničkih dela.

Imajući u vidu metodološke instrumente prikazane naučne polemike, utvrđeno je da se rešenje za uočene probleme može pronaći u multidisciplinarnom kontekstu teorija savremenih diskurzivnih i semantičkih transformacija.

#### ZAHVALNICA

Istraživanje prezentovano u ovom radu, obavljeno je zahvaljujući podršci Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (ugovori 451-03-68/2022-14/200026 i 451-03-68/2022-14/200287), kao i zahvaljujući podršci Ministarstva kulture i informisanja Republike Srbije.

#### REFERENCE

- [1] J. M. Madariaga, *Analytical Strategies for Cultural Heritage Materials and Their Degradation*, Croydon, UK, R. Soc. Chem., 2021.
- [2] The SR2A 2021 - 9th International Conference on Synchrotron Radiation and Neutrons in Art and Archaeology, International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, Los Angeles, CA, USA, 22 - 26 February, 2021.
- [3] P. Bordet, F. Kergourlay, A. Pinto, N. Blanc, P. Martinetto, “Applying multivariate analysis to X-ray diffraction computed tomography: the study of medieval applied brocades,” *J. Anal. At. Spectrom.*, vol. 36, no. 8, pp. 1724-1734, Aug. 2021.
- [4] F. Mirani, A. Maffini, F. Casamichiela, A. Pazzaglia, A. Formenti, D. Dellasega, V. Russo, D. Vavassori, D. Bortot, M. Huault, G. Zeraouli, “Integrated quantitative PIXE analysis and EDX spectroscopy using a laser-driven particle source,” *Sci. Adv.*, vol. 7, no. 3, eabc8660, Jan. 2021.
- [5] C. Jeynes, “Ion beam analysis for cultural heritage,” in *Spectroscopy, Diffraction and Tomography in Art and Heritage Science*, London, UK, Elsevier, 2021, ch. 10, pp. 355-364.
- [6] L. Giuntini, L. Castelli, M. Massi, M. Fedi, C. Czelusniak, N. Gelli, L. Liccioli, F. Giambi, C. Ruberto, A. Mazzinghi, S. Barone, “Detectors and cultural heritage: The INFN-CHNet experience,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 8, 3462, Jan. 2021.
- [7] M. Chiari, S. Barone, A. Bombini, G. Calzolari, L. Carraresi, L. Castelli, C. Czelusniak, M. E. Fedi, N. Gelli, F. Giambi, F. Giardi, “LABEC, the INFN ion beam laboratory of nuclear techniques for environment and cultural heritage,” *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 136, no. 4, pp. 1-28, Apr. 2021.
- [8] G. Festa, G. Romanelli, R. Senesi, L. Arcidiacono, C. Scatigno, S. F. Parker, M. P. M. Marques, C. Andreani, “Neutrons for cultural heritage—techniques, sensors, and detection,” *Sensors*, vol. 20, no. 2, 502, Jan. 2020.
- [9] D. Thickett, B. Pretzel, “FTIR surface analysis for conservation,” *Heritage Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 1-10, Dec. 2020.
- [10] N. Yao, X. Zhan, Q. Ma, S. Wei, “Characterization and identification of Chinese historical rubbings preserved in Wuyuan Museum by Pyrolysis–Gas Chromatography/Mass Spectrometry,” *Heritage Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 1-9, Dec. 2021.
- [11] S. Polić Radovanović, „Primena lasera u obradi, zaštiti i dijagnostiranju materijala predmeta kulturne baštine“, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, 2007.
- [12] S. Polić, Z. Stević, S. Ristić, B. Radojković, „Konceptualizacija heurističke procene u laserskom čišćenju papira“, Zbornik radova 6. naučno-stručnog skupa Politehnika, Beograd, Srbija, pp. 607-612, 10. decembar 2021.
- [13] Č. Brandi, *Teorija restauracije*, Beograd, Srbija, Italijanska kooperacija, 2007.
- [14] C. Brandi, “The cleaning of pictures in relation to patina, varnish, and glazes,” *Burlington Mag.*, vol. 91, no. 556, pp. 183-188, Jul. 1949.
- [15] N. Maclaren, A. Werner, “Some factual observations about varnishes and glazes,” *Burlington Mag.*, vol. 92, no. 568, pp. 189-192, Jul. 1950.

<sup>5</sup> prevod prof. Radmile Šalabić, prema uvidu Sanje Stepanović Todorović

<sup>6</sup> Roland Barthes (1915-1980), francuski književni teoretičar, filozof i kritičar

<sup>7</sup> Gerard Manley Hopkins (1844 –1889), jedan od vodećih viktorijanskih pesnika

- [16] C. Brandi, "Some factual observations about varnishes and glazes," *Boll. dell'Istituto centrale del restauro*, no. 3-4, pp. 9-29, 1950.
- [17] The Pushkin State Museum of Fine Arts (2018). *The age of Rembrandt and Vermeer; Masterpieces of the Leiden Collection*, [Online]. <http://www.arts-museum.ru/events/archive/2018/rembrandt/?lang=en>
- [18] T. Radionova, Čaplinova intonacija i njeno plastično rešenje, *Ogled ontološke analize*, GMS, decembar 2012.
- [19] A. Tarkovski, *Lekcije iz filmske režije*, Novi Sad, Srbija, Prometej, 1992.
- [20] Ž. Simić, „Oslobađanje zaboravom: Crnjanski i Tarkovski,” u *Letopis Matice srpske (knj. 492, sv. 1-2)*, Novi Sad, Srbija, Matica srpska, 2013, pp. 148-162
- [21] R. Keller, *Das Interpretative Paradigma: Eine Einführung*, Wiesbaden, Deutschland, 2012, Springer-Verlag
- [22] Horacije, *Pisma*, Beograd, Srbija, 1972, Srpska književna zadruga
- [23] S. Stepanović-Todorović, „Povodom Didroove »ENCYCLOPÉDIE« u biblioteci SANU,” u *Letopis Matice srpske (knj. 489, sv. 6)*, Novi Sad, Srbija, Matica srpska, 2012, pp. 984-1004
- [24] A. Ilić, „Teze praškog lingvističkog kruga iz 1929. godine,” u *Treći program br. 25*, Beograd, Srbija, Radio Beograd, 1975.
- [25] D. C. François-Denève, *Mythologies - Rolan Bartes*, Paris, France, Bréal, 2002.
- [26] E. Stankjević, „Lingvistika, poetika i književni žanrovi,” *Polja: mesečnik za umetnost i kulturu*, vol. 30, no. 308, pp. 400-403, 1984.

## ABSTRACT

Taking into account the diversity of approaches in qualitative and quantitative criteria for material selection heritology phenomena in the field of research of composite art works set complex tasks in the application of instrumental methods, which precede the development of protocols for conservation and restoration of cultural heritage. The focus of this paper is on the problem of heritology abduction, particularly in the domain of heuristic assessment concerning the number of necessary analyses, i.e. the deficit of data in fragmentary structures, these being expressions of artistic spontaneity. At the same time, the paper also tackles the phenomenon of minor assumptions while pursuing a methodologically sound platform for interpreting data.

**The problem of heritology abduction through instrumental analysis of cultural heritage materials**

Suzana Polić, Mileša Srećković, Zoran Stević,  
Miodrag Malović, Miloš Đurić

# Deskripcija, heritologija i metrologija boje

Milesa Srećković, Veljko Zarubica, Aleksander Kovačević, Milena Davidović, Suzana Polić

**Apstrakt**—Ljudski osećaj za boje ima mnogo aspekata, počevši od čovekovog poimanja sveta oko sebe, do medicinskih pojmova koji uključuju i daltonizam, ali (u svakodnevnici) najpozitivniji, najhumaniji je čovekov osećaj za deo dana ili noći (meseca ili godine), za uživanje u heritološkom blagu, koje su nam ostavili preci, ali ne samo crno-belo. Istraživanja, kojima je procenjivan ljudski vek, postojanje i razvoj humanih bića, kao i nastajanje i evolucija flore i faune, sve ovo mora da bude tretirano multidisciplinarno, bez obzira da li se polazi od stena, stalaktita i stalagmita, morskih dubina, tragova u atmosferi ili potrage za planetom koja je slična Zemlji. U radu se daje nekoliko prilaza boji i kolorimetriji, sa aspekta raznih naučnih disciplina. Prikazuje se uloga lasera u novim problematikama, kvantitativne definicije boje i njenih pokazatelja. U području merenja, daje se prilaz sa aspekta filtera i korektnog opisa stanja i delovanja odabranih filtera sa savremenim izražavanjima rezultata, kao i merne metode. Konstatcija boje i njena deskripcija, ima veliku ulogu u svakodnevnom životu, kao i u pojedinim tehničkim i mass media primenama, uključivši i humanističke i tehničke nauke.

**Ključne reči**— laseri; heritologija; nove tehnologije.

## I. UVOD

Spektroradiometrijska metoda, kao fundamentalna metoda kvantifikacije, deskripcije objektivnog merenja boje, prema trenutnom stanju razvijenosti tehnologije izrade prijemnika optičkog zračenja i ostale merno-tehničke opreme, ima kao glavni zadatak postizanje zadovoljavajuće tačnosti i ponovljivosti rezultata merenja, prema postavljenim zahtevima korisnika.

Spektroradiometrijske metode merenja boje, zasnovane su na određivanju spektralne raspodele zračenja, na osnovu čega se formira boja koja se meri. Trihromatske vrednosti boje se nalaze iz poznatih krivih mešanja boja (slika 1). Za primarne svetlosne izvore, veličina koja se meri je spektralna raspodela energije, a za sekundarne se koristi spektralni koeficijent propustljivosti i koeficijent jednog od procesa interakcije, ovde koeficijent refleksije optičkog zračenja (koje se reflektuje ili propušta kroz određene sredine).

U ovom delu rada, izabran je slučaj kada ne postoji poznata raspodela zračenja izvora. Koristi se raspodela zračenja crnog

Milesa Srećković – Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: esreckov@etf.bg.ac.rs).

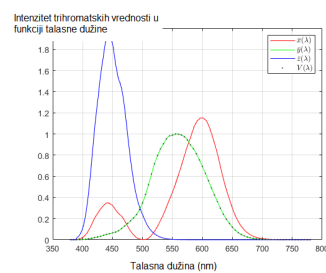
Veljko Zarubica – Analysis d.o.o, Japanska 4, 11070 Novi Beograd, Srbija.

Aleksander Kovačević – Institut za fiziku, Univerzitet u Beogradu, Pregrevica 118, 11080 Beograd, Srbija.

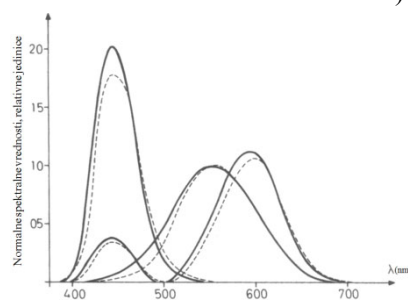
Milena Davidović – Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija.

Suzana Polić – Narodni muzej u Beogradu, Trg Republike 1a, 11000 Beograd, Srbija.

tela i spektralni koeficijent propustljivosti staklenih uzoraka. Na taj način, proračun trihromatskih vrednosti uzima u obzir pored spektralnog koeficijenta propustljivosti i spektralnu raspodelu snage zračenja apsolutno crnog tela (ACT). Spektralna raspodela snage zračenja se množi poznatim spektralnim koeficijentom propustljivosti  $\tau(\lambda)$ . Na sl. 1 je predstavljena spektralna karakteristika trihromatskih vrednosti u funkciji talasne dužine.



a)



b)

Sl. 1. a) Krive mešanja boja; b) Krive za polje viđenja 100° u odnosu na isprekidane krive za 20°.

Proračun trihromatskih vrednosti u CIE (XYZ) standardnom kolorimetrijskom koordinatnom sistemu, za boje svetlosti, koje se propuštaju kroz posmatrani uzorak, sledi procedura:

$$X = \int_{350nm}^{750nm} E_{\lambda} \tau_{\lambda} \overline{X}_{\lambda} d\lambda; Y = \int_{350nm}^{750nm} E_{\lambda} \tau_{\lambda} \overline{Y}_{\lambda} d\lambda; Z = \int_{350nm}^{750nm} E_{\lambda} \tau_{\lambda} \overline{Z}_{\lambda} d\lambda. (1)$$

Kod praktičnih proračuna, integracija se svodi na sumiranje proizvoda vrednosti spektralnog koeficijenta propustljivosti i spektralne snage zračenja ACT za nizove talasnih dužina:

$$X = \Delta\lambda \sum_{\lambda} E_{\lambda} \cdot \tau_{\lambda} \cdot \overline{X}_{\lambda}; Y = \Delta\lambda \sum_{\lambda} E_{\lambda} \cdot \tau_{\lambda} \cdot \overline{Y}_{\lambda}; Z = \Delta\lambda \sum_{\lambda} E_{\lambda} \cdot \tau_{\lambda} \cdot \overline{Z}_{\lambda}. (2)$$

Interval  $\Delta\lambda$ , bira se 1-20 nm, u zavisnosti od željenih nesigurnosti tipa A i B, koje se zahtevaju za određivanje hromatskih koordinata. Kako su krive mešanja boja specifikovane u obliku relativnih vrednosti na ordinati, trihromatske vrednosti izračunate pomoću njih imajuće relativ-

ni karakter kao na slici u poglavlju rezultata (sl. 6) (primer proračuna trihromatskih vrednosti za odabrani filter) [1-4].

Zahtev je da se odrede trihromatske vrednosti i hromatske koordinate boje standardnog svetlosnog izvora tipa  $A$  sa spektralnom raspodelom energija  $E_A$ , posle prolaska kroz uzorak, koji ima određen spektralni koeficijent propustljivosti  $\tau$ . Posle transmisije kroz uzorak, relativna spektralna raspodela jačine zračenja ima oblik prikazan krivom  $\tau E_A$ . Svaka ordinata ove karakteristike, množi se odgovarajućom ordinatom svake od krivih mešanja boja  $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$ ,  $\bar{Z}$ . Šrafirane površine ispod krivih, dobijenih posle množenja, proporcionalne su odgovarajućim trihromatskim vrednostima  $X$ ,  $Y$  i  $Z$ . Hromatske koordinate  $x$  i  $y$  se izražavaju dalje:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}. \quad (3)$$

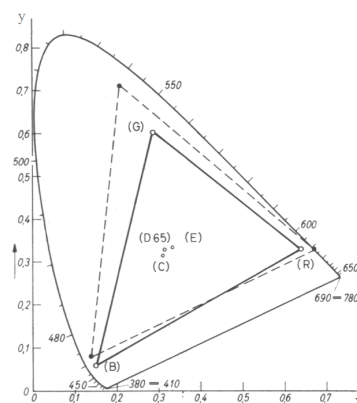
Ordinate krivih mešanja boja i ordinate spektralnih raspodela energije za standardni izvor, potrebne za posmatrani metod proračuna, obično se daju tabelarno.

Kod primarnih izvora svetlosti, postavka metode, zasniva se na spektrometriji koji se koristi za merenje relativne spektralne ozračenosti (iradijancije). Kod sekundarnih izvora, merenje se vrši pomoću spektrofotometara, gde se monohromator sa odgovarajućim sistemom osvetljavanja (u zavisnosti od geometrije merenja), koristi za osvetljavanje datih uzoraka, a reflektovano, odnosno propušteno zračenje se meri fotodetektorom u odgovarajućoj geometriji.

## II. DRUGI PRILAZ BOJI

Boja se može pojaviti kao kategorija ili pojam u vrlo složenim multidisciplinarnim problemima, a često se prema naučnoj disciplini, koja se oslanja na doživljaj boje živih organizama (sa medicinske tačke gledišta, sa filozofske tačke gledišta, sa gledišta heritologije, sa ekološkog gledišta i dr.). Šire gledano, radi se o interakciji zračenja elektromagnetne ili druge prirode sa *prijemnim* aparatom. Sa tehničke strane objektivizacije, kolorimetrija ima zadatak da se kroz različite formirane formalizme opisuje boja putem trougla i koordinata, ili na drugi način, kroz drugi formirani sistem višeg ili nižeg nivoa, sl. 2. U tabeli 1 se daju ilustracije nivoa bioloških procesa uzrokovanih zračenjem i vremenskih konstanti odgovarajućih procesa sa odgovarajućim nivoom [5]. Sa obzirom na *mass media* primene (TV, novine, ...), kulturne manifestacije, znake opasnosti, dozimetrijska pravila u primeni određene ELIONSke tehnike, boja mora da ima dobro definisane koordinate u širem smislu, zasnovane na izvorima (obično tri), čijim se mešanjem postiže efekat određene (željene) boje. Da li će se koristiti odgovarajući softver uz profesionalnu mernu aparaturu, ili će se sve automatizovati kao *user-friendly*, zavisi od trenutnog administrativnog zahteva ili trenutnog nadahnuća umetnika [6].

Prema visini stepena tolerancije, institucije koje se kod nas bave *deskripcijom boje*, kao i njenim promenama, u zavisnosti od izloženosti objekta, odnosno bio-objekta, postoje stroge procedure i sistemi gde se to može izvršiti, a ako nije potrebna



Sl. 2. Normiranje boje putem EBU trougla boja (neprekidno) i FCC (isprekidano) [2].

TABELA I

Nivo	Vreme na nivou (s)	Procesi na nivou, modifikacije
Fizički	$10^{-18} - 10^{-8}$	Eksitacije, jonizacije, elastični sudari, formacija radikala visoke reaktivnosti i kratkoživećih SR u vodi i organskim molekulima
Hemijski	$10^{-14} - 10^{-4}$	Reakcije SR sa organelama formiraju primarno oštećenje DNA, dimerizacija, modifikacije sa temp. MT, i $O_2$
Biohemijski (subćelijski)	$10^{-4} - 10^5$	Reparacija, interakcije oštećenih mikrocentara; mutacije, aberacije, MT i dr. agensi
Biohemijski (ćelijski)	$10^3 - 10^7$	Deoba ćelija i molekula, Mutacije

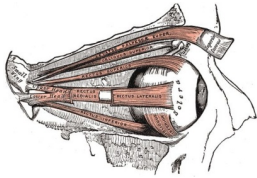
Prema visini stepena tolerancije, institucije koje se kod nas bave *deskripcijom boje*, kao i njenim promenama, u zavisnosti od izloženosti objekta, odnosno bio-objekta, postoje stroge procedure i sistemi, gde se to može izvršiti, a ako nije potrebna velika preciznost, korisnici formiraju svoja sopstvena merna rešenja [7]. U ovim merenjima ima mnogo mesta za definisanje osvetljenosti, u širem smislu, određenog izložbenog prostora i kontrolu stalnog fluksa, koji se, u zavisnosti od mešanja prirodne i veštačke osvetljenosti, mora kontrolisati. U zavisnosti od objekta, mora se obratiti pažnja na mere zaštite od preterane ekspozicije.

Paralelno anatomija oka, njegovog funkcionisanja, mišićnog sistema i osetljivost (kao prijemnika) na definisana zračenja i boje vidljivog spektra su predmet mnogobrojnih istorijskih radova, uključujući i današnja istraživanja na mehanizmima funkcionisanja očnog aparata, modelovanja i kvalitativno/kvantitativno povezivanje sa tehnikama merenja i povezivanja sa *tehničkim uglovima gledanja*, sl. 3 i 4. Poređenje osetljivostu pojma viđenja u oblasti fizike, metrike i psihologije, razlikuje kvantitativnom, kvalitativno i vrednovanje sa tri hromatske koordinate

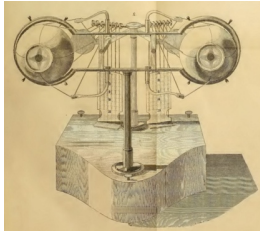


V. REZULTATI

Merene vrednosti tabele 2 su prikazane delimično i na sl. 6, odnosno  $\tau(\lambda)$ ,  $x(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$ ,  $z(\lambda)$ , prema propisanoj proceduri u postupku određivanja karakteristika staklenog filtra MEL-B-1.



Sl. 3. Anatomija oka, koja je još kod Helmholtza imala posebne predstave [8].



Sl. 4. Istorijska slika modelovanja očnog aparata [9].

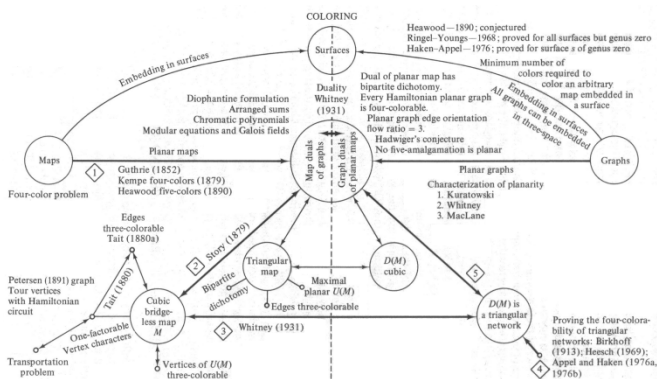
Poređenje osetljivostu pojma viđenja u oblasti fizike, metrike i psihologije, razlikuje kvantitativnom, kvalitativno i vrednovanje sa tri hromatske kordinate.

III. ULOGA IZVORA

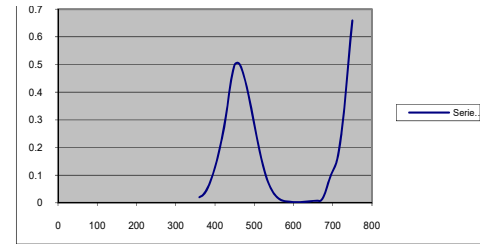
Pri definiciji boje u bilo kom sistemu širina spektralnih linija (spontane ili koherentne svetlosti) igra presudnu ulogu. Kao rezultat toga su nastali RGB laseri, od specijalnog značaja za HDTV. Od novijih tipova lasera, pokazalo se da su laseri na bazi polimera pogodni za kalibraciju, odnosno deskripciju boje [5, 10].

IV. TEOREMA-PROBLEM ČETIRI BOJE

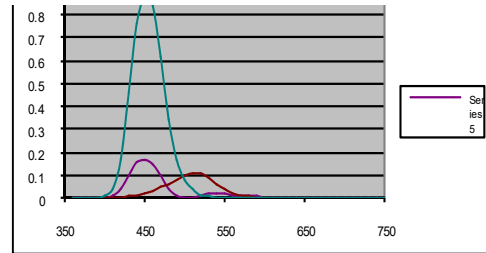
Klasični problem četiri boje zahteva mnogo raznih pogleda koji su ilustrovani sl. 5 datom u originalu, vezanu za teoremu i problem četiri boje, gde kao dokaz mora da bude uključena i savremena računarska tehnika; to ne uključuje nelinearne relacije i osećaje boje uz velike intenzitete, o čemu su istraživanja morala da se intenziviraju posle razvitka snažnih laserskih snopova [11-17].



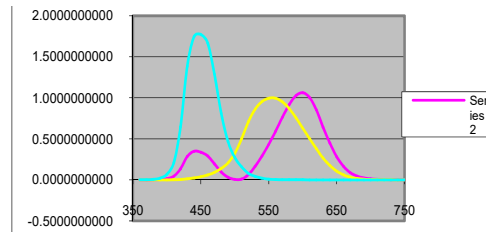
Sl. 5. Prikaz deskripcije problematike teoreme četiri boje [17].



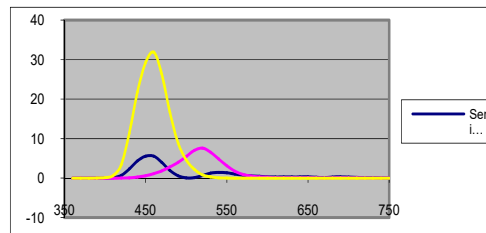
a)



b)



c)



d)

Sl. 6.  $\tau(\lambda)$ ,  $x(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$ ,  $z(\lambda)$ ,... su prikazane na a), b), c), d), redom.

Pored merenja u tabeli II, izvršena su merenja i za seriju drugih filtara: MEL-B-2, MEL-G-2, MEL-G-4, itd.

TABELA II  
VREDNOSTI SPEKTRALNE PROPUSLJIVOSTI STAKLENOG FILTERA MEL-B-1

$\lambda$ (nm)	$\tau(\lambda)$	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$	$x$	$y$	$z$	$E_{e,1 \text{ rel}}$	$X$	$Y$	$Z$
360	0,020104	0,00013	3,29E-6	0,000606	2,61E-6	7,87E-8	1,22E-5	6	1,61E-5	4,84E-7	7,49E-5
370	0,028827	0,000415	1,24E-5	0,001946	1,20E-5	3,57E-7	5,61E-5	8	9,35E-5	2,79E-6	0,000439
380	0,049412	0,001368	3,90E-5	0,00645	6,76E-5	1,93E-6	0,000319	10	0,000662	1,89E-5	0,00312
390	0,084852	0,004243	1,20E-4	0,02005	0,00036	1,02E-5	0,001701	12	0,004353	1,23E-4	0,020569
400	0,128765	0,01431	3,96E-4	0,06785	0,001843	5,10E-5	0,008737	15	0,027105	7,50E-4	0,128517
410	0,184124	0,04351	1,21E-3	0,2074	0,008011	2,23E-4	0,038187	18	0,141639	3,94E-3	0,675152
420	0,251353	0,134338	4,00E-3	0,6456	0,033777	1,01E-3	0,162273	21	0,709313	2,11E-2	3,407743
430	0,332946	0,2839	1,16E-2	1,3856	0,094523	3,86E-3	0,46133	25	2,331892	9,53E-2	11,38101
440	0,435524	0,34828	2,30E-2	1,74706	0,151684	1,00E-2	0,760887	29	4,353339	2,87E-1	21,83744
450	0,498869	0,3362	3,80E-2	1,77211	0,16772	1,90E-2	0,884051	33	5,549847	6,27E-1	29,25324
460	0,504937	0,2908	6,00E-2	1,6692	0,146836	3,03E-2	0,842841	38	5,553325	1,15E+0	31,87624
470	0,476985	0,19536	9,10E-2	1,28764	0,093184	4,34E-2	0,614185	43	3,994789	1,86E+0	26,33011
480	0,424312	0,09564	1,39E-1	0,81295	0,040581	5,90E-2	0,344944	48	1,958043	2,85E+0	16,64357
490	0,355894	0,03201	2,08E-1	0,46518	0,011392	7,40E-2	0,165555	54	0,614152	3,99E+0	8,925058
500	0,283355	0,0049	3,23E-1	0,272	0,001388	9,15E-2	0,077073	60	0,083112	5,48E+0	4,613563
510	0,212164	0,0093	5,03E-1	0,1582	0,001973	1,07E-1	0,033564	66	0,130345	7,05E+0	2,217261
520	0,147607	0,06327	7,10E-1	0,07825	0,009339	1,05E-1	0,01155	73	0,677084	7,60E+0	0,837393
530	0,095958	0,1655	8,62E-1	0,04216	0,015881	8,27E-2	0,004046	79	1,256667	6,55E+0	0,320127
540	0,058893	0,2904	9,54E-1	0,0203	0,017103	5,62E-2	0,001196	86	1,469962	4,83E+0	0,102756
550	0,033716	0,443345	9,95E-1	0,00875	0,014614	3,35E-2	0,000295	93	1,357805	3,12E+0	0,02741
560	0,017632	0,5945	9,95E-1	0,0039	0,010482	1,75E-2	6,88E-5	100	1,048222	1,75E+0	0,006876
570	0,009053	0,7621	9,52E-1	0,0021	0,006889	8,62E-2	1,90E-5	107	0,739466	9,24E-1	0,02038
580	0,005345	0,9163	8,70E-1	0,00165	0,004898	4,65E-3	8,82E-6	114	0,560484	5,32E-1	0,001009
590	0,00365	1,0263	7,57E-1	0,0011	0,003746	2,76E-3	4,02E-6	122	0,456	3,36E-1	0,000489
600	0,002479	1,0622	6,31E-1	0,0008	0,002633	1,56E-3	1,98E-6	129	0,339787	2,02E-1	0,000256
610	0,002195	1,0026	5,03E-1	0,00034	0,002201	1,10E-3	7,46E-7	136	0,300044	1,51E-1	0,000102
620	0,002549	0,85445	3,81E-1	0,00019	0,002178	9,71E-3	4,84E-7	144	0,312803	1,39E-1	6,96E-5
630	0,0031	0,6424	2,65E-1	0,00005	0,001991	8,22E-4	1,55E-7	151	0,300369	1,24E-1	2,34E-5
640	0,004279	0,4479	1,75E-1	0,00002	0,001917	7,49E-4	8,56E-8	158	0,302779	1,18E-1	1,35E-5
650	0,007347	0,2835	1,07E-1	0	0,002083	7,86E-4	0	165	0,343737	1,30E-1	0
660	0,007538	0,1649	6,10E-2	0	0,001243	4,60E-4	0	172	0,213749	7,91E-2	0
670	0,008502	0,0874	3,20E-2	0	0,000743	2,72E-4	0	179	0,132839	4,86E-2	0
680	0,03321	0,04677	1,70E-2	0	0,001553	5,65E-4	0	185	0,288016	1,05E-1	0
690	0,078896	0,0227	8,21E-3	0	0,001791	6,48E-4	0	192	0,343735	1,24E-1	0
700	0,115048	0,011359	4,10E-3	0	0,001307	4,72E-4	0	198	0,259096	9,36E-2	0
710	0,149673	5,79E-3	20,9E-3	0	0,000867	3,13E-4	0	204	0,177154	6,40E-2	0
720	0,226687	2,90E-3	1,05E-3	0	0,000657	2,37E-4	0	210	0,138257	4,99E-2	0
730	0,354033	1,44E-3	5,20E-4	0	0,00051	1,84E-4	0	216	0,110177	3,98E-2	0
740	0,507815	6,90E-4	2,49E-4	0	0,00035	1,27E-4	0	222	0,077677	2,81E-2	0
750	0,659319	3,32E-4	1,20E-4	0	0,000219	7,91E-5	0	227	0,049734	1,80E-2	0
									36,70767	5,06E+1	158,6117

Kao primer merne nesigurnosti za drugu vrstu filtra data je tabela III. Za sva merenja je potrebno dati ocenu nesigurnosti tipa A i B, a za slučaj filtra MEL-Y-2 ocena je u Tabeli III.

Merna nesigurnost ovako dobijenih vrednosti hromatskih koordinata boje propustljivih stakala u boji, svodi se na mernu nesigurnost etalonskog spektrofotometrijskog sistema u

pogledu merenja spektralnog koeficijenta propustljivosti i tačnosti zauzimanja talasne dužine, kao i merne nesigurnosti zbog rasipanja rezultata (nehomogenog filtra). Ukupna procenjena merna nesigurnost dobijenih rezultata se pridružuje dobijenim vrednostima hromatskih koordinata; u zavisnosti od opsega hromatskih koordinata komponente

merne nesigurnosti će biti različite posebno za svaku od koordinata,  $x$  i  $y$ . U ovom radu je predstavljena samo ukupna vrednost merne nesigurnosti. Budžeti merne nesigurnosti za pojedine filtere se proračunavaju na isti način kao u tabelama 2 i 3.

Razvojem spektrofotometrijskog sistema u laboratoriji Analysis d.o.o, ostvarena je cela procedura etaloniranja različitih transparentnih (propustljivih) uzoraka, za različite primene. Poznavanjem svojstva materijala (spektralni koeficijent propustljivosti, spektralna osetljivost detektora, odnosno spektralna raspodela izvora zračenja, može se realizovati još jedna karakteristika materijala – boje. Na osnovu dobijenih vrednosti, moguće je definisati boju datih uzoraka u najširem smislu i tako dobiti novu karakteristiku kvantitativno/objektivno.

TABELA III

PRIMER PRORAČUNA BUDŽETA MERNE NESIGURNOSTI STAKLENOG FILTERA U BOJI MEL-Y-2

Komponenta merne nesigurnosti	Tip A	Tip B
Merna nesigurnost spektrofotometrijskog sistema: -Prosečno rasipanje rezultata -Pomeraj svetlosnog snopa -Orijentacija uzorka u odnosu na optičku osu sistema -Nesigurnost korekcije na interrefleksiju -nelinearnost sistema -Neuniformnost uzoraka	0,15 %	
Merna nesigurnost zauzimanja $\lambda$		0,001 %
Merna nesigurnost izvora zračenja (apsolutno crnog tela) iz literature		1 %
Ukupna relativna merna nesigurnost	1,12 %	

## VI. ZAKLJUČAK

Shvatanje boje je složeno pitanje zavisno od prilaza pojedine naučne discipline, ali je multidisciplinarni problem koji zahvata od heritologije i umetnosti do matematike, elektrotehnike, i pojmova osvetljenosti, interakcije sa zračenjima razne prirode. Kad se priđe sa gledišta koherentnosti, unitarnosti izvora osvetljenja i podseti se da se u doživljavanju boje pojavljuju razne terminologije, propisi i uobičajene, ali i specifične merne tehnike, danas se situacija komplikuje sa linearnim i nelinearnim procesima, koje donose laseri velikih gustina snopa i kratkih impulsa, pa se i aberacije hromatske prirode još više komplikuju, a i doživljaji bioloških objekata. Uz klasične aberacije pojavljuju se nove klase.

## LITERATURA

- [1] M. Srećković, A. Janičević, V. Zarubica et al., *Istorija, metrološka edukacija, razni stepeni i savremeni problemi*, Beograd, SRB: Team, 2019.
- [2] H. Lang, *Einführung in die Nachrichtentechnik*, München, DE: R. Oldenbourg, 1978.

- [3] V. Zarubica, M. Srećković et al., "Some Realization and Measurements Based on Holmium Solutions and Different Wavelength V. So Standards," *Atti de la fond. Ronchi*, LXXIII, no. 5, pp. 485-498, 2018.
- [4] V. Zarubica, M. Srećković, *Realizacija metoda etaloniranja i proračun budžeta merne nesigurnosti mernih instrumenata (merila) u laboratorijama različitih namena*, Beograd, SRB: Velarta, 2012.
- [5] M. Živković, M. Srećković et al., "Influence of electromagnetic and nuclear radiation in medicine for therapy and diagnosis through processes, facts and statistical analysis," *NTRP 32* (1), pp. 91-98, 2017.
- [6] M. Srećković, V. Krasnjuk, "Abberation problems affecting modern techniques of picture processing and transmission," *Im. Techn.*, vol. 81, no. 2, pp. 22-37, 1999.
- [7] V. Džikić, Merenje osetljivosti slike bez naziva – preporuke za izlaganje, *Konzervacijske sveske*, vol. III-IV, no. 3-4, 2020.
- [8] Músculo elevador del párpado superior ([https://www.wikiwand.com/es/M%C3%BAsculo\\_elevador\\_del\\_p%C3%A1rpado\\_superior](https://www.wikiwand.com/es/M%C3%BAsculo_elevador_del_p%C3%A1rpado_superior)).
- [9] Russell Anderson, Why are eye movements so damned interesting? (<https://towardsdatascience.com/why-are-eye-movements-so-damned-interesting-76bf293a7bde>).
- [10] S. Tanaka, S. Hayakawa, H. Sato, "Feasibility of Enhanced / Tunable Organic Polymer Dye Laser," *Proc. Lasers 2000, USA*, 2001.
- [11] R. Fritsch, G. Fritsch, *The four color theorem, History, Topological Foundations, and Idea of Proof*, New York, USA: Springer, 1998.
- [12] T. L. Saaty, P. C. Kainen, *The four-color problem*, London, UK: Dover Edition, 1986.
- [13] Ch. McMullen, *The Four-Color Theorem and Basic Graph Theory*, 2020, 1941691099 Amazon.
- [14] M. Srećković et al., Scattering ,reflection, transmission in theory and practice ,the estimation of nonlinear and ultrafast phenomena, *Atti de la fondaz. Ronchi*, anno LXV, no. 4/5, pp. 543-555, 2010.
- [15] M. Srećković, S. Polić, A. Bugarinović, et al, *Laser i problemi konzervacije kulturne baštine*, Beograd, SRB: Centralni institut za konzervaciju i Regionalni centar za talente Beograd 2, 2016.
- [16] T. B. Brill, *Light*, Moskva, USSR: Mir, 1983.
- [17] T. L. Saaty, P. C. Kainen, *The Four Colour Problem*, New York, USA: Mc Graw Hill, 1977.

## ABSTRACT

The human sense of color has many aspects, from man's understanding of the world around him to medical terms that include colorblind people, but (in everyday life) the most humane is man's sense of that part of the day or night (month or year), to enjoy heritage , left to us by our ancestors. Research assessing human life span, the existence and development of human beings, as well as the origin and evolution of flora and fauna, all this must be treated multi disciplinary, whether we start from rocks, stalactites and stalagmites, sea depths, atmospheric traces or the search for an Earth-like planet. The paper gives several approaches to color and colorimetry, from the aspect of various scientific disciplines. The role of lasers in new problems, quantitative definitions of color and its indicators are presented, and in the field of measurement, an approach is given from the aspect of filters and a correct description of the condition and operation of selected filters with modern expression of results and measurement methods. The perception of color and its description play a major role in everyday life, as well as in certain technical and mass media applications, including the social and technical sciences.

Key words: lasers, heritology, new techniques/methods.

## Deskripcija, heritolog and color metrology

Milesa Srećković, Veljko Zarubica, Aleksander Kovačević,  
Milena Davidović, Suzana Polić

# Proto-konceptualna rešenja u primeni lasera u heritologiji

Milesa Srećković<sup>1</sup>, Suzana Polić<sup>2</sup>, Zoran Stević<sup>1,3</sup>, Veljko Zarubica<sup>4</sup>, Stanko Ostojčić<sup>5</sup>

**Apstrakt**—Kritička preispitivanja postupaka koji se delovanjem na materijale primenjuju u konzervaciji-restauraciji predmeta kulturne baštine, obuhvataju opšta i pojedinačna pitanja o upotrebi novih tehnologija, posebno lasera, u odnosu na klasične prilaze problematici zaštite artefakata, koji imaju arheološku, istorijsku ili umetničku vrednost. Pitanje etičnosti posmatra se sa više aspekata, koji se odnose na materijalna i nematerijalna postupanja prema predmetima zaštite, u smislu ispunjavanja zadate funkcije odabrane tehnike, a pod uslovima najvišeg stepena bezbednosti i ekološke zaštite. U ovom radu u fokusu istraživanja je karakterizacija proto-konceptualnih rešenja u primeni lasera na materijalima predmeta baštine, sa ciljem utvrđivanja eksplikatornih razlika u obrazlaganju potreba za primenu klasičnih pristupa konzervaciji-restauraciji kulturnog nasleđa, sa posebnim osvrtom u domenu tautoloških praksi.

**Ključne reči**—laseri, heritologija, nove tehnologije

## I. UVOD

Višedecenijski rad fizičara, na čelu sa profesorom Asmusom (John Fredrich Asmus), koji je i prvi autor proto-konceptualnih rešenja u primeni lasera u heritologiji (od laserskog čišćenja skulptura, primena holografije u stvaranju trodimenzionalnih reprodukcija remek-dela svetske baštine, do primena lasera u utvrđivanju autentičnosti dela i restauraciji čuvenih figura od terakote u Kini) [1-4], kao i *digital-chiaroscuro* statistike [5], pa sve do doprinosa u stvaranju laserskih sistema čišćenja (*Laser cleaning system*) za primenu u heritologiji [6], predstavlja tehnološki udeo u razvoju nove muzejske teorije i prakse, koju odlikuju zalaganja da „muzej od mesta koje izaziva divljenje i strahopoštovanje, postane mesto kritičkog ispitivanja“ [7].

Milesa Srećković – Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd (e-mail: [esreckov@etf.bg.ac.rs](mailto:esreckov@etf.bg.ac.rs))

Suzana Polić – Narodni muzej Srbije, Trg Republike 1a, 11000 Beograd (e-mail: [suzanapolic64@gmail.com](mailto:suzanapolic64@gmail.com))

Zoran Stević – Narodni muzej Srbije, Trg Republike 1a, 11000 Beograd; Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd; Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor (<https://orcid.org/0000-0002-1867-9360>).

Veljko Zarubica – Analysis d.o.o., Japanska 4, 11070 Novi Beograd (e-mail: [veljko.zarubica@analysis.rs](mailto:veljko.zarubica@analysis.rs))

Stanko Ostojčić – ATSSB, Nade Dimić 4, 11080 Zemun (e-mail: [stankoostojic22@gmail.com](mailto:stankoostojic22@gmail.com))

Reč je o razvoju motivisanom uvidom u praksu konzervacije umetničkih dela, koja je uspostavljena na osnovu subjektivnih izbora kustosa i konzervatora. Sa druge strane, reč je i o uviđanju, da je svako delo organskog porekla, tokom vremena podložno promenama, što neminovno utiče na razumevanje pitanja *autentičnosti* umetnina, shvaćene kao „uzvišeno iskustvo“, odnosno „zračenje aum“, kako to formuliše Dženet Marstin (Janet Marstine), u uvodu u tematski zbornik *Nova muzejska teorija i praksa* [7].

Međutim, uprkos početnim, istorijski značajnim rezultatima primene lasera u zaštiti kulturnog nasleđa, paradoksalno, do danas nije došlo do očekivanih razmera uvođenja ove tehnologije u muzejsku praksu, u kojoj još uvek dominiraju tradicionalne, čak i viševekovne, metode konzervacije-restauracije umetničkih predmeta, iako se u praksi pokazalo, da su u pogledu nedestruktivnosti delovanja na materijale, bezbednosti i ekoloških kvaliteta, takve metode značajno inferiornije u odnosu na lasersku tehnologiju.

I sam prof. Asmus, uviđajući navedenu situaciju, godine 2003. objavljuje naučni rad *Non-divestment laser applications in art conservation* [8], kojim je, kako je naveo, želeo da podstakne „...oživljavanje interesa za ove moćne naučno uspostavljene tehnologije, proširenje njihove primene i prihvatanje od strane šire umetničke konzervatorske zajednice“. Kao neke od mogućih uticaja na navedenu situaciju naveo je, da je u vremenu početaka primene lasera u zaštiti nasleđa, postojalo opšte nepoznavanje potencijala laserske tehnologije, ali i uviđanje da je reč o velikim troškovima održavanja i realnim tadašnjim ograničenjima same tehnologije u primeni na umetničkim predmetima (u pogledu dostupnih talasnih dužina).

U međuvremenu, razvoj laserske tehnike obesnažuje ove argumente, a gotovo dvadeset godina posle pokušaja prof. Asmusa da oživi interes za primenu lasera u heritologiji, uvidom u savremenu konzervatorsku praksu [9], uočava se očiglednost, da postoje drugi uzroci fenomena opisane svojevrstne tehnološke regresije, kakva nije zabeležena ni na jednom od polja primena novih tehnologija. Stoga je istraživanje u ovom radu posvećeno rasvetljavanju fenomena tehnološke regresije u odnosu na proto-konceptualna rešenja u primeni laserske tehnologije u heritologiji.

## II. AGON I TEHNOLOŠKI PROTAGONIZAM

Pogled na genezu problema agonálnosti u primeni lasera u heritologiji, zahteva utvrđivanje nosioca (*vektora*) u

doslovnom tumačenju termina) svrhovitog kritičkog promišlja primene laserske tehnologije u zaštiti baštine, pri čemu se *agon*, kao jedan od fundamentalnih pojmova, ovde semantički koristi u širem značenju *ἀγων*, kao sučeljavanje argumenata u spektru teorijskih nijansi agonistike, koje logički pripadaju konotacijama u ovoj oblasti [10-13].

Te nijanse mogu da direktno ili refleksivno obogate eksplikativnu utemeljenost premise, da laser kao reprezent egzemplarne promene u zaštiti nasleđa, treba da bude razmatran kao subjekt u heritološkom procesu, a ne kao derivat u tehnološkim tumačenjima prirode konzervacije-restauracije. U tom smislu, agonálnost koja stoji u osnovi ovde istraživanog fenomena *tehnološke regresije*, na tako postavljenom semantičkom planu, omogućava da argumentacija različitih provenijencija, od umetničkih, do humanističkih i tehničko-tehnoloških, bude ispitana i na univerzalnoj ravni, pored tehničko-tehnološke, u kojoj je istraživao profesor Asmus.

Jedan od osnova za to daje i uvid koji iskazuje filozof estetike, umetnički kritičar i profesor, Artur Danto (Arthur Coleman Danto), da primena metoda prirodnih nauka na polju društveno-humanističkih nauka ne može biti adekvatna bez razumevanja metodološke autonomije istorijske nauke [14], pa se ispostavlja da potencijale primene lasera u heritologiji, u potpunosti može da aktivira samo istraživač sa odgovarajućom inženjersko – istorijsko - umetničkom kompetencijom, koja predstavlja sublimaciju artikulisanih spoznajnih horizonata i iskustava [15], pri čemu se ima u vidu, kako tehnološko, tako i umetničko spoznavanje fenomena.

Na polju umetnosti, to je mišljenje, da „...slikarstvo ne imitira, kao što [to] Platon navodi, ono ne reprodukuje, već samo smešta svet do sveta. Svet prikazâ je valjan koliko i takozvani stvarni svet.“ [16]. A na polju multidisciplinarnog susretanja tehnologije i istorije, to je pitanje inkluzivnosti istorijsko-umetničkih narativa, koji, budući da neretko ne prelaze naučne norme tehnoloških standarda, zbog svog neformativnog karaktera, izazivaju potrebu da se, kao i u slučaju tradicionalnih nauka, razumeju kao vrednost takozvanih *nenaučnih narativa* [17].

S obzirom na navedeni izraziti nedostatak egalitarnosti perspektiva, kako pokazuje sprovedeno istraživanje, u formulisanju vektora kritičkog promišlja primene laserske tehnologije u zaštiti baštine, neophodno je uvesti i pojam *protagonizam*, u skladu sa etimologijom termina *proto – agon -istis* (prvi borac), koji se ovde odnosi na kvalitet koji laser kao tehnološko sredstvo čini centrom interesa i referencom na polju heritologije, a u demonstraciji prethodno navedenih aspekata superiornosti laserske tehnologije na polju interakcije sa materijalima predmeta kulturne baštine [18].

Sa druge strane, protagonizam je suštinsko obeležje *vektora* kritičkog promišljanja u magistralnoj liniji razvoja primene lasera, koja ima naučistorijske osnove i koja cilja na dalekosežnost i široku obuhvatnost svog implementiranja. Otuda ova problemska postavka i omogućava uvođenje naučne deskripcije, koja konotira smenu naučne paradigme.

Istraživanjem različitih puteva parametizacije, neophodne za sučeljavanje argumenata diferentnih

provenijencija, u ovom radu prezentuje se, na koji način se parametizacija konstituiše u skladu sa metodolijom Žerara Ženeta (Gerard Genette), u tipologiji narativa [19], koja prebačena u okvir multidisciplinarnog heritološke problematike, omogućava širi opseg pitanja o odnosu prema laserskoj tehnologiji, u kontekstu faktora *vremena* (tempus), *načina* (modus), *fokalizacije* (odnosno odgovora na pitanje *ko vidi?*) i *glasa* (vox, odnosno pitanjako govori?).

Pri tome treba imati u vidu da se u lociranju *gledišta* na fenomen koji istražujemo, *differentia specificat*raži u polju distinkcija između fundamentalnih pojmova estetike, mimezisa / μίμησις (ovde u skladu sa navedenim, blisko Aristotelovom shvatanju nagona za učenjem, kao i Lajbnicovom stavu o mogućim svetovima, u korespondenciji sa prethodno navedenim Dantovim mišljenjem), odnosno, na drugom kraju opsega, diegezisa / διήγησις, kao razlaganja u smislu strukturalistički viđenog opozita.

Na ovaj način, polazeći iz različitih oblasti koje konstituišu heritologiju, moguće je pojasniti kako se navedeni parametri povezuju u okviru teorijskih modela (tipologija) primerenih pojedinačnim oblastima, a u cilju multidisciplinarnog saoblikovanja iz preciznije metodološke pozicije, koja treba da obuhvati i iskustvene, neaksiomske prakse, sistematizovane na nov način argumentacije, a na bazi razlike između univerzalnih i specifičnih vrednosti.

Sa druge strane, potreba usaglašavanja sa duhom vremena koji obeležava primenu svake nove tehnologije, a ovde i u kontrastu sa viševekovnim tradicionalnim tehnikama konzervacije, iskazuje se kao *interdiskurzivno prožimanje*, odnosno, kako to naziva Anženo (Marc Angenot), kao „intertekstualni protok i modifikacija ideologema“, kao istorijski određenog kompleksa vrednosti. Parafrazirajući Anženoovo stanovište, da se „na taj način istorijski uspostavlja granica među onim što se u društvu može zamisliti i izreći i onim što se još ne može ili neće misliti“ [20], ovde govorimo o mišljenju specifične ciljne grupe koju profesor Asmus opisuje kao *širu umetničku konzervatorsku zajednicu*.

Imajući osim navedenog, u vidu, da se čitav proces razvoja primene laserske tehnike u heritologiji odvija u okruženju gnoseološke ravnodušnosti *postmoderne*, koja je „anaučna a ne antinaučna“, kako to precizno formuliše profesor intelektualne istorije Ankersmit (Franklin Rudolf Ankersmit) [21], to je napuštanje tradicionalne predstave u svakoj oblasti, a kako se pokazuje, posebno u konzervaciji-restauraciji, povezano sa obrazovanjem koje treba da izgradi otvorenost prema različitim teorijskim konceptima i praksama.

To je i put za prevazilaženje predmultidisciplinarnih, tradicionalnih gledišta, kakvo na primer prezentuje Šap (Wilhelm Schapp) o svetu prirodnih nauka: „Metafizika prirodnih nauka fokusira se na tezu da je uključenost u svet priča neophodan uslov za rad matematičara i naučnika koji se bavi prirodnim naukama. Oni mogu operisati samo na osnovu tog sveta“ [22].

U skladu sa rezultatima ovog istraživanja je i mišljenje da je u postmodernom „...deontologizovanom svetu decentriranog logosa“, važno istaći značaj problematizacije načina, odnosno aktuelizacije pitanja *kako se misli*, u odnosu

na to *šta se misli* [23], zbog čega je i neophodno da savremena pedagogija u oblasti konzervacije-restauracije, uvidi potrebu za analitičkim pristupom u opservaciji *decentriranog mišljenja* [24]. I to iz perspektive mogućnosti sticanja fleksibilnosti u prevazilaženju stereotipija i usvajanja eklektične sistematike. To je i put za mogućnost razumevanja fundamentalnih transformisanja osnova sistema znanja koje je u oblasti konzervacije-restauracije donela primena laserske tehnologije.

Kako sprovedena istraživanja pokazuju, na tom putu značajan je pristup fenomenu *tehnološke regresije* kroz identifikaciju tematizovane agonalnosti sa duhom apologije principu *élan vital* [25], odnosno usmerenosti nastvaralački, umesto na subverzivni pristup. Na taj način *vector* svrhovitog kritičkog promišlja primene laserske tehnologije u zaštiti baštine, može se postaviti na liniju univerzalnog principa stepenovane kompleksnosti, *adaequatio rei et intellectus*, da bi se uspostavio relacioni kvalitet u razumevanju limita tradicionalnih, viševekovnih, unapred zadatih formalno-kompozicionih modela u praksi imitativnog variranja receptura i cirkularnih tautoloških interpretacija. Povećanje tehnoloških kompetencija, čiji bi se karakter u ukupnom istraživačkom protokolu mogao karakterisati kao naučno formativan, omogućilo bi logična razdvajanja relevantnih od irelevantnih pojava, čime bi se i stekli uslovi za adekvatan protagonizam laserske tehnologije, izvan prostora agonalnosti.

### III. ZAKLJUČAK

U ovom radu prezentovano je istraživanje paradoksa neadekvatne zastupljenosti primene lasera u heritologiji, kao oblasti zasnovane na značajnim proto-konceptualnim rešenjima. Prikazana istraživanja modela parametrizacije agonalnosti u razumevanju značaja laserske tehnologije, kao i vektora kritičkog ispitivanja, kao integralnog dela nove muzejske paradigme, ukazuju na potrebe uspostavljanja obrazovnih praksi sa formativno usmerenim modelima integracije znanja u konzervaciji-restauraciji, a u cilju eliminisanja subverzivnih shvatanja o upotrebi laserske tehnologije. Prikazani modeli mišljenja predstavljaju osnov za dalje istraživanje načina prevazilaženja specifičnog fenomena tehnološke regresije.

### ZAHVALNICA

Istraživanje prezentovano u ovom radu obavljeno je zahvaljujući podršci Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ugovor br. 451-03-68/2022-14/200026), kao i zahvaljujući podršci Ministarstva kulture i informisanja Republike Srbije.

### LITERATURA

- [1] J. F. Asmus, C. G. Murphy, W. H. Munk, "Studies on the Interaction of Laser Radiation with Art Artifacts", in: *Developments in Laser Technology II*, San Diego, USA, August 27, 1973, Proc. of SPIE 0041, 1974, DOI: 10.1117/12.953831.
- [2] J. F. Asmus, G. Guattari, L. Lazzarini, G. Musumeci, R. F. Wuerker, "Holography in the Conservation of Statuary", *Studies in Conservation*, vol. 18, no. 2, pp. 49–63, 1973 <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/sic.1973.005> (Accessed 13 Apr. 2022.)
- [3] J. F. Asmus, "Computer Studies of the Isleworth and Louvre Mona Lisas", in T. Russell Hsing and Andrew G. Tescher, *Selected Papers on Visual Communication: Technology and Applications*, p. 652–656, SPIE Optical Engineering Press, Washington, USA, 1990.
- [4] K. Moe, "Expert plans facelift for ancient Chinese artwork", *Hazleton Standard-Speaker*, p. 27., December 8, 1987.
- [5] J. F. Asmus, V. Parfenov, "Characterization of Rembrandt self-portraits through digital-chiaroscuro statistics", *Journal of Cultural Heritage*, Vol 34, Dec. 2018.
- [6] W. Kautek, S. Pentzien, "Laser cleaning system for automated paper and parchment cleaning", in: *Springer Proceedings in Physics 100 (2005)*, Proc. LACONA V, Osnabrück, Germany, September 15 – 18, 2003, K. Dickmann, C. Fotakis, J. F. Asmus (Eds.), pp. 403 – 410, DOI: 10.1007/3-540-27176-7\_51.
- [7] J. Marstine (ed.), "New museum theory and Practice: An Introduction", Blackwell Publishing, Hoboken, NJ, USA, 2006.
- [8] J. F. Asmus, "Non-divestment laser applications in art conservation", *Journal of Cultural Heritage*, Volume 4, Supplement 1, January 2003, pp. 289-293
- [9] S. Polić, „Izveštaj o primeni laserskog čišćenja u savremenoj muzejskoj praksi, sa osvrtom na stanje u Centralnom institutu za konzervaciju“, interni dokument, Beograd, 2020.
- [10] T. F. Scanlon, "The Vocabulary of Competition: 'Agon' and 'Aethlos', Greek Terms for Contest", *Aethlon*, SLA East Tennessee State University, USA, 1983, pp. 147–162.
- [11] B. Sandywell, "The Agonistic Ethic and the Spirit of Inquiry: On the Greek Origins of Theorizing", In: *The Sociology of Philosophical Knowledge*, Edited by M. Kusch, Dordrecht, Netherlands 2000., pp. 93–123.
- [12] J. Lungstrum, E. Sauer, "Creative Agonistics: An Introduction", *Agonistics: Arenas of Creative Contest*. Edited by Janet Lungstrum, Elizabeth Sauer. Albany, SUNY Press, NY, USA, 1997. pp. 1–32.
- [13] I. Weiler, "Der Agon im Mythos: Zur Einstellung der Griechen zum Wettkampf", *Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, Germany*, 1974.
- [14] T. Joho, "Burckhardt and Nietzsche on the Agōn: the dark luster of ancient Greece, Conflict and Competition", in: *Agon in Western Greece: Selected Essays from the 2019 Symposium on the Heritage of Western Greece*. Edited by Heather L. Reid, John Serrati, Tim Sorg. Parnassos Press – Fonte Aretusa, JSTOR, NY, USA, 2020., pp. 267–288.
- [15] G. H. von Wright, "Explanation and understanding", Ithaca, Cornell University Press, NY, USA, 1971.
- [16] S. Polić, „Od inženjerstva do tehnofilozofije u obrazovanju inženjera za zaštitu kulturnog nasleđa“, tematski zbornik radova XXVI naučnog skupa međunarodnog značaja „Tehnologija, kultura i razvoj“, Beograd 2 – 3.12.2019., ISBN 978-86-82183-18-1 (IMP), Beograd, 2020.str. 133-151
- [17] W. Schapp, "Philosophie der Geschichten", Vittorio Klostermann, Frankfurt am Main, Germany, 2015.
- [18] G. Gutting, "Michel Foucault's Archaeology of Scientific Reason", Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1989., pp. 251-256.
- [19] S. Polić, „Primena lasera u obradi, zaštiti i dijagnosticiranju materijala predmeta kulturne baštine“, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, 2007.
- [20] D. Hayman, "Review of Figures III, by G. Genette", *NOVEL: A Forum on Fiction*, Vol. 6, N° 3, Spring 1973, Duke University Press, JSTOR, pp. 288–290.  
M. Angenot, "Intertextualite, interdiscursivite, discours social", *Texte*, 2, 1983, pp. 101–112.
- [21] F. R. Ankersmit, "Historiography and postmodernism", *History and Theory*, XXVIII, No. 2, 1989., pp. 137-153.
- [22] J. Schapp, "Erinnerungen an Wilhelm Schapp", *Geschichte und Geschichten*, Studien zur Geschichtphenomenologie Willhelm Schapps, Königshausen & Neumann GmbH, Würzburg, Germany, 2004.

- [23] M. Belančić, „Rasređeni logos”, Službeni glasnik, Beograd, 2008.
- [24] H. S.Becker, B. Geer, “Participant observation: the analysis of qualitative field data”, in: R. Burgess (ed.): Field research: a source book and field manual, Allen & Unwin, London, United Kingdom, 1982., pp. 239-250
- [25] Đ. Šijaković Maidanik, „Helenski fenomen ἀγών kao élan vital: Miloš Đurić u Umetničkom pregledu”, Filosofija života i helenska agonistika. O ranim radovima Miloša Đurića, Gnomon, Centar za humanistiku, Beograd i Institut za srpsku kulturu, Nikšić, 2021.

#### ABSTRACT

Critical re-examinations of the procedures applied on materials during the conservation-restoration of cultural heritage objects, including general and individual questions about the use of new technologies, especially lasers, in relation to classical approaches to the protection of artifacts of archaeological, historical or artistic value. The issue of ethics is viewed from several aspects related to tangible and intangible actions towards objects of protection, in terms of fulfilling the given function of the chosen technique, and under the conditions of the highest degree of safety and environmental protection. This paper focuses on the characterization of proto-conceptual solutions in the application of lasers on heritage materials, with the aim of determining explicative differences in explaining the need for classical approaches to conservation-restoration of cultural heritage, with special reference to tautological practices.

#### **Proto-conceptual solutions in the application of lasers in heritology**

Milesa Srećković, Suzana Polić, Zoran Stević, Veljko Zarubica, Stanko Ostojić

# Comparison of 3D printing and galvanic coating of gold in printing circuit board production

Zoran Karastojković<sup>1</sup>, Radiša Perić<sup>2</sup>, Aleksandar Bugarinović<sup>3</sup>, Milan Miladinov<sup>4</sup>, Višeslava Rajković<sup>5</sup>

**Abstract**— It became a practice that in printing circuit board (PCB) production is used gold, as an excellent conductor of electricity and highly corrosion resistant (noble) metal. Gold always was an expensive metal, but in great game of electronic devices this metal must be used as a best solution, no matter for the high price. Many processes of gold deposition are available in PCB production, one of them is gold deposition by using electrolytic (or galvanic) process. However, a wide versatility of electrolytic methods were developed for production of circuit boards. In meanwhile is established the one more method for circuit production which is based on so called 3D printing.

Between those processes existing some differences, which need further explanations for better understanding the PCB production, it means the reasons for choosing the proper method.

**Key words:** Printing circuit board, galvanic coating, 3D printing

## 1. INTRODUCTION

It could be said that production of PCB on galvanic (electrolytic) manner belongs to two dimension, shorter 2D. When becomes clear that production of PCB by 3D printing may be cheaper than traditionally manufactured boards, this new technology has attracted a great attention. Further, 3D technology allows more complex design.

The PCBs consist from different components, depending to the final purpose of this *equipment*. So, resistors could be considered as one of the crucial component in a PCB design. But there are other electronic devices as: transistors, diodes, capacitors, inductors, sensors, etc, Fig. 1. In describing of a PCB is noticed that such board in geometric sense should be flat, other variety of informations about the functionality of this device are available in wide literature sources. In this paper the matter of consideration will be a flatness of gold traces (as a conductive layer), obtained either by galvanic or 3D printing methods.

1-Society for Ethics and Evaluation in the Arts and Sciences, Belgrade, Serbia, e-mail: zpran.karastojkovic@gmail.com

2-„Perić&Perić“, d.o.o, Dunavska 114-116, 12000 Požarevac, Serbia

3-Faculty for Electrical engineering, blvd. kralja Aleksandra, 11000 Belgrade, Serbia

4-„Sanacija i ispitivanje metala“, d.o.o, ul. Danila Ilića 2, 11060 Belgrade, Serbia

5-Institut za nuklearne nauke „Vinča“, 11000 Belgrade, Serbia

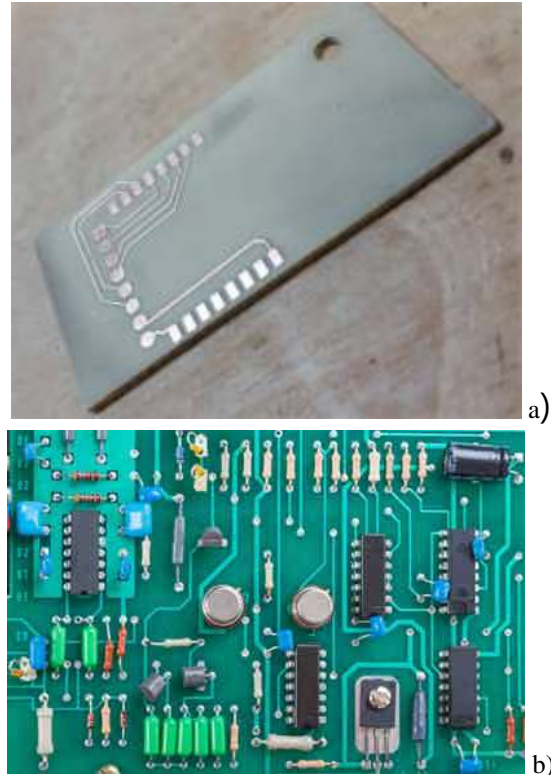


Fig. 1, Two examples in designing of printing circuit board (PCB): a) monolayer and b) multilayer design

## 2. SHORTLY ABOUT THE STRUCTURE OF LAYERS

A PCB may contain just one conductive layer, Fig. 1a), or multilayers, Fig. 1b): monolayer is pretty restrictive in function abilities while design with multilayers offers a wide versatility in making interconnections, etc. So, in designing and terminology of multilayers may be present: the top layer, an internal layer and the bottom layer, above the substrate material. Frequently an insulating layer must be present - if it is needed. It must be underline that this vocabular (top, internal or bottom layer) may not be typical scientific but rather engineering terminology, particularly during fabrication of PCB devices. Multilayer, indeed, has an influence on the thickness of such boards. The four layer frequently is recommended, of course when it is possible. It is desired that the top layer is at the same time a corrosion resistant and with excellent conductive properties, as gold does, Fig. 2.



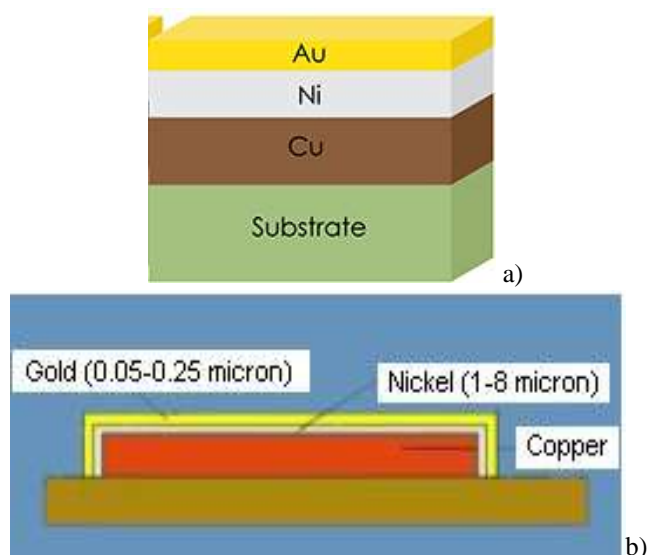


Fig. 2. Composition a) and thicknesses distributions b) at one three-layer structure over substrate material

Each layer has a different function. The multilayers are used for improving the PCB performance. From many reasons (structure, hardness, price etc.) the nickel coating also may be used, as indicated in Fig. 2. As the top layer could be chosen a golded layer from one more reason, previously not mentioned, it is a soldering ability with other components from PCB. The golden layer, also called a trace, possesses a pretty good soldering ability. Other facilities of (multi)layers are the subject of specialities in designing of PCB, here is the matter on which way the deposition of gold layer may be provided.

### 3. ELECTROLYTIC COATING OF PCB

Electrolytic (galvanic) deposition is the well known technology in surface finishing purposes, almost as a method for improving the anticorrosion properties and/or for decorative properties, but also as one of the oldest methods in production of traces onto PCB. Next advantage of electrolytic deposition of metals is in possibility to attain a layer over different materials, almost metallic materials but this is not obvious. Principles and technology of such kind of fabrication are well known and applied all over the world. The pure gold could be electrodeposited and then this is known as a "soft gold". Another type of gold deposition is provided through an alloy (usually with nickel, cobalt or other metals in amount less than 0,2%) when is needed greater hardness, especially at surfaces where the force and then a friction is appeared, so such kind of golden layer is named "hard gold". The possibilities of mixing the chemical compounds for achieving the proper electrolyte(s) also are pretty well established. Many metals are available for electrolytic deposition, but not all of them. One of the important advantages in galvanic electrodeposition of golden layer is the possibility to attain thickness of  $1\mu\text{m}$ , even less. This fact has shown a great importance in production of narrow and/or thin circuit boards, every where applied (in computers, mobile phones, TV apparatus, etc.). One example of possible thickness

distribution of different layers is shown in Fig. 2b). It is found that the gold layer thickness has shown an influence on the porosity: if thickness is less about  $0,40\mu\text{m}$  than the porosity rapidly increases, further when the thickness of this layer is about  $0,75\mu\text{m}$  than the porosity will be markedly low. No doubt that porosity or other imperfections at the substrate material will produce a kind of porous surface at golden layer, even after the galvanic process is correctly applied.

During a longterm heating-up in service periods some electrochemical migrations are possible, which could result in metal dendrites formation at the layer between the two adjacent electronic components (electrodes).

It should be noticed that the using of versatility of electrolytes may produce a harmful waste components.

### 4. 3D PRINTING OF PCB

In last decades the 3D printing as a production method becomes very attractive, especially in modeling and similar demands. In such cases the 3D method is a pretty fast and cost-less method. At many advertisements might be found just a perfect appearance, Fig. 3a). But, not every 3D modeling obviously should be successful, as could be see from Fig. 3b), where the non-uniform thickness is evident.

The printing material, here it is gold metal, should be melted during deposition and this fact represents some kind of risk when the layer is formed on plastic material, because plastic material possesses a pretty power melting temperature than gold. The producing of small amount of a kind of gold alloy in the form of wire is technically possible but may be an expensive job. The case from Fig. 3b) is not desired anyway, because the flatness will be destroyed, also with markedly increasing the roughness (with unequal surface topography) and a large amount of expensive gold will be unusually spent. At the contemporary level of technics the smaller thicknesses on PCB could be achieved by using a galvanic method of deposition

It seems reasonably an expecting that 3D technology does not produce some harmful components, however it is an important benefit.

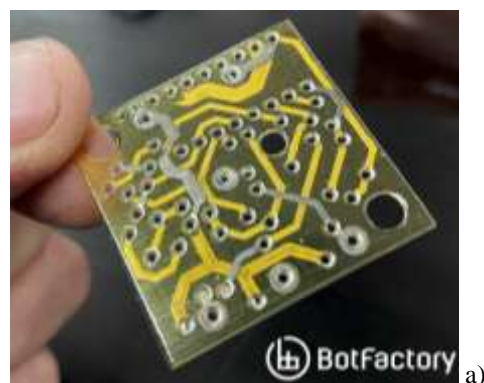




Fig. 3. Results after applying the 3D printing method with using the golden wire in production of one circuit board: a) correct and b) incorrect

## CONCLUSION

Flat and thin surface are needed at every production method. The golded traces are wellcome in PCB from one more reason – easy soldering with other components. In galvanic (electrodeposition) is possible to attain a golden layer in thickness of 1µm, even less, but this demand still is impossible if 3D printing method is used. Surface roughness after galvanic deposition is pretty satisfactory while after applying 3D printing the roughness is greater.

The producing of chemicals for electrolytic deposition of variety metals in the form of (inexpensive) salts or liquids now are present in industry in a great scale and could be supplied relatively easily, while the golden wire made from particular alloy (as mentioned with cobalt or similar) in a small amount for 3D printing still is an expensive job.

Thicknesses obtained by using 3D printing fabrication eventually may reach values above 0,1mm, what is much greater in comparison to galvanic method of deposition. So, the 3D printing method in production of printed circuits is available only at such circuits when the thickness is greater in comparison to galvanic method of deposition.

But, the disadvantage of galvanic technology is in production of variety harmful components, as a waste material, while 3D technology does not.

## References

- [1] J. Kusinski, S. Kac, A. Kopia, et al.: Laser modification of the materials surface layer – a review paper, Bull. of the Polish academy of sciences, Technical sciences, 60/2012/4, p. 711-728.
- [2] J. Sundqvist: Aspects of heat flow in laser materials processing, 2018, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology.
- [3] N. Rykalin, A. Uglov, I. Zuev, A. Kokora: Laser and electron beam material processing, Handbook, Moscow 1988, MIR Publ, p. 277-353.
- [4] <https://www.sharrettsplating.com/blog/benefits-of-electroplating-3d-prints/>
- [5] Z. Karastojković: Površinska zaštita metala, in Serbian, Visoka tehnička škola strukovnih studija, Novi Beograd 2016, p.150-162.
- [6] Z. Karastojković, P. Karastojković, S. Polić, Protective and decorative role of golden foils on sacral objects, Proceedings of XXI YuCorr, Meeting point of the science and practice in the fields of corrosion, materials and Environmental protection, September 17-20, 2019, Tara Mountain, Serbia, Serbian society of corrosion and materials protection, p. 21 – 30.

- [7] Z. Karastojković, S. Polić, P. Karastojković, Metodologija i dizajn u proizvodnji pravoslavnih zlatnih krstova / Methodology and design in production of orthodox golden crosses, Zbornik apstrakata, Druga nacionalna konferencija Metodološka istraživanja u heritologiji i novim tehnologijama, Društvo za etičnost i vrednovanje u kulturi i nauči i Centralni institut za konzervaciju, Beograd, 2020, str. 74-80.
- [8] N. Bajić, Z. Karastojković: Savremeni postupci navarivanja, IRC IHIS Technoexperts 2016, 11080 Zemun, Batajnički put 23, Srbija, str. 200-203.

## Apstrakt

Postala je praksa da se u proizvodnji štampanih koma (PCB) koristi zlato, kao izvanredan provodnik struje i jako koroziono postojan (plemenit) metal. Zlato je oduvek skup metal, ali u ogromnom broju elektronske opreme ovaj metal se mora upotrebiti kao najbolji materija, bez obzira na visoku cenu. Brojni procesi taloženja zlata su primenljivi u izradi PCB, jedan od postupaka je elektrolitičko (ili galvansko) taloženje. Dakako, veliki broj elektrolitičkih metoda je razvijen za proizvodnju štampanih kola. U međuvremenu je razvijena još jedna metoda u proizvodnji štampanih kola, koja je zasnovana na tzv. štampi.

Između ovih procesa postoje izvesne razlike koje zahtevaju dalja razjašnjenja za bolje razumevanje proizvodnje štampanih kola, to znači razloge za izbor odgovarajuće metode.

Key words: Printing circuit board, galvanic coating, 3D printing

## Comparison of 3D printing and galvanic coating of gold in printing circuit board production

Zoran Karastojković<sup>1</sup>, Radiša Perić<sup>2</sup>, Aleksandar Bugarinović<sup>3</sup>, Milan Miladinov<sup>4</sup>, Višeslava Rajković<sup>5</sup>