

UNIVERZITET U BEOGRADU  
TEHNOLOŠKO - METALURŠKI FAKULTET

Mr Maja D. Gajić - Kvaščev

**NEDESTRUKTIVNA KARAKTERIZACIJA  
ARHEOLOŠKIH KERAMIČKIH  
ARTEFAKATA I UTVRĐIVANJE  
NJIHOVOG POREKLA STATISTIČKIM  
METODAMA PREPOZNAVANJA OBLIKA**

doktorska disertacija

Beograd, 2012

UNIVERSITY OF BELGRADE

Faculty of Technology and Metallurgy

Mr Maja D. Gajić - Kvaščev

**NON-DESTRUCTIVE  
CHARACTERISATION OF  
ARCHAEOLOGICAL CERAMIC  
ARTEFACTS AND SOURCING THE  
ORIGIN USING PATTERN  
RECOGNITION METHODS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2012

**Mentor:**

Dr Radmila Jančić-Heinemann, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

---

**Komisija:**

Dr Radoslav Aleksić, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

---

Dr Viktor Pocajt, docent  
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

---

Dr Željko Đurović, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

---

Dr Boris Lončar, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

---

Datum odbrane doktorske disertacije: \_\_\_\_\_

## **Predgovor**

Tokom pionirskog i rada vođenog zavidnim entuzijazmom, u Laboratoriji za hemijsku dinamiku i permanentno obrazovanje, Instituta Vinča u Beogradu, konstruisan je prvi prenosni EDXRF spektrometar posebno namenjen izučavanju predmeta kulturnog nasleđa. Najveća podrška ovom radu ostvarena je kroz tehničku pomoć Međunarodne agencije za atomsku energije (IAEA) iz Beča, koja je realizovana kroz nekoliko projektnih ciklusa. Iskrena posvećenost, širina duha i doslednost su bili preduslovi da se na jedan sasvim poseban način osmisle istraživanja koja se danas obavljaju korišćenjem ove metode za istraživanje predmeta kulturnog nasleđa. Na tome sam zahvalna svom kolegi Veliboru Andriću, dipl. fizikohemičaru bez čije nesebične podrške i vere ovo istraživanje ne bi bilo realizovano. Posebno je zadovoljstvo biti deo takvog istraživačkog tima.

Vremenom su sistematske arheometrijske studije koje se obavljaju u Laboratoriji za hemijsku dinamiku uobličavane iskustvom i istrajnošću tima u kome je Milica Marić Stojanović, dipl. hemičar Narodnog muzeja u Beogradu nezamenjiv član. Pored neprocenjivog entuzijazma i stručnosti, svojim iskrenim prijateljstvom i podrškom Milica je umanjila svaki napor na putu realizacije ove doktorske disertacije.

Neposredna realizacija ovog rada ne bi bila izvodljiva bez posebne vere mr Dušana Šljivara, dr Aleksandra Bulatovića, prof dr Nenada Tasića, prof dr Jasne Vuković i Vesne Svobode, koji su uzorke učinili dostupnima za analizu i gospodina Veljka Ilića iz Narodnog muzeja u Beogradu koji je načinio fotografije uzoraka.

Ideja ovog rada uobličena je zahvaljujući prof dr Željku Đuroviću, redovnom profesoru na Elektrotehničkom fakultetu, Univerziteta u

Beogradu, koji je sa posebnom strpljivošću propratio i njenu finalizaciju, na čemu mu se iskreno zahvaljujem.

Članovima komisije zahvaljujem na sugestijama koje su doprinele da rad ima sadašnji oblik.

Neprocenjivi sagovornik koji je svojim bespoštednim zalaganjem učinio da celokupan rad na završetku ove disertacije bude posebno zadovoljstvo je mentor ovog rada, prof dr Radmila Jančić Heinemann. Zahvalna sam profesorki na prilici za saradnju.

Svi članovi moje porodice uneli su deo svog života u ovaj rad.

**Naziv doktorske disertacije:** Nedestruktivna karakterizacija arheoloških keramičkih artefakata i utvrđivanje njihovog porekla statističkim metodama prepoznavanja oblika

## **Rezime**

Arheološka keramika se može izučavati u kontekstu porekla proizvodnje ili tehnologije izrade, kao i distribucije određenih vrsta posuda ili čitavih grupa. Ovakve studije porekla imaju na raspolaganju čitav arsenal različitih tehnika (kako analitičkih, tako i statističkih) da bi došle do odgovora na postavljena arheološka pitanja. Posebno mesto u dugoj listi analitičkih tehnika pripada nedestruktivnim analizama kao što su IC ili Ramanska spektroskopija, PIXE ili XRD. Među njima se posebno izdvaja, kao najčešće korišćena energetski disperzivna rendgenska fluorescentna (EDXRF) spektrometrija, koja se pokazala efikasna i pogodna za izučavanje porekla arheološke keramike. Tokom poslednjih deset godina, upotreba prenosnih XRF (pXRF), terenskih (fpXRF) ili ručnih (hh)XRF spektrometara značajno je povećana. Takvi instrumenti i tehnike postali su pristupačni za mnoge primene koje generišu brze rezultate što podrazumeva njihovo gotovo trenutno tumačenje i donošenje odluke.

Imajući ovo u vidu, kao i činjenicu da su sistematska analitička ispitivanja keramika vinčanske kulture vrlo sporadična, cilj ovog istraživanja bio je da se ispita mogućnost korišćenja informacija o elementranom hemijskom sastavu keramičkih predmeta generisanih pEDXRF spektrometrijskom analizom za klasifikaciju. Kako keramika vinčanske kulture ima važnu ulogu u svetskoj arheologiji, izučavanje njenog porekla, sa što je moguće više aspekata je od velikog značaja.

Posebno pitanje koje se tokom ovih istraživanja nametnulo je da li se metode prepoznavanja oblika mogu uspešno primeniti na podacima dobijenim EDXRF analitičkom metodom. Fokus ove studije je bio na nedestruktivnoj karakterizaciji keramičkih predmeta iskopanih na tri neolitska lokaliteta: Vinča - Belo Brdo kod Beograda, Pločnik kod Prokuplja i Bubanj kod Niša i njihova klasifikacija prema elementarnom sastavu i dobro definisanom poreklu. Trideset tri fragmenta sa lokaliteta Vinča, 27 različitih fragmenata sa lokaliteta Pločnik i 15 ostataka sa lokaliteta Bubanj organizovani su u tri grupe. Osnovna karakteristika grupe bila je dobro definisano poreklo svakog pripadnika (na osnovu arheoloških razmatranja). Ovakav pristup je odabran, jer su u arheometrijskim istraživanjima moguća dva različita pristupa za utvrđivanje porekla proizvodnje: poređenje sa glinom ili sa artefaktima poznatog porekla.

U okviru disertacije potpuno je razvijen i testiran postupak donošenja odluke o poreklu čiji je cilj da se klasifikuju nepoznati komadi keramike na osnovu njihovih elementarnog sastava određenog korišćenjem pEDXRF spektrometrije. Dakle, analitička ispitivanja praćena primenom metoda prepoznavanja oblika na dobijene rezultate, iskorišćena su za klasifikaciju (a samim tim i utvrđivanje porekla), ali i ekstrakciju najdiskriminantnijih obeležja. Kako predstavljaju najznačajniji deo postupka utvrđivanja porekla, testirane su mogućnosti dve metode za redukciju dimenzija: jedna od njih je analiza glavnih komponenti (PCA) i druga koja je zasnovana na matricama rasejanja. Pokazano je da je redukcija dimenzija zasnovana na matricama rasejanja efikasniji metod za klasifikaciju. U daljem postupku klasifikacije, projektovana su dva linearna klasifikatora na osnovu željenog izlaza, čime je postignuto da 7 od 8 nepoznatih uzoraka iz skupa za testiranje bude korektno klasifikovano.

Na osnovu potvrđenih rezultata, zaključak je da, uprkos ograničenjima koja su tipična za primenjenu analitičku tehniku, elementarni sastav može biti nosilac informacija o poreklu. Uz pomoć

nove, potpuno razvijene procedure, keramički predmeti se mogu klasifikovati na osnovu njihovog elementarnog sastava i poznatog porekla.

**Ključne reči:**

pEDXRF spektrometrija, prepoznavanje oblika, redukcija dimenzija, selekcija i ekstrakcija obeležja, neuralne mreže radijalne osnove klasifikacija, kulturno nasleđe, neolitska keramika

**Naučna oblast:** Hemija i hemijska tehnologija

**UDK:** 666.3.017 : 902



**Doctoral Dissertation Title:** Non-Destructive Characterisation of Archaeological Ceramic Artefacts and Sourcing the Origin Using Pattern Recognition Methods

**Resume**

Archaeological ceramics can be studied in the context of origin of production or production technologies, as well as the distribution of specific ware types or whole assemblages. The provenience studies have at their disposal an arsenal of different techniques, both analytical and statistical to arrive at answers to archaeological issues. Special place in a long list of analytical techniques belongs to non-destructive analyses performed using IR or Raman spectroscopy, PIXE or XRD, but one that have been most commonly used is energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF) spectrometry proven to be efficient and suitable for archaeological ceramics provenience studies. During the past ten years the use of portable XRF (pXRF), field-portable (fpXRF) or hand-held (hh)XRF spectrometers has increased significantly. Such instruments and techniques become affordable for many applications that generate fast results which imply almost immediate interpretation and decision.

Guided by this and the fact that systematic analytical examinations of archaeological ceramics from the Vinča culture are very obscure, the objective of this research was to examine the possibility of using information of ceramic chemical characteristics derived by pEDXRF spectrometry for classification. As the ceramics belonging to the Vinča culture play an important role in global archaeology, it is of great importance to study as many aspects of their provenience as possible. Another question arises whether pattern recognition methods can be applied to the data obtained by EDXRF analytical method. The focus of this study was on non-destructive characterisation of ceramic

findings excavated at three Neolithic sites: Vinča-Belo Brdo near Belgrade, Pločnik near Prokuplje, and Bubaň near Niš, and their classification according to elemental compositions and well-known provenance. Thirty-three pottery sherds from the site of Vinča, 27 different fragments from the site of Pločnik, and 15 pottery sherds from the site of Bubaň were organised in three sample assemblages. The main characteristic of the ceramic assemblages was their well-known provenance (on the basis of archaeological reasons). Such an approach was selected since in archaeometry research, two different approaches can be followed to determine the origin of production: comparison with the clay or with the artefacts of well-known provenance.

A fully-developed decision-making procedure is proposed with main goal to classify unknown ceramic findings based on their elemental compositions derived by pEDXRF spectrometry and well-known provenance. So, analytical examinations were followed by application of pattern recognition methods to the obtained results as part of the decision-making procedure developed and improved to classification (and consequently sourcing) purpose and to extract the most discriminant features. As it is a major part of decision-making procedure, the possibilities of two dimension reduction methods were tested: one of them is principal component analysis (PCA) and the second scattering matrices-based dimension reduction. Scattering matrices-based dimension reduction was found to be the more efficient method for the purpose. Further, two linear classifiers, designed based on the desired output allowed for 7 of 8 unknown samples from the test set to be correctly classified.

Based on the validated results, the conclusion is that despite the constraints typical of the applied analytical technique, the elemental composition can be considered as viable information in provenience studies. With a fully-developed procedure, ceramic artefacts can be classified based on their elemental composition and well-known provenance.

**Keywords:**

pEDXRF spectrometry, Pattern recognition, Dimension reduction, Feature selection and extraction, Radial basis neural network Classification, Cultural Heritage, Neolithic ceramics

**Scientific field:** Chemistry and chemical technology

**UDK:** 666.3.017 : 902

# Sadržaj

<b>1. Uvodna razmatranja, cilj i struktura rada</b>	1
Literatura	5
<b>2. Teorijski deo</b>	7
2.1. Izučavanje keramičkih predmeta u arheometrijskom kontekstu	7
2.2. Nedestruktivne i petrografske metode karakterizacije keramičkih predmeta kulturnog nasleđa	12
2.3. Metode prepoznavanja oblika primenjene u arheometrijskim istraživanjima	19
2.4. Neuralne mreže radijalne osnove primenjene za selekciju obeležja	30
Literatura	34
<b>3. Eksperimentalni deo</b>	43
3.1. Uzorci arheološke keramike i glina – izbor, opis i priprema za analitički postupak	43
3.1.1. Izbor keramičkih predmeta	43
3.1.2. Izgled i karakteristike fragmenata neolitske keramike	47
3.1.3. Priprema keramike za analizu	49
3.1.4. Uzorci gline	52
3.2. Nedestruktivno određivanje elementarnog sastava arheološke keramike EDXRF spektrometrijskom metodom	55
3.2.1. Eksperimentalna postavka za analizu tela fragmenata neolitske keramike	62
3.3. Petrografske analize neolitske keramike i analiza slike kao metoda za selekciju obeležja	65
Literatura	72

<b>4. Određivanje porekla arheološke keramike</b>	76
4.1. Algoritam procedure za donošenje odluke o poreklu keramike	76
4.2. Metode za redukciju dimenzija	80
4.2.1. Redukcija dimenzija korišćenjem analize glavnih komponenti	81
4.2.2. Redukcija dimenzija zasnovana na matricama rasejanja	86
4.3. Klasifikacija i projektovanje klasifikatora	89
4.3.1. Projektovanje lineranog klasifikatora	91
4.3.2. Projektovanje lineranog klasifikatora na bazi željenog izlaza	92
4.4. Metode za testiranje uspešnosti klasifikacije	95
Literatura	100
<b>5. Rezultati i diskusija</b>	102
5.1. Elementarni sastav arheološke keramike kao skup ulaznih podataka za određivanje porekla keramike	102
5.1.1. Određivanje elementarnog sastava keramičkih predmeta EDXRF spektrometrijskom analizom	102
5.1.2. Selekcija obeležja iz spektra korišćenjem ADMCA softverskog paketa	103
5.1.3. Selekcija obeležja iz EDXRF spektra korišćenjem neuralnih mreža sa radijalnom osnovom	112
5.2. Klasifikacija arheološke keramike na osnovu elementarnog sastava određenog EDXRF spektrometrijskom metodom i dobro definisanog porekla	125
5.3. Testiranje uspešnosti klasifikacije	145
5.4. Klasifikacija neolitske keramike i glina na osnovu morfoloških karakteristika minerala korišćenjem procedure za određivanje porekla	150
Literatura	158

<b>Zaključak</b>	160
Prilog A	164
Prilog B	170
Prilog C	183

## **1. Uvodna razmatranja, cilj i struktura rada**

*U ovom poglavlju, rad je predstavljen u kontekstu neophodnosti multidisciplinarnog pristupa savremenim istraživanjima u humanističkim, društvenim i prirodnim nauka kao i u oblastima njihovog preplitanja što predstavlja preduslov osvajanja novih i proširivanja i produbljivanja postojećih saznanja. Ovo uvodno razmatranje prati predstavljajući cilja istraživanja i strukture izloženog rada.*

Svako društvo pokušava da sačuva svoje kulturno nasleđe, jer je upravo to ono što mu daje sopstveni identitet. Način na koji su predmeti identifikovani da imaju važnost za neko društvo i načini kako se kao takvi čuvaju za budućnost, zavise od sofisticiranosti tog društva, od njegovog bogatstva, ali ipak u najvećoj meri želje, volje i odlučnosti pripadnika društva da čuvaju kulturno nasleđe (Creagh 2005). Pojam kulturnog nasleđa i definicije šta ono predstavlja i obuhvata nastajale su i menjale se tokom vremena. U savremenom dobu uspostavljen je sistem međunarodnih preporuka, razvijenih pod okriljem UNESCO-a i drugih srodnih institucija koje daju okvir aktivnostima na zaštiti kulturnog nasleđa. Te preporuke i praksa razvijenih zemalja su usvojene kao osnova za izgrađivanje srpskih institucija čija je delatnost proučavanje i zaštita kulturnog nasleđa. To je oblast kojom, pored arhitekata, tradicionalno dominiraju stručnjaci iz humanističkih nauka i raznih grana umetnosti – istoričari, arheolozi, slikari – konzervatori, istoričari umetnosti, etnolozi, arhivisti kao osnovni stručni kadar institucija zaštite kulturnog nasleđa. Primena metoda i tehnika prirodnih nauka za zaštitu kulturnog nasleđa, u Srbiji počinje sa osnivanjem fizičko – hemijskih laboratorija u centralnim institucijama

čija je ovo matična delatnost i to od samih početaka planske brige o predmetima kulturnog nasleđa. I pored razvijene svesti o neophodnosti multidisciplinarnog pristupa u zaštiti kulturnog nasleđa, stručnjaci su znanja i veštine neophodne za ovu oblast najčešće sticali u institucijama van zemlje (Korolija – Crkvenjakov i ostali 2012). Očuvanje i zaštita kulturnog nasleđa je jedan od glavnih fokusa u današnjoj evropskoj Uniji, a i šire, kao deo šire strategije o očuvanju ambijenta (*environment preservation*). Trend kretanja ka društvu znanja ogleda se i u promeni paradigme zaštite kulturnog nasleđa – sve veći akcenat stavlja se na povećanje znanja kroz multidisciplinarni pristup, u kojem značajno mesto zauzimaju fizičke i hemijske metode kojima se mogu sticati nova saznanja o kulturnom nasleđu (Adriaens i ostali 2004). Ovakav pristup za cilj ima stvaranje povoljnog okruženja u kojem se multidisciplinarnost podrazumeva. S jedne strane ozbiljne studije, sistematska istraživanja i veći i manji projekti u oblastima ispitivanja i zaštite kulturnog nasleđa podrazumevaju i generisanje ili potvrdu podataka analitičkim postupcima. S druge strane zahtevi koje pred nauku postavljaju osetljiva i dragocena dela naše istorije dovode do uključivanja ili razvoja novih tehnika i usavršavanja metodologija za njihovo proučavanje bez ikakvih oštećenja, što se pogotovo odnosi na savremene tehnike nedestruktivnog ispitivanja.

Keramika je, kao najbrojniji materijal na arheološkim lokalitetima odavno predmet mnogih istraživanja. Uz kamene artefakte, keramika predstavlja onu vrstu arheološkog materijala koja je najbolje očuvana, najmanje podložna uticaju proteklog vremena i zastupljena u velikim količinama. Zahvaljujući tim osobinama, keramika je materijal koji pruža najviše mogućnosti za različite analize i studije: ona je izvor informacija o tehnološkim inovacijama, hronologiji, strategijama opstanka, aktivnostima u okviru domaćinstva, razmeni i trgovini, simboličkim sistemima, ritualu i religiji i mnogim drugim (Vuković 2010). Sistematska analitička ispitivanja keramičkih predmeta iz doba Neolita u Srbiji su retka i retko publikovana (Mioč i ostali 2004, Gajić –



Kvaščev i ostali 2012). S druge strane značaj arheoloških nalazišta na teritoriji Srbije na svetskoj arheološkoj mapi, kontekst okruženja i savremeni nalazi (Radivojević i ostali 2010) iziskuju da se istraživanjima neolitske keramike posveti posebna pažnja sa aspekta karakterizacije, autentifikacije i zaštite, metodama i analitičkim tehnikama prirodnih nauka. U tom kontekstu su za prva sistematska analitička istraživanja neolitske keramike izabrani lokaliteti Vinča – Belo Brdo u okolini Beograda, Pločnik u okolini Prokuplja i Bubanj u okolini Niša. Pored nedvosmislenog značaja, na izbor ovih lokaliteta najviše je uticala činjenica da se na njima vrše više – manje intenzivna iskopavanja u poslednjih nekoliko godina. Zbog toga je pored komada keramičkih predmeta koji su deo muzejskih kolekcija, na raspolaganju, za ovu analizu bio dostupan i izvestan broj komada iskopanih u skorašnjim kampanjama. Ovakav pristup uzorkovanju omogućio je da se istraživanje, koje je predmet ove disertacije, obavi u skladu sa zahtevima savremenih arheometrijskih studija. Uzorci neolitske keramike analizirani su u kontekstu određivanja elementarnog sastava materijala od kojeg su keramički predmeti pravljeni. Za ovo su primenjene analitičke tehnike koje se široko primenjuju u ovoj oblasti istraživanja, a sama metodologija analitičkog postupka prati najsavremenije tendencije (Forster i ostali 2011). Pored potrebe da se neolitska keramika opiše u smislu karakterizacije materijala od kojih je pravljena, pojavila se i potreba da se na osnovu ovih informacija definišu karakteristike lokalne proizvodnje i tehnologije izrade ne samo u cilju prepoznavanja lokalne proizvodnje i njene karakterizacije koja će omogućiti razdvajanje od ostalih proizvodnji i utvrđivanje porekla, već i mnogo širi prvenstveno arheološki kontekst postignutih rezultata. Ovde svakako ne treba izostaviti činjenicu da su sve primenjene analitičke tehnike i metodološki pristupi izabrani tako da se dobijeni rezultati mogu iskoristiti za formiranje Nacionalne baze podataka o praistorijskoj keramici, ali i da budu deo neke od postojećih, dobro razvijenih evropskih baza (Hein i ostali 2012).

Suštinski doprinos znanju o kulturnom nasleđu se dobija kada se iz informacija dobijenih analitičkim postupkom, drugim rečima iz činjenica o materijalima i strukturi izvede zaključak sa kulturološkim, arheološkim, istorijskim i/ili umetničkim implikacijama, sa ili bez uticaja na postojeće saznanje. U ovom svetlu je i izvršen prikaz rezultata istraživanja, a sama struktura rada prati isti koncept. Nakon ovih uvodnih razmatranja i definisanja cilja disertacije, sledi poglavlje u kome su predstavljene mogućnosti primene radijacionih i nuklearnih tehnika u analizi predmeta kulturnog nasleđa, sa posebnim akcentom na analize keramičkih artefakata. Nezaobilazni segment analitičkog ispitivanja keramičkih artefakata je i petrografska analiza, čije su mogućnosti takođe predstavljene u ovom poglavlju. Dat je i pregled tehnika i metoda prepoznavanja obeležja sa posebnim akcentom na one koje se primenjuju u arheometriji i kratak osvrt na upotrebu neuralnih mreža za analizu spektara. Treće poglavlje sadrži delove u kojima su, pored detaljnog opisa korišćenih uzoraka i načina njihovog tretmana, detaljno prikazani i eksperimentalni postupci korišćeni u istraživanju. U četvrtom poglavlju predstavljena je i detaljno razrađena procedura za donošenje odluke o poreklu keramičkih predmeta. Pored rezultata analitičke karakterizacije materijala od kojih su analizirani predmeti sačinjeni, peto poglavlje sadrži i rezultate korišćenja ovih podataka za određivanje porekla. Ispitane su i kvantifikovane različite mogućnosti u pristupu obradi analitičkih rezultata. Na osnovu svih rezultata predložena je procedura koja je jednostavna, brza i efikasna u postizanju rezultata, izraženog kroz zaključak o poreklu. Zaključak je osmišljen da predstavi rezultate u kontekstu značaja multidisciplinarnog pristupa u analizi predmeta kulturnog nasleđa koje rezultira proširivanjem i produbljivanjem postojećeg znanja.

## LITERATURA

- Adriaens A, 2004 Demortier G: COST Actions G1 and G8: EU programs on the use of radiation in art and archaeometry. *Nucl. Instrum. Methods B*, 226: 3 – 9.
- Creagh DC 2005 The characterization of artefacts of cultural heritage significance using physical techniques. *Radiation Physics and Chemistry*, 74: 426–442.
- Forster N, 2011 Grave P, Vickery N, Kealhofer L: Non-destructive analysis using PXRF: methodology and application to archaeological ceramics. *X-Ray Spectrom*, 40: 389–398.
- Gajić-Kvašček M, 2012 Marić-Stojanović M, Šmit Ž, Kantarelou V, Karydas AG, Šljivar D, Milovanović D, Andrić V: New evidence for the use of cinnabar as a colouring pigment in the Vinča culture. *J Archaeol Sci*, 39:1025–1033.
- Hein A, 2012 Kilikoglou V: *ceraDAT*—Prototype of a Web-based Relational Database for Archaeological Ceramics. *Archaeometry*, 54:230 – 243.
- Korolija – 2012 Marić – Stojanović M, Andrić ĐV, Gajić – Kvašček DM: Crkvenjakov DD, Multidisciplinarni pristup kao osnov za unapređenje znanja o kulturnom nasleđu. Prvi TIPNUD – Teorija i praksa nauke u društvu: od krize ka društvu znanja, 14 - 16. Novembar 2012, Beograd, Srbija, 231 – 237.
- Mioč UB, 2004 Ph. Colomban Ph, Sagon G, Stojanović M, Rosić A: Ochre decor and Cinnabar Residues in Neolithic Pottery from Vinča, Serbia. *J. Raman Spectroscopy*, 35: 843-846.

- Radivojevic M, 2010      Rehren Th, Pernicka E, Sljivar D, Brauns M, Boric D: On the origins of extractive metallurgy: new evidence from Europe. *Journal of Archaeological Science*, 37 (11): 2775 – 2787.
- Vuković J      2010      Neolitska grnčarija – tehnološki i socijalni aspekti. Doktorska disertacija, Beograd. Univerzitet u Beogradu, Filozofski fakultet.

## **2. Teorijski deo**

### **2.1. Izučavanje keramičkih predmeta u arheometrijskom kontekstu**

*Svojom osobinom da kao materijal (što se tiče sastava i svojstava) ima neznatne promene tokom i pod uticajem vremena, keramika predstavlja nepresušan izvor informacija o prošlosti ljudske civilizacije. Iako je to sasvim dovoljan razlog da arheološka keramika bude u fokusu svih oblasti našeg istraživanja, još neke njene osobine treba istaći. Smatra se da je izrada keramike najstarija svesna hemijska disciplina u istoriji čovečanstva (Vuković 2010). Srećnu okolnost sa stanovišta analitičkih tehnika, sa značajnim antropološkim i arheološkim implikacijama, predstavlja i činjenica da su keramički artefakti najbrojniji materijal na arheološkim lokalitetima. U svetlu neprocenjivog značaja keramičkog kulturnog nasleđa, u ovom poglavlju prikazani su različiti arheometrijski pristupi odgonetanju tajni koje su ostale zapisane u ovom blagu.*

Keramika je, uz kamene artefakte, odavno predmet mnogih istraživanja i predstavlja onu vrstu arheološkog materijala koja je najbolje očuvana i to najčešće u velikim količinama. Zahvaljujući ovim osobinama, keramika je materijal koji pruža najviše mogućnosti za različite analize i studije – ona pruža informacije o hronologiji, strategijama opstanka, aktivnostima u okviru domaćinstva, razmeni i trgovini, ritualima i religiji i sličnim (Vuković 2010). Potpuni okvir pomenutim studijama daje čitanje zapisa unutar same strukture

materijala, koji nosi informaciju o korišćenoj sirovini, strukturi, dodanim primesama, načinima obrade i pečenja, pigmentima za ukrašavanje. Sve ovo zajedno za rezultat ima potpuno sagledavanje porekla i tehnologije izrade, a posledično i evidentnije arheološke i antropološke implikacije.

Najstarija upotreba gline svakako je dokazana nalazima iz gornjepaleolitskog lokaliteta Dolni Vestonice u Češkoj (Vandiver i ostali 1989). Glina, međutim, nije korišćena za izradu posuda, već zoomornih i antropomornih figurina (više o ovome na <http://www.ancient-wisdom.co.uk/czechdolnivestonice.htm>). U novije vreme, međutim, sve je više nalaza prema kojima Kina preuzima primat za nalaze najstarije keramike na svetu (Chi 2002).

Keramika se ni na jednom lokalitetu ne javlja sporadično, već u pravom smislu predstavlja značajan deo ukupnih nalaza. Ovome treba dodati i da nekoliko stotina fragmenata sa jednog lokaliteta ukazuje na razvijenu proizvodnju. Zbog toga je grnčarija, posebno tokom prve polovine XX veka, bila osnov za formiranje periodizacija i relativno - hronološka razmatranja praistorijskih kultura, a analize su se zasnivale na opisu tipologije oblika i stilskih elemenata, pre svega ornamentike (Vuković 2010). Ozbiljna savremena istraživanja keramike (Sánchez i ostali 2002, Carrero i ostali 2010, Guoxi i ostali 2009, Hein i ostali 2012), ne mogu se zamisliti bez analiza izvedenih tehnikama koje se koriste u oblasti prirodnih nauka. Izuzetan je broj i prvenstveno rezultat publikovanih rezultata arheometrijskog ispitivanja keramičkih artefakata, počevši od pojedinačnih i lokalnih studija slučaja pa sve do zahtevnih sistematskih istraživanja. Iako su ovakvi multidisciplinarni pristupi u savremenoj srpskoj nauci sporadični, u razvijenim naučnim sredinama, čitanju civilizacijskih zapisa sakrivenih u keramičkim artefaktima na raspolaganju je čitav arsenal raznovrsnih analitičkih tehnika. Posebno treba istaći činjenicu da su svetska istraživanja sistematska, dobro osmišljena i organizovana sa nezaobilaznim multidisciplinarnim pristupom koji se ogleda u neraskidivoj povezanosti

humanističkih i prirodnih nauka u dešifrovanju otkrivenih činjenica. Do sada nema publikovanih rezultata sistematskog analitičkog ispitivanja keramičkih artefakata sa arheoloških lokaliteta na teritoriji Srbije, iako su upravo te civilizacije od izuzetnog značaja na svetskoj arheološkoj mapi.

Keramički predmeti se arheometrijskim metodama mogu istraživati na dva osnovna načina:

- § utvrđivanje porekla i
- § izučavanje tehnologije izrade.

Svi ostali pristupi u izučavanju keramike predstavljaju podgrupu ove dve grupe, zavisno od izabranog pristupa u istraživanju. Na primer, tehnike koje se koriste za identifikaciju lokalne proizvodnje mogu da pruže odgovore i na pitanja kojima se utvrđuje poreklo. Posledično, identifikacija predmeta trgovine predstavlja podgrupu iste ove grupe. Ovde se pod terminom tehnika podrazumeva celokupan način utvrđivanja činjenica, od načina uzorkovanja, analize hemijskog sastava, arheološke interpretacije i sličnih postupaka.

Izučavanje porekla arheološke keramike u arheometrijskom kontekstu odnosi se prvenstveno na karakterizaciju i lociranje izvora sirovina korišćenih u proizvodnji artefakata u cilju utvrđivanja porekla. Proširena istraživanja uključuju studije obrazaca nabavke sirovina i razmene i trgovine (Tite 2008) koje mogu dodatno da obogate studije porekla. Pored stilske interpretacije kao perjanice istraživanja porekla, arheometrijskim studijama porekla keramike se može pristupiti na dva načina:

- § istovremenim istraživanjem i upoređivanjem sirovina sa keramičkim predmetom koji se istražuje i
- § poređenjem predmeta ispitivanja sa drugim predmetom (predmetima) čije je poreklo nedvosmisleno potvrđeno, tj sa

predmetom **dobro definisanog porekla**. Ovaj pristup je i izabran za istraživanje prikazano u ovoj disertaciji.

Najčešći pristup je da se hemijski (Minc i ostali 2011, Montana i ostali 2011, Xu i ostali 2001, Fermo i ostali 2008, Glascock i ostali 2003, Hall i ostali 2002, Taylor i ostali 1997) ili mineraloški (Quinn i ostali 2011, Hill i ostali 2004, Mason 1995, Neff 2012, Bagnasco i ostali 2001) sastav keramičkih predmeta uporedi sa sastavom sirovina iz geoloških izvora (bilo da je u pitanju glina ili različiti materijali koji su u keramiku dodavani kao primese). Hemijska karakterizacija podrazumeva utvrđivanje elementarnog sastava i elemenata u tragovima (kao svojevrstne *finger print* elemente), zajedno sa njihovom zastupljenošću u sastavu sirovine i proizvoda. Za ove analize, koriste se različite analitičke tehnike počevši od neutronske aktivacione analize (NAA, Dias i ostali 2007, Li i ostali 2012), masene spektrometrije (ICP – MS, LA - ICP – MS, TOF - LA - ICP – MS, Iñañez i ostali 2010, Li i ostali 2005) do tehnika zasnovanih na interakciji zračenja sa materijom (XRF, SXRF – PIXE ili PIGE, Kos i ostali 2011, Papachristodoulou i ostali 2010, Freitas i ostali 2010, Cariati i ostali 2003), mada se u praksi sreće i multianalitički pristup (Padilla i ostali 2006, Tsolakidou i ostali 2002, Wallis i ostali 2012, Speakman i ostali 2011, Stewart i ostali 1990, Akyuz i ostali 2008, Centeno i ostali 2012, Smith i ostali 2004, Clark 2007). Petrografska istraživanja najčešće su bazirana na mineraloškom ispitivanju sirovina i keramičkih predmeta. Najčešći pristup je analiza tankih preseka na kojima se vrši identifikacija minerala i njihova međusobna komparacija. Pored ovog standardnog petrografskog postupka korišćenjem SEM-EDX dobijamo informacije koje u toku petrografske analize ostanu sakrivene (Braun 2012, Adriaens i ostali 2004, 73–128). S druge strane, izučavanje tehnologije izrade, pored identifikacije sirovina i karakterizacije materijala, uključuje i istraživanje same tehnike izrade od pripreme sirovine (što uključuje



dodavanje primesa), oblikovanja i ukrašavanja, pečenja, do finalne dorade.

Ovako obiman i raznovrstan skup različitih aktivnosti koje se obavljaju prilikom proizvodnje keramičkog predmeta zahteva upošljavanje svih raspoloživih analitičkih tehnika ispitivanja, čiji bi rezultati mogli biti iskorišćeni za izvođenje zaključaka (Stahl i ostali 2008, Frankel i ostali 2012, Pizarro i ostali 2012, Remolá i ostali 1993, Eramo i ostali 2004). Na ovaj način se u procesu izučavanja keramičkih predmeta generiše značajna količina informacija, koje, da bi se stavile u funkciju arheološkog i antropološkog rezultata, moraju biti obrađene angažovanjem više ili manje kompleksnih računskih tehnika: statističke i multivarijantne analize, prepoznavanja oblika, digitalne obrade signala i slike, pa sve do formiranja i održavanja elektronskih baza podataka.

U najkraćem, arheometrijski skup podataka generisan je u procesu analitičkog (ili primenom više analitičkih metoda) ispitivanja predmeta kulturnog nasleđa. Njegova priroda je gotovo isključivo multivarijantna (pa čak i kada se ispitivanje porekla zasniva na stilističkim karakteristikama keramičkih predmeta, Karasik i ostali 2011). Ovo za rezultat ima uključivanje i raznovrsnih računskih metoda za analize arheometrijskih podataka prilikom izučavanja predmeta kulturnog nasleđa, a u funkciji dostizanja odgovora sa arheološkim implikacijama.

## **2.2. Nedestruktivne i petrografske metode karakterizacije keramičkih predmeta kulturnog nasleđa**

*Od širokog spektra analitičkih tehnika koje su uspešno našle primenu u arheometrijskim istraživanjima u ovom poglavlju su detaljnije prikazane nedestruktivne tehnike sa posebnim osvrtom na mogućnosti njihove primene za istraživanja u terenskim uslovima. Kako rezultati dobijeni petrografskom analizom mogu biti veoma značajni nosioci informacija o poreklu arheološke keramike, ova metoda je iskorišćena za poređenje postignutih rezultata i u tom kontekstu su prikazani osnovni elementi ove analitičke tehnike.*

Dve glavne komponente keramičkih predmeta koje mogu biti značajni nosioci informacije o poreklu su telo keramike (hemijski sastav paste od koje je predmet napravljen) i glazura sa dekoracijom (hemijski sastav glazure i korišćeni pigmenti). Glinena pasta od koje se formira keramički predmet je multikomponentni sistem koji je po hemijskom sastavu sličan sastavu sedimentnih stena. Pored gline, u pasti se mogu naći i različite primese koje mogu biti prirodne nečistoće gline ili pak ciljano dodate u toku njene pripreme za formiranje keramičkog predmeta. Sve ovo ukazuje da je telo keramičkog predmeta vrlo dragocen i relevantan nosilac informacije o poreklu sirovine, poreklu primesa, tehnici izrade datog predmeta, drugim rečima da se analizom hemijskog sastava tela keramike vrši analiza gline i primesa čime se na osnovu dobijenih rezultata može povratiti informacija o poreklu sirovine i samog predmeta. Hemijska analiza sastava paste od koje je sačinjen predmet koji se ispituje može biti izvršena bilo kojom standardnom

metodom hemijskih analiza, a na izbor određene metode najčešće utiču sledeći faktori:

- § informacija koja se želi dobiti analizom,
- § da li se može vršiti uzorkovanje ili ne,
- § da li se predmet može analizirati u laboratorijskim uslovima ili se analiza mora obaviti *in-situ* i
- § da li se želi na pomenutom predmetu izvršiti više ponovljenih analiza ili ispitivanje izvršiti drugom instrumentalnom tehnikom.

Već samo ovo početno razmatranje ukazuje na različite mogućnosti u izboru metodologije arheometrijskog izučavanja keramičkih predmeta počevši od izbora analitičkog postupka pa do načina obrade i interpretacije dobijenih rezultata. U savremenim arheometrijskim istraživanjima usvojen je termin „prilagođen nameni” (eng. *fitness for purpose*) koji se odnosi na izabrani analitički pristup, a objašnjava sinergiju izabranog analitičkog postupka za karakterizaciju predmeta kulturnog nasleđa i postizanja željenog rezultata. Poželjno je da analitički postupak kojim se analiziraju keramički predmeti može da zadovolji sledeće zahteve:

- § *Nedestruktivnost i neinvazivnost*; U najopštijem bi se moglo reći da je nedestruktivan onaj analitički postupak koji nema nikakvog uticaja na analit i predmet ispitivanja, tj. oni ostaju nepromenjeni nakon analitičkog postupka. Međutim, nedestruktivnost ne isključuje uzorkovanje. Kada je predmet ispitivanja izuzetne vrednosti ili važnosti dodatni zahtev koji može da bude od presudnog značaja za odabir analitičkog postupka je neinvazivnost, tj da se analitički postupak može obavljati bez ikakvog uticaja na predmet ispitivanja u celini. Moglo bi se reći da su nedestruktivnost i

neinvazivnost „zahtevi nad zahtevima” u najvećem broju analiza predmeta kulturnog nasleđa.

- § *Multielementarnost* je zahtev kojim je izražena potreba da se u jednom analitičkom postupku prikupi maksimalna moguća informacija o hemijskom sastavu keramičkog predmeta. Izrazita prirodna raznolikost hemijskog sastava sirovine i primesa za izradu keramike zahteva da izbrani analitički postupak ima širok opseg sa što je moguće istim ili sličnim performansama.
- § *Portabilnost*; Među zahtevima koji se mogu smatrati osnovnim sve češće se pojavljuje i zahtev da se analize vrše na mestu gde se predmet ispitivanja nalazi. Ovaj zahtev je omogućen sve većim brojem analitičkih postupaka koji se mogu obaviti na opremi koja je takoreći „minijaturizovana” i prilagođena mogućnostima rada na terenu. Tada je cena transporta opreme i *in-situ* analitičkog postupka mnogo manja od cene koja prati transport i osiguranje jedinstvenog predmeta kulturnog nasleđa. Prilikom izbora analitičkog postupka za analize keramičkih predmeta ovaj zahtev nije od presudne važnosti, ali je poželjan.
- § *Brzina generisanja rezultata, tačnost i preciznost, stabilnost, mala tehnička i metodološka zahtevnost i niska cena analitičkog postupka, mogućnosti obrade i interpretacije dobijenih rezultata* samo su još neki bitni faktori koji imaju uticaj na izbor analitičkog postupka u arheometrijskim istraživanjima, pa i u analizi keramičkih predmeta.

U savremenim istraživanjima se skoro sve instrumentalne tehnike koriste za karakterizaciju predmeta kulturnog nasleđa, ali se praktično najčešće koriste one koje se mogu nazvati nedestruktivnim, a poželjno je i neinvazivnim instrumentalnim tehnikama, kao što su napr. FTIR, XRD, Ramanska spektrometrija, LIBS, LA ICP-MS i druge.

Tehnika energetski disperzivne rendgenske fluorescentne spektrometrije, EDXRF (eng. *Energy Dispersive X-Ray Fluorescence*) ispunjava najveći broj prethodno pobrojanih zahteva i trenutno se smatra jednim od standardnih i najčešće primenjivanih analitičkih postupaka u arheometrijskim istraživanjima. Razlozi za ovako privilegovan status jednog analitičkog postupka potiču iz sledećih osobina:

- § velika dostupnost, uz relativno nisku cenu, aparature za izvođenje analitičkog postupka;
- § nedestruktivni karakter analitičkog postupka;
- § savremeni instrumenti koji su poslednjih godina dostupni na tržištu su prenosni (portabl-pEDXRF ili fpEDXRF) ili su čak do te mere minijaturizovani da se mogu svrstati u grupu ručnih instrumenata (eng. *hand-held*, hhEDXRF, Frahm i ostali 2013) čime je obezbeđena neinvazivnost analitičkog postupka.
- § velika brzina generisanja rezultata (reda nekoliko desetina sekundi) a samim tim i brzina analitičkog postupka što u velikoj meri utiče i na njegovu cenu;
- § mogućnost kvalitativne i kvantitativne analize;
- § opseg hemijskih elemenata koji se ovim postupkom istovremeno može identifikovati je veliki (od Si do U), pa je generisani rezultat informativan za veliki broj zahteva.
- § instrumenti su bezbedni i jednostavni za rukovanje;
- § vremenom su analitičke procedure standardizovane tako da se rezultati generišu sa velikom tačnošću i preciznošću i mogu se međusobno porediti.

Kao i svaka druga instrumentalna tehnika i EDXRF spektrometrija je ograničenih karakteristika usled same prirode fizičkog procesa koji se koristi za detekciju i kvantifikaciju analita u predmetu

ispitivanja. Najznačajnija ograničenja su mala osetljivost za lake elemente, značajan doprinos matriksa na izgled rezultujućih spektara, veliki broj preklopljenih linija u spektru koje zahtevaju dodatnu obradu i otežavaju kvantifikaciju rezultata.

Petrografija tankog preseka je korisna metoda za izučavanje proizvoda od gline koja je, iako destruktivnog karaktera, našla primenu i u arheometrijskim istraživanjima. Tanki preseki mogu biti iskorišćeni za ispitivanje različitih materijala a posebno stena i minerala u pečenim glinama. Sama metoda može da pruži dokaze za brojne aspekte izučavanja keramičkih predmeta što uključuje i određivanje porekla i tehnologije izrade. Krajem XVIII veka škotski naučnik W. Nicol napravio je prvi presek fosilizovanog drveta koji je bio dovoljno tanak da bude transparentan pod mikroskopom. Ovaj naučnik doprineo je i konstruisanju prvog polarizacionog mikroskopa, 1828. godine, tako što je izumeo prizmu koja omogućava propuštanje jednog zraka ravanski polarizovane svetlosti. Prva primena ove tehnike za analizu arheološkog materijala objavljena je 1890. godine. Nemački geolog Karl Lepsius je pripremio 409 uzoraka grčkog mermera i klasifikovao ih na različite tipove na osnovu mikroskopski uočenih detalja kao što su boja i veličina zrna primesa (Lepsius 1890).

Korišćenje metode petrografske analize tankog preseka za izučavanje arheološke keramike nije šire primenjivano do sredine dvadesetog veka kada je Ana Šepard 1942. godine objavila rezultate petrografske analize Rio Grande posuda od glazirane i oslikane keramike (Shepard 1942). Paralelno sa ovim radom W. Felts je demonstrirao mogućnosti metode analizirajući tanke preseke keramičkih proizvoda iz Troje (zapadna turska obala). On je poredeći primese u keramici sa primesama u zemljištu uspeo da razdvoji lokalnu proizvodnju od komada koji su bili predmet trgovine (Felts 1942). Petrografske analize keramike su u Evropi značajno intenzivirane radovima D. Pikoka. On je 1968. godine objavio rezultate istraživanja oko stotinu tankih preseka dve posude iz kamnog doba pronađene u

zapadnoj Engleskoj (Peacock 1968). U nizu značajnih istraživanja koja su napravila pomake ovoj oblasti (Riley 1979, Riley i ostali 1980, Day i ostali 1999, Reedy 2008) ulazimo u 21. vek kada petrografsko ispitivanje postaje nezaobilazni segment u istraživanjima arheološke keramike, pružajući obilje važnih informacija o poreklu i tehnologiji izrade.

Priprema uzoraka za petrografsku analizu se sastoji od nekoliko koraka (Peterson 2009):

- § iseče se mali fragment keramičkog predmeta pomoću dijamantskog sečiva. U slučaju da je materijal izrazito porozan ili trošan pre sečenja se vrši impregnacija smolom da bi se sprečilo oštećenje uzorka,
- § izrezana površina se izbrusi (uglača-ground) ili rukama ili nekim pogodnim sredstvom dok ne postane potpuno ravna,
- § pripremljeni materijal se zalepi na staklenu podlogu i osuši,
- § gornja površina se paralelno nosaču preseče do debljine od 1 – 2 mm,
- § ova površina se fino polira do debljine 25 – 30  $\mu\text{m}$  i
- § tako dobijen uzorak se prekrije zaštitnim staklom.

Ovako pripremljeni uzorci tankih preseka spremni su za petrografsku analizu sa ciljem karakterizacije materijala od kojeg su napravljeni. Analiza se vrši pomoću mikroskopa koji propušta polarizovanu svetlost kroz uzorak tankog preseka. Ovime je omogućena identifikacija dve glavne komponente u sastavu keramike, gline i dodavanih primesa. Kao dodatna informacija mogu se analizirati pore i pukotine, kao i detalji kojima se određuje tretman površina. U opisanom postupku najjednostavnija je identifikacija minerala. Oni se identifikuju pomoću karakterističnih optičkih svojstava kao što su: transparentnost, boja, morfologija i sličnih.

U savremenim petrografskim istraživanjima moguće je dobiti digitalnu sliku sa polarizacionog mikroskopa. Ova tehnika nadalje otvara široke mogućnosti u prostoru obrade digitalnih slika. Metodama koje se koriste za digitalnu obradu slike moguće je kvantifikovati morfološke karakteristike identifikovanih minerala na petrografskim snimcima (Volkov-Husović i ostali 2005, Dostanić i ostali 2009). Korišćenjem pogodnog softverskog paketa, sa dobrim alatima moguće je za svaki mineral u strukturi gline ili keramičkog proizvoda odrediti parametre kao što su: površina mineralnog zrna i njegove dimenzije, fraktalna dimenzija, zakrivljenost i veliki broj parametara koji se odnose na optičku gustinu identifikovanog objekta (zrna minerala). Na ovaj način praktično se vrši selekcija obeležja koji bi mogli biti nosioci informacija o poreklu i sirovine i keramičkih predmeta, kao i tehnologije izrade.



### **2.3. Metode prepoznavanja oblika primenjene u arheometrijskim istraživanjima**

*U ovom poglavlju, dat je teorijski prikaz raspoloživih metoda prepoznavanja oblika. Načinjen je kratak osvrt na značaj primene ovih metoda u arheometriji. Definisana je skup arheometrijskih podataka i objašnjena multivarijantna priroda ovog skupa. Naglašeno je kakvi se rezultati mogu očekivati primenom metoda prepoznavanja oblika na arheometrijski skup podataka. Ukratko su predstavljene mogućnosti i primeri korišćenja pojedinačnih metoda. Poseban akcenat je stavljen na prikaz metoda prepoznavanja oblika korišćenih za klasifikaciju keramičkih artefakata u cilju određivanja porekla.*

Korišćenje metoda prepoznavanja oblika za analizu arheometrijskih podataka danas se smatra rutinskim postupkom u svakoj obuhvatnijoj analizi predmeta kulturnog nasleđa. Kao što se nijedno savremeno, šire i ozbiljnije izučavanje predmeta kulturnog nasleđa ne može zamisliti bez neke fizičko-hemijske analize, tako se ni izvođenje zaključaka na osnovu ovih analiza ne može smatrati celovitim bez ispitivanja primenom neke od metoda prepoznavanja oblika. Svako pojedinačno merenje izvedeno na nekom predmetu kulturnog nasleđa, karakteriše se skupom obeležja (promenljivih) koja mogu biti različitog tipa:

- § kategorisana (pripadaju određenoj kategoriji),
- § opisna (malo, srednje, veliko),
- § celobrojna vrednost (broj pojavljivanja određene pojave) ili
- § realna vrednost (koncentracija određenog hemijskog elementa).

Arheometrijski podaci, bez obzira na način njihovog generisanja (tj. primenjene metode za analizu), po svojoj prirodi su multivarijantni, tj. svako merenje se karakteriše skupom više obeležja. Ako se na primer, arheometrijski skup podataka formira od podataka dobijenih fizičko-hemijskim analizama tela keramike svako pojedinačno merenje biće opisano sa najmanje deset, a najčešće do dvadeset promenljivih kojima se definiše hemijski sastav keramike. S druge strane, multivarijantni karakter imaju i podaci čisto arheološke prirode nastali kvantifikacijom tipoloških i stilističkih karakteristika nekog keramičkog predmeta (oblik, dimenzije, namena, način izrade, ukrašavanje i slično, Vuković 2010). Suštinske informacije koje nose ovakvi multivarijantni podaci mogu da budu neuočljive (sakrivene) zbog nemogućnosti sagledavanja njihovih povezanosti i međusobnih uticaja usled brojnosti obeležja i kao takve zahtevaju tretman metodama prepoznavanja oblika. Izbor određene (ili više njih) metode za obradu ovakvih podataka ponajviše zavisi od prirode objekata kulturnog nasleđa koji se izučavaju i tesno je povezan sa zaključkom koji treba izvesti iz ovakve analize, nedvosmisleno smeštenim u arheološki kontekst. Informacije generisane određenom analitičkom tehnikom, kao ni kombinovanje informacija dobijenih različitim analitičkim tehnikama, nisu prepreka za primenu određene metode prepoznavanja oblika.

U zavisnosti od prirode problema koji se izučava primenjuju se ili metode obučavanja bez nadgledanja (nesupervizijsko obučavanje, eng. *unsupervised methods*) ili metode obučavanja sa nadgledanjem (supervizijsko obučavanje, eng. *supervised methods*), mada ima primera i njihovog kombinovanja. Izbor pogodne metode nije određen samo skupom koji će se analizirati, njegovom strukturom i osobinama, već i namenom rezultata koji će se nakon obučavanja dobiti. U slučajevima kada treba ispitati prethodno nepoznatu strukturu u jednom arheometrijskom skupu podataka koriste se metode obučavanja bez nadgledanja, dok se tehnike sa nadgledanjem koriste ako je potrebno iskoristiti ili sačuvati prethodno znanje o strukturi (izraženoj kroz

postojanje grupa) unutar početnog skupa podataka (Baxter 2006). Rezultati primene multivarijantne analize mogu se u najopštijem posmatrati kao:

- § redukcija dimenzija,
- § ekstrakcija obeležja i
- § klasifikacija.

Ako je početni skup podataka formiran od velikog broja promenljivih (kakvi su recimo skupovi formirani od koncentracije hemijskih elemenata u strukturi keramičkih predmeta koje su određene korišćenjem neutronske aktivacione analize) potrebno je iskoristiti metode multivarijantne analize za redukciju dimenzija. Proces redukcije dimenzija obično je usmeren na smanjenje broja međusobno jako korelisanih promenljivih na manji broj nekorelisanih promenljivih koji će učiniti mogućom vizuelizaciju početnog skupa. Primena određene tehnike multivarijantne analize za redukciju dimenzija zavisi i od toga šta je cilj same analize, tj. da li je to ispitivanje strukture unutar početnog skupa podataka, klasifikacija, ili ekstrakcija obeležja. Ekstrakcija obeležja i/ili klasifikacija mogu, ali i ne moraju da budu rezultat redukcije dimenzija, i za posledicu imaju utvrđivanje međusobne povezanosti i uticaja pojedinačnih obeležja u početnom skupu na strukturu skupa (klasifikaciju). Klasifikacija može biti direktna posledica redukcije dimenzija, ali može biti i unapred zahtevana. Širina i raznolikost arheometrijskih problema koji se rešavaju metodama prepoznavanja oblika diktiraju potrebu da se koristi većina ovih metoda, odvojeno ili zajedno, sa jednim ili više zajedničkih ciljeva. Može se reći da je trenutno široko prihvaćeno stanovište da nema jedne statističke procedure koja će samostalno i u potpunosti rešiti kompleksne multivarijantne probleme u analizi skupova arheometrijskih podataka (Jain i ostali 2000).

Najšire i uobičajno korišćena tehnika bez nadgledanja je analiza glavnih komponenti, PCA (eng. *principal component analysis*) koja je poznata i kao Karhunen–Loeve (KL) transformacija. Metoda se najčešće primenjuje za redukciju dimenzija, kada se vrši linearna transformacija početnog n-dimenzionog prostora u novi prostor značajno manjih dimenzija, koji je određen maksimalnom varijansom unutar početnog skupa. Kako je rezultat redukcije dimenzija primenom PCA metode generisanje novih, međusobno nekorelisanih promenljivih koje su linearna kombinacija originalnih, ova metoda se može koristiti i kao metoda za ekstrakciju obeležja. Na ovaj način omogućeno je utvrđivanje odnosa između pojedinačnih početnih promenljivih koji nisu bili očigledni u mnoštvu informacija sadržanih u početnom multivarijantnom skup. Potencijalna mogućnost za klasifikaciju je posledica redukcije dimenzija pomoću PCA, jer je priroda ove metode bez nadgledanja, tj. ne koristi se znanje o prethodnoj strukturi skupa. Ako se ispostavi da postoji mogućnost klasifikacije podataka koji su obrađeni primenom PCA tehnike, generiše se još jedan kvalitet u interpretaciji dobijenih rezultata. Postoji mogućnost i da se rezultati klasifikacije utvrđeni primenom recimo klusterske analize provere i potvrde korišćenjem PCA analize. PCA analiza je primenjena gotovo u svim oblastima koje su predmet arheometrijskih studija. Neki zanimljivi primeri su primena PCA analize na procentni sastav amino kiselina u uzorcima koja je omogućila identifikaciju proteinskih veziva na Vizantijskim zidnim slikama Protaton crkve iz 1295. godine na Atosu u Grčkoj (Sister Daniilia i ostali 2007). Rezultati FTIR analiza vršenih u procesu određivanja kristaliničnosti ostataka kostiju koje su pretrpele spaljivanje su dodatno analizirani korišćenjem PCA da bi se shvatile promene u kostima nastale usled delovanja visoke temperature (Thompson i ostali 2013). Detaljna matematička struktura PCA analize prikazana je u prilogu A.

Klusterska analiza (eng. *cluster analysis*) je generičko ime za grupu matematičkih multivarijantnih metoda koje se mogu koristiti za

utvrđivanje sličnosti i/ili razlika između objekata i/ili promenljivih u skupu i njihovo grupisanje i klasifikaciju. Drugim rečima klasterska analiza predstavlja pronalaženje grupa objekata unutar originalnog skupa podataka takvih da je:

§ svaka grupa - klaster homogena (kompaktna) u odnosu na određene promenljive, tj. da su svi objekti u jednoj grupi slični jedni drugima i

§ svaka grupa - klaster različita od druge u odnosu na te iste promenljive, tj. da se objekti u jednoj grupi moraju razlikovati od objekata u drugoj grupi.

Osim za utvrđivanje klasterske strukture početnog skupa podataka ova analiza može poslužiti kod planiranja eksperimenta, provere hipoteze i kao dopuna PCA analizama. Termin klaster se koristi za “koncentrisanu” grupu i obično se odnosi na objekte (u prostoru promenljivih), ali se može odnositi i na promenljive – obeležja (u prostoru koji je određen objektima). Klasteri opisuju grupu objekata, koji su međusobno slični, a različiti u odnosu na objekte van te grupe. Postoji nekoliko tipova klastera:

§ dobro razdvojeni klasteri (eng. *well-separated*),

§ klasteri zasnovani na centru (eng. *center-based*),

§ klasteri zasnovani na susedstvu (eng. *contiguous*),

§ klasteri zasnovani na gustini (eng. *density-based*),

§ klasteri zasnovani na grafovima,

§ konceptualni klasteri - rezultat su klasterovanja na osnovu zajedničkih osobina (eng. *conceptual*) i

§ klasteri opisani ciljnom funkcijom (eng. *described by an objective function*)

Klasterovanje predstavlja postupak utvrđivanje klasterske strukture početnog skupa podataka i može biti hijerarhijsko (formira se skup

“ugnježenih” klastera organizovan u obliku hijerarhijskog drveta) ili particiono (vrši se podela skupa podataka u nepreklapajuće podskupove takve da je svaki podatak tačno u jednom podskupu, slika 2.3.1, <http://poincare.matf.bg.ac.rs/~nenad/ipdr.2011/9.klasterovanje.pdf>).

Hijerarhijska klaster analiza zasnovana je na algoritmu koji formira klaster po hijerarhiji tako da je u svakom sledećem nivou broj klastera manji za jedan. Ova metoda analize se najčešće prikazuje grafički, dendogramom (slika 2.3.1). Postoje dva osnovna tipa ove metode:

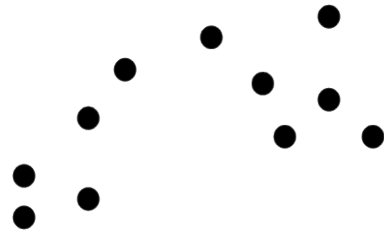
- § aglomerativna (rastuća, u kojoj svaki objekat započinje kao zasebni klaster, broj klastera se u sledećim koracima smanjuje dok se svi na kraju ne grupišu u jedan veliki klaster)
- § divizivna (opadajuća, koja započinje jednim velikim klasterom koji sadrži sve objekte, a u sledećim koracima se deli).

Za razliku od hijerarhijske, u particionoj klaster analizi broj klastera ( $k$ ) i njihovi centriodi moraju biti poznati *a priori*. Početni klasteri formiraju se uklapanjem svih preostalih  $n - k$  objekata najbližem centroidu. Pored pomenutih metoda primenu su našle i fazi klaster analiza (svaki objekat je koeficijentom pripadnosti povezan sa svakim određenim klasterom) i klaster analiza zasnovana na modelu (predpostavlja se da različite klaster opisuju različiti modeli).

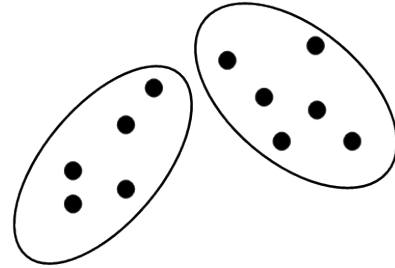
Rezultat primene bilo koje od navedenih klasterskih analiza je svrstavanje objekata početnog skupa u klaster, uz pretpostavku da su objekti unutar jednog klastera međusobno sličnih osobina, a različitih u odnosu na objekte koji pripadaju drugim klasterima. Iz ovoga sledi da:

- § rastojanja između objekata moraju biti definisana i za ovu namenu definisana je mera sličnosti i
- § uspešnost klasterovanja mora biti validovana. Kako je informacija o strukturi početnog skupa nepoznata

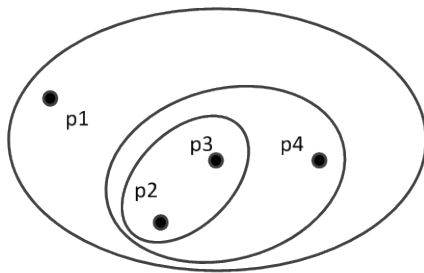
rezultujući broj klastera nastao u procesu klasterske analize mora biti na neki način potvrđen.



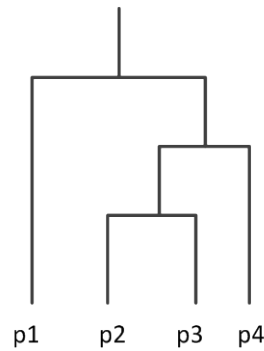
Početni podaci



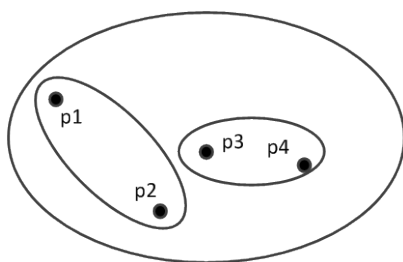
Particiono klasterovanje



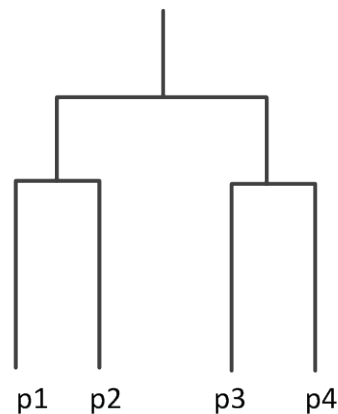
Tradicionalno hijerarhijsko klasterovanje



Tradicionalni dendrogram



Netradicionalno hijerarhijsko klasterovanje



Netradicionalni dendrogram

Slika 2.3.1. Klasterovanje multivarijantnih podataka

Najčešće korišćena rastojanja kao mera sličnosti u klusterskoj analizi su:

- § Euklidsko rastojanje (eng. *Euclidean distance*),
- § Menhetn rastojanje (eng. *Manhattan* ili *City block distance*),
- § Rastojanje Minkovskog (eng. *Minkowski distance*),
- § Korelacioni koeficijent sličnosti ( $\cos \alpha$ ),
- § Sličnost vektora ( $S_{AB}$ ) i
- § Mahalanobisovo rastojanje (eng. *Mahalanobis distance*).

Klusterska analiza nije tehnika statističkog zaključivanja u smislu pretpostavki odnosa uzorak - populacija, nego objektivna metoda za klasifikaciju. Zato ona nije opterećena pretpostavkama o normalnosti, linearnosti i homogenosti varijansi. Klusterska analiza je osetljiva na izbor promenljivih koje su relevantne za objekat istraživanja i na one objekte koji se razlikuju od ostalih (tzv. autlajere, eng. *outliers*). pa je reprezentativnost uzorka od velike važnosti. Pored toga, zbog velikog broja podmetoda, klusterska analiza je, možda više nego ijedna druga multivarijatna analiza, zavisna od izbora samog analitičara. Interpretirati klustere znači znati objasniti njihov sadržaj, tj. biti u mogućnosti opisati klaster ili ga jednoznačno definisati. Slično kao i PCA i klusterska analiza je široko primenjivana u analizi arheometrijskih skupova podataka. Za ilustraciju naveden je najzanimljiviji primer. Podaci dobijeni ispitivanjem drevnih namirnica, rezanaca, kolača i prosa, koji su iskopani iz Subeixi groblja (Turpan, Xinjiang oblasti u Kini, a koji su datovani na 500-300 godina pre nove ere) obrađeni su metodom klusterske analize za utvrđivanje drevnog načina pripreme hrane (Gong Y i ostali 2011).

Manje zastupljene u praktičnoj primeni metode obučavanja bez nadgledanja (i iz tog razloga samo spomenute, bez detaljnijeg opisa) su multidimenziono skaliranje (eng. *multidimensional scaling, MDS*), samoorganizujuće mape (eng. *self-organizing map, SOM*) i analiza



nezavisnih komponenti (eng. *independent component analysis, ICA*). Od metoda sa nadgledanjem za analizu arheometrijskih skupova podataka najčešće se koristi Fišerova linearna diskriminantna analiza (fLDA), dok se primena drugih metoda sreće sporadično. Od njih svakako treba spomenuti kvadratnu diskriminantnu analizu (QDA), primenu neuralnih mreža, fazi (eng. *fuzzy*) logike, *support vector machine learning* (SVM).

Iako je klasifikacija primarna namena metoda sa nadgledanjem one mogu da se koriste i za redukciju dimenzija i ekstrakciju obeležja. Analize primenom metoda sa nadgledanjem, uz *a priori* poznatu ili pretpostavljenu klasifikaciju, gotovo obavezno rezultiraju grafičkim reprezentovanjem podataka (u obliku 1D, 2D ili 3D grafika) koji na diskriminantan način prikazuju pretpostavljeno razdvajanje, što je moguće jasnije. Rezultujuća diskriminantna funkcija može biti iskorišćena i za identifikaciju promenljivih koje su odgovorne za očuvanje pretpostavljene separabilnosti između klasa. Projektovanjem diskriminantne funkcije (klasifikatora) ova vrsta analize može da se iskoristi i za predikciju pripadnosti objekata koji nisu korišćeni u procesu obučavanja. Iako u prvi mah može da izgleda zbunjujuće, navod u referentnoj publikaciji (Baxter 2006) o praktičnoj primeni metoda sa nadgledanjem u svrhu predikcije pripadnosti klasi pomoću koje je u procesu obučavanja razvijeno pravilo predikcije, a koji glasi “*This usage is less common in archaeometry but it provides the motivation for several of the methods to be discussed...*”, realnost je takva da je većina publikacija ostala uskraćena za širu primenu ovakvog pristupa. Gotovo da nema publikovanih rezultata u kojima je

- § izvršena kritička procena uspešnosti diskriminantne analize,
- § kvantifikovana mera te uspešnosti i/ili
- § izvršeno testiranje korišćenjem pravila razvijenog u procesu obučavanja.

Detaljniji matematički opis metode sa nadgledanjem koja je korišćena u ovom radu dat je u poglavlju 4.2. Diskusija je ograničena na primenu linearne diskriminantne analize. Ispitivanje mogućnosti primene drugih metoda sa nadgledanjem u mnogome bi prevazišlo okvire i cilj ovog rada.

Arheološki keramički predmeti su svojevrsni svedoci vremena u kome su nastali. Njihova postojanost tokom vremena pruža nam zapis o mnogim aspektima života naših predaka. Čitanje ovog zapisa biće uspešnije i sadržajnije ukoliko se analitičke činjenice interpretiraju i potvrde u arheološkom kontekstu. Metode prepoznavanja oblika nisu samo jedan olakšavajući korak u ovoj interpretaciji, već njihovi rezultati mogu značajno da pomere granice saznanja. Rezultat primene neke pogodne analitičke tehnike za analizu keramičkih artefakata može biti informacija o:

- § hemijskom sastavu tela keramike,
- § mineraloškoj strukturi tela keramike,
- § vrsti i načinu glaziranja ili
- § vrsti pigmenata korišćenih za dekoraciju

Ovakve informacije su sadržajne, ali samostalno prikazane nisu informativne u arheološkom kontekstu. Da li je na primer, analizirani predmet lokalno proizveden ili je predmet trgovine, nisu informacije koje se generišu analitičkim postupkom, ali su svakako njegova posledica. Odgovor na prethodno postavljeno arheološko pitanje je posledica analize analitičkih podataka (o na primer hemijskom sastavu ili mineraloškoj strukturi keramike) metodama prepoznavanja oblika. Analiziranje podataka o arheološkoj keramici koji su generisani raznovrsnim analitičkim postupcima vrši se kako primenom metoda sa nadgledanjem tako i metodama bez nadgledanja. Rezultati obrade analitičkih podataka mogu se vrlo opšte grupisati u sledeće kategorije

(mada je granicu teško podvući, jer je najčešće interpretacijom rezultata može stići do više zaključaka):

- § izučavanje porekla,
- § kombinovano izučavanje porekla i tehnologije izrade,
- § karakterizacija i klasifikacija i
- § specifični zaključci.

Izučavanje porekla predstavlja analizu arheometrijskih podataka sa ciljem utvrđivanja porekla analizirane keramike, i može se realizovati analizom podataka kako arheološke prirode tako i podataka o sastavu ili strukturi materijala. Praktično se, utvrđivanje porekla na osnovu karakteristika materijala zasniva na upoređivanju sa karakteristikama lokalnih izvora sirovina ili upoređivanju sa predmetima dobro defisanog porekla, mada može biti i posledica klasifikacije zasnovane na utvrđenim karakteristikama (Speakman i ostali 2011, Taylor i ostali 1997, Burley i ostali 2010, Montana i ostali 2011, Xu i ostali 2001). Najčešće se kao posledica izučavanja karakteristika materijala od kojih su napravljeni keramički predmeti u sklopu proučavanja tehnologija izrade može istovremeno utvrditi i njihovo poreklo (Papachristodoulou i ostali 2010, Hall 2004, Terenzi i ostali 2010, Tite 2008, Frankel i ostali 2012). Rezultat analize arheometrijskih podataka o karakteristikama materijala može biti i utvrđivanje svojstava lokalne proizvodnje i na taj način njene karakterizacije i klasifikacije (Bakraji i ostali 2010, Padilla i ostali 2006, Freitas i ostali 2010, Morgenstein i ostali 2005, Remolá i ostali 1993). Na osnovama ovakvih istraživanja mogu se izvući zaključci o putevima trgovine (Hall i ostali 2002) ili pak postići neki sasvim specifični rezultati, kao što je na primer posledično datovanje (Guoxi i ostali 2009, Sánchez i ostali 2002) ili pridruživanje ispitivanih keramičkih predmeta određenom kulturnom sloju (Carrero i ostali 2010).

## 2.4. Neuralne mreže radijalne osnove primenjene za selekciju obeležja

*U ovom poglavlju, ukratko su prikazane teorijske osnove o neuralnim mrežama radijalne osnove, dovoljne da se osvetli njihova primena u spektrometriji. Neuralne mreže radijalne osnove u okviru ove disertacije iskorišćene su za izdvajanje obeležja iz EDXRF spektara.*

Neuralna mreža radijalne osnove, RBF neuralna mreža (eng. *Radial Basis Function Neural Network*, Moody i ostali 1989, Wasserman 1993) se sastoji od tri sloja:

- § ulaznog,
- § skrivenog i
- § izlaznog (slika 2.4.1 a),

i projektovana je da izvrši ulazno - izlazno preslikavanje koje se postiže učenjem mreže na primerima, parovima ulaza i izlaza ( $x$ ,  $y$ ) skupa za obučavanje. Za obučavanje ovakvih neuralnih mreža najčešće se koriste hibridni algoritmi:

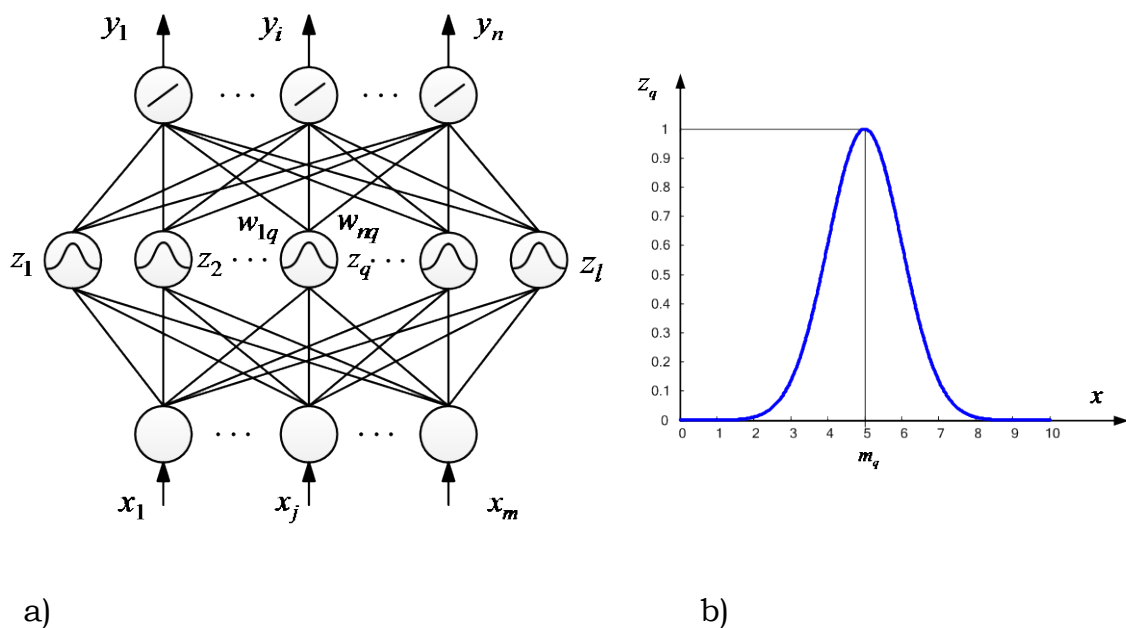
- § obučavanje bez nadgledanja za skriveni sloj i
- § obučavanje sa nadgledanjem za izlazni linearni sloj neurona.

Ulazni vektor  $X$  će „aktivirati“ radijalne funkcije, tj. neurone u skrivenom sloju, čiji se centri nalaze u blizini ulaznog vektora  $X$ , u zavisnosti od udaljenosti od pobudnog signala,  $X$ . Izlaz neuralne mreže će zatim biti formiran kao ponderisana suma izlaza skrivenog sloja neurona.

Aktivacione funkcije skrivenog sloja su funkcije radijalne osnove (najčešće se koriste normalizovane Gausove funkcije, slika 2.4.1 b), definisane izrazom:

$$z_q = \frac{R_q(X)}{\sum_k R_k(X)} = \frac{\exp\left(-\frac{|X - m_q|^2}{2\sigma_q^2}\right)}{\sum_k \exp\left(-\frac{|X - m_k|^2}{2\sigma_k^2}\right)} \quad 2.4.1$$

gde je  $X$  - ulazni  $n$  - dimenzioni vektor,  $z_q$  - izlaz  $q$  - tog neurona u skrivenom sloju,  $m_q$  i  $\sigma_q$  su srednja vrednost i varijansa Gausove funkcije aktivacije  $q$ -tog neurona u skrivenom sloju, respektivno.



Slika 2.4.1. a) Neuralna mreža radijalne osnove sa  $m$  ulaza,  $l$  čvorova u skrivenom sloju i  $n$  izlaza;  
 b) Normalizovana Gausova funkcija (npr.  $m_q = 5$ ,  $\sigma_q = 1$ ).

Za određivanje centara Gausovskih funkcija aktivacije  $m_q$ , za svaki čvor, kao i širine rasipanja  $\sigma_q$  ( $q = 1, 2, \dots, l$ , gde  $l$  predstavlja ukupan broj čvorova u skrivenom sloju) korišćeno je obučavanje bez nadgledanja. Odgovarajuća vrednost centara  $m_q$  može se odrediti nekom od mnogobrojnih tehnika:

- § tehnika vektorske kvantizacije (eng. *vector quantization*),
- § konkurentnim obučavanjem (eng. *competitive learning rules*),
- § primenom Kohonenovog pravila obučavanja, ili
- § obučavanjem metodom ortogonalnih najmanjih kvadrata (eng. *orthogonal least squares learning algorithm for radial basis function networks*, Chen i ostali 1991) koja je i korišćena u radu.

Varijansa Gausove funkcije u skrivenom sloju,  $\sigma_q$ , određena je karakteristikama instrumenta i postavljenim eksperimentalnim uslovima. U odnosu na proces obučavanja neuralne mreže ta vrednost je unapred određena i smatra se konstantnom.

Izlaz sa neuralne mreže dobija se kao ponderisana suma izlaza prethodnog sloja, i realizovan je linearnom funkcijom aktivacije u izlaznom sloju neurona oblika:

$$y_i = a_i \left( \sum_{q=1}^l w_{iq} z_q + \theta_i \right) \quad 2.4.2$$

gde je sa  $a_i$  (.) označena funkcija aktivacije, i kao što je rečeno, ona je u najvećem broju slučajeva linearna. Sa  $w_{iq}$  su označena pojačanja između ulaza  $i$ -tog i  $q$ -tog neurona dok  $\theta_i$  predstavlja prag (eng. *bias*). Pojačanja u izlaznom sloju dobijena su primenom obučavanja sa nadgledanjem, tehnikom delta obučavajućeg pravila (eng. *delta learning rule*).

Neuralne mreže radijalne osnove korišćene su za određivanje parametara pikova u EDXRF spektru, tj. izdvajanje obeležja od značaja. Ovo je postignuto aproksimacijom date funkcije spektra uklapanjem većeg broja različito parametrizovanih funkcija radijalnog tipa (Gausovih funkcija). Generisane vrednosti pojačanja od skrivenog ka izlaznom sloju,  $w_{iq}$ , predstavljaju selektovana obeležja iz spektra, tj. parametre koji će biti analizirani u smislu nosilaca informacije o poreklu (nakon redukcije dimenzija, biće iskorišćeni za klasifikaciju). Čitav postupak selekcije obeležja korišćenjem neuralnih mreža omogućava automatizaciju procesa obrade spektara i značajno skraćuje vreme potrebno da se spektar obradi u poređenju sa klasičnim pristupom (Kvaščev i ostali 2012).

Za procenu efikasnosti aproksimacije spektra neuralnim mrežama sa radijalnom osnovom korišćeni su parametri prikazani u tabeli 2.4.1.

Tabela 2.4.1. Parametri za ocenu efikasnosti aproksimacije EDXRF spektra neuralnom mrežom radijalne osnove.

<b>Mera</b>	<b>Izraz</b>
Srednja kvadratna greška, <i>RMSE</i>	$RMSE = \left[ \overline{(C_p - C_o)^2} \right]^{1/2}$
Srednja apsolutna greška, <i>MAE</i>	$MAE = \frac{1}{n} \sum  C_p - C_o $
Indeks slaganja, <i>IA</i>	$IA = 1 - \frac{\overline{(C_p - C_o)^2}}{\left[ \overline{ C_p - \overline{C_o} } + \overline{ C_o - \overline{C_p} } \right]^2}$

## LITERATURA

- Adriaens A, 2004 Dowsett M: Electron microscopy and its role in cultural heritage studies, in: Janssens K, Van Grieken R (Eds.), *Non-destructive Microanalysis of Cultural Heritage Materials*. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Akyuz S, 2008 Akyuz T, Basaran S, Bolcal C, Gulec A: Analysis of ancient potteries using FT-IR, micro-Raman and EDXRF spectrometry. *Vib Spectrosc*, 48: 276–280.
- Bagnasco MB, 2001 Casoli A, Chiari G, Compagnoni R, Davit P, Mirti P: Mineralogical and chemical composition of transport amphorae excavated at Locri Epizephiri (southern Italy). *J Cult Herit*, 2, (3): 229-239.
- Bakraji EH, 2010 Itlas M, Abdulrahman A, Issa H, Abboud R: X-ray fluorescence analysis for the study of fragments pottery excavated at Tell Jendares site, Syria, employing multivariate statistical analysis. *J Radioanal Nucl Ch*, 285: 455–460.
- Baxter MJ 2006 A Review of Supervised and Unsupervised Pattern Recognition in Archaeometry. *Archaeometry*, 48, (4): 671-694.
- Braun GV 2012 Petrography as a technique for investigating Iroquoian ceramic production and smoking rituals. *J Archaeol Sci*, 39, (1): 1-10.
- Burley DV, 2010 Dickinson WR: Among Polynesia's first pots. *J Archaeol Sci*, 37: 1020–1026.



- Cariati F, Fermo P, Gilardoni S, Galli A, Milazzo M: A new approach for archaeological ceramics analysis using total reflection X-ray fluorescence spectrometry. *Spectrochim Acta B*, 58: 177–184. 2003
- Carrero JA, Goienaga N, Fdez-Ortiz De Vallejuelo S, Arana G, Madariaga JM: Classification of archaeological pieces into their respective stratum by a chemometric model based on the soil concentration of 25 selected elements. *Spectrochim Acta B*, 65: 279–286. 2010
- Centeno SA, Williams VI, Little NC, Speakman RJ: Characterization of surface decorations in Prehispanic archaeological ceramics by Raman spectroscopy, FTIR, XRD and XRF. *Vib Spectrosc*, 58: 119–124. 2012
- Chen S, Cowan CFN, Grant PM: Orthogonal Least Squares Learning Algorithm for Radial Basis Function Networks. *IEEE T on Neural Networ*, 2 (2): 302–309. 1991
- Chi Z: The Discovery of Early Pottery in China. *Documenta Praehistorica*, XXIX: 29-35. 2002
- Clark RJH: Raman microscopy as a structural and analytical tool in the fields of art and archaeology. *J Mol Struct*, 834–836: 74–80. 2007
- Day PM, Kiriati E, Tzolakidou A, Kilikoglou V: Group Therapy in Crete: A Comparison between Analyses by NAA and Thin Section Petrography of Early Minoan Pottery. *J Archaeol Sci*, 26: 1025-1036. 1999
- Dias MI, Prudencio MI: Neutron Activation Analysis of Archaeological Materials: an Overview of the ITN NAA Laboratory, Portugal. *Archaeometry*, 49, (2): 383–393. 2007
- Dostanić J, Dimitrijević M, Jančić – Heinemann R, Volkov – Husović T: Primena analize slike u karakterizaciji materijala. RIC grafičkog inženjerstva. TMF, Beograd. 2009

- Eramo G, 2004 Laviano R, Muntoni IM, Volpe G: Late Roman cooking pottery from the Tavoliere area (Southern Italy): raw materials and technological aspects. *Journal of Cultural Heritage*, 5, (2): 157-165.
- Felts WM 1942 A Petrographic Examination of Potsherds form Ancient Troy. *American Journal of Archaeology*, 46: 237-244.
- Fermo P, 2008 Delnevo E, Lasagni M, Polla S, de Vos M: Application of chemical and chemometric analytical techniques to the study of ancient ceramics from Dougga (Tunisia). *Microchem J*, 88: 150–159.
- Frahm E, 2013 Doonan CPR: The technological versus methodological revolution of portable XRF in archaeology. *J Archaeol Sci*, 40, 1425-1434.
- Frankel D, 2012 Webb JM: Pottery production and distribution in prehistoric Bronze Age Cyprus. An application of pXRF analysis. *J Archaeol Sci*, 39: 1380–1387.
- Freitas PR, 2010 Calza C, Lima AT, Rabello A, Lopes TR: EDXRF and multivariate statistical analysis of fragments from Marajoara ceramics. *X-Ray Spectrom*, 39: 307–310.
- Glascock D, 2003 Neff H: Neutron activation analysis and provenance research in archaeology. *Meas Sci Technol*, 14: 1516–1526.
- Gong Y, 2011 Yang Y, Ferguso DK, Tao D, Li W, Wang C, Lü E, Jiang H: Investigation of ancient noodles, cakes, and millet at the Subeixi Site, Xinjiang,China. *J Archaeol Sci*, 38: 470-479.
- Guoxi X, 2009 Songlin F, Xiangqian F, Yongqiang L, Hongye H, Yanqing W, Jihao Z, Lingtong Y, Li L: The Dating of Ancient Chinese Celadon by INAA and Pattern Recognition Methods. *Archaeometry*, 51: 682–699.
- Hall M, 2002 Minyae S: Chemical Analysis of Xiong-nu Pottery: A Preliminary Study of Exchange and Trade on the Inner Asian Steppes. *J Archaeol Sci*, 2: 135–144.

- Hall ME 2004 Pottery production during the Late Jomon period: insights from the chemical analyses of Kasori B pottery. *J Archaeol Sci*, 31: 1439–1450.
- Hein A, 2012 Kilikoglou V: *ceraDAT*—Prototype of a Web-based Relational Database for Archaeological Ceramics. *Archaeometry*, 54: 230–243.
- Hill DV, 2004 Speakman RJ, Glascock DM: Chemical and Mineralogical Characterization of Sasanian and Early Islamic Glazed Ceramics from the Deh Luran Plain, Southwestern Iran. *Archaeometry*, 46, (4): 585–605.
- Iñáñez JG, 2010 BellucciJJ, Rodríguez-Alegria E, Ash R, McDonough W, Speakman RJ: Romita pottery revisited: a reassessment of the provenance of ceramics from Colonial Mexico by LA-MC-ICP-MS. *J Archaeol Sci*, 37: 2698–2704.
- Jain AK, 2000 Duin RPW, Mao J: Statistical Pattern Recognition: A Review. *IEEE Pattern Anal*, 22, (1): 4–37.
- Karasik A, 2011 Smilansky U: Computerized morphological classification of ceramics. *J Archaeol Sci*, 38: 2644–2657.
- Kos M, 2011 Šmit Ž: PIXE-PIGE analysis of 18th and early 19th century creamware from Slovenia and Northern Italy. *J Cult Herit*, 12: 236–242.
- Kvašček G, 2012 Gajić-Kvašček M, Đurović Ž: Radial Basis Function Network Based Feature Extraction for Improvement the Procedure of Sourcing Neolithic Ceramics. Proceedings of the 11th NEUREL, 95–100.
- Lepsius GR 1890 Greichische Marmorsstudien, Berlin.
- Li B, 2005 Greig A, Zhao J, Collerson KD, Quan K, Meng Y, Ma Z: ICP-MS trace element analysis of Song dynasty porcelains from Ding, Jiexiu and Guantai kilns, north China. *J Archaeol Sci*, 32, (2): 251–259.

- Li L, 2012 Xie G, Feng S, Feng X, Yan L, Zhu J, Li Y, Han H: Provenance research by INAA on ancient Chinese white porcelain excavated from the Maojiawan site of Beijing. *J Archaeol Sci*, 40, 1449-1453.
- Mason RB 1995 Criteria for the Petrographic Characterization of Stonepaste Ceramics. *Archaeometry*, 37, 307–321.
- Minc LD, 2011 Sherman RJ: Assessing Natural Clay Composition in the Valley of Oaxaca as a Basis for Ceramic Provenance Studies. *Archaeometry*, 53, 285–328.
- Montana G, 2011 Ontiveros MAC, Polito AM, Azzaro E: Characterisation of clayey raw materials for ceramic manufacture in ancient Sicily. *Appl. Clay Sci*, 53: 476–488.
- Morgenstein M, 2005 Redmount CA: Using portable energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF) analysis for on-site study of ceramic sherds at El Hibeh, Egypt. *J Archaeol Sci* 32: 1613–1623.
- Moody J, 1989 Darken C: Fast learning in networks of locally-tuned processing units. *Neural Comput*, 1: 281-294.
- Neff H 2012 Comment: Chemical and Mineralogical Approaches to Ceramic Provenance Determination. *Archaeometry*, 54, 244–249.
- Padilla R, 2006 Van Espen P, Godo Torres PP: The suitability of XRF analysis for compositional classification of archaeological ceramic fabric: A comparison with a previous NAA study. *Anal Chim Acta*, 558: 283–289.
- Papachristodoulou C, 2010 Gravani K, Oikonomou A, Ioannides K: On the provenance and manufacture of red-slipped fine ware from ancient Cassope: evidence by X-ray analytical methods. *J Archaeol Sci*, 37: 2146–2154.

- Peacock DPS 1968 A Petrological Study of Certain Iron Age Pottery from Western England. *Proceedings of the Prehistoric Society*, 34: 414-427.
- Peterson S 2009 Thin-Section Petrography of Ceramic Materials. INSTAP Academic Press Philadelphia, Pennsylvania.
- Pizarro C, 2012 Perez-del-Notario N, Saenz-Gonzalez C, Rodriguez-Tecedor S, Gonzalez Saiz JM: Matching past and present ceramic production in the Banda area (Ghana): improving the analytical performance of neutron activation analysis in archaeology using multivariate analysis techniques. *Archaeometry*, 54: 101–113.
- Quinn P, 2011 Rout D, Stringer L, Alexander T, Armstrong A, Olmstead S: Petrodatabase: an on-line database for thin section ceramic petrography. *J Archaeol Sci*, 38, (9): 2491-2496.
- Reedy CL 2008 Thin – Section Petrography of Stone and Ceramic Cultural Materials, Plymouth, UK.
- Remolá JA, 1993 Larrechi MS, Rius FX: Chemometric characterization of 5th century A.D. amphora producing centres in the Mediterranean. *Talanta*, 40: 1749–1757.
- Riley JA 1979 The Petrological Investigation of Roman and Islamic Ceramics from Cyrenaica. *Libyan Studies*, 10: 35-46.
- Riley JA, 1980 Peacock DPS and Renfrew AC: The Petrological Characterisation of Ceramics from Knossos and Mycenae. *Revue d'Archeometrie*. 3: 245-250.
- Sánchez S, 2002 Bosch F, Gimeno JV, Yusá DJ, Doménech A: Study and dating of medieval ceramic tiles by analysis of enamels with atomic absorption spectroscopy, X-ray fluorescence and electron probe microanalysis. *Spectrochim Acta B*, 57: 689–700.

- Shepard AO 1942 Rio Grande Glaze Paint Ware: A Study Illustrating the Place of Ceramic Technological Analysis in Archaeological Research. Carnegie Institution of Washington Publication, 528, Washington DC.
- Sister Daniilia, 2007 Tsakalof A, Bairachtari K, Chryssoulakis Y: The Byzantine wall paintings from the Protaton Church on Mount Athos, Greece: tradition and science. *J Archaeol Sci*, 34: 1971-1984.
- Smith GD, 2004 Clark RJH: Raman microscopy in archaeological science. *J Archaeol Sci*, 31: 1137-1160.
- Speakman RJ, 2011 Little NC, Creel D, Miller MR, Iñáñez JG: Sourcing ceramics with portable XRF spectrometers? A comparison with INAA using Mimbres pottery from the American Southwest. *J Archaeol Sci*, 38: 3483-3496.
- Stahl AB, 2008 Cruz MD, Neff H, Glascock MD, Speakman RJ, Giles B, Smith L: Ceramic production, consumption and exchange in the Banda area, Ghana: Insights from compositional analyses. *J Anthropol Archaeol*, 27: 363-381.
- Stewart JD, 1990 Fralick P, Hancock RGV, Kelley JH, Garrette EM: Petrographic analysis and INAA geochemistry of prehistoric ceramics from Robinson Pueblo, New Mexico. *J Archaeol Sci*, 17, (6): 601-625.
- Taylor RJ, 1997 Robinson VJ, Gibbins DJL: An investigation of the provenance of the Roman Amphora cargo from the Plemmirio B shipwreck. *Archaeometry*, 39: 9-21.
- Terenzi C, 2010 Casieri C, Felici AC, Piacentini M, Vendittelli M, De Luca F: Characterization of elemental and firing-dependent properties of Phlegrean ceramics by non-destructive ED-XRF and NMR techniques. *J Archaeol Sci*, 37: 1403-1412.

- Thompson TJU, 2013 Islam M, Bonniere M: A new statistical approach for determining the crystallinity of heat-altered bone mineral from FTIR spectra. *J Archaeol Sci*, 40: 416-422.
- Tite MS 2008 Ceramic production, provenance and use—a review. *Archaeometry*, 50: 216–231.
- Tsolakidou A, 2002 Kilikoglou V: Comparative analysis of ancient ceramics by neutron activation analysis, inductively coupled plasma-optical-emission spectrometry, inductively coupled plasma-mass spectrometry, and X-ray fluorescence. *Anal Bioanal Chem*, 374: 566–572.
- Vandiver P, 1989 Soffer O, Klima B, Svoboda J: The Origins of Ceramic Technology at Dolni Vestonice, Czechoslovakia. *Science*, 246, (4933): 1002-1008.
- Volkov-Husović T, 2005 Jančić RM, Mitraković D: Using the Image Analysis Program for Prediction of Thermal Stability Behavior of Refractory Specimen. *Materials Science Forum*, ed. O van der Biest, M Gasik, J Vleugels, VIII: 492–493.
- Vuković J 2010 Neolitska grnčarija – tehnološki i socijalni aspekti. Doktorska disertacija, Beograd. Univerzitet u Beogradu, Filozofski fakultet.
- Wallis NJ, 2012 Kamenov GD: Challenges in the Analysis of Heterogeneous Pottery by LA-ICP-MS: A Comparison with INAA. *Archaeometry*, doi: 10.1111/j.1475-4754.2012.00718.x.
- Wasserman PD 1993 *Advanced Methods in NeuralComputing*. Van Nostrand Reinhold: New York.
- Xu A, 2001 Wang C, Chi J, Li M, Zhang M, Holmes L, Harbottle G, Koshimizu S, Manabu K, Koichi K: Preliminary Provenance Research on Chinese Neolithic Pottery: Huating (Xinyi County) and Three Yellow River Valley Sites. *Archaeometry*, 43: 35–47.

<http://www.ancient-wisdom.co.uk/czechdolnivestonice.htm>

<http://poincare.matf.bg.ac.rs/~nenad/ipdr.2011/9.klasterovanje.pdf>



## **3. Eksperimentalni deo**

### **3.1. Uzorci arheološke keramike i glina – izbor, opis i priprema za analitički postupak**

*U ovom poglavlju, opisani su uzorci neolitske keramike koji su korišćeni u radu. Pobrojani su kriterijumi kojima je vršen odabir uzoraka, izgled i karakteristike uzoraka su detaljno opisani, kao i način njihove pripreme za analizu. Priložene su i fotografije korišćenog arheološkog materijala. Pored toga prikazane su sve značajne karakteristike glina koje su korišćene u procesu donošenja odluke o lokalnoj proizvodnji na lokalitetu Pločnik.*

#### **3.1.1. Izbor keramičkih predmeta**

Prateći osnovne ciljeve ovog istraživanja uzorci keramičkih predmeta (u radu su najviše korišćeni fragmenti keramičkih predmeta, mada su pojedini predmeti samo delimično bili fragmentirani) odabrani su tako da budu zadovoljeni sledeći kriterijumi:

- § dobro definisano poreklo,
- § uslovno datovanje na isti vremenski period i
- § reprezentativnost odabranog skupa uzoraka

Najznačajniji kriterijum koji je neki fragment morao da zadovolji je njegovo dobro definisano poreklo, koje je određeno od strane

arheologa na bazi stilističkih, arheoloških ili nekih drugih kriterijuma. Na osnovu ovoga pretpostavlja se, sa značajnom sigurnošću, da su svi analizirani fragmenti keramike lokalno proizvedeni od sirovina koje su eksploatisane u blizini drevnih naseobina (pretpostavka je da su se u doba Neolita za grnčarske radove eksploatisala gliništa koja su bila najbliža naselju, a koja su istovremeno imala i glinu potrebnog kvaliteta, Vuković 2010, 159).

Razvoj grnčarskih tehnika kroz vreme za rezultat je imao i poboljšanja u načinu izrade keramičkih predmeta, i to ne samo po obliku, načinu ukrašavanja, već i po načinu pripreme gline za proizvodnju datog predmeta, zatim dodavanju primesa, tehnici izrade i načinu pečenja koji mogu imati značajan uticaj na parametre kojima ćemo definisati poreklo nekog određenog predmeta. Zato je period nastanka datog keramičkog predmeta jedan od značajnih činilaca u odabiru uzoraka. Arheološka je pretpostavka da predmeti nastali u bliskom vremenskom periodu imaju slične karakteristike. U svrhu određivanja porekla, termin slične karakteristike odnosi se na način pripreme gline, vrstu i način dodavanja primesa (ukoliko ih ima) i tehnike oblikovanja i pečenja. Način pripreme gline predstavlja separaciju prirodnih primesa koje su nepodesne za izradu predmeta i direktno utiče na hemijske osobine koje će budući predmet pokazati u analizi. I vrsta i način dodavanja primesa, koja je svesna delatnost predaka – grnčara, direktno utiče na sam analitički proces, ali i na zaključak o poreklu. Može se reći da je uticaj ovog faktora od presudnog značaja, jer zahteva izuzetno pažljivu interpretaciju. Tehnike oblikovanja i pečenja mogu da imaju uticaj na određivanje elementarnog sastava keramike, ali je u ovom radu taj uticaj minimizovan pogodnim izborom fragmenata za anлізу, da se ne bi udaljili od osnovnog cilja disertacije.

Važan kriterijum za izbor uzoraka je i njihova finoća izrade koja utiče na reprezentativnost odabranog skupa fragmenata keramike. Ovo je izraženo kroz dodatni zahtev da u skupu budu zastupljeni fragmenti

različite finoće izrade. Keramika se prema fakturi (izgled i sastav mase od koje je izrađena keramika) deli na grubu, srednju i finu a glavni kriterijumi su vrsta, količina i veličina dodatih primesa ili prirodno prisutnih grubih uključaka (Shepard 1971, 131). Ovaj zahtev može da omogući praćenje uticaja tehnika izrade i dodatih primesa na postavljeni cilj izražen kroz klasifikaciju arheološke keramike.

Uzorci arheološke keramike korišćeni u ovom radu svrstani su u tri grupe, prema lokalitetu na kome su iskopani, a uz pretpostavku dobro definisanog porekla (u ovom slučaju dobro definisano poreklo određeno je na osnovu arheoloških razmatranja, dr J. Vuković i dr N. Tasić za keramike sa lokaliteta Vinča, D. Šljivar za keramike sa lokaliteta Pločnik i dr A. Bulatović za keramike sa lokaliteta Bubanj). Prvu grupu sačinjavaju fragmenti keramike sa lokaliteta Vinča – Belo brdo, drugu grupu predmeti sa lokaliteta Pločnik i treću oni predmeti koji su pronađeni na lokalitetu Bubanj, slika 3.1.1. Značaj ovih lokaliteta na svetskoj arheološkoj mapi kao i intenzivna iskopavanja koja se trenutno odvijaju na lokalitetima Vinča i Pločnik (a delom i na lokalitetu Bubanj) uticala su na njihov izbor. Ovakav izbor lokaliteta i gore pomenuti kriterijumi koje su pojedinačni predmeti morali za zadovolje ograničio je populaciju pojedinačnih skupova koje oni formiraju. Tako je sa lokaliteta Vinča za analizu bilo pogodno 33 fragmenta od kojih je 29 svrstano u skup koji je korišćen za obučavanje, dok su preostala četiri fragmenta iskorišćena za testiranje uspešnosti predloženog postupka. Sa lokaliteta Pločnik analizirano je 25 fragmenta u skupu za obučavanje dok su dva preostala za proceduru testiranja. Skup fragmenata keramike sa lokaliteta Bubanj ima posebne karakteristike. Ovaj skup namenjen je za ispitivanje mogućnosti proširenja predloženog postupka klasifikacije na više od dve grupe, jer je sama matematička procedura zahtevnija u odnosu na osnovni slučaj klasifikacije dve grupe. Zato je ovaj skup formiran sa manjim brojem uzoraka, ukupno 13 u skupu za obučavanje i 2 u skupu za testiranje.

Kao što je već pomenuto kriterijum od važnosti za odabir fragmenata keramike koji će biti iskorišćeni u procesu obučavanja je vreme nastanka, tačnije datovanje (ili uslovno datovanje) u arheološkom kontekstu. Fragmenti sa lokaliteta Vinča i Pločnik uslovno su datovani u period od druge polovine šestog do druge polovine petog milenijuma pre nove ere i pripadaju tzv. ranoj i srednjoj Vinčanskoj kulturi (Borić 2009, 234). U grupu fragmenata keramike sa lokaliteta Bubanj svrstani su fragmenti koji su datovani u dva različita perioda.



Slika 3.1.1. Mapa arheoloških lokaliteta sa kojih je izvršeno uzorkovanje keramičkih artefakata i glina.

Prva grupa uzoraka sa lokaliteta Bujanj sadrži fragmente koji pripadaju tzv. Bujanj – Hum I kulturi (koja je regionalna varijanta Vinčanske kulture, Garašanin 1998, 265–274) i čija je starost uslovno datovana na drugu polovinu petog milenijuma pre nove ere (Stojić i ostali 2006, 77–87). Druga grupa uzoraka sa ovog lokaliteta pripadaju tzv. Starčevačkoj kulturi i uslovno su datovani na kraj sedmog milenijuma pre nove ere. Tako su pored ostataka posuda različite namene (tanjiri i činije, koji spadaju u keramiku fine izrade) ovim istraživanjem obuhvaćeni i predmeti koji su služili u ritualnim i verskim obredima, a predstavljaju keramičke predmete grublje izrade (kakve su figurine i žrtvenici).

### 3.1.2. Izgled i karakteristike fragmenata neolitske keramike

Prikaz svih važnih karakteristika fragmenata keramike koji su korišćeni za studiju porekla ograničen je na one karakteristike koje nose informaciju o elementarnom sastavu i one koje su od važnosti ili mogu da imaju uticaja na sam analitički postupak. Uopšteno, uzorci keramičkih predmeta čije je poreklo određivano u okviru ove doktorske disertacije nemaju glazuru (neglazirana keramike, kao uopšte i sva keramika iz doba Neolita), a njihova površina je ukrašena i dekorisana (ukrašavanje je izvedeno različitim tehnikama ucrtavanja šara koje su bojene ili ne). Pigmenti korišćeni za dekoraciju uzoraka koji su ispitivani nisu od značaja za istraživanje prikazano u ovoj disertaciji niti su uticali na hemijski sastav tela keramike (za detaljniji opis korišćenih pigmenata videti Mioč i ostali 2004 i Gajić-Kvašček i ostali 2012a). Za ovaj rad sa lokaliteta Vinča – Belo brdo analizirano je ukupno 33 fragmenta keramike koji su služili kao upotrebna keramika, tj. različite posude i tanjiri. Fragmenti sa ovog lokaliteta spadaju u kategoriju

keramike fine fakture (neki od njih prikazani su na slici 3.1.2). Površina ispitivanih fragmenata je fino uglačana do visokog sjaja i ukrašena različitim pigmentima. Dimenzije izabranih fragmenata sa ovog lokaliteta su od 10 x 5 cm (veći komadi) do 5 x 3 cm (manji komadi). Fragmenti imaju zakrivljenu (i konkavnu i konveksnu) spoljašnju površinu. Njihova prosečna debljina iznosi oko 4 – 6 mm. Telo keramike je homogene strukture (slika 3.1.2) crne ili braon boje. Boja koju vidimo na telu neolitske keramike najčešće potiče od uslova pečenja (oksidaciona atmosfera – crvena boja tela keramike, dok crna boja tela keramike ukazuje na redukcionu atmosferu pečenja. Nekada je crvena boja posledica kasnijih termičkih uticaja, recimo požara).

Sa lokaliteta Pločnik analizirano je ukupno 27 fragmenata keramike (slika 3.1.3). Od toga 2 fragmenta posuda, 2 žrtvenika i 22 figurine (delimično fragmentirane). Za razliku od posuda žrtvenici i figurine spadaju u kategoriju keramike srednje do grube fakture. Figurine iz grupe keramika iskopanih na lokalitetu Pločnik su oko 10 – 15 cm visoke i imaju oko 5 cm u prečniku. Telo figurina i žrtvenika iz ove grupe je crne boje, zadovoljavajuće homogenosti (slika sa opičkog mikroskopa na slici 3.1.3). Glatka površina figurina i žrtvenika ukrašavana je različitim tehnikama graviranja i bojena najčešće crvenim i belim pigmentima.

Sa lokaliteta Bujanj analizirani su fragmenti keramičkih posuda čije je telo crne boje. Dimenzije fragmenata sa lokaliteta Bujanj su oko 5 x 5 cm, dok im prosečna debljina iznosi 5 – 10 mm. Fragmenti iz ove grupe mogu se svrstati u keramiku fine do grube fakture, sa nešto narušenom homogenošću (što je po mišljenju arheologa karakteristika ovog lokaliteta za posmatrani period, slika 3.1.4). Površina je najčešće ukrašena različitim gravurama i pigmentima.

Detaljan pregled korišćenih uzoraka prikazan je u prilogu B.

### 3.1.3. Priprema keramike za analizu

U svakom trenutku analitičkog procesa ne sme se izgubiti iz vida dragocenost predmeta koji se ispituje i zahtev za nedestruktivnim i neinvazivnim pristupom u analizi. Imajući ovo na umu može se reći da priprema uzoraka za analizu, u smislu koji poznaju metode prirodnih nauka, ne postoji.



Slika 3.1.2. Fotografije nekih fragmenata keramičkih predmeta sa lokaliteta, Vinča analiziranih u radu. U gornjem desnom uglu prikazana je fotografija sa optičkog mikroskopa tela jednog od fragmenata.

Ovaj zahtev je dodatno ograničio broj uzoraka u pojedinačnim grupama, jer su birani samo oni fragmenti sa prelomima pogodnim za analizu (prelomi omogućavaju uvid i analizu materijala od kojeg je predmet napravljen, tj. u fakturu). Svi uzorci koji su analizirani morali su da budu očišćeni od zemlje i drugih naslaga (naslage kakve su recimo kalcinacije na mestima koja se analiziraju mogu da utiču i na analitički i na arheološki rezultat). To se naročito odnosilo na prelom.

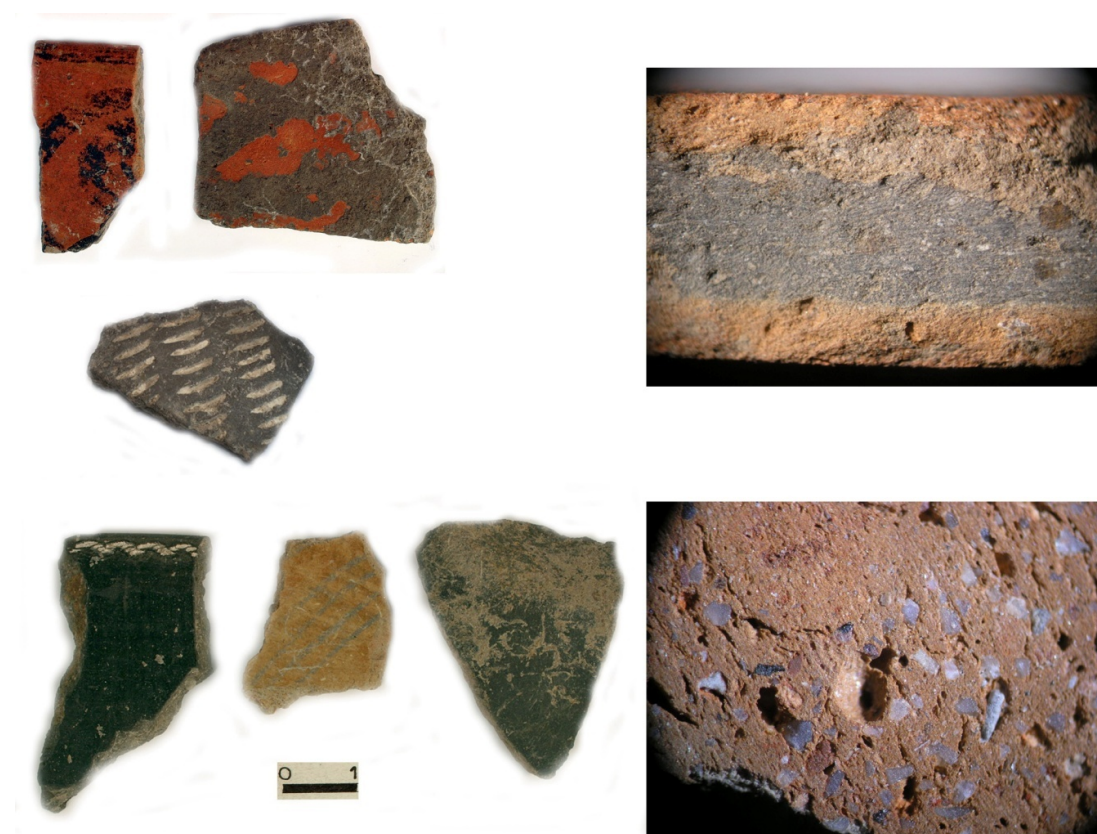


Slika 3.1.3. Fotografije nekih fragmenata keramičkih predmeta sa lokaliteta Pločnik, korišćenih u radu. Na desnoj strani prikazane su fotografije sa optičkog mikroskopa tela fragmenata.

Izabrani fragmenti morali su da zadovolje i uslov homogenosti strukture tela keramike (fakture keramike). Termin homogena struktura tela keramičkog predmeta se odnosi na strukturu u kojoj se



ne mogu uočiti primese i pore značajne veličine koje bi mogle imati uticaj na analitički proces i rezultujući elementarni sastav ispitivanog komada. Provera homogenosti strukture izvršena je snimanjem preloma optičkim mikroskopom. Prirodne nehomogenosti u strukturi eliminisane su usrednjavanjem vrednosti iz ponovljenih merenja u tri različite tačke (kako je preporučeno u Forster i ostali 2011).



Slika 3.1.4. Fotografije nekih fragmenata keramičkih predmeta sa lokaliteta Bujanj, korišćenih u radu. Na desnoj strani prikazane su fotografije sa optičkog mikroskopa tela dva fragmenta.

Tačke su, gde god je to bilo izvodljivo, birane na različitim stranama komada. Gde ovo nije bilo moguće, na jednom prelomu birane su tri različite tačke. Pored toga izabrani komadi imali su zaravnjen (gladak)

bar neki, mali deo preloma. Ovaj zahtev je omogućio da rasejanje i slabljenje pobudnog X-zračenja budu uporedivi za sve uzorke, drugim rečima obezbeđeni su isti merni uslovi za sve fragmente.

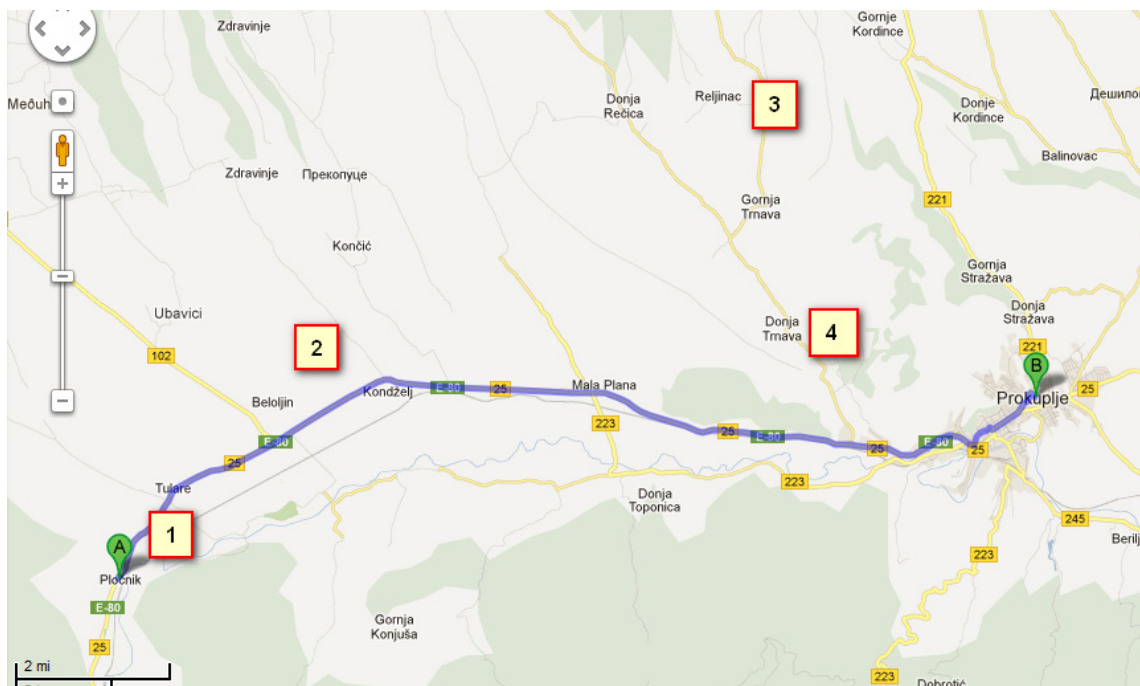
#### 3.1.4. Uzorci gline

Sasvim posebnu grupu uzoraka predstavljaju keramičke pločice posebno napravljene u laboratorijskim uslovima i namenjene ispitivanju tehnika izrade arheološke keramike i njihovog porekla (slika 3.1.5). Arheološka pretpostavka je da se u vremenu u kojem je nastala ispitivana keramika nije vršio transport sirovina, već da su one eksploatisane na najbližim pogodnim lokacijama u odnosu na mesta koja su preci nastanjivali. Gline su uzorkovane na gliništima koja su u neposrednoj blizini lokaliteta Pločnik i za koja postoje indikacije da su u prošlosti bila eksploatisana ili se još uvek eksploatišu. Po ovim kriterijumima, četiri lokacije su bile pogodne za uzorkovanje glina (slika 3.1.6).



Slika 3.1.5. Test pločice od pečene gline koja je uzorkovana u blizini lokaliteta Pločnik (izradila Vesna Svoboda, CIK).

Od uzorkovanih gline pečene su keramičke pločice na nekoliko različitih načina radi utvrđivanja najverovatnije tehnike izrade keramičkih predmeta. U ovom radu su korišćene četiri test pločice. Bez detaljnijeg razmatranja tehnike izrade i pečenja pločica od gline, može se reći da je njihova struktura zadovoljavala iste uslove kao i fragmenti keramike: homogenost izražena kroz odsustvo primesa i pora značajnih dimenzija i fino zaravnjena površina za analizu.



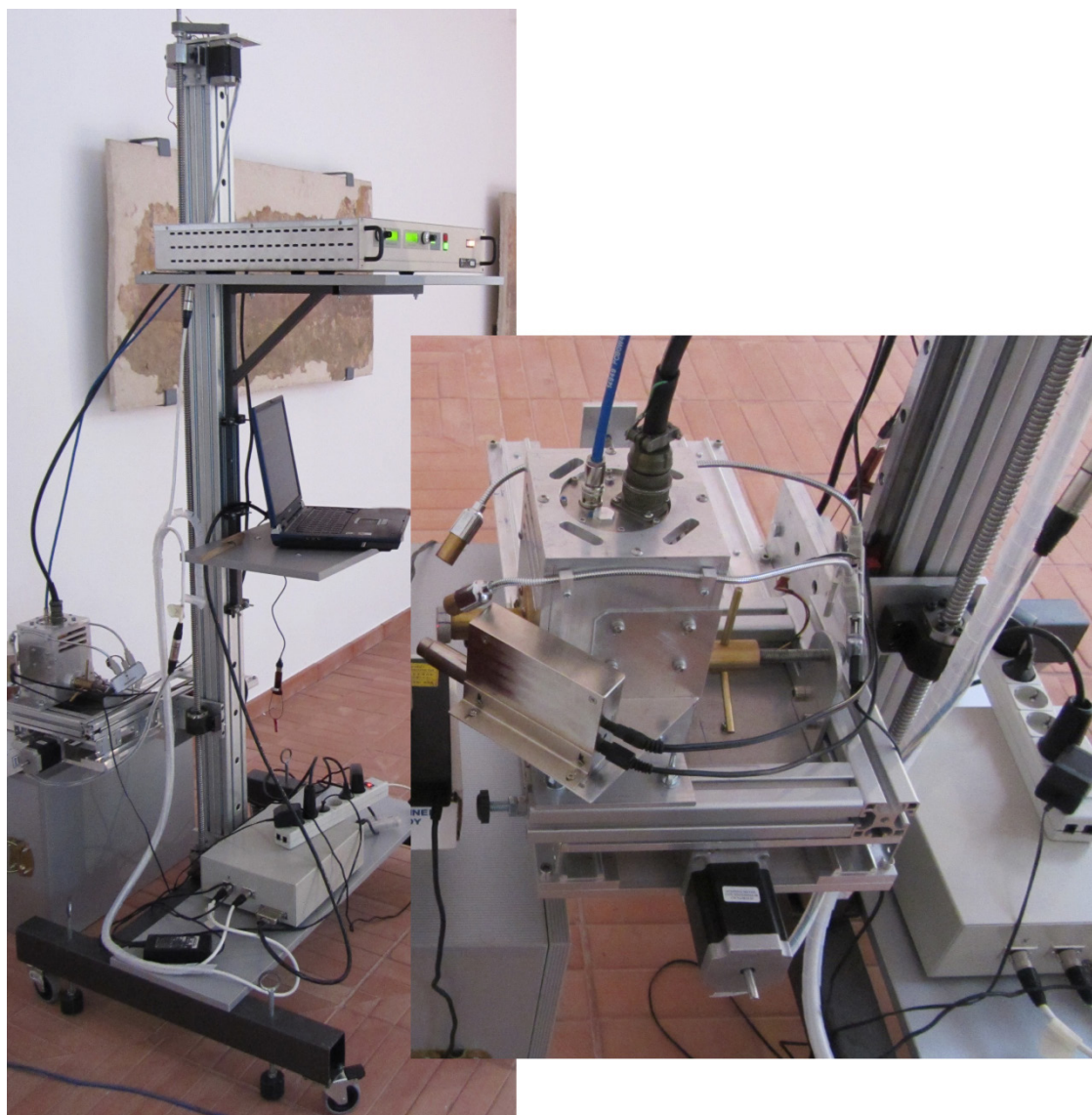
Slika 3.1.6. Mesta na kojima je uzorkovana glina u blizini lokaliteta Pločnik.

### **3.2. Nedestruktivno određivanje elementarnog sastava arheološke keramike EDXRF spektrometrijskom metodom**

*U ovom poglavlju, prikazan je analitički postupak određivanja elementarnog sastava fragmenata keramičkih predmeta. Prikazana je instrumentacija kojom se nedestruktivnim i neinvazivnim postupkom analiziraju keramički predmeti sa Neolitskih lokaliteta. Detaljno su opisani uslovi pod kojima su generisani podaci koji će daljom analizom biti iskorišćeni za utvrđivanje porekla. Mogućnost realizacije analitičkog postupka u uslovima na terenu (in-situ merenja) prikazana je u kontekstu specifičnosti u odnosu na rad u laboratorijskim uslovima.*

Mobilni EDXRF spektrometar koji je korišćen u ovom istraživanju (slika 3.2.1) konstruisali su saradnici Laboratorije za hemijsku dinamiku, Instituta Vinča u Beogradu i predstavlja prvi mobilni EDXRF spektrometar takvog tipa u Srbiji. Imajući u vidu prvenstveno značaj ispitivanja i zaštite predmeta kulturnog nasleđa, ali i tek sporadična i svakako ne sistematska dosadašnja istraživanja u ovoj oblasti, instrument je posebno konstruisan za primenu prilikom analiza predmeta kulturnog nasleđa, mada se uspešno primenjuje i u svim ostalim analitičkim procesima analize elementarnog hemijskog sastava. Jedna od njegovih bitnih karakteristika, pored nedestruktivnog analitičkog postupka, je i mogućnost korišćenje van laboratorijskih uslova, drugim rečima može se koristiti i na terenu, tj. mestu gde se nalazi predmet za analizu. Ovakva merenja van laboratorijskih uslova nazivaju se *in-situ* merenja i od naročitog su značaja kada se vrše analize predmeta kulturnog nasleđa. Šematski prikaz korišćenog

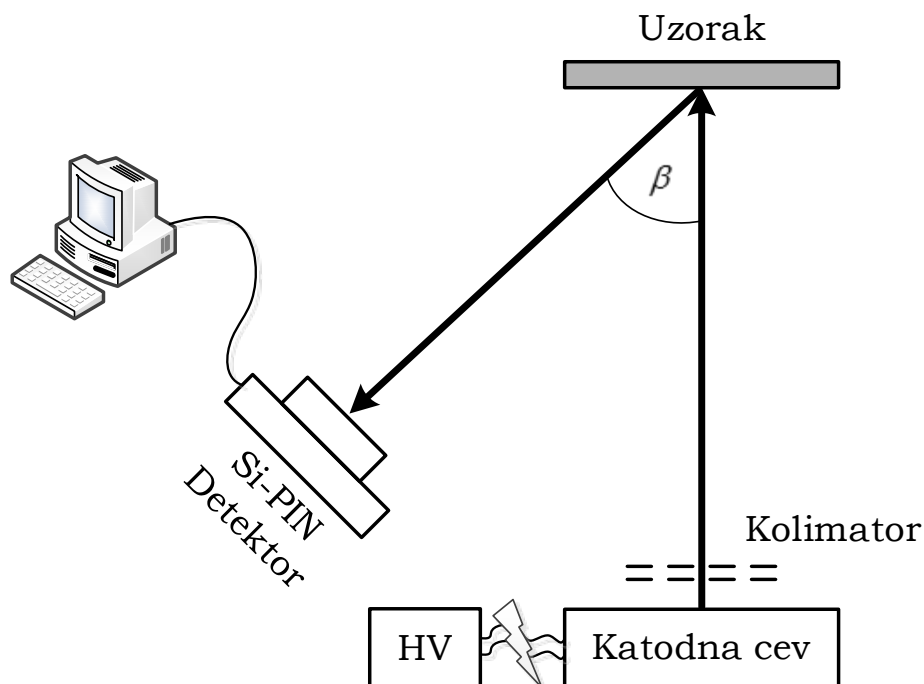
instrumenta dat je na slici 3.2.2. Izvor pobudnog X-zračenja predstavlja katodna cev - *OXFORD Instruments*, sa rodijumskom (Rh) anodom, maksimalne struje 1 mA i maksimalnog napona od 50 kV. Emitovano X-zračenje se na izlazu iz katodne cevi kolimiše pomoću tačkastog olovnog kolimatora.



Slika 3.2.1. Mobilni EDXRF spektrometar konstruisan u Laboratoriji za hemijsku dinamiku u Institutu Vinča u Beogradu.

Uloga ovog kolimatora je da u odnosu na podešenu geometriju merenja, suzi ekscitacioni snop X-zraka na poželjnih 2 – 3 mm u prečniku na predmetu koji se analizira. Ova veličina snopa svrstava instrument u grupu mili-XRF spektrometara. Deo kolimatora je i produžetak napravljen od bakra, aluminijuma i olova koji omogućava lakši pristup ispitivanim predmetima, ali delimično i umanjuje intenzitet ekscitacionog snopa X-zračenja s obzirom na malo rastojanje.

Katodna cev smeštena je u kućište čija je namena višestruka. Kućište prevashodno ima funkciju zaštite korisnika instrumenta od potencijalnog rasejanog X-zračenja. U ovom kućištu smešten je i ventilator kojim se obezbeđuju optimalni radni uslovi katodne cevi bez obzira na trenutne ambijentalne uslove. Zaštitno kućište predstavlja i nosač dva laserska pokazivača, koji služe za pozicioniranje uzorka koji se ispituje.



Slika 3.2.2. Šematski prikaz EDXRF spektrometra.

Funkcija laserskih pokazivača je vizuelizacija one tačke na predmetu koji se analizira koja je pogođena snopom upadnih X-zraka emitovanih sa katodne cevi. Tačka preseka dva laserska snopa (levog i desnog u odnosu na katodnu cev), predstavlja mesto koje pogađa upadni snop X-zračenja, i određena je unapred zadatim rastojenjem površine predmeta koji se ispituje od vrha kolimatora katodne cevi. Imajući na umu da se elementarna analiza hemijskog sastava određenog objekta može obavljati i u terenskim uslovima i da se pored pomeranja uzorka koji se ispituje može pomerati i sam instrument, neophodno je prilikom svakog merenja izvršiti tačno pozicioniranje predmeta koji se analizira u odnosu na ekscitacioni snop X-zraka. Rastojanje na koje se postavlja predmet koji se analizira zavisi od više faktora: vrste materijala koji se ispituje, geometrije samog predmeta, raspoložive površine za analizu, ograničenja – poput ramova u kojima su slike koje se analiziraju, i sličnih.

Integrirani detektorski sistem (X123, Amptek Inc., Bedford, MA, USA) se sastoji od detektora karakterističnog fluorescentnog X-zračenja materijala sa predpojačavačem, digitalnog signal procesora (DSP), višekanalnog analizatora (eng. *Multi Channel Analyzer*, MCA.) i sopstvenog napajanja. Detektorski sistem je malih dimenzija (7 x 10 x 2,5 cm), male težine (180 g) i male snage (2,5 W – jednostavno je napajanje) što ga čini posebno pogodnim za korišćenje u mobilnim sistemima. Moguće je direktno povezivanje detektorskog sistema sa računarom, preko USB ili RS232 portova, čime se akvizicija spektara vrši trenutno tj. u realnom vremenu. Sam Si-PIN detektor ima berilijumski (Be) prozor površine 6 – 25 mm<sup>2</sup> i debljine 500 μm, zatim višeslojni kolimator i dvostepeno termoelektrično hlađenje. Optimalni energetski opseg koji se detektuje ovim detektorom je od 1 keV do 40 keV. Ostale karakteristike detektora izražene su preko rezolucije (145 do 260 eV FWHM na 5.9 keV) i maksimalne brzine brojanja (do 2 x 10<sup>5</sup> cps, *counts per second*). Rezolucija višekanalnog analizatora korišćenog za ove analize je postavljena na 2048 kanala. Detektorski sistem



pričvršćen je za zaštitno kućište katodne cevi čime je obezbeđena dobro definisana i stabilna geometrija sistema.

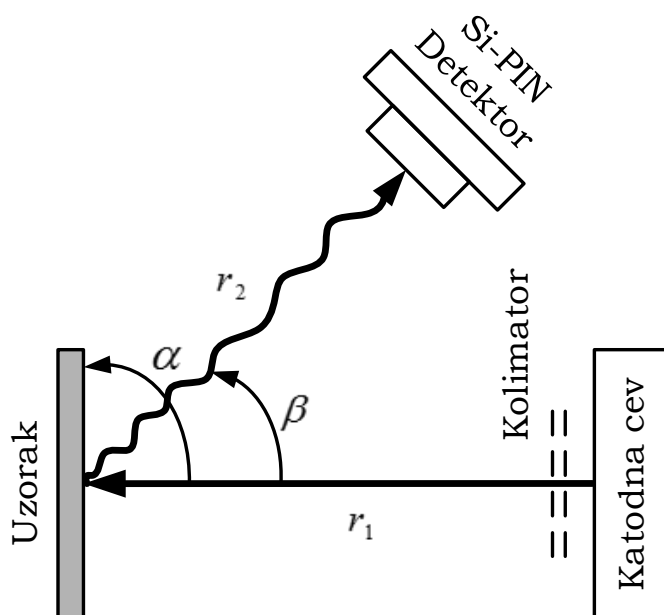
Sastavni deo instrumenta je i posebno viskonaponsko napajanje katodne cevi. Kućište sa katodnom cevi i detektor postavljeni su na motorizovanu pokretnu platformu pomoću koje je moguće jednostavno pomeranje i pozicioniranje instrumenta u sva tri pravca. Kretanje platforme je omogućeno pomoću dva step – motora, softverski je kontrolisano (MACH - softver koji se originalno koristi za navođenje i kontrolu CNC alata) i sa tačno određenim korakom od minimalnih 1 mm. Sve ovo omogućava jednostavno korišćenje uređaja i u otežanim terenskim uslovima (kao što je na primer rad na visini – uz korišćenje skele), kao i lak pristup objektima koji se ne mogu pomerati (freske, ikone na ikonostasu, velika platna i slično).

Većina konstrukcionih i tehničkih rešenja na ovom instrumentu izvedena su imajući na umu prvenstveno njegovu namenu – analiza predmeta kulturnog nasleđa u laboratorijskim i terenskim uslovima. Tako je i geometrija čitavog sistema prilagođena ovom zahtevu. Geometrija sistema, šematski prikazana na slici 3.2.3, određena je sledećim parametrima:

- § ugao između ekscitacionog snopa X-zračenja i površine predmeta koji se analizira,  $\alpha$ ;
- § ugao između uzdužne ose detektora i ekscitacionog snopa X-zračenja,  $\beta$ ;
- § rastojanje između vrha kolimatora katodne cevi i površine predmeta koji se analizira,  $r_1$ ;
- § rastojanje detektora od površine predmeta koji se analizira,  $r_2$ .

Vrednosti ovih geometrijskih parametra se mogu proizvoljno birati i menjati, što prvenstveno zavisi od uslova same analize (na primer od oblika i dostupnosti predmeta koji se ispituju). Rastojanja  $r_1$  i  $r_2$ ,

postavljaju se tako da se postigne maksimalna efikasnost analitičkog procesa za date uslove. U literaturi (Cesareo i ostali 2000, Ardid i ostali 2004, Pérez-Arantequi i ostali 2008, Pappalardo i ostali 2005) se mogu pronaći različite geometrijske realizacije za vrednosti uglova  $\alpha$  i  $\beta$  ( $\alpha = 90^\circ$  i  $\beta = 90^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$  i  $\beta = 45^\circ$  ili  $\alpha = 45^\circ$  i  $\beta = 45^\circ$ ).



Slika 3.2.3. Šematski prikaz geometrije mernog sistema korišćenog EDXRF spektrometra.

Sistem prikazan na slici 3.2.1 je tako postavljen da je ugao  $\alpha$  najčešće fiksiran na  $90^\circ$  u odnosu na ispitivanu površinu (mada ova vrednost zavisi i od homogenosti i oblika površine predmeta koji se ispituje). Ugao  $\beta$  se uglavnom fiksira na  $45^\circ$  ali je promena ovog ugla tehnički daleko lakša i može se uraditi i u toku samog merenja bez promene ugla ekscitacije,  $\alpha$ .

Tehničke mogućnosti u toku nedestruktivne analize predmeta kulturnog nasleđa u terenskim uslovima, onemogućavaju da se sredina

kroz koju prolazi karakteristično X-zračenje na putu od predmeta koji se analizira do detektora vakuumira ili ispuni nekim inertnim gasom. Realizacija takvih eksperimentalnih uslova je tehnički vrlo komplikovana prilikom *in-situ* merenja. Zbog toga se ovakvom eksperimentalnom postavkom ne mogu detektovati hemijski elementi lakši od silicijuma (Si), usled apsorpcije njihovog karakterističnog X-zračenja u vazduhu, na putu do detektora.

Detektorski sistem kontrolisan je pomoću ADMCA (Amptek Inc.) softverskog paketa za akviziciju, obradu i prikaz spektara. Ovaj softver potpuno podešava i kontroliše detektorski sistem, prikuplja i prikazuje podatake, omogućava određivanje oblasti od interesa (ROI), pretraživanje pikova, a moguće je izvršiti i kalibraciju spektara. Može se reći da je ovaj softver potpuno adekvatan za određivanje svih neophodnih parametara za kvalitativnu analizu različitih uzoraka.

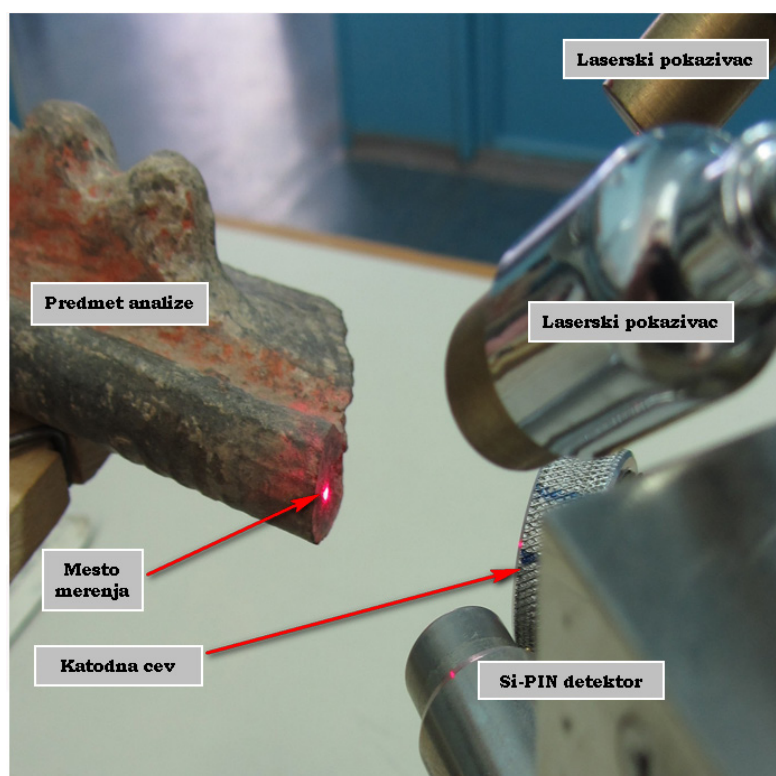
Pored analiza koje se izvode na predmetima kulturnog nasleđa (Korolija Crkvenjakov i ostali 2012, Gajić-Kvašček i ostali 2012a, Gajić-Kvašček i ostali 2012b, Damjanović i ostali 2010, Andrić i ostali 2011, Gajić-Kvašček i ostali 2012c, Andrić i ostali 2012, Gajić-Kvašček i ostali 2012d,) instrument se koristi i za ostale analize koje se izvode u Laboratoriji za hemijsku dinamiku instituta Vinča, koje su akreditovane međunarodnim standardom ISO 17025. Metode merenja su verifikovane učešćem na međunarodnim međulaboratorijskim proverama (eng. *proficiency tests*, četiri PT testa organizovana od strane IAEA za određivanje glavnih i elemenata u tragovima u morskom sedimentu, uzorku mešane trave, mulju u prahu i kineskoj keramici). Za neposrednu realizaciju ispitivanja ovom metodom laboratorija raspolaže različitim standardnim referentnim i referentnim materijalima.

### 3.2.1 Eksperimentalna postavka za analizu tela fragmenata neolitske keramike

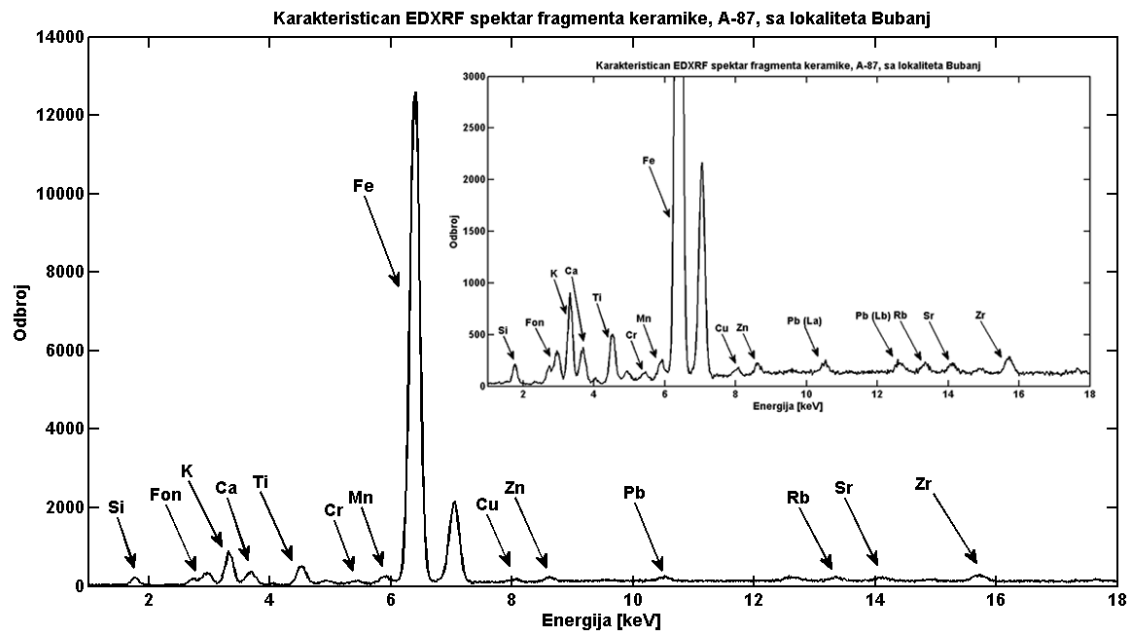
Iako su sve analize komada arheološke keramike, koje su prikazane u ovoj disertaciji, izvršene u laboratorijskim uslovima izbor parametara za analizu vršen je sa ciljem određivanja uslova koji bi se mogli reprodukovati na terenu. Prvi parametar koji je najosetljiviji na terenske uslove je geometrija sistema. Uglovi  $\alpha$  i  $\beta$  izabrani su tako da sistem bude najmanje perturbiran u terenskim uslovima. Utvrđeno je da je kombinacija  $\alpha = 90^\circ$  i  $\beta = 45^\circ$  najstabilnija za ponovljena merenja iz sledećih razloga:

- § uzorak fragmenta keramike se najjednostavnije pozicionira tako da površina preloma bude normalna na ekscitacioni snop X-zraka. Ovime su obezbeđeni i isti merni uslovi za svaki fragment na najjednostavniji način,
- § nesavršenosti površine, hrapavost i zakrivljenost, prisutne su ma koliko se trudili da izaberemo najravniji deo preloma. Pozicioniranjem površine uzorka normalno na upadni snop postižu se isti merni uslovi za sve fragmente. Ovo je pogotovo važno za one analize kada se predmet kulturnog nasleđa nikako ne sme/ne može pomerati ili se na njemu ne smeju vršiti intervencije da bi se ostvarili pogodni merni uslovi,
- § eksperimentalnom proverom više mogućnosti i nizom ponovljenih merenja utvrđeno je da detektorski sistem ima najveću efikasnost (izraženu kroz najmanju vrednost mrtvog vremena) i najmanje je perturbiran ambijentalnim uslovima (kakva su recimo pomeranja koja utiču na pomeranje samog instrumenta) kada je postavljen pod uglom od  $45^\circ$  u odnosu na osu sistema.

Rastojanja  $r_1$  i  $r_2$  pri kojima se postiže maksimalna efikasnost analitičkog procesa u datim uslovima su 16 mm i 21 mm, respektivno. Struja i napon katodne cevi su 800  $\mu\text{A}$  i 35 kV, čime je postignuta optimalna snaga pobude. Vreme akvizicije spektralnih podataka je 100 s i odabrano je tako da bude uporedivo sa karakterističnim vremenom akvizicije kada se koriste ručni (*hand held*, hhEDXRF) spektrometri. Svi parametri održavani su konstatnim u toku svih merenja u ovom istraživanju. Karakteristično merenje fragmenta keramike (sa lokaliteta Pločnik) prikazano je na slici 3.2.4, a rezultat analitičkog procesa – spektr detektovanog karakterističnog X-zračenja hemijskih elemenata u sastavu tela keramike, na slici 3.2.5.



Slika 3.2.4. Analiza keramičkog predmeta iz doba Neolita nedestruktivnom EDXRF spektrometrijom.



Slika 3.2.5. Spektar karakterističnog X-zračenja hemijskih elemenata detektovanih u telu fragmenta keramike (oznaka A – 87) sa lokaliteta Bubanj.

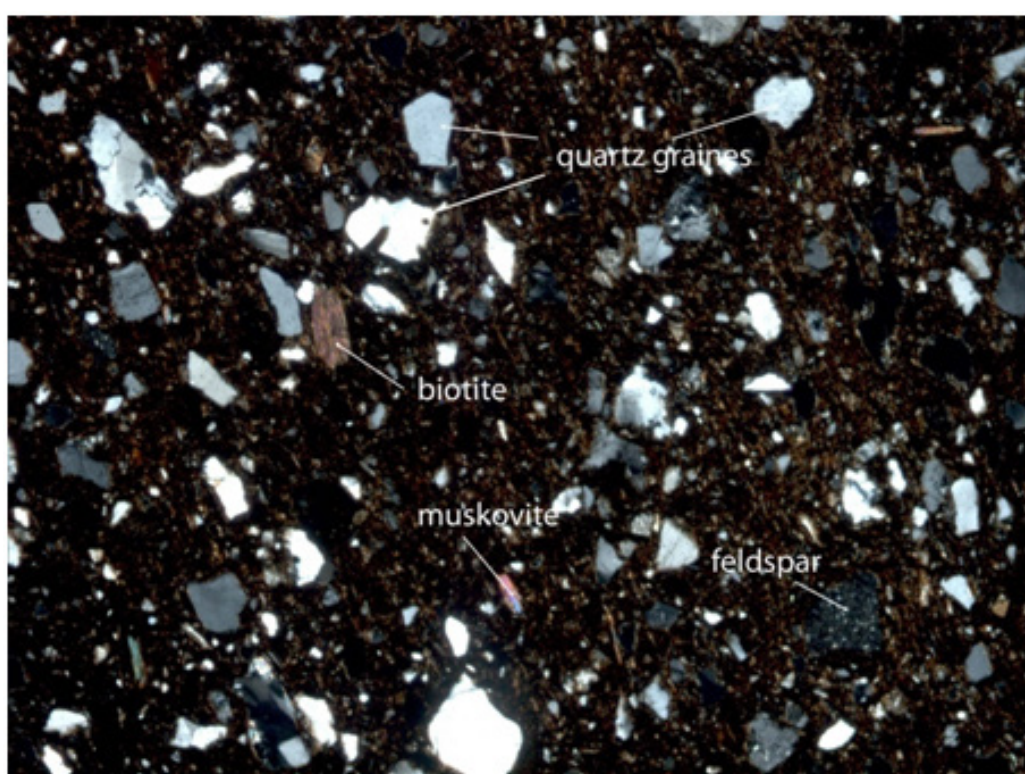
Identifikacija hemijskih elemenata prisutnih u sastavu fature keramike i čije su energije karakterističnog X-zračenja detektovane u spektru vrši se posredno. Kalibracijom detektorskog sistema se svakom kanalu pridružuje odgovarajuća energija, čime skala na kojoj su prikazani pojedinačni kanali višekanalnog analizatora postaje energetska (u keV). Pik koji se pojavio na datoj energiji ukazuje na prisustvo određenog hemijskog elementa u materijalu koji je analiziran.

### **3.3. Petrografske analize neolitske keramike i analiza slike kao metoda za selekciju obeležja**

*U ovom poglavlju prikazani su rezultati petrografskih analiza uzoraka neolitske keramike i pločica napravljenih pečenjem gline sa nalazišta u blizini arheološkog lokaliteta Pločnik. Prikazani su i načini obrade petrografskih slika tehnikama koje se koriste za analize digitalnih slika, čime je omogućena kvantifikacija petrografskih karakteristika analiziranih keramika i pečenih glina. Dobijeni rezultati prikazani su u kontekstu selekcije obeležja za formiranje novog skupa ulaznih podataka, kojima je izvršeno testiranje predložene procedure za utvrđivanje porekla neolitske keramike.*

Uzorci keramika sa lokaliteta Pločnik izabrani su za dodatno testiranje predloženog algoritma za određivanje porekla. Osam fragmenata činija različitih po obliku, veličini i finoći izrade, uslovno datovanih u Vinča II period odabrano je za analizu. Kulturni sloj na nalazištu Pločnik datiran je na ukupno 800 godina i završava se oko 4500 godine pne. Sloj iz koga su uzimani uzorci za analizu uslovno je datovan u prvoj polovini ovog perioda. Karakteristike perioda u smislu stila izrade keramike su velika finoća izrade predmeta, uglačane spoljne površine predmeta, dekor na spoljnim površinama i veliki broj predmeta upotrebne keramike izrađen bez pigmenata na spoljnim površinama. Uzorci za koje je bilo dozvoljeno da budu podvrgnuti destruktivnim ispitivanjima pripremljeni su standardnim postupkom za petrografsku analizu. Telo keramičkog uzorka sečeno je u tanke preseke koji se postavljaju na stakleni nosač na kome se kasnije takav preparat pregleda korišćenjem mikroskopa sa propuštenom polarizovanom

svetlošću (za ove analize korišćen je mikroskop NU2, Karl Zeiss, Jena, koji se nalazi na Rudarsko – geološkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu). Osmam preparata neolitske keramike snimani su sa uvećanjem 1200 x i na osnovu uočenih optičkih karakteristika izvršena je identifikacija minerala (slika 3.3.1). Na ovaj način sačinjene su 32 digitalne fotografije tela keramičkih fragmenata, pogodne za dalju analizu.

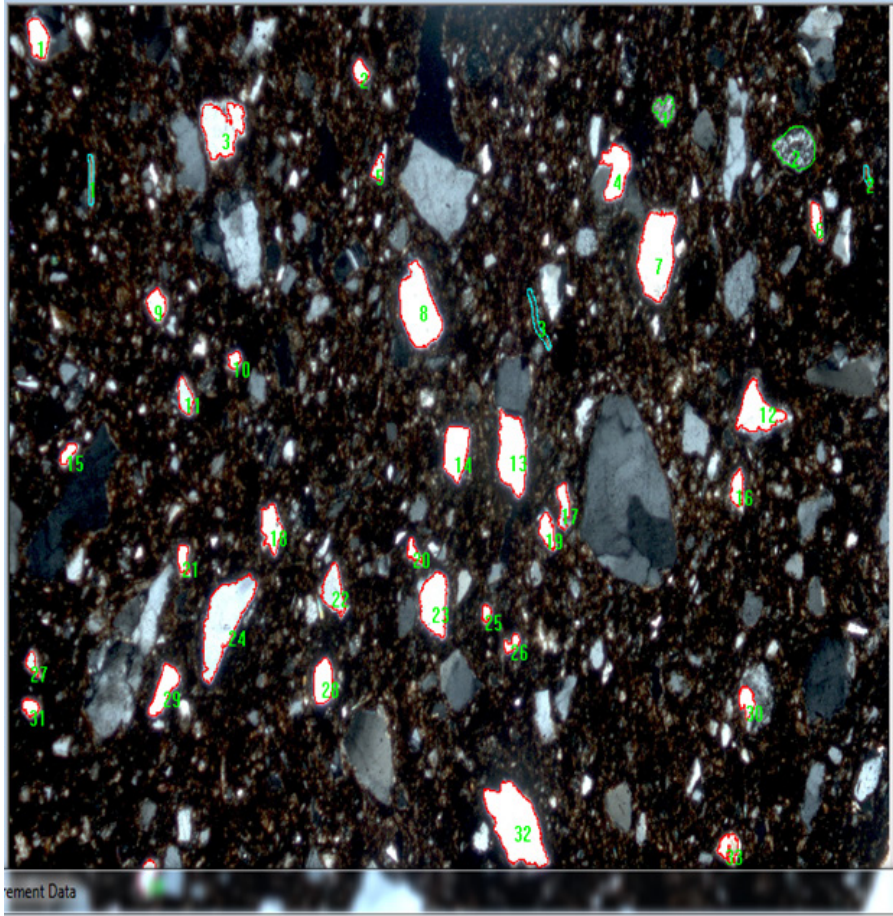


Slika 3.3.1. Petrografska slika na kojoj su obeleženi karakteristični minerali identifikovani u strukturi tela keramike (Svoboda i ostali 2011).

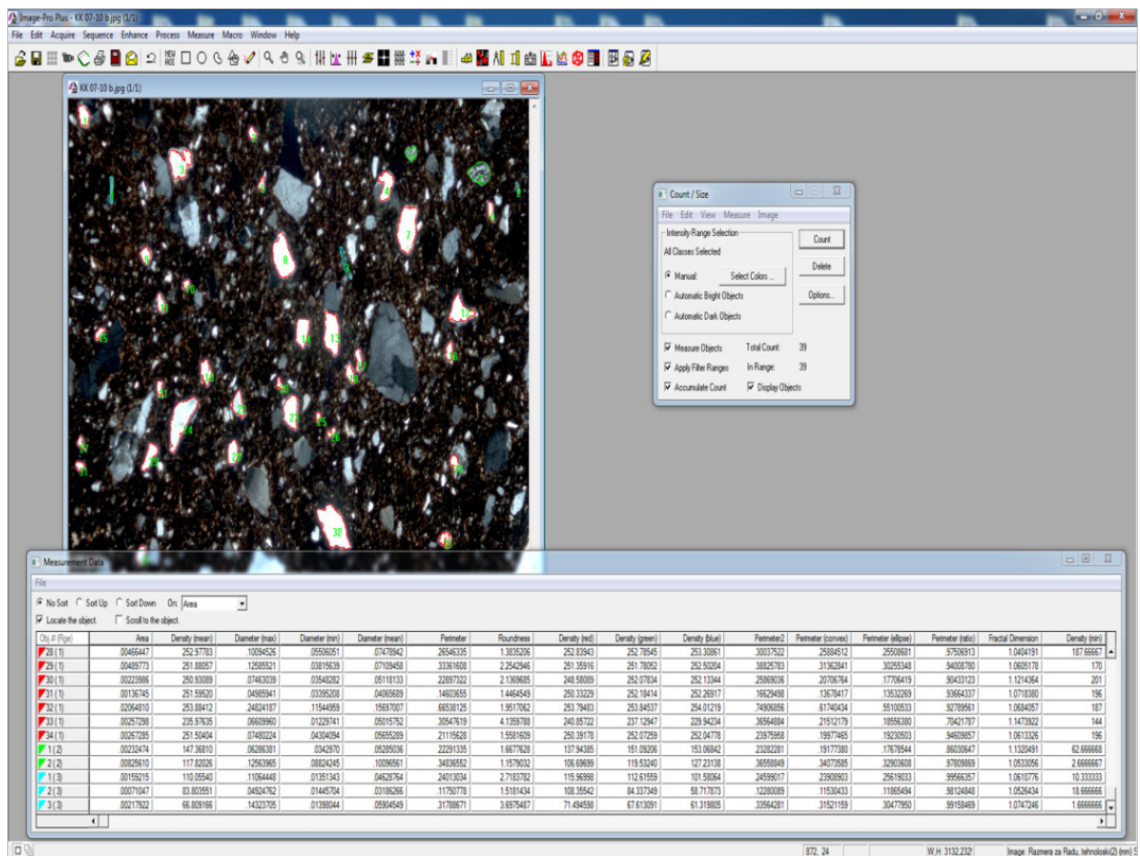


Digitalne fotografije pogodne su za analizu i postoji veliki broj procedura koje uz pomoć odgovarajućih softvera omogućavaju kvantifikovanje vizuelnih informacija dobijenih sa digitalnih fotografija. Za kvantifikaciju značajnih parametara minerala identifikovanih petrografskim analizama u telu keramike korišćeni su alati softverskog paketa *ImageProPlus* ver. 6.2, Media Cybernetics, Silver Spring. Minerali koji su identifikovani u telu keramike, a koji bi mogli da doprinesu izučavanju porekla i tehnologije izrade su kvarc (pojavljuje se u zrnima različite veličine što ukazuje na kratke puteve transporta materijala od kojih glina nastaje i različite izvore ovih minerala, Svoboda i ostali 2011), liskun i metamorfne stene (kao važna primesa sa stanovišta porekla sirovina i tehnologije izrade). Svaki od identifikovanih minerala od značaja izdvojen je na digitalnoj fotografiji (slika 3.3.2) korišćenjem alata softverskog paketa *ImageProPlus* (slika 3.3.3). Nakon selekcije karakterističnih minerala sledi kvantifikovanje njihovih morfoloških karakteristika posebnim alatima softverskog paketa *ImageProPlus*. Ovim postupkom izdvojen je ukupno 21 parametar pomoću kojih su opisane morfološke karakteristike odabranih minerala, koji omogućavaju identifikaciju i kvantifikaciju oblika minerala preko njihove površine, dimenzija, fraktalne dimenzije, veličine zakrivljenosti i sličnih. Pored oblika i dimenzija, važne karakteristike zrna minerala su i one koje potiču od njegovih optičkih karakteristika, a koje se uočavaju u polarizovanoj svetlosti. Detaljan prikaz korišćenih parametara dat je u tabeli 3.3.1, a pregled petrografskih snimaka pet fragmenata posuda sa loklita Pločnik koji su korišćeni za ove analize dat je u prilogu C.

Obradom petrografskih snimaka test pločica od pečene gline istim postupkom koji je prethodno opisan, izdvojeno je 21 istih parametara kojima su kvantifikovane morfološke karakteristike kvarca, liskuna i metamorfnih stena u sirovini.



Slika 3.3.2. Karakteristični minerali obeleženi na petrografskom snimku tela keramike.



Slika 3.3.3. Korisnički interfejs softverskog paketa *ImageProPlus* u toku obrade digitalne petrografske slika tela keramičkog predmeta.

Tabela 3.3.1. Odabrani parametri kojima su kvantifikovane morfološke karakteristike zrna sa objašnjenjima njihove prirode.

Naziv	Opis	Slika
Površina	Površina objekta, može uključivati ili ne rupe unutar objekta. U istaživanju rupe su uključene u površinu objekta.	
Glavna osa	Dužina glavne ose elipse koja ima iste momente reda 1 i 2 kao i objekat koji aproksimira.	
Sporedna osa	Dužina sporedne ose elipse koja ima iste momente reda 1 i 2 kao i objekat koji aproksimira.	
Gustina plave	Srednja vrednost plave boje za objekte, primenjuje se samo za slike u boji.	
Gustina zelene	Srednja vrednost zelene boje za objekte, primenjuje se samo za slike u boji.	
Gustina crvene	Srednja vrednost crvene boje za objekte, primenjuje se samo za slike u boji.	
Srednja optička gustina	Srednja optička gustina ili intenzitet objekta.	
Minimalna optička gustina	Minimalna vrednost gustine unutar objekta.	
Standardna devijacija gustine	Standardna devijacija optičke gustine unutar objekta.	
Zbir optičkih gustina	Zbir intenziteta ili optičkih gustina unutar objekta.	
Srednji prečnik	Srednja vrednost prečnika merenih sa intervalima od 2 stepena koji prolaze kroz centroidu objekta.	

Nastavak tabele 3.3.1.

Naziv	Opis	Slika
Minimalni prečnik	Dužina najkraće linije koja spaja dve strane spoljne linije objekta i prolazi kroz centroidu objekta.	
Maksimalni prečnik	Dužina najduže linije koja spaja dve strane spoljne linije objekta i prolazi kroz centroidu objekta.	
Fraktalna dimenzija	Fraktalna dimenzija obima objekta.	
Obim	Dužina spoljne linije objekta.	
Obim konveksne senke objekta	Obim konveksne senke objekta.	
Obim ekvivalentne elipse	Obim elipse čije su ose jednake osama objekta.	
Odnos obima	Odnos konveksnog obima i obima objekta.	
Obim 2	Dužina spoljne linije objekta, takođe uključuje i rupe ukoliko postoje, određuje se brže, ali je manje tačan od običnog obima.	
Obim 3	Korigovana spoljna linija objekta ne uključujući rupe ima manji fizički smisao od obima 2.	
Sferičnost	Koristi obim 2 i površinu za određivanje odstupanja oblika od kružnog.	

## Literatura

- Andrić V, Stojanović M, Gajić-Kvašček M: Investigation of XVIII Century Robert Hubert's Painting with EDXRF, SEM-EDX and OM Analytical Techniques. Proceedings of the Euroanalysis-16<sup>th</sup> European Conference on Analytical Chemistry, Belgrade, Serbia, B, AH01.
- Andrić V, Gajić Kvašček M, Marić Stojanović M, Korolija Crkvenjakov D, Gulan J, Marković N: Comparative Study of Pigments on Post Byzantine Icons in Krusedol Monastery. Proceedings of the EXRS, Vienna, Austria, 205.
- Ardid M, Ferrero JL, Juanes D, Lluch JL, Roldán C: Comparison of total-reflection X-ray fluorescence, static and portable energy dispersive X-ray fluorescence spectrometers for art and archeometry studies. *Spectrochim Acta B*, 59, (10–11): 1581-1586.
- Borić D Absolute dating of metallurgical innovations in the Vinča culture of the Balkans. In: Kienlin, T.L., Roberts, B.W. (Eds.), *Metals and Societies. Studies in Honour of Barbara S. Ottaway*, Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie. Rudolf Habelt, Bonn, 191-245.
- Cesareo R, Cappio Borlino C, Stara G, Brunetti A, Castellano A, Buccolieri G, Marabelli M, Giovagnoli AM, Gorghinian A, Igante GE: A portable energy dispersive X-ray fluorescence apparatus for the analysis of sulfur and chlorine in frescos. *J. Trace Microprobe Techniques*, 18: 23–33.

- Damjanović Lj, 2010 Durđević J, Andrić V, Gajić-Kvašček M, Stojanović M, Lazić T, Nikolić S: Spectroscopic Investigation of Milo Milunović's Canvas Painting "The Inspiration of the Poet". Proceedings of the 10th International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Physical Chemistry, Belgrade, Vol II, 667-669.
- Forster N, 2011 Grave P, Vickery N, Kealhofer L: Non-destructive analysis using PXRF: methodology and application to archaeological ceramics. *X-Ray Spectrom*, 40: 389–398.
- Gajić-Kvašček M, 2012a Marić-Stojanović M, Šmit Ž, Kantarelou V, Karydas AG, Šljivar D, Milovanović D, Andrić V: New evidence for the use of cinnabar as a colouring pigment in the Vinča culture. *J Archaeol Sci*, 39, 1025-1033.
- Gajić-Kvašček M, 2012b Marić-Stojanović M, Jančić-Heinemann R, Kvašček G and Andrić V: Non-destructive characterisation and classification of ceramic artefacts using pEDXRF and statistical pattern recognition. *Chemistry Central Journal*, doi:10.1186/1752-153X-6-102.
- Gajić-Kvašček M, 2012c Svoboda V, Jančić-Heinemann R, Dimitrijević M, Milovanović D, Polić-Radovanović S: Classification of Neolithic Ceramics and Clays According to Their Morphological Characteristics. CMA4CH 2012, Mediterranean Meeting Use of Multivariate Analysis and Chemometrics in Cultural Heritage and Environment 4th ed., Rome, Italy.
- Gajić-Kvašček M, 2012d Rogić D and Andrić V: The Roman wall paintings from Viminacium- analysis of the pigments. Proceedings of the EXRS, Vienna, Austria, 185.

- Garašanin M 1998 Zur Verbreitung des Salkuța-Krivodol-Bubanj-Komplexes auf dem Mittleren Balkan. In: P. Anreiter/L. Bartosiewicz/E. Jerem/W. Meid (eds.), *Man and the Animal World. Studies in Archaeozoology, Archaeology, Anthropology and Palaeolinguistics in memoriam Sándor Bökönyi. Archaeolingua 8. Archaeolingua: Budapest.*
- Korolija Crkvenjakov D, 2012 Andrić V, Marić Stojanović M, Gajić Kvašček M, Gulan J, Marković N: *The Iconostasis of the Krušedol Monastery Church - A Scientific-Technical Study*, (Edi Stefano Ridolfi, *The Gallery of Matica srpska*, Novi Sad, University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences Belgrade.
- Mioč UB, 2004 Colomban Ph, Sagon G, Stojanović M, Rosić A: Ochre decor and cinnabar residues in Neolithic pottery from Vinča, Serbia. *J Raman Spectrosc*, 35, (10): 843-846.
- Pappalardo L, 2005 Karydas AG, Kotzamani N, Pappalardo G, Romano FP, Zarkadas Ch: Complementary use of PIXE-alpha and XRF portable systems for the non-destructive and in situ characterization of gemstones in museums. *Nucl Instrum Meth B*, 239, (1-2): 114-121.
- Pérez-Arantegui J, Resano M, García-Ruiz E, Vanhaecke F, Roldán C, 2008 Ferrero J, Coll J: Characterization of cobalt pigments found in traditional Valencian ceramics by means of laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry and portable X-ray fluorescence spectrometry. *Talanta*, 74, (5): 1271-1280.
- Shepard AO 1971 *Ceramics for the Archaeologist*, Carnegie Institution, Washington D.C.



- Stojić M, 2006 Jocić M: Niš-Kulturna stratigrafija praistorijskih lokaliteta u Niškoj regiji. Narodni muzej Niš i Arheološki institut u Beogradu: Niš, Beograd.
- Svoboda V, 2011 Popović-Živančević M, Jančić-Heinemann R, Milovanović D, Petrović A, Polić – Radovanović S, Kuzmanović-Cvetković J: Experimental Archaeology – Multidisciplinary Research into Pločnik Site. Proceedings of the International Conference on Traditional Pottery Making from the Ethnoarchaeological Point of View, Belgrade, Serbia.
- Vuković J 2010 Neolitska grnčarija – tehnološki i socijalni aspekti. Doktorska disertacija, Beograd. Univerzitet u Beogradu, Filozofski fakultet.

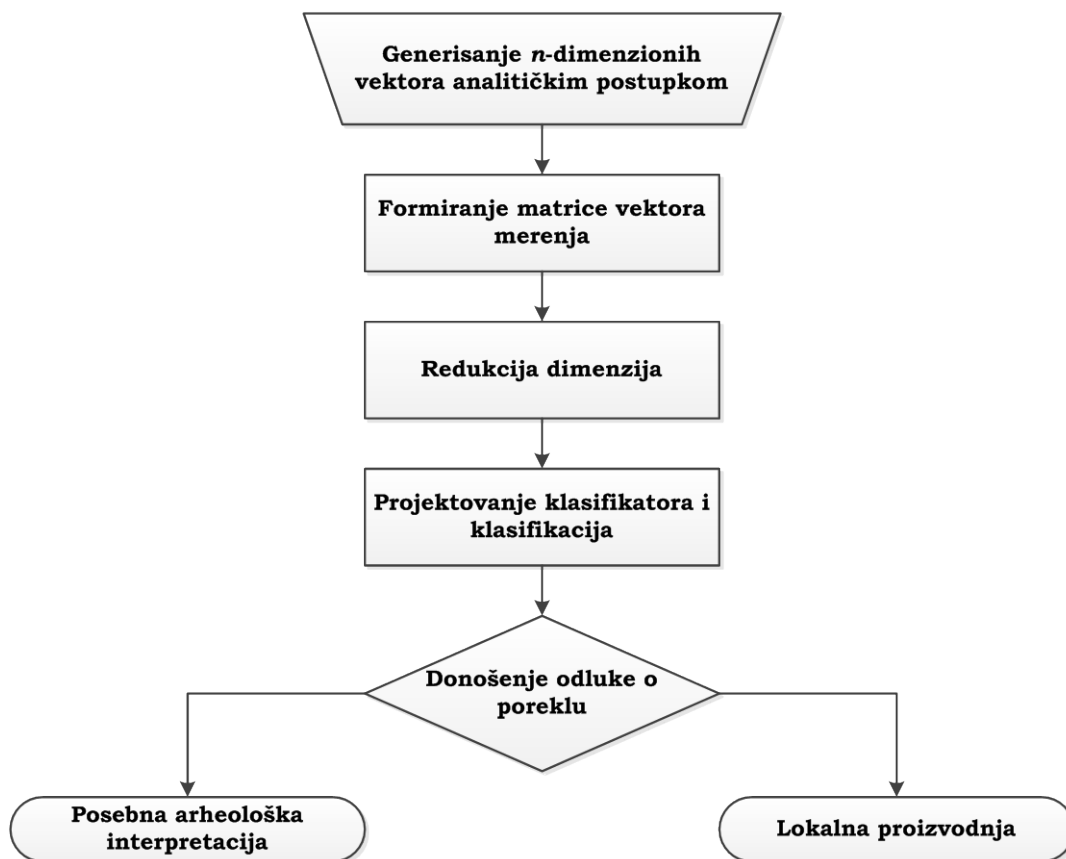
## **4. Određivanje porekla arheološke keramike**

### **4.1. Algoritam procedure za donošenje odluke o poreklu keramike**

*Postupak donošenja odluke o poreklu arheološke keramike prikazan je uopštenom algoritamskom strukturom, koja je dizajnirana tako da se do rezultata može doći na brz, jednostavan i pouzdan način. Detaljan prikaz predloženog algoritma dat je u ovom poglavlju.*

Imajući na umu sve pomenute pogodnosti nedestruktivne EDXRF analize arheološke keramike koja se izvodi na terenu, uz sve dostupniju opremu za ove namene, dolazi se u situaciju da se prilikom rada na terenu generiše značajna količina podataka na osnovu koje treba doneti odluku o karakteristikama i poreklu ispitivane keramike. Uzimajući u obzir okolnosti terenskih radnih uslova, od interesa je automatizovati proces donošenja odluke. Prvi korak u ovome je razvoj podesnog algoritma koji će zadovoljiti sve zahteve koja ova procedura postavlja. Ti zahtevi izraženi su potrebom da brz analitički postupak (kakav i jeste EDXRF spektrometrijska analiza, a pogotovo ako se koristi hhEDXRF spektrometar) prati i brz rezultat u vidu izjave o poreklu ispitivanog predmeta. Pored brzine, procedura bi morala biti dizajnirana na način da njena realizacija bude jednostavna, a rezultujuća informacija pouzdana. Imajući u vidu neophodnost multidisciplinarnog pristupa u rešavanju arheometrijskih problema, proces donošenja odluke o poreklu nekog keramičkog predmeta nikako ne sme biti zasnovan samo na zaključcima izvedenim iz analitičkog ili statističkog postupka. Iz tog

razloga ovde predloženi algoritam procedure treba da bude pomoćno sredstvo u procesu donošenja odluke o poreklu arheološke keramike. Struktura algoritma koji bi mogao da zadovolji sve uslove u postupku donošenja zaključka o poreklu prikazana je na slici 4.1.1.



Slika 4.1.1. Uopšteni algoritam za realizaciju procedure donošenja odluke o poreklu arheološke keramike.

Prvi korak je akvizicija analitičkih podataka i formiranje vektora koji opisuju svako merenje pomoću  $n$  promenljivih. Na ovaj način svaki komad arheološke keramike koji je izmeren, predstavljen je vektorom čije su dimenzije određene brojem identifikovanih hemijskih elemenata u telu keramike. Svi izmereni komadi keramike (neka je njihov broj  $m$ ) predstavljaju tačke u prostoru koji je određen brojem identifikovanih

hemijskih elemenata (neka je taj broj  $n$ ). Na ovaj način smo proces analize elementarnog sastava keramike smestili u prostor čije su dimenzije  $n \times m$ . Primenjena analitička tehnika može da dovede do usložnjavanja drugog koraka u algoritmu povećanjem identifikovanih hemijskih elemenata i broja izvršenih analiza, tj. broja komada koji se ispituju. Da bi se proces donošenja odluke pojednostavio neophodno je omogućiti lakšu vizuelizaciju dobijenih analitičkih rezultata.

U sledećem koraku predloženog algoritma upravo se zadovoljava ovaj zahtev kroz proces redukcije dimenzija. Prilikom realizacije ovog koraka mora se voditi računa o sledećem:

- § redukcija dimenzija se vrši u prostor čije su dimenzije (neka je označena sa  $d$ ) značajno manje od dimenzije polaznog prostora,  $d \ll n$ . U cilju vizuelizacije analitičkih rezultata poželjno je da  $d$  ima vrednost 2 ili 3, tj. da se početni prostor preslika u dvo- ili trodimenzionalni prostor;
- § gubitak informacija u procesu redukcije dimenzija treba da bude minimalan;
- § poseban zahtev mogu da predstavljaju i izvesni unapred određeni preduslovi kao što je na primer klasifikacija.

Kako cilj predložene procedure predstavlja donošenje odluke o poreklu arheološke keramike, klasifikacija predstavlja unapred određen zahtev. Da bi se izvršila klasifikacija potrebno je dizajnirati pogodan klasifikator. Odluka o poreklu donosi se u zavisnosti od rezultata klasifikacije.

Ovako predložen algoritam može da zadovolji osnovne zahteve procedure kojom se donosi odluka o poreklu. Svaki korak ovog algoritma nosi deo odgovornosti u realizaciji i zato je omogućeno da se u svakom koraku iskoristi najbolja i najefikasnija realizacija. U tom smislu testiranje algoritma izvršeno je tako što su generisane dve po prirodi različite matrice vektora merenja: jedna matrica generisana je

nedestruktivnom EDXRF analizom arheološke keramike, dok je druga matrica generisana petrografskom analizom. Obe matrice su prošle kroz sve korake algoritma da bi se utvrdila njegova efikasnost u realizaciji postavljenog zadatka na ulaznim podacima čija je priroda različita. U istom kontekstu za sledeći korak u algoritmu ispitane su dve, po prirodi različite tehnike redukcije dimenzija, tj. njihov uticaj na sam postupak. Izbor klasifikatora je posledica redukcije dimenzija i zato se bira najbolja mogućnost za svaku situaciju posebno. Dodatno testiranje pouzdanosti izvršeno je pomoću test skupa. Ovaj skup je čine fragmenti koji nisu korišćeni u procesu obučavanja. Sasvim posebna ocena moći predikacije testirana je skupom koji je formiran od elementarnog sastava pečenih glina koje su uzorkovane na gliništima u blizini lokaliteta Pločnik.

## 4.2. Metode za redukciju dimenzija

*U ovom poglavlju, detaljno su opisane dve metode za redukciju dimenzija koje su korišćene u toku realizacije predložene procedure za utvrđivanje porekla arheološke keramike.*

Predložena procedura za utvrđivanje porekla keramičkih predmeta (detaljno opisana u prethodnom poglavlju) započinje generisanjem ukupno  $m$ ,  $n$ -dimenzionih vektora kojima je opisano svako izvršeno merenje. Nedestruktivnom EDXRF analizom arheološke keramike generisano je oko dvestotine 10-dimenzionih vektora, jer je u skladu sa zahtevom analitičkog postupka svako merenje ponovljeno tri puta, a kao rezultat korišćena je srednja vrednost ovih merenja. Na ovaj način analizom arheološke keramike formiran je skup sačinjen od 67 10-dimenzionih vektora koji nose informaciju o karakteristikama keramike, i zavisnosti tih karakteristika od deset hemijskih elemenata koji su selektovani u analitičkom procesu. Izvođenje zaključaka o karakteristikama keramika, utvrđivanje uticaja pojedinačnih hemijskih elemenata na te karakteristike, kao i zaključivanje o međusobnim odnosima elemenata u hemijskom sastavu nije izvodljivo u ovakvom multivarijantnom skupu. Neophodno je ovakve podatke transformisati i učiniti pogodnijim za analizu. Metode prepoznavanja oblika raspolažu tehnikama kojima se mogu transformisati multivarijantni podaci. To su već pomenute (u poglavlju 2.3) tehnike za redukciju dimenzija. Za realizaciju procedure za donošenje odluke o poreklu keramike korišćena je jedna metoda bez nadgledanja – analiza glavnih komponenti, PCA i jedna metoda sa nadgledanjem – redukcija dimenzija zasnovana na matricama rasejanja (eng. *scattering matrices-based dimension reduction*). U ovom poglavlju detaljno će biti opisane obe metode kao i

uslovi njihove primene na arheometrijski skup podataka generisanih nedestruktivnim EDXRF analizama.

#### 4.2.1. Redukcija dimenzija korišćenjem analize glavnih komponenti

Analiza glavnih komponenti (engleski *Principal component analysis*, PCA), poznata u stručnoj literaturi i kao Karhunen – Loeve (KL) transformacija, široko je primenjivana metoda za redukciju dimenzija i ekstrakciju obeležja. Uveo ju je Pirson 1901. godine (Pearson 1901), usavršio Hotelling 1933. godine (Hotelling 1933), a pravi procvat primene nastupa sa pojavom računara. PCA pripada kategoriji metoda za redukciju dimenzija bez nadgledanja.

Ova metoda se može koristiti na dva načina, istovremeno ili odvojeno:

- § kao metoda za redukciju dimenzija, čime se početni  $n$ -dimenzioni prostor linearnom transformacijom preslikava u novi prostor manjih dimenzija  $i$ /ili
- § kao metoda za ekstrakciju obeležja.

U toku merenja generiše se početni skup ulaznih podataka  $X$  (matematički reprezentovan matricom  $X$ , dimenzije  $n \times m$ ), koga sačinjavaju izmerene vrednosti željenih parametara ( $n$ -ta dimenzija, kolona skupa  $X$ ) za svako pojedinačno merenje ( $m$ -ta dimenzija, vrsta skupa  $X$ ). Drugim rečima, u toku procesa merenja generiše se ukupno  $m$  različitih  $n$ -dimenzionih vektora kojima je opisano svako pojedinačno merenje. Redukcija dimenzija skupa  $X$  korišćenjem PCA tehnike vrši se projekcijom  $n$ -dimenzionih podataka u podprostor manje dimenzije  $d$ . Najjednostavnije je ovu projekciju predstaviti u obliku:

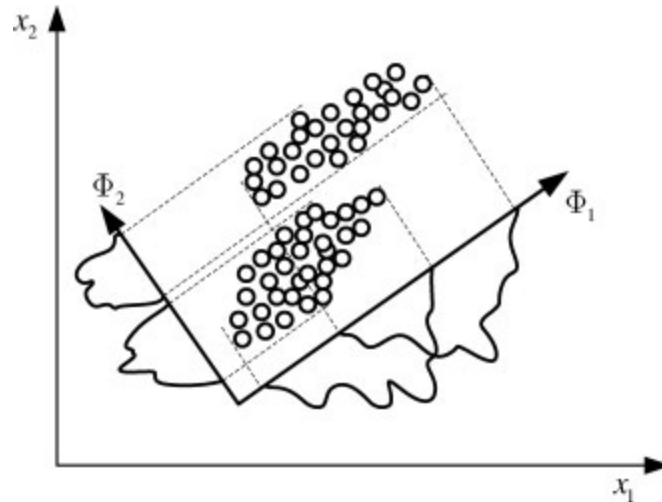
$$X = Y\Phi$$

4.2.1

čime se polazni skup  $X$  aproksimira pomoću dva nova skupa  $Y$  (dimenzija  $n \times d$ ) i  $\Phi$  ( $d \times m$ ), manjih dimenzija od  $n \times m$ . Aproksimacija skupa  $X$  se vrši na način da se minimizira suma kvadrata greške (ili drugim rečima, potpuno ekvivalentno, da se maksimizuje varijansa). Ovim postupkom generišu se nove promenljive (uobičajeno se nazivaju glavne komponente, PC) koje predstavljaju linearnu kombinaciju polaznih (originalnih, generisanih u toku procesa merenja) jako korelisanih promenljivih i koje nose informaciju o varijansi unutar skupa. Novogenerisane promenljive su međusobno nekorelisane. Redukcija dimenzija vrši se projektovanjem  $n$ -dimenzionih vektora u prostor  $Y$  određen glavnim komponentama i najpoželjnije je da se grafički prikaže predstavljanjem ove projekcije u dvo- ili trodimenzionom koordinatnom sistemu formiranom od prvih glavnih komponenti,  $PC1$  i  $PC2$  ili  $PC3$ , respektivno u opadajućem redosledu varijanse koju opisuju. Ekvivalentno ovom postupku, projektovanjem vektora iz matrice  $X$  u prostor  $\Phi$  (prostor određen faktorskim opterećenjima, eng. *loadings*) formira se grafik u kome su u prostoru određenom PC osama predstavljene projekcije  $n$  promenljivih.

Geometrijski, PCA se može opisati kao rotacija osa originalnog (početnog) koordinatnog sistema u novi skup ortogonalnih osa koje su određene varijansom originalnih podataka na koje se odnose, slika 4.2.1. Svaka komponenta ima različit stepen informativnosti i poželjno je da prvih nekoliko (najpoželjnije dve ili tri) od njih budu najinformativnije, tj. da uračunaju najveći procenat varijanse polaznog skupa (idealno je da prve tri glavne komponente opisuju oko 95% varijanse unutar skupa  $X$ ).





Slika 4.2.1. Geometrijski prikaz redukcije dimanzija. (Ilustracija značaja izbora prostora za klasifikaciju).

Samo izračunavanje glavnih komponenti je jednostavno i sastoji se od sledećih koraka (detaljna matematička procedura data je u prilogu A).

- § Za čitav skup podataka (matricu  $X$ ) odredi se  $n$ -dimenzioni vektor srednje vrednosti  $\mu$  i  $n \times n$  kovarijaciona matrica  $\Sigma_X$ .
- § Zatim se izračunaju svojstveni vektori i njima odgovarajuće svojstvene vrednosti, od kojih se potom odabere prvih  $d$  u opadajućem nizu.
- § Na ovaj način se formira kvadratna matrica  $A$ , dimenzija  $d \times d$ , čije kolone predstavljaju  $d$  svojstvenih vektora. (Duda i ostali 2000, 655).

PCA ne koristi informaciju o strukturi polaznog skupa podataka, čime postaje izuzetno korisno oruđe za ekstrakciju onih obeležja u multivarijantnim skupovima podataka koji ostaju "sakriveni" nosioci informacija (Webb 2002). Ekstrakcija obeležja u toku analize glavnih komponenti za rezultat imaju izdvajanje relevantnih informacija od

“šuma” i kombinovanje nekoliko promenljivih koje opisuju jednu karakteristiku u samo jednu ili nekoliko “karakterističnih” promenljivih (Varmuza i ostali 2008).

Dobro je poznato da je PCA metoda koja zavisi od dimenzije varijabli početnog skupa (Varmuza i ostali 2008, Arnold i ostali 1993, Jolliffe 1986, 64-91). Ova činjenica proističe iz toga da se rezultati PCA analize sagledavaju na osnovu linerane projekcije u prostor određen glavnim komponentama. Da bi se ovakav prikaz učinio pogodnim za izvođenje zaključaka o strukturi podataka neophodno je na neki način početne podatke prilagoditi. Promenljive se pre PCA tretmana standardizuju na nultu srednju vrednost i jediničnu varijansu (što je neophodno ako su merene varijable izražene u različitim jedinicama), tj. vrši se autoskaliranje podataka merenja. Ako su parametri, međutim, izmereni u istim jedinicama, standardizacija se svodi na proizvoljan izbor mernih jedinica. Ovaj proces (koji svakako očuvava varijansu unutar početnog skupa) predhodne obrade (predtretmana) podataka koji su rezultat arheometrijskih ispitivanja izazvao je polemiku u stručnoj javnosti koja je rezultirala u sveobuhvatnom ispitivanju nekoliko različitih pristupa u predtretmanu i njihovom uticaju na rezultat PCA analize i potonju interpretaciju dobijenih rezultata u arheološkom kontekstu (Baxter 1995). PCA analiza je izvršena na istom skupu podataka koji su prethodno obrađeni na četiri različita načina

- (a) autoskaliranje originalnih podataka,
- (b) podaci transformisani po rangu,
- (c) logaritamska ( $v_i^* = \ln(1+v_i)$ ), gde je  $v_i$  izmerena vrednost date promenljive, (Dewer i ostali 1975) transformacija podataka  $i$
- (d) autoskaliranje logaritamski transformisanih podataka.

Iako se ne može na jednostavan način predložiti odabir načina predtretmana podataka neke osnovne zaključke treba imati na umu pre

realizacije PCA analize. PCA analiza izvršena sa podacima koji su obrađeni na (a), (b) i (d) način često daje slične rezultate. Analiza izvršena na podacima koji su transformisani po rangu (b) je robusnija i osetljivija na autlajere (eng. *outliers*, članovi skupa čije su osobine bitno drugačije od ostatka populacije), pa daje rezultate koji mogu predložiti dodatno grupisanje u odnosu na analize izvršene sa podacima koji su predhodno obrađeni na (a) i (d) način. Potpuno drugačiji rezultat dobija se primenom logaritamski transformisanih podataka, mada je pokazano (Baxter 1995) da se oni ipak mogu suštinski slično interpretirati. U ovom slučaju predlaže se detaljnija analiza na nekoliko različitih načina da bi se generisali zaključci o strukturi podataka.

Opisana analiza glavnih komponenti, kao jedna od računski nezahtevnih tehnika analize podataka koji su po svojoj strukturi multivarijantni, našla je široku primenu u arheometriji. Najčešći problemi koji su uspešno tretirani ovom tehnikom su:

- § ispitivanje strukture podataka o hemijskom sastavu (naročito ako postoji nedostatak drugih podataka o predmetima koji se ispituju),
- § istraživanje da li se (ili ne) ispitivane arheološke vrste grupišu unutar grafika glavnih komponenti koji u osnovi ima samo podatke o hemijskom sastavu i
- § reprezentovanje hemijski različitih grupa određenih primenom analize klastera.

Smatra se (Baxter 1994, poglavlje 4) da najveći broj problema arheometrije obrađenih korišćenjem PCA može biti svrstan u jednu od ove tri kategorije. U literaturi se mogu (iako ređe) pronaći i situacije u kojima je početni skup podataka prvo tretiran PCA tehnikom, a potom su rezultujuće nekorelisane PC komponente tretirane kao ulazne promenljive za neku drugu analizu (recimo klustersku, diskriminantnu i slične).

#### 4.2.2. Redukcija dimenzija zasnovana na matricama rasejanja

U slučajevima kada se redukcija dimenzija vrši na skupu čija je struktura unapred poznata moguće je korišćenje metoda sa nadgledanjem. Proces redukcije dimenzija može se izvršiti i na način da bude zadovoljen neki unapred postavljen zahtev. U slučaju (kao što je ovo istraživanje) kada klasifikacija treba da sledi proces redukcije dimenzija najpogodniji izbor je da se ona izvrši pomoću matrica rasejanja. U osnovi procesa redukcije dimenzija je da se pronađe transformaciona matrica  $A$  koja će redukovati  $n$ -tu dimenziju početnog skupa na neku manju dimenziju  $d$  ( $d < n$ ). Ova transformacija matematički se može predstaviti relacijom:

$$Y = A^T X \quad 4.2.2$$

Drugim rečima, potrebno je odrediti matricu  $A$  na način da se unapred određena pripadnost određenoj klasi očuva u najvećoj mogućoj meri, uz istovremeno zadovoljenje i početnog uslova koji je klasifikacija  $L$  klasa, u koje su raspoređeni elementi početnog skupa  $X$ . Neka je  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \in \mathfrak{R}^{n \times m}$  početni skup, koji se sastoji od  $m$  podataka raspoređenih u  $L$  klasa, opisanih pomoću  $n$  promenljivih (obeležja). Matrice rasejanja definišu se na sledeći način (Fukunaga 1990, 446):

§ Matrica unutarklasnog rasejanja

$$S_w = \sum_{i=1}^L p_i \Sigma_i \quad 4.2.3$$

### § Matrica međuklasnog rasejanja

$$S_b = \sum_{i=1}^L p_i (M_i - M_0)(M_i - M_0)^T \quad 4.2.4$$

Pored ove dve matrice, praktičnu primenu našla je i mešovita matrica rasejanja

### § Mešovita matrica rasejanja

$$S_m = S_b + S_w \quad 4.2.5$$

gde  $p_i, \Sigma_i, M_i$  i  $M_0$ , predstavljaju *a priori* određenu verovatnoću, kovarijacionu matricu, vektore srednje vrednosti unutar  $i$ -te grupe i čitavog skupa podataka, respektivno. U praktičnim situacijama *a priori* verovatnoće mogu biti odabrane tako da budu jednake za svaku prethodno definisanu grupu, može biti izabrana vrednost odnosa broja članova unutar posmatrane kategorije i ukupnog broja uzoraka u početnom skupu, a postoje i situacije kada se neka grupa ciljano favorizuje tako što joj se pridružuje najveća od svih vrednosti  $p_i$ .

Za datu transformacionu matricu  $A$  unutarklasna kohezija kao i međuklasna separabilnost u novoformiranom  $d$ -dimenzionom prostoru  $Y$ , uobičajeno predstavljaju meru matrica  $A^T S_w A$  i  $A^T S_b A$ , respektivno. Optimalna linearna transformacija  $A$  (u smislu klasifikacije) može da se odredi istovremenim minimiziranjem traga matrice koja očuvava unutarklasnu koheziju,  $\text{tr}(A^T S_w A)$  i maksimiziranjem traga matrice koja opisuje međuklasnu separabilnost,  $\text{tr}(A^T S_b A)$ . Način da se ovaj zahtev ispuni je maksimizacija nekog od sledećih kriterijuma separabilnosti (Fukunaga 1990, 446):

$$J_1 = \text{tr}(S_2^{-1}S_1) \quad 4.2.6$$

$$J_2 = \ln|S_2^{-1}S_1| = \ln|S_1| - \ln|S_2| \quad 4.2.7$$

$$J_3 = \text{tr}S_1 - \mu(\text{tr}S_2 - c) \quad 4.2.8$$

$$J_4 = \frac{\text{tr}S_1}{\text{tr}S_2} \quad 4.2.9$$

gde  $S_1$  i  $S_2$  mogu biti bilo koje od matrica  $S_w$ ,  $S_b$  ili  $S_m$ . Za optimizaciju linearne transformacije početnog  $n$ -dimenzionog prostora  $X$  u novi  $d$ -dimenzioni prostor  $Y$ , u radu je korišćen kriterijum separabilnosti u obliku  $J_1 = \text{tr}(S_w^{-1}S_b)$ , koji se naziva i kriterijum traga količnika (eng. *ratio trace criterion*). Ovaj kriterijum je od naročito značaja, jer za razliku od ostalih kriterijuma, jedini vodi računa da se redukcija dimenzija mora izvršiti poštujući prethodno definisani zahtev, koji predstavlja klasifikaciju u našem slučaju. Eksplicitno rešenje kriterijuma separabilnosti  $J_1$ , predstavlja transformaciona matrica  $A$ , dobijena kao rešenje u procesu uopštene singularne dekompozicije (SVD) matrice  $S_w^{-1}S_b$ . Na taj način matricu  $A$  sačinjava  $d$  svojstvenih vektora kojima odgovara  $d$  najvećih svojstvenih vrednosti.

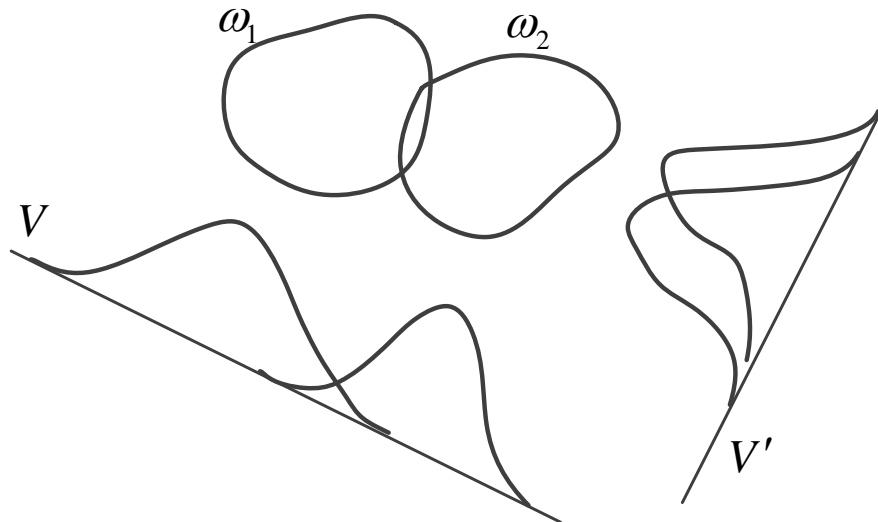
### 4.3. Klasifikacija i projektovanje klasifikatora

*Pored definisanja i opisa postupka klasifikacije, u ovom poglavlju detaljno je prikazano i projektovanje linearnog klasifikatora na bazi željenog izlaza, koji je izabran za klasifikaciju arheoloških keramičkih predmeta.*

Proces klasifikacije se može definisati kao problem određivanja klase kojoj pripada novi uzorak, tj. nepoznati uzorak ili onaj koji nije korišćen u procesu obučavanja. Postupak koji utvrđuje pripadnost novog podatka određenoj klasi – klasifikacija, realizuje se korišćenjem prethodno projektovanog klasifikatora na skupu za obučavanje u kome je, za svaki uzorak, poznata pripadnost određenoj klasi (*a priori* poznata ili određena nekom metodom prepoznavanja oblika). Klasifikator predstavlja matematičku funkciju kojom se vrši preslikavanje ulaznih informacija – obeležja, u određenu kategoriju, tj. klasu na izlazu (primer je prikazan na slici 4.3.1). Problemi klasifikacije se sreću u mnogim oblastima i nalaze široku primenu u svim aspektima ljudskog života, a samo neki od primera su:

- § Prepoznavanje kucanog i pisanog teksta (*Optical character and hand writing recognition*).
- § Prepoznavanje govora (*Speech recognition*).
- § Identifikacija upotrebom biometrijskih obeležja (*Biometric identification*).
- § Klasifikacija dokumenata (*Document classification*).
- § Internet pretraživanje (*Internet search engines*).
- § Prepoznavanje oblika (*Pattern recognition*).

Na slici 4.3.1 je prikazan primer preslikavanja vektora  $X$  na dva različita vektora,  $V$  i  $V'$  koji određuju pravce preslikavanja.



Slika 4.3.1. Preslikavanje vektora obeležja  $X$  na dva vektora  $V$  i  $V'$ .

Izboru pravca preslikavanja mora se posvetiti posebna pažnja. Sa slike 4.3.1 se jasno vidi da je po pitanju tačnosti klasifikacije mnogo bolje odabrati projekciju na vektor  $V$  nego na  $V'$ . Izbor optimalne transformacije, drugim rečima najpogodnijeg pravca, vrši se odabirom pogodnog kriterijuma separabilnosti i tada se novoformirane promenljive kojima je određen prostor preslikavanja mogu smatrati najboljim obeležjima za klasifikaciju (Fukunaga 1991, 452)



### 4.3.1. Projektovanje linearnog klasifikatora

Linearni klasifikator je klasifikator najjednostavnijeg oblika. Često se koristi zbog svoje jednostavnosti i pored toga što je optimalan samo u slučaju kada podaci imaju normalnu raspodelu sa jednakim kovarijacionim matricama. Iako pomenuti uslovi u velikom broju praktičnih primena nisu ispunjeni, linearni klasifikator daje zadovoljavajuće rezultate, te je njegova upotreba opravdana. Jedna od bitnih osobina za ovaj klasifikator je robusnost, tj. neosetljivost na promene u statističkim karakteristikama vektora koji se klasifikuju. Linearni klasifikator ne zahteva poznavanje uslovnih funkcija gustine verovatnoće, pa se projektuje u sledećem obliku:

$$h(X) = V^T X + v_0 < 0 \Rightarrow X \in \omega_1$$

4.3.1

$$h(X) = V^T X + v_0 > 0 \Rightarrow X \in \omega_2$$

gde je  $h(X)$  - linearna diskriminaciona funkcija,  $V$  - vektor preslikavanja, a  $v_0$  - skalar koji određuje prag za separaciju klasa. Vektor  $V$  i skalar  $v_0$  određuju se tako da se optimizuje neki pogodno izabrani kriterijum kojim će se kvantifikovati separabilnost. Ovakav klasifikator ima smisla primenjivati samo u slučaju da su klase separabilne i da ta separabilnost potiče od rastojanja u vektorima srednjih vrednosti pojedinačnih klasa. Poželjan, ali ne i obavezan uslov je dobro očuvana kohezija unutar određene klase. U slučaju da uslov separabilnosti nije zadovoljen, potrebno je primeniti neki drugi klasifikator, kao na primer kvadratni, deo po deo linearni klasifikator ili neke klasifikatore još složenijeg oblika (projektovanih pomoću neuralnih mreža ili fazi logike). U izrazu za linearni klasifikator, jednačina 4.3.1, član  $V^T X$  vrši preslikavanje vektora obeležja  $X$  na vektor  $V$ , a zatim se ovaj vektorski

proizvod poredi sa konstantom  $-v_0$ , na osnovu čega se donosi odluka o pripadnosti određenoj klasi. Na primer, ako je  $V^T X$  manje od  $-v_0$  tada ispitivani uzorak pripada klasi  $\omega_1$ , u suprotnom pripada klasi  $\omega_2$ .

#### 4.3.2. Projektovanje linearnog klasifikatora na bazi željenog izlaza

Projektovanje linearnog klasifikatora na bazi željenog izlaza je klasifikaciona metoda sa nadgledanjem, gde se najčešće koriste samo odbirci koji se nalaze u bliskoj okolini diskriminacione granice, dok su udaljeni odbirci od manjeg interesa. Polazeći od izraza 4.3.1 definišemo novi vektor  $Z$  kojim su predstavljeni vektori merenja koji se nalaze u dve, unapred definisane klase na način:

$$Z = [-1 \quad -X_1 \quad -X_2 \cdots -X_n]^T \quad \text{za } X \in \omega_1 \quad 4.3.2$$

$$Z = [1 \quad X_1 \quad X_2 \cdots X_n]^T \quad \text{za } X \in \omega_2$$

Sada diskriminaciona funkcija dobija vrlo jednostavnu formu

$$h(Z) = W^T Z = \sum_{i=1}^n w_i z_i > 0 \quad 4.3.3$$

Na ovaj način projektovanje linearnog klasifikatora se svodi na svega dva koraka:

§ **Korak 1:** generisanje vektora  $Z$  na osnovu vektora merenja  $X$  iz klasa  $\omega_1$  i  $\omega_2$ .

§ **Korak 2:** odredi se takav vektor  $W$ , da je  $W^T Z > 0$  za što je moguće veći broj vektora  $Z$ .

Željeni izlaz definišimo funkcijom  $\gamma(Z)$  i pridružujemo ga svakom vektoru  $Z$ , pri čemu je važno napomenuti da je potrebno da bude ispunjen uslov da je  $\gamma(Z) > 0$ . Minimizacijom unapred zadate kriterijumske funkcije  $J$ , omogućeno je da diskriminaciona funkcija  $h(Z)$  generiše vrednosti što je moguće bliže željenom izlazu  $\gamma(Z)$ . U praksi se najčešće koriste sledeći oblici kriterijumske funkcije  $J$ :

$$\begin{aligned}
 a) \quad J &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [W^T Z_i - |W^T Z_i|]^2 \\
 b) \quad J &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\text{sgn}(W^T Z_i) - 1]^2 \\
 c) \quad J &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [W^T Z_i - \gamma(Z_i)]^2
 \end{aligned}
 \tag{4.3.4}$$

gde je  $N$  ukupan broj vektora merenja za koje se projektuje klasifikator. Pronalaženje vektora  $W$  koji minimizuje kriterijumsku funkciju  $J$  nije jednostavno zbog nelinearne prirode date funkcije. Zbog toga se primenjuje iterativna procedura određivanja nepoznatog vektora  $W$  na primer gradijentnim algoritmom:

$$W(l+1) = W(l) - \rho \left. \frac{\partial J}{\partial W} \right|_{W=W(l)}
 \tag{4.3.5}$$

gde je  $l$  broj tekuće iteracije, a  $\rho$  pozitivna konstanta koja određuje brzinu konvergencije. I ovaj algoritam ima problem, određivanje parcijalnog izvoda kriterijumske funkcije  $J$  po nepoznatom vektoru  $W$ ,

tj.  $\partial J / \partial W$ . Za ovaj problem, u linearnom slučaju stvar se prilično pojednostavljuje, pa se za odabir pogodne kriterijumske funkcije dobija:

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [W^T Z_i - \gamma(Z_i)]^2 = \frac{1}{N} (U^T W - \Gamma)^T (U^T W - \Gamma) \quad 4.3.6$$

Parcijalni izvod se sada određuje:

$$\frac{\partial J}{\partial W} = \frac{2}{N} U (U^T W - \Gamma) \quad 4.3.7$$

gde su matrice  $U$  i  $\Gamma$  definisane kao:

$$U = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & \dots & Z_n \\ & i & & \end{bmatrix} \quad 4.3.8$$

$$\Gamma = [\gamma(Z_1) \quad \gamma(Z_2) \dots \gamma(Z_n)]^T$$

Matrica  $U$  se naziva matrica vektora merenja, a matrica  $\Gamma$  je matrica željenih izlaza. U linearnom slučaju, rešenje za optimalni vektor  $W$  se dobija u zatvorenoj formi, tj. može se eksplicitno odrediti kao:

$$W = (UU^T)^{-1} U \Gamma \quad 4.3.9$$

dok se u nelinearnim slučajevima moraju primeniti iterativne metode.

#### **4.4. Metode za testiranje uspešnosti klasifikacije**

*U ovom poglavlju, prikazani su načini testiranja uspešnosti procesa klasifikacije korišćeni i za ocenu nepouzdanosti koju u proceduru donešenja odluke o poreklu unosi svaki njen korak. Poseban akcenat stavljen je na predstavljanje rezultata klasifikacije i testiranja njene uspešnosti u arheološkom kontekstu, koji se ne sme zanemariti u interpretaciji.*

Prateći korake algoritma kojima se realizuje procedura za utvrđivanje porekla arheološke keramike može se zaključiti da svaki od njih unosi izvesnu nepouzdanost u konačnu odluku o poreklu. Zato je neophodno proceniti njihove izvore, odrediti veličinu tih nepouzdanosti i predložiti načine umanjavanja. Drugim rečima, rezultat klasifikacije mora imati meru nepouzdanosti određivanja porekla.

Analitički postupak primenjen za određivanje elementarnog sastava može se smatrati standardnim postupkom (Forster i ostali 2011) i njegova nepouzdanost nema direktnog uticaja na nepouzdanost same procedure.

Formiranje matrice vektora merenja koja će predstavljati skup za obučavanje i testiranje je korak od izuzetnog značaja za nastavak procedure iako nije jednostavno definisati meru nepouzdanosti koju on unosi u proceduru. Ova nepouzdanost direktno utiče na rezultat sledećeg koraka u proceduri. Takođe, nepouzdanost koju unosi formiranje matrica može da potiče i od selekcije obeležja kojima su definisani pojedinačni vektori u matricama. Preporuka za određivanje mere ove nesigurnosti može biti usmerena na sledeća razmatranja:

§ uspostavljanje korelacije između selekcije obeležja i mere uspešnosti redukcije dimenzija,

§ ekspertska analiza selekcije obeležja

Iako je u toku definisanja procedure za određivanje porekla arheološke keramike predviđena mogućnost da se redukcija dimenzija početnog skupa može izvršiti bilo kojom metodom preporuka je da se ovaj izbor izvrši u skladu sa arheološkim kontekstom ispitivanog materijala. Sama mera nepouzdanosti koju proces redukcije dimenzija nosi izražena je *indeksom informativnosti*,  $l_{d/n}$ , kojim se određuje procenat izgubljenih informacija u toku redukcije dimenzija na način određen jednačinom 4.4.1:

$$l_{d/n} = \frac{\sum_{i=1}^d \lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} \quad 4.4.1$$

gde su  $\lambda_i$  – svojstvene vrednosti kovarijacione matrice u opadajućem redosledu,  $d$  – dimenzija redukovanog prostora i  $n$  – dimenzija početnog prostora. Za izabranu tehniku redukcije dimenzija poželjno je da ovaj indeks ima što veću vrednost. Ocena značaja nepouzdanosti ovog parametra i veličine kojom on doprinosi vrednosti ukupne nepouzdanosti procedure, smeštena je u arheološki kontekst. Drugim rečima, može se dogoditi da redukcija dimenzija bude izvedena sa minimalnim gubitkom informacija (tj. parametar  $l_{d/n}$  može imati veliku vrednost), ali da njen rezultat nema implikacija u arheološkom kontekstu. U tom slučaju umesto o uspešnosti postupka redukcije dimenzija, možemo govoriti o njenoj (ne)informativnosti za datu namenu. Ono što svakako treba istaći je preporuka da se izbor metode za redukciju dimezija izvrši tako da gubitak informacija u samom procesu bude minimalan (sa što većom vrednošću indeksa

informativnosti), da rezultujuća projekcija omogući klasifikaciju i da usledi validna arheološka interpretacija.

Rezultat redukcije dimenzija u velikoj meri određuje izbor klasifikatora kojim će se vršiti klasifikacija. Izbor pogodnog klasifikatora vrši se i na osnovu unapred postavljenog ili nekog dodatnog zahteva u odnosu na sam proces klasifikacije. U slučaju procedure za određivanje porekla arheološke keramike dodatni zahtev je da proces donošenja odluke bude brz i jednostavan i ispunjen je kroz projektovanje linearnih klasifikatora. Da bi se klasifikacija mogla vršiti projektovanjem linearnog klasifikatora (koji je zbog svoje strukture najjednostavniji i zbog toga najpoželjniji za korišćenje) neophodno je da klase budu linearno separabilne, tj. da postoji linearni segment koji posmatrane grupe razdvaja bez ikakve greške klasifikacije. Ovaj zahtev se može kvantifikovati i pomoću *Batačarijine granice* (eng. *Bhattacharyya distance*),  $\mu(1/2)$ . Batačarijina granica predstavlja meru separabilnosti između dve klase i određena je izrazom 4.4.2.

$$\mu(1/2) = \frac{1}{8} (M_2 - M_1)^T \left[ \frac{\Sigma_1 + \Sigma_2}{2} \right]^{-1} (M_2 - M_1) + \frac{1}{2} \ln \frac{\left| \frac{\Sigma_1 + \Sigma_2}{2} \right|}{\sqrt{|\Sigma_1| |\Sigma_2|}} \quad 4.4.2$$

Što je vrednost ovog izraza veća to je separabilnost između klasa bolja, tj. može se projektovati klasifikator tako da greška klasifikacije bude najmanja. U slučajevima da je Batačarijina granica mala, klase ne moraju biti separabilne i tada se u zavisnosti od slučaja do slučaja ispituju mogućnosti klasifikacije projektovanjem klasifikatora složenijih oblika (kvadratni, klasifikatori bazirani na neuralnim mrežama, fazi logici, k – najbližih suseda i drugi).

Testiranje uspešnosti rezultata klasifikacije može se izvršiti na različite načine, a u radu su korišćeni sledeći pristupi:

- § unakrsna validacija bez jednog člana (eng. *leave-one-out cross validation*),
- § moć prepoznavanja (eng. *recognition ability*),
- § sposobnost predviđanja (eng. *prediction ability*),
- § korišćenjem skupa za testiranje i
- § obučavanje na skupu koji je generisan drugom analitičkom tehnikom.

Unakrsna validacija bez jednog člana je metoda u toku čije realizacije se jedan od uzoraka  $x_i$  ( $i$ -ti član matrice  $X_{n \times m}$ ) isključi iz skupa poznatih, klasifikator se isprojektuje bez njega, a zatim se uspešnost klasifikacije testira na baš tom uzorku. Ovaj postupak se ponavlja za sve uzorke, čime se procenjuje verovatnoća greške ili uspešnost klasifikacije. Moć prepoznavanja se definiše kao procenat članova skupa za obučavanje koji su korektno klasifikovani. Matematički, predstavlja odnos broja korektno klasifikovanih i ukupnog broja članova skupa za obučavanje. Sposobnost predviđanja predstavlja procenat članova iz skupa za testiranje koji su korektno klasifikovani pomoću pravila razvijenog u procesu obučavanja. Formiranje skupa za testiranje podrazumeva generisanje vektora istim analitičkim postupkom sa istim selektovanim obeležjima kao i u skupu za obučavanje, ali na uzorcima koji nisu korišćeni u procesu obučavanja. Za dodatno testiranje procedure za određivanje porekla arheološke keramike generisan je poseban skup za obučavanje koga čine vektori dobijeni različitom analitičkom tehnikom. Novi set za obučavanje formiran je kvantifikovanjem morfoloških karakteristika zrna minerala u sastavu arheološke keramike. Skup korišćenih metoda za testiranje je široko izabran i nije neophodno da se primenjuje u celini. Kako je čitava procedura novoustanovljena za ovu namenu, svaki njen korak je višestruko testiran. Minimalan skup metoda za testiranje uspešnosti klasifikacije može biti unakrsna validacija bez jednog člana i određivanje moći prepoznavanja, mada je



svakako najinformativnije određivanje sposobnosti predviđanja i testiranje pomoću skupa za testiranje.

Poznavanje (na kvantitativan način) mere nepouzdanosti koju svaki od koraka unosi u proceduru za određivanje porekla je od suštinskog značaja. Rezultat realizacije ove procedure je ne samo informacija o poreklu komada koji je predmet ispitivanja, već je pouzdanost donošenja ove odluke procenjena arheološkom interpretacijom. Iilustracije radi, ne može se uvek govoriti o pogrešno klasifikovanom uzorku, jer je možda upravo taj komad nosilac dragocene informacije o putevima trgovine koji do tada nisu razmatrani.

## LITERATURA

- Arnold GM, Collins AJ: Interpretation of transformed axes in  
1993 multivariate analysis. *Appl. Statist*, 42, 381-400.
- Baxter MJ Exploratory Multivariate Analysis in Archaeology.  
1994 Edinburgh University Press: Edinburgh.
- Baxter MJ Standardization and Transformation in Principal  
1995 Component Analysis, with Applications to Archaeometry.  
*Appl. Statist*, 44, 513-527.
- Duda RO, Hart PE, Stork DG: Pattern Classification. 2nd edition.  
2000 Wiley: New York.
- Duewer DL, Kowalski BR, Schatzki TF: Source identification of oil  
1975 spills by pattern recognition analysis of natural  
elemental composition. *Anal. Chem*, 47, 1573–1583.
- Forster N, Grave P, Vickery N, Kealhofer L: Non-destructive  
2011 analysis using PXRF: methodology and application to  
archaeological ceramics. *X-Ray Spectrom*, 40, 389–398.
- Fukunaga K Introduction to Statistical Pattern Recognition. 2nd  
1990 edition. Academic: Orlando.
- Hotelling H Analysis of a Complex of Statistical Variables Into  
1933 Principal Components. *Journal of Educational  
Psychology*, 24: 417-441 i 498-520.
- Jolliffe IT Principal Component Analysis. Springer: New York.  
1986
- Pearson K On lines and planes of closest fit to systems of points in  
1901 space. *Philosophical Magazine, Series B*, 2, (11): 559–  
572.

Varmuza K, Filzmoser P: Introduction to Multivariate Statistical  
2000 Analysis in Chemometrics. CRC Press: Boca Raton FL.  
Webb A  
2002 Statistical pattern recognition. John Wiley: New London.

## **5. Rezultati i diskusija**

### **5.1. Elementarni sastav arheološke keramike kao skup ulaznih podataka za određivanje porekla keramike**

*U ovom poglavlju, prikazani su uslovi pod kojima je generisan skup podataka kojima se opisuje sastav analiziranih keramičkih predmeta. Prikazani su rezultati nedestruktivne analize tela keramike korišćenjem prenosnog EDXRF spektrometra. Posebno su istaknuta dva pristupa u pripremi ovako dobijenih rezultata za dalju obradu tehnikama prepoznavanja oblika. Jedan pristup je korišćenjem ADMCA softverskog paketa pripadajućeg za korišćeni instrument, a drugi je korišćenjem neuralnih mreža sa radijalnom osnovom.*

#### **5.1.1. Određivanje elementarnog sastava keramičkih predmeta EDXRF spektrometrijskom analizom**

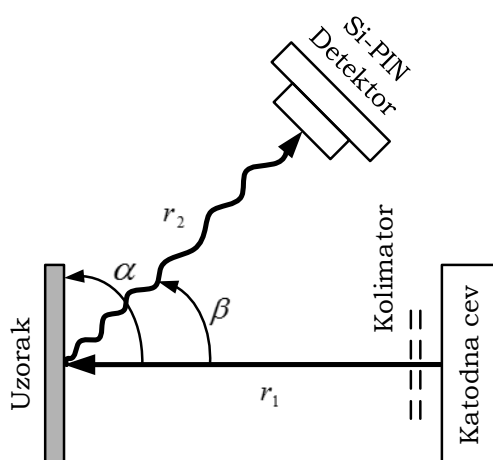
Nedestruktivno ispitivanje fragmenata neolitske keramike sa tri arheološka lokaliteta izvršeno je primenom EDXRF spektrometrijske analize. Ove analize izvršene su korišćenjem pokretnog (prenosnog, eng. *portable*) spektrometra koji je u potpunosti konstruisan u Laboratoriji za hemijsku dinamiku, Instituta za nuklearne nauke “Vinča” u Beogradu. Detaljan opis ovog instrumenta, kao i prikaz njegovih performansi dat je u odeljku 3.2. Iako su sve analize fragmenata arheološke keramike, obuhvaćene ovom disertacijom, izvršene u

laboratorijskim uslovima, kompletan analitički postupak prilagođen je uslovima analiziranja artefakata na terenu. Prvi parametar čije podešavanje zahteva posebnu pažnju u odnosu na uslove rada je geometrija sistema, slika 5.1.1. Uglovi  $\alpha$  (ugao između ekscitacionog snopa X-zračenja i površine predmeta koji se analizira) i  $\beta$  (ugao između uzdužne ose detektora i ekscitacionog snopa X-zračenja) određeni su tako da sistem bude najmanje perturbiran u terenskim uslovima. Eksperimentalno je utvrđeno da je kombinacija  $\alpha = 90^\circ$  i  $\beta = 45^\circ$  najstabilnija za ponovljena merenja (Gajić-Kvašček i ostali 2012). Rastojanja  $r_1$  (rastojanje između vrha kolimatora katodne cevi i površine predmeta koji se analizira) i  $r_2$  (rastojanje detektora od površine predmeta koji se analizira) pri kojima se postiže maksimalna efikasnost analitičkog procesa u datim uslovima su 16 mm i 21 mm, respektivno. Struja i napon katodne cevi su 800  $\mu\text{A}$  i 35 kV, čime je postignuta optimalna snaga pobude, ali i detekcija svih elemenata od značaja za proučavanje porekla keramike tj. potencijalnih nosilaca informacije o poreklu. Vreme akvizicije spektralnih podataka je 100 s, i odabrano je tako da bude uporedivo sa karakterističnim vremenom akvizicije kada se koriste ručni (*hand-held*, hhEDXRF) spektrometri. Svi parametri održavani su konstantnim u toku svih merenja u ovom istraživanju.

### 5.1.2. Selekcija obeležja iz spektra korišćenjem ADMCA softverskog paketa

Detektorski sistem kontrolisan je pomoću ADMCA (Amptek Inc.) softverskog paketa za akviziciju, obradu i prikaz spektara. Pored podešavanja i kontrole detektorskog sistema, ovaj softver omogućava i akviziciju i prikaz spektra karakterističnog X-zračenja u opsegu koji je određen eksperimentalnim podešavanjem uslova ekscitacije i sistema za

akviziciju, zatim pretraživanje pikova i određivanje tzv. oblasti od interesa, ROI (eng. *Region of Interest*). Na  $x$ -osi predstavljeni su kanali višekanalnog analizatora (rezolucija EDXRF spektrometra korišćenog za ove analize je postavljena na 2048 kanala), a na  $y$ -osi predstavljen je broj karakterističnih X-zraka nastalih u ispitivanom materijalu, dospelih do detektora i registrovanih u datom kanalu višekanalnog analizatora.



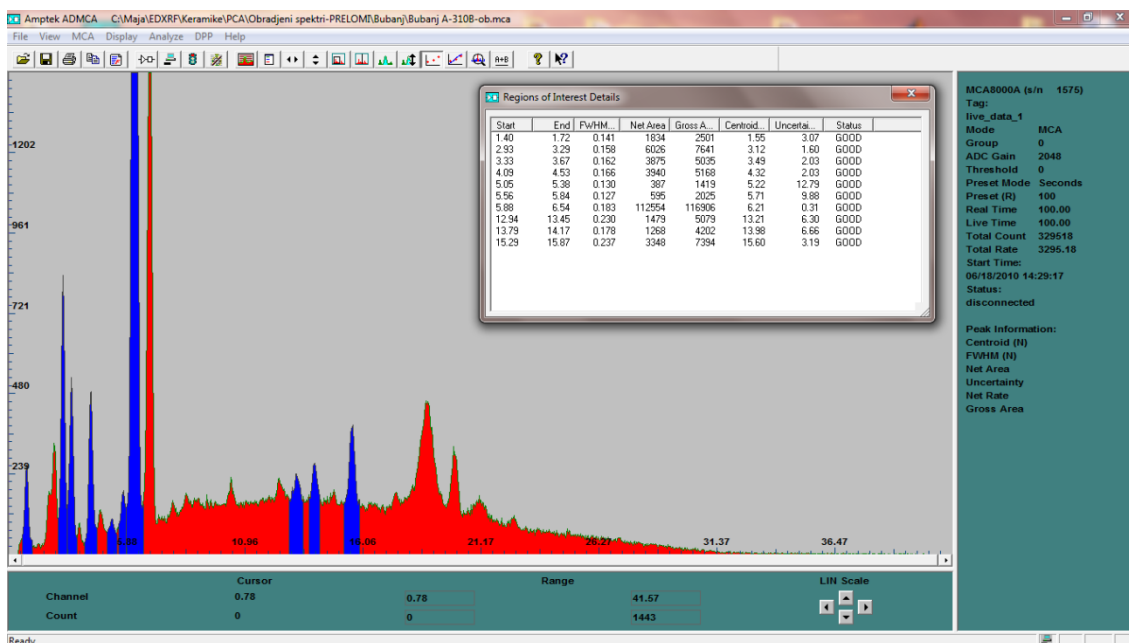
Slika 5.1.1. Šematski prikaz geometrije mernog sistema EDXRF spektrometra.

Pomoću ADMCA softvera moguće je izvršiti i kalibraciju spektrometra. Kalibracijom se svakom kanalu može pridružiti odgovarajuća energija (u keV), čime  $x$ -osa postaje energetska. Na ovaj način omogućena je identifikacija hemijskih elemenata koji se nalaze u uzorku i čije su energije karakterističnog X-zračenja detektovane u spektru. Realizacijom odgovarajućeg postupka u ADMCA softveru omogućeno je definisanje tzv. oblasti od interesa, ROI (delovi spektra na slici 5.1.2. koji su plave boje). ROI predstavlja niz kanala koji najbolje definišu željeni pik. Broj kanala u nizu kojim se definiše ROI je

promenljiv i zavisi od oblika pika za koji se ROI definiše. Prvi i poslednji kanal kojim se definiše ROI su prvi i poslednji minimum funkcije oblika pika. Korisničko okruženje ADMCA softvera za jedan karakterističan spektar nastao analizom fragmenta neolitskog keramičkog predmeta pod uslovima koji su opisani gore, prikazan je na slici 5.1.2.

Postupkom koji je opisan moguće je da se u toku jednog merenja u datom mernom opsegu istovremeno dobiju informacije o hemijskim elementima u sastavu predmeta koji se analizira. Broj hemijskih elemenata kojim će se opisati jedno merenje može da bude različit. Pored toga što ne možemo da detektujemo elemente lakše od silicijuma u uslovima kada se ispitivanja ne obavljaju u vakuumu, može se dogoditi i da neki drugi elementi ostanu “nevidljivi” u spektru, što se može otkloniti pravilnim podešavanjem eksperimentalnih uslova za postizanje maksimalne efikasnosti analitičkog postupka. Osim toga, mogućnost detekcije elemenata zavisi i od energije karakterističnog X-zračenja i sadržaja datog elementa u uzorku. U spektrima nastalim analizom tela fragmenata keramičkih predmeta iz doba Neolita detektovano je ukupno 15 hemijskih elemenata, u zadatim eksperimentalnim uslovima. Prikaz detektovanih hemijskih elemenata u spektru neolitske keramike dat je u tabeli 5.1.1.

U daljem postupku, za svaki detektovani element određen je ROI za najintenzivniju liniju u spektru (korišćene linije prikazane su u tabeli 5.1.1), čime je praktično izvršena selekcija obeležja (eng. *feature selection*). (Napomena. Proces odabira, selekcije obeležja razlikuje se od procesa ekstrakcije obeležja za čiju se realizaciju koriste različite tehnike prepoznavanja oblika, Jain i ostali 2000). Vrednost koju svako obeležje ima određuje se iz definisanog ROI korišćenjem alata ADMCA softvera, predstavlja ukupnu površinu svakog pika određenog sa ROI i određena je parametrom *NetPeakArea*.



Slika 5.1.2. Spektar karakterističnog X-zračenja neolitske keramike, prikazan u ADMCA okruženju i prikaz selekcije obeležja od interesa za analizu (plavo označeni pikovi).

Vrednosti *NetPeakArea* predstavljaju promenljive kojima se generišu  $n$ -dimenzioni vektori merenja. Drugim rečima svako merenje opisano je sa 15 vrednosti *NetPeakArea*. Iz tabele 5.1.1. vidi se da je *NetPeakArea* za najveći broj hemijskih elemenata određena sa nepouzdanošću značajno manjom od poželjnih 10% (kako je preporučeno u Forster i ostali 2011). Svi hemijski elementi za koje je nepouzdanost u određivanju *NetPeakArea* veća od 15% nisu korišćeni za dalje analize u okviru ove disertacije. Iz ovog razloga, koji se još može izraziti i kao loša statistika odbroja za dalju analizu nisu korišćene vrednosti *NetPeakArea* za Cr, Cu, Pb i Y. Vrednost kojom se određuje loša statistika odbroja može se značajno smanjiti povećanjem vremena akvizicije podataka. Međutim, ta mogućnost u ovom radu nije iskorišćena iz razloga simuliranja terenskih uslova rada i kontrole uticaja selekcije obeležja na rezultat klasifikacije. Vrednosti



*NetPeakArea* za nikel, takođe nisu korišćene za dalju analizu, zbog velikog broja nedostajućih podataka (u velikom broju uzoraka ovaj hemijski element je bio ispod nivoa minimalne granice detekcije). Od maksimalnog broja detektovanih hemijskih elemenata iz svih pomenutih razloga za dalju analizu korišćene su vrednosti *NetPeakArea* za sledećih deset elemenata – Si, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Zn, Rb, Sr, Zr. Ovaj skup hemijskih elemenata koji definišu elementarni sastav ispitivane keramike može se smatrati dovoljnim (reprezentativnim) za izučavanje porekla (Forster i ostali 2011, Bakraji i ostali 2010, Freitas i ostali 2010).

Tabela 5.1.1. Prikaz detektovanih hemijskih elemenata u spektru neolitske keramike, linije karakterističnog X-zračenja koje su korišćene za određivanje parametra *NetPeakArea* i prosečna nepouzdanost u određivanju *NetPeakArea*.

Hemijski element	Linija karakterističnog X-zračenja	Energija [keV]	Nepouzdanost %
Si	K <sub>α</sub>	1,74	3,5 - 5,1
K	K <sub>α</sub>	3,31	1,7 - 3,0
Ca	K <sub>α</sub>	3,69	1,7 - 2,1
Ti	K <sub>α</sub>	4,51	1,9 - 2,5
Cr	K <sub>α</sub>	5,41	loša statistika odbroja
Mn	K <sub>α</sub>	5,89	5,9 - 7,3
Fe	K <sub>α</sub>	6,4	0,3 - 0,4
Ni	K <sub>α</sub>	7,47	loša statistika odbroja
Cu	K <sub>α</sub>	8,04	loša statistika odbroja
Zn	K <sub>α</sub>	8,63	6,9 - 9,4
Pb	L <sub>α</sub>	10,55	loša statistika odbroja
Rb	K <sub>α</sub>	13,39	7,1 - 9,7
Sr	K <sub>α</sub>	14,16	6,4 - 7,2
Y	K <sub>α</sub>	14,95	loša statistika odbroja
Zr	K <sub>α</sub>	15,77	4,1 - 5,8

Da bi se u što većoj meri otklonile posledice prirodne nehomogenosti keramike koja je ispitivana, svako merenje je ponovljeno tri puta. U zavisnosti od pojedinačnih karakteristika i dostupnih mesta za merenje tačke su birane tako da budu na više različitih preloma. Gde ovo nije bilo izvodljivo merenja su vršena u bliskim tačkama na jednom prelomu. Vrednost *NetPeakArea* za dati hemijski element određena je kao srednja vrednost tri izmerene vrednosti.

Za ovaj rad, imajući u vidu izabrani arheometrijski pristup izučavanju porekla keramike preko njenog dobro definisanog porekla, analizirano je 67 fragmenata keramike sa tri lokaliteta. Sa lokaliteta Vinča analizirano je 29 fragmenata, sa nalazišta Pločnik 25 pogodnih fragmenata, dok je sa arheološkog nalazišta Bujanj analizirano 13 ostataka keramičkih predmeta. Svako pojedinačno merenje keramičkog predmeta možemo da predstavimo  $n$ -dimenzionim vektorom, gde  $n$  predstavlja broj detektovanih hemijskih elemenata u sastavu materijala koji je analiziran. Na ovaj način formiran je skup od 67 desetodimenzionih vektora kojima je opisan elementarni sastav neolitske keramike (tabele 5.1.2 – 5.1.4). Ovi vektori formiraju skup za obučavanje koji se može predstaviti  $67 \times 10$ -dimenzionom matricom, *TDS*. Svaka promenljiva u skupu za obučavanje predstavlja površinu pika datog elementa u sastavu keramike, izražen kao srednja vrednost tri merenja karakterističnog X-zračenja detektovanog za vreme od 100s, tj. srednju vrednost parametra *NetPeakArea*. Dodatnih osam uzoraka, koji su zadovoljili iste kriterijume i koji su analizirani na isti način kao i uzorci koji formiraju skup za obučavanje, iskorišćeno je za formiranje skupa za kontrolu (testiranje). Pomoću njih je izvršena provera zaključaka izvedenih u procesu obučavanja. Skup za testiranje čini osam 10-dimenzionih vektora elementarnog sastava keramike (tabela 5.1.5), koji formiraju  $8 \times 10$ -dimenzionu matricu, *TS*. Od ovih osam fragmenata četiri su sa lokaliteta Vinča, dva sa lokaliteta Pločnik i preostala dva sa lokaliteta Bujanj.

Tabela 5.1.2. Srednje vrednosti *NetPeakArea* elemenata u sastavu arheološke keramike sa lokaliteta Vinča, određenih EDXRF spektrometrijskom analizom.

Oznaka fragmenta	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	Rb	Sr	Zr
<b>1 D</b>	651	2117	8407	1591	752	51158	755	588	935	1429
<b>4 C</b>	1046	3249	5659	3186	674	90966	917	949	886	1511
<b>6 D</b>	1346	3177	3042	3416	747	81409	1123	1209	1152	1896
<b>7 D</b>	1605	4563	5789	4072	1094	113664	777	994	1434	2524
<b>8.1 C</b>	378	1715	2461	2206	390	64553	788	858	1331	2158
<b>8.2 B</b>	697	3763	7510	3978	697	112069	10284	921	1898	2852
<b>9.1 D24</b>	967	2674	3417	2846	467	76518	12010	981	1284	2260
<b>9.2 D</b>	1281	4348	5551	4112	1061	96497	588	734	1447	2071
<b>11 D</b>	1669	4621	7286	3622	1022	100779	19253	793	2349	3709
<b>12 E</b>	2223	5549	8067	5350	615	146304	1043	1430	2078	2807
<b>14 B</b>	1654	4248	4084	4736	615	99695	4209	1168	1501	2446
<b>15 E</b>	1694	4717	4416	4184	666	111217	2937	1255	1454	2871
<b>16 D</b>	1552	5426	4969	4189	951	90613	945	1211	2100	2385
<b>17 E</b>	1557	4524	3765	5383	1323	125703	4156	1501	1379	3485
<b>18 C</b>	1240	3248	5058	3295	1202	81028	4712	677	1109	2281
<b>19 D</b>	1611	4913	8043	4617	1027	122806	1135	1405	1963	2029
<b>20.1 B</b>	1254	3101	3622	3148	1177	88028	6716	828	1582	3060
<b>20.3 C</b>	1125	3386	5122	3380	715	98386	827	1287	1614	2415
<b>20.4 D</b>	1672	4356	4684	4355	1087	115203	680	1786	1499	2839
<b>20.5 B</b>	1675	4229	3910	4241	623	103226	927	1110	1688	1793
<b>21 D</b>	1166	3344	4778	2939	736	81798	530	1317	1231	2555
<b>22 C</b>	1667	3885	5037	4277	1027	100313	1225	794	992	1980
<b>23 C</b>	1587	4021	7606	4243	1165	115955	1511	935	1265	2415
<b>24 C</b>	1483	2880	2902	3570	883	103845	530	935	1137	1747
<b>25 D</b>	1816	4204	9761	3910	1101	102442	530	750	1763	1960
<b>26 D</b>	991	3370	5715	2769	1870	80643	549	962	735	1730
<b>27 C</b>	1552	3322	5256	4597	1565	113880	767	872	1092	2719
<b>EDM 33 A</b>	948	3411	6024	3291	658	85033	831	544	1621	2082
<b>C-417 F</b>	704	3513	11564	2556	4399	79548	566	732	578	2481

Tabela 5.1.3. Srednje vrednosti *NetPeakArea* elemenata u sastavu arheološke keramike sa lokaliteta Pločnik, određenih EDXRF spektrometrijskom analizom.

Oznaka fragmenta	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	Rb	Sr	Zr
<b>139 E</b>	664	2279	10646	2411	1034	91358	1000	647	1327	1211
<b>169 A</b>	761	2127	2544	2490	1990	72128	338	642	560	769
<b>170 E</b>	923	2056	2701	2517	2174	63888	796	841	1226	863
<b>195 F</b>	334	1164	1688	1308	590	34169	1047	572	810	948
<b>365 C</b>	1092	1825	2335	2298	1402	65318	870	611	1016	856
<b>415 D</b>	751	2251	3260	2531	1012	80889	2021	1223	1235	1309
<b>18422 C</b>	725	2049	3109	2473	1761	67141	1065	744	1223	1232
<b>18423 A</b>	1280	3123	4105	3747	2964	101941	896	1160	1800	3009
<b>18428</b>	667	2317	3405	2189	457	63324	498	770	643	729
<b>18431 D</b>	476	1516	3552	1575	1766	51859	248	535	753	906
<b>18438 A</b>	518	1597	1839	1810	303	62225	438	515	1057	1025
<b>18585 A</b>	711	1746	4487	2771	1700	75282	642	537	910	1723
<b>18649 A</b>	940	2435	8045	2426	1047	81553	426	515	1161	1411
<b>18682 A</b>	354	929	1182	1231	497	37540	523	528	663	1727
<b>18856 D</b>	1111	3151	3283	3831	738	82912	910	1096	1123	1260
<b>25007 D</b>	1672	3500	3312	4375	383	106055	1070	984	1323	2398
<b>25009 I</b>	1114	3308	6375	4065	1293	97592	1071	695	1429	1629
<b>25109 F</b>	935	3587	11912	3334	6301	94999	2912	1269	1311	1981
<b>25165 B</b>	372	541	2806	722	494	19782	248	304	745	604
<b>KESA 22 C</b>	665	3053	3278	2983	770	80247	512	1013	1151	2466
<b>MALA 78 A</b>	999	2231	3857	3542	1065	82697	338	663	1144	2266
<b>FIGURINA A</b>	1665	4527	9822	5000	1963	144080	885	1448	1221	1917
<b>TI 8 A</b>	704	2975	3614	4631	393	77770	414	540	1650	1759
<b>TROUGAO G</b>	1615	3804	4534	4806	518	126770	596	901	1360	1866
<b>ŽRTVENIK F</b>	1130	2692	4297	3913	1055	112569	1011	894	732	2004

Tabela 5.1.4. Srednje vrednosti *NetPeakArea* elemenata u sastavu arheološke keramike sa lokaliteta Bujanj, određenih EDXRF spektrometrijskom analizom.

Oznaka komada	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	Rb	Sr	Zr
<b>87 E</b>	1282	6069	2278	4252	1449	121774	1067	1216	934	2348
<b>168 C</b>	2248	6062	6012	6519	1547	145407	804	1869	2164	1816
<b>224 E</b>	1926	6628	6747	5492	1300	142579	513	1278	2550	2744
<b>258 C</b>	1031	4143	3894	3257	1993	103982	509	1289	1117	1620
<b>293 D</b>	1073	5487	4418	4454	2881	150335	679	764	2243	1394
<b>297 D</b>	1361	5407	4081	4116	1817	111259	1777	759	2216	1703
<b>300 E</b>	1568	4277	3914	3676	1418	97377	1493	1258	1265	1519
<b>310 B</b>	1834	6026	3875	3940	595	112554	415	1479	1268	3348
<b>311 D</b>	1867	5700	2906	3921	612	114653	4549	1513	1353	2332
<b>313 C</b>	1197	4644	4762	5587	741	149050	522	1567	1220	1225
<b>317 F</b>	674	4040	3054	2529	1234	65438	415	661	906	1288
<b>323 F</b>	1444	7159	3216	5693	564	142511	697	1290	1131	2081
<b>324 F</b>	1289	5869	3638	4882	1539	133702	5153	1194	1108	1894

Tabela 5.1.5. Srednje vrednosti *NetPeakArea* elemenata u sastavu fragmenata arheološke keramike koji su korišćeni za testiranje, određenih EDXRF spektrometrijskom analizom.

Lokalitet	Oznaka komada	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	Rb	Sr	Zr
Bujanj	<b>3 A</b>	866	5820	3724	3527	1671	146804	1250	688	1215	983
	<b>146 D</b>	920	4223	4671	2996	1001	94074	28982	1294	1553	1679
Pločnik	<b>17828 B</b>	506	1721	2871	1832	2711	43301	364	471	591	739
	<b>PEHAR D</b>	732	2062	23939	2064	813	88767	884	761	1051	1749
Vinča	<b>3J</b>	1637	5232	11111	5817	1075	130378	940	1228	1710	2461
	<b>20.2 B</b>	1567	4033	6345	4016	1615	105243	1760	803	2265	2978
	<b>U 931 A</b>	537	2532	6990	1934	804	57425	199	622	871	1511
	<b>2 G</b>	1280	3747	6006	3758	1409	105165	4006	756	1359	3213

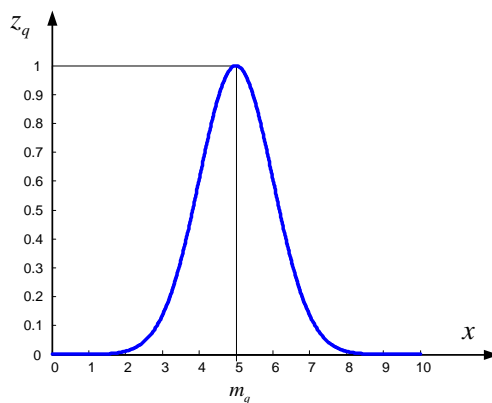
### 5.1.3. Selekcija obeležja iz EDXRF spektra korišćenjem neuralnih mreža sa radijalnom osnovom

Prethodno opisan postupak generisanja desetodimenzionih vektora merenja u velikoj meri zavisi od operatora koji obrađuje spektar. Definisanje ROI, tj. definisanje broja kanala unutar kojih će biti izvršeno sumiranje detektovanih karakterističnih X-zraka, u potpunosti je uslovljen iskustvom operatora. Iskustvo nije jedini, mada je svakako najznačajniji faktor uticaja na rezultat. Vreme potrebno za obradu spektara na ovaj način (u smislu selekcije obeležja) onemogućava da se postigne zadovoljavajuća brzina izvršenja procedure za utvrđivanje porekla keramike. Jedna od najznačajnijih osobina ove procedure je brzina kojom se nakon izvršene analize mogu izvesti potrebni zaključci, kako je opisano u odeljku 4.1. Da bi se korak generisanja vektora merenja u predloženoj proceduri realizovao u prihvatljivom vremenu neophodno je automatizovati postupak obrade spektara.

Najpouzdaniji i najjednostavniji način obrade spektara je da se koriste informacije iz čitavog spektra, tj. da se on posmatra kao jedinstvena celina bez ekstrakcije onih obeležja (pikova i njihovih karakteristika) koji su od interesa (Freitas i ostali 2010). Međutim, ovaj način nije prihvatljiv u situacijama kada je broj analiziranih uzoraka manji od broja kanala u kojima je registrovan spektar. Drugim rečima, kada se analizira manje uzoraka (u našem slučaju 67 uzoraka) od postavljenog broja kanala u višekanalnom analizatoru (u našem slučaju 2048 kanala) pojavljuje se problem, tzv. „kletva“ dimenzionalnosti (eng. *curse of dimensionality*, Fukunaga i ostali 1989) i korak koji nakon ovog sledi u proceduri donošenja odluke, a to je redukcija dimenzija, ne može biti realizovan. U ovakvim situacijama neophodno je automatizovati proces selekcije obeležja na neki drugi način. Od svih raspoloživih

tehnika (čija se upotreba sreće u rešavanju ovakvih i sličnih problema, Beltran i ostali 2006) korišćenje neuralnih mreža sa radijalnom osnovom dalo je najbolje rezultate (Kvaščev i ostali 2012).

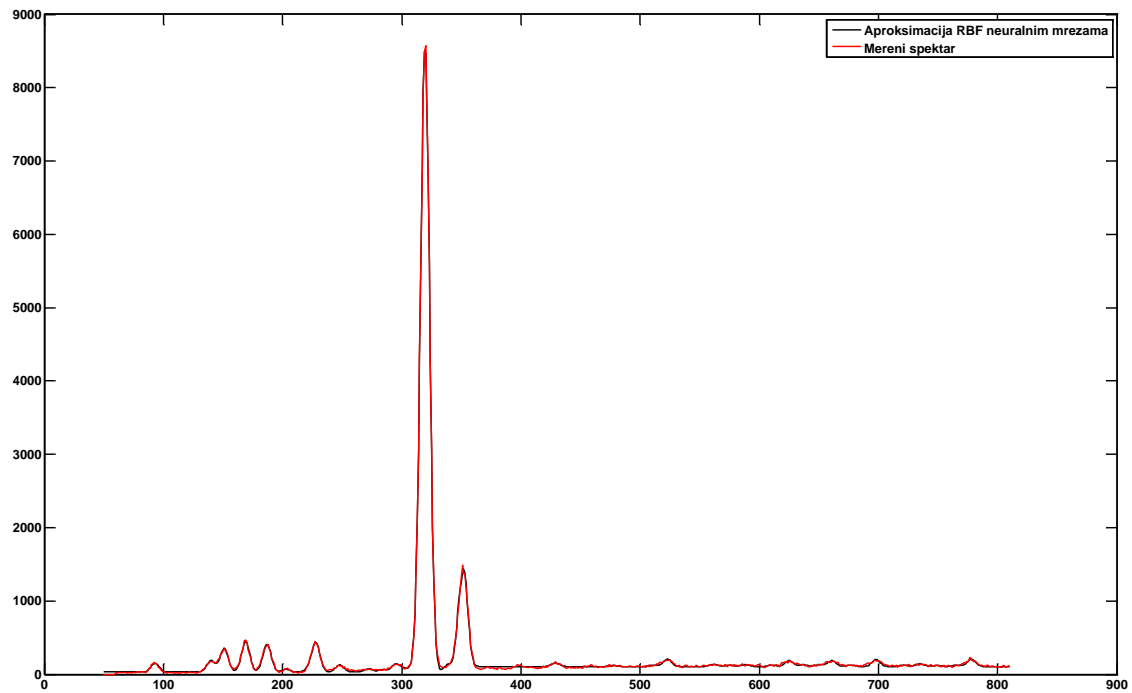
Namena neuralnih mreža radijalne osnove je da izvrše aproksimaciju date funkcije spektra uklapanjem većeg broja različito parametrizovanih funkcija radijalnog tipa (normalizovanih Gausovih funkcija). ASCII zapis sa 2048 podatka sa detektora predstavlja ulazne podatke koje će RBF neuralna mreža aproksimirati odgovarajućim skupom Gausovih funkcija koje su potpuno određene parovima ( $m_q$  i  $\sigma_q$ ) (slika 5.1.3).



Slika 5.1.3. Normalizovana Gausova funkcija (npr.  $m_q = 5$ ,  $\sigma_q = 1$ ).

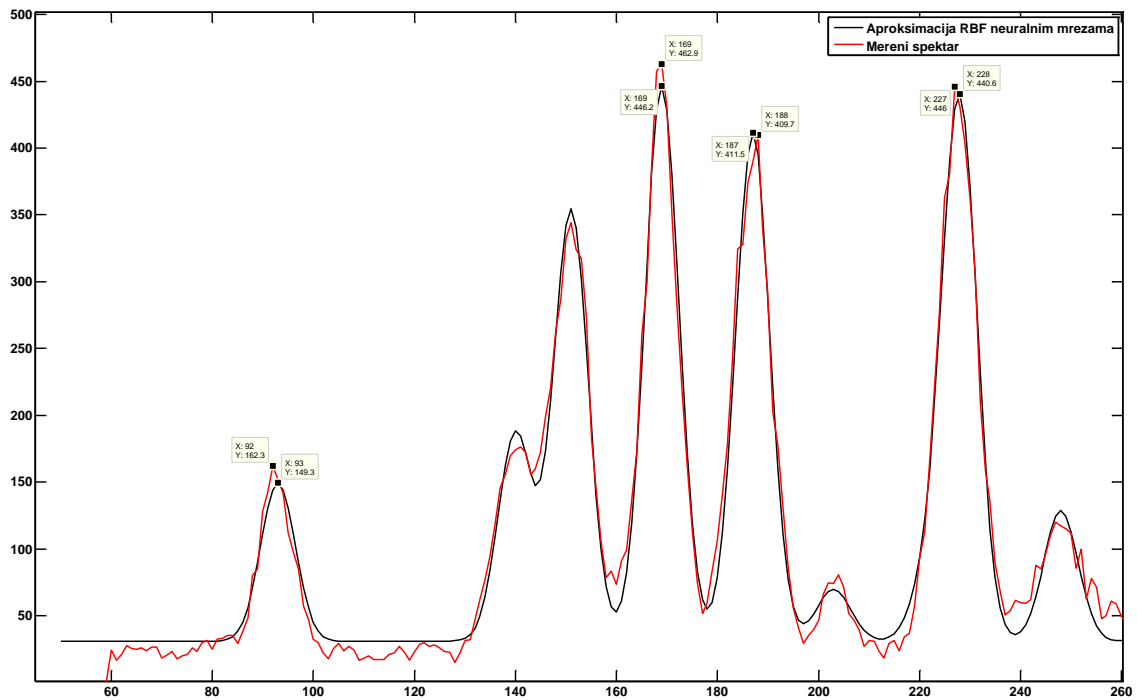
Priroda spektra nastalog primenom EDXRF spektrometrijske analize keramike je takva da je svaki detektovani hemijski element koji se nalazi u analiziranom materijalu predstavljen nizom kanala u koje su smeštene vrednosti broja signala dospelih do detektorskog sistema. Na taj način informacija o svakom pojedinačnom hemijskom elementu može se prirodno opisati Gausovom funkcijom, sa centrom oko vrednosti energije linije karakterističnog X-zračenja koja je korišćena za dati hemijski element. Ova vrednost je unapred poznata, tako što je definisan opseg u kome se ona nalazi. Na ovaj način moguće je čitav

spektar opisati kao sumu odgovarajućih normalizovanih Gausovih funkcija raspodele, sa odgovarajućim centrima i amplitudama (pojačanjima od skrivenog sloja neurona ka izlaznom sloju), kojima se predstavlja dati hemijski element u materijalu. Rezultat ovakve aproksimacije prikazan je na slikama 5.1.4 - 5.1.7.

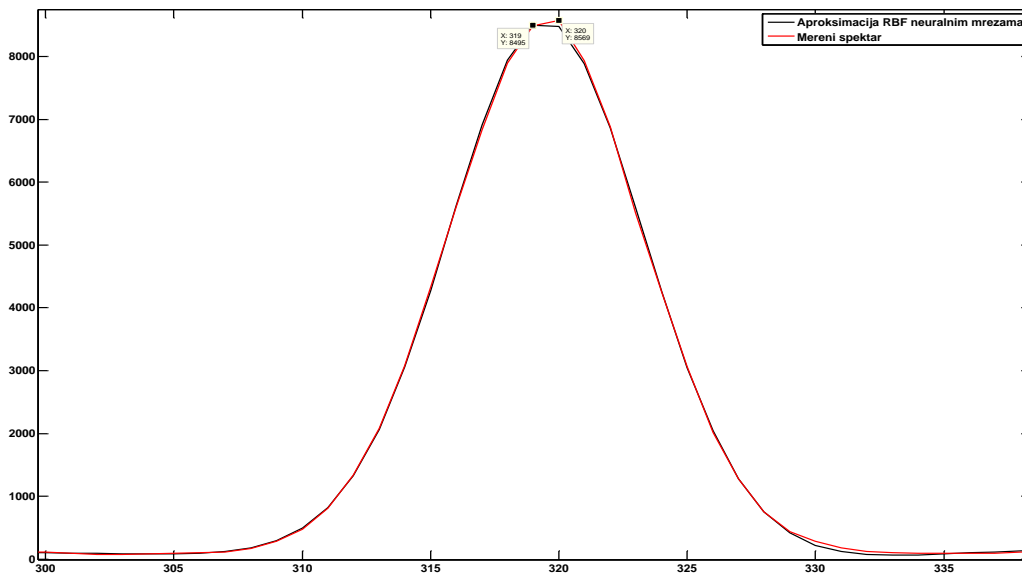


Slika 5.1.4. Aproksimacija EDXRF spektra neuralnom mrežom.

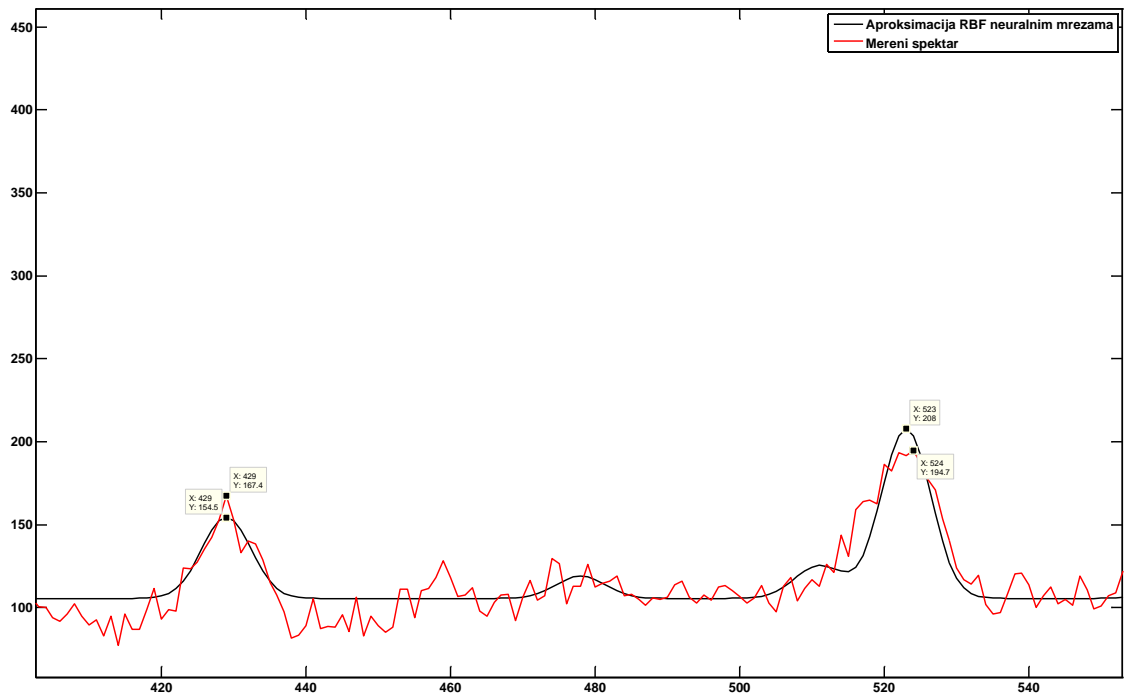




Slika 5.1.5. Deo EDXRF spektra i spektra aproksimiranog korišćenjem neuralne mreže sa radijalnom osnovom.



Slika 5.1.6. Deo EDXRF spektra i aproksimiranog spektra korišćenjem neuralne mreže sa radijalnom osnovom za pik sa dobrom statistikom odbroja.



Slika 5.1.7. Deo EDXRF spektra i aproksimiranog spektra korišćenjem neuralne mreže sa radijalnom osnovom za pik sa lošijom statistikom odbroja.

Uspešnost aproksimacije spektra neuralnim mrežama sa radijalnom osnovom određena je parametrima koji su opisani u poglavlju 2.4 (tabela 2.4.1). Vrednosti pobrojanih parametara izračunate su za spektre u celini (za svih 2048 ulaznih vektora) i prikazane su tabeli 5.1.6. Dodatna ocena tačnosti aproksimacije EDXRF spektra RBF neuralnom mrežom izvršena je na sledeći način. Za šest slučajno odabranih spektara (po dva iz svake grupe) određene su vrednosti visine pika iz ASCII zapisa za svaki od 15 hemijskih elemenata. Ove vrednosti upoređene su sa vrednostima koje generiše RBF neuralna mreža (tabela 5.1.7).

Tabela 5.1.6. Srednja kvadratna, srednja apsolutna greška i indeks slaganja aproksimacije EDXRF spektra RBF neuralnim mrežama.

	<b>RMSE</b>	<b>MAE</b>	<b>IA</b>			<b>RMSE</b>	<b>MAE</b>	<b>IA</b>	
			%					%	
1	22.2	15.3	0.99991	99.99106	34	19.6	12.6	0.99985	99.98517
2	30.0	20.9	0.99989	99.98871	35	29.4	17.6	0.99989	99.98894
3	33.2	20.1	0.99986	99.98565	36	19.4	12.4	0.99983	99.98329
4	21.0	14.7	0.99989	99.98924	37	25.4	15.3	0.99989	99.98929
5	24.5	16.9	0.99993	99.99291	38	23.7	14.8	0.99988	99.98881
6	24.3	15.6	0.99987	99.98728	39	14.5	9.8	0.99979	99.97898
7	21.3	14.3	0.99987	99.98727	40	22.0	13.5	0.99984	99.98435
8	29.7	18.3	0.99982	99.98156	41	19.4	13.5	0.99985	99.98515
9	24.4	17.3	0.99988	99.98777	42	23.5	15.5	0.99989	99.98874
10	24.3	16.1	0.99993	99.99284	43	19.5	12.8	0.99976	99.97569
11	16.2	10.9	0.99984	99.98355	44	27.8	18.5	0.99984	99.98356
12	26.7	17.4	0.99991	99.99066	45	20.0	13.9	0.99982	99.98201
13	28.4	17.8	0.99988	99.98795	46	24.3	15.5	0.99983	99.98301
14	21.5	12.4	0.99985	99.98545	47	33.2	21.0	0.99972	99.97182
15	17.0	10.2	0.99985	99.98519	48	26.6	18.1	0.99991	99.99128
16	16.3	10.8	0.99983	99.98254	49	25.4	16.1	0.99983	99.98269
17	10.3	6.8	0.99976	99.97609	50	25.7	16.9	0.99986	99.98577
18	20.0	12.0	0.99975	99.9752	51	24.8	16.3	0.99980	99.98017
19	17.4	11.2	0.99988	99.98768	52	26.7	16.6	0.99988	99.98785
20	16.6	10.9	0.99984	99.98359	53	21.0	14.0	0.99982	99.98223
21	26.1	15.1	0.99983	99.98267	54	28.9	16.8	0.99985	99.98526
22	15.2	9.8	0.99985	99.98479	55	21.9	14.5	0.99984	99.98369
23	13.4	9.2	0.99982	99.98216	56	24.9	14.7	0.99983	99.98299
24	15.5	9.6	0.99984	99.98385	57	24.5	17.4	0.99988	99.988
25	16.0	10.8	0.99988	99.98796	58	23.2	15.3	0.99987	99.98656
26	25.0	14.0	0.99975	99.97522	59	20.1	13.5	0.99984	99.98382
27	11.3	7.7	0.99976	99.97617	60	24.7	15.6	0.99984	99.98408
28	17.1	12.3	0.99988	99.98843	61	23.9	15.1	0.99989	99.98876
29	23.2	16.0	0.99987	99.98728	62	19.6	12.6	0.99991	99.99056
30	26.3	16.4	0.99980	99.98033	63	25.7	15.7	0.99983	99.983
31	24.8	16.7	0.99982	99.98215	64	18.2	11.8	0.99986	99.98647
32	8.2	5.9	0.99955	99.95521	65	25.9	14.9	0.99986	99.98606
33	21.4	13.3	0.99981	99.98118	66	18.3	12.8	0.99988	99.98788
					67	17.3	12.3	0.99988	99.98796

	<b>RMSE</b>	<b>MAE</b>	<b>IA</b>	
<b>Max</b>	33.2	21.0	0.99993	99.99
<b>Min</b>	8.2	5.9	0.99955	99.96

Tabela 5.1.7. Srednja kvadratna, srednja apsolutna greška i indeks slaganja aproksimacije vrednosti intenziteta pika EDXRF spektra i odgovarajućeg selektovanog obeležja korišćenjem RBF neuralnih mreža.

Uzorak	1		7		28		31		41		57	
	NM	ASCII	NM	ASCII	NM	ASCII	NM	ASCII	NM	ASCII	NM	ASCII
Si	196	215	215	222	149	162	150	181	174	187	227	239
K	828	902	607	647	446	463	516	540	484	509	605	621
Ca	375	358	509	499	411	410	1464	1474	421	423	611	584
Ti	515	500	430	433	441	446	413	393	430	404	518	517
Cr	149	136	119	108	76	70	110	100	98	90	114	112
Mn	255	254	265	261	146	142	824	788	189	191	233	211
Fe	12659	12597	10079	10166	8495	8569	9974	9996	8623	8603	11933	11799
Ni	167	181	207	217	106	130	135	136	147	161	132	143
Cu	221	223	279	275	155	167	420	393	214	218	192	188
Zn	236	243	202	198	208	195	269	270	200	193	239	233
Pb	246	257	202	205	188	188	243	237	191	199	231	218
Rb	231	228	274	279	201	189	251	242	214	209	282	266
Sr	233	233	219	215	188	181	211	200	195	183	252	235
Y	173	174	159	160	124	134	168	170	141	140	175	179
Zr	299	283	287	282	209	227	275	251	284	263	357	341
RMSE	27		25		22		19		14		37	
MAE	17		13		14		15		11		20	
IA	0.99998		0.99997		0.99997		0.99998		0.99999		0.99996	
IA [%]	99.99808		99.99735		99.99708		99.99845		99.99891		99.99587	

Iz tabele 5.1.7. se može zaključiti da je opseg odstupanja vrednosti intenziteta pika odgovarajućeg hemijskog elementa koje su generisane korišćenjem RBF neuralnih mreža od odgovarajućih ASCII vrednosti generisanih u toku merenja od 0,15% – 19%. Ovo je i potvrđeno visokim vrednostima indeksa slaganja za pomenute vrednosti, kao i vrednostima relativne integralne apsolutne greške za svih 2048 podataka u celokupnom spektru i RBF neuralnoj mreži koje se nalaze u intervalu 3,8% - 6,5%. Ovime se aproksimacija EDXRF spektra RBF neuralnom mrežom može smatrati uspešnom, a sam metod selekcije obeležja validnim.

U procesu obučavanja RBF neuralnih mreža generisano je 67 vektora obeležja sastavljenih od  $l$  parova  $(m_q, w_{1q})$  koji opisuju svaki čvor u skrivenom sloju, tj. njegov položaj u celokupnom spektru ( $m_q$ ) i težinu izlaznog neurona,  $w_{1q}$ , koja zapravo predstavlja amplitudu odgovarajuće radijalne funkcije (čime je opisan intenzitet svakog

pojedinačnog pika). Broj čvorova u skrivenom sloju u posmatranom slučaju unapred je određen i iznosi 15 (na taj način su obuhvaćeni svi hemijski elementi kojima se karakteriše struktura keramičkog predmeta). Ovaj broj je izabran:

§ na osnovu zaključaka prethodne analize spektara (u toku generisanja skupa *TDS*) i

§ da bi se utvrdio uticaj elemenata Cr, Ni, Cu, Pb i posebno Y za koje se u prethodnom postupku selekcije obeležja, parametar *NetPeakArea* nije mogao odrediti sa zahtevanom tačnošću.

Ovim postupkom selekcije obeležja formiran je novi skup za obučavanje koji je predstavljen 67 x 15 dimenzionom matricom, *TDS<sub>i</sub>* (tabele 5.1.8 – 5.1.10), koja će biti tretirana na isti način kao i matrica *TDS*, u nastavku procedure za donošenje odluke o poreklu.

Tabela 5.1.8. Vrednosti obeležja selektovanih iz EDXRF spektara arheološke keramike sa lokaliteta Vinča korišćenjem RBF neuralnih mreža.

	Si	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb	Rb	Sr	Y	Zr
	70.24	299.01	974.06	176.75	37.03	118.67	4592.10	0.00	35.28	81.20	75.92	41.77	80.05	12.60	109.47
	128.32	443.98	592.52	365.88	69.43	143.64	7568.33	18.12	66.86	0.00	80.04	93.14	96.38	35.34	135.40
	143.96	453.82	390.50	399.08	67.59	156.20	7854.35	40.42	107.20	93.51	84.49	87.71	107.56	34.12	177.24
	174.75	594.28	711.22	486.87	95.69	201.52	10648.84	7.08	72.76	93.67	92.65	101.84	153.88	31.53	167.27
	31.93	233.42	316.48	264.67	54.05	92.74	6176.18	33.71	76.17	109.19	73.22	79.92	138.55	40.39	188.52
	83.97	521.24	938.50	467.21	73.00	167.85	10085.12	683.27	901.63	106.80	100.66	114.74	187.14	44.68	243.71
	102.61	365.24	417.75	325.29	57.83	119.90	6990.97	871.22	1003.47	0.00	98.31	82.51	114.30	0.00	181.39
	162.92	555.76	708.14	460.45	60.51	168.72	9046.01	0.00	47.42	123.02	103.57	95.19	150.19	31.90	198.59
	189.98	617.17	931.17	433.24	83.18	194.93	9655.41	1296.37	1666.87	105.55	96.23	100.53	180.65	45.17	283.34
	253.68	740.60	1012.91	590.61	98.95	194.89	14187.09	0.00	43.33	152.86	136.18	141.57	178.29	37.13	253.29
	187.47	577.94	498.39	557.84	83.50	162.48	9077.63	144.68	393.04	104.83	105.80	129.07	165.32	64.25	231.99
	182.50	594.14	516.85	464.03	73.01	151.98	9700.48	172.31	335.02	113.80	111.10	110.01	122.17	42.11	251.37
	183.49	716.43	634.44	487.65	82.25	161.71	8505.09	0.00	59.54	140.30	108.23	108.89	167.66	46.74	177.93
	170.08	583.09	443.59	596.13	87.79	223.40	11457.54	203.12	437.67	0.00	103.22	128.67	161.93	9.76	281.78
	139.07	428.93	630.30	370.94	52.30	177.48	7672.81	270.71	404.02	96.91	84.69	86.38	107.82	41.69	196.66
	187.37	667.84	987.77	539.09	86.98	193.26	11195.17	42.38	95.80	147.15	125.13	113.18	145.94	34.10	173.23
	144.76	420.07	452.67	341.68	62.16	193.94	8146.92	465.61	568.64	97.32	83.15	81.05	108.16	33.85	246.07
	148.44	440.54	618.56	360.69	71.09	158.16	9180.01	0.00	48.92	0.00	96.62	95.08	128.56	0.00	193.03
	183.12	562.02	567.57	475.09	70.88	189.22	9737.75	0.00	59.67	107.02	99.08	119.57	149.48	42.59	224.36
	174.69	541.30	464.06	484.55	79.24	130.38	8303.32	0.00	49.48	98.41	98.39	106.11	149.27	29.42	164.88
	135.24	458.33	573.36	367.61	59.51	128.57	7654.95	0.00	29.12	78.05	68.88	93.79	121.93	41.41	185.27
	189.48	546.12	641.45	468.06	76.77	197.91	9077.62	15.12	75.93	73.06	82.03	101.77	122.21	34.01	193.65
	187.15	543.05	925.40	466.76	80.38	225.20	10415.82	44.13	106.41	81.85	82.54	82.82	114.88	29.84	203.07
	165.10	423.48	373.79	403.59	69.52	179.97	9628.90	0.00	62.78	75.11	76.32	94.46	87.40	31.83	173.61
	233.99	586.72	1214.78	431.19	72.98	186.90	9711.27	26.04	45.46	0.00	86.73	104.12	144.59	0.00	179.99
	111.80	433.39	704.70	306.51	60.22	272.35	7306.57	0.00	60.56	5.31	65.13	75.13	87.72	0.00	133.11
	186.33	464.60	658.87	508.84	70.31	261.73	10642.57	17.56	86.81	0.00	81.66	93.07	98.25	0.00	188.54
	107.33	470.07	771.13	369.54	55.53	132.31	6984.03	9.47	71.40	42.50	44.29	81.79	124.21	29.20	173.88
	85.65	493.11	1466.27	316.50	54.18	509.91	7557.44	79.45	64.33	26.89	33.18	85.96	92.89	34.84	200.18

Tabela 5.1.9. Vrednosti obeležja selektovanih iz EDXRF spektara arheološke keramike sa lokaliteta Pločnik korišćenjem RBF neuralnih mreža.

	Si	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb	Rb	Sr	Y	Zr
Pločnik	74.94	311.80	1300.33	257.98	60.23	162.02	8115.78	13.89	65.14	4.34	40.18	73.35	117.72	23.36	103.90
	78.84	271.18	299.68	279.39	47.67	283.88	6761.86	0.00	39.92	19.05	29.95	63.66	82.87	27.19	85.42
	106.12	277.16	331.17	291.06	59.36	263.94	6010.63	0.00	49.56	0.00	19.86	52.27	112.77	9.03	103.59
	44.41	169.61	208.94	142.60	22.12	80.22	3238.93	0.00	86.97	12.48	19.09	45.95	52.75	22.06	63.23
	134.65	255.85	284.43	284.39	55.75	188.87	6375.51	0.00	57.23	0.00	37.56	70.45	102.38	30.47	119.31
	76.09	302.38	377.64	290.60	71.74	159.66	7402.59	48.04	205.12	31.08	20.29	62.32	86.91	18.22	97.61
	87.43	276.14	380.07	294.23	50.91	219.35	6176.44	32.63	86.63	24.34	34.25	59.37	114.32	25.77	103.02
	142.71	425.98	528.51	447.97	70.88	391.71	8938.87	0.00	40.86	68.28	53.53	85.62	126.08	29.42	210.82
	66.87	301.77	411.14	233.03	41.90	107.21	5832.91	0.00	38.10	20.14	34.97	73.42	74.74	25.24	84.69
	52.82	199.10	418.96	170.52	39.22	218.59	4172.81	0.00	21.22	38.11	34.59	57.44	65.12	14.62	57.97
	63.67	244.25	230.42	213.67	36.40	61.42	5774.75	0.00	22.01	28.39	27.62	53.77	58.98	22.65	58.28
	90.68	246.55	555.58	311.39	71.13	272.41	7077.03	0.00	36.14	26.21	30.90	63.28	112.86	23.95	133.74
	108.03	346.99	989.78	307.99	50.93	173.28	7217.82	7.66	47.88	27.26	48.68	65.80	101.13	22.54	98.49
	37.36	128.79	141.51	136.08	24.82	68.53	3158.25	0.00	11.34	13.71	16.46	39.86	58.80	21.69	108.57
	118.47	415.34	380.60	400.23	44.78	111.52	7190.94	0.00	48.87	0.00	81.83	82.10	95.77	13.95	103.33
	205.30	451.69	410.35	497.32	52.83	144.37	8970.52	0.00	83.71	19.37	118.60	101.91	118.37	58.50	170.60
	128.27	441.88	752.44	445.34	70.98	208.24	9157.41	0.00	90.35	14.57	116.42	74.76	149.03	0.00	125.97
	104.43	471.14	1400.09	368.34	65.09	762.84	9229.18	0.00	284.31	11.11	107.36	75.60	115.38	0.00	139.75
	33.15	85.52	339.70	62.51	13.41	48.79	1724.33	4.49	15.65	105.68	81.87	21.72	53.23	0.00	37.40
	75.23	408.52	413.29	340.41	48.29	121.85	7031.44	0.00	33.22	28.41	39.92	75.30	123.62	28.41	177.74
	104.21	291.53	458.63	408.08	74.99	179.28	7527.41	0.00	29.08	12.54	37.45	67.39	106.19	21.64	182.01
	200.45	602.10	1213.37	594.81	93.08	335.59	12638.52	0.00	46.90	17.59	117.42	119.72	113.06	41.83	154.79
	84.34	384.93	432.57	512.17	63.67	88.31	6887.54	0.00	23.91	26.90	35.32	68.10	149.05	21.56	139.03
	200.70	503.84	547.08	529.58	85.44	151.61	11616.09	0.00	46.82	99.26	110.91	93.66	109.46	28.38	184.93
	139.95	371.01	533.83	447.37	71.90	200.69	9810.18	0.00	56.51	81.27	87.36	87.66	96.32	30.96	178.78

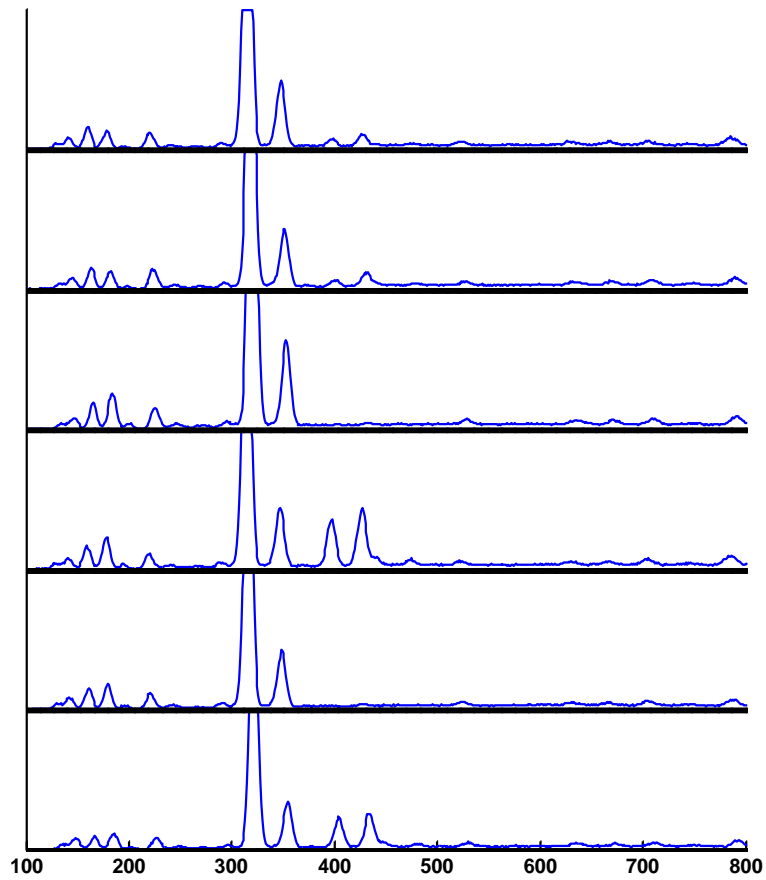
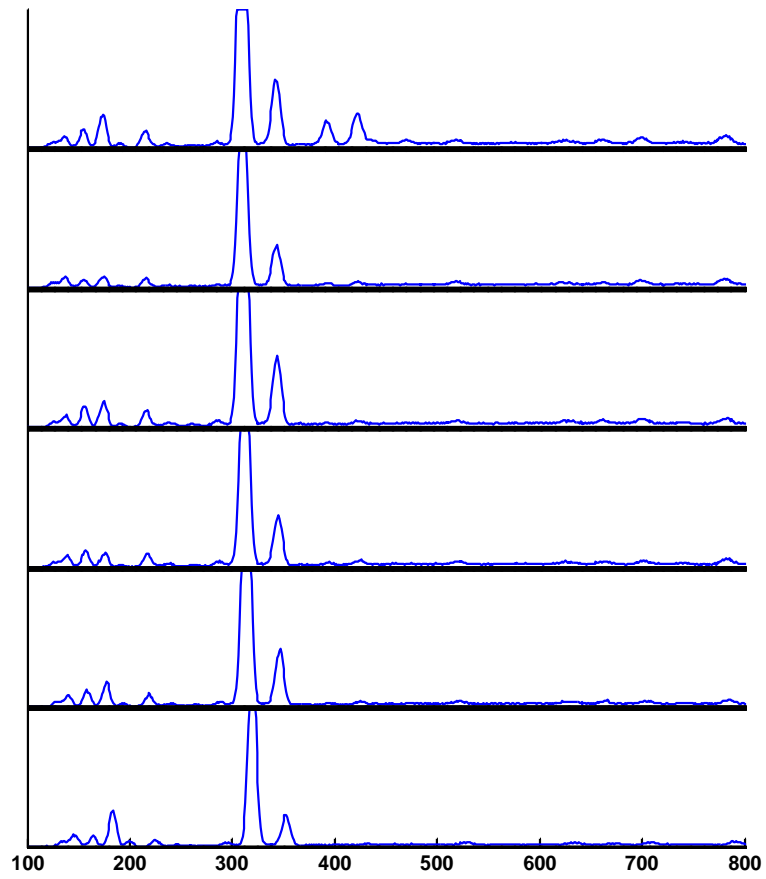
Tabela 5.1.10. Vrednosti obeležja selektovanih iz EDXRF spektara arheološke keramike sa lokaliteta Bubanj korišćenjem RBF neuralnih mreža.

	Si	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb	Rb	Sr	Y	Zr
Bubanj	159.65	790.98	338.65	474.32	112.64	213.36	10890.91	36.93	91.38	0.00	116.16	103.39	101.09	0.00	169.55
	270.28	832.28	774.87	765.86	93.92	276.45	13173.56	0.00	46.81	96.69	128.49	145.20	177.37	65.47	177.90
	233.41	878.90	846.55	601.69	83.62	232.75	12528.30	0.00	58.95	76.39	111.98	129.84	205.21	30.92	197.89
	119.91	553.30	479.02	375.13	45.88	271.11	8786.58	0.00	46.88	122.27	115.37	96.97	91.64	41.17	136.06
	122.20	727.77	567.86	506.87	76.31	416.84	13412.16	7.12	58.17	171.30	144.73	100.38	213.07	26.38	104.87
	145.86	692.83	509.24	490.31	70.30	305.55	10731.73	129.70	192.70	0.00	110.61	92.68	195.92	30.26	110.02
	182.37	574.79	476.07	396.10	86.32	231.78	8789.87	81.70	154.21	77.51	76.78	94.32	149.50	34.48	162.33
	235.33	806.02	504.64	469.79	80.61	160.07	9353.74	0.00	37.10	79.97	97.94	108.24	151.42	46.48	288.21
	211.26	767.92	370.09	434.69	63.59	125.46	9981.89	155.38	317.59	125.71	125.96	125.20	153.40	46.25	177.38
	124.53	597.21	564.43	603.79	68.63	177.04	13427.05	5.34	55.03	9.71	126.71	128.80	97.00	0.00	103.34
	90.73	527.10	367.08	284.60	43.25	158.24	5974.39	0.00	32.97	81.08	68.24	68.40	89.59	28.66	106.38
	181.09	944.22	384.92	653.26	84.32	139.83	12970.70	0.00	35.25	131.08	142.14	120.22	124.85	40.19	188.25
	153.73	783.05	462.34	540.89	61.75	234.22	12610.25	245.08	482.87	111.65	121.94	93.84	100.75	38.83	150.11

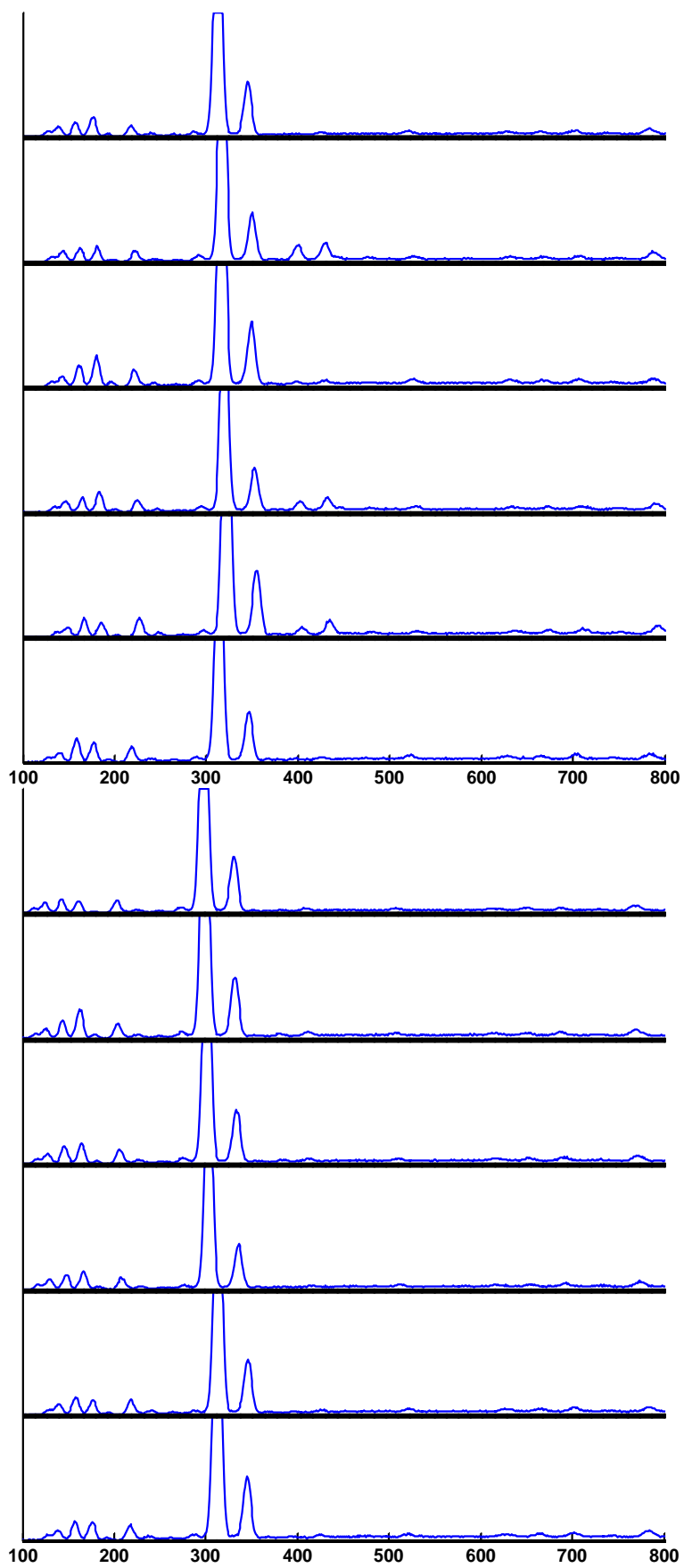
Iz svega navedenog može se zaključiti da se željena automatizacija procesa obrade spektara može efikasno realizovati korišćenjem neuralnih mreža pomoću kojih je, sa visokom tačnošću, aproksimiran spektar generisan u toku merenja. Opisani postupak odabira obeležja iz EDXRF spektra pomoću RBF neuralnih mreža, omogućio je da se preko

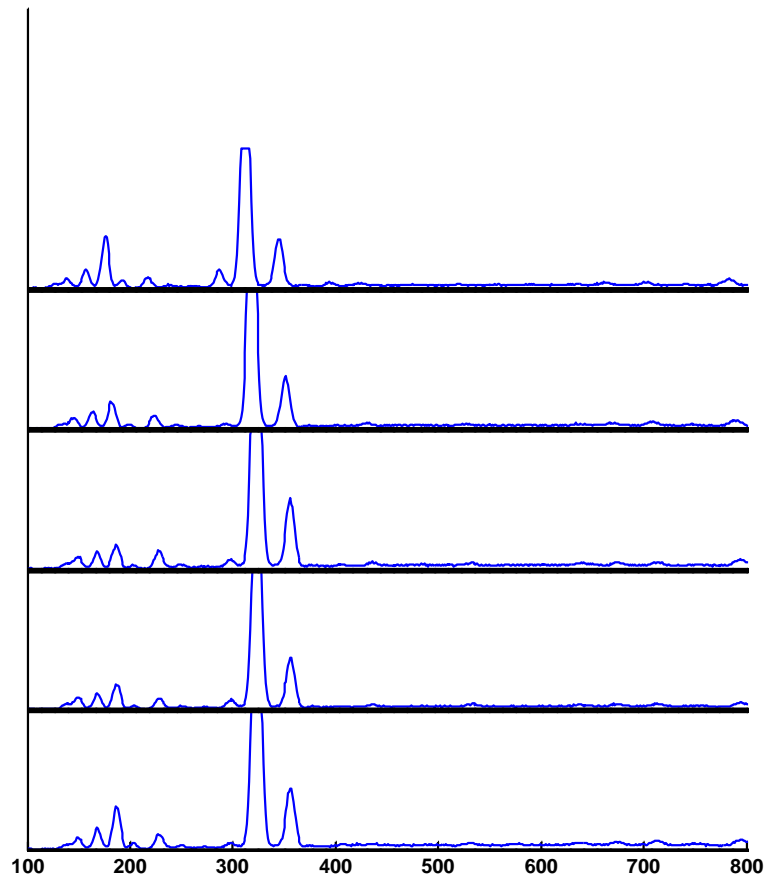
dve stotine spektara na ovaj način obrađuje za vreme reda veličine par minuta na laptop računaru što se ne može uporediti sa vremenom potrebnim za određivanje parametra *NetPeakArea* kao ulaznog obeležja za opisivanje merenja, koje sprovodi operator (ili ekspert) koristeći svoje iskustvo. Treba napomenuti da se upotrebom predložene metode korišćenjem RBF neuralnih mreža, rešava i problem fona (*baseline*), jer se on automatski kompenzuje, tj. identifikuje kao prag (eng. *bias*) neurona u izlaznom sloju.

U cilju ilustracije raznovrsnosti problema u obradi EDXRF spektara, na istom grafiku (slika 5.1.8), prikazani su svi izmereni spektri fragmenata keramika sa jednog lokaliteta korišćeni u ovoj disertaciji (u ovom slučaju 29 spektara dobijenih analizom keramike sa lokaliteta Vinča).









Slika 5.1.8. EDXRF spektri fragmenata keramika sa lokaliteta Vinča.

## **5.2. Klasifikacija arheološke keramike na osnovu elementarnog sastava određenog EDXRF spektrometrijskom metodom i dobro definisanog porekla**

*U ovom poglavlju, prikazani su rezultati realizacije dva koraka u predloženom algoritmu za donošenje odluke o poreklu arheološke keramike, redukcija dimenzija i klasifikacija.*

Prateći algoritam kojim se realizuje procedura donošenja odluke o poreklu arheološke keramike, nakon formiranja višedimenzionih matrica vektora ( $TDS$  i  $TDS_1$ ) kojima se opisuju merenja izvršena u cilju određivanja elementarnog sastava, vrši se redukcija dimenzija. Cilj redukcije dimenzija početnog višedimenzionog skupa je da se merenja učine pogodnijim za interpretaciju i sagledavanje njihovih međusobnih odnosa. Kako je izabrana metoda klasifikacije na osnovu dobro definisanog porekla, možemo smatrati da nam je struktura početnog skupa unapred poznata, čime je izbor neke od metoda prepoznavanja oblika sa nagledanjem prirodan za realizaciju ove klasifikacije. S druge strane, relativna standardna devijacija izmerenih promenljivih unutar čitavog početnog skupa  $TDS$  je u intervalu 30%-168% (tabela 5.2.1), pa je poželjno prethodno ispitati međusobne odnose između promenljivih i njihov pojedinačni uticaj na strukturu čitavog skupa kojim su opisana merenja. Da bi se ovo ostvarilo najkorisniji put je da se izvrši analiza skupova  $TDS$  i  $TDS_1$  nekom od metoda prepoznavanja oblika bez nadgledanja. Analiza glavnih komponenti, PCA je za ovu namenu najefikasnija, zato što u jednom postupku pored redukcije dimenzija pruža odgovor i na pitanje o međusobnom odnosu promenljivih, o

njihovom uticaju na svaki pojedinačni oblik (ovde se termin oblik odnosi merenjem generisan desetodimenzioni vektor kojim je opisan elementarni sastav datog fragmenta keramike) i na mogućnost klasifikacije unutar skupa na koji se primenjuje.

Tabela 5.2.1. Elementarni sastav neolitske keramike sa tri arheološka lokaliteta. Srednja vrednost *NetPeakArea*, standardna devijacija i relativna standardna devijacija prikazane su za pojedinačne grupe i za čitav skup merenja.

		Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	Rb	Sr	Zr
Bubanđ	<b>Min</b>	674	4040	2278	2529	564	65438	415	661	906	1225
	<b>Max</b>	2248	7159	6747	6519	2881	150335	5153	1869	2550	3348
	<b>Mean</b>	1445.7	5500.8	4061.2	4486	1360.8	122355.5	1430.2	1241.3	1498.1	1947.1
	<b>SD</b>	432	972	1230	1110	657	24918	1579	346	572	616
	<b>RSD</b>	30	18	30	25	48	20	110	28	38	32
Pločnik	<b>Min</b>	334	541	1182	722	303	19782	248	304	560	604
	<b>Max</b>	1672	4527	11912	5000	6301	144080	2912	1448	1800	3009
	<b>Mean</b>	887.1	2431.3	4399.5	2919.2	1346.8	78963.5	831	785.9	1102.9	1530.7
	<b>SD</b>	385	948	2805	1169	1237	28000	581	288	315	625
	<b>RSD</b>	43	39	64	40	92	35	70	37	29	41
Vinča	<b>Min</b>	378	1715	2461	1591	390	51158	530	544	578	1429
	<b>Max</b>	2223	5549	11564	5383	4399	146304	19253	1786	2349	3709
	<b>Mean</b>	1338.3	3788.8	5638.1	3726.2	1045.1	97699.3	2821.4	1018.1	1417.1	2361.7
	<b>SD</b>	416	898	2144	882	723	19744	4296	295	419	543
	<b>RSD</b>	31	24	38	24	69	20	152	29	30	23
Ukupno	<b>Min</b>	334	541	1182	722	303	19782	248	304	560	604
	<b>Max</b>	2248	7159	11912	6519	6301	150335	19253	1869	2550	3709
	<b>Mean</b>	1190.8	3614.4	4870	3572.5	1218.9	95492.4	1808.8	974.8	1315.6	1971.2
	<b>SD</b>	468	1444	2357	1178	938	28480	3041	342	445	691
	<b>RSD</b>	39	40	48	33	77	30	168	35	34	35

Analiza glavnih komponenti, PCA izvršena je na početnom skupu podataka koji je pre analize obrađen, tako što je izvršeno autoskaliranje vrednosti za *NetPeakArea* (odnosi se i na *TDS* i na *TDS<sub>i</sub>*). Sama analiza izvršena je korišćenjem softverskog paketa IBM SPSS Statistics 19. Pored ovog softvera analize su rađene i u MATLAB okruženju - verzija R2010a, Math Works, Inc. Rezultati PCA analize podataka u skupu *TDS* prikazani su u tabeli 5.2.2. Iz tabele se vidi da prve tri PC komponente opisuju više od 75% varijanse unutar početnog skupa, odakle proizilazi da trodimenzionalna projekcija početnog skupa daje dobru sliku

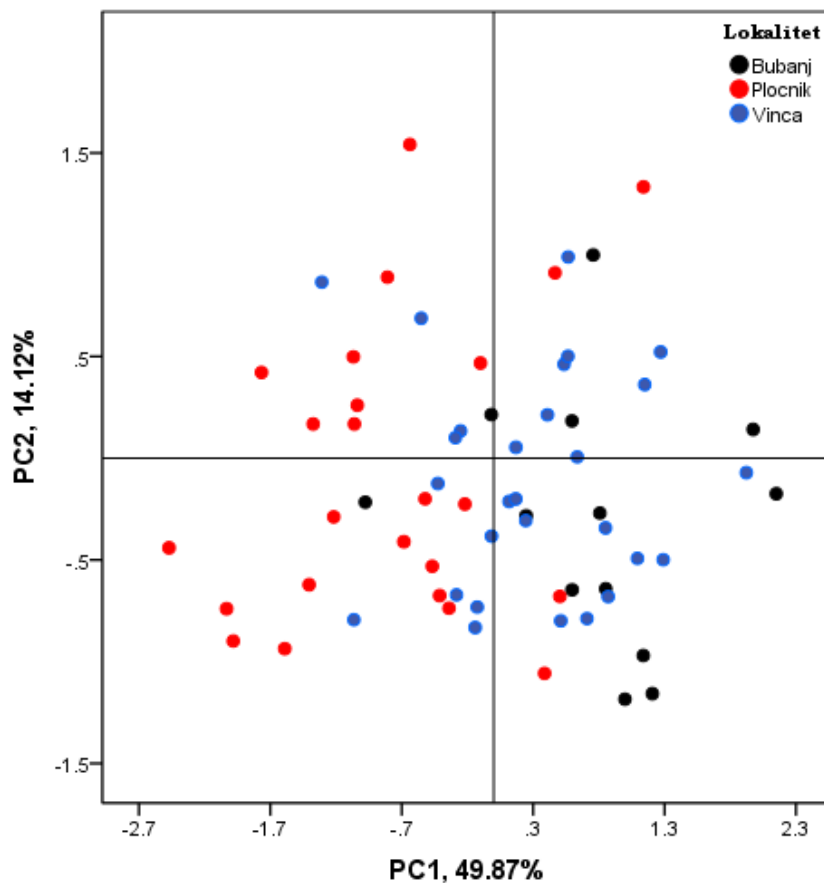
strukture unutar početnog skupa (Varmuza i ostali 2000). Kako je sa prve dve PC komponente opisano 64% ukupne varijanse (što je blisko vrednosti od 70% za koju se može reći da daje dobru sliku strukture početnog skupa), u cilju bolje preglednosti, struktura skupa *TDS* ispitivanja je u dvodimenzionom prostoru određenom ovim PC komponentama. Prva PC komponenta, obeležena sa *PC1*, opisuje 49.87% ukupne varijanse, dok druga PC komponenta, obeležena sa *PC2*, nosi informaciju o 14.12% ukupne varijanse početnog skupa.

Tabela 5.2.2. Analiza glavnih komponenti – svojstvene vrednosti, uračunata i ukupna varijansa za *TDS* prikazane po odgovarajućim PC komponentama.

<b>Uračunata varijansa</b>			
<b>PC</b>	<b>Svojstvene vrednosti</b>	<b>% varijanse</b>	<b>Ukupni %</b>
<b>1</b>	4.99	49.87	49.87
<b>2</b>	1.41	14.12	64
<b>3</b>	1.29	12.91	76.91
<b>4</b>	0.64	6.38	83.29
<b>5</b>	0.51	5.03	88.32
<b>6</b>	0.38	3.79	92.12

Grafik određen *PC1* i *PC2* osama predstavlja prikaz redukcije dimenzija izvršene analizom glavnih komponenti. *PC1* i *PC2* vrednosti određene su kao linearna kombinacija početnih izmerenih vrednosti elementarnog sastava arheološke keramike. Svaka tačka na ovom grafiku (slika 5.2.1) predstavlja projekciju merenja iz originalnog - desetodimenzionog prostora u novi - dvodimenzioni prostor određen *PC1* i *PC2* osama. Ovakvom linearnom transformacijom olakšano je sagledavanje strukture početnog desetodimenzionog skupa podataka. Sa slike 5.2.1 se vidi da se nijedna grupa (definisana prema lokalitetu

na kome je pronađena ispitivana keramika) ne može nedvosmisleno izdvojiti kao posebna u prostoru određenom osama  $PC1$  i  $PC2$ , tj. ne mogu se definisati posebne karakteristike koje bi jednu grupu izdvojile od ostale dve, na način da se zadovolji početni zahtev izražen kroz klasifikaciju.



Slika 5.2.1. Analiza glavnih komponenti – grafik zavisnosti prve dve glavne komponente ( $PC1$  i  $PC2$ ) za TDS.

Na osnovu ovakvog rezultata može se zaključiti da varijansa koncentracije elemenata u sastavu tela keramike unutar čitavog skupa nije dovoljno informativna za klasifikaciju, tj. za utvrđivanje porekla

keramike na osnovu elementarnog sastava tela keramičkog predmeta. Drugim rečima, linearna transformacija početnog desetodimenzionog prostora u prostor koji prati maksimalnu varijansu izvršena je sa gubitkom informacije o poreklu keramike.

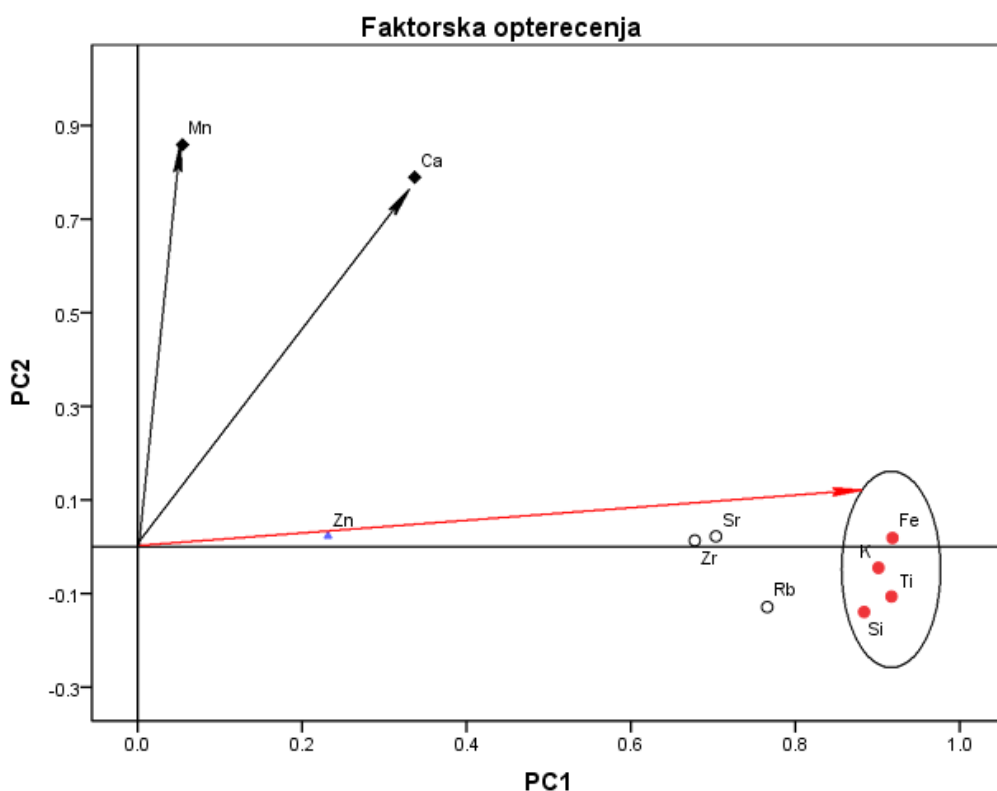
Pored redukcije dimenzija analiza glavnih komponenti omogućava utvrđivanje međusobne povezanosti promenljivih, kao i njihov uticaj na svaki pojedinačni oblik. Uticaj promenljivih na strukturu početnog skupa izražen je preko faktorskih opterećenja (eng. *loadings*) i prikazan je u tabeli 5.2.3. Međusobni odnosi pojedinačnih promenljivih takođe su izraženi preko faktorskih opterećenja. Iz tabele 5.2.3 može se zaključiti da najveća faktorska opterećenja unutar početnog skupa možemo pripisati Fe, Ti, K, Mn i Ca, respektivno. Fe, Ti i K, imaju najveća faktorska opterećenja duž *PC1* ose, dok Mn i Ca imaju najveća faktorska opterećenja duž *PC2* ose.

Tabela 5.2.3. Analiza glavnih komponenti – faktorska opterećenja za prve dve glavne komponente (*PC1* i *PC2*) za *TDS*.

<b>Faktorska opterećenja</b>										
<b>PC</b>	<b>Si</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Ti</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Zn</b>	<b>Rb</b>	<b>Sr</b>	<b>Zr</b>
<b>1</b>	0.88	<b>0.9</b>	0.34	<b>0.92</b>	0.05	<b>0.92</b>	0.23	0.77	0.7	0.68
<b>2</b>	-0.14	-0.04	<b>0.79</b>	-0.11	<b>0.86</b>	0.02	0.02	-0.13	0.02	0.01

Svih pet elemenata značajne varijanse su međusobno izrazito jako korelisani (slika 5.2.2), što znači da podjednako utiču na raspodelu projektovanih merenja duž *PC1* i *PC2* osa. Izuzetno značajan uticaj varijanse Mn mogao bi da bude posledica i lošije statistike odbroja, mada je izvesnije da predstavlja geohemijsku karakteristiku gliništa, s obzirom da teži da se koncentriše u njenim frakcijama. Ovaj rezultat nam može ukazati na moguće nalazište gline koje je eksploatisano za keramičku proizvodnju. Visoka vrednost faktorskog opterećenja za Mn, u direktnoj korelaciji sa faktorskim opterećenjem Ca duž *PC2* ose može

da ima uticaja na koheziju grupa unutar početnog skupa. Kako se sa slike 5.2.1 vidi, koherentnost grupa, koje su definisane u odnosu na lokalitet na kome je ispitivani keramički predmet pronađen, je izrazito narušena u *PC1-PC2* prostoru pod uticajem Mn i Ca.



Slika 5.2.2. Analiza glavnih komponenti – grafik faktorskih opterećenja za TDS.

Kao posledica ovoga, zaključak koji se može naglasiti je da je izradu ispitivanih keramičkih predmeta karakterisalo:

- § pažljivo biranje gliništa i
- § dobro poznavanje osobina glina (može se pretpostaviti da glina koja je korišćena sadrži homogeno distribuirane fino



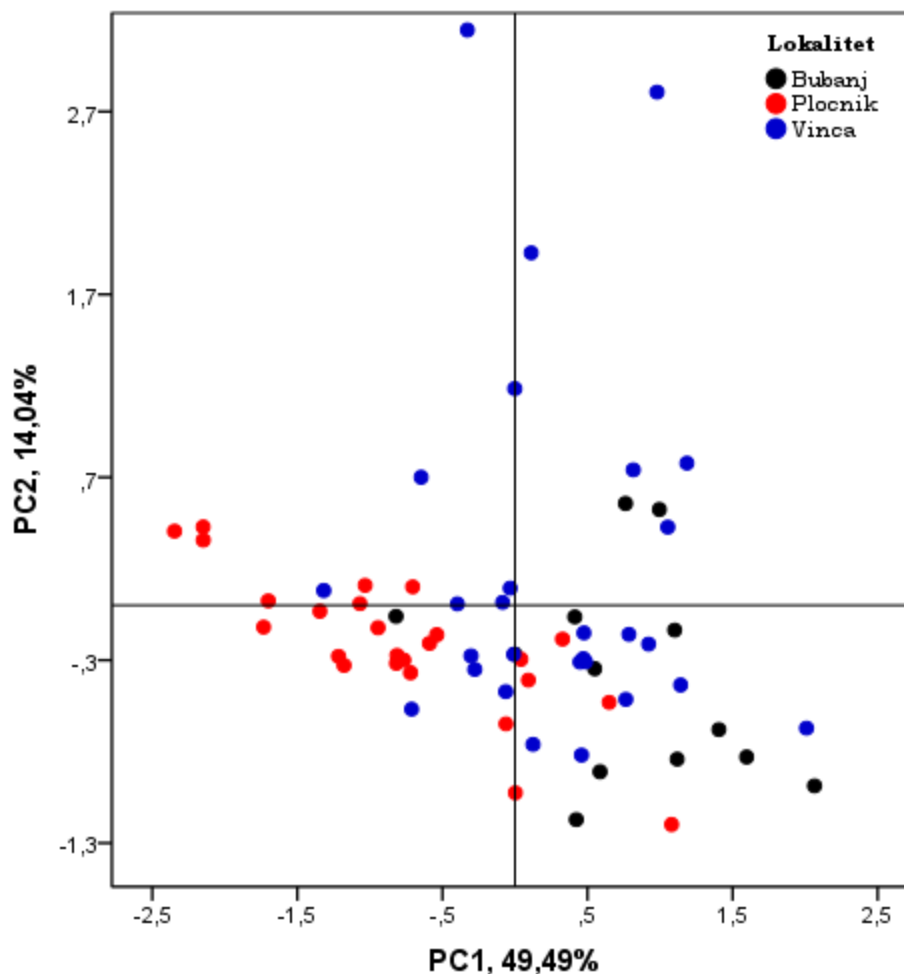
granulisane čestice  $\text{CaCO}_3$ , koje su omogućavale lakše sinterovanje, što se pogotovo odnosi na keramike sa lokaliteta Pločnik).

Nakon selekcije promenljivih upotrebom RBF neuralnih mreža, formiran je još jedan skup podataka za obučavanje, predstavljen  $67 \times 15$  dimenzionom matricom  $TDS_I$ . Ovaj skup podataka proširen je u odnosu na skup  $TDS$  za one hemijske elemente čija je nepouzdanost u određivanju parametra  $NetPeakArea$  bila veća od 15% i one elemente koji su imali značajan broj merenja ispod minimalne granice detekcije za dati hemijski element. Rezultati analize glavnih komponenti skupa  $TDS_I$  prikazani su u tabelama 5.2.4-5.2.5 i na slikama 5.2.3-5.2.4.

Tabela 5.2.4. Analiza glavnih komponenti – svojstvene vrednosti, uračunata i ukupna varijansa za  $TDS_I$  prikazane po odgovarajućim PC komponentama.

<b>Uračunata varijansa</b>			
<b>PC</b>	<b>Svojstvene vrednosti</b>	<b>% varijanse</b>	<b>Ukupni %</b>
<b>1</b>	7.42	49.49	49.49
<b>2</b>	2.12	14.04	63.53
<b>3</b>	1.64	10.96	74.48
<b>4</b>	0.96	6.39	80.88
<b>5</b>	0.7	4.67	85.55
<b>6</b>	0.5	3.35	88.89

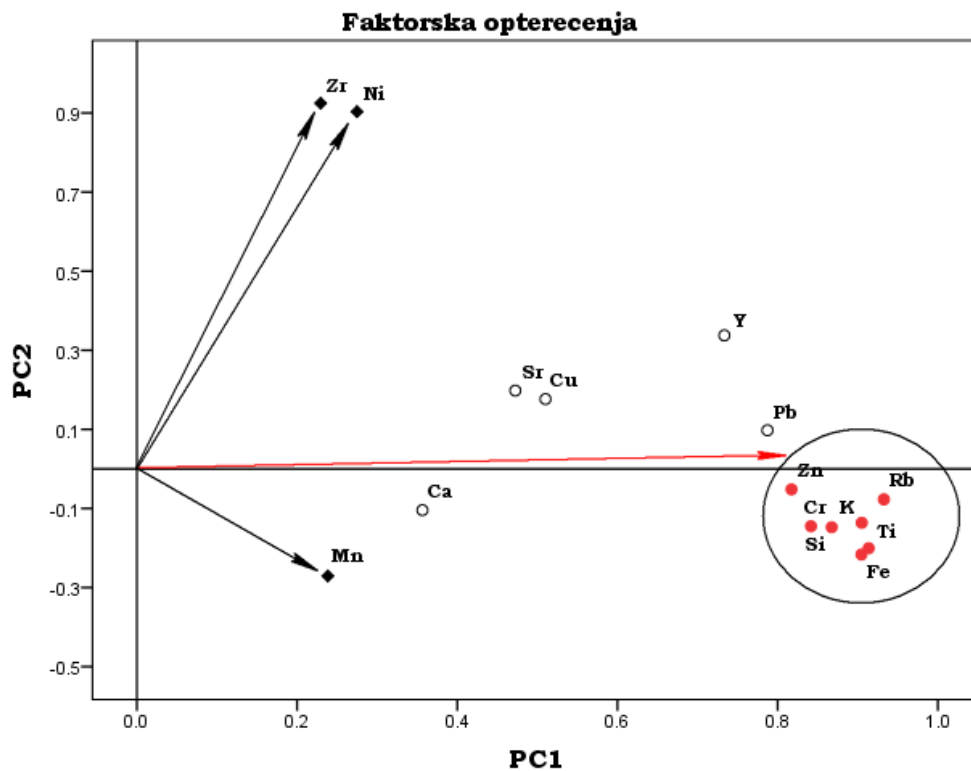
Iz tabele se vidi da prve tri PC komponente opisuje blizu 75% varijanse unutar početnog skupa, tako da prva komponenta,  $PC1$  opisuje 49.5% ukupne varijanse, dok druga,  $PC2$  nosi informaciju o 14.0% ukupne varijanse početnog skupa.



Slika 5.2.3. Analiza glavnih komponenti – grafik zavisnosti prve dve glavne komponente ( $PC1$  i  $PC2$ ) za  $TDS_1$ .

Za razliku od grafika na slici 5.2.1, projektovana merenja iz skupa  $TDS_1$  u  $PC1$ - $PC2$  prostor pokazuju da je skup keramika sa lokaliteta Pločnik nešto jasnije izdvojen od ostatka skupa. Na separabilnost ove kategorije utiče zaokružena grupa elemenata na slici 5.2.4, tj. Rb, Ti, K, Fe, Si, Cr i Zn. Ovo znači da u izdvojenoj grupi keramike sa lokaliteta Pločnik možemo govoriti o različitoj varijansi pomenutih hemijskih elemenata u strukturi keramike sa ovog lokaliteta u odnosu na vrednosti čitavog skupa. Kvantifikacijom EDXRF spektrometrijskih

rezultata može se doći do detaljnije analize varijanse pojedinih elemenata u strukturi keramike.



Slika 5.2.4. Analiza glavnih komponenti – grafik faktorskih opterećenja za skup  $TDS_1$ .

Uključivanje informacije o prisustvu još pet elemenata u telu keramike smanjilo je gubitak informativnosti u toku redukcije dimenzija. Ovakav rezultat je posebno značajan jer je omogućio da se adekvatnom obradom spektara, rezultati EDXRF spektrometrijske analize mogu porediti sa mnogo preciznijim, informativnijim i sofisticiranijim (i proporcionalno skupljim i nedostupnijim) analitičkim postupcima kakva je na primer neutronska aktivaciona analiza (kojom bi kvantifikovali sadržaj preko 20 elemenata u sastavu tela keramike).

Faktorska opterećenja po PC-osama prikazana su tabeli 5.2.5.

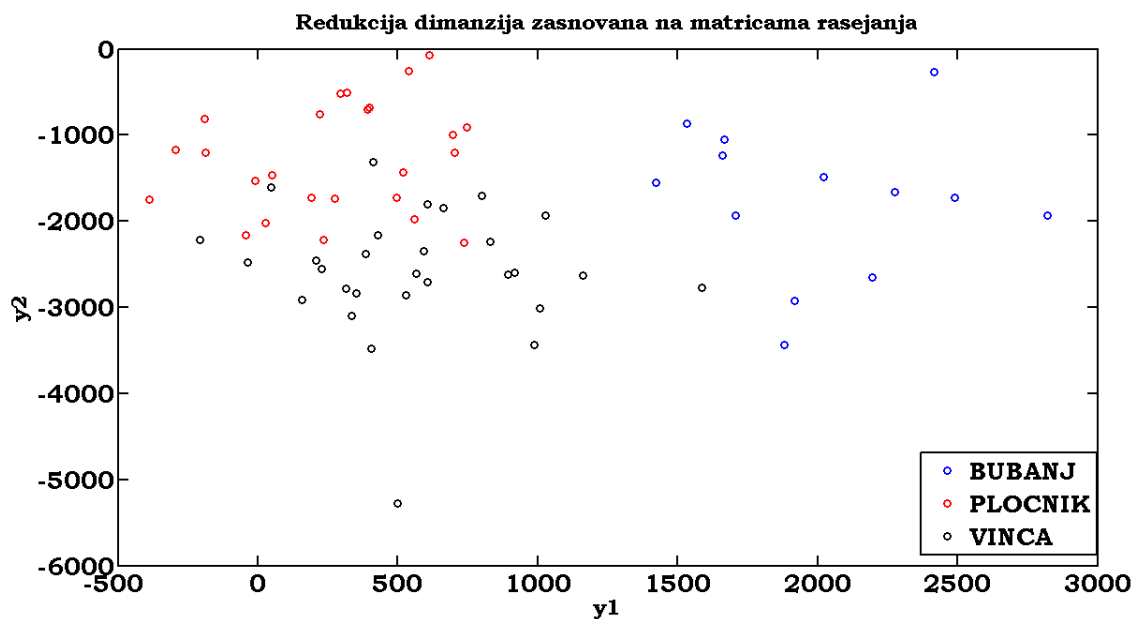
Tabela 5.2.5. Analiza glavnih komponenti – faktorska opterećenja za prve dve glavne komponente (*PC1* i *PC2*) za *TDS<sub>1</sub>*.

<b>Faktorska opterećenja</b>		
	<b>PC</b>	
	<b>1</b>	<b>2</b>
Si	<b>0.867</b>	-0.147
K	<b>0.905</b>	-0.136
Ca	0.356	-0.104
Ti	<b>0.914</b>	-0.201
Cr	<b>0.842</b>	-0.145
Mn	0.238	-0.271
Fe	<b>0.905</b>	-0.216
Ni	0.275	<b>0.903</b>
Cu	0.51	0.176
Zn	<b>0.817</b>	-0.052
Pb	0.787	0.098
Rb	<b>0.933</b>	-0.077
Sr	0.472	0.198
Y	0.733	0.337
Zr	0.229	<b>0.925</b>

Iako je analiza glavnih komponenti izvršena sa ciljem da se ispituju međusobni odnosi promenljivih i njihov pojedinačni uticaj na oblike u skupovima merenja, redukcija dimenzija je pokazala da se ovaj metod prepoznavanja oblika ne može efikasno iskoristiti za klasifikaciju. Razlog za ovo je postojanje značajnog gubitka informacije o poreklu keramike za vreme linearnog preslikavanja početnog (desetodimenzionog) u prostor određen maksimalnom varijansom (*PC1-PC2*). Kao što je već pomenuto redukcija dimenzija (kao segment procedure za donošenje odluke o poreklu keramike) mora biti izvedena tako da bude zadovoljen prethodno postavljeni cilj, a to je klasifikacija keramike na osnovu dobro poznatog porekla i elementarnog sastava tela

keramičkog proizvoda. Činjenica da je poreklo keramike dobro poznato za rezultat ima poznatu strukturu početnog skupa podataka. Drugim rečima, početni 67x10 skup za obučavanje sastavljen je od tri grupe čije su dimenzije 13x10, 25x10 i 29x10 za keramike sa lokaliteta Bujanj, Pločnik i Vinča, respektivno. Ispitivanje mogućnosti klasifikacije i izbor najpogodnijeg klasifikatora u slučaju da je klasifikacija moguća najefikasnije će se izvesti ako se prethodno izvrši redukcija dimenzija. Jedna metoda sa nadgledanjem za prepoznavanje oblika izdvaja se kao posebno pogodna za redukciju dimenzija sa unapred poznatim zahtevima. To je redukcija dimenzija zasnovana na matricama rasejanja. Gotovo da nema publikovanih rezultata primene ove metode u arheometrijskim istraživanjima, mada se njena šira primena može sresti u mnogim drugim segmentima naučnog saznavanja (na primer, Stepanić i ostali 2009 – detekcija oštećenja, Stričević i ostali 2011 – predikcija sušne godine, Mami i ostali 2006 – prepoznavanje govora).

Prateći postupak redukcije dimenzija zasnovan na matricama rasejanja detaljno opisan u poglavlju 4.2, izvršeno je linearno preslikavanje početnog desetodimenzionog prostora u novi dvodimenzioni. Ovo preslikavanje izvedeno je vodeći računa da gubitak informacija koje nosi početni skup bude minimalan. Uopšteno, linearna transformacija početnog  $n$ -dimenzionog prostora može biti izvršena u prostor bilo koje druge dimenzije manje od  $n$ . Najpogodnije za dalju analizu je da novoformirani prostor bude dvo- ili trodimenzioni. Podaci o elementarnom sastavu arheološke keramike iz skupa za obučavanje *TDS* preslikani su u novi dvodimenzioni prostor određen linearnom kombinacijom početnih promenljivih (slika 5.2.5). Na ovaj način, redukcija dimenzija zasnovana na matricama rasejanja omogućila je generisanje dve nove promenljive, obeležene sa  $y_1$  i  $y_2$ , kao linearne kombinacije početnih.



Slika 5.2.5. Redukcija dimenzija zasnovana na matricama rasejanja.

Sa slike 5.2.5 se vidi da je redukcija dimenzija izvršena na način da *a priori* poznata pripadnost određenoj grupi ostane očuvana u najvećoj mogućoj meri i u prostoru određenom novim promenljivim, uz istovremeno očuvanje kohezije pojedinačnih grupa. Tri klase predstavljene u novoformiranom  $y_1 - y_2$  prostoru nisu razdvojene u potpunosti. Ovo se naročito odnosi na grupe koje su formirane od keramika sa lokaliteta Pločnik i Vinča. Grupa koja sadrži keramičke predmete sa lokaliteta Bujanj je od ostale dve grupe odvojena tako da je moguće definisati linearne segmente koji ovu grupu razdvajaju bez ikakve greške klasifikacije. Kohezija grupe koja sadrži keramičke predmete iskopane na lokalitetu Pločnik je najbolje sačuvana, a slično se može reći i za grupu keramike sa lokaliteta Vinča. Grupu koju formiraju keramički predmeti sa lokaliteta Bujanj je najviše rasuta. Ovakav rezultat može se objasniti sličnim vremenom nastanka keramika sa lokaliteta Pločnik i Vinča (prva polovina petog milenijuma pre nove ere), dok je keramika sa lokaliteta Bujanj nastala u dva

perioda, uslovno je datovana na kraj sedmog i drugu polovinu petog milenijuma pne. Ovaj rezultat povlači zaključak koji se u arheološkoj interpretaciji može smatrati veoma zanimljivim. S jedne strane primenjena metoda redukcije dimenzija omogućava nam klasifikaciju keramičkih predmeta na osnovu njihovog porekla istovremeno vodeći računa i o tehnologiji izrade. Naime, keramički predmeti sa lokaliteta Pločnik i Vinča datovani su na vrlo blizak vremenski period nastajanja, pa iako međusobno udaljeni (oko 300 km) lokaliteti sa gliništima lokalnih karakteristika, koristili su sirovinu na sličan način. U terminima elementanog sastava, grupe Pločnik i Vinča su međusobno linearno separabilne po  $y_2$ -osi, što bi moglo da ukaže na karakteristike gliništa. Sa druge strane, relativno malo međusobno rastojanje između ove dve grupe i dobra očuvana pripadnosti određenoj grupi ukazuju na sličnu i dobro poznatu tehniku izrade (relativno homogena struktura tela keramike, dobro poznavanje dodavanja primesa i slično). Slično, lošije očuvana pripadnost unutar grupe Bujanj ukazuje na različite tehnike izrade keramike u različitim vremenskim periodima. Na ovaj način tehnika redukcije dimenzija zasnovana na matricama rasejanja pokazala je značajnu osetljivost ne samo na početne uslove (izražene kroz dobro poznato poreklo), već i na one informacije “sakrivene” unutar teksture keramičkog materijala, a izražene kroz izbor gliništa za eksploataciju i primenjenu tehniku izrade.

Kako je linearna transformacija, pogodnim izborom kriterijuma separabilnosti, izvršena na optimalan način (kao što je detaljno prikazano u poglavlju 4.2), novogenerisane promenljive  $y_1$  i  $y_2$ , mogu se smatrati najboljim obeležjima za klasifikaciju. Na ovaj način, redukcija dimenzija zasnovana na matricama rasejanja za posledicu ima i ekstrakciju onih obeležja koja su najuticajnija za klasifikaciju. Iz transformacione matrice  $A$  možemo da sagledamo pojedinačne uticaje originalnih promenljivih na rezultat klasifikacije (tabela 5.2.6). Zavisnost prikazana u tabeli 5.2.6 ukazuje da su Zr, Rb i K, respektivno

najinformativniji za razdvajanja klasa po  $y_1$ -osi. Za razdvajanja klasa po  $y_2$ -osi najinformativniji su Si i Zr, respektivno.

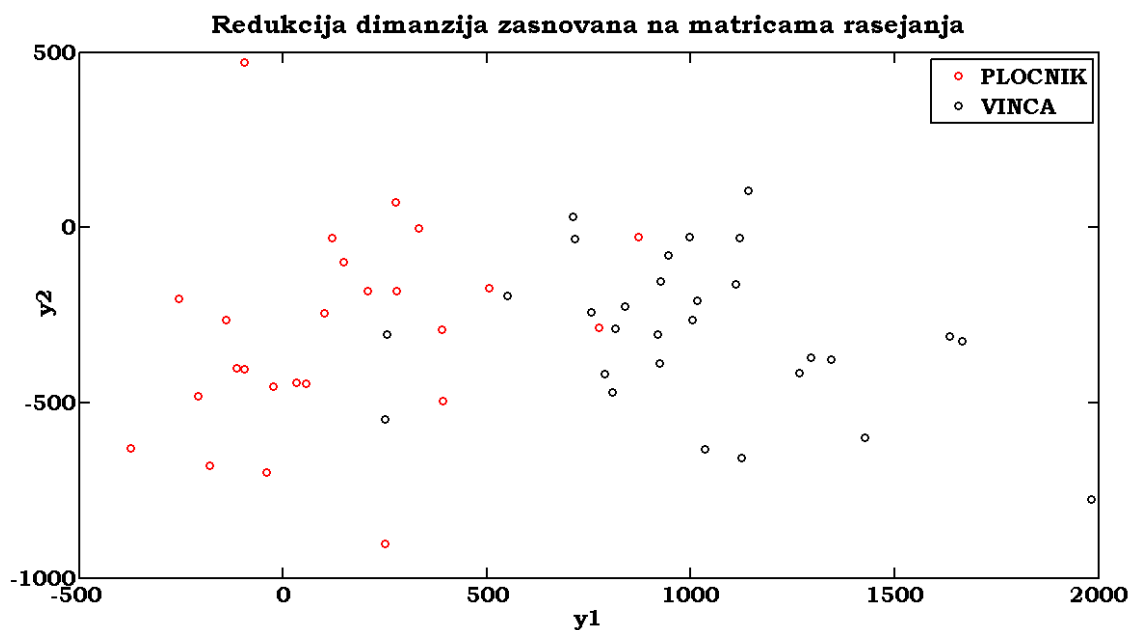
Tabela 5.2.6. Zavisnost novo-generisanih obeležja  $y_1$  i  $y_2$  od originalnih promenljivih.

<b>Originalne promenljive</b>	<b>Generisane promenjive</b>	
	<b>y1</b>	<b>y2</b>
<b>Si</b>	-0.06	<b>0.58</b>
<b>K</b>	<b>0.44</b>	-0.34
<b>Ca</b>	-0.11	-0.06
<b>Ti</b>	-0.37	-0.20
<b>Mn</b>	0.19	0.42
<b>Fe</b>	0.01	-0.01
<b>Zn</b>	-0.01	-0.04
<b>Rb</b>	<b>0.47</b>	-0.08
<b>Sr</b>	0.09	-0.07
<b>Zr</b>	<b>-0.62</b>	<b>-0.57</b>

Na osnovu gornjih razmatranja zaključak koji svakako treba istaći je da se grupa keramičkih artefakata sa lokaliteta Bujanj po sastavu razlikuje od grupa u kojima su keramički fragmenti nađeni na lokalitetima Vinča i Pločnik. Kako je Zr jedan od elemenata koji na ovo razdvajanje ima najveći uticaj možemo smatrati da sastav gline razlikuje ove dve grupe. Grupe keramičkih predmeta sa lokaliteta Pločnik i Vinča međusobno su separabilne po  $y_2$ -osi što je posledica uticaja Zr i Si, tj. kvaliteta same gline i dodatih primesa. U ovom slučaju može se govoriti da je tehnika pripreme gline za izradu keramičkog predmeta dominantna karakteristika keramike sa lokaliteta Vinča i Pločnik. Sasvim posebno na ovom mestu treba istaći da predložena procedura može na efikasan način da izvrši klasifikaciju, ali i da dobijene rezultate smesti u arheološki kontekst.



Sledeći korak nakon izvršene redukcije dimenzija je validacija tog procesa. Mera uspešnosti redukcije dimenzija izražena je preko indeksa informativnosti,  $l_{2/10}$ . U opisanom slučaju ovaj indeks iznosi  $l_{2/10} \sim 100\%$ , što znači da je redukcija dimenzija izvršena sa minimalnim gubitkom informacija. Da bi se klasifikacija nepoznatih uzoraka izvršila sa velikom pouzdanošću na osnovu ovde postavljenih uslova, neophodno je dizajnirati pogodan klasifikator. Izbor podesnog klasifikatora zavisi u prvom redu od procenjene separabilnosti klasa. Mera separabilnosti određuje se za dve klase i izražava vrednošću Batačarijine granice,  $\mu(1/2)$ . Napred pomenuto postajanje linearnog segmenta koji grupu keramičkih predmeta sa lokaliteta Bubanj razdvaja od ostale dve grupe bez ikakve greške klasifikacije (izraženo visokom vrednošću Batačarijine granice,  $\mu(1/2) = 4,41$ ) omogućava nam da izaberemo linearni klasifikator za klasifikaciju. Naizgled nešto slabija separabilnost između grupa keramičkih fragmenata sa lokaliteta Pločnik i Vinča (slika 5.2.6) ipak se može smatrati prihvatljivom, jer vrednost Batačarijine granice iznosi  $\mu(1/2) = 2,47$  i uslovljava izbor hijerarhijske klasifikacije zasnovane na sekvencijalnom izboru jedne klase u odnosu na preostale dve. Imajući na umu i zahtev da predložena procedura za donošenje odluke o poreklu keramike mora biti brza, jednostavna i efikasna za klasifikaciju nepoznatih objekata razumno je zahtevati i da se klasifikacija keramičkih predmeta između grupa Pločnik i Vinča izvrši pomoću iste vrste klasifikatora koji su i po obiku najjednostavniji.



Slika 5.2.6. Redukcija dimenzija zasnovana na matricama rasejanja za keramičke predmete sa lokaliteta Pločnik i Vinča.

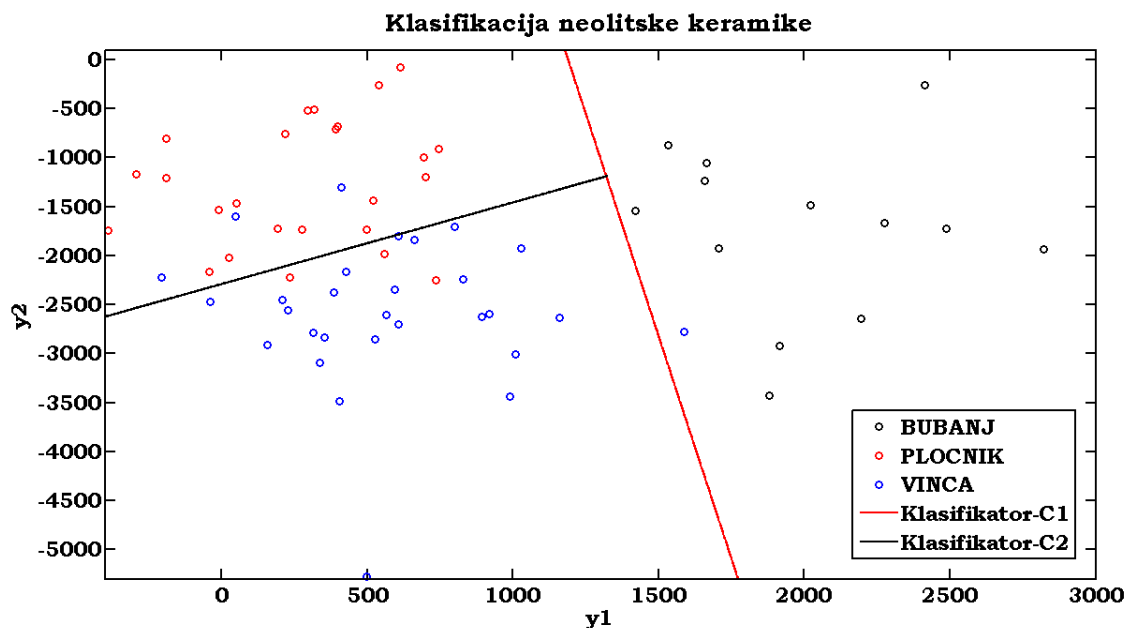
Na osnovu ovog razmatranja adekvatna klasifikacija postignuta je dizajniranjem dva linearna klasifikatora zasnovana na željenom izlazu,  $h_1(Y)$  (za klasifikator C1 na slici 5.2.7) i  $h_2(Y)$  (za klasifikator C2 na slici 5.2.7) u obliku

$$C1: h_1(Y) = V_1^T Y + v_{01} = [0,0009 \quad 0,0001]Y - 1,09 \quad 5.2.1$$

i

$$C2: h_2(Y) = V_2^T Y + v_{02} = [-0,0006 \quad 0,0007]Y + 1,63 \quad 5.2.2$$

gde je  $Y$ , skup projektovanih merenja u dvodimenzionom prostoru (definisan kao  $Y=A^T X$ ). Na slici 5.2.7 prikazani su rezultati klasifikacije zajedno sa klasifikatorima C1 i C2.



Slika 5.2.7. Rezultati klasifikacije zasnovane na redukciji dimenzija pomoću matrica rasejanja prikazani sa linearnim klasifikatorima C1:  $h1(Y)$  i C2:  $h2(Y)$ , projektovanim na osnovu željenog izlaza.

Gore prikazana zavisnost klasifikatora  $h1(Y)$  i  $h2(Y)$  (jednačine 5.2.1 i 5.2.2) od početnih promenljivih data je u matričnom obliku iz razloga jednostavnosti prikaza. Sledeći korak u klasifikaciji predstavlja donošenje odluke da li novi vektor  $Z$  (koji predstavlja elementarni sastav nepoznatog uzorka) pripada grupi keramike sa lokaliteta Bubanj ili ne. Ako je vrednost  $h1(Z) > 0$  može se reći da nepoznati predmet pripada grupi keramike sa lokaliteta Bubanj. U slučaju da  $h1(Z)$  ima vrednost manju od nule, možemo konstatovati da ispitivani fragment nema karakteristike grupe keramike sa lokaliteta Bubanj, i proceduru utvrđivanja porekla nastavljamo daljim ispitivanjem, tj. utvrđivanju da li je ispitivani fragment sa lokaliteta Pločnik ili Vinča. Za vrednosti

$h_2(Z) > 0$  možemo reći da ispitivani fragment keramike ima karakteristike grupe sa lokaliteta Pločnik, dok  $h_2(Z) < 0$  ukazuje na slične osobine ispitivanog komada sa komadima sa lokaliteta Vinča.

Rezultate procesa klasifikacije možemo da ocenimo pomoću vrednosti parametra koji se naziva moć prepoznavanja. Moć prepoznavanja definiše se kao odnos korektno klasifikovanih objekata u jednom skupu u odnosu na ukupan broj elemenata koji su učestvovali u procesu klasifikacije. Rezultati klasifikacije izraženi ocenom moći prepoznavanja prikazani su u tabeli 5.2.7. Vidi se da su keramički predmeti sa lokaliteta Bujanj 100%, sa lokaliteta Pločnik 88% i sa lokaliteta Vinča 86,2% korektno klasifikovani. Ukupna moć prepoznavanja čitavog klasifikacionog procesa iznosi 89,6% korektno klasifikovanih objekata iz skupa za obučavanje TDS.

Tabela 5.2.7. Rezultati klasifikacije keramičkih predmeta koji sačinjavaju skup za obučavanje TDS.

		<i>A priori</i> određene grupe			Ukupno
		Bujanj	Pločnik	Vinča	
<b>TDS</b>	<b>Broj</b>				
	<b>Bujanj</b>	13	0	0	13
	<b>Pločnik</b>	0	22	3	25
	<b>Vinča</b>	1	3	25	29
	<b>%</b>				
	<b>Bujanj</b>	<b>100</b>	0	0	100
	<b>Pločnik</b>	0	<b>88</b>	12	100
	<b>Vinča</b>	3.4	10.3	<b>86.2</b>	100

Visoka vrednost moći prepoznavanja od **89.6%** korektno klasifikovanih objekata u procesu obučavanja ukazuje na dobro odabrane i pravilno raspoređene korake u proceduri za donošenje odluke o poreklu keramike. Izbor linearnog klasifikatora, kao jednog od odlučujućih koraka u ovoj proceduri nije uslovljen samo zahtevom da proceduru ubrza i pojednostavi. Linearni klasifikator predstavljen na

slici 5.2.7 omogućava nam mnogo dublji pogled u strukturu skupa za obučavanje *TDS*. Relativan položaj tačaka koje predstavljaju pojedinačne uzorke keramika u dvodimenzionom  $y_1 - y_2$  prostoru od linije (C1 i C2 na slici 5.2.7) kojom je predstavljen linearni klasifikator, može da bude od značaja u otkrivanju mogućih trgovinskih aktivnosti, promena u tehnologiji izrade ili da pokažu potencijalne nepravilnosti u određivanju elementarnog sastava (koje mogu da budu posledica rada u terenskim uslovima merenja).

Redukcija dimenzija zasnovana na matricama rasejanja izvršena je i za skup za obučavanje  $TDS_1$ , formiran odabirom promenljivih pomoću RBF neuralnih mreža. Najefikasnije poređenje uspešnosti klasifikacije (koja je izvedena na potpuno isti način kao i za *TDS* skup za obučavanje) je poređenjem moći prepoznavanja. Vrednosti ovog parametra za skup  $TDS_1$ , prikazane su u tabeli 5.2.8.

Tabela 5.2.8. Rezultati klasifikacije keramičkih predmeta koji sačinjavaju skup za obučavanje  $TDS_1$ .

		<b><u>A priori određene grupe</u></b>			<b>Ukupno</b>	
		<b>Bubanj</b>	<b>Pločnik</b>	<b>Vinča</b>		
<b>TDS</b>	<b>Broj</b>	<b>Bubanj</b>	12	0	1	13
		<b>Pločnik</b>	0	25	0	25
		<b>Vinča</b>	0	2	27	29
	<b>%</b>	<b>Bubanj</b>	<b>92.3</b>	0	7.7	100
		<b>Pločnik</b>	0	<b>100</b>	0	100
		<b>Vinča</b>	0	6.9	<b>93.1</b>	100

U odnosu na *TDS* skup, moć prepoznavanja keramike sa lokaliteta Vinča i Pločnik značajno je porasla (za lokalitet Bubanj je neznatno opala) novim pristupom u obradi spektara. To pokazuje i vrednost Batačarijine granice, koja u ovom slučaju iznosi  $\mu(1/2)=5,65$ . Moć prepoznavanja celokupnog procesa klasifikacije takođe je značajno

porasla sa 89.6% na **95.5%**. Elementi kojima je proširen skup za obučavanje nose značajnu informaciju o karakteristikama lokalne proizvodnje (ili lokacije sa koje je eksploatisana sirovina ili tehnologije izrade). Keramika sa lokaliteta Bujanj od ostalih analiziranih fragmenata razdvojena je pod uticajem Sr i Cr (tabela 5.2.9). Na separabilnost fragmenata keramika sa lokaliteta Vinča i Pločnik najviše utiču Sr i Rb. Svi ovi elementi, izuzev Cr, mogu da karakterišu lokalna gliništa.

Tabela 5.2.9. Zavisnost novogenerisanih obeležja  $y_1$  i  $y_2$  od originalnih promenljivih za  $TDS_1$ .

<b>Originalne promenljive</b>	<b>y1</b>	<b>y2</b>
<b>Si</b>	-0.12	0.06
<b>K</b>	0.39	0.02
<b>Ca</b>	-0.07	-0.03
<b>Ti</b>	-0.21	0.02
<b>Cr</b>	<b>-0.52</b>	-0.14
<b>Mn</b>	0.09	0.03
<b>Fe</b>	0	0.01
<b>Ni</b>	-0.17	0.03
<b>Cu</b>	-0.05	-0.19
<b>Zn</b>	0.04	-0.08
<b>Pb</b>	0	0.02
<b>Rb</b>	0.04	<b>-0.56</b>
<b>Sr</b>	<b>0.61</b>	<b>-0.75</b>
<b>Y</b>	-0.24	-0.23
<b>Zr</b>	0.21	-0.05

### 5.3. Testiranje uspešnosti klasifikacije

U ovom poglavlju, prikazani su rezultati testiranja uspešnosti procedure u donošenju odluke o poreklu keramike. Testiranje je izvršeno korišćenjem unakrsne validacije bez jednog člana, izračunata je moć prepoznavanja i sposobnost predviđanja. Dodatno testiranje izvršeno je korišćenjem posebnog skupa za testiranje.

U poglavlju 4.4. detaljno su objašnjeni načini za procenu nepouzdanosti svakog koraka u proceduri za donošenje odluke o poreklu arheološke keramike i definisane su veličine kojima se meri nepouzdanost čitave procedure. Unakrsna validacija bez jednog člana izvršena je korišćenjem svih uzoraka iz skupa za obučavanje. Rezultati unakrsne validacije bez jednog člana za skup *TDS* prikazani su u tabeli 5.3.1.

Tabela 5.3.1. Rezultati unakrsne validacije bez jednog člana skupa formiranog od deset hemijskih elemenata u sastavu fragmenata keramika sa tri arheološka lokaliteta (*TDS*).

		<b><i>A priori</i> određene grupe</b>				
		<b>Bubanj</b>	<b>Pločnik</b>	<b>Vinča</b>	Ukupno	
<b>TDS</b>	<b>Broj</b>	<b>Bubanj</b>	10	1	2	13
		<b>Pločnik</b>	0	18	7	25
		<b>Vinča</b>	1	5	23	29
		<b>Bubanj</b>	<b>76,9</b>	7,7	15,4	100
		<b>% Pločnik</b>	0	<b>72</b>	28	100
		<b>Vinča</b>	3.4	17,2	<b>79,3</b>	100

Vidi se da su keramički predmeti sa lokaliteta Bujanj 76,9%, sa lokaliteta Pločnik 72% i sa lokaliteta Vinča 79,3% korektno klasifikovani. Ukupno je 76,1% fragmenata keramike korektno klasifikovano u procesu unakrsne validacije bez jednog člana. Isti postupak ponovljen je sa skupom koji je formiran selekcijom obeležja korišćenjem RBF neuralnih mreža. Rezultati su prikazani u tabeli 5.3.2.

Tabela 5.3.2. Rezultati unakrsne validacije bez jednog člana skupa  $TDS_1$ .

		<b><i>A priori određene grupe</i></b>			Ukupno	
		<b>Bujanj</b>	<b>Pločnik</b>	<b>Vinča</b>		
<b><math>TDS_1</math></b>	<b>Broj</b>	<b>Bujanj</b>	9	0	4	13
		<b>Pločnik</b>	0	19	6	25
		<b>Vinča</b>	1	6	22	29
		<b>Bujanj</b>	<b>69,2</b>	0	30,8	100
	<b>%</b>	<b>Pločnik</b>	0	<b>76</b>	24	100
		<b>Vinča</b>	3.4	20,7	<b>75,9</b>	100

Unakrsnom validacijom bez jednog člana ukupno je 74,6% fragmenata keramike korektno klasifikovano. U poglavlju 5.2. prikazani su rezultati određivanja vrednosti moći prepoznavanja, koje za lokalitet Bujanj, Pločnik i Vinča iznose 100%, 88% i 86,2% respektivno, za skup  $TDS$ , i 92,3% za lokalitet Bujanj, 100% za Pločnik i 93,1% za lokalitet Vinča za skup  $TDS_1$ .

Da bi se kvantifikovala sposobnost predviđanja (definisana kao procenat članova iz skupa za testiranje koji su korektno klasifikovani pomoću pravila razvijenog u procesu obučavanja) formiran je poseban skup koji je reprezentovan 8 x 10 dimenzionom matricom,  $TS$ . Kao i za skup  $TDS$ , za istih deset hemijskih elemenata određene su vrednosti parametra  $NetPeakArea$ , za osam različitih fragmenata keramika koji nisu korišćeni u procesu obučavanja. Sa lokaliteta Bujanj u ovaj skup ušla su dva fragmeta, koliko je bilo dostupno i sa lokaliteta Pločnik. Sa



lokaliteta Vinča u skup za testiranje ušlo je 4 fragmenta keramike. Analogno postupku opisanom u poglavlju 5.2. formiran je skup  $TS_1$  korišćenjem RBF neuralnih mreža za selekciju obeležja iz spektara dobijenih EDXRF analizom osam fragmenata keramike za testiranje. Na osnovu pravila formiranog u procesu obučavanja, tj. korišćenjem linearnih funkcija predstavljenih izrazima 5.2.1 i 5.2.2 (u poglavlju 5.2.) za svaki od vektora u skupu  $TS$  izvršeno je određivanje pripadnosti jednoj od tri klase. Ovo je izvršeno korišćenjem iterativnog postupka kada se prvo korišćenjem izraza 5.2.1 određuje da li dati komad pripada lokalitetu Bubanj ili ne. Ako je rezultat ovog koraka da dati fragment nema osobine koje su karakteristika keramika sa lokaliteta Bubanj proverava se da li je to komad sa lokaliteta Pločnik ili Vinča, određivanjem vrednosti izraza 5.2.2. Rezultati iterativne procedure prikazani su tabelama 5.3.3 i 5.3.4 i na slikama 5.3.1 i 5.3.2 za skupove  $TS$  i  $TS_1$ , respektivno.

Tabela 5.3.3. Sposobnost predviđanja za skup  $TS$ .

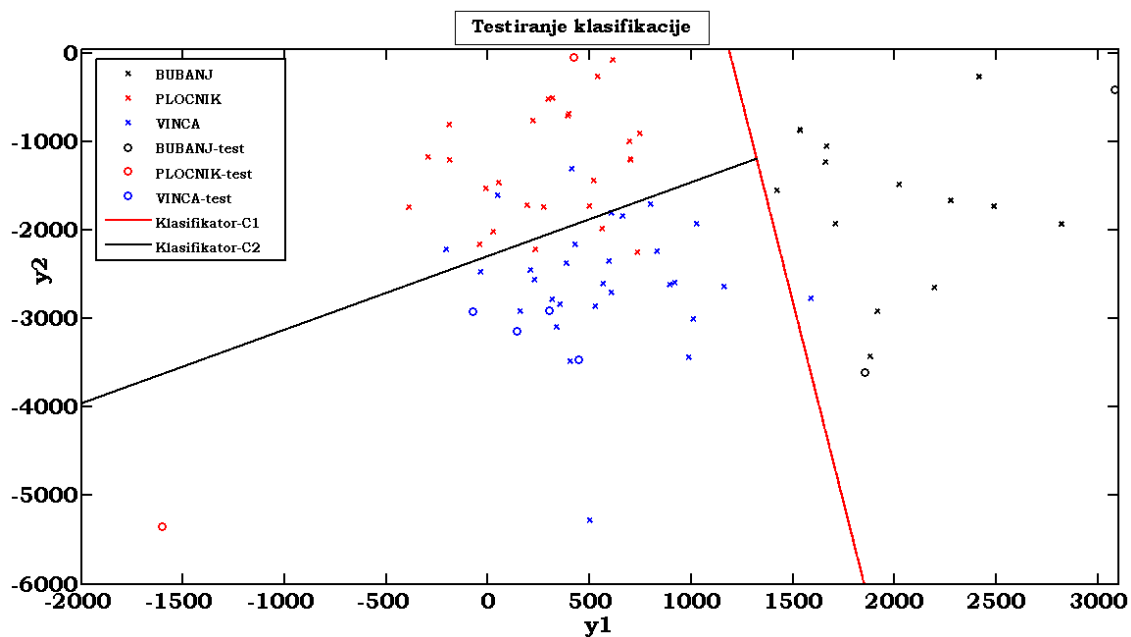
Klasifikator	B1	B2	P1	P2	V1	V2	V3	V4
C1	1.70	0.25	-0.71	-3.10	-1.03	-1.11	-1.45	-1.28
C2			1.36	-1.23	-1.10	-0.62	-0.40	-0.69

Tabela 5.3.4. Sposobnost predviđanja za skup  $TS_1$ .

Klasifikator	B1	B2	P1	P2	V1	V2	V3	V4
C1	1.90	0.01	-0.43	-3.67	-1.45	-0.85	-0.72	-1.50
C2			1.04	0.22	-1.01	-0.91	-2.70	-0.40

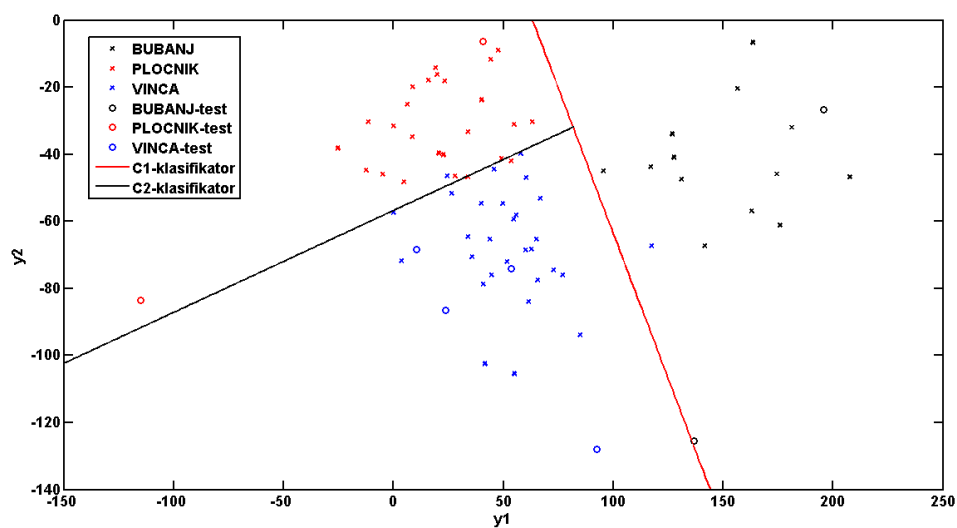
Vidi se da je u procesu obučavanja postignuta značajna sposobnost predviđanja: u skupu  $TS$  samo jedan fragment nije korektno klasifikovan, što znači da je sposobnost predviđanja u ovom skupu

visokih **87,5%** korektno klasifikovanih objekata. Ova vrednost za skup  $TS_1$  iznosi **100%**, jer su svi fragmenti korektno klasifikovani u odgovarajuće grupe.

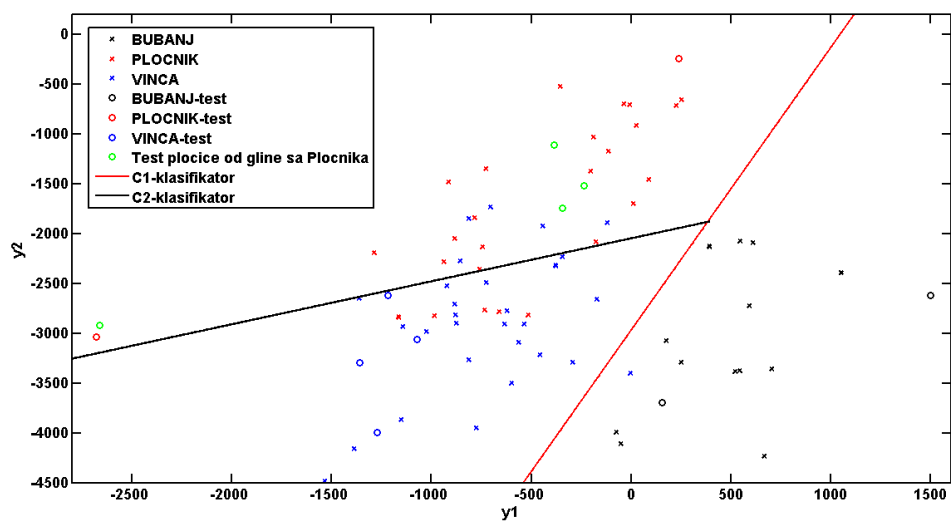


Slika 5.3.1. Klasifikacija nepoznatih uzoraka iz skupa  $TS$ .

Sasvim poseban postupak testiranja izvršen je korišćenjem prethodno opisanog postupka koji je primenjen za skup  $TG$ . Ovaj skup formiran je od 4 vrednosti parametra *NetPeakArea*, za deset hemijskih elemenata koji su određeni EDXRF spektrometrijskom analizom 4 test pločice napravljene pečenjem gline sa 4 gliništa u okolini lokaliteta Pločnik. Rezultati prikazani na slici 5.3.3. pokazuju da su uzorci sve četiri test pločice od pečene gline korektno klasifikovani na lokalitet Pločnik. Ovakvim rezultatom nije potvrđena samo visoka uspešnost predložene procedure u klasifikaciji nepoznatih uzoraka, već i njena sposobnost određivanja porekla arheološke keramike.



Slika 5.3.2. Klasifikacija nepoznatih uzoraka iz skupa  $TS_1$ .



Slika 5.3.3. Klasifikacija uzoraka pečene gline iz skupa  $TG$ .

#### **5.4. Klasifikacija neolitske keramike i glina na osnovu morfoloških karakteristika minerala korišćenjem procedure za određivanje porekla**

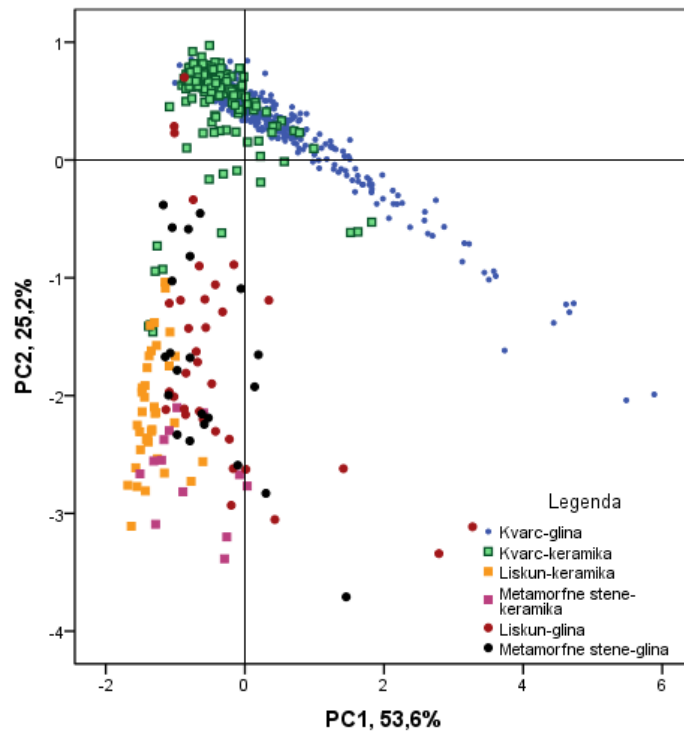
*U ovom poglavlju, prikazani su rezultati testiranja mogućnosti procedure za donošenje odluke o poreklu keramike korišćenjem skupa koji je generisan drugim analitičkim postupkom. Testiranje je izvršeno korišćenjem morfoloških karakteristika minerala u sastavu neolitske keramike i pečenih glina kao ulaznih podataka za proceduru. Rezultati klasifikacije pokazuju široku mogućnost primene predložene procedure, tj. njenu nezavisnost od vrste analitičkog postupka kojim se generišu ulazni podaci kojima se opisuju svojstva neolitske keramike.*

U poglavlju 3.3 detaljno je opisan postupak ispitivanja morfoloških svojstava neolitske keramike i pečenih glina. Petrografskom analizom identifikovane su najznačajnije morfološke karakteristike ispitivanih fragmenata keramike i pečenih glina. Predpostavljeno je da minerali kvarc, liskun i metamorfne stene mogu da budu najznačajniji konstituenti tela keramike koji bi mogli da budu nosioci informacije o poreklu i/ili tehnologiji izrade. Isti minerali identifikovani su i u test pločicama pripremljenim pečenjem gline koja je uzorkovana u blizini lokaliteta Pločnik. Daljom obradom digitalnih petrografskih snimaka korišćenjem alata za obradu slike izvršena je kvantifikacija morfoloških karakteristika pomenutih minerala.

Na opisan način, korišćenjem petrografske analize i analize slike izvršena je selekcija 21 parametra pomoću kojih su, na kvantitativan način, opisane morfološke karakteristike minerala u sastavu tela keramike i pečenih glina. Za osam fragmenata posuda sa lokaliteta

Pločnik načinjena su 32 petrografska snimka na kojima je izdvojeno ukupno 219 zrna minerala kvarca, liskuna i metamorfnih stena za koje su kvantifikovane morfološke karakteristike. Sa 4 petrografska snimka test pločica od pečene gline (sa 4 različite lokacije u blizini lokaliteta Pločnik, slika 3.3.4) izdvojeno je 437 zrna istih minerala čije su karakteristike kvantifikovane. Na ovaj način, petrografskom analizom formirana je 656 x 21 dimenziona matrica za obučavanje, *MTS*.

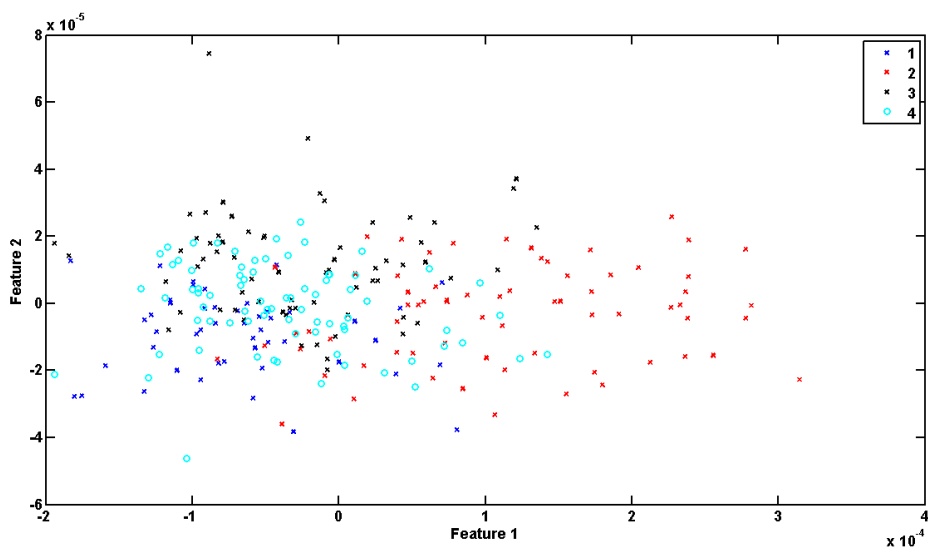
Prva redukcija dimenzija ove matrice izvršena je (kao i u slučaju matrice *TDS* elementranog sastava keramike) analizom glavnih komponenti, koja je prikazana na slici 5.4.1. Rezultati PCA analize (podaci su pre PCA analize autoskalirani) prikazani su u tabeli 5.4.1. Iz tabele se vidi da prve tri PC komponente opisuju više od 89% varijanse unutar početnog skupa, a da su prve dve PC komponente odlične za reprezentovanje strukture unutar početnog skupa. Prva PC komponenta opisuje 53.6% ukupne varijanse, dok druga PC komponenta, obeležena sa *PC2*, nosi informaciju o 25.2% ukupne varijanse početnog skupa. Od karakterističnih minerala (kvarc, liskun i metamorfne stene) u strukturi keramika i test pločica od pečene gline, kvarc se posebno izdvojio kao potencijalni nosilac informacije o poreklu. Jasno definisane i separabilne grupe koje karakterišu morfološka svojstva zrna kvarca u keramikama i test pločicama mogu se uočiti na slici 5.4.1. Na osnovu rezultata ove analize formiran je novi skup za obučavanje, *MTS<sub>K1</sub>* reprezentovan matricom dimenzija 261 x 21 (početni podaci su autoskalirani da bi se ostvarili isti početni uslovi sa analizom glavnih komponenti). Ukupno 261 zrno kvarca koji su identifikovani na 4 petrografska snimka načinjenih na test pločicama od glina koje su uzorkovane na četiri gliništa najbliža lokalitetu Pločnik opisano je pomoću 21 parametara za kvantifikaciju morfoloških osobina. Redukcija dimenzija ovog skupa izvršena je pomoću matrica rasejanja, a rezultat je prikazan na slici 5.4.2.



Slika 5.4.1. Analiza glavnih komponenti – grafik zavisnosti prve dve glavne komponente ( $PC1$  i  $PC2$ ) za *MTS*.

Tabela 5.4.1. Analiza glavnih komponenti – svojstvene vrednosti, uračunata i ukupna varijansa za *MTS* prikazane po odgovarajućim PC komponentama.

Uračunata varijansa			
PC	Svojstvene vrednosti	% varijanse	Ukupni %
1	11,26	53,61	53,61
2	5,29	25,21	78,83
3	2,21	10,51	89,34
4	0,65	3,11	92,46
5	0,39	1,89	94,34
6	0,32	1,53	95,87



Slika 5.4.2. Redukcija dimenzija skupa  $MTS_{K1}$ , zasnovana na matricama rasejanja.

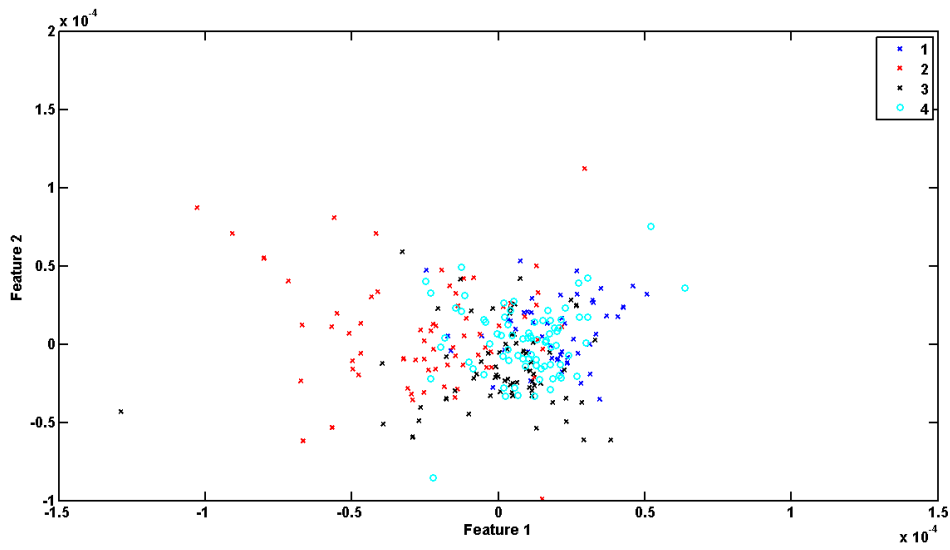
Redukcija dimenzija skupa  $MTS_{K1}$ , pokazala je da se i pored značajne separabilnosti između svake dve klase (Batačarijeve distance su redom:  $\mu_{12}(1/2) = 12,89$ ,  $\mu_{13}(1/2) = 11,78$ ,  $\mu_{14}(1/2) = 10,57$ ,  $\mu_{23}(1/2) = 12,78$ ,  $\mu_{24}(1/2) = 11,89$ ,  $\mu_{34}(1/2) = 11,46$ ), grupna kohezija ne može očuvati u meri potrebnoj da se izvrši klasifikacija projektovanjem nekog od klasifikatora. Ovakav rezultat navodi na zaključak da morfološki parametar zrna kvarca ne nose informaciju o razlici između lokalnih gliništa. Ovaj zaključak potvrđen je i na još jednom skupu  $MTS_{K2}$ , koji je reprezentovan matricom dimenzija  $261 \times 10$ . Selekcija deset parametara kojima su opisane morfološke karakteristike kvarca u sastavu pečenih glina izvršena je tako da je odabrano po pet najinformativnijih parametara duž PC osa. Drugim rečima, po pet parametara koji imaju najveća faktorska opterećenja duž  $PC1$  i  $PC2$  ose (tabela 5.4.2), tj. opisuju najveću varijansu u morfološkim parametrima zrna kvarca, izabrano je za formiranje novog skupa za obučavanje.

Tabela 5.4.2. Analiza glavnih komponenti – faktorska opterećenja za prve dve glavne komponente (PC1 i PC2) za MTS.

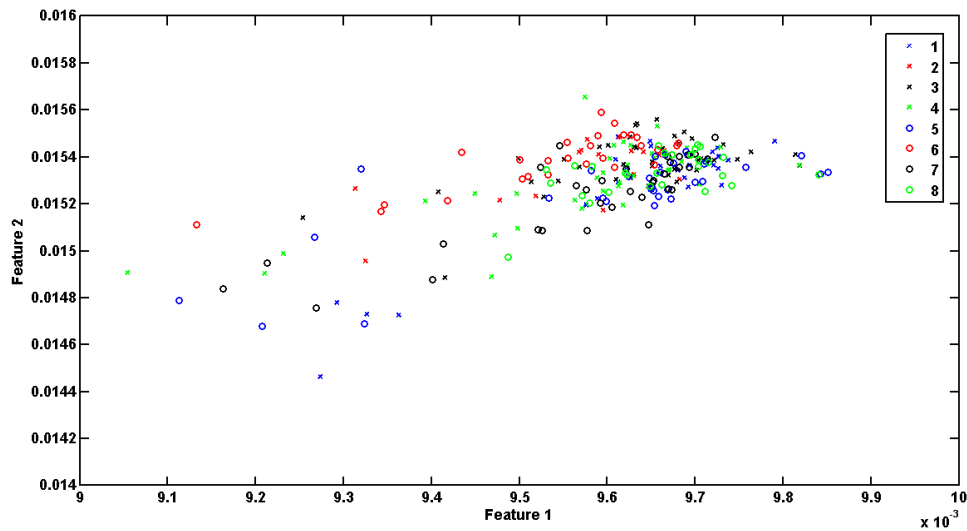
<b>Faktorska opterećenja</b>					
Morf. Parametar	PC komponenta		Morf. Parametar	PC komponenta	
	1	2		1	2
Area	.906	-.252	<b>Density (blue</b>	.386	<b>.888</b>
<b>Density (mean</b>	.384	<b>.908</b>	Perimeter2	.914	-.172
Axis (major)	.940	-.208	<b>Perimeter (co</b>	<b>.961</b>	-.191
Axis (minor)	.940	-.142	<b>Perimeter (el</b>	<b>.964</b>	-.196
Diameter (max	.938	-.209	Perimeter (ra	-.356	-.327
Diameter (min	.847	-.144	Fractal Dimen	.154	.191
<b>Diameter (mea</b>	<b>.953</b>	-.176	<b>Density (min)</b>	.282	<b>.933</b>
<b>Perimeter</b>	<b>.959</b>	-.174	Density (std.	-.311	-.814
Roundness	.242	-.079	Density (sum)	.822	-.137
<b>Density (red)</b>	.375	<b>.876</b>	<b>Perimeter3</b>	<b>.962</b>	-.155
<b>Density (gree</b>	.371	<b>.912</b>			

Redukcija dimenzija skupa  $MTS_{K2}$  urađena je na isti način kao i za skup  $MTS_{K1}$ , tj. na bazi matrica rasejanja. Rezultat ove redukcije dimenzija prikazan je na slici 5.4.3. Zaključak izveden nakon redukcije dimenzije skupa  $MTS_{K1}$ , potvrđen je i u ovom slučaju. Parametri kojima su kvantifikovane morfološke karakteristike kvarca u glinama, a koji su nosioci najveće varijanse nisu istovremeno i nosioci informacije o poreklu. Drugim rečima za kvarc u sastavu glina se ne mogu izdvojiti morfološke karakteristike koje bi karakterisale pojedinačna gliništa. Na osnovu slike 5.4.4 isti zaključak možemo da izvedemo i za kvarc u sastavu tela keramika.



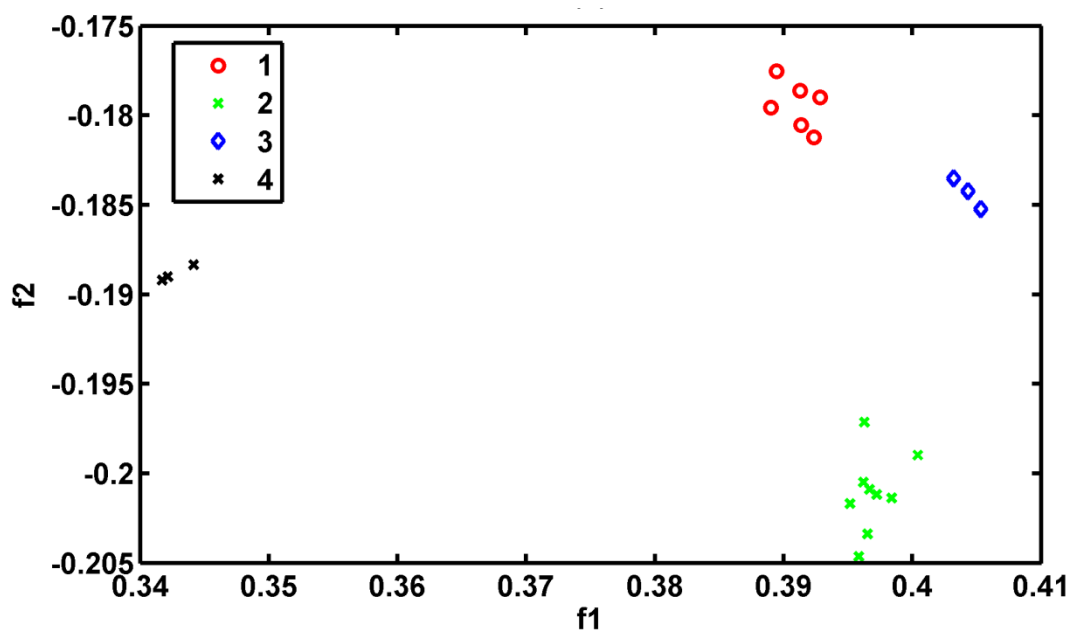


Slika 5.4.3. Redukcija dimenzija skupa  $MTS_{K2}$ , zasnovana na matricama rasejanja.



Slika 5.4.4. Redukcija dimenzija zasnovana na matricama rasejanja skupa formiranog od parametara kojima su opisane morfološke karakteristike zrna kvarca u telu fragmenata keramike sa lokaliteta Pločnik.

Redukcija dimenzija prikazana na slici 5.4.4 izvršena je za skup predstavljen matricom formiranom od 21 parametra kojim su opisane morfološke karakteristike zrna kvarca koji su identifikovani na petrografskim snimcima tela fragmenata osam različitih posuda sa lokaliteta Pločnik. Ispitivanje morfoloških karakteristika zrna liskuna kao potencijalnih nosilaca informacije o poreklu sirovine imala je izvesna ograničenja u ovom istraživanju. Mala populacija uzoraka u skupu za obučavanje onemogućavala je nastavak procedure posle koraka kojim se vrši redukcija dimenzija. Rezultat redukcije dimenzija skupa koji je formiran od 20 parametra kojima su kvantifikovane morfološke karakteristike 21 zrna liskuna u glinama sa četiri gliništa prikazan je na slici 5.4.5. Na osnovu ovog rezultata može se pretpostaviti da su liskuni potencijalni nosioci informacije o kakarakteristikama ispitivanih gliništa. Mala populacija zrna metamorfnih stena u sastavu glina onemogućila nam je detaljnije ispitivanje i ocenu da li su morfološke karakteristike ovih minerala nosioci informacije o poreklu ili tehnologiji izrade.



Slika 5.4.5. Redukcija dimenzija zasnovana na matricama rasejanja skupa formiranog od parametara kojima su opisane morfološke karakteristike zrna liskuna u glinama.

## LITERATURA

- Bakraji EH, 2010 Itlas M, Abdulrahman A, Issa H, Abboud R: X-ray fluorescence analysis for the study of fragments pottery excavated at Tell Jendares site, Syria, employing multivariate statistical analysis. *J. Radioanal. Nucl. Chem*, 285: 455–460.
- Beltran NH, 2006 Duarte-Mermoud MA, Bustos MA, Salah SA, Loyola EA, Pena-Neira AI, Jalocha JW, Feature extraction and classification of Chilean wines. *Journal of Food Engineering*, 75, 1–10.
- Forster N, 2011 Grave P, Vickery N, Kealhofer L: Non-destructive analysis using PXRF: methodology and application to archaeological ceramics. *X-Ray Spectrom*, 40: 389–398.
- Freitas PR, 2010 Calza C, Lima AT, Rabello A, Lopes TR: EDXRF and multivariate statistical analysis of fragments from Marajoara ceramics. *X-Ray Spectrom*, 39: 307–310.
- Fukunaga K, 1989 Hayes RR: Effects of sample size in classifier design. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11, (8): 873–885.
- Gajić-Kvašček M, 2012 Marić-Stojanović M, Šmit Ž, Kantarelou V, Karydas AG, Šljivar D, Milovanović D, Andrić V: New evidence for the use of cinnabar as a colouring pigment in the Vinča culture. *J Archaeol Sci*, 39:1025–1033.
- Jain AK, 2000 Duin RPW, Mao J: Statistical Pattern Recognition: A Review. *IEEE Pattern Anal*, 22, (1): 4–37.

- Kvaščev G,  
2012 Gajić-Kvaščev M, Đurović Ž: Radial Basis Function Network Based Feature Extraction for Improvement the Procedure of Sourcing Neolithic Ceramics. Proceedings of the 11th Symposium - NEUREL 2012, Belgrade, Serbia, 95-100.
- Mami Y,  
2006 Charlet D: Speaker recognition by location in the space of reference speakers. *Speech Communication*, 48, (2): 127-141.
- Stepanić P,  
2009 Latinovic I, Djurovic Z: A new approach to detection of defects in rolling element bearings based on statistical pattern recognition. *Int. J. Adv. Manuf. Techno*, 45: 91-100.
- Stričević R,  
2011 Djurovic N, Djurovic Z: Drought classification in Northern Serbia based on SPI and statistical pattern recognition. *Meteorol Appl*, 18: 60-69.
- Varmuza K,  
2000 Filzmoser P: *Introduction to Multivariate Statistical Analysis in Chemometrics*. CRC Press: Boca Raton FL.

## Zaključak

Značajan broj pitanja otvorenih željom da se odgonetnu zapisi koje su nam daleki preci ispisali praveći keramičke predmete koje smo savremenim analitičkim tehnikama dešifrovali na jezik razumljiv savremenoj nauci, doneo je i značajnu količinu odgovora na osnovu kojih se mogu izvesti sledeći zaključci. Najpodesniji pristup, s obzirom na raznolikost i širinu istraživanja, je da se zaključci predstave u tri celine:

- § analitička,
- § računska i
- § arheološka.

Najznačajnija motivacija za prikazano istraživanje, zbog čega je nekoliko puta istaknuta u radu, je da se sistematska ispitivanja u cilju karakterizacije i zaštite predmeta kulturnog nasleđa metodama i tehnikama koje se koriste u prirodnim naukama (sa ekspertskim znanjem koje ih prati) ne sprovode ili sprovode sporadično (sasvim ličnim zalaganjem pojedinaca i manjih grupa istraživača). To nas značajnim koracima udaljava od žiže svetskih interesovanja za ovu oblast, u kojoj su ulaganja značajna. Takva značajna ulaganja su poslenicima humanističkih nauka (arheolozima, konzervatorima i restauratorima, kustosima, istoričarima umetnosti) na raspolaganje stavila najsofisticiranije analitičke tehnike i najsavremeniju (i proporcionalno najviše finansijski zahtevnu) opremu za analize. Srećna okolnost po trenutnu istraživačku stvarnost u Srbiji je da su nedestruktivne analitičke tehnike među omiljenima za praktičnu primenu. Ako se uz ovaj uslov doda i mogućnost da predmeti kulturnog nasleđa mogu biti analizirani na mestu gde se trenutno nalaze

(lokalitet, zaštićen muzejski depo, atelje za restauraciju) otvara se čitavo polje za prikupljanje vrlo interesantnih rezultata. Saradnici Laboratorije za hemijsku dinamiku, Instituta Vinča konstruisali su prvi prenosni (*portabl*) EDXRF spektrometar namenjen isključivo za analize predmeta kulturnog nasleđa. Iako ima izuzetne osobine, sama analitička tehnika je ograničena na analizu elementarnog sastava. To je čini ograničenom u odnosu na rezultate koji se mogu generisati analizama keramičkih artefakata drugim analitičkim tehnikama. Ispitivanje mogućnosti primene ove tehnike za generisanje rezultata o hemijskoj strukturi keramičkog predmeta koji bi mogli biti upotrebljeni za izvođenje zaključaka o poreklu obavljeno je u eksperimentalnom delu ovog istraživanja. Rezultati su pokazali da EDXRF spektrometrijska metoda određivanja hemijske strukture keramičkog predmeta može da generiše podatke koji nose informaciju o poreklu. Za samu realizaciju analitičkog procesa treba istaći još jedan doprinos. Većina publikovanih i referentnih rezultata zasnovana je na istom pristupu selekcije informacija u cilju određivanja porekla keramičkih artefakata. Pogodnom analitičkom tehnikom odredi se sadržaj glavnih elementa (najčešće izraženo u %) i elemenata u tragovima (nekoliko ppm) u keramičkim predmetima i glinama. Odluka o poreklu donosi se na osnovu poređenja sadržaja glavnih i elemenata u tragovima u keramici i sirovinama. Kvantifikovanje sadržaja hemijskih elemenata vrši se upotrebom standardnog referentnog materijala, čija je upotreba izazvala značajne stručne polemike. Rezultati prikazanog istraživanja pokazuju da je precizno osmišljenim postupkom (izraženim kroz posebno dizajniran algoritam prikazan u poglavlju 4.1) moguće izvesti zaključak o poreklu keramike i bez kvantifikovanja sadržaja hemijskih elemenata u ispitivanim uzorcima, čime nije neophodna upotreba standardnog referentnog materijala. Još jedan novi pristup uveden u ovom radu omogućio je ostvarivanje prethodnog zaključka. Pogodnom obradom spektara korišćenjem neuralnih mreža radijalne osnove omogućeno je da se selekcija obeležja koji su nosioci informacije o poreklu izvrši

automatski, u vremenu koje je uporedivo sa samim analitičkim korakom i bez učešća ljudskog faktora čime je obezbeđeno da se ovi koraci izvode na isti način.

Analizom elementarnog sastava keramičkih predmeta generiše se značajna količina podataka koji su po svojoj prirodi višedimenzioni. I ponovo se u većini publikovanih i referentnih rezultata sreće isti pristup. Zaključak o poreklu se izvodi klasifikacijom u prostoru najveće varijanse u sastavu ispitivanog materijala, a na modelu zasnovanom na sastavu sirovine. Najčešće primenjivane tehnike za ovo su klasterizacija i analiza glavnih komponenti. Ovo međutim, ne mora uvek da bude put koji će dovesti do značajnog rezultata. Rezultati postignuti u toku ovog istraživanja (i prikazani u radu) pokazuju da se i izbor metode/metoda prepoznavanja obeležja koje se koriste za obradu višedimenzionalnih podataka o hemijskom sastavu keramičkog predmeta moraju staviti u arheološki kontekst. Drugim rečima, koji god da se pristup izabere, koja god metodologija prirodnih nauka da se primeni, ne sme se zaboraviti funkcija istraživanja, a to je arheološki kontekst. Da bi ovo bilo i praktično izvodljivo, neophodno je ekspertsko znanje iz svakog pojedinačnog segmenta procedure, izraženo postupkom validacije svakog pojedinačnog koraka, ali i procedure u celini. Odsustvo ovog segmenta u najvećem broju referentnih publikacija iniciralo je ispitivanje veličine nepouzdanosti svakog koraka kojim se donosi odluka o poreklu na najširi način. Većina identifikovanih nepouzdanosti je kvantifikovana i predloženi su različiti postupci za testiranje uspešnosti klasifikacije.

Najznačajniji doprinos ovog istraživanja i postignutih rezultata je u zaključcima koji se mogu smestiti u arheološki kontekst. Njih svakako treba sasvim posebno istaći.

§ Prvo ciljano, osmišljeno i sistematizovano analitičko ispitivanje keramike sa neolitskih lokaliteta u Srbiji, koji su po svom značaju prepoznati u široj svetskoj javnosti i na



kojima su trenutno aktuelne kampanje iskopavanja. U ovim kampanjam ne učestvuju samo vrhunski domaći stručnjaci već i svetski priznati istraživači.

- § Generisana su prva saznanja o hemijskom sastavu keramičkih predmeta sa ovih lokaliteta. Time je izvršena ne samo karakterizacija lokalne proizvodnje, već su otvoreni i prostori za nova istaživanja.
- § Rezultati mogu biti iskorišćeni za formiranje baza podataka po modelima koji su trenutno aktuelni u svetu.
- § Rezultati mogu biti iskorišćeni i za utvrđivanje tehnologije izrade ispitivanih predmeta, čime se može vršiti dublja arheološka, sociološka i antropološka analiza.
- § Rezultati o lokalnoj keramičkoj proizvodnji u doba Neolita su publikovani i postali su dostupni na uvid i kritičizam svetskoj javnosti, čime je slika o Neolitskom Balkanu postala još dublja i važnost Vinčanske kulture još istaknutija.

Jedna sasvim lična impresija može da zaključi prikaz rezultata postignutih u ovom radu. Objektivna nemogućnost praćenja svetskih dostignuća izražena kroz nedostatak savremene analitičke opreme i nedostatak institucionalne podrške ovakvim istraživanjima, još više je istakla neophodnost multidisciplinarnog pristupa u generisanju validnih rezultata, uz naznaku da je pozornica postavljena na ekspertskom nivou.

## Prilog A

### Karhunen-Loeve (KL)ekspanzija

Slučajni  $n$ -dimenzioni vektor  $X$  se može bez greške aproksimacije predstaviti u obliku zbira  $n$  linearno nezavisnih vektora:

$$X = \sum_{i=1}^n y_i \Phi_i = \Phi Y \quad \text{A.1}$$

gde su matrice  $\Phi$  i  $Y$  određene sa:

$$\Phi = [\Phi_1 \ \Phi_2 \ \dots \ \Phi_n]; \quad Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T \quad \text{A.2}$$

gde su  $\Phi_i$  bazisi  $n$ -dimenzionog prostora. Ovako definisana matrica  $\Phi$  je deterministička, i sastoji se od  $n$  linearno nezavisnih vektor kolona, odakle sledi da je

$$\det(\Phi) \neq 0 \quad \text{A.3}$$

Bazisni vektori matrice  $\Phi$  (njene kolone) moraju zadovoljiti, po samoj definiciji ortonormalnost, uslov:

$$\Phi_i^T \Phi_j = \begin{cases} 1; & i = j \\ 0; & i \neq j \end{cases} \quad \text{A.4}$$

Tada se može pisati da je

$$y_i = \Phi_i^T X; \quad i = 1, \dots, n \quad \text{A.5}$$

Kako je vektor  $X$  slučajni vektor, tako je i njegova ortonormalna transformacija  $Y$  takođe slučajni vektor. Vektor  $\Phi_i$  se naziva obeležje, a  $y_i$  je  $i$ -ta komponenta vektora  $X$  u preslikanom ortonormalnom prostoru. Da bi izvršili aproksimaciju vektora  $X$ , treba izabrati  $d$  bazisnih vektora, tako da je  $d$  manje od  $n$  - početne dimenzije vektora  $X$ , ( $d < n$ ). Tada aproksimirani vektor ima sledeći oblik:

$$\hat{X}(d) = \sum_{i=1}^d y_i \Phi_i + \sum_{i=d+1}^n b_i \Phi_i \quad \text{A.6}$$

Tada je greška izvedene aproksimacije definisana sa:

$$\Delta X(d) = X - \hat{X} = \sum_{i=d+1}^n (y_i - b_i) \Phi_i \quad \text{A.7}$$

Treba napomenuti da su vektori  $\hat{X}$  i  $\Delta X$  takođe slučajni vektori. Srednja kvadratna greška aproksimacije, koja treba da je minimalna, se definiše kao

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}^2(d) &= E\{\|\Delta X(d)\|^2\} = E\left\{ \sum_{i=d+1}^n \sum_{j=d+1}^n (y_i - b_i)(y_j - b_j) \Phi_i^T \Phi_j \right\} \\ &= \sum_{i=d+1}^n E\{(y_i - b_i)^2\} \end{aligned} \quad \text{A.8}$$

Minimizacija srednje kvadratne greške aproksimacije vektora  $X$ , vrši se pogodnim izborom parametra  $b$ :

$$\frac{\partial \bar{\varepsilon}^2(d)}{\partial b_i} = -2E\{(y_i - b_i)\} = 0 \quad \text{A.9}$$

Oдавде sledi da je optimalno  $b_i$ , za koje je greška aproksimacije minimalna određeno izrazom:

$$b_i = E\{y_i\} = \Phi_i^T E\{X\} \quad \text{A.10}$$

Sada se srednja kvadratna greška (A.8) može napisati u obliku:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{opt}^2(d) &= \sum_{i=d+1}^n E\{(y_i - E\{y_i\})^2\} = \sum_{i=d+1}^n \Phi_i^T E\{(X - E\{X\})(X - E\{X\})^T\} \Phi_i \\ &= \sum_{i=d+1}^n \Phi_i^T \Sigma_X \Phi_i \end{aligned} \quad \text{A.11}$$

gde je  $\Sigma_X$  kovarijaciona matrica vektora  $X$ .

Ovime se problem minimizacije greške svodi na minimiziranje funkcije  $J$  definisane kao:

$$J = \sum_{i=d+1}^n \Phi_i^T \Sigma_X \Phi_i - \sum_{i=d+1}^n \sum_{j=d+1}^n \mu_{ij} (\Phi_i^T \Phi_j - \delta_{ij}) \quad \text{A.12}$$

gde su  $\mu_{ij}$  Lagranžeoivi multiplikatori, dok drugi član potiče od ograničenja da bazisni vektori moraju biti ortonormalni. Kriterijum  $J$  se može napisati i na sledeći način:

$$J = \text{tr}\{\phi_{n-d}^T \Sigma_X \phi_{n-d} - \mu_{n-d}^* (\phi_{n-d}^T \phi_{n-d} - I)\} \quad \text{A.13}$$

gde su

$$\phi_{n-d} = [\Phi_{d+1} \Phi_{d+2} \dots \Phi_n]; \quad \text{A.14a}$$

i

$$\mu_{n-d}^* = \begin{bmatrix} \mu_{d+1,d+1} & \cdots & \frac{1}{2}\mu_{ij} \\ \cdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{2}\mu_{ji} & \cdots & \mu_{n,n} \end{bmatrix} \quad \text{A.14b}$$

Tražeći parcijalne izvode kriterijuma  $J$  po bazisima i izjednačavajući ove izvode sa nulom, dobija se sledeći rezultat:

$$\frac{\partial J}{\partial \phi_{n-d}} = 2(\Sigma_X \phi_{n-d} - \phi_{n-d} \mu_{n-d}^*) = 0 \quad \text{A.15}$$

pa je

$$\Sigma_X \phi_{n-d} - \phi_{n-d} \mu_{n-d}^* = 0 \quad \text{A.16}$$

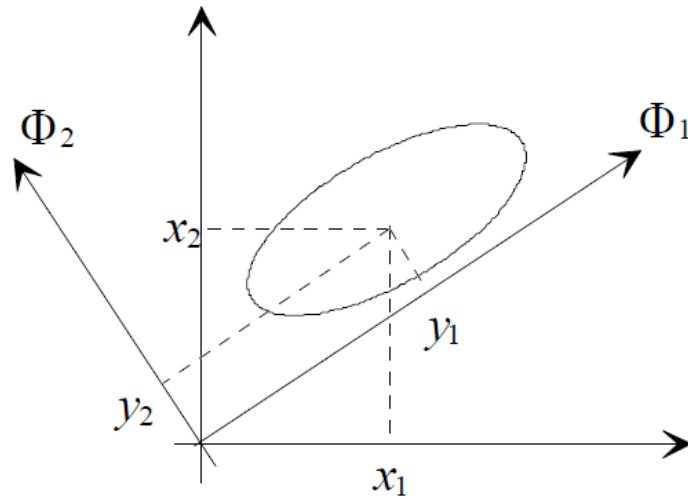
odakle sledi da je

$$\Sigma_X \phi_{n-d} = \phi_{n-d} \mu_{n-d}^* \quad \text{A.17}$$

Poslednja relacija je zadovoljena ako je matrica  $\mu_{nd}^*$  dijagonalna sa elementima  $\lambda_{d+1}, \dots, \lambda_n$  na dijagonali, što su zapravo svojstvene vrednosti kovarijacione matrice,  $\Sigma_X$ . Dakle, minimalna vrednost srednje kvadratne greške aproksimacije vektora  $X$  predstavlja zbir svojstvenih vrednosti izostavljenih koordinata (drugim rečima, treba izostaviti one koordinate kojima odgovaraju najmanje svojstvene vrednosti). Na taj način je:

$$\bar{\varepsilon}_{opt}^2 = \sum_{i=d+1}^n \lambda_i \quad \text{A.18}$$

Ekspanzija slučajnog vektora u prostor koji čine svojstveni vektori kovarijacione matrice  $\Sigma_X$  naziva se Karhunen-Loeve ekspanzija (KL ekspanzija). Na slici A.1 prikazan je primer KL ekspanzije za dvodimenzioni slučajni vektor.



Slika A.1. KL - ekspanzije za dvodimenzioni slučajni vektor.

Raspodela ovog dvodimenzionog vektora je prikazana konturom. Svojstveni vektori  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$  su suštinske ose raspodele, a  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  opisuju varijansu duž ovih osa. Ako je

$$\lambda_2 = E\{(y_2 - b_2)^2\} \tag{A.19}$$

malo, to znači da je  $y \approx b_2$  za svako  $X$ , pa otuda ova koordinata nije informativna, i metod KL ekspanzije rezultira zaključkom da se svaki dvodimenzioni vektor može aproksimirati samo jednom slučajnom promenljivom sa minimalnom greškom aproksimacije:

$$X = \sum_{i=1}^d y_i \Phi_i \approx y_1 \Phi_1 \quad \text{A.20}$$

U daljim razmatranjima smatra se da je

$$E\{X\} = 0 \quad \text{A.21}$$

što neće smetati generalnosti dobijenih rezultata. Osobine KL ekspanzije su sledeće:

§ doprinos svakog od obeležja izražava se njegovom svojstvenom vrednošću  $\lambda$ . Stoga prilikom odbacivanja obeležja, prvo treba odbaciti ono sa najmanjom svojstvenom vrednošću i tako redom i

§ koordinate  $y_i$  su međusobno nekorelisane, jer je kovarijaciona matrica slučajnog vektora  $Y$  dijagonalna:

$$\Sigma_Y = \Phi^T \Sigma_X \Phi = \Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_n\} \quad \text{A.22}$$

Ukoliko se slučajni vektor  $X$  može opisati normalnom raspodelom, tada je i slučajni vektor  $Y$  normalno raspodeljen, što znači da su tada koordinate nezavisne. Skup od  $d$  svojstvenih vektora matrice  $\Sigma_X$  koji odgovaraju najvećim svojstvenim vrednostima minimiziraju srednju kvadratnu grešku aproksimacije  $\bar{\epsilon}^2(d)$ .

## Prilog B

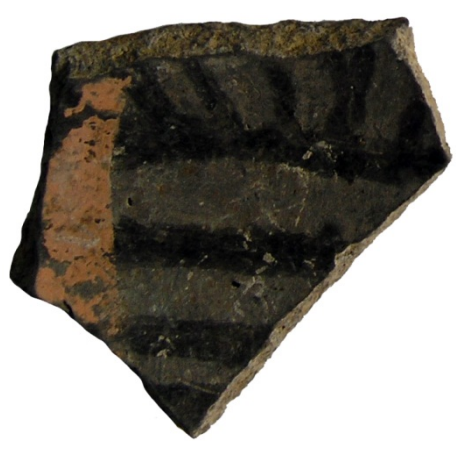
Fragmenti keramičkih predmeta sa lokaliteta Vinča koji su korišćeni u radu.















Fragmenti keramičkih predmeta sa lokaliteta Pločnik koji su korišćeni u radu.











Fragmenti keramičkih predmeta sa lokaliteta Bujanj koji su korišćeni u radu.



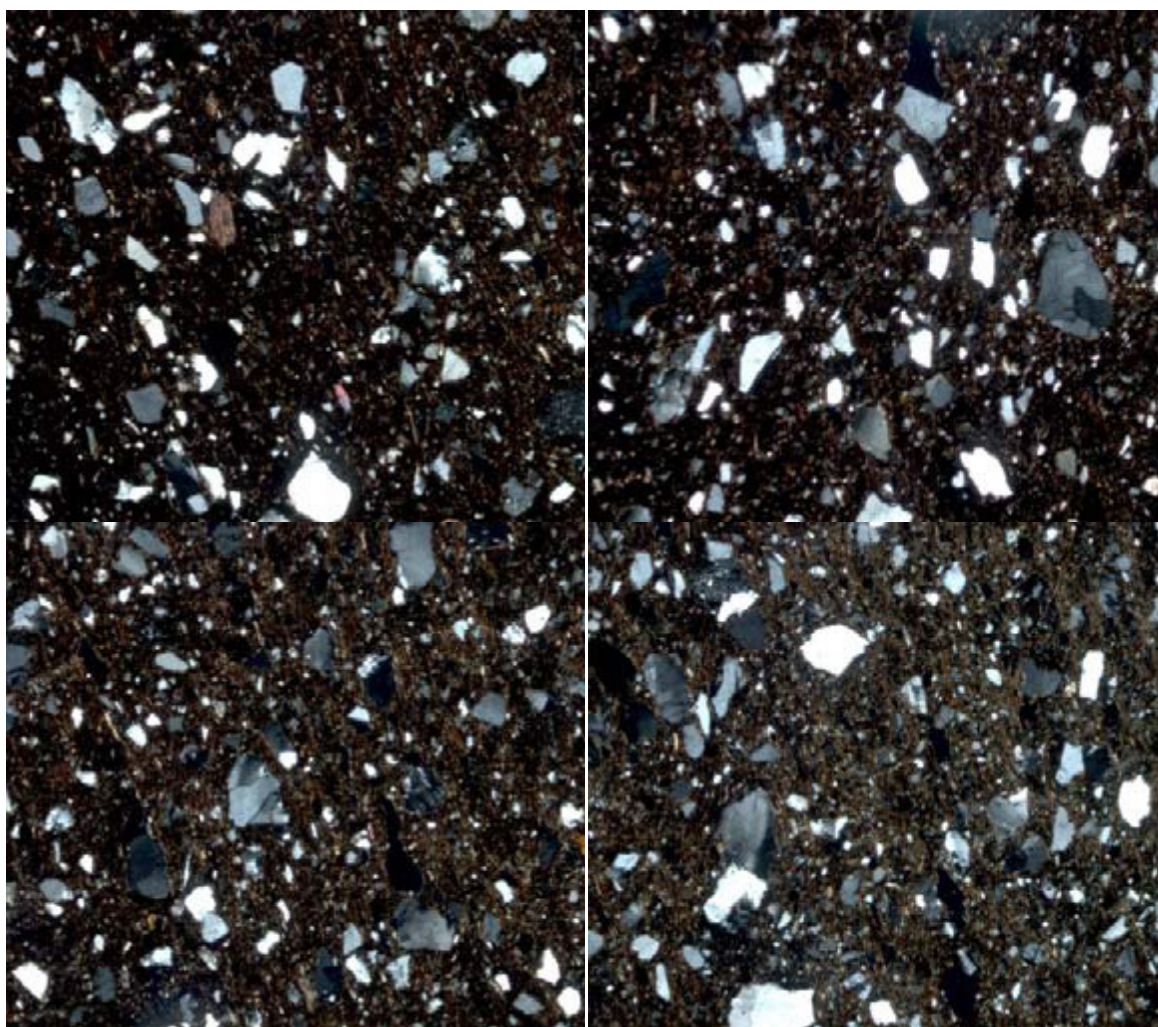




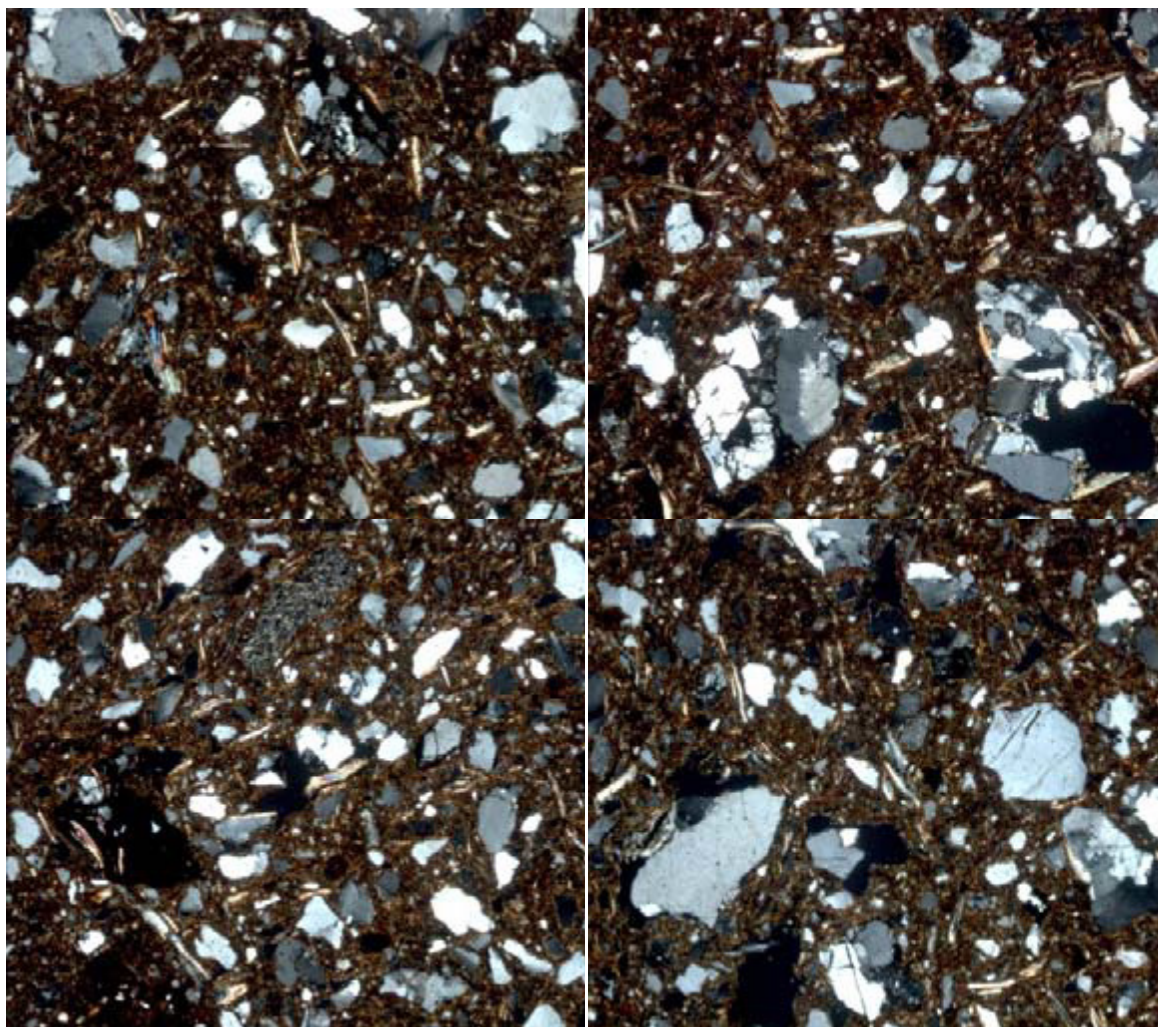
## Prilog C

Petrografski snimci keramičkih predmeta sa lokaliteta Pločnik

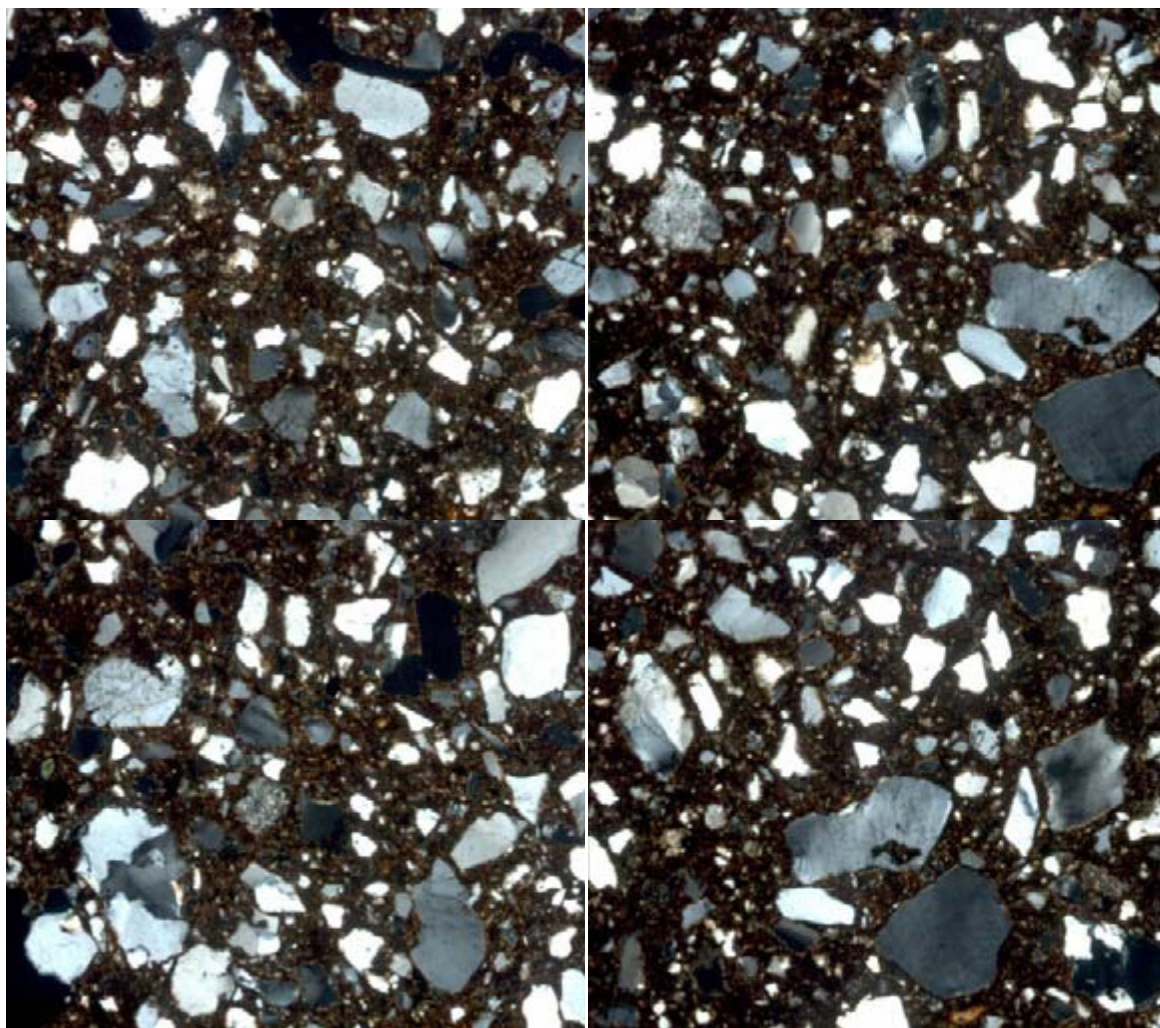
Interna oznaka uzorka KK07



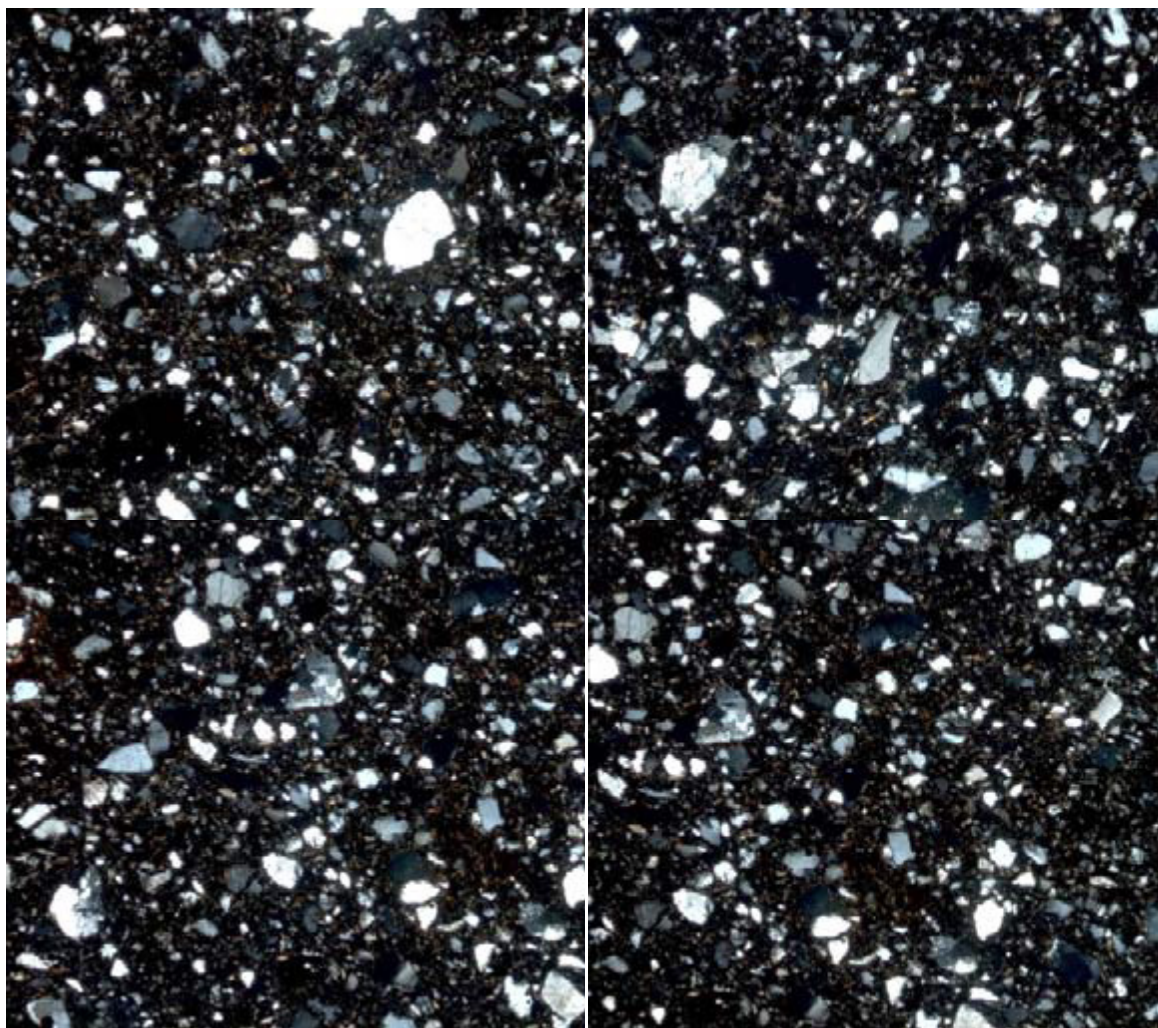
Interna oznaka uzorka KK08



Interna oznaka uzorka KK09

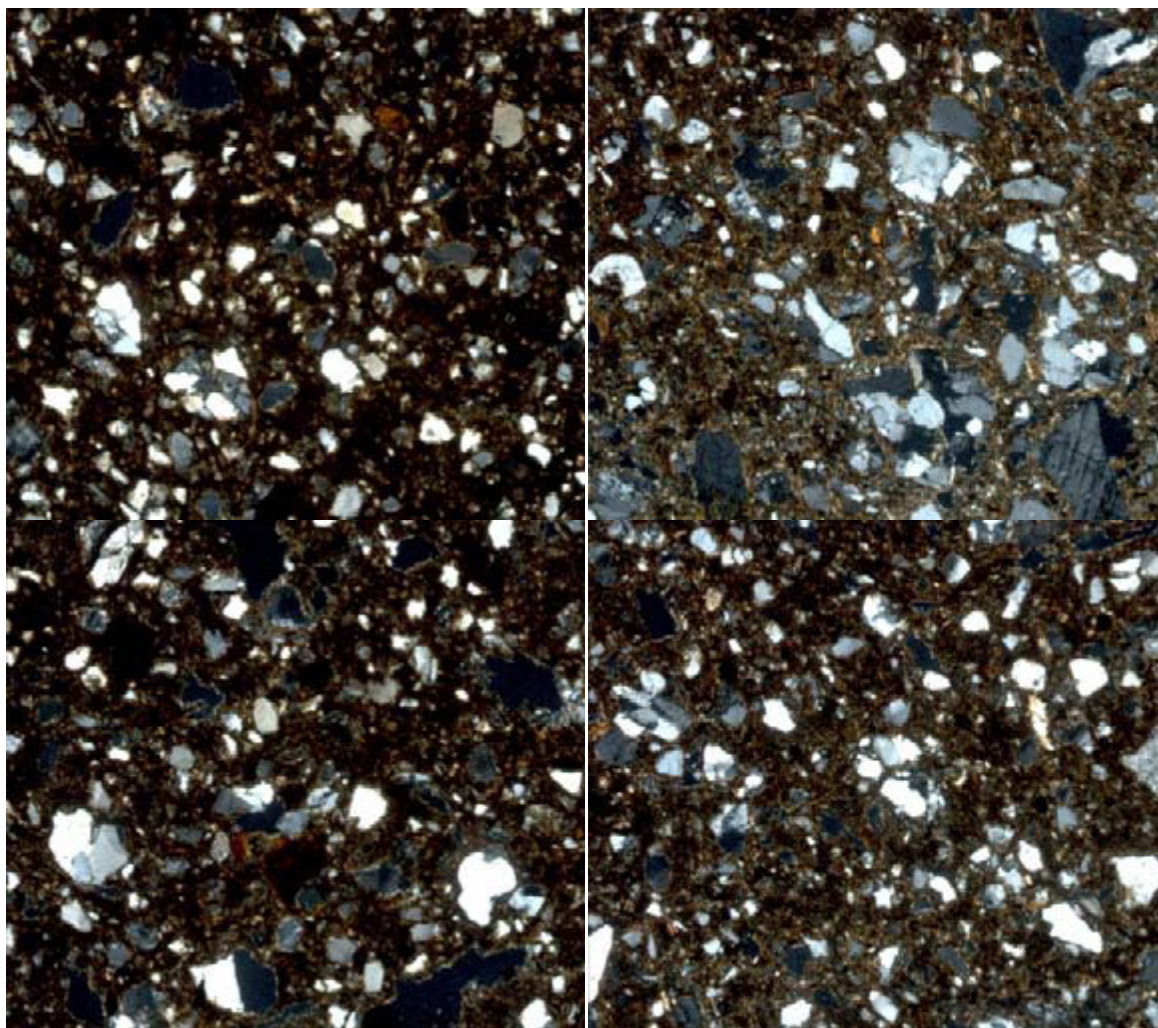


Interna oznaka uzorka KK12





Interna oznaka uzorka KK16



## **Stručna biografija**

Maja Gajić-Kvašček rođena je 28.04.1973. godine u Požarevcu. Osnovno i srednje obrazovanje završila je u Velikom Gradištu. Fizički fakultet u Beogradu upisala je školske 1991/92. godine. Diplomski rad odbranila je 1997. godine sa ocenom 10 i stekla zvanje: diplomirani fizičar. Fizički fakultet je završila sa prosečnom ocenom 8,68. Poslediplomske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu upisala je školske 1997/98. godine. Magistarski rad pod naslovom: "Mehanizam električnog proboja gasova u okolini Pašenovog minimuma" odbranila je 14.02.2003. godine i time stekla akademsko zvanje magistra elektrotehničkih nauka za oblast elektrotehničkih materijala i tehnologija.

Od 1998-2000. godine bila je stipendista Ministarstva za nauku i tehnologiju Republike Srbije i angažovana kao istraživač-pripravnik na projektu osnovnih istraživanja 11M01E1-Štednja energije kroz tribologiju, koji se realizovao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. To vreme bila je angažovana i kao asistent-pripravnik za izvođenje nastave na Elektrotehničkom fakultetu. Školske 2000/2001 godine bila je zaposlena kao asistent-pripravnik na Poljoprivrednom fakultetu, Univerziteta u Beogradu na katedri za fiziku. Od aprila 2001 do 2011. godine bila je zaposlena u institutu za nuklearne nauke "Vinča" u laboratoriji za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine "Zaštita". U laboratoriji je bila raspoređena na poslovima u okviru grupe za kontrolu okoline. Od januara 2002. godine bila je angažovana na projektima osnovnih istraživanja 2016-"Fizika zaštite od zračenja" i 1985-"Istraživanje i razvoj postupaka i materijala u obradi radioaktivnog i opasnog otpada i procena opasnosti po okolinu" koji su realizovani u laboratoriji "Zaštita". Od 2007. godine raspoređena je na aktivnosti za realizaciji projekta *VIND-Vinca Institute Nuclear*

*Decommissioning Program*, koji se realizuje kao naučno-tehnološki projekat Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije a uz tehničku i ekspertsku podršku MAAE (IAEA). U 2010. godini angažovana je na projektu osnovnih istraživanja 142050-“Istraživanje hemijskih i fizičkih fenomena u obradi radioaktivnog i opasnog otpada”. U 2008. godini učestvovala je u realizaciji projekta “Sistem rane najave radijacionog akcidenta” i rukovođila je dvema aktivnostima (laboratorijske analize i sistem kvaliteta), na projektu “Preuzimanje radijuma-226 iz Instituta za onkologiju i radiologiju Srbije, njegov transport, kondicioniranje i skladištenje u Institutu “Vinča”.

Od 01.03.2011. godine zaposlena je Laboratoriji za hemijsku dinamiku i permanentno obrazovanje u Institutu "Vinča" i angažovana na aktivnostima vezanim za zaštitu životne sredine, zaštitu od zračenja i primeni radijacionih i ostalih analitičkih tehnika na izučavanje kulturnog nasleđa. U tekućem projektnom ciklusu angažovana je na dva projekta TR 37021 i III 43009.

U 2007. godini bila je stipendista Međunarodne agencije za atomsku energiju, IAEA. Stipendija je realizovana u IAEA Laboratory, Seibersdorf, Wien.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а мр Маја Гајић - Квашчев

број индекса /

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Недеструктивна карактеризација археолошких керамичких артефаката и

---

утврђивање њиховог порекла статистичким методама препознавања облика

---

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

**Потпис докторанда**

У Београду, 06.02.2013.

  
\_\_\_\_\_

Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора мр Маја Гајић - Квашчев

Број индекса /

Студијски програм /

Наслов рада Недеструктивна карактеризација археолошких керамичких артефаката и утврђивање њиховог порекла статистичким методама препознавања облика

Ментор Проф. др Радмила Јанчић - Хеинеманн

Потписани/а мр Маја Гајић - Квашчев

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис докторанда**

У Београду, 06.02.2013.



Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Недеструктивна карактеризација археолошких керамичких артефаката и

---

утврђивање њиховог порекла статистичким методама препознавања облика

---

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 06.02.2013.

