

# Indirektni nadzor istrošenosti alata i tvrdoće obratka kod bušenja kamena

---

**Klaić, Miho**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:298433>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-20**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Miho Klaić

**INDIREKTNI NADZOR ISTROŠENOSTI ALATA I  
TVRDOĆE OBRATKA KOD BUŠENJA KAMENA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2018.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL  
ARCHITECTURE

Miho Klaić

**INDIRECT TOOL WEAR AND WORKPIECE  
HARDNESS MONITORING IN STONE DRILLING**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2018.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Miho Klaić

**INDIREKTNI NADZOR ISTROŠENOSTI ALATA I  
TVRDOĆE OBRATKA KOD BUŠENJA KAMENA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Toma Udiljak

Zagreb, 2018.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL  
ARCHITECTURE

Miho Klaić

**INDIRECT TOOL WEAR AND WORKPIECE  
HARDNESS MONITORING IN STONE DRILLING**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:

Prof. dr. sc. Toma Udiljak

Zagreb, 2018.

## PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

**UDK:**

**Ključne riječi:** bušenje kamena, neuronske mreže, klasifikacija stupnja  
istrošenosti svrdla, klasifikacija tvrdoće kamena

**Znanstveno područje:** Tehničke znanosti

**Znanstveno polje:** Strojarsstvo

**Institucija u kojoj je rad izrađen:** Fakultet strojarstva i brodogradnje (FSB), Zagreb

**Mentor rada:** Prof. dr. sc. Toma Udiljak

**Broj stranica:** 177

**Broj slika:** 67

**Broj tablica:** 63

**Broj korištenih bibliografskih jedinica:** 78

**Datum obrane:** 27.06.2018

**Povjerenstvo:** Dr. sc. Damir Ciglar, red. prof. – predsjednik povjerenstva  
Dr. sc. Toma Udiljak, red. prof. – mentor  
Dr. sc. Darko Mayer, professor emeritus Rudarsko-geološko-  
naftnog fakulteta, Zagreb – član povjerenstva  
Dr. sc. Mladen Franz, professor emeritus – član povjerenstva  
Dr. sc. Dubravko Majetić, red. prof. – član povjerenstva

**Institucija u kojoj je rad pohranjen:** Fakultet strojarstva i brodogradnje (FSB), Zagreb  
Nacionalna i sveučilišna knjižnica, Zagreb

## Zahvala

---

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Tomi Udiljku, te prof. dr. sc. Danku Brezaku i prof. dr. sc. Damiru Ciglaru na savjetima i bezrezervnoj podršci koju su mi pružali tijekom istraživanja i pisanja rada.

Posebnu zahvalnost dugujem doc. dr. sc. Tomislavu Staroveškom i dipl. ing. Zlatku Čatlaku na prijateljskom pristupu, podršci i pomoći tijekom cijelog poslijediplomskog studija kao i pri izradi ovog rada.

Zahvalio bih se kolegici mag. ing. Zrinki Murat koja je nesebično odvojila dio svog vremena i pomogla mi pri obradi podataka dobivenih u eksperimentalnom dijelu rada.

Također se želim zahvaliti i djelatnicima laboratorija za alatne strojeve, g. Damiru Švecu i g. Franji Babiću na pomoći pri izradi ispitnog postava i tijekom provedbe eksperimentalnog rada.

Na kraju, najveću zahvalnost dugujem cijeloj svojoj obitelji, posebno supruzi Ljiljani i sinu Mihi.



|  |       |
|--|-------|
| Podaci o mentoru .....   | V     |
| Predgovor .....  | VII   |
| Sažetak .....  | VIII  |
| Summary .....  | IX    |
| Ključne riječi – Keywords.....   | X     |
| Popis slika .....  | XI    |
| Popis tablica .....  | XIV   |
| Popis oznaka .....   | XVIII |
| Popis kratica .....  | XXII  |
| 1. Uvod .....  | 1     |
| 1.1. Motivacija .....  | 4     |
| 1.2. Cilj i hipoteza rada .....  | 5     |
| 1.3. Metodologija i plan istraživanja .....                                      | 5     |
| 1.3.1. Razvoj eksperimentalnog postava .....                                     | 5     |
| 1.3.2. Plan pokusa .....   | 6     |
| 1.3.3. Razvoj modela kvantifikacije stupnja istrošenosti i tvrdoće obratka ..... | 7     |
| 1.4. Struktura rada.....   | 7     |
| 1.5. Upotreba kamena danas .....   | 9     |
| 2. Pregled postojećeg stanja i spoznaja .....                                    | 12    |
| 2.1. Podjela arhitektonsko građevinskog kamena .....                             | 12    |
| 2.1.1. Genetska klasifikacija .....  | 12    |
| 2.1.2. Komercijalna podjela vrsta arhitektonsko građevinskog kamena .....        | 15    |
| 2.1.3. Komercijalni naziv arhitektonsko građevinskog kamena.....                 | 16    |

---

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 2.1.4. | Mehanička svojstva najznačajnija za obradu odvajanjem čestica .....         | 17 |
| 2.2.   | Pregled područja postupka bušenja kamena .....                              | 19 |
| 2.2.1. | Alat za bušenje- spiralno svrdlo .....                                      | 20 |
| 2.2.2. | Sile rezanja i momenti pri obradi postupkom bušenja .....                   | 23 |
| 2.2.3. | Spiralna svrdla s tvrdo lemljenom pločicom od tvrdog metala .....           | 25 |
| 2.3.   | Trošenje alata .....  | 25 |
| 2.3.1. | Mehanizmi trošenja .....  | 26 |
| 2.3.2. | Parametri trošenja oštrice spiralnog svrdla .....                           | 32 |
| 2.3.3. | Postojanost i kriteriji istrošenosti rezne oštrice.....                     | 33 |
| 2.4.   | Tvrdoća kamena .....  | 35 |
| 2.4.1. | Određivanje tvrdoće po Knoop-ovoj metodi .....                              | 37 |
| 2.5.   | Metode nadzora istrošenosti reznih alata i tvrdoće obratka .....            | 40 |
| 2.6.   | Vrste i obrada signala kod indirektnog nadzora procesa .....                | 43 |
| 2.6.1. | Sile rezanja i moment glavnog vretena .....                                 | 43 |
| 2.6.2. | Jakosti struje pogonskih motora .....                                       | 44 |
| 2.6.3. | Vibracije.....  | 45 |
| 2.6.4. | Akustična emisija.....  | 45 |
| 2.6.5. | Obrada signala i vrste značajki procesa .....                               | 47 |
| 2.7.   | Model sustava za indirektni nadzor procesa trošenja i tvrdoće obratka ..... | 50 |
| 3.     | Eksperimentalni postav i mjerna oprema.....                                 | 52 |
| 3.1.   | Postav za pripremu uzoraka .....  | 52 |
| 3.2.   | Ispitni postav glavnih mjerenja.....  | 56 |
| 3.2.1. | Konstrukcija stroja.....  | 56 |
| 3.2.2. | CNC Sustav.....   | 58 |
| 3.2.3. | Konstrukcija modula za mjerenje tvrdoće .....                               | 60 |

---

---

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 3.3.   | Mjerni sustavi ispitnog stroja .....   | 63  |
| 3.3.1. | Senzor sila.....   | 66  |
| 3.3.2. | Senzor vibracija .....   | 67  |
| 3.3.3. | Senzor akustične emisije .....   | 68  |
| 3.3.4. | Vizijski sustav ispitnog stroja.....   | 69  |
| 3.4.   | Korisničko sučelje mjernog sustava .....   | 71  |
| 4.     | Mjerenje, analiza signala i izdvajanje značajki.....                                       | 73  |
| 4.1.   | Planiranje pokusa .....  | 73  |
| 4.1.1. | Ispitni uzorci i svrdla .....  | 73  |
| 4.1.2. | Mjerenje tvrdoće.....  | 76  |
| 4.1.3. | Određivanje stupnja istrošenosti .....   | 81  |
| 4.1.4. | Izbor parametara obrade za izvođenje glavnog eksperimenta .....                            | 85  |
| 4.2.   | Snimanje i filtriranje signala .....   | 89  |
| 4.3.   | Izdvajanje značajki .....  | 93  |
| 4.3.1. | Značajke izdvojene iz signala sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora.....          | 93  |
| 4.3.2. | Značajke izdvojene iz signala vibracija .....  | 94  |
| 4.3.3. | Značajke izdvojene iz signala akustične emisije .....                                      | 95  |
| 5.     | Modeliranje stupnja istrošenosti alata i tvrdoće kamena .....                              | 97  |
| 5.1.   | Struktura mreže i matematički model.....   | 98  |
| 5.2.   | Učenje i testiranje mreže.....   | 102 |
| 5.3.   | Podaci za učenje i testiranje mreže .....  | 104 |
| 5.4.   | Model stupnja istrošenosti svrdla .....  | 106 |
| 5.4.1. | Klasifikacija stupnja istrošenosti značajkama sila i jakosti struja pogonskih motora ..... | 106 |
| 5.4.2. | Klasifikacija stupnja istrošenosti značajkama vibracija .....                              | 109 |

---

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 5.4.3. | Klasifikacija stupnja istrošenosti značajkama akustične emisije.....   | 114 |
| 5.4.4. | Klasifikacija stupnja istrošenosti značajkama sila rezanja, jakosti struja<br>pogonskih motora, vibracija i akustične emisije..... | 118 |
| 5.5.   | Model klasifikacije tvrdoće kamena .....   | 122 |
| 5.5.1. | Klasifikacija tvrdoće kamena značajkama sila rezanja i jakosti struja pogonskih<br>motora .....                                    | 122 |
| 5.5.2. | Klasifikacija tvrdoće kamena značajkama vibracija .....  | 124 |
| 5.5.3. | Klasifikacija tvrdoće kamena značajkama akustične emisije .....  | 128 |
| 5.5.4. | Klasifikacija tvrdoće kamena značajkama sila rezanja, jakosti struja pogonskih<br>motora, vibracija i akustične emisije .....      | 132 |
| 6.     | Zaključak.....   | 135 |
| 7.     | Literatura.....  | 138 |
|        | Kratki životopis .....   | 146 |
|        | Short Biography.....   | 147 |

Toma Udiljak rođen je 16. 11. 1955. u Studencima, Republika Hrvatska. Osnovnu školu i V. gimnaziju završava u Zagrebu, gdje je 1980. diplomirao na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (FSB), Sveučilišta u Zagrebu. Godine 1981. upisuje poslijediplomski studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, gdje je 1988. godine magistrirao, a 1996. godine doktorirao.

Nakon studija se zapošljava u tvornici *Jugoturbina*, Karlovac, a od 1982. radi na FSB Zagreb, Zavod za tehnologiju, u zvanju asistenta. 1997. je izabran za višeg asistenta, 2000. za docenta, 2004. za izvanrednog profesora, a 2009. za redovitog profesora. Obavljao je funkciju voditelja Laboratorija za alatne strojeve, a 2007. je sudjelovao u osnivanju Laboratorija za medicinsko inženjerstvo. Tijekom rada na FSB bio je član većeg broja povjerenstava, prodekan za poslovanje i organizaciju, voditelj Laboratorija za medicinsko inženjerstvo i voditelj usmjerenja *Obradbeni strojevi i procesi*.

Sudjeluje u izvođenju nastave iz većeg broja kolegija Katedre za alatne strojeve na preddiplomskom, diplomskom i poslijediplomskom studiju. Uveo je kolegije *Proizvodnja podržana računalom-CAM, Upravljanje i programiranje obradnih sustava, te Postupci obrade odvajanjem*, a u poslijediplomskoj nastavi kolegij *Automatizirani obradni sustavi*. Sudjelovao je i u izvođenju nastave na Strojarskom fakultetu u Slavonskom Brodu, Višoj tehničkoj školi u Varaždinu, Tehničkom veleučilištu u Karlovcu i na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu. Bio je mentor trojici doktoranada te pri izradi preko 50 diplomskih i 40 završnih radova. Kao nastavnik je sudjelovao u radu doktorskih škola na *Tallinn University of Technology*, Estonija i na Sveučilištu u Zadru.

Od 1982. aktivno je sudjelovao u ostvarivanju desetak znanstvenoistraživačkih projekata. Bio je glavni istraživač projekta *Visokobrzinski sustavi*, a od 2007. godine je glavni istraživač projekta *Napredni obradni sustavi i procesi*, te istraživač na projektu *Inteligentno vođenje obradnih sustava*. Autor je i koautor u više od 100 znanstvenih i stručnih radova.

Bio je voditelj četiri uspješno završena tehnologijska projekta, a trenutno je voditelj projekta *Napredni sustavi bušenja u koštano-zglobnoj kirurgiji (ADRISS)*.

Tijekom 1989. godine bio je šest mjeseci na specijalizaciji *na University of South Florida*, Tampa, a u srpnju 1995. na specijalizaciji za primjenu CAD/CAM sustava za izradu proteza u Seattle-u, SAD.

Do sada je, kao član organizacijskog i/ili znanstvenog odbora sudjelovao u pripremi i realizaciji velikog broja (preko 40) znanstvenih i stručnih savjetovanja u Hrvatskoj i inozemstvu.

Predsjednik je *Hrvatske udruge proizvodnoga strojarstva (HUPS)* i udruge *Božo Težak*, član Međunarodnog odbora *Donau-Adria Association for Automation and Manufacturing - DAAAM Viena*, član Akademije tehničkih znanosti i član Znanstvenog vijeća za tehnološki razvoj pri HAZU.

U periodu 1997.-2002. bio je član Sveučilišnog odbora za međunarodnu suradnju, u periodu 2008. – 2011. član stručnog vijeća Tehničkog veleučilišta u Zagrebu, od 2005. je član Vijeća tehničkog područja Sveučilišta u Zagrebu, a od 2012. godine član Senata Sveučilišta u Zagrebu.

Dobitnik je studentske svibanjske nagrade, medalje fakulteta FSB, priznanja DAAAM, srebrne i zlatne plakete Hrvatskog društva održavatelja (HDO), te srebrne i zlatne plakete HUPS-a. Govori i piše engleski, a služi se njemačkim jezikom. Oženjen je i otac troje djece.

Unatoč velikom naporu koji je posljednja tri desetljeća uloženo u području nadzora trošenja reznih alata, opće primjenjiv model za estimaciju trošenja još uvijek nije ostvaren. Uzme li se u obzir trend obrade skupine materijala nehomogene i anizotropne strukture kakav je i kamen obradivost može predstavljati veliki problem. Razlog tomu većim je dijelom povezan uz mehanička svojstva ovih materijala, koja u zoni obrade mogu značajno varirati i koja je često teško ili nemoguće prethodno kvalitetno izmjeriti. Promjena tvrdoće ili čvrstoće kamena u zoni obrade uz stalne parametre obrade (posmak i brzinu rezanja) može izazvati porast sila rezanja, što u konačnici može dovesti do loma alata ili obrađivanog materijala. Povećanje sila rezanja s istim krajnjim posljedicama također može biti izazvano trošenjem alata. Važno je naglasiti da se u svim dosadašnjim istraživanjima dinamika trošenja već i kod homogenih materijala pokazala izrazito nehomogenom, a dijelom i stohastične prirode.

S druge strane, današnje metode za određivanje tvrdoće zasnivaju se na izravnim mjernim postupcima kojima je tvrdoću moguće dobiti samo na površini materijala. Postupci za određivanje čvrstoće su razorni i uglavnom pružaju orijentacijske vrijednosti. Stoga je na osnovi ovih postupaka teško i često nemoguće odrediti predmetna svojstva unutar materijala, a time i obradivost materijala. Jedan od pristupa kojima se spomenuta problematika nastoji riješiti su neizravni postupci, kojima se tijekom obrade nastoje procijeniti mehanička svojstva materijala. Međutim, iz objavljenih radova može se zaključiti da su takvi postupci još uvijek nedovoljno istraženi. Dosadašnja istraživanja usmjerena su isključivo na procjenu čvrstoće i tvrdoće primjenom senzora sila ili jakosti struja pogonskih motora, odnosno korištenjem manjeg broja parametara procesa. Nadalje, do sada predloženi modeli zasnovani su na nekoj od distribucija vjerojatnosti i ne uključuju trošenje alata kao značajan parametar.

Slična istraživanja, provedena na području modeliranja trošenja alata kod obrada homogenih i izotropnih materijala, ukazuju na puno bolje rezultate dobivene modelima koji uključuju veći broj parametara procesa i koji su zasnovani na algoritmima računalne inteligencije. S obzirom na navedeno, očekuje se da bi se modelima temeljenim na algoritmima računalne inteligencije koji uključuju veći broj parametara procesa mogla ostvariti robusna kvantifikacija stupnja istrošenosti te svojstva obrađivanog kamena.

Kamen je po svojoj strukturi krhak, nehomogen i anizotropan materijal, čija mehanička svojstva u zoni obrade mogu značajno varirati. Promjenjiva mehanička svojstva, poglavito tvrdoća, imaju veliki značaj kod izbora parametara obrade. Neodgovarajući parametri obrade mogu negativno djelovati na dinamiku trošenja alata, te izazvati lom alata ili obrađivanog materijala uslijed povećanih sila rezanja. Imajući u vidu nemogućnost mjerenja istrošenosti reznog alata tijekom postupka obrade, u predloženom istraživanju analizirat će se mogućnost indirektnog nadzora procesa bušenja u smislu procjene stupnja istrošenosti svrdla i vrste (tvrdoće) obrađivanog kamena. Modeliranje navedenih parametara procesa provest će se primjenom algoritama računalne inteligencije u uvjetima bušenja triju vrsta kamena različitih tvrdoća i stupnjeva heterogenosti, primjenom svrdla s četiri različita stupnja istrošenosti, a na temelju značajki izdvojenih iz eksperimentalno snimljenih signala procesa bušenja.



Stone is a brittle, non-homogeneous and anisotropic material whose physical-mechanical properties usually substantially vary in the cutting zone. Variable material properties, especially hardness, have important influence in cutting parameters selection. Improper values of cutting parameters can have negative influence on tool wear dynamic, and can potentially result in tool or workpiece breakage due to occurrence of the higher cutting forces. Since direct tool wear measurement is not possible during the cutting process, application of indirect monitoring techniques for tool wear and material type (hardness) classification in stone drilling will be analyzed in this study. Classification models of these two parameters will be based on artificial intelligence algorithms. They will be analyzed based on the features extracted from several types of process signals acquired during stone drilling experiment. Three types of stone samples of different hardness and heterogeneity will be analyzed, with the use of drills with the four different wear levels.

## Ključne riječi – Keywords

---

- bušenje kamena
  - neuronske mreže
  - klasifikacija stupnja istrošenosti svrdla
  - klasifikacija tvrdoće kamena
  - višesenzorski nadzor
- 
- stone drilling
  - neural networks
  - classification of drill wear
  - stone hardness estimation
  - multisensor fusion-based drill condition monitoring

|   |    |
|---|----|
| Slika 1.1 Amfiteatar u Puli i Dioklecijanova palača u Splitu .....                                  | 1  |
| Slika 1.2 Ulomak kamene grede s natpisom kneza Branimira .....                                      | 2  |
| Slika 1.3 Trogirska katedrala i Šibenska katedrala .....  | 2  |
| Slika 1.4 Medvedgrad i Dubrovačke zidine .....  | 3  |
| Slika 1.5 Eksploatacija i udio gotovog proizvoda arhitektonsko građevinskog kamena.....             | 9  |
| Slika 1.6 Udio kontinenata u svjetskoj proizvodnji i preradi arhitektonsko građevinskog kamena..... | 10 |
| Slika 1.7 Udio država u svjetskoj proizvodnji i preradi arhitektonsko građevinskog.....             | 10 |
| Slika 2.1 Sustav postupka bušenja.....  | 19 |
| Slika 2.2 Elementi spiralnog svrdla .....   | 20 |
| Slika 2.3 Geometrija spiralnog svrdla .....   | 21 |
| Slika 2.4 Geometrijski kutovi svrdla .....  | 21 |
| Slika 2.5 Parametri zahvata postupka bušenja .....  | 22 |
| Slika 2.6 Sile rezanja kod bušenja.....   | 24 |
| Slika 2.7 Faze izrade spiralnog svrdla s tvrdo lemljenom pločicom od tvrdog metala .....            | 25 |
| Slika 2.8 Sučelje alata i obratka sa zonama trošenja .....  | 26 |
| Slika 2.9 Abrazijsko trošenje između dva tijela .....   | 27 |
| Slika 2.10 Abrazijsko trošenje između tri tijela .....  | 27 |
| Slika 2.11 Adhezijsko trošenje.....   | 28 |
| Slika 2.12 Difuzijsko trošenje.....   | 29 |
| Slika 2.13 Oksidacijsko trošenje .....  | 30 |
| Slika 2.14 Plastična deformacija rezne oštrice .....  | 30 |
| Slika 2.15 Umor materijala .....  | 32 |
| Slika 2.16 Karakteristični oblici trošenja spiralnog svrdla .....                                   | 33 |

---

|   |    |
|---|----|
| Slika 2.17 Metode direktnog ispitivanja tvrdoće metalnih materijala.....                | 36 |
| Slika 2.18 Oblik indentora i otiska Knoop-ove metode.....                               | 37 |
| Slika 2.19 Dijagram tvrdoće po Knoop-u.....   | 39 |
| Slika 2.20 Pristupi nadzoru istrošenosti reznog alata i tvrdoće obratka.....            | 42 |
| Slika 2.21 Izvori akustične emisije .....   | 46 |
| Slika 2.22 Sustav za nadzor procesa obrade .....  | 51 |
| Slika 3.1 Eksperimentalni postav.....   | 52 |
| Slika 3.2 Postav za pripremu kamenih uzoraka.....                                       | 54 |
| Slika 3.3 Glava za poliranje.....   | 55 |
| Slika 3.4 Radni prostor ispitnog stroja .....   | 56 |
| Slika 3.5 Modul glavnog prigona ispitnog stroja .....                                   | 57 |
| Slika 3.6 Elementi upravljačkog sustava ispitnog postava .....                          | 58 |
| Slika 3.7 Uređaj za mjerenje tvrdoće .....  | 61 |
| Slika 3.8 Struktura upravljačkog sustava modula za mjerenje tvrdoće .....               | 62 |
| Slika 3.9 Raspored senzora na ispitnom stroju .....                                     | 63 |
| Slika 3.10 Mjerna stanica NI cDAQ-9178.....   | 64 |
| Slika 3.11 Struktura mjernog sustava.....   | 66 |
| Slika 3.12 Senzor sila s nabojnim pojačalom.....  | 66 |
| Slika 3.13 Senzor vibracija s nabojnim pojačalom .....                                  | 68 |
| Slika 3.14 Senzor akustične emisije s odgovarajućim sklopom za prihvatanje signala..... | 69 |
| Slika 3.15 Vizijski sustav ispitnog stroja .....  | 70 |
| Slika 3.16 Korisničko sučelje mjerne aplikacije .....                                   | 71 |
| Slika 3.17 Primjer mjernih datoteka nastalih jednim mjernim ciklusom.....               | 72 |
| Slika 4.1 Izgled rezanog kamenog uzorka .....   | 74 |
| Slika 4.2 Alati za pripremu uzoraka .....   | 75 |

---

---

|  |     |
|--|-----|
| Slika 4.3 Postupak poliranja uzoraka.....  | 75  |
| Slika 4.4 Ispitna svrdlo korišteno za potrebe eksperimenta .....   | 76  |
| Slika 4.5 Primjer izgleda tekstura ispitnih kamenih uzoraka.....   | 77  |
| Slika 4.6 Postupak indentacije.....  | 77  |
| Slika 4.7 Slike otisaka indentacije $K_1$ , $K_2$ i $K_3$ .....  | 78  |
| Slika 4.8 Neupotrebljivi otisci snimljeni na uzorcima kamena $K_1$ i $K_3$ .....                                   | 78  |
| Slika 4.9 Prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoća uzoraka.....   | 79  |
| Slika 4.10 Vrijednosti tvrdoća uzoraka i prosječnih vrijednosti kamena $K_1$ , $K_2$ i $K_3$ .....                 | 80  |
| Slika 4.11 Notacija naziva slike za mjerenje istrošenosti .....  | 81  |
| Slika 4.12 Tijek izvođenja glavnog eksperimenta.....   | 82  |
| Slika 4.13 Primjena CAD sustava CATIA za određivanje parametara trošenja .....                                     | 84  |
| Slika 4.14 Aksijalna sila pri različitim parametrima obrade i stupnjevima istrošenosti.....                        | 86  |
| Slika 4.15 Parametri obrade prema planu pokusa .....   | 87  |
| Slika 4.16 Nefiltrirani i filtrirani signal sila rezanja $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ te resultantne sile $F_R$ .....     | 90  |
| Slika 4.17 Nefiltrirani i filtrirani signal jakosti struja pogonskih motora $I_x$ , $I_y$ , $I_z$ i $I_{GV}$ ..... | 91  |
| Slika 5.1 Sustav za klasifikaciju stupnja istrošenosti i tvrdoće kamena .....                                      | 97  |
| Slika 5.2 Struktura RBF mreže .....  | 99  |
| Slika 5.3 Skup podataka za učenje i testiranje mreže .....   | 104 |
| Slika 5.4 Analiza podataka iz signala vibracija.....   | 109 |

|   |     |
|---|-----|
| Tablica 2.1 Klasifikacija arhitektonsko-građevnog kamena temeljem tlačne čvrstoće .....                                 | 18  |
| Tablica 2.2 Podjela značajki trošenja i tvrdoće obratka .....   | 48  |
| Tablica 3.1 Osnovne tehničke karakteristike stroja za pripremu uzoraka .....  | 53  |
| Tablica 3.2 Osnovne tehničke karakteristike ispitnog stroja .....   | 57  |
| Tablica 3.3 Popis mjernih kartica .....   | 59  |
| Tablica 3.4 Popis mjernih sustava korištenih u eksperimentu.....  | 65  |
| Tablica 3.5 Tehničke karakteristike senzora sila i odgovarajućeg pojačala .....   | 67  |
| Tablica 3.6 Tehničke karakteristike senzora vibracija i odgovarajućeg pojačala .....                                    | 68  |
| Tablica 3.7 Tehničke karakteristike sustava za mjerenje akustične emisije .....   | 69  |
| Tablica 3.8 Tehničke karakteristike vizijskog sustava .....   | 70  |
| Tablica 4.1 Mehanička svojstva vrsta ispitnih uzoraka .....   | 74  |
| Tablica 4.2 Svojstva tvrdoće vrsta ispitnih uzoraka .....   | 80  |
| Tablica 4.3 Početni i konačni oblici trošenja prema stupnju istrošenosti.....   | 83  |
| Tablica 4.4 Parametri trošenja s obzirom na stupanj istrošenosti.....   | 85  |
| Tablica 4.5 Režimi obrade korišteni u glavnom eksperimentu .....  | 88  |
| Tablica 4.6 Značajke u vremenskom području izdvojene iz signala sila rezanja i jakosti<br>struja pogonskih motora ..... | 93  |
| Tablica 4.7 Značajke u vremenskom području izdvojene iz signala sila rezanja i jakosti<br>struja pogonskih motora ..... | 94  |
| Tablica 4.8 Značajke izdvojene iz signala vibracija.....  | 95  |
| Tablica 4.9 Značajke izdvojene iz signala akustične emisije.....  | 96  |
| Tablica 5.1 Izlazni neuroni mreže za procjenu stupnja istrošenosti svrdla.....  | 105 |
| Tablica 5.2 Izlazni neuroni mreže za procjenu tvrdoće kamena .....  | 105 |

---

|  |     |
|--|-----|
| Tablica 5.3 Rezultati klasifikacije stupnja istrošenosti svrdla dobiveni sa značajkama sila rezanja .....  | 106 |
| Tablica 5.4 Rezultati klasifikacije stupnja istrošenosti svrdla dobiveni sa značajkama jakosti struja pogonskih motora Z osi i glavnog vretena .....     | 107 |
| Tablica 5.5 Kombinacije značajki korištene u prvom koraku analize podataka vibracija .....   | 110 |
| Tablica 5.6 Najbolji rezultat kombinacija značajki svakog od odabranih širina frekvencijskih pojaseva nakon prvog koraka analize signala vibracija ..... | 110 |
| Tablica 5.7 Kombinacije značajki korištene u drugom koraku analize podataka vibracija ....   | 111 |
| Tablica 5.8 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki iz signala vibracija uz uvjet $T_{SR} \geq 75\%$ .....           | 112 |
| Tablica 5.9 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki iz signala vibracija uz uvjet $T_{SR} \geq 80\%$ .....           | 112 |
| Tablica 5.10 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki iz signala vibracija uz uvjet $T_{SR} \geq 85\%$ .....          | 113 |
| Tablica 5.11 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla kombinacija značajki $(XY)_{75}$ .....  | 114 |
| Tablica 5.12 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla kombinacija značajki $(XYZ)_{80}$ .....   | 114 |
| Tablica 5.13 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla kombinacija značajki $(YZ)_{85}$ .....  | 114 |
| Tablica 5.14 Značajke i njihove kombinacije korištene u prvom koraku analize podataka akustične emisije .....  | 115 |
| Tablica 5.15 Najbolji rezultati svakog od odabranih širina frekvencijskih pojaseva nakon prvog koraka analize signala akustične emisije .....            | 115 |
| Tablica 5.16 Značajke i njihove kombinacije korištene u drugom koraku analize podataka akustične emisije .....   | 116 |
| Tablica 5.17 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki iz signala akustične emisije uz uvjet $T_{SR} \geq 50\%$ .....  | 116 |
| Tablica 5.18 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki iz signala akustične emisije uz uvjet $T_{SR} \geq 55\%$ .....  | 116 |

|  |     |
|--|-----|
| Tablica 5.19 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki iz signala akustične emisije uz uvjet $T_{SR} \geq 60$ % .....                  | 117 |
| Tablica 5.20 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla kombinacijama značajki $(AE_{RAZLIČITI})_{50}$ .....  | 117 |
| Tablica 5.21 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla kombinacijama značajki $(AE_{5000})_{55}$ ....  | 118 |
| Tablica 5.22 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla kombinacijama značajki $(AE_{RAZLIČITI})_{60}$ .....  | 118 |
| Tablica 5.23 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki iz signala vibracija i akustične emisije .....                                  | 119 |
| Tablica 5.24 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki iz signala vibracija i jakosti struja pogonskih motora .....                    | 120 |
| Tablica 5.25 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki iz signala akustične emisije i jakosti struja pogonskih motora .....            | 120 |
| Tablica 5.26 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki iz signala vibracija, akustične emisije i jakosti struja pogonskih motora ..... | 120 |
| Tablica 5.27 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni sa značajkama sila rezanja i njihovim kombinacijama .....   | 122 |
| Tablica 5.28 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni sa značajkama jakosti struja pogonskih motora Z osi i glavnog vretena te njihovim kombinacijama .....       | 123 |
| Tablica 5.29 Najbolji rezultati svakog od odabranih širina frekvencijskih pojaseva signala vibracija nakon prvog koraka klasifikacije tvrdoće kamena .....               | 124 |
| Tablica 5.30 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki iz signala vibracija uz uvjet $T_{SR} \geq 55$ % .....                               | 125 |
| Tablica 5.31 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki iz signala vibracija uz uvjet $T_{SR} \geq 60$ % .....                               | 126 |
| Tablica 5.32 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki iz signala vibracija uz uvjet $T_{SR} \geq 65$ % .....                               | 126 |
| Tablica 5.33 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena kombinacija značajki $(XY+XY_{SUM})_{55}$ .....  | 127 |



---

|   |     |
|---|-----|
| Tablica 5.34 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena kombinacija značajki $(XY+XY_{SUM})_{60}$ .....   | 127 |
| Tablica 5.35 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena kombinacija značajki $(XYZ+XYZ_{SUM})_{65}$ ...   | 127 |
| Tablica 5.36 Najbolji rezultati klasifikacije tvrdoće kamena svakog od odabranih širina<br>frekvencijskih pojaseva nakon prvog koraka analize signala akustične emisije ..... | 128 |
| Tablica 5.37 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki iz<br>signala akustične emisije uz uvjet $T_{SR} \geq 30\%$ .....                         | 129 |
| Tablica 5.38 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki iz<br>signala akustične emisije uz uvjet $T_{SR} \geq 35\%$ .....                         | 129 |
| Tablica 5.39 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki iz<br>signala akustične emisije uz uvjet $T_{SR} \geq 40\%$ .....                         | 129 |
| Tablica 5.40 Usporedba stvarnih i klasificiranih tvrdoća kamena za kombinaciju značajki<br>$(AE_{5000})_{30}$ .....   | 131 |
| Tablica 5.41 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki iz<br>signala vibracija i akustične emisije .....   | 132 |
| Tablica 5.42 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki iz<br>signala vibracija i jakosti struja pogonskih motora .....                           | 133 |
| Tablica 5.43 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki iz<br>signala akustične emisije i jakosti struja pogonskih motora.....                    | 133 |
| Tablica 5.44 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki iz<br>signala vibracija, akustične emisije i jakosti struja pogonskih motora .....        | 133 |

---

| Oznaka     | Jedinica | Opis  |
|------------|----------|---|
| $2\varphi$ | °        | vršni kut svrdla  |
| $a_p$      | mm       | dubina rezanja  |
| $b$        | mm       | duljina glavne oštrice  |
| $C$        | -        | matrica težinskih faktora RBF mreže ( $K \times M$ )                                      |
| $c_j$      | -        | vektor težinskih faktora izlaznog sloja RBF mreže   |
| $c_{jw}$   | -        | težinski faktor koji povezuje $j$ -ti neuron sakrivenog sloja i $w$ -ti izlazni neuron    |
| $C_{L_f}$  | m/min    | konstanta brzine rezanja pri kojoj postojanost alata iznosi 1m u smjeru posmičnog gibanja |
| $C_{L_v}$  | m/min    | konstanta brzine rezanja pri kojoj postojanost alata iznosi 1m u smjeru glavnog gibanja   |
| $C_T$      | m/min    | konstanta brzine rezanja pri kojoj postojanost alata iznosi 1min                          |
| $d_1$      | mm       | promjer svrdla  |
| $d_c$      | mm       | promjer jezgre svrdla   |
| $f$        | Hz       | frekvencija   |
| $F_a$      | N        | aksijalna sila bušenja  |
| $F_c$      | N        | glavna sila rezanja   |
| $f_c$      | Hz       | granična ( <i>cutoff</i> ) frekvencija  |
| $F_{cp}$   | N        | glavna sila rezanja poprečne oštrice  |
| $f_d$      | Hz       | donja granica frekvencijskog spektra  |
| $F_f$      | N        | posmična sila rezanja   |
| $f_g$      | Hz       | gornja granica frekvencijskog spektra   |
| $F_p$      | N        | natražna sila rezanja   |
| $F_R$      | N        | rezultantna sila rezanja  |

---

| Oznaka         | Jedinica            | Opis  |
|----------------|---------------------|---|
| $F_x$          | N                   | komponenta rezultante sile rezanja u smjeru X osi                             |
| $F_y$          | N                   | komponenta rezultante sile rezanja u smjeru Y osi                             |
| $F_z$          | N                   | komponenta rezultante sile rezanja u smjeru Z osi                             |
| $h$            | mm                  | debljina čestice prije deformacije  |
| $\mathbf{H}$   | -                   | matrica vrijednosti radijalnih baznih funkcija RBF mreže                      |
| $h(\cdot)$     | -                   | aktivacijska funkcija neurona RBF mreže                                       |
| $\mathbf{H}^+$ | -                   | Moore-Penroseov pseudoinverz matrice  |
| $H_{ij}$       | -                   | element matrice vrijednosti radijalnih baznih funkcija $\mathbf{H}$ RBF mreže |
| $HK$           | MPa                 | Tvrdoća po Knoop-u  |
| $I_{GV}$       | A                   | jakost struje glavnog motora  |
| $I_x$          | A                   | jakost struje posmičnog motora X osi  |
| $I_y$          | A                   | jakost struje posmičnog motora Y osi  |
| $I_z$          | A                   | jakost struje posmičnog motora Z osi  |
| $K$            | -                   | broj neurona skrivenog sloja RBF mreže  |
| $KB$           | mm                  | širina kratera  |
| $KM$           | mm                  | udaljenost od oštrice do središta kratera                                     |
| $KT$           | mm                  | dubina kratera na prednjoj površini alata                                     |
| $K_T$          | Nm/A                | Konstanta momenta vrtnje motora   |
| $K_V$          | V/min <sup>-1</sup> | Naponska konstanta vrtnje motora  |
| $L$            | -                   | broj ulaznih neurona RBF mreže  |
| $L_f$          | m                   | postojanost definirana duljinom puta u smjeru posmičnog gibanja               |
| $L_v$          | m                   | postojanost definirana duljinom puta u smjeru glavnog gibanja                 |
| $M$            | -                   | broj izlaznih neurona RBF mreže   |
| $M_{FC}$       | Nm                  | moment glavnih sila rezanja   |

| Oznaka     | Jedinica          | Opis  |
|------------|-------------------|---|
| $M_{FCP}$  | Nm                | moment glavnih sila rezanja poprečne oštrice  |
| $M_{FT}$   | Nm                | moment sila trenja  |
| $M_U$      | Nm                | ukupni moment rezanja   |
| $n$        | $\text{min}^{-1}$ | učestalost vrtnje glavnog vretena   |
| $N$        | -                 | broj komponenti spektra u intervalu $[f_d, f_g]$  |
| $O$        | -                 | matrica izlaza RBF mreže ( $L \times M$ )   |
| $O_w$      | -                 | element $w$ -tog izlaznog neurona RBF mreže   |
| $R^2$      | -                 | Koeficijent determinacije   |
| $r_{ij}$   | -                 | Mahalanobisova udaljenost između $i$ -tih elemenata ulaznih neurona i elemenata $j$ -tog vektora centra |
| $R^L$      | -                 | $L$ -dimenzionalni ulazi vektor RBF mreže   |
| $R^M$      | -                 | $M$ -dimenzionalni izlazni vektor RBF mreže   |
| $RU(g)$    | -                 | Referentni uzorak skupa za učenje RBF mreže   |
| $S_1$      | -                 | 1. stupanj istrošenosti   |
| $S_2$      | -                 | 2. stupanj istrošenosti   |
| $S_3$      | -                 | 3. stupanj istrošenosti   |
| $S_4$      | -                 | 4. stupanj istrošenosti   |
| $T$        | min               | postojanost definirana vremenom   |
| $t_b$      | s                 | vrijeme bušenja   |
| $t_j$      | -                 | $L$ -dimenzionalni vektor centara $j$ -tog neurona sakrivenog sloja RBF mreže                           |
| $T_{uz}$   | s                 | period uzorkovanja  |
| $VB$       | mm                | širina trošenja stražnje površine alata   |
| $VB_{MAX}$ | mm                | maksimalna vrijednost širine trošenja stražnje površine   |
| $VB_S$     | $\text{mm}_2$     | površina trošenja stražnje površine   |

| Oznaka        | Jedinica | Opis  |
|---------------|----------|---|
| $VB_{SR}$     | mm       | srednja vrijednost širine trošenja  |
| $v_c$         | m/min    | brzina rezanja  |
| $v_f$         | mm/min   | posmična brzina   |
| $x$           | -        | ulazni vektor RBF mreže   |
| $x_g$         | -        | $g$ -ti $L$ -dimenzionalni ulazni vektor RBF mreže (klasifikacijska značajka).                                    |
| $z_{pg}$      | -        | $g$ -ta komponenta $p$ -tog uzorka $j$ -te grupe  |
| $\alpha$      | °        | kut stražnje površine alata   |
| $\gamma$      | °        | kut prednje površine alata  |
| $\beta_c$     | -        | koeficijent najmanjih udaljenosti među susjednim elementima referentne grupe uzoraka iz skupa za učenje RBF mreže |
| $\beta$       | °        | kut klina   |
| $\sigma_g$    | -        | vrijednost fiktivnog ili stvarnog maksimalno udaljenog uzorka   |
| $\Sigma_j$    | -        | kovarijantna matrica  |
| $\psi_f$      | -        | površina ispod krivulje spektralne gustoće snage  |
| $\psi_p$      | °        | kut poprečnog brida   |
| $\omega_{GV}$ | rad/s    | kutna brzina glavnog vretena  |
| $\omega_s$    | °        | kut spiralnog žlijeba   |
| $\omega_z$    | rad/s    | kutna brzina vretena Z-osi  |

---

## Popis kratica

---

| Kratica                 | Opis  |
|-------------------------|---|
| AE                      | Akustična emisija ( <i>Acoustic Emission</i> )  |
| ANN                     | Umjetna neuronska mreža ( <i>Artificial Neural Network</i> )                                    |
| ART,<br>ART2,<br>ARTMAP | Neuronske mreže temeljene na teoriji adaptivne rezonancije ( <i>Adaptive Resonance Theory</i> ) |
| BR                      | Lom alata ( <i>Breakage</i> )   |
| CH                      | Makro krhanje ( <i>Chip Hammering</i> )   |
| CNC                     | Računalno numeričko upravljanje ( <i>Computer Numerical Control</i> )                           |
| CR                      | Odlamanje ( <i>Thermal Cracks</i> )   |
| CW                      | Trošenje prednje površine alata ( <i>Crater Wear</i> )  |
| EBP                     | Metoda učenja povratnim prostiranjem pogreške ( <i>Error Back-Propagation</i> )                 |
| EMC                     | Vrsta otvorenog CNC upravljačkog sustava ( <i>Enhanced Machine Controller</i> )                 |
| FFT                     | Brza Fourierova transformacija ( <i>Fast Fourier Transformation</i> )                           |
| FL                      | Neizrazita logika ( <i>Fuzzy Logic</i> )  |
| FNN                     | Neizrazita neuronska mreža ( <i>Fuzzy Neural Network</i> )                                      |
| FO                      | Frekvencija oštrica   |
| FV                      | Frekvencija vrtnje  |
| FW                      | Trošenje stražnje površine alata ( <i>Flank Wear</i> )  |
| GUI                     | Grafičko korisničko sučelje ( <i>Graphical User Interface</i> )                                 |
| GV                      | Glavno vreteno ( <i>Main Spindle</i> )  |
| HAL                     | Apstrakcijski sloj ( <i>Hardware Abstraction Layer</i> )  |
| MLP                     | Višeslojne perceptronske mreže ( <i>Multi-Layer Perceptron</i> )                                |

---

| <b>Kratica</b> | <b>Opis</b>   |
|----------------|---|
| N              | Žljebovi na oštrici alata ( <i>Notching</i> )   |
| OAC            | Upravljački sustavi otvorene arhitekture ( <i>Open Architecture Controllers</i> )                         |
| PD             | Trošenje uslijed plastične deformacije ( <i>Plastic Deformation</i> )                                     |
| RBFNN          | Neuronske mreže temeljene na radijalnim baznim funkcijama ( <i>Radial Basis Function Neural Network</i> ) |
| RNN            | Dinamičke ili povratne neuronske mreže ( <i>Recurrent Neural Networks</i> )                               |
| SHIP           | Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje  |
| SMB            | Spremnik dijeljene memorije ( <i>Shared Memory Buffer</i> )   |
| SMPM           | Sinkroni motor s permanentnim magnetom ( <i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i> )                      |
| TTL            | Tranzistor – tranzistorska logika ( <i>Transistor-Transistor Logic</i> )                                  |
| $T_{SR}$       | Srednja vrijednost klasifikacije u testiranju mreže   |
| T1, ..., T3    | Točnosti klasifikacije pojedinog testa u testiranju mreže   |
| UK             | Uspješnost klasifikacije istrošenosti svrdla/tvrdoće kamena   |
| UV             | Ultrazvučne vibracije ( <i>Ultrasonic Vibrations</i> )  |
| VCP            | Virtualni upravljački panel ( <i>Virtual Control Panel</i> )  |

Kamen je jedan od najstarijih i najvažnijih pratilaca evolucije i napretka ljudskog roda. Privrženost čovjeka obradi kamena oduvijek je pružala neizmjernu mogućnost obnavljanja tradicije građenja i potrebu sjedinjavanja sa sadašnjim stupnjem duhovnoga, kulturnoga i tehnološkog razvoja. Prirodni kameni materijali, različite strukture i teksture, predstavljaju zahvalnu osnovu za izraz i oblikovanje, za jednu tradicionalno lijepu i korisnu djelatnost čovjeka koja se prenosi s koljena na koljeno [1]. O dostignućima pojedinih naroda svjedoče brojne građevine, dvorci, utvrde, kulturni, sakralni i memorijalni spomenici. Tragovi brojnih kultura, danas pretežito u ruševinama, prizori su koji pružaju dokaze o dosadašnjim generacijama. Opeku, građevni element koji se do tada najviše koristio u Grčkoj je zamijenio kamen gradnjom hramova kao što su Zeusov hram u Olimpiji te Partenon na atenskoj akropoli [2]. Grčka je poznata kao zemlja vapnenca i mramora koji u graditeljstvu dominiraju od VI. stoljeća prije Krista. Antička kultura imala je važan utjecaj na kasnije stilove u Europi. U Hrvatskoj su ilirske građevine najstarije poznate građevine izgrađene od autohtonog kamena, zidane kao suhozid ili grobovi obloženi kamenim pločama. Velik broj slabije ili bolje očuvanih ostataka sakralnih i drugih objekata pripada antičkom razdoblju. Amfiteatar u Puli, kao i Dioklecijanova palača u Splitu (slika 1.1) koja je izgrađena od kamena iz kamenoloma s otoka Braća, svjedoče o velikim mogućnostima gradnje u to doba. U to vrijeme bili su aktivni i kamenolomi na otoku Korčuli i otočićima nedaleko od nje.



Slika 1.1 Amfiteatar u Puli [3] i Dioklecijanova palača u Splitu [4]

Posebno je značajna uporaba kamena vezana za dolazak Hrvata na ovdašnje prostore u 7 stoljeću. Godine 1971. U Muću, zapadno od Sinja, nađen je ulomak crkvene kamene

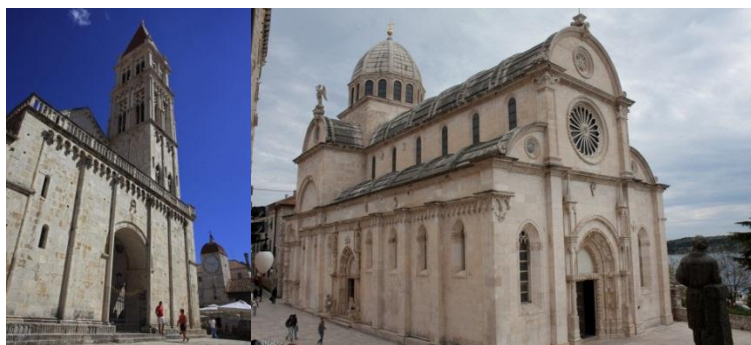


grede (slika 1.2) dekoriran pleterom, s natpisom hrvatskog kneza Branimira i vremenskom oznakom 888. godine.



Slika 1.2 Ulomak kamene grede s natpisom kneza Branimira [5]

Od obilja predromaničke ostavštine u kamenu potrebno je spomenuti arhitektonske i konstruktivne dijelove crkava kao i elemente kamenoga crkvenog namještaja, nađene u Trogiru i bližoj okolici, koji datiraju od XI. do XII. stoljeća. Među najpoznatijim predstavnicima romaničkog stila svakako je Trogirska katedrala (slika 1.3, lijevo), građena u XIII. stoljeću od vapnenca iz nedalekog kamenoloma Seget.



Slika 1.3 Trogirska katedrala [6] i Šibenska katedrala [7]

Gotički stil s prvim elementima renesanse datira iz doba Jurja Dalmatinca pozvanog da završi Šibensku katedralu (slika 1.3, desno) u XV. stoljeću. U njegovo je vrijeme na otoku Braču vrlo intenzivna eksploatacija kamena koji je korišten za gradnju Šibenske katedrale, a ujedno je transportiran kao sirovina u Italiju. Kao poduzetnik i poznavatelj kamena te profinjeni kipar koji kleše i obrađuje kamen, Juraj Dalmatinac je za svoja dijela odabrao kamen u kamenolomima na otoku Braču. Radovi u Dubrovniku odveli su ga i na Korčulu, gdje je odabrao kamen za svoja arhitektonska i umjetnička dijela.



Slika 1.4 Medvedgrad [8] i Dubrovačke zidine [9]

U kontinentalnom dijelu Hrvatske također je razvijena gradnja u kamenu. Jedan od najznačajnijih predstavnika je Medvedgrad (slika 1.4, lijevo) na jugozapadnim obroncima Medvednice. Građen je od autohtonog kamena tanko slojevitog slabo zaglinjenog vapnenca iz kamena eksploatiranog u podnožju susjednog uzvišenja. Posebno vrijedna sakralna građevina u Medvedgradu je kapelica Sv. Filipa i Jakova, osmerokutna lađa gotičkog obilježja. Nezaobilazan je i grad Dubrovnik kao jedinstveni primjer kamene arhitekture i građenja. Gradske zidine (slika 1.4, desno) građene su od XIII. do XVII. stoljeća za potrebe obrane i zaštite. Duge su 1940 m, visoke do 25 m, prema kopnu debljine 4-6 m, a prema moru 1,5-3 m, na četiri strane svijeta, zaštićene su utvrdama. Brojne crkve, palače, ljetnikovci i tvrđave primjer su kako i danas nakon toliko godina kamen čuva povijest naroda i prostora.

## 1.1 Motivacija

Stijena je osnovni sastavni materijal zemljine kore i ukoliko je podvrgnuta bilo kakvoj tehnologiji obrade naziva se kamenom [10]. Niz građevina i povijesnih nalaza koji danas krasi područja diljem svijeta svjedoče o kamenu kao jednom od prvih materijala koje je čovjek koristio. Iako se upotreba kamena vezuje za povijesna razdoblja, njegova upotreba i danas raste. Primjerice, u SAD-u je 2000. godine upotreba kamena iznosila oko 1,3 milijuna tona, dok je 2014. godine iznosila 2,13 milijuna tona, što je porast oko 60% [11].

Kamen je heterogena tvorevina karakterizirana mineralnim sastavom, teksturom i strukturom. Različita kemijska i fizikalna svojstva pojedinih vrsta kamena mogu značajno varirati, a najčešće se ispituju izravnim metodama u akreditiranim laboratorijima. Razvojem industrije i rastom tržišta neprestano se otvaraju nova nalazišta kamena različitih mehaničkih svojstava [12]. Imajući u vidu nehomogenu i anizotropnu strukturu kamena, određivanje obradivosti može predstavljati veliki problem [13]. Razlog tomu većim je dijelom povezan uz mehanička svojstva ovih materijala, koja u zoni obrade mogu značajno varirati i koja je često teško ili nemoguće prethodno kvalitetno izmjeriti. Povećanje tvrdoće ili čvrstoće kamena u zoni obrade uz konstantne parametre obrade (posmak i brzinu rezanja) može izazvati porast sile rezanja, što u konačnici može dovesti do loma alata ili obrađivanog materijala. Povećanje sile rezanja s istim krajnjim posljedicama također može biti izazvano trošenjem alata. Važno je naglasiti da se u svim dosadašnjim istraživanjima dinamika trošenja već i kod homogenih materijala pokazala izrazito nehomogenom, a dijelom i stohastičke prirode [14, 15, 16, 17].

Današnje metode za određivanje tvrdoće zasnivaju se na izravnim mjernim postupcima kojima je tvrdoću moguće izmjeriti samo na površini materijala. Postupci za određivanje čvrstoće su razorni i uglavnom pružaju orijentacijske vrijednosti. Stoga je na osnovi ovih postupaka teško i često nemoguće odrediti predmetna svojstva unutar materijala, a time i obradivost materijala. Jedan od pristupa kojim se spomenuta problematika nastoji riješiti su neizravni postupci pomoću kojih se tijekom obrade nastoje procijeniti mehanička svojstva materijala. Međutim, iz objavljenih radova može se zaključiti da su takvi postupci još uvijek nedovoljno istraženi. Dosadašnja istraživanja usmjerena su isključivo na procjenu čvrstoće i tvrdoće primjenom senzora sile ili jakosti struja pogonskih motora, odnosno korištenjem manjeg broja parametara procesa. Nadalje, do sada

predloženi modeli zasnovani su na nekoj od distribucija vjerojatnosti i ne uključuju trošenje alata kao značajan parametar.

Slična istraživanja, provedena na području modeliranja trošenja alata kod obrada homogenih i izotropnih materijala, ukazuju na puno bolje rezultate dobivene modelima koji uključuju veći broj parametara procesa i koji su zasnovani na algoritmima računalne inteligencije. S obzirom na navedeno, očekuje se da bi se modelima temeljenim na algoritmima računalne inteligencije koji uključuju veći broj parametara procesa mogla ostvariti robusna kvantifikacija stupnja istrošenosti te svojstava obrađivanog kamena, što je osnovna motivacija ovog rada.

## 1.2 Cilj i hipoteza rada

Uzevši u obzir postojeće trendove razvoja alatnih strojeva, cilj ovog istraživanja predstavlja razvoj modela indirektnog nadzora stupnja istrošenosti alata i modela za klasifikaciju tvrdoće, tj. vrste materijala obratka u postupcima bušenja kamena. Njihovom implementacijom značajno bi porastao stupanj automatizacije navedenog obradnog procesa s pozitivnim utjecajem na njegovu sigurnost, kvalitetu i isplativost. U tom se kontekstu postavlja sljedeća hipoteza istraživanja:

Iz odabranih i eksperimentalno snimljenih signala procesa izdvojiti će se značajke osjetljive na promjene stanja alata i strukturu obrađivanog materijala, na temelju kojih će zatim biti moguće formirati robusne modele za klasifikaciju stupnja istrošenosti alata i vrste obrađivanog kamena primjenjive u industrijskim uvjetima.

## 1.3 Metodologija i plan istraživanja

Nakon pregleda dosadašnjih stanja i spoznaja iz razmatranog područja planirano eksperimentalno istraživanje provedeno je u nekoliko faza.

### 1.3.1 Razvoj eksperimentalnog postava

U cilju strukturiranja i verifikacije modela za procjenu stupnja istrošenosti i vrste kamenih ispitnih uzoraka, u prvoj fazi istraživanja provedena je izrada i nadogradnja postojećeg eksperimentalnog ispitnog postava. On se zasniva na postojećoj konstrukciji troosne glodalice opremljene odgovarajućim pogonskim, upravljačkim i mjernim sustavima. Eksperimentalni postav opremljen je senzorom sila smještenim ispod stezne naprave za

kamene uzorke te sensorima akustične emisije i vibracija smještenim u neposrednoj blizini prednjeg ležaja glavnog motora. Signali jakosti struja pogonskih motora prikupljali su se izravno iz pripadajućih regulatora. Uz spomenute senzore u sustav je ugrađena industrijska kamera s odgovarajućim objektivom kako bi se također provelo izravno mjerenje trošenja alata.

### 1.3.2 Plan pokusa

U planiranju pokusa posebna pažnja posvećena je mjerenju tvrdoće ispitnih uzoraka kamena, vrsti i kvaliteti uzoraka, određivanju parametara obrade, tipovima svrdla i mjerenju istrošenosti oštrice alata. Ispitni uzorci formirali su se iz većih komada kamena uz pozornost posvećenu smjeru izuzimanja. Pri tome je pozornost usmjerena izboru vrsta materijala kako bi se obuhvatila što veća širina različitih tipova kamena te ostvarila što veća robusnost klasifikacije.

Parametri obrade (brzina rezanja i posmak) i ispitna svrdla odabrana su s obzirom na preporuke proizvođača svrdla, karakteristike prigona ispitnog stroja i na osnovi iskustva. Kombinacije parametara obrade određene su eksperimentalno. U svim eksperimentima korištena su standardna svrdla s tvrdo lemljenom pločicom od tvrdog metala za bušenje kamenih materijala. Istrošenost rezne oštrice kvantificirana je mjerenjem širine područja trošenja na stražnjoj površini alata (*VB*) primjenom prilagođenog vizijskog sustava ugrađenog u radni prostor eksperimentalnog postava. Navedeni je parametar općenito prepoznat kao najznačajniji parametar trošenja. Dobivene vrijednosti parametra *VB* zatim su razdijeljene u nekoliko grupa, vezanih uz prethodno definirane stupnjeve istrošenosti, na temelju kojih su zatim provedeni postupci klasifikacije.

Mjerenje tvrdoće realizirano je na tvrdomjeru, razvijenom u sklopu ovog istraživanja. Tvrdomjer je kao zasebni modul ugrađen na mjestu glavnog vretena ispitnog stroja. Modul se sastoji od kamere za snimanje makrostrukture s objektivom vidnog polja 6,4 x 4,8 mm, kamere za mjerenje otiska s mikroskopskim objektivom te sklopa aktuatora sa sensorom sila i odgovarajućim indentorom. Aktuator je izveden preciznim vodilicama, na čiji je klizač ugrađen senzor sile mjernog područja do 20 N te stezni mehanizam s dijamanntnim indentorom pričvršćenim na senzor sile.

Odabrani indentor prikladan je za mjerenje tvrdoće Knoop-ovom metodom, koja je normirana od strane Državnog zavoda za normizaciju i mjeriteljstvo EN 14205:2003 [18].

Mjerenje tvrdoće odvijalo se u nekoliko koraka: izuzimanje slike makrostrukture, utiskivanje indentora tvrdomjera te izuzimanje slike za mjerenje dimenzija otiska. Ugradnjom modula za mjerenje tvrdoće (slika 3.7) na postojeći alatni stroj osigurano je točnije i brže mjerenje na većem broju ispitnih uzoraka bez potrebe smanjenja dimenzija uzorka kao što je slučaj kod postojećih tvrdomjera.

Postupak mjerenja zahtijeva dobro pripremljenu ispitnu površinu koja se mora polirati do visokog sjaja. U tom cilju, realiziran je i postav za poliranje uzoraka (Slika 3.2) koji se sastoji od stezne naprave s filtrirajućim sustavom sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje te podesive naprave za prihvat brusnih ploča. Nakon bušenja svih predviđenih provrta pristupilo se mjerenju tvrdoće kamena.

### 1.3.3 Razvoj modela kvantifikacije stupnja istrošenosti i tvrdoće obratka

Imajući u vidu dinamiku procesa bušenja, koja se kod obrada homogenih i izotropnih materijala pokazala izrazito nelinearnom, kod bušenja kamena kao nehomogene i anizotropne strukture može se očekivati još veća složenost dinamičkog modela. Klasični matematički modeli procjene parametara procesa temeljeni na distribucijama vjerojatnosti nisu se pokazali pouzdanima. Stoga su u ovom istraživanju korišteni algoritmi računalne inteligencije, odnosno umjetne neuronske mreže, koje su u dosadašnjim istraživanjima pokazale potrebnu robusnost u modeliranju složenih dinamika obradnih procesa [17, 19, 20].

## 1.4 Struktura rada

Rad je podijeljen u nekoliko povezanih cjelina. Nakon uvodnog dijela u kojem su dane opće informacije o upotrebi kamena, u drugom dijelu ukratko je izložen pregled osnovnih mehaničkih svojstava kamena. Također su dani pregledi postupka bušenja, geometrijske značajke svrdla, metode mjerenja tvrdoće kamena, proces trošenja reznog dijela alata te pregled metoda nadzora trošenja.

U idućem, trećem poglavlju detaljno je opisana laboratorijska oprema korištena pri provedbi eksperimentalnog dijela rada. Opisani su i strojevi na kojima su se vršile pripreme uzoraka te glavna mjerenja.

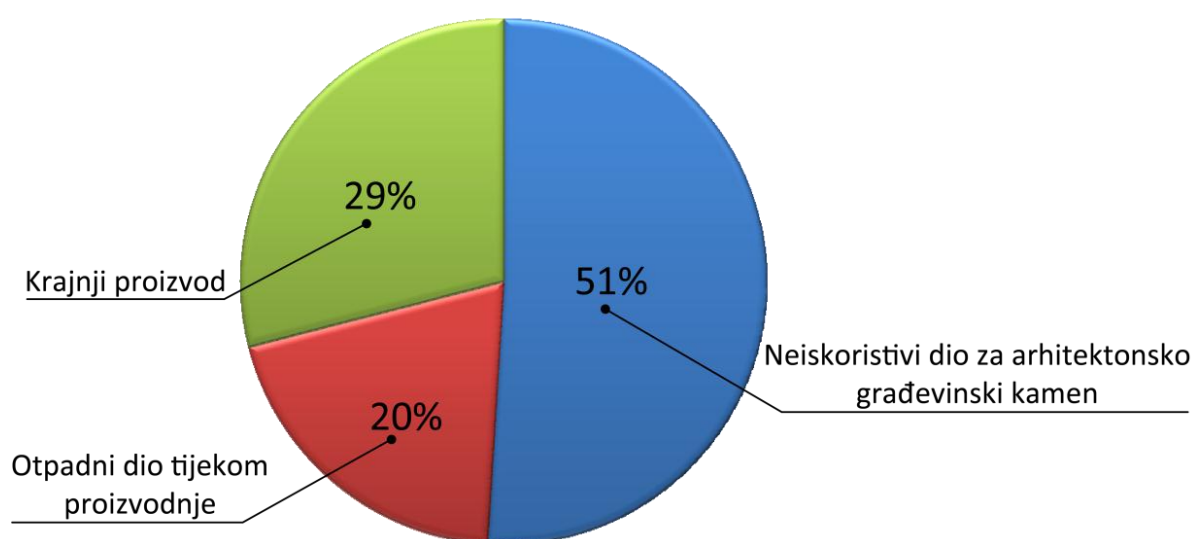
U četvrtom poglavlju opisani su plan pokusa, vrsta i dimenzije ispitnih uzoraka kao i postupak mjerenja tvrdoće. Također je obrazložen način snimanja i filtriranja signala te vrste i način izdvajanja značajki.

U zadnjem, petom poglavlju izneseni su rezultati klasifikacije stupnja istrošenosti svrdla i tvrdoće kamena. Najprije je dano nekoliko informacija o strukturi korištene neuronske mreže te skupu podataka za učenje i testiranje. Potom su u drugom dijelu poglavlja detaljno opisane zasebne analize kombinacija značajki korištene za klasifikaciju stupnja istrošenosti kao i tvrdoće kamena. Na kraju poglavlja opisan je posljednji korak međusobnih analiza provedenih na temelju kombinacija značajki izdvojenih iz pojedinih vrsta signala koje su rezultirale najvećom uspješnošću klasifikacije u zasebnim analizama.

Na temelju postignutih rezultata zasebnim i međusobnim analizama doneseni su zaključci rada.

## 1.5 Upotreba kamena danas

Kamen se zbog načina eksploatacije, a velikim dijelom i zbog svoje strukture i sastava tek djelomično može iskoristiti kao arhitektonsko građevinski kamen. Od ukupne eksploatirane količine sirovine čak 51% udjela čini neupotrebljivi dio za arhitektonsko-građevinski kamen (slika 1.5). Taj udio upotrebljava se za tehnički kamen rezultirajući proizvodnjom kamenih agregata koji se koriste u gradnji cesta, kao i u izradi betnoskih proizvoda i uređenju okoliša. Značajni dio također uzima i otpadni dio koji se troši u obliku odvojene čestice (po zadnjim podacima nekih 20-ak % od ukupne količine).

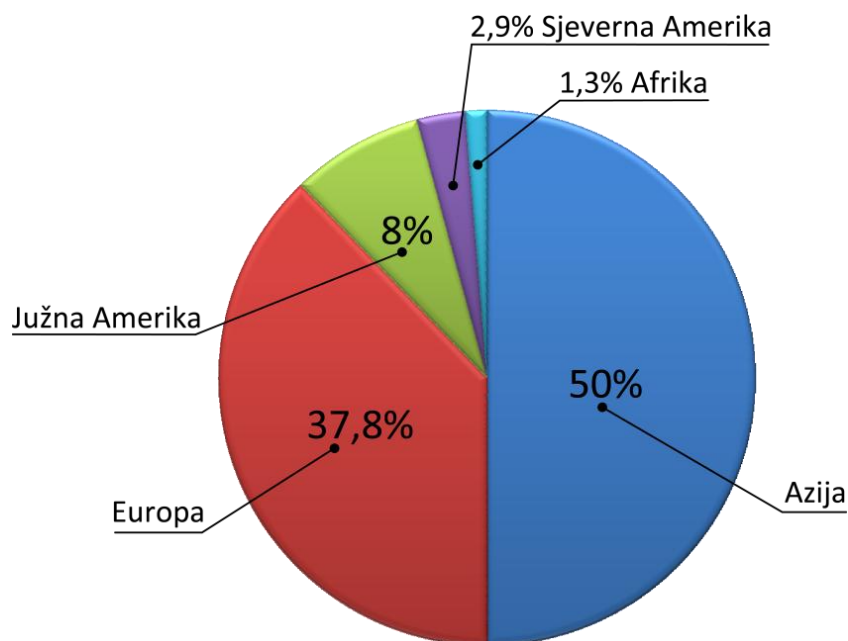


Slika 1.5 Eksploatacija i udio gotovog proizvoda arhitektonsko građevinskog kamena [21]

Novo tehnologije prerade kao i potražnja za novim vrstama i teksturama rezultirali su razvojem umjetnih materijala koji za sirovinu koriste otpadni dio (manje otpadne komade i odvojene čestice) dobivene tijekom obrade. Miješanjem s različitim polimerima dobivaju se umjetni materijali željenih kemijskih, fizikalno-mehaničkih i dekorativnih svojstava.

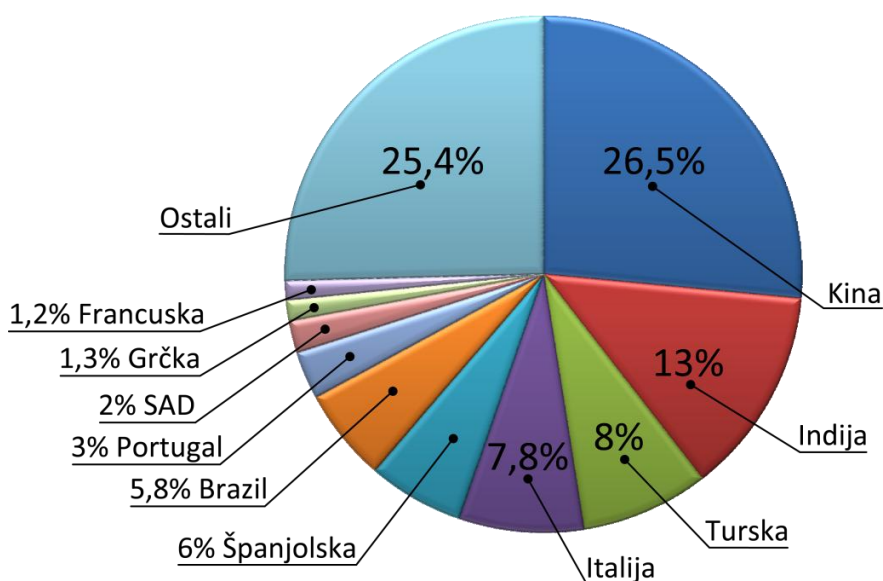
Prerada arhitektonsko građevinskog kamena važna je djelatnost u području iskorištavanja prirodnih resursa u više od 50 zemalja svijeta. Prema zadnjim podacima, apsolutni lider u preradi kamena svakako je azijski kontinent (slika 1.6), čineći preko 50 % ukupnog proizvodnog kapaciteta prerade kamena, a slijedi ga Europa s nešto više od 37% ukupne svjetske proizvodnje.





Slika 1.6 Udio kontinenata u svjetskoj proizvodnji i preradi arhitektonsko građevinskog kamena [21]

Dublja analiza je pokazala da čak 26.5% ukupnog kapaciteta otpada na Kinu, koja godišnje prerađuje oko 11.8 milijuna tona. Indija je također država u velikom usponu u djelatnosti obrade kamena zauzimajući 13% ukupnog svjetskog kapaciteta. Promatrajući 10-ak svjetskih zemalja u području prerade čak je 5 europskih, vidljivo iz slike 1.7, što dodatno govori o sektoru koji je jako zastupljen na ovim prostorima.



Slika 1.7 Udio država u svjetskoj proizvodnji i preradi arhitektonsko građevinskog kamena [21]

Značajna gospodarska područja europske industrije prirodnog kamena nalaze se u Južnoj Europi s izlazom na Sredozemno more. Zemlje poput Italije, Španjolske, Portugala i Grčke pokrivaju oko 90 % proizvodnje. Razlog tom leži u povoljnom geološkom položaju i svakako dugogodišnjoj tradiciji u području proizvodnje i prerade prirodnog kamena.

## 2 Pregled postojećeg stanja i spoznaja

---

### 2.1 Podjela arhitektonsko građevinskog kamena

Iako sistematizacija znanja o Zemlji traje još od 15 stoljeća, do dana današnjeg u literaturi ne postoji općeprihvaćena inženjersko-geološka klasifikacija stijena. Temeljna klasifikacija stijena u području geoznanosti je geološka ili genetska klasifikacija, koja se temelji na genezi ili postanku stijena [22].

#### 2.1.1 Genetska klasifikacija

Stijene koje grade litosferu ili zemljinu koru, prema postanku ili genezi dijele se prema [10] u tri grupe:

- magmatske ili eruptivne stijene,
- sedimentne stijene,
- metamorfne stijene.

**Magmatske ili eruptivne stijene** nastaju kristalizacijom ili očvrnućem magme koja se prodiranjem iz zemljine unutrašnjosti prema ili na površini zemljine kore hladi i tako poprima konačni oblik. Ako se navedene stijene formiraju već u dubljim slojevima litosfere onda se govori o dubinskim, intruzivnim odnosno plutonskim stijenama.

Druga vrsta magmatskih ili eruptivnih stijena nastaje kad se magma koja se iz zemljine unutrašnjosti izbija na površinu zemljine kore u obliku lave hladi i tako tvori površinske, efuzivne ili vulkanske stijene.

U skupinu magmatskih ili eruptivnih stijena spadaju i žilne stijene. Takve stijene formiraju se u obliku tanjih ili debljih žila između ranije nastalih intruzivnih i efuzivnih stijena.

Sve ove stijene razlikuju se i s obzirom na sadržaj  $\text{SiO}_2$ , o čemu u velike ovisi i njihova tvrdoća. Prema tom kriteriju dijele se na kisele (sadrže >63 tež.%  $\text{SiO}_2$  – granit/riolit), neutralne (sadrže 52-63 tež.%  $\text{SiO}_2$  – diorit/andezit), bazične (sadrže 45-52 tež.%  $\text{SiO}_2$  – gabro/bazalt) i ultrabazične (sadrže < 45 tež. %  $\text{SiO}_2$  – peridotit/dunit).

Zbog svoje dekorativnosti kao i zbog dobrih fizikalno kemijskih značajki iz grupe magmatskih ili eruptivnih stijena najviše se koriste intruzivne stijene poznatije pod nazivom

granit. U Hrvatskoj nije značajnije rasprostranjen i nema eksploatacijskih ležišta arhitektonsko- građevinskog kamena magmatskog postanka.

**Sedimentne stijene** su najraširenije stjenke mase na zemljinoj površini. Nastale su na površini litosfere uslijed djelovanja mehaničkih, kemijskih i biokemijskih procesa. Kao što i samo ime govori, nastale su taloženjem te kasnijom litifikacijom ili okamenjivanjem. Sedimentne stijene dijele se na klastične ili mehaničke i neklastične ili kemijske.

Klastične ili mehaničke stijene nastale su od odlomljenih komada raznih minerala i stijena, a dijele se na nevezane (šljunak, pijesak) i vezane (konglomerati, breče, pješčenjaci). Također postoji i fina podjela unutar navedene grupe stijena klasificirane po veličini čestica: psamite (čestice veličine iznad 3 mm), psamite (čestice veličine od 0,3 mm do 3 mm) i pelite (čestice veličine ispod 0,3 mm)

Kao AG kamen najčešće se koriste konglomerati, breče i pješčenjaci.

Konglomerat (valutičnjak) se sastoji od zaobljenih do poluzaobljenih odlomaka većih od 2mm i cementa ili matriksa. Veličina i oblik zrna ovisi o vrsti i tvrdoći ishodišne stijene, kao i o duljini transporta. Po podrijetlu se razlikuju riječni, jezerski, marinski i glacijalni konglomerati.

Breča (kršnik) sastoji se od uglastog do poluuglastog stjenkog kršja većeg od 2 (3) mm i cementa ili matriksa. Veličina fragmenata najčešće jako varira. Uglatost je posljedica kratkog transporta. Prijelazni tip između breče i konglomerata naziva se brečo-konglomerat. Prema načinu postanka razlikujemo vulkanske, tektonske, sedimentne i piroklastične breče .

I konglomerati i breče su vrlo heterogeni materijali s obzirom na tvrdoću koja ovisi o tvrdoći pojedinog zrna i tvrdoći matriksa koje se mogu jako razlikovati.

Pješčenjaci imaju veliku raznolikost mineralnog i granulometrijskog sastava. Mogu sadržavati zrna šljunka, kao i sitnije čestice dimenzija praha i gline koje čine cement ili matriks. S obzirom na količinu matriksa pješčenjaci se dijele na: čiste pješčenjake ili arenite (matriks <15 %) i nečiste pješčenjake ili grauvake (matriks >15 %). Bitni sastojci pješčenjaka su kvarc, feldspati i odlomci stijena, a sporedni tinjci, karbonati, minerali glina i teški minerali. Najvažniji sastojak gotovo svih tipova pješčenjaka je kvarc, a o njegovom udjelu ovisi tvrdoća stijene. Najčešći tipovi pješčenjaka su: kvarcni pješčenjaci (pretežito zrna kvarca i

malo matriksa), arkoze (zrna kvarca i feldspata s malo matriksa), grauvake (zrna kvarca, odlomci stijena i dosta matriksa) i kalkareniti ili vapnenački pješčenjaci.

Neklastične sedimentne stijene nastaju pri određenoj temperaturi postupkom kristalizacije iz koncentracija njihovih vodenih otopina. Najpoznatije neklastične sedimentne stijene su vapnenac i dolomit.

Vapnenac (vapnenjak), taložna stijena koja sadrži najmanje 50 % minerala kalcita (kalcijev karbonat,  $\text{CaCO}_3$ ) te primjesa kao što su glina, limonit, hematit, kremen, cirkon, turmalin, granat. U sastavu Zemljine kore udjel je vapnenca među taložnim stijenama znatan, pa je on svojevrsan repozitorij fosilnih zapisa bitnih za razumijevanje geološke prošlosti Zemlje. U građi vapnenca razaznaju se tri bitne sastavnice: zrna ili alokeme, osnova (matriks) i vezivo. Zrna mogu biti biogena ili anorganska. Biogena zrna u obliku vapnenačkoga taloga jače su ili slabije razmravljeni skeletni kalcitni ostatci izumrlih morskih organizama (mekušci, koralji, bodljikaši, crvene i modrozeleno alge, praživotinje kao npr. različite foraminifere). Premda u odnosu na plitka mora znatno slabije, nije zanemarivo ni stvaranje vapnenačkoga mulja u otvorenim (oceanskim) prostranstvima, gdje tomu pridonose sićušni pučinski organizmi kao što su planktonske foraminifere, kokolitoforide i pteropodi. Anorganska zrna čestice su starijih stijena ili zaobljena zrna taložnoga mulja, osnova je u pravilu mikro(kripto) kristalinični kalcit, tzv. mikrit, a vezivo je najčešće krupnije kristalizirani kalcit (tzv. sparit). Podrijetlo fosiliziranih skeletnih dijelova vapnenca često se ogleda u njegovu nazivu, npr. foraminiferski, koraljni, krinoidni, brahiopodni, amonitni, algalni vapnenac.

Vapnenci se mogu klasificirati temeljem određenih strukturnih značajki u sljedeće podgrupe: *grainstone*, *packstone*, *wackstone*, *mudstone*, *boundstone*, *coquina* i *mikrocoquina* vapnenci.

Odlikuje ih boja, skeletni detritus, kalcitne žilice, slojevitost i stiloliti. Bogate lepeze različitih vrsta i boja kao i činjenica da ih najviše ima na području Republike Hrvatske čini ih jednom od najkorištenijih sirovina u području arhitektonsko građevinskog kamena na ovim prostorima.

Dolomit je naziv i za mineral koji tvori kalcij-magnezijev karbonat ( $\text{CaCO}_3 \times \text{MgCO}_3$ ) u kristalnome stanju. Obično je bijele boje, ali može biti i crvenkast, siv ili smeđ od primjesa

željeza ili mangana. Glavni je sastojak istoimenih stijena. Stijena dolomit može sadržavati različite omjere  $\text{CaCO}_3$  i  $\text{MgCO}_3$ , pa postoje prijelazi od čistoga vapnenca do čistog dolomita.

**Metamorfne stijene** nastale su metamorfozom iz magmatskih (eruptivnih) ili sedimentnih stijena. Glavni pokretači procesa metamorfoze su temperatura, tlak i kemijski aktivni fluidi. Metamorfne stijene visoko su cijenjene zbog svoje vrlo složene teksture i egzotičnog izgleda, što ih visoko rangira u kvantifikaciji eksploatacije te na razini cijena. Metamorfne stijene čine 15-28 % volumena Zemljine kore.

Metamorfne stijene podijeljene su s obzirom na stupanj metamorfizma. Metamorfoza koja se odvija pri nižim temperaturama i visokom tlaku naziva se dinamotermna ili regionalna. Također postoji i plutonska metamorfoza koja se odvija pri visokoj temperaturi i visokom hidrostatskom tlaku. Postoje tri vrste metamorfnih stijena koje su ime dobile po termodinamičkim zonama: epi-metamorfne, mezo-metamorfne i kata-metamorfne stijene.

Koncentracija metamorfnih stijena na tržištu sirovine arhitektonsko građevinskog kamena je velika zahvaljujući svom izrazito privlačnom dekorativnom obilježju. Hrvatska se također može pohvaliti relativno velikom ponudom takvih vrsta sirovine na tržištu, iako na našim prostorima ne postoje ležišta arhitektonsko građevinskog kamena metamorfnog postanka [22].

### 2.1.2 Komercijalna podjela vrsta arhitektonsko građevinskog kamena

Iako se vezuje direktno uz postanak i sastav, genetska podjela stijenske mase danas nije toliko zastupljena u komercijalnoj primjeni. Razlog tomu leži prvenstveno u kompleksnoj genetskoj terminologiji i mnoštvu podjela od kojih su samo osnovne spomenute u prethodnom poglavlju. Iz navedenog razloga formirana je komercijalna podjela koja se prvenstveno bazira na obradivosti te petrografskim i fizikalno mehaničkim svojstvima.

Najjednostavnija komercijalna podjela arhitektonsko građevinskog kamena nastala u proizvodnom sektoru navodi dvije grupe:

1. *Graniti* (tvrdi kamen) – obuhvaća prvenstveno magmatske i dio metamorfnih stijena.
2. *Mramori* (meki kamen) – obuhvaća prvenstveno sedimentne i dio metamorfnih stijena.

Ipak, u novije vrijeme u primjeni je detaljnija komercijalna podjela arhitektonsko građevinskog kamena koja navodi četiri grupe [22]:

1. *Mramor* – tvrde i srednje tvrde karbonatne, kalcitne i dolomitne stijene sedimentnog i metamornog postanka. Potrebno je napomenuti da nisu osobito otporne na djelovanje atmosferilija i da često gube sjaj. Upotrebljavaju se pretežito za izradu interijera. U ovu skupinu spadaju komercijalni mramori (Mramori s.s.), vapnenci, travertini i oniksi.
2. *Granit* – izrazito tvrde silikatne stijene, velike trajnosti i svojstva nepromjenjivosti izgleda te sposobnosti održavanja boje, odnosno pigmenta.
3. *Kvarcit* – metamorfna stijena nastala metamorfozom pješčenjaka i rožnjaca, potječe iz grupe granita ali zbog velike koncentracije kvarca izdvojen je u posebnu istoimenu grupu kvarcit. Ima veliku statičku tvrdoću, kemijski je otporan, a odlikuje ga i otpornost na visoke temperature.
4. *Kamen* - U ovu grupu spadaju:
  - meki vapnenci, inače mekane stijene karbonatnog sastava,
  - konglomerati i breče, sedimentne stijene karbonatnog sastava,
  - škriljevci, niskometamorfne stijene,
  - pješčenjaci, klastične sedimentne stijene.

### 2.1.3 Komercijalni naziv arhitektonsko građevinskog kamena

Na međunarodnom i domaćem tržištu sve je veća ponuda različitih vrsta kamena, pri čemu se može primijetiti da uz stalnu globalizaciju postojeća ponuda neprestano raste. Siegfried u svojoj knjizi [21] navodi da je grupa istraživača u svom izvještaju 2007. godine prikupila preko 14000 komercijalnih vrsta različitih kamenih materijala. Ovako veliki broj govori o raznolikosti i vrsti pojedinih materijala te o širokoj paleti različitih boja i dekora. Osnovni problem ovako velikog broja vrsta materijala svakako leži u proizvoljnom izboru komercijalnog ili trgovačkog naziva pojedine vrste kamenog materijala. Također postoji i problem prodaje iste vrste kamena pod drugim imenima. Dobar primjer za to je kineski granit za koji postoji čak 67 drugačijih komercijalnih imena. Na tržištu postoje i materijali s

dugogodišnjom tradicijom poput vrste *Balmoral* koji se i danas zove isto kao i prije više od 100 godina.

#### 2.1.4 Mehanička svojstva najznačajnija za obradu odvajanjem čestica

Postoji zaista veliki broj svojstava materijala koji utječu na obradivost kamena, a u nastavku će biti dan samo kratki pregled najvažnijih koja utječu na proces obrade odnosno rezanja kamena.

**Tvrdoća.** Tvrdoća nekog materijala zasniva se njegovoj otpornosti prodiranju drugog, tvrdog materijala. Tvrdoća kamena predstavlja njegovu otpornost na deformaciju. Ispitivanja mehaničkih svojstava (tvrdoće) kamena mogu se vršiti izravnim i neizravnim metodama ispitivanja. Također, takve vrste ispitivanja mehaničkih svojstava kamena najvećim je dijelom moguće provoditi u laboratoriju ili na terenu. Do danas su jako poznate i općenito najraširenije metode mjerenja tvrdoće po Vickers-u, Brinell-u, Rockwell-u, Shore-u i Knoop-u. Svaka od navedenih skala tvrdoće određena je temeljem različitih principa i postupaka mjerenja [23].

**Abrazivnost.** Definiira se kao sposobnost odupiranja trošenja kamena odnosno površinskog sloja uslijed kontakta nekog drugog tijela. Jako izražena abrazivna svojstva imaju stijene koje sadrže zrna vrlo tvrdih minerala povezanih s manje čvrstim vezivom. Najabrazivnijima se smatraju kvarcni pješčenjaci. Također, ne smije se zanemariti utjecaj šupljina i pora koje, kako su brojne studije pokazale, znatno utječu na porast abrazivnosti. Abrazivnost se mjeri u laboratorijima prema normi HRN EN 14157:2008 [24].

**Tlačna čvrstoća.** Tlačna čvrstoća kamena jednaka je aksijalnom opterećenju ispitnog uzorka po jedinici površine prilikom koje nastaje deformacija ili lom uzorka. Metoda ispitivanja tlačne čvrstoće vrši se po normi HRN EN 1926:2008 [25]. Vrijednosti tlačne čvrstoće prirodnog kamena većinom se kreću od 80 do 250MPa, ovisno o vrsti i strukturi ispitnog kamena, a ona se također se može grupirati unutar nekoliko razreda koji su prikazani u tablici 2.1.



Tablica 2.1 Klasifikacija arhitektonsko-građevnog kamena temeljem tlačne čvrstoće [22]

| Kategorija čvrstoće | Tlačna čvrstoća (MPa) |
|---------------------|-----------------------|
| vrlo niska          | < 40                  |
| Niska               | 40 - 80               |
| srednje visoka      | 80 - 180              |
| Visoka              | 180 - 280             |
| vrlo visoka         | > 280                 |

Ispitivanje tlačne čvrstoće vrši se opterećenjem ispitnog uzorka silom od 30 do 70% vrijednosti tlačne čvrstoće pri čemu se uzorak ponaša linearno elastično, nakon čega dolazi do promjene oblika te na kraju do loma uzorka. Rezultati ispitivanja ovise o poziciji mikropukotina unutar kamenog uzorka, o mehaničkoj stabilnosti minerala kao i o vrsti veziva između pojedinih minerala kamenog uzorka. Jednoosna tlačna čvrstoća jedna je od najvažnijih metoda ispitivanja mehaničkih svojstava arhitektonsko građevinskog kamena koja se danas koristi.

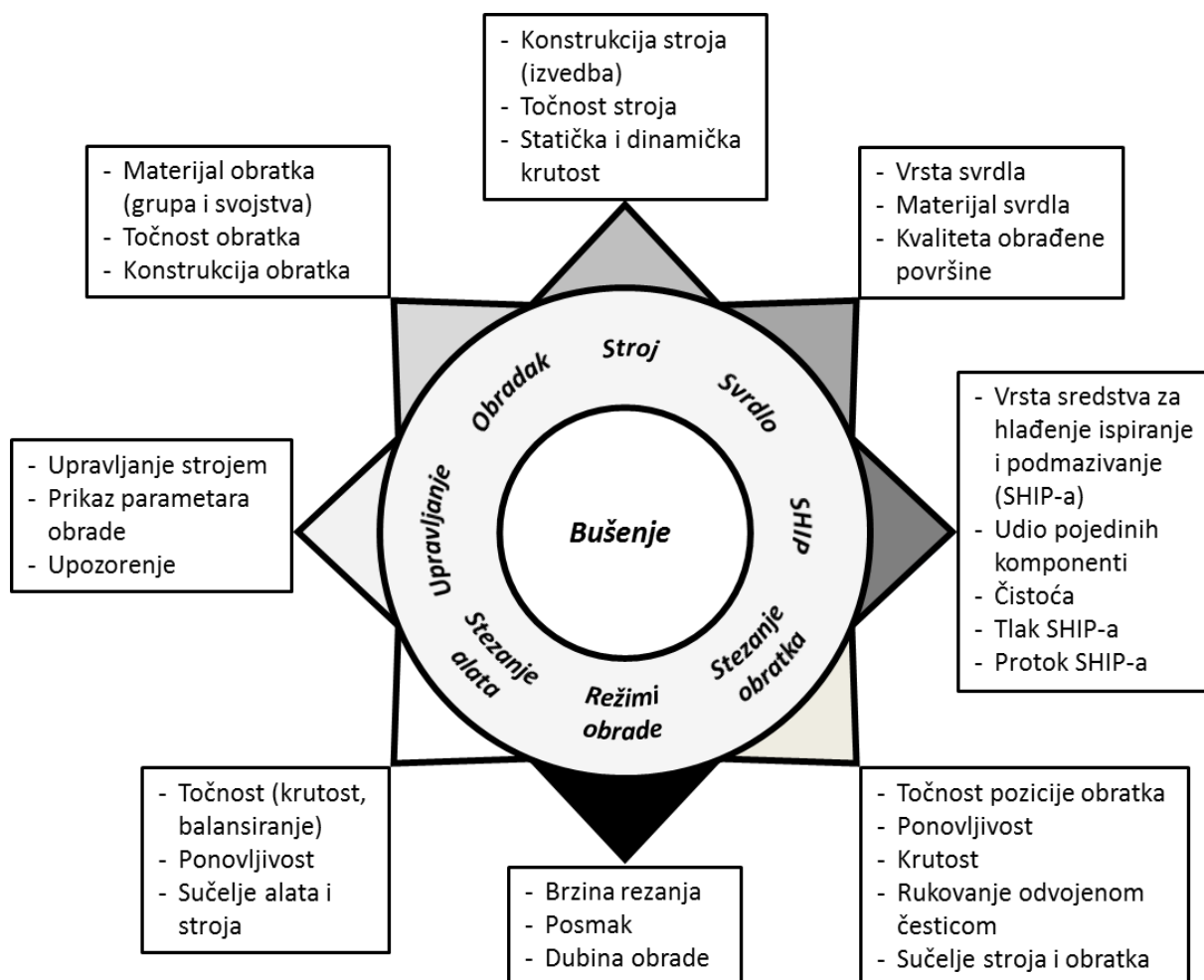
**Poroznost.** Poroznost je fizikalno svojstvo kamena kojim se definira udio šupljina (pora) unutar ispitnog uzorka. Kvantitativno se izražava kao odnos izražen u postocima (%) volumena svih šupljina sadržanih u uzorku prema ukupnom volumenu ispitnog uzorka, poznatija kao apsolutna ili ukupna poroznost. Potrebno je razlikovati još i otvorenu poroznost ili relativnu poroznost koja predstavlja šupljine unutar kamenog uzorka koje mogu biti ispunjene vodom. Navedene poroznosti ispituju se u akreditiranim laboratorijima prema normi HRN EN 1936 [26].

**Gustoća kamena i prostorna masa.** Treba razlikovati gustoću od prostorne mase kamena. Gustoća kamena ovisi jedino o gustoći minerala od kojih je građen ispitni uzorak ne uzimajući u obzir poroznost. Primjerice, kalcitni i dolomitni uzorci kamena imaju značajne razlike u gustoći minerala; gustoća kalcita je  $2710 \text{ g/cm}^3$  dok je gustoća dolomita  $2866 \text{ g/cm}^3$ . Navedena gustoća ispitnog uzorka uključujući poroznost definira prostornu masu, a njihova se svojstva najčešće ispituju prema normi HRN EN 1936 [26].

## 2.2 Pregled područja postupka bušenja kamena

Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica pomoću kojeg se izrađuju slijepi i prolazni provrti. Alat kojim se vrši postupak naziva se svrdlo, definirane je rezne geometrije i najčešće se sastoji od dvije rezne i jedne poprečne oštrice. Glavno gibanje kod bušenja je kontinuirana rotacija alata (svrdla), dok je posmično gibanje kontinuirano translacijsko, najčešće pridruženo svrdlu. Bušenje spada u kontinuirane postupke, što znači da su rezne oštrice alata u konstantnom kontaktu s obrađivanim materijalom.

Postupak bušenja ovisi o nizu parametara (kombinaciji brzine rezanja i posmaka, geometriji alata, materijalu alata, svojstvima obrađivanog materijala) prikazanih na slici 2.1 .



Slika 2.1 Sustav postupka bušenja [27]

Koliko je važno promatrati određeni postupak kao sustav svjedoči autor [27] koji na primjeru ankete provedene u nekoliko tvrtki specijaliziranih za obrade raznih automobilskih dijelova te nekoliko tvrtki koje izrađuju alate i kalupe za injekcijsko prešanje uočava sljedeće:

- ispravna geometrija svrdla upotrebljava se u 30 % slučajeva,
- ispravni režimi obrade korišteni su u 48 % slučajeva,
- potpuna iskoristivost reznog alata tijekom eksploatacije ostvari se u 57 % slučajeva,
- ispravan materijal alata odabran je u 30 % slučajeva,
- ispravna rashladna tekućina koristi se u 42 % slučajeva,
- ispravni parametri postupka bušenja koriste se u manje od 40 % slučajeva.

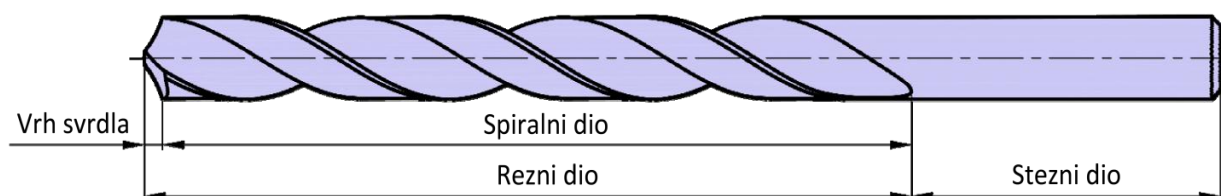
Iz navedenih podataka može se zaključiti da bi u protivnom bušenje moglo rezultirati slabom učinkovitošću, nedostatkom kvalitete ili pak lomkom alata, kao i obrađivanog materijala. S navedenim rezultatima, bušenje može vrlo lako postati potencijalno mjesto zastoja u proizvodnji. Stoga svaka komponenta sustava mora biti funkcionalna i usklađena s ostalim komponentama.

Osim navedenog, bušenje karakterizira nekoliko važnih značajki:

- brzina rezanja duž glavne oštrice,
- promjenjivi kutovi rezanja duž glavne oštrice,
- otežano odvođenje odvojenih čestica i dovod SHIP-a,
- mala krutost sustava.

### 2.2.1 Alat za bušenje- spiralno svrdlo

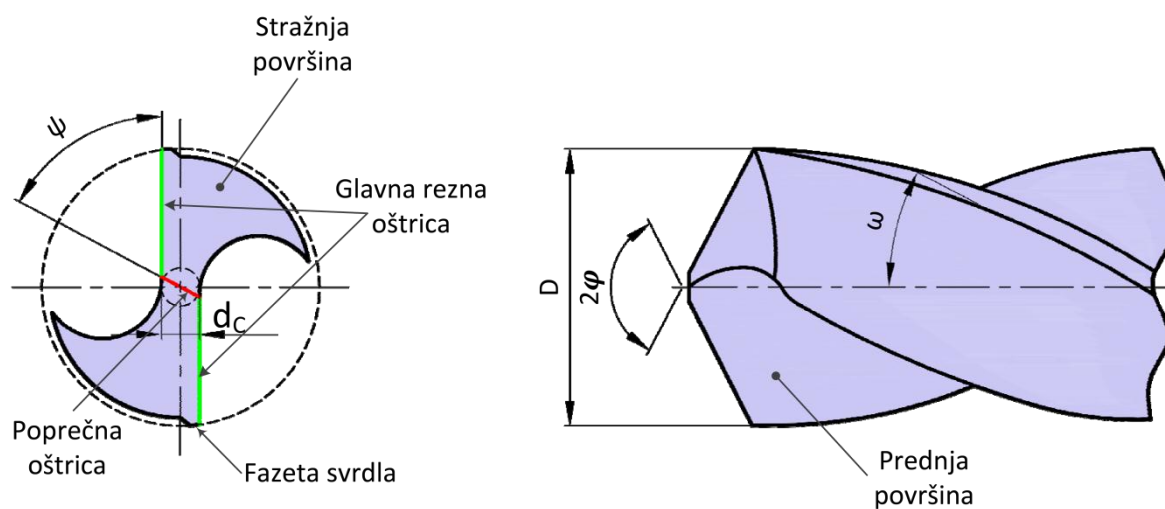
Spiralno svrdlo je alat koji se najviše koristi za postupak bušenja. Procjenjuje se da bušenje s takvim svrdlom zauzima 20 do 25 % kapaciteta strojne obrade danas u svijetu. Spiralno svrdlo sastoji se od reznog i steznog dijela što se može vidjeti na slici 2.2. Rezni dio sastoji se od vrha svrdla i spiralnog dijela koji služi za vođenje svrdla i za odvođenje odvojenih čestica.



Slika 2.2 Elementi spiralnog svrdla [28]

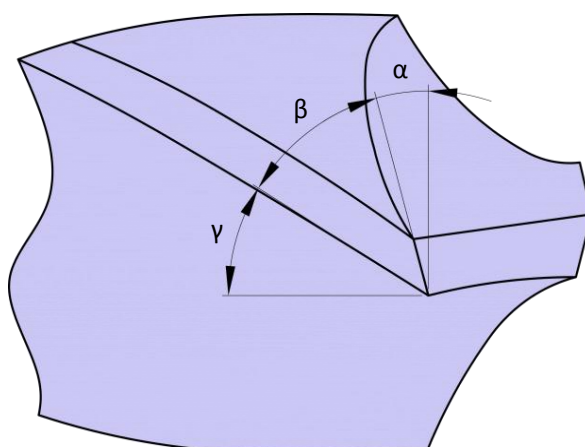
Rezni dio svrdla sadrži dva spiralna žlijeba koja su na vrhu svrdla najveći, dok se prema steznom dijelu smanjuju i naposljetku prelaze u stezni dio svrdla (granica između reznog i steznog dijela). Žlijebovi imaju temeljnu funkciju odvođenja odvojene čestice iz zone

rezanja. Rezni dio svrdla sastoji se od dvije glavne rezne oštrice međusobno spojene s poprečnom oštricom koja zbog svoje geometrije, kao i parametara obrade ne reže nego gnječi materijal, odnosno obradak. Kut poprečne rezne oštrice ( $\psi$ ) mjeri se između glavne rezne oštrice i poprečne oštrice, ovisi o promjeru promatranog svrdla i obično se kreće od  $47^\circ$  do  $55^\circ$ . Predmetna oštrica ne može se izbjeći jer njena veličina ovisi o promjeru jezgre svrdla ( $d_c$ ). Promjer jezgre svrdla utječe na krutost svrdla i gledajući od vrha svrdla prema steznom dijelu, navedeni promjer se povećava ovisno o veličini svrdla.



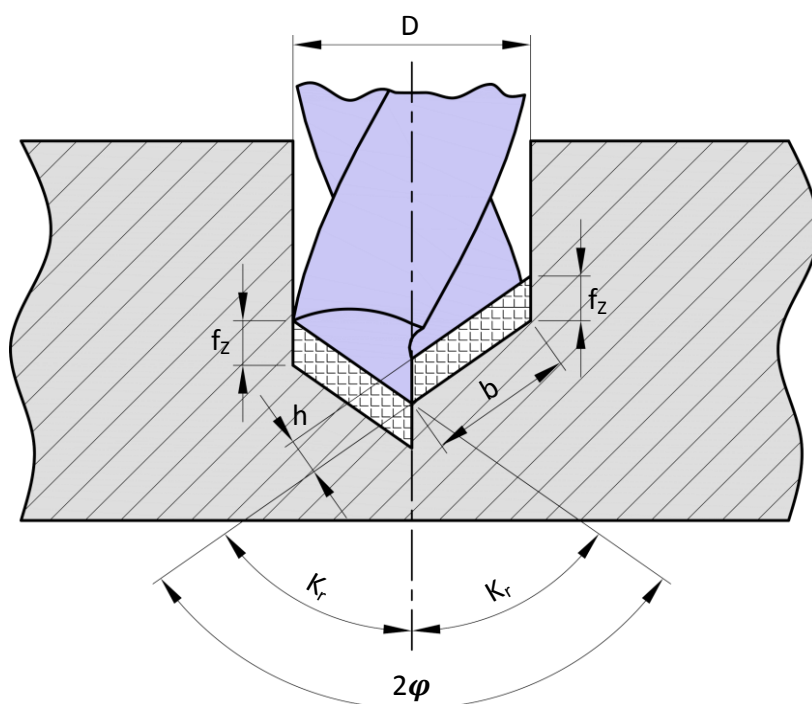
Slika 2.3 Geometrija spiralnog svrdla [28]

Promjer svrdla ( $D$ ) smanjuje se gledajući od vrha svrdla prema steznom dijelu zbog manjeg trenja i smanjenja momenta rezanja [29]. Fazeta svrdla služi za vođenje svrdla i smanjenje trenja između izbušenog provrta i svrdla. Kut vrha svrdla ( $2\phi$ ) ovisi isključivo o vrsti obrađivanog materijala i obično se kreće od  $90^\circ$  do  $140^\circ$ .



Slika 2.4 Geometrijski kutovi svrdla [28]

Pri konstantnom usponu spirale svrdla prednji kut ( $\gamma$ ) i kut spiralnog žlijeba svrdla ( $\omega$ ) najčešće su jednaki, u praksi se njihove vrijednosti kreću od  $10^\circ$  do  $45^\circ$ . Za tvrde i materijale veće prekidne čvrstoće upotrebljavaju se svrdla s manjim kutom spiralnog žlijeba zbog veće krutosti svrdla. Prednji kut i kut spiralnog žlijeba svrdla najveći su na obodu, a smanjuju se promatrajući svrdlo od oboda prema središtu. Stražnji kut ( $\alpha$ ) mijenja se duž rezne oštrice svrdla i obično iznosi od  $7^\circ$  do  $25^\circ$ . Veličina navedenog kuta ovisi o iznosu posmaka, tj. stražnji kut mora osigurati nepostojanje kontakta između stražnje površine i obrađivanog materijala. Kut klina ( $\beta$ ) je kut između prednje i stražnje površine alata.



Slika 2.5 Parametri zahvata postupka bušenja [28]

Parametri zahvata kod postupka bušenja dani su na slici 2.5. Dubina rezanja ( $a_p$ ) predstavlja polovinu promjera svrdla ( $D$ ) odnosno:

$$a_p = \frac{D}{2} \quad (2.1)$$

Posmak kod bušenja predstavlja put svrdla za jedan okretaj. Ako se radi o svrdlu s dvije rezne oštrice, alatima koji se danas najviše upotrebljavaju u postupku bušenja, onda je posmak ( $f$ ) umnožak posmaka po oštrici ( $f_z$ ) i broja reznih oštrica ( $z$ ):

$$f = f_z * z \quad (2.2)$$

Ukupna površina presjeka odvojene čestice ( $A_{UK}$ ) u općem slučaju je umnožak površine presjeka odvojene čestice po reznoj oštrici ( $A_X$ ) i broja reznih oštrica ( $z$ ):

$$A_{UK} = A_X * z \quad (2.3)$$

Površina presjeka odvojene čestice po reznoj oštrici ( $A_X$ ) jednaka je umnošku dubine rezanja ( $a_p$ ) i posmaka po reznoj oštrici ( $f_z$ ). Navedena površina može se izraziti i preko širine ( $b$ ) i debljine ( $h$ ) odvojene čestice:

$$A_X = a_p * f_z = b * h \quad (2.4)$$

Pri čemu je širina odvojene čestice ( $b$ ):

$$b = \frac{D}{2\sin\varphi} \quad (2.5)$$

Debljina odvojene čestice ( $h$ ) izražava se preko:

$$h = f_z * \sin\varphi \quad (2.6)$$

## 2.2.2 Sile rezanja i momenti pri obradi postupkom bušenja

Rezultantna sila rezanja koja se razvija prilikom postupka bušenja određena je silama koje djeluju na pojedinim reznim oštricama. Ako je klasično spiralno svrdlo ispravno naoštreno onda je presjek odvojene čestice po pojedinoj reznoj oštrici jednak pa su jednake i sile rezanja. Također, ne smiju se izostaviti ni sile koje se razvijaju na poprečnoj oštrici, a koje nisu zanemarive.

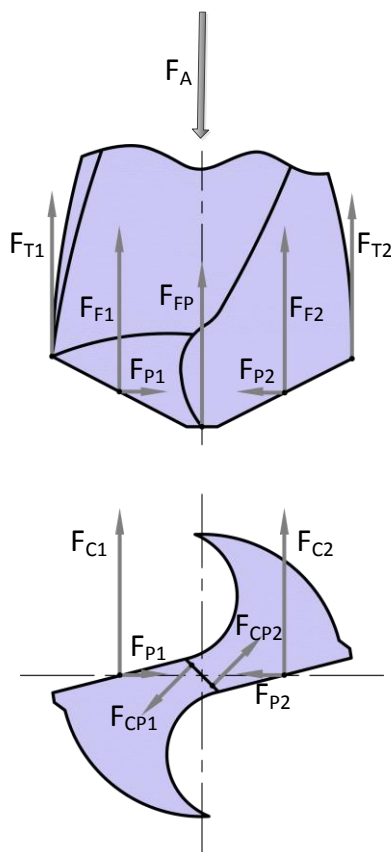
Na svaku rezu oštricu djeluju:

- dvije jednake i suprotno usmjerene glavne sile rezanja  $F_{C1}$  i  $F_{C2}$ ,
- dvije jednake i istosmjerne posmične sile rezanja  $F_{F1}$  i  $F_{F2}$ ,
- dvije jednake i suprotno usmjerene posmične sile rezanja  $F_{P1}$  i  $F_{P2}$ ,

Na svaku poprečnu oštricu djeluju:

- dvije jednake i suprotno usmjerene glavne sile rezanja  $F_{CP1}$  i  $F_{CP2}$ ,
- posmična sila rezanja  $F_{FP}$ ,

Osim navedenih sila na glavnim reznim oštricama postoje dvije jednake sile trenja  $F_{T1}$  i  $F_{T2}$  koje se razvijaju kontaktom fazete svrdla i tek obrađenog dijela provrta.



Slika 2.6 Sile rezanja kod bušenja [28]

Prema slici 2.6 može se zaključiti da je ukupna aksijalna sila ( $F_A$ ) određena rezultantom svih vertikalnih komponenti, odnosno:

$$F_A = (F_{F1} + F_{F2}) + F_{FP} + (F_{T1} + F_{T2}) \quad (2.7)$$

Brojna dosadašnja istraživanja kod postupka bušenja s klasičnim spiralnim svrdlom pokazala su da od ukupne aksijalne sile 30-40 % otpada na posmične sile glavnih oštrica, čak 50-60 % ide na posmičnu silu poprečne oštrice te oko 10 % na sile trenja između fazeta i obratka [27].

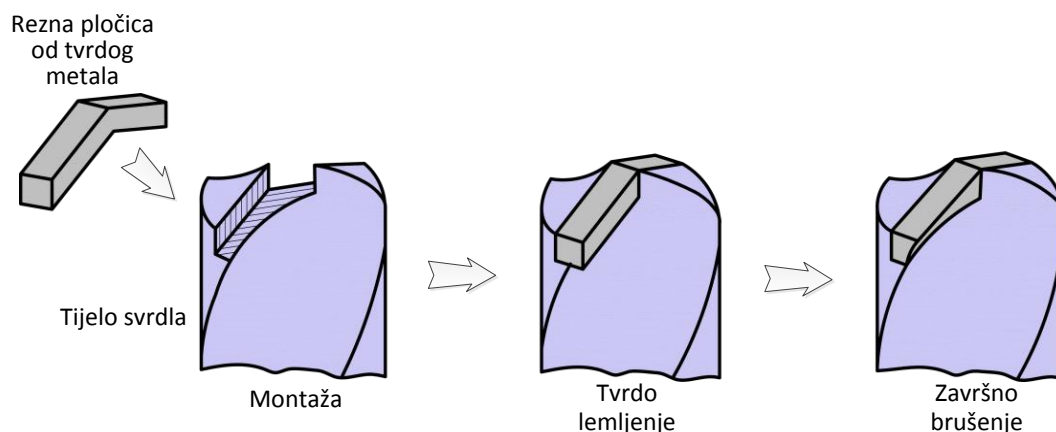
Ukupni moment ( $M_U$ ) koji djeluje na svrdlo prilikom postupka bušenja čine moment glavnih sila rezanja  $M_{FC}$ , moment glavnih sila rezanja poprečne oštrice  $M_{FCP}$  i moment trenja  $M_{FT}$ .

$$M_U = M_{FC} + M_{FCP} + M_{FT} \quad (2.8)$$

S praktičnog gledišta, ako se uzme ukupni moment kod postupka bušenja, oko 80 % odnosi se na moment glavnih sila rezanja, oko 10 % otpada na moment glavnih sila rezanja poprečne oštrice te 10 % na moment trenja koje nastaje kontaktom fazeta svrdla [28].

### 2.2.3 Spiralna svrdla s tvrdo lemljenom pločicom od tvrdog metala

U novije vrijeme postupak bušenja kamena prakticira upotrebu spiralnog svrdla s tvrdo lemljenom pločicom od tvrdog metala, slika 2.7. Pločica od tvrdog metala (vrh svrdla) sadrži zrna volframovog karbida veličine od 2 do 5 $\mu$ m i 5-10 % kobaltnog veziva. Takve alate karakteriziraju visoka tvrdoća i čvrstoća, dajući dobar odnos otpornosti na trošenje i otpornosti na lom i krzanje rezne oštrice [30].



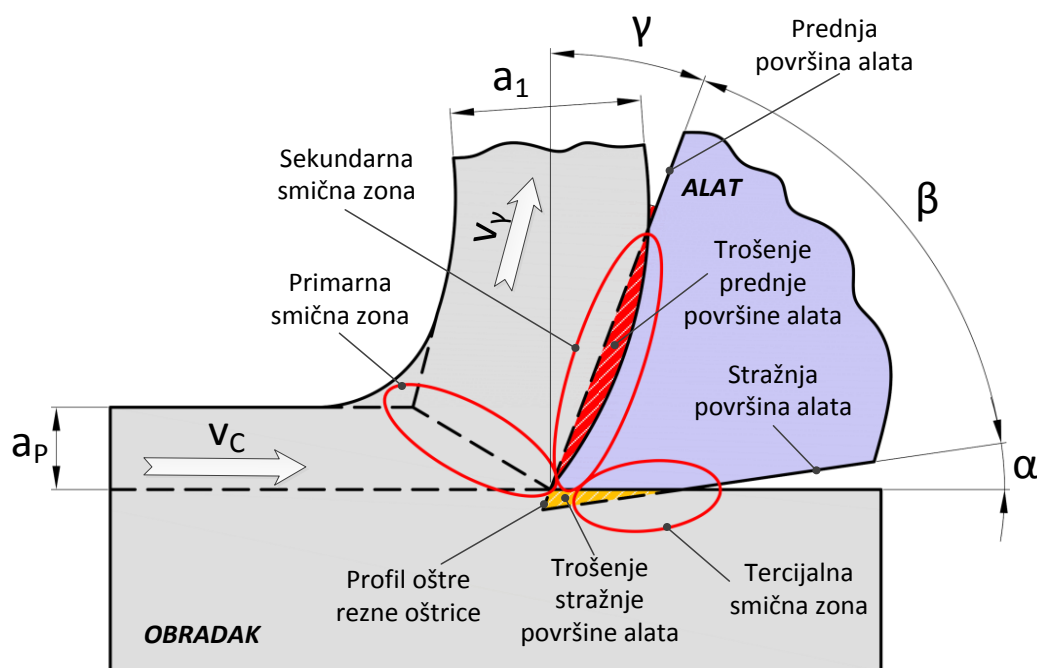
Slika 2.7 Faze izrade spiralnog svrdla s tvrdo lemljenom pločicom od tvrdog metala [27]

Za izradu predmetnog svrdla potrebno je na vrhu spiralnog dijela napraviti utor, najčešće postupkom brušenja ili elektroerozije. Postoji nekoliko vrsta pločica koje se leme na vrh svrdla ali generalna preporuka je izraditi utore čiji su bridovi paralelni s reznim oštricama svrdla. Izvedba takvih utora podržava lemljenje pločice od tvrdog metala koja ima oblik obrnutog slova V. Navedeni oblik rezne pločice osigurava točno centriranje i uspješno provođenje daljnjeg postupka tvrdog lemljenja bez potrebe specijalnih naprava koje bi dodatno centrirale reznu pločicu i tijelo svrdla.

### 2.3 Trošenje alata

Tijekom postupka obrade odvajanjem čestica alatom definirane geometrije dolazi do odvajanja, deformacija i trenja u području primarne, sekundarne i tercijalne smične zone (slika 2.8). Tijekom navedenog procesa alat je izložen iznimno složenom opterećenju karakteriziranom visokim tlakom, brzinama rezanja i temperaturama. Shodno navedenom, dolazi do trošenja alata, pojave koja je karakterizirana kao stohastička, progresivna i izrazito nepovoljna.





Slika 2.8 Sučelje alata i obratka sa zonama trošenja [31]

Proces trošenja je predmet brojnih istraživanja zadnjih stotinjak godina, ali do danas nije dovoljno razjašnjen. Trošenje reznih alata rezultat je kompleksnih mehaničkih, kemijskih i termo-mehaničkih pojava. Budući da različiti mehanizmi trošenja (abrazija, adhezija, oksidacija i difuzija) mogu djelovati istovremeno, identifikacija dominantnog mehanizma nije jednostavna te ovisi o subjektivnoj interpretaciji.

Mehanizmi trošenja mogu se podijeliti u dvije skupine:

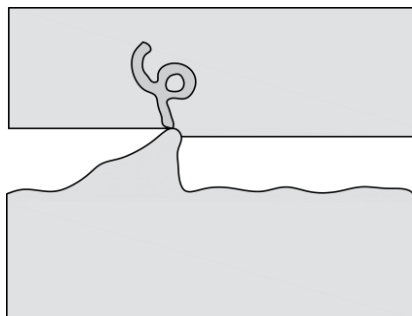
- mehanizmi trošenja uslijed mehaničkog djelovanja (prisutni su gotovo uvijek, naročito kod nižih temperatura),
- mehanizmi trošenja uslijed mehaničko- kemijskog djelovanja (dominantno se javljaju kod viših temperatura).

### 2.3.1 Mehanizmi trošenja

Opterećenja kojima je alat izložen tijekom procesa obrade odvajanjem rezultiraju mehanizmima trošenja, a u literaturi se najčešće navode abrazija, adhezija, difuzija, oksidacija, plastična deformacija rezne oštrice i trošenje uslijed umora materijala.

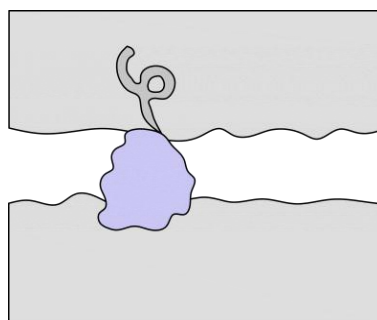
**Abrazijsko trošenje.** Karakterističan proces trošenja gotovo uvijek prisutan kod obrade odvajanjem čestica s većim utjecajem kod nižih temperatura. Abrazijsko trošenje nastaje kontaktom između alata i obratka, najčešće utjecajem različitih ukuljučina unutar materijala obratka (slika 2.9). Postoje dvije vrste abrazijskog trošenja:

*Abrazijsko trošenje između dva tijela* nastaje kada vrhovi neravnina jednog ili drugog tijela prodiru i skidaju mikro čestice drugog tijela. Pri tome nema utjecaja dodatnih čestica drugih stranih tijela, odnosno utjecaja prljavštine.



Slika 2.9 Abrazijsko trošenje između dva tijela [32]

Navedeno trošenje neizbježno je i javlja se uvijek kod konvencionalnih postupaka obrade odvajanjem čestica zbog kontakta alata i obratka. Intenzivnije djelovanje abrazije nastaje zbog nedovoljnog podmazivanja između površina alata i obratka, neodgovarajućeg medija za podmazivanje ili neadekvatne hrapavosti površina, što može biti utjecaj drugih mehanizama trošenja. Abrazijsko trošenje između tri tijela (slika 2.10) javlja se klizanjem površina alata i obratka gdje se između njih javljaju još i čestice nekog trećeg tijela koje uzrokuju nastajanje malih ogrebotina u smjeru glavnog gibanja.



Slika 2.10 Abrazijsko trošenje između tri tijela [32]

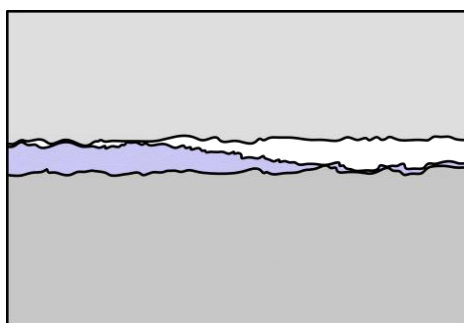
Ako su čestice trećeg tijela dovoljno fine, dolazi do postupka lepanja ili poliranja. Nedovoljna čistoća SHIP-a (sredstva za hlađenje ispiranje i podmazivanje) može biti uzrok

pojave intenzivnijeg abrazijskog trošenja između tri tijela. Prema jednom istraživanju [27], postoji nekoliko veličina čestica koje se najčešće pronalaze u SHIP-u:

- čestice tvrdih karbida alata veličine od 0.6 do 1.5  $\mu\text{m}$  nastalih odvajanjem tijekom obrade,
- čestice drugih metalnih materijala veličine do 25 $\mu\text{m}$ .

Najbolji način djelomične eliminacije utjecaja dodatnih abrazivnih čestica Astakhov predlaže ugradnju dodatnih sustava za filtriranje SHIP-a.

**Adhezijsko trošenje.** Nastaje neposredno nakon procesa rezanja, uglavnom kod nižih temperatura, mehaničkim „lijepljenjem“, odnosno zavarivanjem malih komada netom prije odvojenih čestica, tvoreći tako naljepak na reznoj oštrici (slika 2.11). Nakon određenog perioda dolazi do otkidanja naljepka, a s tim i do mogućeg otkidanja dijela rezne oštrice, odnosno alata.

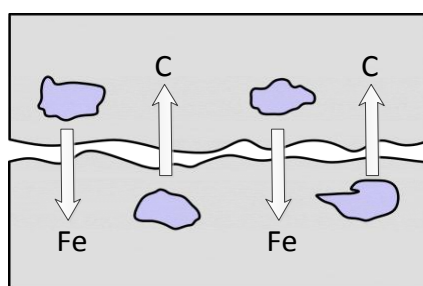


Slika 2.11 Adhezijsko trošenje [32]

Adheziju poboljšava veći tlak između oštrice i obratka, odnosno odvojene čestice, kao i razina kvalitete kontaktnih površina, pri čemu porastom hrapavosti površine raste mogućnost nastanka adhezije. Navedeni mehanizam trošenja nepovoljan je kod svih razina obrade, no pri finoj ili završnoj obradi takvo trošenje može bitno narušiti geometrijske i funkcionalne značajke nekog proizvoda, odnosno obratka. Stalnim razvojem novih materijala reznih oštrica primjenjive su veće brzine rezanja čime se najčešće može zaobići područje nastanka naljepka. Kod postupka bušenja, gdje se brzina rezanja mijenja duž rezne oštrice, stvaranje naljepka ne može se spriječiti neovisno o materijalu alata. Iskustvo je pokazalo da se porastom brzine rezanja preko 70 m/min znatno smanjuje mogućnost nastanka naljepka pri obradi čeličnih materijala. Prilikom porasta brzina rezanja kakve se

danas koriste u suvremenoj proizvodnji dolazi do pojave kombiniranih trošenja, najčešće abrazije i adhezije. Porastom brzine rezanja raste i temperatura koja često dosegne i 1200 °C, a djelovanjem adhezijskog trošenja dolazi do kontaktnog zavarivanja rezne oštrice i odvojene čestice rezultirajući plastičnom deformacijom alata. Prilikom plastične deformacije, karbidna zrna unutar reznog materijala razdvajaju se od matrice i tvore čestice koje abrazivno djeluju na površine obratka i alata.

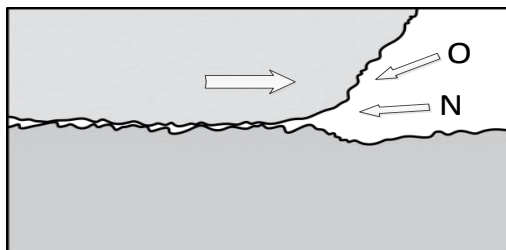
**Difuzijsko trošenje.** Suvremena proizvodnja počiva na nekoliko bitnih parametara, a jedan od njih je i mogućnost obrade velikim brzinama rezanja. Prilikom navedenih brzina rezanja dolazi do porasta temperatura, što posljedično uzrokuje trošenje temeljeno na mehaničkim i kemijskim djelovanjima. Difuzija, toplinski aktiviran proces, uzrokovana je kemijskim opterećenjima koja rastu s porastom temperature te afinitetom materijala alata prema materijalu obratka (slika 2.12). Shodno navedenom, difuzijsko trošenje intenzivno se susreće kod alata od tvrdog metala i keramike. Također se smatra glavnim uzročnikom kraterskog trošenja prisutnog na prednjoj površini alata. Nouari [33] u svom radu navodi da su još davne 1966. godine u jednom istraživanju promatrani procesi trošenja pri različitim brzinama rezanja. Navodi da se abrazija dominantno javlja ispod 35 m/min, između 35 i 110 m/min dominira adhezija, dok se difuzijsko trošenje intenzivira na brzinama iznad 110m/min. Pri tome se eksploatacija alata od tvrdog metala odvija do temperatura od oko 800°C, dok je kod alata od keramike taj prag malo viši i iznosi oko 1200°C [32]. Difuzijsko trošenje se najbolje suzbija korištenjem različitih vrsta prevlaka, poglavito aluminij-oksidnom prevlakom  $Al_2O_3$ .



Slika 2.12 Difuzijsko trošenje [32]

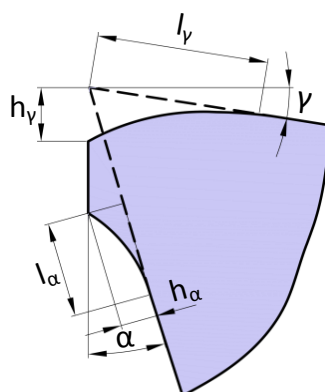
**Oksidacijsko trošenje.** Oksidacijsko trošenje (slika 2.13 ) prouzročeno je kemijskim promjenama unutar materijala alata pri povišenim temperaturama i uz prisutnosti zraka. Oksidacija najčešće nastaje na početku i na kraju dijela oštrice koji je u zahvatu s

obrađivanim materijalom. Problem oksidacije uspješno se kontrolira pravilnim odabirom alata, upotrebom različitih vrsta prevlaka ili upotrebom alata od tvrdog metala građenih s nekim drugim vezivom (Ni, Cr, Mo) [32].



Slika 2.13 Oksidacijsko trošenje [32]

**Plastična deformacija rezne oštrice.** Tijekom kontinuiranih ili prekidnih obrada odvajanjem čestica, uslijed djelovanja visokih temperatura i tlačnih naprezanja na reznoj oštrici alata, može se javiti plastična deformacija (slika 2.14).



Slika 2.14 Plastična deformacija rezne oštrice [27]

Gdje je:

- $l_v$  – duljina plastične deformacije prednje površine alata, mm
- $h_v$  – visina plastične deformacije prednje površine alata, mm
- $l_\alpha$  – duljina plastične deformacije stražnje površine alata, mm
- $h_\alpha$  – visina plastične deformacije stražnje površine alata, mm

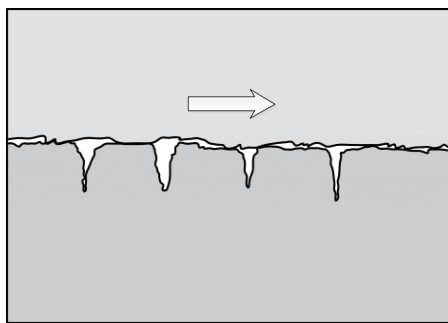
Takav proces trošenja dolazi s kombinacijom utjecajnih parametara kao što su:

- čvrstoća i tvrdoća materijala obratka,

- geometrija, čvrstoća i tvrdoća rezne oštrice,
- parametri obrade.

Plastična deformacija javlja se pri temperaturama od 900 do 1300°C ponajviše djelovanjem adhezijskog trošenja između odvojene čestice i rezne oštrice alata. Alati od tvrdog metala koji su građeni od volframovih karbida s kobaltnim vezivom pretendiraju većoj plastičnoj deformaciji. Iako se takav oblik trošenja često javlja kod alata od tvrdog metala, nije rijetka pojava ni kod drugih materijala reznih alata, primjerice kod polikristalnog dijamanta ili keramike. Kada nastupi plastična deformacija dolazi do promjene geometrijskih kutova alata, poglavito prednjeg i stražnjeg kuta. U literaturi se mogu naći preporuke kako izbjeći pojavu plastične deformacije. Autori navode da bi se kobaltna matrica trebala legirati s volframom i tako spriječiti puzanje materijala. Također, kao jedno od rješenja preporučuju pravilan odabir geometrije, kao i vrste materijala reznog alata, čime se može u velikoj mjeri spriječiti takav proces trošenja.

**Trošenje uslijed umora materijala.** Pojava takvog oblika trošenja najčešće se javlja kod isprekidane obrade odvajanjem čestica, primjerice glodanja, gdje je cikličko opterećenje/rasterećenje reznih oštrica. Prilikom ulaska u zahvat opterećenje na reznu oštricu naglo raste, kao i temperatura u kontaktnoj zoni. Navedeno stanje traje sve dok rezna oštrica ne izađe iz zahvata te se naglo rasterećuje i hladi. Cijeli proces periodički se ponavlja za svaku oštricu, u visokoj frekvenciji, što može dovesti do trošenja uslijed umora materijala. Pukotine mogu biti i na prednjoj i na stražnjoj površini, a ponekad, na prednjoj površini mogu biti i paralelne s oštricom. Ukoliko nastane više manjih pukotina dolazi do razaranja prednje površine alata (slika 2.15), a konačno može uzrokovati krhanje ili lom rezne oštrice. Iako niz faktora utječe na umor materijala, za izbjegavanje takvog oblika trošenja posebnu pozornost treba usmjeriti odabiru materijala rezne oštrice, tj. koristiti alate od materijala visoke tvrdoće, čvrstoće i žilavosti na povišenim temperaturama.



Slika 2.15 Umor materijala [32]

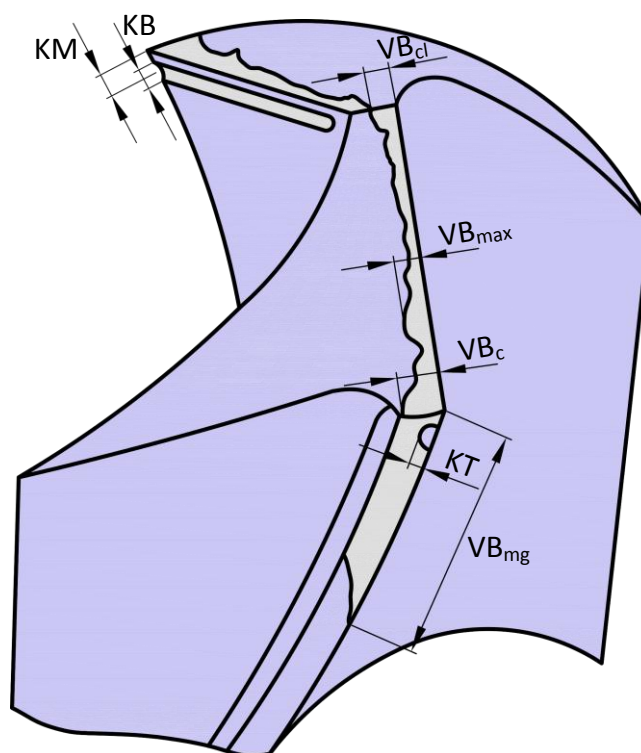
Kod bušenja kamena, umor materijala može predstavljati veliki problem. Prilikom obrade može doći do nastanka mikro pukotina koje se s vremenom eksploatacije alata šire i postepeno ispunjavaju sitnim česticama kamena. Uslijed djelovanja drugih procesa trošenja, temperatura u kontaktnoj zoni raste i sitne kamene čestice se šire te na oštricu djeluju kao klin koji razorno djeluje razdvajajući je te konačno uzrokuje krzanje ili lom materijala. Ovakav fenomen karakterističan je upravo kod alata za obradu kamena [34].

### 2.3.2 Parametri trošenja oštrice spiralnog svrdla

Oblici trošenja koji se javljaju na reznim oštrocama alata uvelike se razlikuju ovisno o postupku obrade, parametrima obrade, geometriji i vrsti alata, kao i vrsti obrađivanog materijala. Slika 2.16 prikazuje uobičajene oblike istrošenosti spiralnog svrdla.

Veličine kojima se kvantificiraju oblici trošenja reznog dijela alata nazivaju se parametri trošenja. Razvojem sustava za praćenje parametara trošenja, primjena se može podijeliti na linijske, volumenske, masene i površinske [32], dok se u novije vrijeme intenzivno primjenjuju, a to su volumenske i površinske metode.

Za procjenu istrošenosti reznoga alata s ravnom prednjom površinom koriste se parametri  $VB$ ,  $VB_{MAX}$ ,  $KT$ ,  $KM$  i  $KB$  propisani normom ISO 3685:1993 [35] od kojih su najviše u upotrebi prva tri:  $VB$  (širina trošenja stražnje površine),  $VB_{MAX}$  (maksimalna vrijednost širine trošenja stražnje površine) i  $KT$  (dubina kratera na prednjoj površini alata).



Slika 2.16 Karakteristični oblici trošenja spiralnog svrdla [27]

Gdje su:

- $KT$  - dubina kratera na prednjoj površini alata,
- $KM$  - udaljenost od oštrice do središta kratera,
- $KB$  - širina kratera,
- $VB_{cl}$  - širina trošenja poprečne oštrice,
- $VB_{MAX}$  - maksimalna širina istrošenosti stražnje površine,
- $VB_C$  – širina trošenja na kraju rezne oštrice svrdla
- $VB_{mg}$  - širina trošenja fazete svrdla

### 2.3.3 Postojanost i kriteriji istrošenosti rezne oštrice

Kriterij istrošenosti je prethodno definirana vrijednost jednog parametra istrošenosti ili pojave nekog fenomena istrošenosti [32]. Ne postoje jednoznačni kriteriji istrošenosti, ali često se u literaturi može naći podjela unutar dvije skupine:

- direktni (koriste vrijednosti nekog od parametra trošenja),
- posredni (koriste parametre obratka kao što su dimenzije i hrapavost ili veličine



procesa kao što su sile, snaga, vibracije).

Direktni kriteriji istrošenosti daju bolju informaciju o stanju alata, ali zbog svoje složene implementacije, kao i nemogućnosti da se parametri trošenja prate za vrijeme trajanja procesa obrade, zadnjih nekoliko desetljeća sve je veći naglasak na posrednim kriterijima istrošenosti. Posredni kriteriji dolaze do spoznaje o stanju alata preko mjerljivih veličina tijekom procesa. Posljednjih godina veliki napor se ulaže u ovu metodu, ali pri tome treba biti oprezan jer su istraživanja pokazala da se rasipanja promatranih veličina u laboratorijskim uvjetima kreću od 10 % do 20 %, dok u realnim uvjetima, tijekom proizvodnje, taj postotak zna doseći znatno veću vrijednost [36].

Postojanost rezne oštrice alata najčešće je definirana vremenom koje je alat proveo u zahvatu s obratkom do ostvarivanja jednog od unaprijed definiranih kriterija istrošenosti.

Postojanost rezne oštrice definirana vremenom dana je izrazom:

$$v_c \cdot T^m = C_T \quad (2.9)$$

Gdje je:

- $v_c$  – brzina rezanja, m/min
- $T$  – postojanost definirana vremenom, min
- $m$  – eksperimentalno određen eksponent Taylorove jednadžbe
- $C_T$  – brzina za postojanost oštrice od jedne vremenske jedinice

U novije vrijeme postojanost alata se osim vremenom sve češće izražava i putem u smjeru posmičnog ili glavnog gibanja. Postojanost alata kod postupka bušenja najčešće se izražava upravo duljinom puta u smjeru posmičnog gibanja [36].

Postojanost rezne oštrice definirana duljinom puta u smjeru glavnog gibanja:

$$v_c \cdot L_v^{m_v} = C_{L_v} \quad (2.10)$$

$$L_v = v_c \cdot T \quad (2.11)$$

Gdje je:

- $L_v$  – postojanost definirana duljinom puta u smjeru glavnog gibanja, m
- $m_v$  – eksponent dobiven supstitucijom,  $\frac{m}{1-m} = m_v$

- $C_{L_v}$  – konstanta dobivena izrazom,  $C_{L_v} = C_T^{\frac{1}{1-m}}$ , m/min

Postojanost rezne oštrice definirana duljinom puta u smjeru posmičnog gibanja:

$$v_c \cdot L_f^{m_f} = C_{L_f} \quad (2.12)$$

$$L_f = v_f \cdot T \quad (2.13)$$

$$v_f = f \cdot n = f \cdot \frac{v_c}{D \cdot \pi} \quad (2.14)$$

Gdje je:

- $L_f$  – postojanost definirana duljinom puta u smjeru posmičnog gibanja, m
- $m_f$  – eksponent dobiven supstitucijom,  $\frac{m}{1-m} = m_f$
- $v_f$  – posmična brzina, m/min
- $C_{L_f}$  – konstanta dobivena izrazom,  $C_{L_f} = C_{L_v} \cdot \left(\frac{f}{D \cdot \pi}\right)^{m_f}$ , mm/min
- $f$  – posmak, mm<sup>-1</sup>
- $n$  – učestalost vrtnje, min<sup>-1</sup>

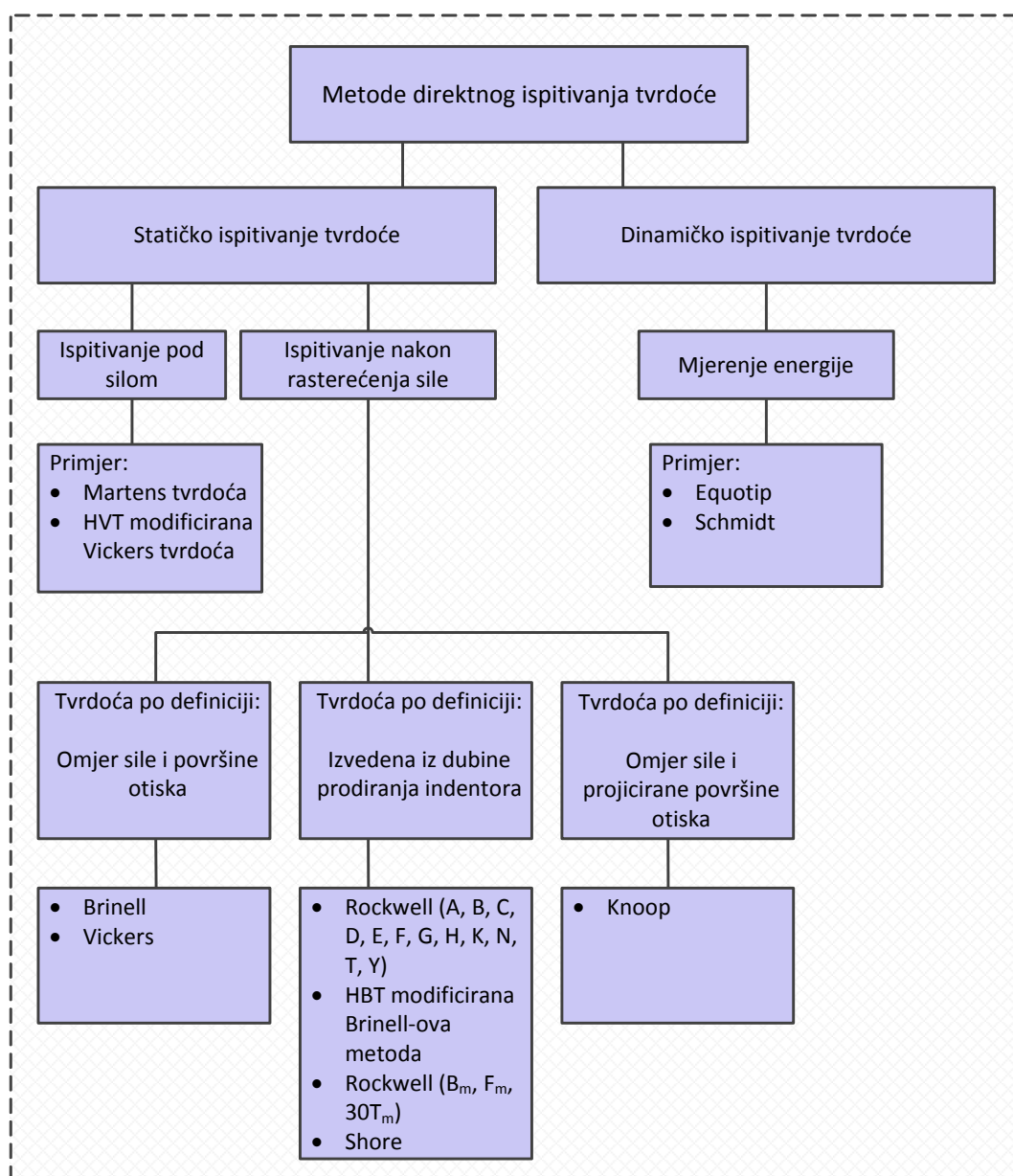
Definirati kriterij istrošenosti znači odrediti postojanost alata, tj. predvidjeti sposobnost oštrice da zadovolji određene vrijednosti obratka unutar definiranih granica povjerenja. Zaključno, vijek trajanja alata jedan je od glavnih utjecajnih faktora na proizvodnost nekog postupka obrade.

## 2.4 Tvrdoća kamena

Tvrdoća obratka spada među najvažnija svojstva nekog materijala koje u velikoj mjeri utječe na njegovu obradivost. Spada u relativnu mjernu veličinu koja nema jedinicu u SI sustavu, ali kao takva pripada mjernim veličinama koje se određuju na temelju skale referentnih vrijednosti. Tvrdoća nema kvantitativnu vrijednost osim u smislu određenog opterećenja primijenjenog na određeni način, određenim indentorom u određenom razdoblju [23].

Ispitivanje tvrdoće materijala može biti provedeno statičnim i dinamičkim metodama mjerenja [37]. Dinamička metoda mjerenja tvrdoće ostvaruje se udarom indentora određenom silom, nakon čega se tvrdoća najčešće određuje na osnovi elastičnog odskoka

istog od površine koja se ispituje. Navedena metoda se koristi isključivo za grubu procjenu tvrdoće, a odlikuje ju jednostavno korištenje u svim pozicijama i različitim uvjetima primjene. Statička metoda mjerenja tvrdoće zasniva se na utiskivanju određenog penetratora u ispitni materijal silom koja postepeno raste do propisane vrijednosti u točno određenom vremenu. U odnosu na dinamičke metode mjerenja, statičkim metodama moguće je točno određivanje tvrdoće uz ograničenja kao što su bolja priprema površine i nemogućnost mjerenja na terenu, kao i česta ograničenja vezana uz dimenzije ispitnih uzoraka. Pregled najčešće korištenih metoda za direktno mjerenje tvrdoće dan je na slici 2.17.

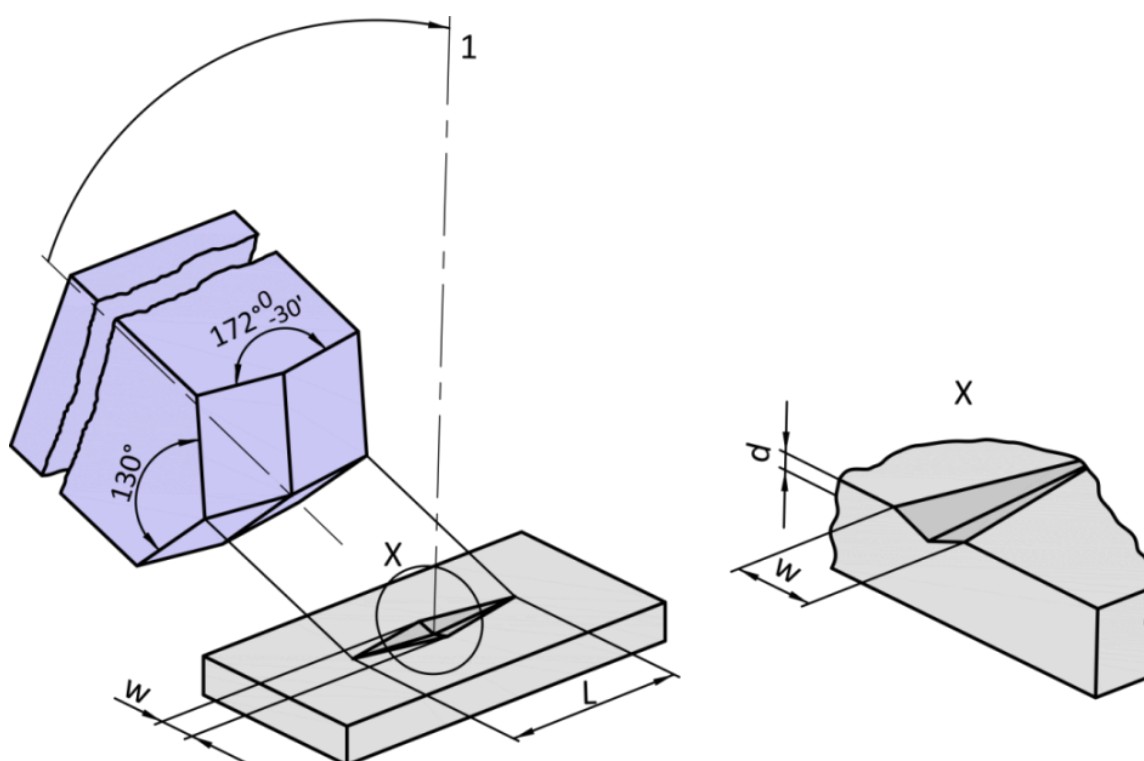


Slika 2.17 Metode direktnog ispitivanja tvrdoće metalnih materijala [38]

Međunarodno društvo za mehaniku stijena (International Society for Rock Mechanics, ISRM), 1977. godine predlaže izravne metode za određivanje tvrdoće kamena [39]. Kao prioritetne metode mjerenja tvrdoće navode se metode prema Knoop-u i Vickersu, dok se Brinellova i Rockwell-ova metoda ne preporučuju zbog krhkosti kamena. Također se predlažu i mjerenja tvrdoće po Shore-u i Schmidt-u, međutim navedene metode daju grubu informaciju o tvrdoći uzorka.

#### 2.4.1 Određivanje tvrdoće po Knoop-ovoj metodi

Knoop-ova metoda pogodna je za krhke i tvrde materijale poput kamena i keramike. Nastala je 1969. godine kao inačica Vickers-ove metode. Zbog relativno velikih i nesimetričnih kutova vrha (slika 2.18) ova metoda je pogodna za ispitivanje materijala tankih stjenki.



Slika 2.18 Oblik indentora i otiska Knoop-ove metode [18]

Osnovni princip rada zasniva se na utiskivanju piramidalnog dijamantnog indentora različitih vršnih kutova  $172^{\circ}30'$  i  $130^{\circ}$ . Prema normi HRN EN 14205:2003 [18] ispitivanje se vrši silom od 0,1 N do 5 N, ovisno o vrsti kamena. Pri tome treba napomenuti da se ispitna površina mora adekvatno pripremiti, odnosno polirati do visokog sjaja. Norma također propisuje i minimalnu veličinu ispitnog uzorka koji ne smije biti manji od 30 mm duljine, 20

mm širine i 10 mm debljine. Kako se radi o ispitivanju tvrdoće kamena, materijala izrazito nehomogene strukture, što je objašnjeno u poglavlju 2.4.1, nije moguće jednoznačno propisati broj mjerenja na određenoj vrsti kamena, već se za to primjenjuju tri načelna načina mjerenja:

- Za sitno-zrnate vrste kamena jednolike strukture preporučuje se jedna serija od 20 indentacija uzduž uzorka s korakom od 1mm.
- Za srednje-zrnate vrste kamena nejednolike strukture preporučuju se tri serije od 20 + 10 + 10 indentacija uzduž uzorka s korakom od 1 mm.
- Za grubo-zrnate vrste kamena nejednolike strukture preporučuju se tri serije od 20 + 10 + 10 indentacija uzduž uzorka s korakom od 2 mm.

Nakon izvršene indentacije pristupa se mjerenju otiska u cilju utvrđivanja vrijednosti tvrdoće. Zbog različitih vršnih kutova nastaje otisak određene dubine ( $d$ ) romboidnog oblika na kojem se mjeri veća dijagonala ( $L$ ) u svrhu izračunavanja tvrdoće, što je vidljivo na slici 2.18.

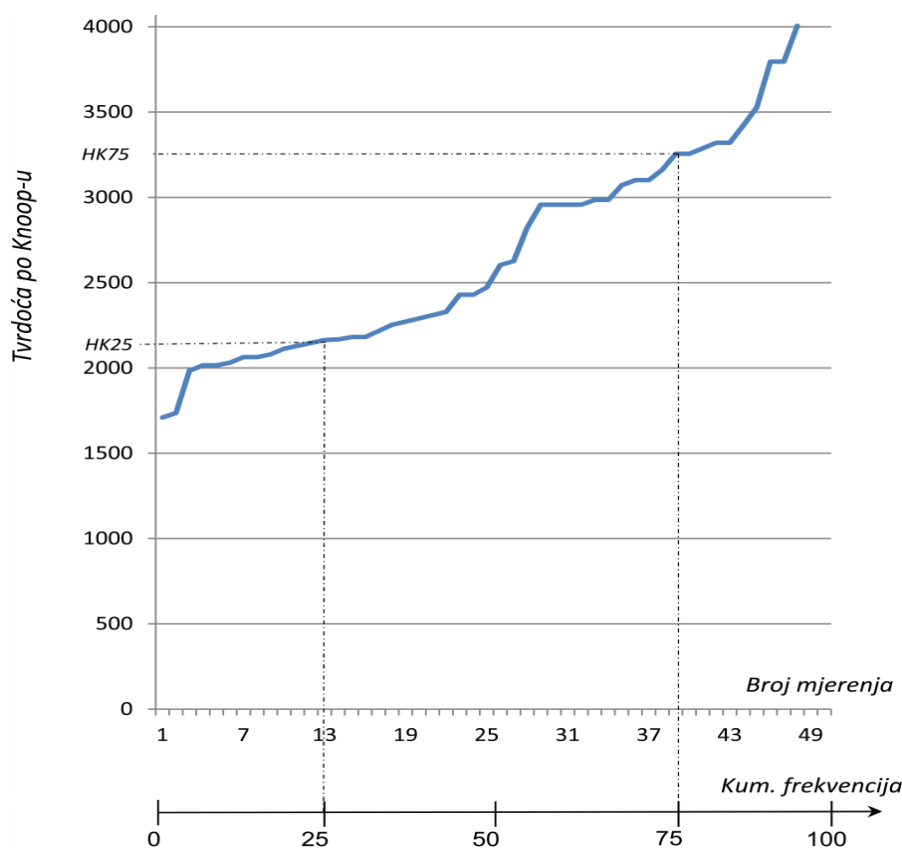
Izmjerena dijagonala se zatim uvrštava u izraz:

$$HK = 14.23 \frac{P}{L^2} \quad (2.15)$$

Gdje je:

- $P$  – sila utiskivanja, N
- $L$  – duljina najdulje dijagonale otiska, mm

Nakon izračunavanja vrijednosti, tvrdoće se slažu u rastućem nizu, počevši od najmanje prema većoj. Iznosi poredani u takvom obliku tvore dijagram kumulativne vrijednosti mikrotvrdoće ispitnog kamena (slika 2.19).



Slika 2.19 Dijagram tvrdoće po Knoop-u [18]

Pri tome je:

- *HK 25* ili donji kvartil – vrijednost mikrotvrdoće koja odgovara kumulativnoj frekvenciji od 25 % ukupnih mjerenja tog uzorka.
- *HK 50* ili srednji kvartil – vrijednost mikrotvrdoće koja odgovara kumulativnoj frekvenciji od 50 % ukupnih mjerenja tog uzorka.
- *HK 75* ili gornji kvartil – vrijednost mikrotvrdoće koja odgovara kumulativnoj frekvenciji od 75 % ukupnih mjerenja tog uzorka.

Dijagram raspodjele tvrdoće daje vrlo detaljnu informaciju o tvrdoći kamena. Međutim, uniformnost tvrdoće može se prikazati i kao omjer između donjeg kvartila *HK25* i gornjeg kvartila *HK75*. Veće vrijednosti indeksa uniformnosti tvrdoće ukazuju na jednoličniju strukturu kamena, dok niže vrijednosti ukazuju na veliku nejednolikost tvrdoće koja potencijalno može nepovoljno utjecati na njegovu obradivost.

## 2.5 Metode nadzora istrošenosti reznih alata i tvrdoće obratka

Iako se proizvođači reznih alata trude što više olakšati upotrebu i pravovremenu zamjenu istrošenih alata nizom preporuka i korisničkih priručnika, zamjena alata nije pravodobna. Prerana ili prekasna zamjena alata može prouzročiti velike gubitke u vidu prekomjerne potrošnje alata ili pak prekasne intervencije na promjenu alata. Takva pojava rezultira s oštećenjem obratka ili stroja te naposljetku s zastojem u proizvodnji. Premda danas postoje neka komercijalna rješenja sustava za nadzor istrošenosti reznih alata, njihova primjena je jako ograničena i temeljena isključivo na specifičnostima promatranog procesa prilikom obrade homogenih materijala. Kao glavni razlog navodi se velika složenost procesa i njemu pripadajućih utjecajnih faktora, od kojih veliku ulogu ima i tvrdoća. U ovom poglavlju kratko su opisani mjerni pristupi nadzora trošenja i tvrdoće kamena, odabir značajki i modeliranje procesa.

Mjerni pristupi koji se danas koriste u praćenju procesa trošenja reznih alata (slika 2.20) dijele se prema više kriterija [36]:

- prema načinu prikupljanja podataka:
  - direktni,
  - indirektni;
- prema broju različitih mjernih sustava:
  - jednosenzorski mjerni sustavi,
  - višesenzorski mjerni sustavi;
- prema smještaju senzora, odnosno načinu integracije na obradni stroj:
  - interni,
  - eksterni.

Direktne metode obuhvaćaju sve tehnike mjerenja pomoću kojih je moguće dobiti izravnu informaciju o stanju rezne oštrice promatranog alata. No, ovakav način mjerenja ima nekoliko nedostataka. Korištenje navedene metode jako je otežano i može se primijeniti isključivo dok proces obrade nije aktivan, odnosno dok je privremeno zaustavljen. Razlog

tome leži u činjenici da nije moguće praćenje stanja rezne oštrice u zahvatu zbog različitih utjecajnih faktora, primjerice SHIP-a ili odvojene čestice. Takvi sustavi pretežito su građeni od industrijskih kamera i odgovarajućih objektiva koji se moraju prikladno zaštititi zbog navedenih razloga. Shodno navedenom, takvi se sustavi pretežito koriste u laboratorijima, dok je njihova primjena u industriji vrlo ograničena.

Osim kod trošenja alata, direktnim metodama se ispituju i mehanička svojstva materijala. Njima je moguće dobiti jasnu sliku o traženim svojstvima nekog materijala, ali isto tako zahtijevaju razmjerno složenu pripremu uzoraka. Pregled direktnih metoda za određivanje tvrdoće dan je u prethodnom poglavlju.

Indirektne metode zasnivaju se na višesenzorskom pristupu gdje se, za vrijeme trajanja procesa obrade, snimaju i prikupljaju različiti signali (sila, jakosti struja glavnih i posmičnih motora, vibracije, akustična emisija, temperatura i dr.), koji su osjetljivi na promjene vezane za stanje alata i tvrdoću. Nedostatak navedene metode svakako leži u načinu snimanja i prikupljanja, kao i u računalno intenzivnoj obradi signala. Njihova najznačajnija karakteristika vezana je uz mogućnost praćenja dinamike trošenja u stvarnom vremenu (kontinuirani ili "on-line" režim nadzora), čime se osigurava nužan preduvjet inteligentnog vođenja alatnog stroja [40]. Zbog sveg navedenog, indirektne metode danas se puno više istražuju u obradi odvajanjem čestica.

Poznato je da nehomogeni materijali imaju i nejednoliku tvrdoću u svojoj strukturi koja negativno utječe na obradivost. Za vrijeme obrade takvih materijala postoji velika opasnost za zastoj u proizvodnji uzrokovan puknućem alata ili obratka. Stoga se nadzor tvrdoće intenzivnije počeo primjenjivati u zadnja dva desetljeća.

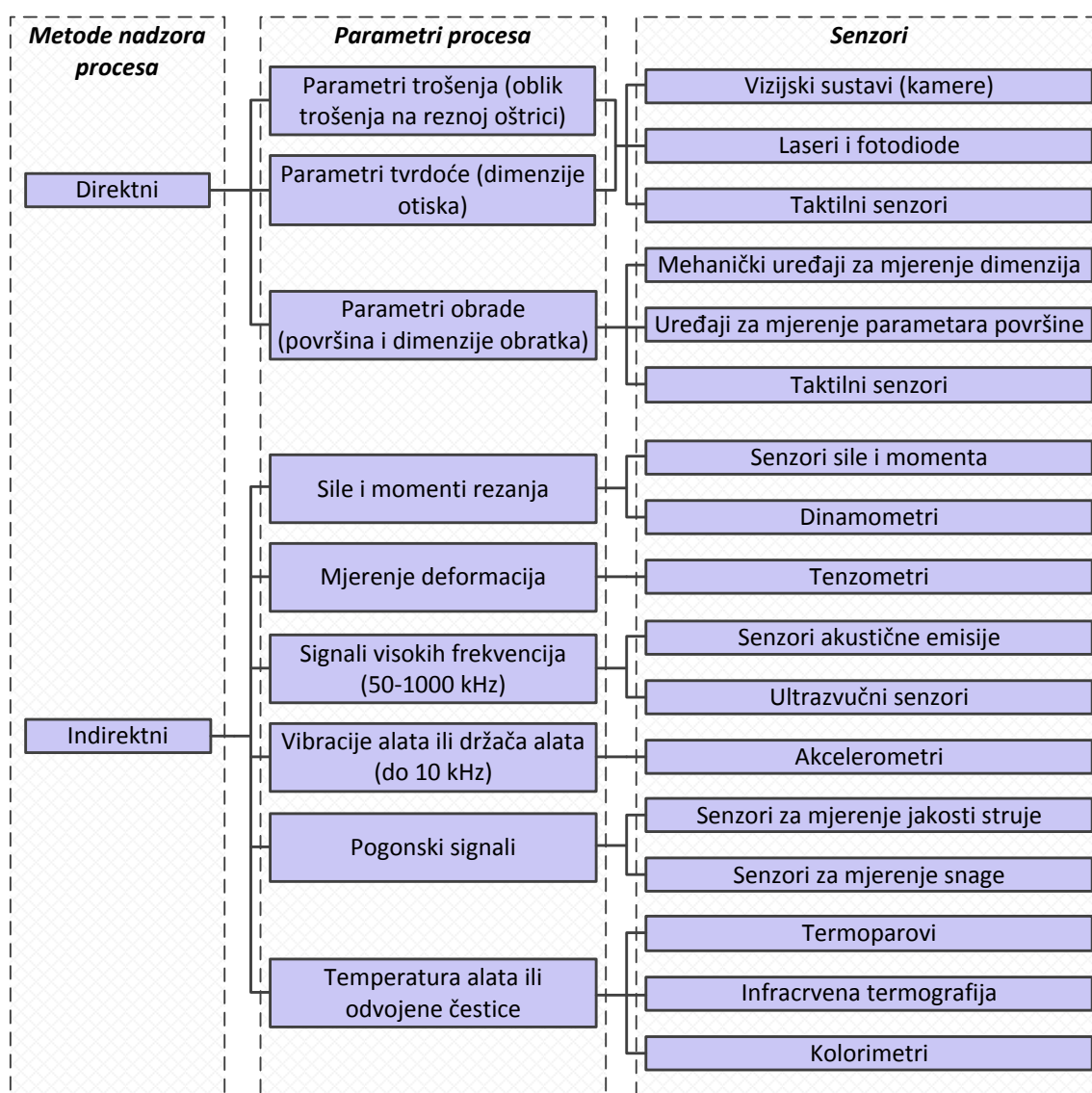
Sustavi za nadzor procesa obrade počeli su se primjenjivati početkom 50-tih godina. Prve inačice temeljene su na jednosenzorskom pristupu, no tijekom eksplantacije se nisu pokazale pouzdanima. Iz navedenog razloga formiran je višesenzorski pristup, baziran na internim i eksternim mjernim sustavima, koji se i danas najčešće koristi.

Interni mjerni sustavi obuhvaćaju senzore koji su integrirani u obradni stroj kao sastavni dio mjernog sustava. Takvi senzori su upotrebljivi jedino ako postoji mogućnost korisničkog pristupa upravljačkom sustavu stroja. Tako se zaobilazi invazivno djelovanje na samu konstrukciju stroja, kao i na njegovu eventualnu smanjenu funkcionalnost koja može biti ograničena ugradnjom dodatnih senzora [36]. S druge strane, navedeni mjerni sustavi



povezani su nizom električnih i mehaničkih komponenti obradnog stroja koji su neophodni za proces obrade. Iz tog razloga, osim informacije o samom stanju alata, signali iz takvih mjernih sustava sadrže i jako puno drugih informacija vezanih uz dinamiku stroja kao što su zračnosti, spojevi i slično. Najčešći signali internih mjernih sustava odnose se na senzore jakosti struja glavnog i posmičnih motora.

Za razliku od internih, eksterni mjerni sustavi zasnivaju se na upotrebi senzora koji se ugrađuju na postojeću konstrukciju alatnog stroja. Pri tome treba obratiti pažnju da ugrađene komponente senzora i pojačala bitno ne narušavaju funkcionalnost obradnog stroja. Najčešći senzori koji se eksterno ugrađuju na postojeće strojeve su senzori sila ili momenta, senzori akustične emisije i vibracija te rjeđe neki vizijski sustavi (slika 2.20) [36].



Slika 2.20 Pristupi nadzoru istrošenosti reznog alata i tvrdoće obratka [36]

## 2.6 Vrste i obrada signala kod indirektnog nadzora procesa

Danas su u primjeni najčešće indirektno metode mjerenja zasnovane na višesenzorskom pristupu, pri čemu se najčešće koriste senzori sile i momenta, jakosti struja pogonskih motora, akustične emisije i vibracija.

### 2.6.1 Sile rezanja i moment glavnog vretena

Mjerenje istrošenosti rezne oštrice upotrebom signala sila rezanja spada u indirektno metode nadzora stanja alata. Poznato je da se trošenjem alata povećava trenje između alata i obratka, što na kraju rezultira povećanjem sila rezanja. Dakle, povećanjem trošenja raste potrebni rad za odvajanje čestice i stoga se isti smatra jednim od parametara istrošenosti alata. Prilikom obrade odvajanjem čestica moguće je mjeriti glavnu, posmičnu i natražnu silu te moment glavnog vretena. Shodno navedenom, mjerenje sila rezanja mnogi su istraživači koristili za praćenje stanja alata. Kod postupka bušenja u literaturi preporučuje mjerenje aksijalne (posmične) sile i momenta glavnog vretena [41].

Brojni su istraživači provodili eksperimente iz nadzora stanja alata kod postupka bušenja, varirajući pritom određene parametre u cilju ispitivanja robusnosti predloženih metoda. Pri tome je glavni cilj sa što manje senzora dobiti što veću pouzdanost sustava za nadzor procesa obrade. Zbog navedenog, Heinemann je u svom radu [42] pokušao promatrati utjecaj trošenja svrdla na aksijalnu silu u smjeru posmičnog gibanja te na moment glavnog vretena. Zaključio je da, usprkos znatnom istrošenju alata, aksijalna sila ne pokazuje dovoljnu osjetljivost te je bez kombinacije s momentom glavnog vretena u industrijskim uvjetima neupotrebljiva.

Veliki utjecaj na sile rezanja i moment glavnog vretena ima i tvrdoća obratka. Jantunen [43] u svojem istraživanju napominje da obrađivani materijal treba imati uniformnu tvrdoću u relativno uskim tolerancijama jer se u protivnom sustav za nadzor istrošenosti alata baziran na silama rezanja i momenta pokazao nepouzdan.

Exadaktylos i dr. [44], N. Billim [45] te Stavropoulou i dr. [46] utvrdili su korelaciju tvrdoće obrađivanog kamena s posmičnom brzinom svrdla pri konstantnoj aksijalnoj sili. E. Valentini i dr. [47] te M. Pamplona i dr. [48] pronalaze korelaciju tlačne čvrstoće s aksijalnom silom i posmičnom brzinom. Al-Naddaf i dr. [49] uspoređuju utjecaj poroznosti kamena na

aksijalnu silu tijekom bušenja kamena te ukazuju na veliku mogućnost pogreške upotrebom izravnih metoda u mjerenju poroznosti kamena zbog njegove nehomogene strukture.

### 2.6.2 Jakosti struje pogonskih motora

Sustavi nadzora trošenja alata realizirani praćenjem jakosti struje motora posmičnih i glavnih prigona bili su predmetom brojnih istraživanja još od njihovih početaka. Brojni su istraživači pratili utjecaj trošenja alata na porast struje kroz regulatore pogonskih motora. Navedena metoda zanimljiva je iz mnogo više razloga, a jedan od najbitnijih je svakako minimalna invazivna intervencija na postojećem obradnom stroju za ugradnju senzora. Naime, regulatori pogonskih motora glavnog i posmičnih prigona opremljeni su sensorima koji su neizbježno prisutni u njihovim upravljačkim sustavima [36]. Trošenje svrdla prilikom procesa bušenja vrlo dobro korelira s vrijednostima jakosti struja. Pri tome autor Mannan navodi da je struja posmičnog motora puno bolji parametar od struje motora glavnog vretena [50]. No upozorava da, ako se obrada vrši svrdlima malog promjera, čak ni jakosti struja posmičnog motora ne moraju nužno dati dobre rezultate.

Nakon pregleda dosadašnjih istraživanja vezanih za metode nadzora istrošenosti alata, Botsaris preporučuje upotrebu signala jakosti struje za detekciju loma za jednosenzorski pristup, dok se u kombinaciji s drugim sensorima može upotrijebiti i za nadzor istrošenosti alata [51].

Rangwala i Dornfeld su pak u svojem istraživanju pokazali vezu između sila rezanja, momenta te struja glavnih i posmičnih motora [52]. Naveli su da nije potrebno mjeriti sve veličine nego samo neke, prethodno određene, što ovisi o samom procesu obrade, dok se do drugih vrijednosti može doći analitičkim putem.

M. Yurdakul i dr. [53] određivali su tvrdoću kamena signalima jakosti struja pogonskih motora. U cilju osiguranja ponovljivosti mjerenja, u dosadašnjim su istraživanjima korišteni umjetni referentni uzorci, od kojih je najčešća primjena umjetnog referentnog kamena (*Artificial reference stone*, ARS [44, 47, 48, 54] i prirodne soli „Halit“ [55].

### 2.6.3 Vibracije

Metode indirektnog nadzora koje se temelje na signalima vibracija intenzivnije su se počele primjenjivati 90-tih godina. Iako ugradnja senzora iziskuje minimalnu rekonstrukciju, ugradnjom senzora u neposrednoj blizini prednjeg ležaja glavnog motora ili na obradak, izmjereni signali ovise o puno faktora od kojih su najutjecajniji materijal obratka, parametri obrade te konstrukcijska struktura stroja [56]. U dostupnoj literaturi istraživači su isključivo koristili senzore vibracija frekvencijskog raspona od 0,5 Hz do 5 kHz, iako Jantunen navodi da se u nekim istraživanjima koristio i širi frekvencijski raspon od 0,5 Hz do 40 kHz [43].

Harun je u svom istraživanju proučavao utjecaj trošenja alata na signale vibracija i sila prilikom bušenja svrdlom promjera 8 mm [57]. Signali senzora sila dobro su korelirali s istrošenosti kod bušenja do dubine od 100 mm. Međutim kod aplikacija bušenja dubine od 200 mm s promjerom alata od 8 mm senzor sila nije prikladan zbog šumova nastalih utjecajem odvojene čestice. Shodno navedenom, preporučuje se upotreba senzora vibracija za nadzor istrošenosti i detekciju loma alata koji se pokazao pouzdanim za primjenu kod dubine bušenja iznad 100 mm. Također je naglasio da je ugradnja senzora vibracija usporedno sa senzorom sila višestruko jednostavnija.

Na osnovi rezultata dobivenih u istraživanju utjecaja istrošenosti alata na signale vibracija, Mahfouz predlaže upotrebu senzora vibracija i kod drugih postupaka obrade, primjerice tokarenja i glodanja [58]. Osim za pouzdanu informaciju o stanju alata, autor navodi da se signali vibracija mogu upotrijebiti i za određivanje kvalitete obrađenog provrta, što je osobito korisno ako se radi o postupku dubokog bušenja.

### 2.6.4 Akustična emisija

Akustična emisija (*AE*) je fenomen prijelaza visokofrekventne energije nastale uslijed deformacije u materijalu (slika 2.21). Prema dostupnoj literaturi, istraživanja vezana uz *AE* najčešće su izvođena uz frekvencijski raspon od 50 kHz do 2 MHz [59]. Prilikom obrade odvajanjem čestica signal *AE* se sastoji od kontinuiranog i dijela sa skokovitim promjenama [32].

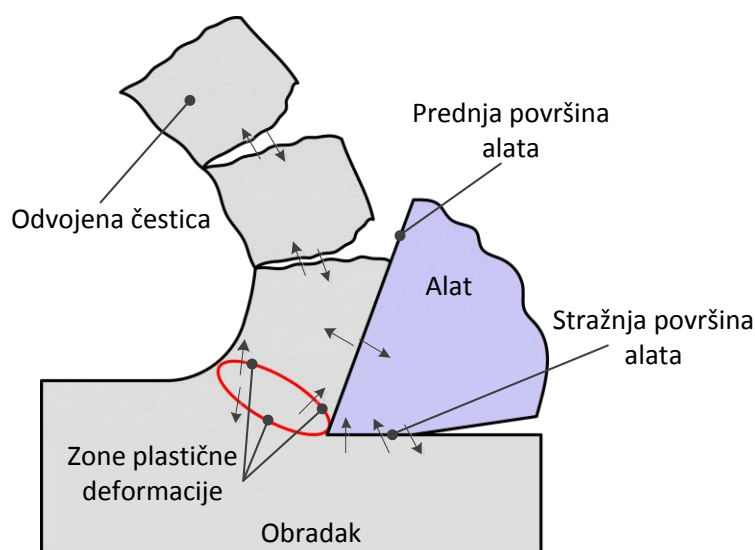
Izvori kontinuiranog signala *AE* nastaju:

- trenjem između alata i obratka na prednjoj površini alata,
- trenjem između alata i obratka na stražnjoj površini alata,

- plastičnom deformacijom u obratku,
- plastičnom deformacijom u čestici,

Izvori skokovitog signala *AE* nastaju:

- kontaktom odvojene čestice i alata,
- puknućem odvojene čestice,
- krhanjem ili lomom alata,



Slika 2.21 Izvori akustične emisije [40]

Quadro je u svom radu istraživao utjecaj trošenja alata na signal akustične emisije sa senzorom mjernog područja od 100 kHz do 1 MHz pri bušenju čeličnog materijala [60]. Eksperiment se provodio sa svrdlom promjera 6 mm u pet razina istrošenosti. Pri tome je također pratio i oblik odvojene čestice koje je također podijelio u nekoliko grupa s ciljem utvrđivanja utjecaja na signal akustične emisije. Od spomenutih razina istrošenosti svrdla zaključio je da je promjena vrijednosti signala *AE* kod 2. i 4. razine istrošenosti najveća te da se *AE* može pouzdano koristiti za nadzor istrošenosti kod bušenja.

Posljednjih nekoliko godina intenzivirala su se istraživanja vezana uz trošenje alata pri bušenju kompozitnih materijala [61]. Pri tome su se signali *AE* pokazali pouzdanima u nadzoru stanja i detekciji loma alata.

Prema navedenom, značajke signala AE pokazale su se pouzdanim pri nadzoru istrošenosti i detekciji loma homogenih i nehomogenih materijala. Međutim, do sada nema zabilježenih istraživanja vezanih uz praćenje stanja alata kod bušenja kamena upotrebom senzora akustične emisije i senzora vibracija.

Iako je logično za pretpostaviti da stupanj istrošenosti alata ima značajan utjecaj kod procjene tvrdoće obrađivanog materijala, procjena tvrdoće kamena tijekom bušenja svrdlima različitim stupnjevima istrošenosti do sada nije razmatran niti u jednom istraživanju [54]. Pri tome su mjereni samo neki parametri procesa, odnosno sile rezanja [44, 46, 54, 55], jakosti struja pogonskih motora [53], posmična brzina [44-47, 55] te razina buke u slušnom području [62, 63].

Ni u jednom istraživanju nisu primijenjeni senzori vibracija i akustične emisije iz ultrazvučnog područja, a značajke procesa prikupljene iz snimljenih signala uglavnom su izdvojene iz vremenskog područja, dok su one iz frekvencijskog i vremensko-frekvencijskog područja izostavljene.

### 2.6.5 Obrada signala i vrste značajki procesa

Nakon završetka faze snimanja, filtriranje predstavlja prvi korak u obradi signala koji prije svega ovisi o vrsti signala, karakteristikama obradnog stroja te o parametrima obrade [36]. U današnje vrijeme, puno industrijskih mjernih sustava za praćenje procesa obrade isporučuje se s već ugrađenim filtrom signala, a pomoću kojeg se frekvencijski pojas ograničava na područje koje senzor najbolje pokriva. Iz dostupne literature uočena je najčešća upotreba niskopropusnih i pojasnopropusnih filtra. Postupak filtriranja nije jednoznačno definiran te ga je potrebno pažljivo odrediti s obzirom na karakteristike obradnog procesa [31]. No, ukoliko je unaprijed poznato frekvencijsko područje razmatranih signala, primjerice signala sila rezanja i struja motora posmičnih osi, onda se oni najčešće filtriraju korištenjem nisko i visoko propusnih te pojasno propusnih i pojasno nepropusnih filtara [36]. S druge strane, u industrijskim uvjetima često postoje situacije u kojima nije u potpunosti moguće razlučiti područja signala s informacijom o stanju alata i tvrdoće obratka od onih područja koji predstavljaju šum. Najbolji primjer za navedeno svakako predstavljaju signali akustične emisije. Tijekom obrade odvajanjem čestica rezna oštrica odvaja dio materijala, prilikom čega dolazi do naprezanja u deformacijskoj zoni koje uzrokuje nastajanje tranzijentnih elastičnih valova, a oni predstavljaju akustičnu emisiju [31]. Kao što je u

prethodnom poglavlju navedeno, najznačajniji izvori signala *AE* nastaju plastičnom deformacijom te trenjem prednje i stražnje površine alata i obratka na višim frekvencijama u ultrazvučnom području. Na taj se način izbjegavaju utjecaji različitih šumova, poput vibracije stroja i drugih signala iz okoline.

Međutim, osim navedenog, signali *AE* prilikom obrade sadrže harmonike deformacije i loma odvojene čestice te sudara čestica s alatom, kao i sve ostale izvore šuma. Iz navedenog razloga, kod filtriranja takvih signala učinkovito se pokazala primjena diskretne wavelet transformacije [31].

Posljednji korak prije postavljanja modela nadzora procesa svakako predstavlja izdvajanje značajki iz prethodno snimljenih i filtriranih signala. Pri tome se određuju značajke osjetljive na promjenu stanja alata tijekom procesa bušenja, kao i značajke osjetljive na promjenu tvrdoće obratka. Značajke se mogu podijeliti u nekoliko kategorija prikazanih u tablici 2.2.

Tablica 2.2 Podjela značajki trošenja i tvrdoće obratka [31]

| Skupina                         | Vrsta značajke  | Napomena  |
|---------------------------------|---|---|
| Statističke značajke            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aritmetička sredina</li> <li>• Varijanca</li> <li>• Standardna devijacija</li> <li>• Koeficijenti spljoštenosti i asimetrije</li> </ul>  | Opisuju distribuciju vjerojatnosti u procesu trošenja |
|                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Autoregresija (<i>AR</i>)</li> <li>• Pomični prosjek (<i>MA</i>)</li> <li>• Autoregresijski model pomičnih prosjeka (<i>ARMA</i>)</li> </ul>   | Modeliranje signala korištenjem vremenskih serija     |
|                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Različiti koeficijenti graničnih vrijednosti</li> <li>• Križna korelacija</li> <li>• Harmonijska sredina</li> </ul>  | Ostale rjeđe zastupljene statističke značajke         |
| Značajke iz vremenskog područja | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prosječne i efektivne (<i>RMS</i>) vrijednosti signala unutar nekog vremenskog intervala</li> <li>• Kratkotrajne promjene vrijednosti u signalima</li> <li>• Omjeri sila, faktori krijeste, polinomne aproksimacije signala</li> </ul> | Većinom korištene kod obrade signala sila i momenta   |

| Skupina                                       | Vrsta značajke   | Napomena  |
|---|--|---|
| Značajke iz frekvencijskog područja           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dominantne amplitude/snage spektra</li> <li>• Spektralna gustoća snage cijelog spektra</li> <li>• Spektralna gustoća snage u pojedinim segmentima signala (međusobno susjednih ili dijelom preklapajućih frekvencijskih pojaseva)</li> <li>• Frekvencija najveće amplitude spektra</li> <li>• Ukupna snaga signala u okolini frekvencije najveće amplitude spektra</li> </ul> | Značajke dobivene primjenom Fourierove transformacije               |
| Značajke iz vremensko frekvencijskog područja | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Koeficijenti transformacije</li> </ul>  | Značajke vezane gotovo isključivo uz wavelet transformaciju signala |



## 2.7 Model sustava za indirektni nadzor procesa trošenja i tvrdoće obratka

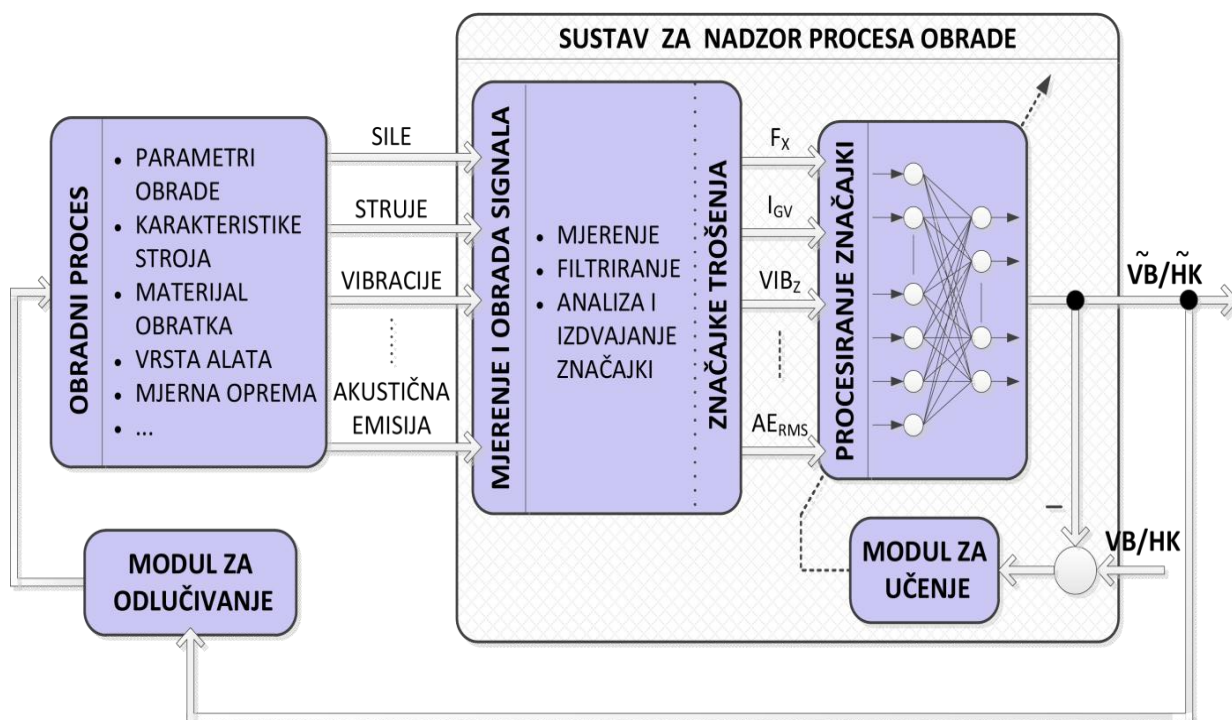
Trošenje reznih alata je kompleksna i stohastička pojava koja značajno otežava mogućnost povećanja razine automatizacije obradnih procesa. Do danas nije postavljen opće primjenjiv model trošenja alata, čak i ako se područje primjene ograniči isključivo na obradu homogenih materijala. Imajući u vidu da se u ovom radu obrađuje kamen, materijal izrazito nehomogene i anizotropne strukture čija tvrdoća može jako varirati u zoni obrade, cijela se problematika dodatno komplicira.

S druge strane, današnja proizvodnja zahtijeva smanjenje troškova uz stalno osiguravanje visoke kvalitete obrade. Shodno navedenom, proces obrade nehomogenih materijala s visokim stupnjem automatizacije moguć je isključivo uz kvalitetni sustav za nadzor alata i tvrdoće obratka (slika 2.22). Njegovom implementacijom u proces obrade uvelike bi se spriječio zastoj prouzrokovan lomom ili prevelikim trošenjem alata, nedovoljna dimenzijska točnost ili pak lom obratka. Osim navedenog, za pretpostaviti je da bi se kvalitetnom procjenom tvrdoće za vrijeme bušenja stvorili uvjeti za dinamičku adaptaciju parametara obrade ovisno o estimiranoj tvrdoći u zoni obrade.

S ciljem sprečavanja navedenih nedostataka, sustav za nadzor stanja procesa obrade mora se sastojati od nekoliko modula koje navodi autor [36]:

- modul indirektnog mjerenja,
- modul za prihvatanje i obradu signala,
- modul paralelnog procesiranja značajki,
- modul za učenje i adaptaciju strukture.

Još su sredinom 80-ih godina prošlog stoljeća postavljeni brojni modeli temeljeni na klasičnim matematičkim algoritmima (Bayesov klasifikator, metoda najbližih susjeda, linearni diskriminatori, stohastički aproksimatori i dr.) Međutim, zbog svoje nelinearnosti i stohastičnosti, proces trošenja vrlo je teško opisati klasičnim matematičkim modelima [31]. Daljnji problemi se javljaju obradom nehomogenih materijala čija mehanička svojstva mogu značajno varirati u zoni obrade.



Slika 2.22 Sustav za nadzor procesa obrade

Temeljem brojnih istraživanja došlo se do spoznaje da tvrdoća takvih materijala ima golemu ulogu u dinamici trošenja alata. Dosadašnji modeli za procjenu tvrdoće obratka zasnivali su se na statističkim modelima, koristeći nekoliko tipova značajki iz signala struja posmičnih motora i sila rezanja koje su se pokazale nedovoljno pouzdanima. Osim navedenog, do sada u literaturi nije pronađen model koji bi klasificirao stupanj istrošenosti reznog alata uzimajući u obzir i tvrdoću kod procesa obrade nehomogenih materijala.

Višesenzorskim pristupom početkom 90-ih godina stvaraju se preduvjeti za razvoj novih modela nadzora procesa obrade temeljenih na algoritmima umjetne inteligencije. Među najčešće korištene algoritme spadaju umjetne neuronske mreže (*Artificial Neural Network, ANN*), čija je prisutnost i danas intenzivna. Jedan od najvećih razloga njihovog odabira svakako je mogućnost modeliranja složenih nelinearnih procesa temeljenih na nedovoljnom broju informacija te mogućnošću procesiranja velike količine podataka [31].

U ovom istraživanju korištena je troslojna statička neuronska mreža s radijalnim baznim funkcijama (*Radial Basis Function Neural Network, RBFNN*) koja uči u jednom koraku.

### 3 Eksperimentalni postav i mjerna oprema

---

Eksperimentalni postav korišten pri izradi ovog rada proveden u Laboratoriju za alatne strojeve, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, prikazan je na slici 3.1. Zbog razine složenosti izvedbe plana pokusa eksperimentalni postav je podijeljen u dva dijela:

- Postav za pripremu uzoraka,
- Ispitni postav za mjerenja procesnih signala, istrošenosti svrdla i tvrdoće kamena.



Slika 3.1 Eksperimentalni postav

#### 3.1 Postav za pripremu uzoraka

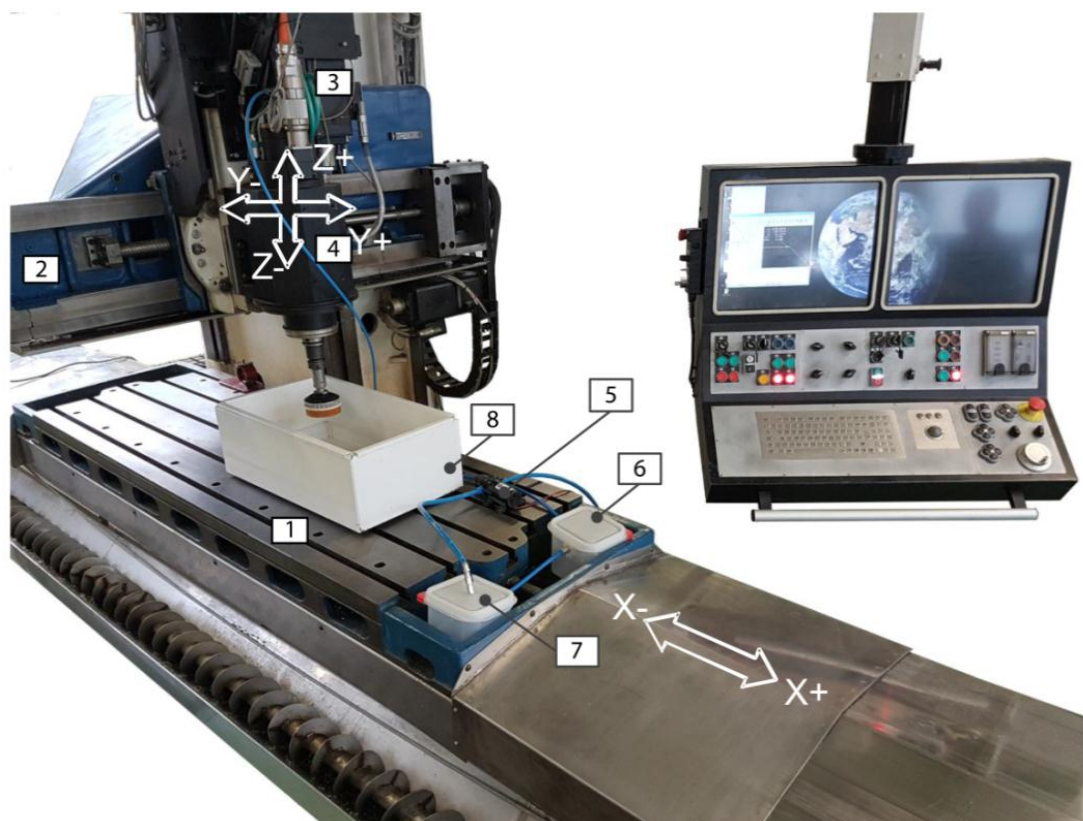
Priprema uzoraka se odvijala na većoj 3-osnoj glodalici čija je specifikacija dana u tablici 3.1, nastaloj 2012. godine iz dugohodne blanjalice zajedničkim naporima Katedre za alatne strojeve i Katedre za strojarsku automatiku u sklopu tehnologijskog projekta „INGPOS inteligentni nadzor glavnog pogona obradnih sustava“.

Posmični prigoni navedenog stroja čine hidrodinamičke vodilice na Z i Y osi, dok je os X izvedena hidrostatskim vodilicama koje karakterizira velika nosivost i preciznost. Glavni prigon je realiziran motorvretenom (tip *MV HSM 105 E*) proizvođača *HSTec Zadar* nazivne snage 33 kW i momenta od 105 Nm. Navedeno motorvreteno opremljeno je sustavom za prihvat držača alata *HSK63*.

Tablica 3.1 Osnovne tehničke karakteristike stroja za pripremu uzoraka

|                                 |       | Iznos | Jedinica          |
|---------------------------------|-------|-------|-------------------|
| Hod osi                         | X     | 2180  | mm                |
|                                 | Y     | 780   |                   |
|                                 | Z     | 200   |                   |
|                                 | W     | 620   |                   |
| Korak navojnog vretena osi      | X,Y,Z | 10    | mm                |
| Maksimalna posmična brzina osi  | X,Y,Z | 5     | m/min             |
| Maksimalni brzi hod osi         | X,Y,Z | 7,5   | m/min             |
|                                 | W     | 0,5   | m/min             |
| Nazivna učestalost vrtnje GV    |       | 3000  | min <sup>-1</sup> |
| Maksimalna učestalost vrtnje GV |       | 12000 | min <sup>-1</sup> |

Iako se radi o stroju veoma široke primjene, za potrebe ovog istraživanja pristupilo se djelomičnoj modifikaciji i nadogradnji postojećeg stroja sa sustavom za stezanje kamenih uzoraka. Naime, tijekom obrade (glodanje i poliranje) potrebno je korištenje sredstva za hlađenje i ispiranje (*SHIP*) jer bi u protivnom moglo doći do oštećenja površine obratka i reznih oštrica alata. Sitni komadi brusa i kamenog uzorka u *SHIP-u* tvore agresivan medij koji može oštetiti dijelove stroja, stoga je konstruiran i izrađen sustav za stezanje i filtriranje *SHIP-a*, prikazan na slici 3.2. Sustav se sastoji od kade za poliranje i dijela za filtriranje *SHIP-a*.



- |                          |  |
|--------------------------|--|
| 1. Posmični prigon X osi | 5. Pumpa za SHIP                             |
| 2. Posmični prigon Y osi | 6. Spremnik za djelomično filtriranje SHIP-a |
| 3. Posmični prigon Z osi | 7. Spremnik za dodatno filtriranje SHIP-a    |
| 4. Glavni motor          | 8. Kada za poliranje                         |

Slika 3.2 Postav za pripremu kamenih uzoraka

Proces filtracije odvijao se u dvjema zasebnim posudama (slika 3.2, pozicije 6 i 7) povezanim pri vrhu posuda. SHIP korišten prilikom obrade iz kade za poliranje otjecao je u prvu posudu, gdje se djelomično taložio i prelijevao u drugu. Nakon druge posude, SHIP se dodatno taložio te se pumpom i cjevovodom transportirao do motorvretena. Uspješnom postupku poliranja svakako je doprinijelo osiguranje konstantne aksijalne sile unutar propisanih vrijednosti, ovisno o vrsti kamena koji se obrađivao. U tu svrhu konstruirana je i izrađena posebna glava za poliranje (slika 3.3) sa standardiziranim prihvatom za brusove (tip *D100 M4*), stegnuta u držač alata *HSK63*.



1. Stezni dio
2. Kućište s oprugom
3. Aksijalno pomični dio
4. Prihvat za brusove D100M4

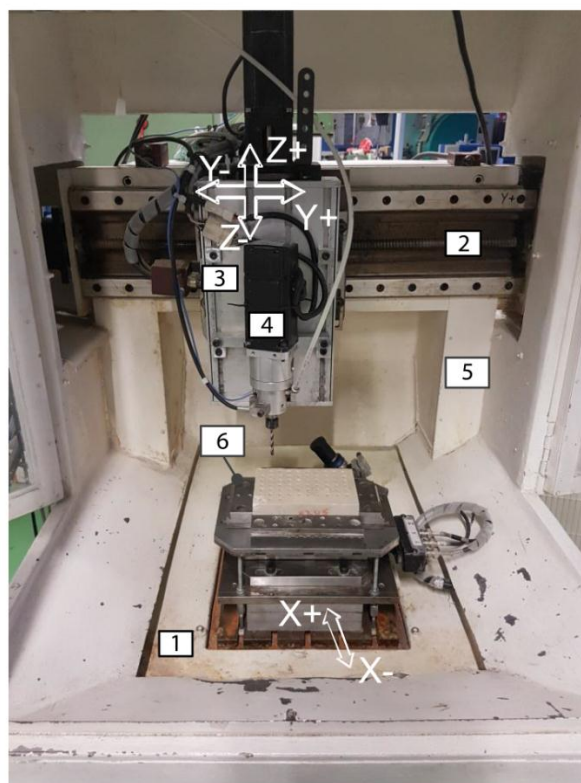
Slika 3.3 Glava za poliranje

## 3.2 Ispitni postav glavnih mjerenja

Nakon pripreme uzoraka, drugi dio eksperimenta obuhvatio je glavna mjerenja koja su podijeljena u dvije razine. Prva razina podrazumijeva snimanje signala osjetljivih na promjene stanja alata i vrste materijala tijekom procesa bušenja, dok se u drugoj razini izvršila verifikacija tvrdoće ispitnih uzoraka.

### 3.2.1 Konstrukcija stroja

Glavna mjerenja provedena su na manjoj troosnoj glodalici prikazanoj na slici 3.4. Osnovu ispitnog stroja čini zavarena portalna konstrukcija na koju su ugrađene kotrljajuće vodilice posmičnih prigona. Pomični radni stol stroja (obradak) giba se po X osi, fiksni portal predstavlja os Y, po kojem se giba glavni motor (svrdlo) sa osi Z.



- |                          |                             |
|--------------------------|-----------------------------|
| 1. Posmični prigon X osi | 4. Glavni motor             |
| 2. Posmični prigon Y osi | 5. Zavarena konstrukcija    |
| 3. Posmični prigon Z osi | 6. Stezna naprava za uzorke |

Slika 3.4 Radni prostor ispitnog stroja

Posmično gibanje realizirano je kugličnim navojnim vretenima (tip *R16-05T3-FSIDIN*) proizvođača *HIWIN* (Tajvan). Pogon posmičnih prigona ostvaren je upotrebom sinkronih servo motora s permanentnim magnetima (tip *APMSB04ADK*) proizvođača *Mecapion Ltd*

(Južna Koreja). Navedeni servo motori opremljeni su inkrementalnim enkoderima koji generiraju diferencijalne *TTL* signale za povratnu vezu brzine i pozicije (*A,B* + Indeks) te emulirane signale Hall-ovih osjetila [36]. Detaljnije informacije o ispitnom stroju navedene su u tablici 3.2.

Tablica 3.2 Osnovne tehničke karakteristike ispitnog stroja

|                                 |       | Iznos   | Jedinica          |
|---------------------------------|-------|---------|-------------------|
| Hod osi                         | X     | 350     | mm                |
|                                 | Y     | 450     |                   |
|                                 | Z     | 55      |                   |
| Korak navojnog vretena osi      | X,Y,Z | 5       | mm                |
| Maksimalna posmična brzina osi  | X,Y,Z | 15      | m/min             |
|                                 | C     | +/- 360 | °                 |
| Nazivna učestalost vrtnje GV    |       | 3000    | min <sup>-1</sup> |
| Maksimalna učestalost vrtnje GV |       | 5000    | min <sup>-1</sup> |

Za potrebe glavnog eksperimenta, u cilju boljeg i točnijeg stezanja i centriranja alata, izrađen je modul glavnog prigona (slika 3.5) s mogućnošću protočnog hlađenja, kao i stezanja različitih vrsta senzora neposredno pokraj prednjeg ležaja. Glavno gibanje navedenog modula također je ostvareno s istim sinkronim servo motorom s permanentnim magnetima kakav je korišten i kod realizacije posmičnih prigona.

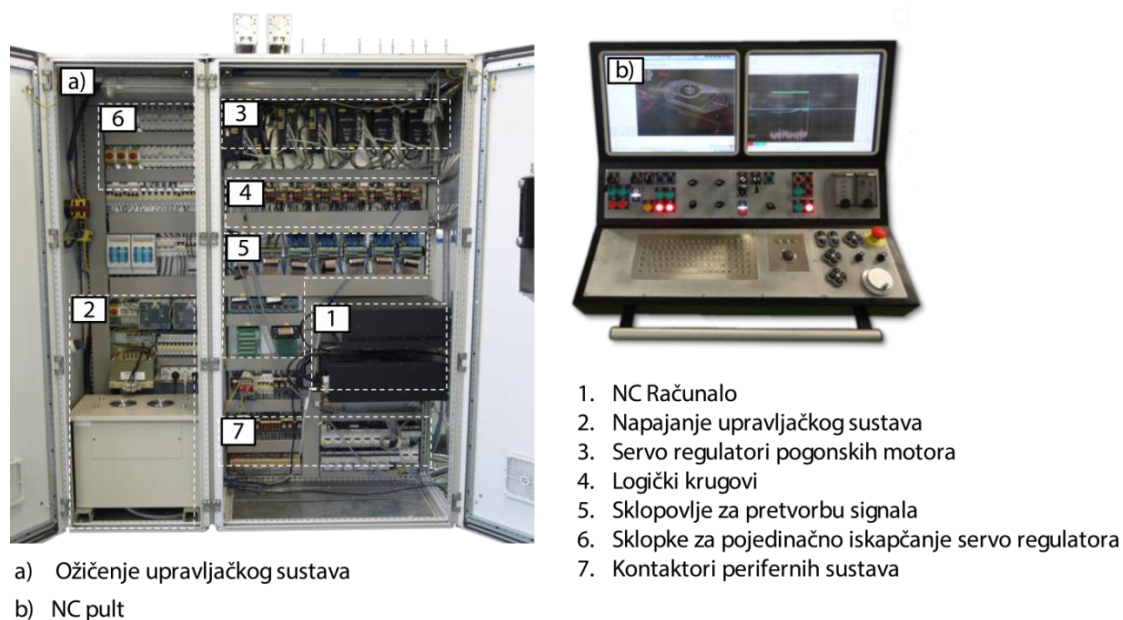


Slika 3.5 Modul glavnog prigona ispitnog stroja



### 3.2.2 CNC Sustav

Temelj upravljačkog dijela čini otvoreni CNC upravljački sustav *EMC2* (Enhanced Machine Controller), integriran na *NC* računalo zajedno s napajanjima, servo regulatorima i ostalim ulazno- izlaznim sklopovljem smještenim u elektro-ormar (slika 3.6 ) [36].



Slika 3.6 Elementi upravljačkog sustava ispitnog postava [36]



Prikazani upravljački sustav podržava jednostavnu modifikaciju i promjene za različite vrste istraživanja i prototipnog testiranja. Navedenim sustavom je moguće simultano upravljanje do šest posmičnih osi i dva glavna vretena. Osim regulatora posmičnih i glavnih motora, upravljački sustav sadrži sklopovlje za prilagodbu upravljačkih i mjernih signala te logičkih sklopova za kontrolu SHIP-a, podmazivanje, izmjenu alata i drugo [36].

*NC* računalo za upravljanje alatnim strojevima ne iziskuje specijalne hardverske module u ovom slučaju, a zbog mogućnosti obrade signala za vrijeme upravljanja alatnim strojem, odabrana je složenija konfiguracija s ciljem osiguranja mogućnosti istovremenog snimanja i obrade signala kao i izvršenja različitih algoritama temeljenih na računalnoj inteligenciji. Detaljnije informacije o konfiguraciji *NC* računala kao i o upravljačkim karticama moguće je pronaći u [36].

Snimanje signala procesa obrade realizirano je akvizicijskim karticama (prikazano u tablici 3.3) smještenima u upravljačkom računalu i upotrebom eksterne mjerne stanice o

kojoj će biti više riječi u poglavlju 3.3. Uz potrebne tehničke karakteristike, odabir navedenih kartica uvjetovan je dostupnošću odgovarajućih pokretačkih programa (*driver-a*) za operacijske sustave u stvarnom vremenu, zasnovane na Linux jezgri [36].

Tablica 3.3 Popis mjernih kartica

| Pozicija  | Karakteristike i namjena  |   |
|---|---|---|
| 1   | Naziv kartice i proizvođač: NI PCI-6023E, <i>National Instruments Co.</i> (SAD) [64]    |   |
|   |        | Karakteristike: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 16 analognih ulaza (<math>\pm 0,05</math> do <math>\pm 10</math> V, 16-bitna rezolucija, frekvencija uzorkovanja do 200 kHz)</li> <li>• 2 analona izlaza (<math>\pm 10</math> V)</li> <li>• 8 digitalnih I/O (TTL)</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Akvizicija signala srednjih frekvencija (do 100 kHz)</li> <li>• Analogni I/O opće namjene</li> </ul> |   |   |
| 2   | Naziv kartice i proizvođač: PCI-DAS4020/12, <i>Measurement Computing Co.</i> (SAD) [65] |   |
|   |      | Karakteristike: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 4 analogna ulaza (<math>\pm 1</math> V ili <math>\pm 5</math> V, 12-bitna rezolucija, frekvencija uzorkovanja do 20 MHz)</li> <li>• Brzi digitalni ulaz za okidanje (TTL)</li> <li>• 2 analogna izlaza (<math>\pm 10</math> V, <math>\pm 5</math> V, 0-5 V, 0-10 V, (12-bitna rezolucija) dostupna na unutarnjem dijelu kartice</li> <li>• 24 Digitalna I/O (TTL) dostupna na unutarnjem dijelu kartice</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Akvizicija signala visokih frekvencije (do 10 MHz)</li> </ul>  |   |   |

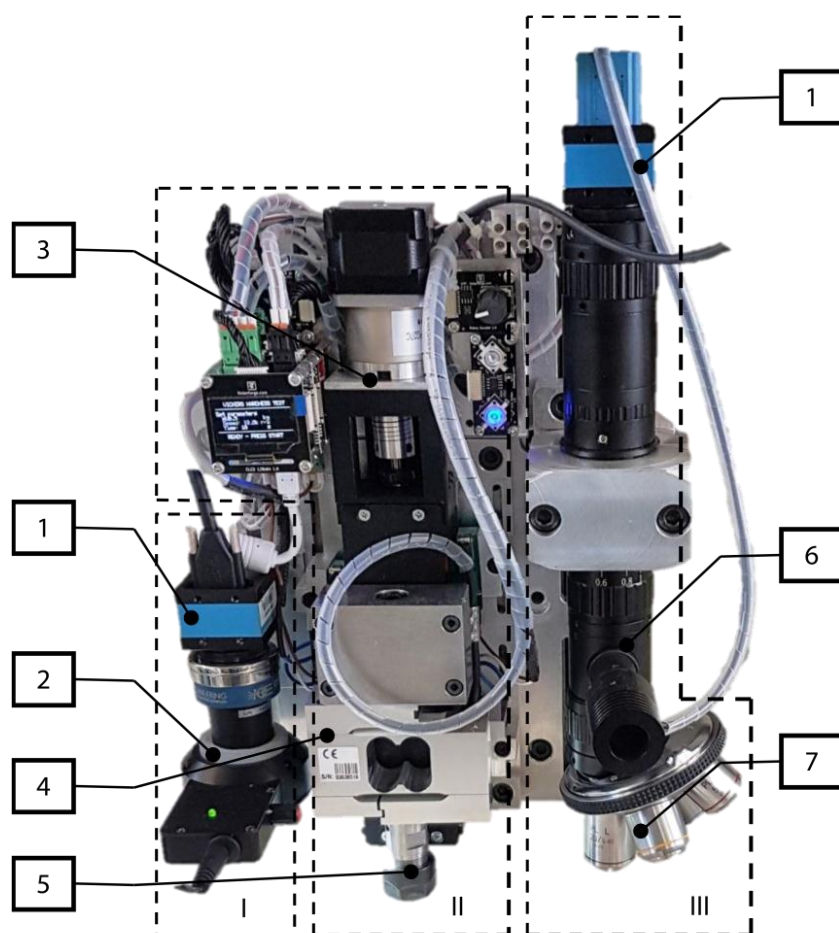
### 3.2.3 Konstrukcija modula za mjerenje tvrdoće

Snimljene i obrađene signale na kojima se temelji model klasifikacije materijala potrebno je verificirati i dokazati uz pomoć postupka direktnog mjerenja tvrdoće kamenih uzoraka koji je detaljnije objašnjen u poglavlju 2.4. Postojeći uređaji za mjerenje tvrdoće najčešće su ograničeni radnim prostorom zbog čega nije moguće izvršiti ispitivanje na cijeloj površini ispitnog uzorka. Osim navedenog, takvi uređaji nisu opremljeni kamerom za teksturu koja ima važnu ulogu u izboru odgovarajuće pozicije za identaciju. Nadalje, ukoliko je potrebno povezati prijašnja mjerenja indirektnim metodama nadzora procesa s tvrdoćom određenog dijela uzorka, svakako je značajno korištenje identičnog koordinatnog sustava za obradu i mjerenje tvrdoće. Na temelju niza ograničenja, klasični mjerni uređaji za mjerenje tvrdoće jednostavno nisu upotrebljivi te se u ovom radu pristupilo konstrukciji i izradi posebnog modula koji je, nakon obavljenog postupka bušenja, ugrađen umjesto glavnog prigona. Modul za mjerenje tvrdoće zadovoljava nekoliko važnih funkcija:

- Jednostavna integracija upravljačkog sustava modula s upravljačkim *CNC* sustavom ispitnog postava,
- Regulacijski krug postupka indentacije zatvoren je preko senzora sila i neovisan je o alatnom stroju na kojem je ugrađen,
- Precizna regulacija sile indentacije od 0,1 N do 20 N,
- Mogućnost prihvata različitih vrsta indentora,
- Pokretanje ciklusa mjerenja kao i vrijeme držanja ispitnog opterećenja moguće je regulirati ručno ili automatski u sklopu željenog programa,

Modul za mjerenje tvrdoće (slika 3.7) sastoji se od tri dijela:

- I. Vizijski sustav za snimanje teksture,
- II. Sklop za indentaciju,
- III. Vizijski sustav za mjerenje dimenzija otiska.



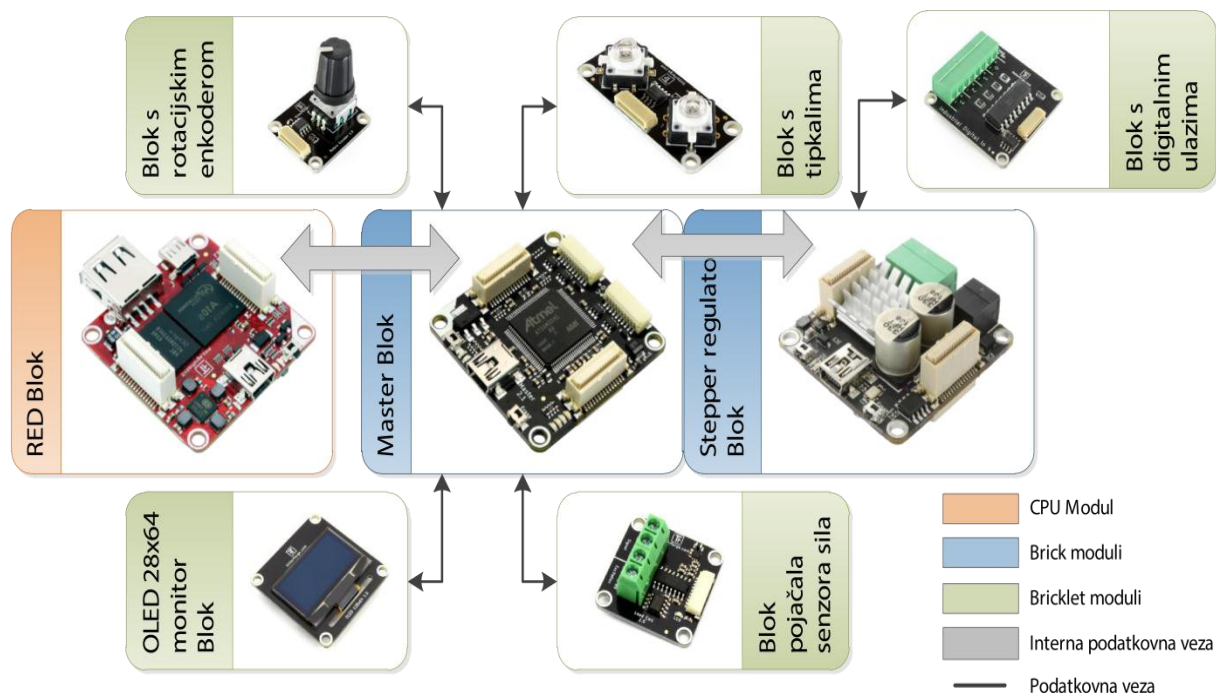
1. Industrijska kamera DFK24UP031
2. Telecentrični objektiv TC2309 s prstenom za rasvjetu R65 LED
3. Posmična os uređaja za mjerenje tvrdoće KK5002P-150-A1-FOC
4. Senzor sila HBM-S2M
5. Stezna glava za indentor
6. Objektiv FB0650D s koaksijalnim osvjetljenjem FJ41R33
7. Revolver glava s mikroskopskim objektivima

Slika 3.7 Uređaj za mjerenje tvrdoće

**Vizijski sustav za snimanje teksture** (slika 3.7, pozicija I) izrađen je na osnovi industrijske kamere (tip *DFK24UP031*) proizvođača *The Imaging Source* (Njemačka), telecentričnog objektivu (tip *TC2309*) proizvođača *Opto Engineering S.r.l.* (Italija) i prstena za rasvjetu *FJ41R33* proizvođača *Guilin ft-Opto co.ltd.* (Kina). Uz pomoć navedenog sklopa izuzimane su slike pomoću kojih je utvrđena pozicija i mjesto indentacije.

**Sklop za indentaciju** (slika 3.7, pozicija II) temelji se na posmičnom prigonu (tip *KK5002P-150-A1-FOC*) proizvođača *HIWIN* (Tajvan), senzoru sila (tip *HBM-S2M*) proizvođača *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH* (Njemačka), steznoj glavi sa ekspanzijskim čahurama *ER11* te Knoop-ovom indentoru (tip *IN/8205*) proizvođača *INNOVATEST* (Nizozemska).

Upravljački sustav navedenog sklopa (slika 3.8) složen je od modularnih upravljačkih komponenti otvorene arhitekture proizvođača TINKERFORGE GmbH (Njemačka), dok je softverska podrška pisana u Python programskom jeziku.

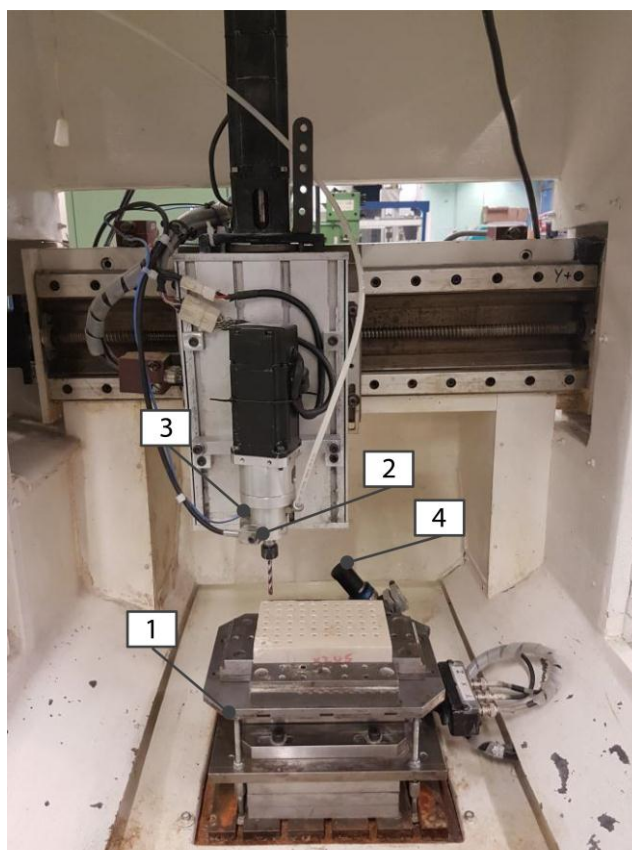


Slika 3.8 Struktura upravljačkog sustava modula za mjerenje tvrdoće

**Vizijski sustav za mjerenje dimenzija otiska** (slika 3.7, pozicija III) sastoji se od industrijske kamere (tip *DFK24UP031*) proizvođača *The Imaging Source* (Njemačka), objektiva s koaksijalnim osvjetljenjem (tip *FB0650D*), revolver glave s 4 gnijezda te mikroskopskih objektiva uvećanja 5X, 10X, 20X i 40X (tipovi *FW235U*, *FW2310U*, *FW2320U* te *FW2340U*) proizvođača *Guilin ft-Opto co.ltd.* (Kina).

### 3.3 Mjerni sustavi ispitnog stroja

Ispitni stroj opremljen je nizom senzora koji se koriste direktnim i indirektnim metodama nadzora procesa obrade. Na radnom stolu stroja ugrađen je senzor za mjerenje sila (slika 3.9, pozicija 1) dok je na modulu glavnog prigona smješten senzor akustične emisije (slika 3.9, pozicija 2) i senzor vibracija (slika 3.9, pozicija 3). Signali struja pogonskih motora prikupljeni su pomoću komunikacijskog modula s CAN sučeljem (tip IPEH-002021) proizvođača *PEAK-System Technik GmbH*.



1. Senzor sila (tro- komponentni)
2. Senzor akustične emisije
3. Senzor vibracija (tro- komponentni)
4. Industrijska kamera s telecentričnim objektivom i rasvjetom

Slika 3.9 Raspored senzora na ispitnom stroju

Korištenje više industrijskih kamera kao i mogućnost boljeg nadzora i kontrole eksperimenta uz postojeće *NC* računalo upravljačkog sustava korišteno je još jedno, vanjsko mjerno računalo s prijenosnom modularnom mjernom stanicom. Navedeno računalo istovremeno je korišteno za izvršavanje mjerne aplikacije te kao poslužitelj za udaljeno

prikazivanje grafičkog dijela *LinuxCNC* sustava [36]. Takvim rješenjem izbjegla se mogućnost eventualne pogreške prilikom unosa pojedinih parametara koji bitno utječu na provođenje i kvalitetu eksperimenta. Mjerno računalo također je poslužilo za snimanje slikovnih podataka vezano za trošenje rezne oštrice preko vizijskog sustava za mjerenje istrošenosti (slika 3.9, pozicija 4) kao i vizijskog sustava za snimanje teksture te slike otiska indentacije (slika 3.7, I. i III. pozicija)

U sklopu prijenosne modularne mjerne stanice (tip *NI cDAQ-9178*) proizvođača *National Instruments Co.* (SAD) korištena su dva modula (slika 3.10).



Slika 3.10 Mjerna stanica NI cDAQ-9178

Modul za analogne ulaze (tip *NI 9201*) poslužio je za akviziciju signala sila rezanja u smjeru *X*, *Y* i *Z* osi dok je modul za digitalni ulaz (tip *NI 9422*) korišten za akviziciju početka snimanja signala. Pregled cjelokupnih senzora kao i osnovnih podataka o snimanju i prikupljanju signala dan je u tablici 3.4.

Tablica 3.4 Popis mjernih sustava korištenih u eksperimentu

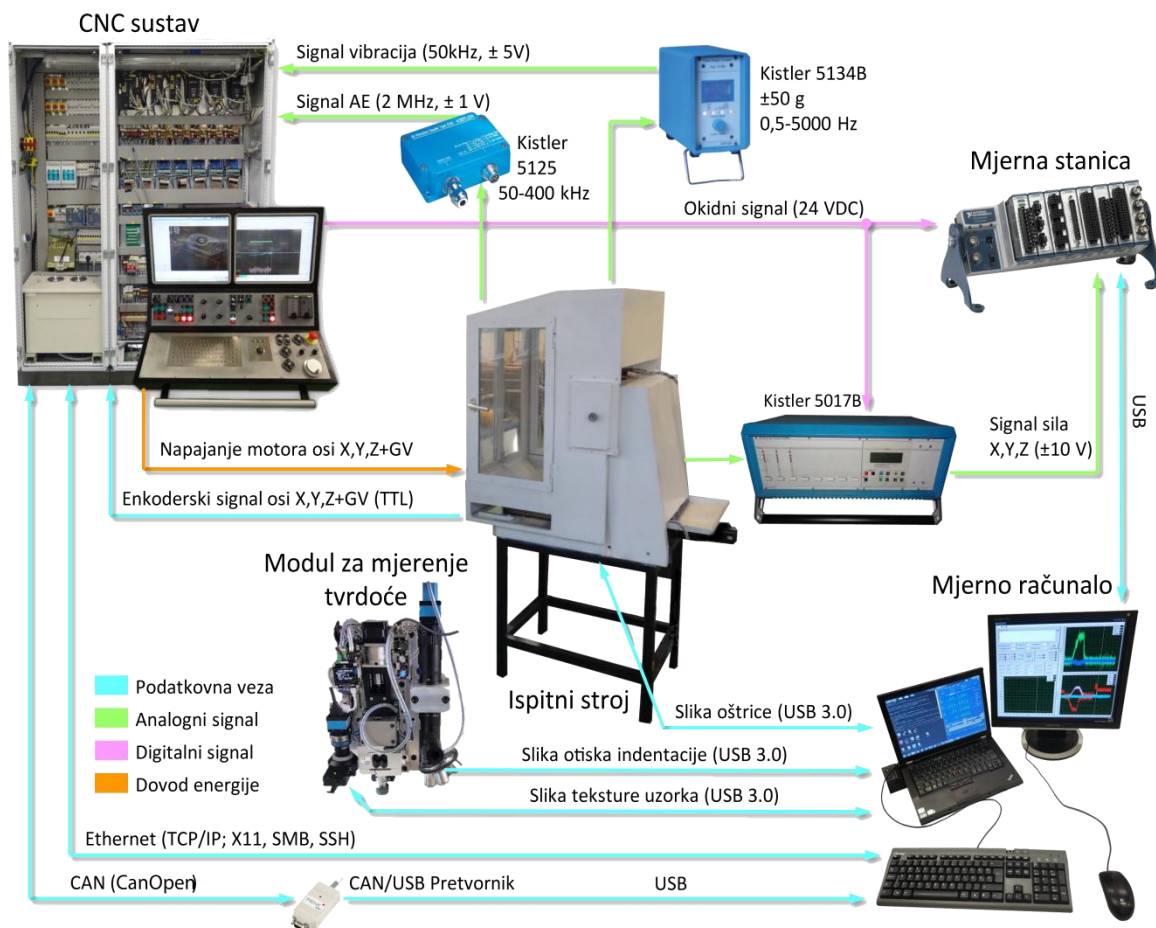
| Mjerena veličina                   | Vrijeme snimanja                    | Frekvencija uzorkovanja | Mjerni sustav            | Prikupljanje signala |                         |
|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|
|                                    |                                     |                         |                          | NC računalo          | Vanjsko mjerno računalo |
| Jakost struje pogonskih motora     | Kontinuirano tijekom bušenja        | 2 kHz                   | Servo-regulatori         |                      | ✓                       |
| Sile rezanja u smjeru X, Y i Z osi |                                     | 2 kHz                   | Senzor sila              |                      | ✓                       |
| Vibracije u smjeru X, Y i Z osi    | Kratkotrajno (2 s)                  | 5 kHz                   | Senzor vibracija         | ✓                    |                         |
| Akustična emisija                  | Kratkotrajno (0,1 s)                | 2 MHz                   | Senzor akustične emisije | ✓                    |                         |
| Parametri trošenja                 | Periodički prema planu eksperimenta | /                       | Industrijska kamera      |                      | ✓                       |
| Parametri tvrdoće                  | Nakon procesa bušenja               | /                       | Industrijska kamera      |                      | ✓                       |

Signali sila rezanja i struja pogonskih motora snimani su kontinuirano tijekom postupka bušenja. Snimljeni signali navedenih senzora sadrže cjelovitu informaciju o stanju procesa prije, za vrijeme i nakon zahvata alata i ispitnog uzorka. Početak snimanja zadan je naredbom iz NC programa preko okidačkog signala.

Signali akustične emisije i vibracija snimani su kratkotrajno u određenim vremenskim intervalima. Razlog tomu leži u velikoj količini prikupljenih podataka tijekom jednog ciklusa bušenja te nemogućnosti adekvatne pohrane signala zbog hardverskog ograničenja akvizicijskih kartica. Dakle, predmetni signali snimani su s vremenskom odgodom u cilju osiguranja punog zahvata svrdla i ispitnog uzorka.

Shematski prikaz kompletne strukture mjernog sustava prikazan je slikom 3.11.





Slika 3.11 Struktura mjernog sustava

### 3.3.1 Senzor sile

Mjerenje sile rezanja izvedeno je primjenom mjernog sustava (slika 3.12) koji se sastoji od tro-komponentnog senzora sile (tip 9257B) [66] i nabojnog pojačala (tip 5017B) [67] proizvođača *Kistler Holding AG* (Švicarska). Senzor sile ugrađen je na radni stol ispitnog stroja na koji se nastavlja stezna naprava ispitnih uzoraka. Signali sile rezanja prikupljeni su pomoću vanjskog mjernog računala i mobilne mjerne stanice.



Slika 3.12 Senzor sile s nabojnim pojačalom

Tehničke karakteristike tro-komponentnog senzora sila i nabojnog pojačala dane su u tablici 3.5.

Tablica 3.5 Tehničke karakteristike senzora sila i odgovarajućeg pojačala

|                                       |   | Područje   | Jedinica            |
|---------------------------------------|---|------------|---------------------|
| Senzor sila<br>(tip<br>9257B)         | Mjerno područje                                 | $F_x, F_y$ | -5 ... 5            |
|                                       |   | $F_z$      | -5 ... 10           |
|                                       | Maksimalne dozvoljene sile                      | $F_x, F_y$ | -7,5/7,5            |
|                                       |   | $F_z$      | -7,5/15             |
|                                       | Osjetljivost                                    | $F_x, F_y$ | -7,5                |
|                                       |   | $F_z$      | -3,7                |
| Nabojno<br>pojačalo<br>(tip<br>5017B) | Broj kanala                                     |            | 3 (do 8)            |
|                                       | Mjerno područje (podesivo po kanalu)            |            | $\pm 10 \dots 10^6$ |
|                                       | Frekvencijsko područje                          |            | 0 ... 200           |
|                                       | Osjetljivost (podesiva po kanalu)               |            | 0,01 ... 9990       |
|                                       | Skaliranje mjerne veličine (podesivo po kanalu) |            | $0,001 \dots 10^7$  |
|                                       | Izlazni signal (po kanalu)                      |            | $\pm 10$            |

### 3.3.2 Senzor vibracija

Signali vibracija prikupljeni su mjernim sustavom sastavljenim (slika 3.13) od tro-komponentnog piezo-električnog akcelerometra (tip 8688A50) [68] i nabojnog pojačala (tip 5134B) [69] proizvođača *Kistler Holding AG*. Senzor vibracija ugrađen je neposredno u blizini prednjeg ležaja prigona glavnog vretena na ležištu za senzore (slika 3.9, pozicija 3). Signali vibracija snimani su akvizicijskom karticom *PCI-DAS4020/12* (tablica 3.3, pozicija 2) ugrađenoj u *NC* računalo u sklopu upravljačkog sustava eksperimentalnog postava.



Slika 3.13 Senzor vibracija s nabojnim pojačalom

Tehničke karakteristike tro-komponentnog senzora vibracija i nabojnog pojačala dane su u tablici 3.6.

Tablica 3.6 Tehničke karakteristike senzora vibracija i odgovarajućeg pojačala

|                                |  | Područje         | Jedinica |
|--------------------------------|--|------------------|----------|
| Senzor vibracija (tip 8688A50) | Mjerno područje akceleracije               | $\pm 50$         | g        |
|                                | Maksimalna dozvoljena akceleracija         | $\pm 80$         |          |
|                                | Osjetljivost ( $\pm 10\%$ )                | 100              | mV/g     |
|                                | Frekvencijsko područje                     | 0,5 ... 5000     | Hz       |
| Nabojno pojačalo (tip 5134B)   | Broj kanala                                | 4                |          |
|                                | Vremenska konstanta ulaznog kruga          | 10/1/0,1/0       | s        |
|                                | Programibilni faktor pojačanja             | 0,5 ... 150      |          |
|                                | Programibilni nisko propusni filter (-3dB) | 0,001 ... $10^7$ | Hz       |
|                                | Izlazni signal (po kanalu)                 | $\pm 10, \pm 5$  | V        |

### 3.3.3 Senzor akustične emisije

Mjerenje akustične emisije izvedeno je primjenom piezo-električnog senzora (tip 8152B1/12sp) i odgovarajućeg sklopa za prihvata signala (tip 5125B) proizvođača Kistler Holding AG [70] prikazanog na slici 3.14. Senzor je ugrađen neposredno uz prednji ležaj prigona glavnog vretena, isto kao i senzor vibracija. Sklop za prihvata signala akustične emisije ima funkciju snimanja i istovremenog filtriranja primjenom pojasnopropusnog filtra u rasponu od 50 do 400 kHz koji je definiran od strane proizvođača senzora.

Signali akustične emisije također su snimani akvizicijskom karticom PCI-DAS4020/12 (tablica 3.3, pozicija 2) ugrađenom u NC računalo.



Slika 3.14 Senzor akustične emisije s odgovarajućim sklopom za prihvata signala

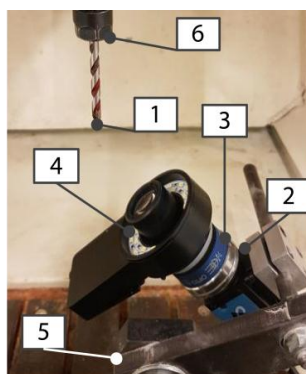
Tehničke karakteristike senzora akustične emisije i sklopa za prihvata signala dane su u tablici 3.7.

Tablica 3.7 Tehničke karakteristike sustava za mjerenje akustične emisije

|   |  | Područje      | Jedinica  |
|---|--|---------------|---|
| Senzor AE<br>(tip 8152B1/12sp)                        | Frekvencijsko područje ( $\pm 10\text{dB}$ ) | 50 ... 400    | kHz   |
|   | Osjetljivost                                 | 57            | $\text{dB}_{\text{ref}} 1\text{V}/(\text{m/s})$ |
| Sprežnik<br>u zadanoj<br>konfiguraciji<br>(tip 5125B) | Visoko propusni filter                       | 50            | kHz   |
|   | Nisko propusni filter                        | 500           | kHz   |
|   | Integracijska vremenska konstanta            | 1,2           | ms  |
|   | Izlazni signal                               | 0 ... $\pm 5$ | V   |

### 3.3.4 Vizijski sustav ispitnog stroja

Vizijski sustav mjernog stroja (slika 3.15) realiziran je primjenom industrijske kamere (tip DMK23UX174) proizvođača Imaging Source Europe GmbH (Njemačka), telecentričnim objektivom (tip TC2309) proizvođača Opto Engineering S.r.l. (Italija) i pripadajućim prstenom za rasvjetu (tip FJ41R33) proizvođača Guilin ft-Opto co.ltd. (Kina).



1. Ispitno svrdlo
2. Industrijska kamera DMK23UX174
3. Telecentrični objektiv TC2309
4. Prsten za rasvjetu FJ41R33
5. Podesivi stalak kamere ispitnog stroja
6. Glavni prigon

Slika 3.15 Vizijski sustav ispitnog stroja

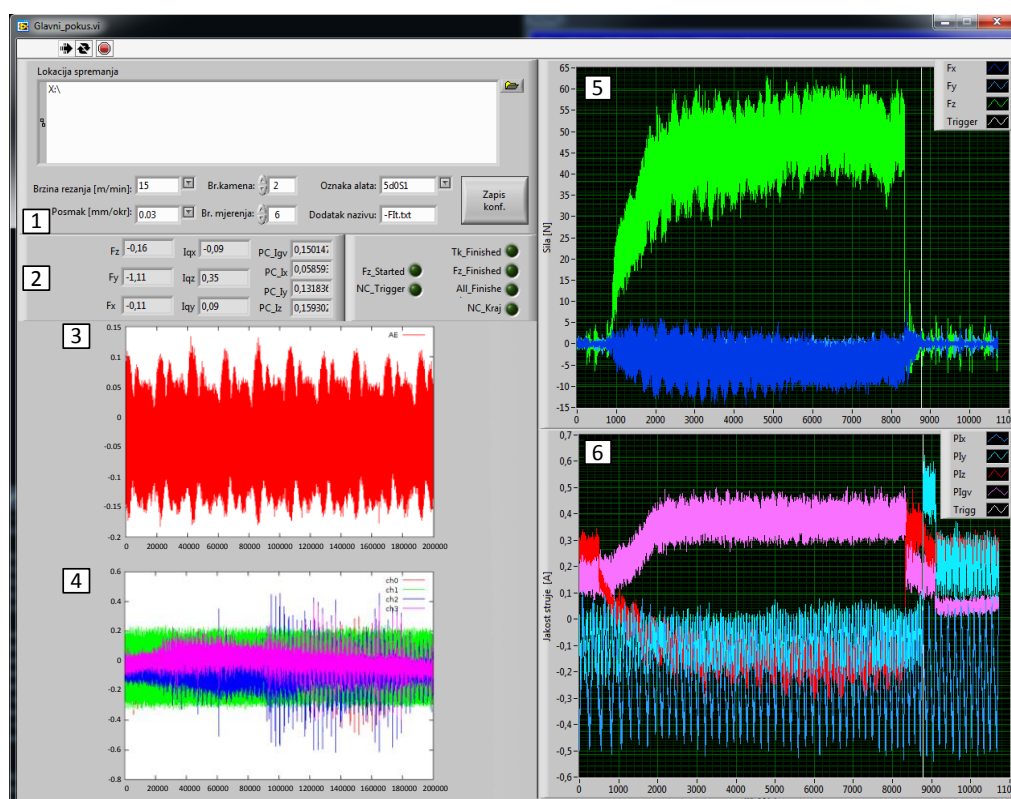
Sustav je ugrađen na radni stol ispitnog stroja pomoću staka kojim je moguće podešavanje kuta i udaljenosti kamere. Upotreba telecentričnog objektiva za mjerenje istrošenosti reznih oštrica svrdla osigurava minimalnu radijalnu distorziju u cijelom području interesa [71]. Kamera se spaja na mjerno računalo putem USB 3.0 veze [72]. Detaljnije tehničke karakteristike kamere i objektiva nalaze se u tablici 3.8.

Tablica 3.8 Tehničke karakteristike vizijskog sustava

|   |                                      | Područje     | Jedinica |   |
|---|--------------------------------------|--------------|----------|---|
| Kamera<br>(DMK23UX174)                              | Rezolucija                           | 1920x1200    | piksela  |   |
|   | Osjetljivost                         | 0,05         | lx       |   |
|   | Frekv. osvježavanja slike            | 25 ... 50    | Hz       |   |
|   | Format osjetilnog senzora            | 1/2          | in       |   |
|   | Izvedba osjetilnog senzora           | CMOS Pregius |          |   |
|   | Prihvata objektiva                   | C/CS         |          |   |
| Objektiv<br>(TC2309)                                | Vidno polje (za format senzora 1/2") | 6,4x4,8      | mm       |   |
|   | Radna udaljenost                     | 63,3±2       | mm       |   |
|   | Dubinska oštrina                     | 0,9          | mm       |   |
|   | Distorzija                           | tipična      | <0,04    | % |
|   |                                      | maksimalna   | 0,08     |   |
|   | Telecentričnost                      | tipična      | <0,08    | ° |
| maksimalna  |                                      | 0,10         |          |   |
| Rezolucija mjernog sustava u opisanoj konfiguraciji |                                      | 5            | µm       |   |

### 3.4 Korisničko sučelje mjernog sustava

Nadzor cjelokupnog eksperimentalnog dijela obavljen je uz pomoć mjernog računala. Upravljanje ispitnog stroja vršeno je primjenom X11 sustava preko X poslužitelja koji omogućava spajanje na mjerno računalo s neke udaljene lokacije. Za potrebe glavnih mjerenja, u svrhu nadzora cijelog mjernog sustava, djelomično je nadograđena postojeća mjerna aplikacija u sklopu LabView okruženja. Navedenom aplikacijom (slika 3.16) moguće je zadavanje parametara obrade, snimanje signala procesa obrade, verifikacija rezultata te generiranje mjernih datoteka.



1. Parametri eksperimenta
2. Trenutne vrijednosti signala
3. Signal akustične emisije
4. Signali vibracija
5. Signali sila rezanja
6. Signali jakosti struja pogonskih motora

Slika 3.16 Korisničko sučelje mjerne aplikacije

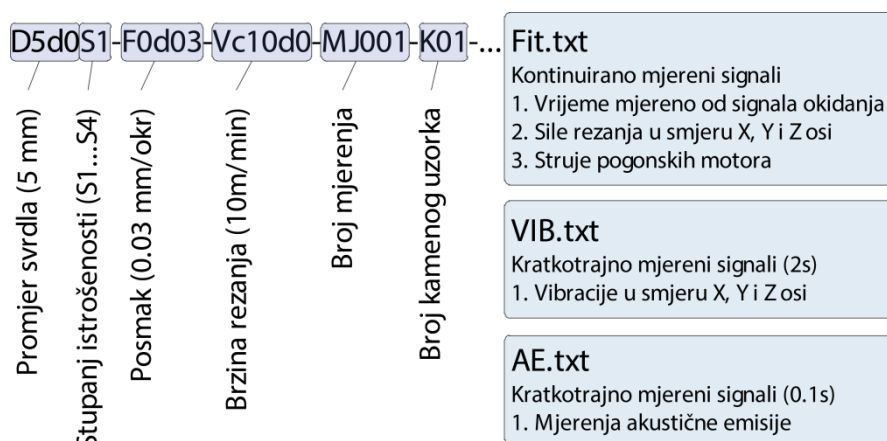
Korisničkim sučeljem navedene mjerne aplikacije ručnim unosom zadaju se parametri stanja pokusa kao što su:

- Parametri obrade:
  - o Posmak (mm/okretaju svrdla),

- Brzina rezanja (m/min).
- Broj ispitnog kamenog uzorka.
- Broj ponavljanja ciklusa bušenja.
- Promjer svrdla i stupanj istrošenosti.

Temeljem unesenih parametara eksperimenta generira se NC program kojim se vrši ciklus bušenja. Dubina bušenja (15 mm) je određena nizom probnih bušenja u različitim vrstama kamenih uzoraka, dok je debljina stjenke (2 mm) dva susjedna provrta uvjetovana naknadnom mogućnošću mjerenja tvrdoće.

Nakon završetka jednog ciklusa mjerenja nastaju tri datoteke s točno određenim nazivljem koje odgovara parametrima stanja pokusa i vrsti mjerenih signala. Prva mjerna datoteka sadrži podatke o kontinuirano mjerenim signalima jakosti struja pogonskih motora i sila rezanja snimanih s vanjskom modularnom mjernom stanicom. Druga i treća datoteka se odnose na signale vibracija i akustične emisije koje su snimane kratkotrajno pomoću akvizicijske kartice smještene u NC računalu. Detaljniji opis nazivlja mjernih datoteka prikazan je na slici 3.17.



Slika 3.17 Primjer mjernih datoteka nastalih jednim mjernim ciklusom

## 4 Mjerenje, analiza signala i izdvajanje značajki

---

Navedeno poglavlje obuhvaća detaljnu razradu plana pokusa, snimanje i filtriranje signala te izdvajanje niza potencijalnih značajki na kojima se temelji model za procjenu stupnja istrošenosti i tvrdoće kamena.

### 4.1 Planiranje pokusa

Planiranje glavnog eksperimenta izvedeno je u nekoliko koraka. Nakon obavljenih preliminarnih mjerenja tvrdoće na postojećem uređaju odabrane su vrste i dimenzije kamenih uzoraka, dok je u idućoj fazi, izvođenjem niza probnih bušenja, odabrano odgovarajuće svrdlo. Na osnovi preporuke proizvođača kao i temeljem predpokusa, utvrđeni su parametri obrade (brzina rezanja i posmak) i dinamika trošenja ispitnog svrdla.

Mjerenje tvrdoće prilikom izvođenja glavnog eksperimenta provedeno je odgovarajućim modulom za mjerenje tvrdoće opisanim u poglavlju 3.2.3. Broj mjerenja i parametri indentacije (ispitna sila i vrijeme držanja) utvrđeni su nizom probnih mjerenja izvedenih na odabranim vrstama kamena. Na osnovu dobivenih rezultata kao i propisane norme utvrđen je plan mjerenja tvrdoća svakog pojedinog ispitnog uzorka.

#### 4.1.1 Ispitni uzorci i svrdla

Prilikom odabira vrsti kamenih uzorka nastojala se pokriti što veća međusobna razlika u mehaničkim svojstvima pa su u tu svrhu odabrane tri vrste kamena:

- Sivec Konavoski, oznaka  $K_1$ ,
- Mironja, oznaka  $K_2$ ,
- Sivec, oznaka  $K_3$ .

Kamen  $K_1$ , karakteriziran je svijetlo-sivom bojom, komercijalnog naziva *Sivec Konavoski* kojeg čini 80,94 % dolomita i 18,6 % kalcita svrstanog u dolomite. Tekstura kamena je homogena, osim u dijelovima gdje su milimetarske kalcitne vene pravocrtnog pružanja od otprilike 100 mm [73].

Kamen  $K_2$  komercijalnog naziva *Mironja* čini mikrit 60 %, sparitni kalcit 35 % te fosilni ostaci 5 %. Navedena vrsta kamena spada u slojeviti vapnenac, Intramikrit. Zrnate je



teksture, bijelo smeđe boje s rijetkim svijetlobijelim točkicama i rijetkim bijelim kalcitnim venama. Također ga karakterizira prisutnost tankih žućkasto-crvenih stilolita [74].

Posljednja vrsta kamena  $K_3$ , komercijalnog naziva *Sivec* građena je 97,8 % od dolomita te 2,2 % od kalcita te spada u dolomitni mramor. Kompaktne je i zrnate teksture s veličinom zrna od 90  $\mu\text{m}$  do 850  $\mu\text{m}$  (prosječno oko 400  $\mu\text{m}$ ), dok se mjestimično može pojaviti zrno veličine do 1,2 mm [75]. Detaljnije informacije o mehaničkim svojstvima pojedinih uzoraka vrsta kamena mogu se pronaći u tablici 4.1.

Tablica 4.1 Mehanička svojstva vrsta ispitnih uzoraka

| Vrsta kamena              | $K_1$                                | $K_2$                              | $K_3$                                 |
|---------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Komercijalni naziv kamena | Sivac Konavoski                      | Mironja                            | Sivec                                 |
| Tlačna čvrstoća           | $P_{\text{pros.}}=136,8 \text{ MPa}$ | $P_{\text{pros.}}=169 \text{ MPa}$ | $P_{\text{pros.}}=162,10 \text{ MPa}$ |
| Upijanje vode             | $\vartheta = 2,08 \%$                | $\vartheta = 0,07 \%$              | $\vartheta = 0,1067 \%$               |
| Prostorna masa            | $\rho=2570 \text{ kg/m}^3$           | $\rho=2690 \text{ kg/m}^3$         | $\rho=2850 \text{ kg/m}^3$            |
| Poroznost                 | $P=5,2 \%$                           | $P=0,2 \%$                         | $P=0,877 \%$                          |
| Tvrdoća*                  | 1815 MPa                             | 1620 MPa                           | 2605 MPa                              |

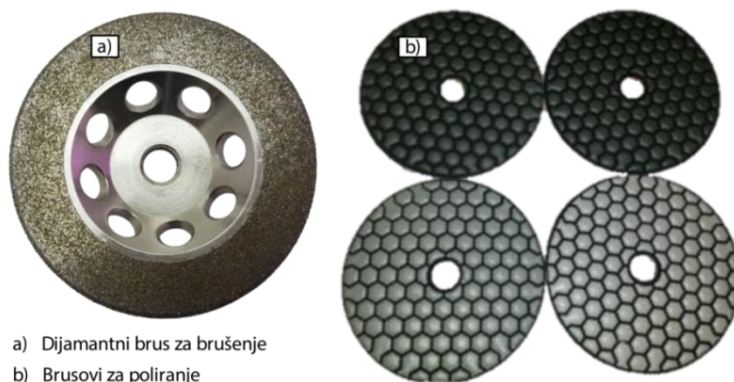
\* Vrijednosti tvrdoće dobivene su preliminarnim mjerenjima Knoop-ovom metodom u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Ispitni uzorci formirani su iz većih kamenih komada na portalnom stroju za rezanje kamena, uz pozornost posvećenu smjeru izuzimanja i orijentaciji uzoraka. Zbog velike hrapavosti površine nakon rezanja, pristupilo se završnoj obradi na dimenzije obratka od 200x90x30 mm (slika 4.1) obavljenoj na stroju za pripremu uzoraka (poglavlje 3.1) s dijamantnim brusom (slika 4.2, dio a).



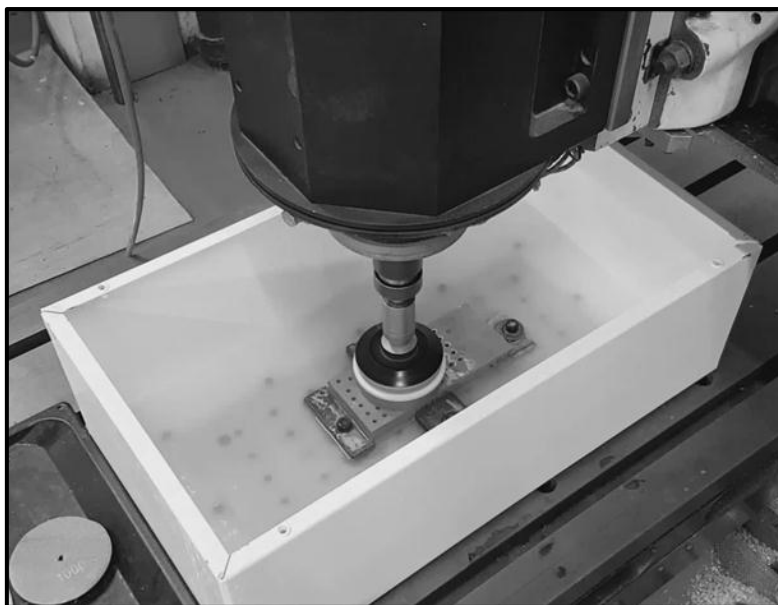
Slika 4.1 Izgled rezanog kamenog uzorka

Osim navedenog, predmetni brus je nužan za postizanje ravnosti površine koja je preduvjet za poliranje uzorka do visokog sjaja s ciljem naknadnog mjerenja tvrdoće.



Slika 4.2 Alati za pripremu uzoraka

Poliranje kamenih uzoraka (slika 4.3) također je obavljeno na stroju za pripremu uzoraka s glavom izrađenom za tu namjenu koja je detaljnije objašnjena u poglavlju 3.1. Prilikom izvođenja postupka poliranja korišteni su brusovi (slika 4.2, dio b) koji se razlikuju po granulaciji, od 50 do 3000, pri čemu je 50 grubi brus dok je 3000 završni fini brus. Poliranje je popraćeno upotrebom SHIP-a čija je funkcija bila hlađenje i ispiranje uzorka.



Slika 4.3 Postupak poliranja uzoraka

Postupak bušenja je realiziran upotrebom svrdla promjera 5 mm (tip M005) proizvođača OMGF (Officina Martello di GIORGI F.LLI s.r.l., Italija). Rezni dio ispitnog svrdla se sastoji od tvrdo-lemljene pločice od tvrdog metala (slika 4.4) koja sadrži zrna od volfram karbida (WC) i 9 % kobaltno vezivo. Zbog oštro brušenog vrha, kao i prethodno obrađene

površine obratka, kod postupka bušenja nije potrebna prethodna operacija zabušivanja. Postupak bušenja se izvodio bez prisutnosti SHIP-a po preporuci proizvođača.



Slika 4.4 Ispitna svrdlo korišteno za potrebe eksperimenta

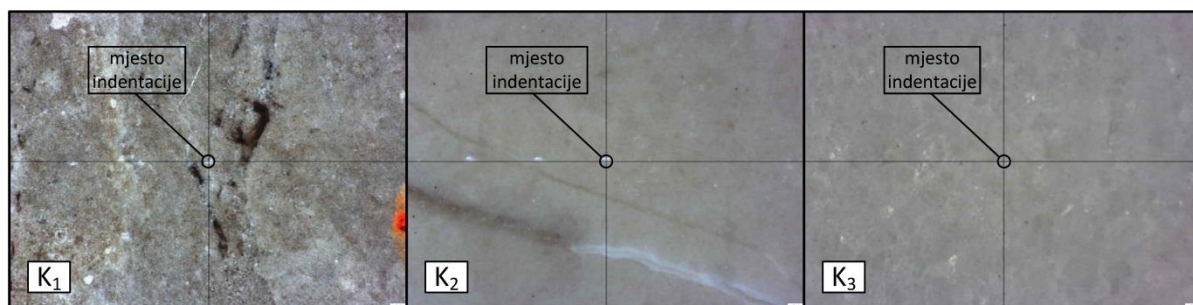
#### 4.1.2 Mjerenje tvrdoće

Prilikom odabira odgovarajućih uzoraka koji su detaljnije objašnjeni u prethodnom poglavlju, preliminarna ispitivanja tvrdoće po Knoop-u obavljena su u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Dobiveni rezultati su ukazali na prihvatljiv izbor pojedinih vrsta kamenih uzoraka, odnosno dovoljnu razliku u tvrdoći među odabranim vrstama kamena. Međutim, postojeći mjerni uređaj korišten za preliminarna istraživanja uvjetovan je mogućnošću stezanja manjih dimenzija, dok je za dimenzije obratka od 200x90x30 mm spomenuti uređaj teško primjenjiv. Iz navedenog razloga, prilikom izvođenja glavnog eksperimenta koristio se modul za mjerenje tvrdoće koji je detaljnije objašnjen u poglavlju 3.2.3.

Mjerenja su izvođena prije i nakon određenog broja ciklusa bušenja. Iako je normom propisan broj mjerenja tvrdoće kamena (obično se izvodi od 20 do 40 mjerenja), u slučaju nehomogenosti strukture broj mjerenja se po potrebi može povećati. Shodno navedenom, prilikom ispitivanja odabranih uzoraka odrađeno je 75 mjerenja prije ciklusa bušenja i 75 mjerenja tvrdoće nakon bušenja. Propisani razmak između 2 susjedna mjerenja iznosio je 2 mm dok je vrijeme držanja opterećenja iznosilo 10 s. Prema normi HRN EN 14205:2003 propisana vrijednost ispitne sile iznosi od 0,1 N do 5 N uz preporuku od 1,96 N. Preliminarna istraživanja su pokazala da se primjenom ispitne sile u iznosu od 1.96 N na kamenu  $K_2$  i  $K_3$  dobivaju zadovoljavajući rezultati, dok kod kamena  $K_1$  dolazi do nejasnog i nepotpunog otiska. Zbog navedenog, primjenom različitih opterećenja usvojila se ispitna sila od 5 N koja je kod sve tri vrste kamena dala zadovoljavajuće rezultate.

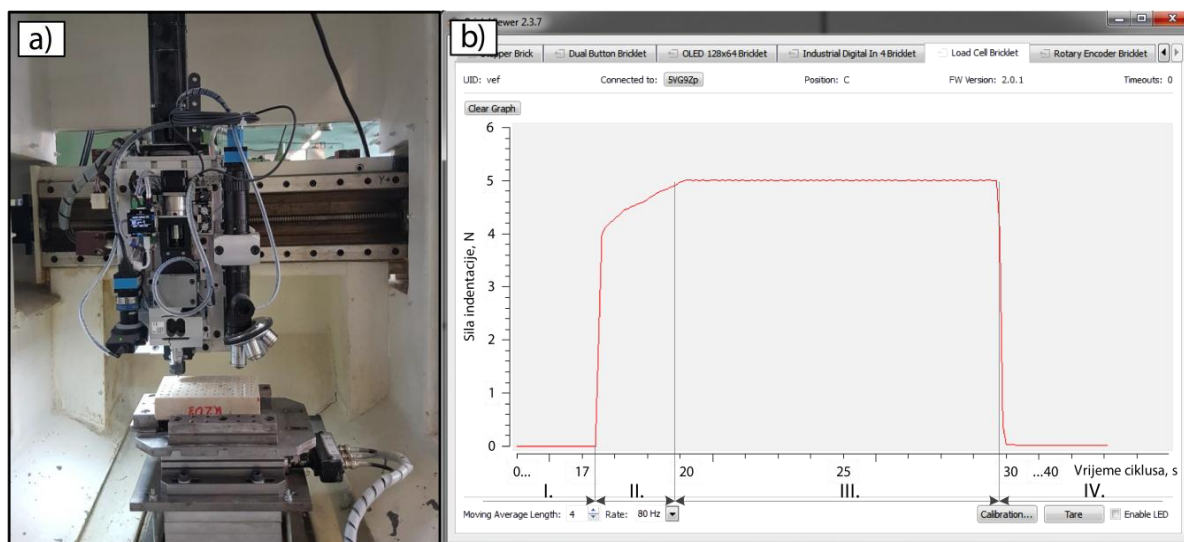
Mjerenje tvrdoće razvijenim modulom izvodilo se u tri koraka. U prvom koraku snimana je slika površinske teksture uzorka s ciljem detaljnijeg pregleda mjesta za indentaciju. Navedena operacija obavljala se s vizijskim sustavom za snimanje teksture (slika

3.7, pozicija I), detaljnije objašnjenim u poglavlju 3.2.3. Tipični primjeri izgleda teksture korištenih kamenih uzoraka  $K_1$ ,  $K_2$  i  $K_3$  prikazani su na slici 4.5.



Slika 4.5 Primjer izgleda tekstura ispitnih kamenih uzoraka

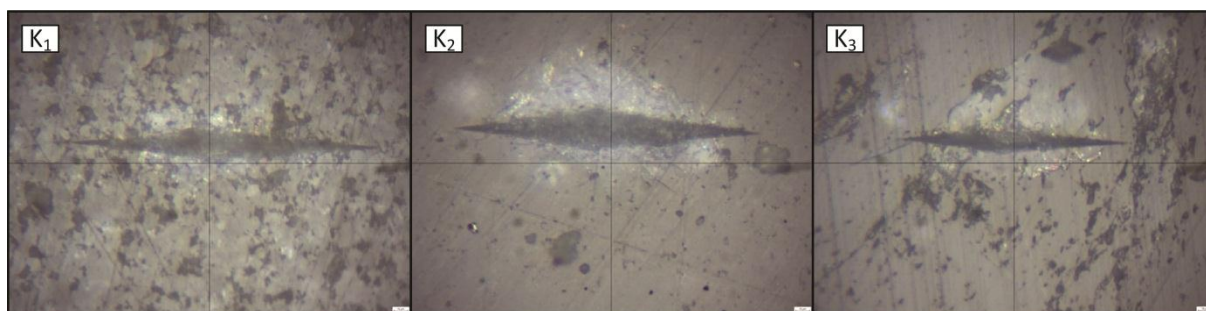
Nakon snimanja teksture, sklop za indentaciju (slika 3.7, pozicija II) je uz pomoć posmičnih osi ispitnog stroja pozicioniran u točku u kojoj je neposredno prije snimljena tekstura s ciljem provođenja indentacije. Postupak se odvijao opterećenjem od 5 N u trajanju od 10 s, dok je cijeli ciklus mjerenja trajao oko 40 s, uzimajući u obzir vrijeme prilaženja (slika 4.6b, područje I.), vrijeme postizanja propisane ispitne sile (slika 4.6b, područje II.), vrijeme indentacije (slika 4.6b, područje III.) i vrijeme odmicanja (slika 4.6b, područje IV.). Na slici 4.6a vidljiv je postupak indentacije na ispitnom stroju.



Slika 4.6 Postupak indentacije

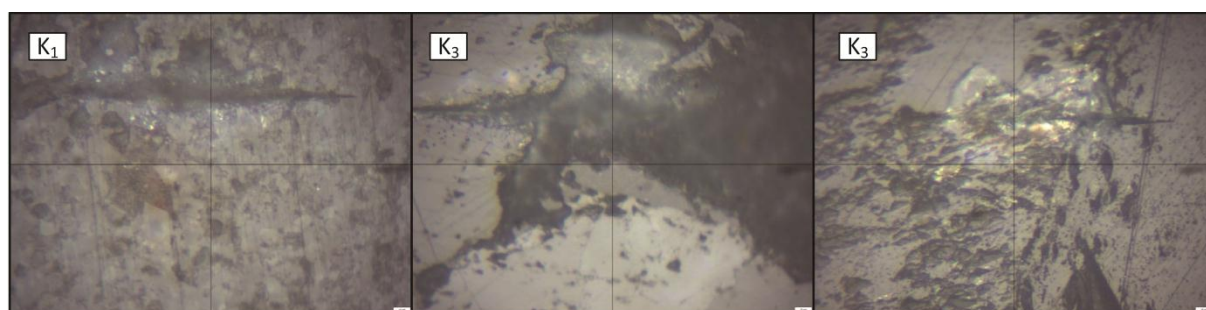
Zadnji korak u mjerenju tvrdoće predstavlja mjerenje veličine otiska nastalog nakon indentacije primjenom vizijskog sustava za mjerenje dimenzija otiska (slika 3.7, III). Kao i u

prethodnom koraku, pomoću ispitnog stroja, vizijski sustav je pozicioniran iznad novonastalog otiska te se pomoću mjernog računala upravlja snimanjem slike otiska. Unatoč razmjerno velikom broju slika automatizacija obrade slike nije moguća zbog pojave velikog broja nepravilnih artefakata koji se javljaju na slikama. Iz navedenog razloga slike su ručno obrađivane u softverskom paketu „*IC Measure*“ proizvođača *Imaging Source Europe GmbH* (Njemačka) pomoću kojeg su mjerene duljine dijagonala otiska za daljnju analizu i obradu. Na slici 4.7 mogu se vidjeti otisci indentacije na uzorcima  $K_1$ ,  $K_2$  i  $K_3$ .



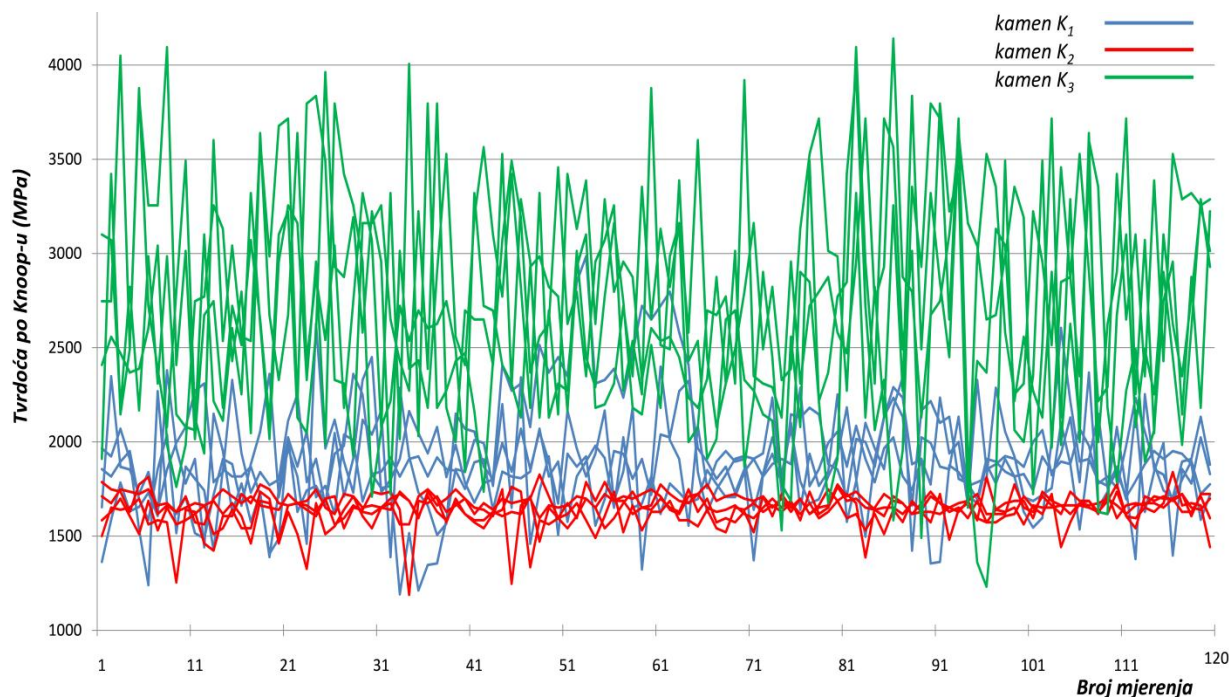
Slika 4.7 Slike otisaka indentacije  $K_1$ ,  $K_2$  i  $K_3$

U glavnom eksperimentu korištena su četiri uzorka od svake vrste kamena, odnosno sveukupno dvanaest ispitnih uzoraka. Po svakom uzorku je napravljeno najmanje 120 mjerenja, što čini ukupno više od 1440 mjerenja tvrdoće predmetnih uzoraka. Iako je većina mjerenja verificirana i prihvaćena, nekolicina je odbačena zbog površinskog puknuća i pojave mikro-pukotina na uzorcima. Na slici 4.8 mogu se vidjeti neupotrebljivi otisci nastali za vrijeme mjerenja. Najveći problem je vrsta uzorka  $K_3$  koja je zbog svoje zrnate strukture rijetko rezultira najvećim brojem odbačenih mjerenja, dok kod vrste kamena  $K_2$  gotovo da i nije bilo odbacivanja rezultata.



Slika 4.8 Neupotrebljivi otisci snimljeni na uzorcima kamena  $K_1$  i  $K_3$

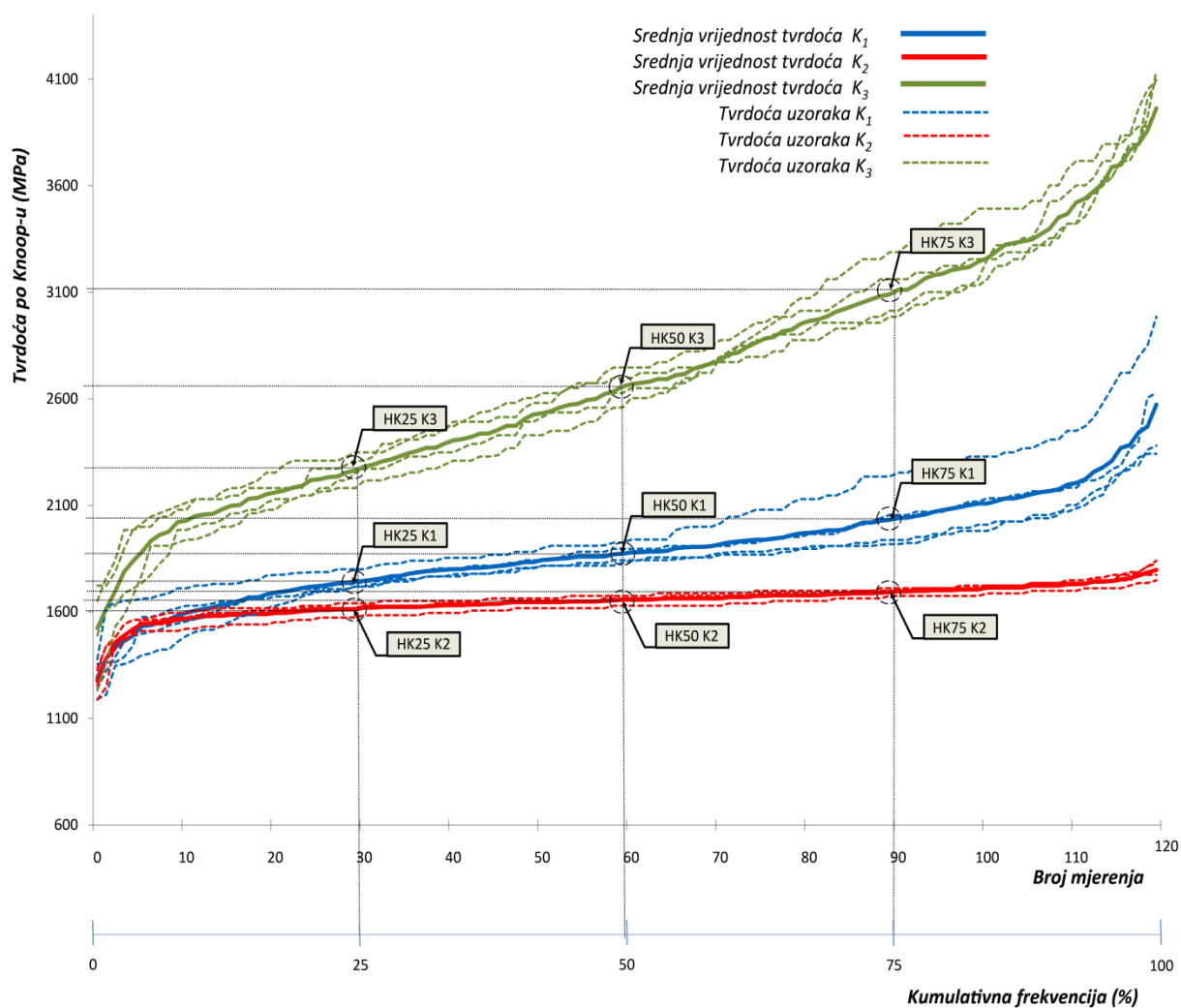
Nakon formiranja datoteka s mjernim rezultatima svih ispitnih uzoraka, a primjenom izraza (2.15) dobivene su numeričke vrijednosti tvrdoća. Vrijednosti tvrdoća svih ispitnih uzoraka prikazane su na slici 4.9 za svaku od tri vrste kamena.



Slika 4.9 Prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoća uzoraka

Dobiveni rezultati tvrdoća ukazuju na relativno mala rasipanja. Temeljem 1440 mjerenja utvrđene su ukupne prosječne vrijednosti tvrdoće kamena  $K_1$  od 1890,8 MPa, kamena  $K_2$  od 1648,6 MPa te kamena  $K_3$  od 2695,5 MPa. Također su utvrđene minimalne i maksimalne vrijednosti tvrdoće kamena  $K_1$  u rasponu od 1190,8 MPa do 2984,6 MPa, kamena  $K_2$  od 1188,2 MPa do 1840 MPa te kamena  $K_3$  u rasponu od 1231,8 MPa do 4140,2 MPa.

Vrijednosti tvrdoća svih uzoraka posložene su rastućim nizom i zajedno sa srednjim krivuljama tvrdoće svake vrste kamena prikazane su na slici 4.10. Uz prethodno izračunate srednje vrijednosti tvrdoća izražene su i kumulativne frekvencije tvrdoća  $HK25$ ,  $HK50$  i  $HK75$ .

Slika 4.10 Vrijednosti tvrdoća uzoraka i prosječnih vrijednosti kamena  $K_1$ ,  $K_2$  i  $K_3$ 

Uz kvantitativni prikaz kumulativnih frekvencija tvrdoća, u tablici 4.2 izraženi su i indeksi uniformnosti tvrdoće sve tri vrste kamena (poglavlje 2.4.1). Iz prikazanih vrijednosti također se može uočiti najveća heterogenost strukture kamena  $K_3$  (najniža vrijednost indeksa uniformnosti) u odnosu na preostale dvije vrste kamena, što je u skladu s dobivenim rasipanjima tvrdoća uzoraka navedene vrste kamena.

Tablica 4.2 Svojstva tvrdoće vrsta ispitnih uzoraka

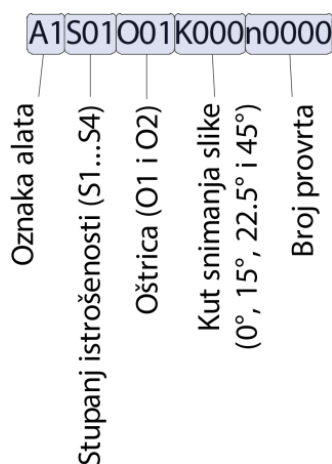
| Vrsta ispitnog uzorka | HK25        | HK50        | HK75        | Indeks uniformnosti tvrdoće |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------------|
| $K_1$                 | 1742,01 MPa | 1833,81 MPa | 2032,22 MPa | 0.85                        |
| $K_2$                 | 1612,27 MPa | 1645,85 MPa | 1692,89 MPa | 0.95                        |
| $K_3$                 | 2263,92 MPa | 2526,24 MPa | 3089,39 MPa | 0.73                        |

### 4.1.3 Određivanje stupnja istrošenosti

Dinamika trošenja reznog alata kvantificirana je prosječnom ( $VB$ , mm) i maksimalnom ( $VB_{MAX}$ , mm) širinom zone trošenja stražnje površine alata te njezinom površinom ( $VB_{POV}$ , mm<sup>2</sup>). Navedeni su parametri određeni primjenom metode direktnog nadzora istrošenosti. Snimanje reznih oštrica svrdla realizirano je industrijskom kamerom nakon određenog broja ciklusa bušenja, vidljivo iz slike 4.12.

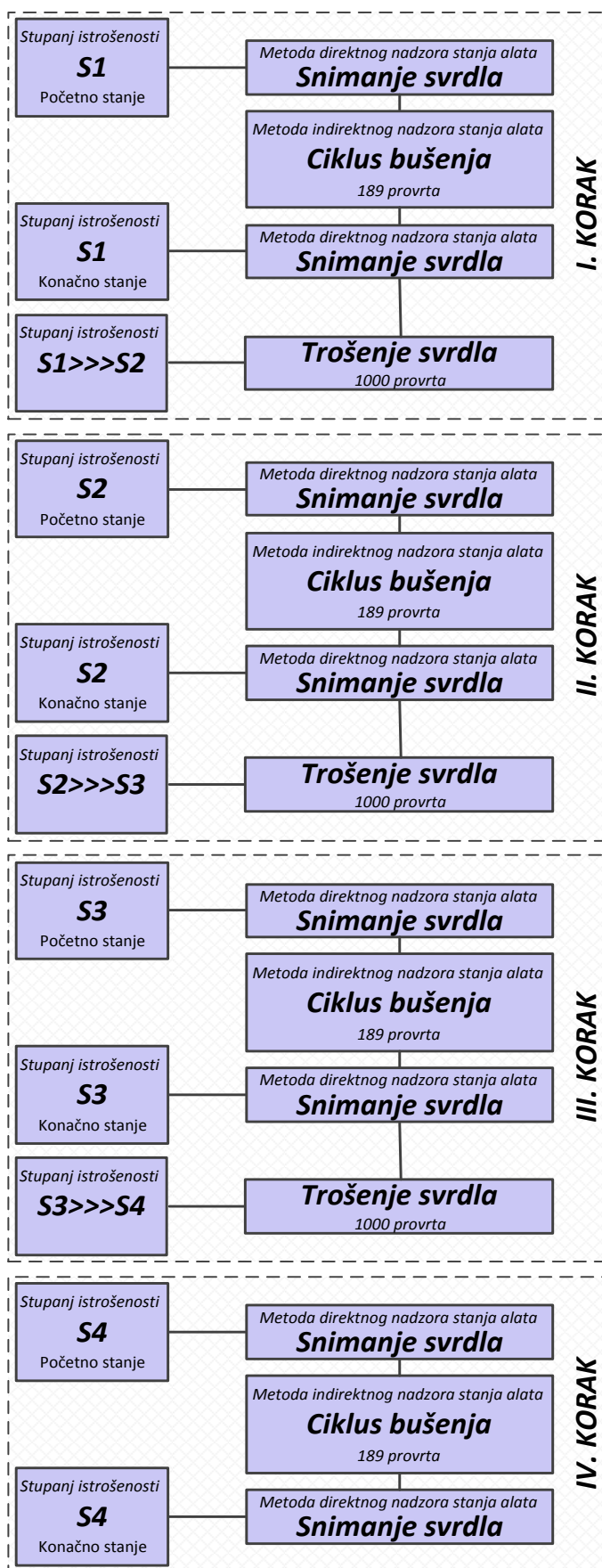
Glavni eksperiment izvodio se u nekoliko koraka koji su bili uvjetovani stupnjevima istrošenosti svrdla klasificiranim u četiri kategorije prema parametrima trošenja stražnje površine alata, pri čemu oznaka  $S_1$  označava potpuno oštro svrdlo, dok je  $S_4$  oznaka za potpuno istrošeno svrdlo. Prisilno trošenje svrdla u svrhu postizanja idućeg stupnja istrošenosti izvodilo se na kamenu  $K_1$  brzinom rezanja od 15 m/min i posmakom od 0.09 mm/okr pri dubini bušenja od 15 mm, sveukupno 1000 provrta za svaki novi stupanj istrošenosti.

Snimanje svrdla obavljalo se u radnom prostoru stroja ciklusom slikanja koji je temeljen na NC programu posebno napisanom za tu namjenu. Program je obuhvaćao slikanje reznih oštrica  $O1$  i  $O2$  pod kutom od  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $22,5^\circ$  i  $45^\circ$ . Nakon zauzimanja položaja oštrice NC program ispisuje poruku s podacima karakterističnim za pojedinu sliku koja se uz pomoć mjernog računala pohranjuje s prethodno definiranim nazivom, slika 4.11.



Slika 4.11 Notacija naziva slike za mjerenje istrošenosti

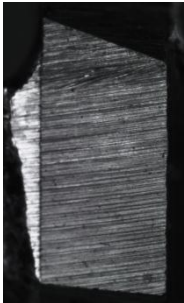
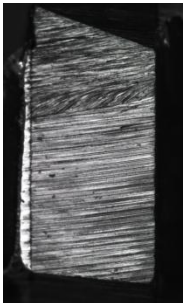
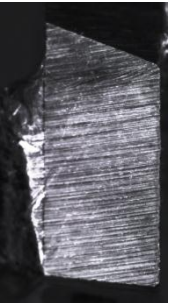
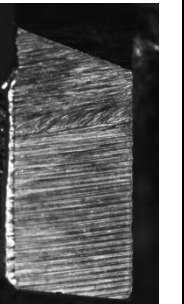
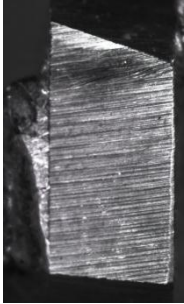

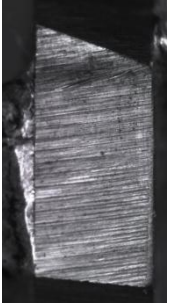
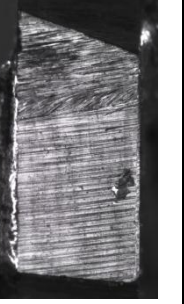
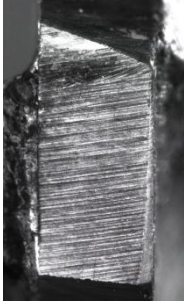
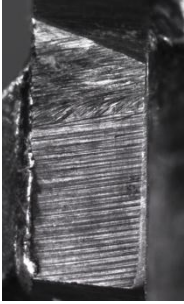
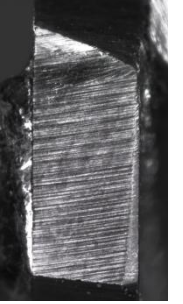
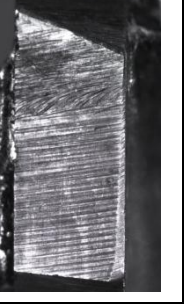
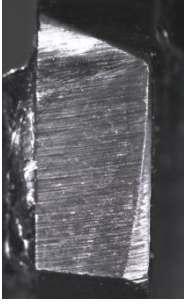
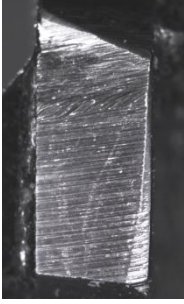
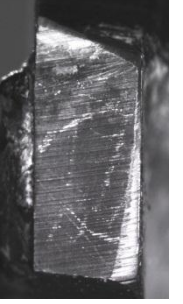





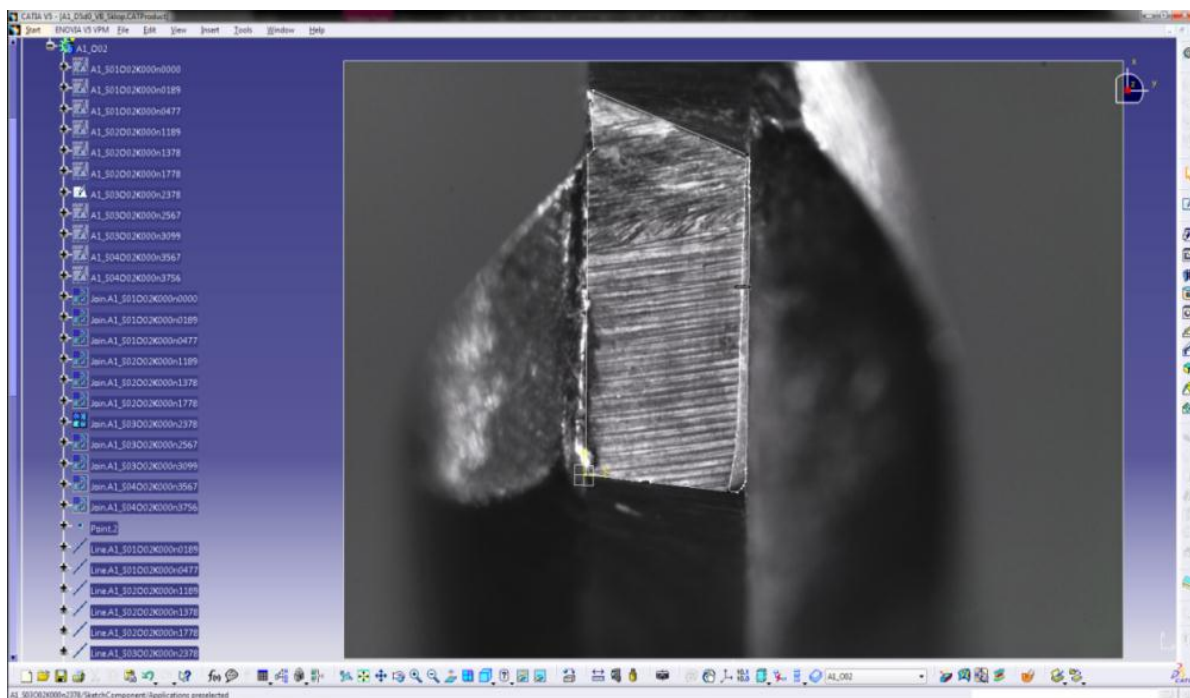
Slika 4.12 Tijek izvođenja glavnog eksperimenta

Tablicom 4.3 prikazana su početna i konačna stanja alata za svaki stupanj istrošenosti. Iz slika je vidljivo povećanje širine pojasa istrošenosti stražnje površine s obzirom na povećanje brzine rezanja od vrha svrdla prema rubovima duž reznih oštrica. Također se može zamijetiti da je na području vrha svrdla došlo do krzanja i loma poprečne oštrice. Iz tablice je vidljiv karakteristični oblik trošenja alata kod obrade abrazivnih materijala kao što je kamen.

Tablica 4.3 Početni i konačni oblici trošenja prema stupnju istrošenosti

| Stupanj istrošenosti svrdla | Početno stanje  |   | Konačno stanje   |   |
|-----------------------------|---|---|--|---|
|                             | Oštrica 1   | Oštrica 2   | Oštrica 1  | Oštrica 2   |
| $S_1$                       |   |   |   |   |
| $S_2$                       |  |  |  |  |
| $S_3$                       |  |  |  |  |
| $S_4$                       |  |  |  |  |

Snimljene slike reznih oštrica ispitnog svrdla potom su obrađene u programskom paketu CATIA primjenom modula „Sketch tracer“ (slika 4.13). Prve slike odnose se na potpuno oštre rezne oštrice korištene kao referentne slike kod kasnije analize. Svaka iduća slika temelji se na postojećem koordinatnom sustavu te su prema njoj rubovi zone trošenja ručno iscrtavani. Analizirane slike su korištene za određivanje parametara trošenja stražnje površine alata.



Slika 4.13 Primjena CAD sustava CATIA za određivanje parametara trošenja

Tablica 4.4 prikazuje kvantificirane vrijednosti parametara trošenja nastalih za vrijeme izvođenja glavnog eksperimenta, zasebno prikazanih za svaku oštricu i stupanj istrošenosti. Usporedbom navedenih vrijednosti može se uočiti razlika između vrijednosti za prvu i drugu rezu oštricu. Mjerenjem ispitnog svrdla u Nacionalnom laboratoriju za duljinu Fakulteta strojarstva i brodogradnje utvrđena je razlika od 0,06 mm između duljina reznih oštrica. Pretpostavlja se da je glavni uzrok navedenom odstupanju kvaliteta izrade ispitnog svrdla odnosno načina lemljenja i naknadnog brušenja tvrdo-metalne rezne pločice.

Tablica 4.4 Parametri trošenja s obzirom na stupanj istrošenosti

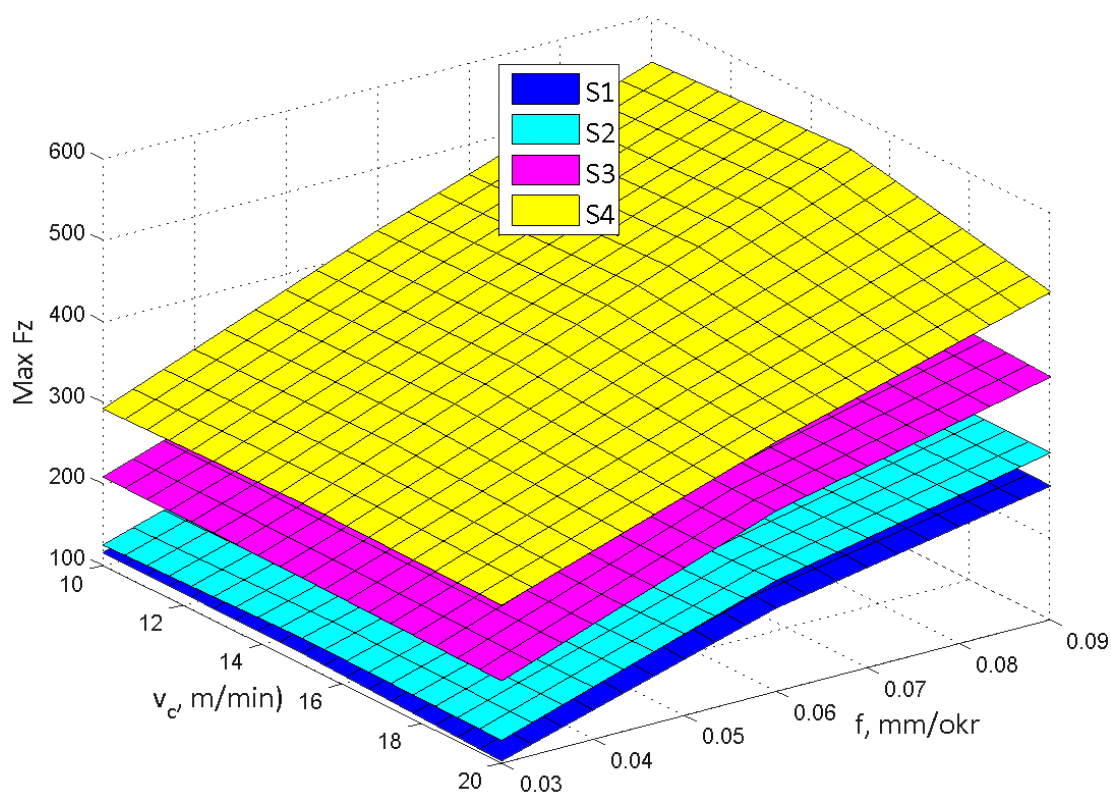
| Parametri trošenja stražnje površine         | Oznaka     | Stupanj istrošenosti | Oštrica 1      |                | Oštrica 2      |                | Jedinica        |
|--|------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|  |            |                      | Početno stanje | Konačno stanje | Početno stanje | Konačno stanje |                 |
| Srednja širina trošenja stražnje površine    | $VB_{SR}$  | $S_1$                | 0              | 0,015          | 0              | 0,018          | mm              |
|  |            | $S_2$                | 0,035          | 0,048          | 0,028          | 0,037          |                 |
|  |            | $S_3$                | 0,069          | 0,083          | 0,065          | 0,077          |                 |
|  |            | $S_4$                | 0,141          | 0,174          | 0,131          | 0,153          |                 |
| Maksimalna širina trošenja stražnje površine | $VB_{MAX}$ | $S_1$                | 0              | 0,027          | 0              | 0,027          | mm              |
|  |            | $S_2$                | 0,125          | 0,148          | 0,036          | 0,054          |                 |
|  |            | $S_3$                | 0,242          | 0,293          | 0,123          | 0,154          |                 |
|  |            | $S_4$                | 0,482          | 0,572          | 0,3            | 0,355          |                 |
| Površina trošenja stražnje površine          | $VB_{POV}$ | $S_1$                | 0              | 0,029          | 0              | 0,049          | mm <sup>2</sup> |
|  |            | $S_2$                | 0,104          | 0,117          | 0,073          | 0,097          |                 |
|  |            | $S_3$                | 0,174          | 0,214          | 0,170          | 0,198          |                 |
|  |            | $S_4$                | 0,358          | 0,465          | 0,334          | 0,392          |                 |

#### 4.1.4 Izbor parametara obrade za izvođenje glavnog eksperimenta

Pod pojmom parametri obrade podrazumijeva se dubina rezanja, brzina rezanja i posmak. Za potrebe glavnog eksperimenta odabrano je svrdlo s tvrdo-lemljenom tvrdometalnom pločicom promjera 5 mm čije su karakteristike detaljnije objašnjene u poglavlju 4.1. Ciklusi bušenja izvođeni su bez prethodne operacije predbušenja, čime je jednoznačno definirana dubina rezanja od pola promjera svrdla, odnosno 2,5 mm. Proizvođač odabranog svrdla u svojoj dokumentaciji nije naveo detaljne preporuke o primjeni navedenog svrdla, kao i o parametrima obrade. Stoga je za definiranje brzine rezanja i posmaka obavljen niz predpokrusa s ciljem utvrđivanja egzaktnih vrijednosti spomenutih parametara obrade.

Bušenja su izvođena na vrsti kamena  $K_1$  bez upotrebe *SHIP*-a s nekoliko kombinacija parametara obrade zaključno s vršnim vrijednostima posmaka od 0,1 mm/okr i brzine rezanja od 20 m/min. Prilikom izvođenja bušenja u predpokrusu također je utvrđeno da kod izrade oko 3500 provrta dolazi do pojave trošenja stražnje površine, odnosno pojave  $VB_{MAX}$  od 0,5 mm. Navedeni parametar je važan jer se tijekom bušenja navedenim  $VB_{MAX}$ -om i vršnim vrijednostima parametara obrade ostvarila aksijalna sila u smjeru osi Z koja

kratkotrajno premašuje 700 N, što je ujedno i vršna vrijednost sile koju ispitni stroj može podnijeti.

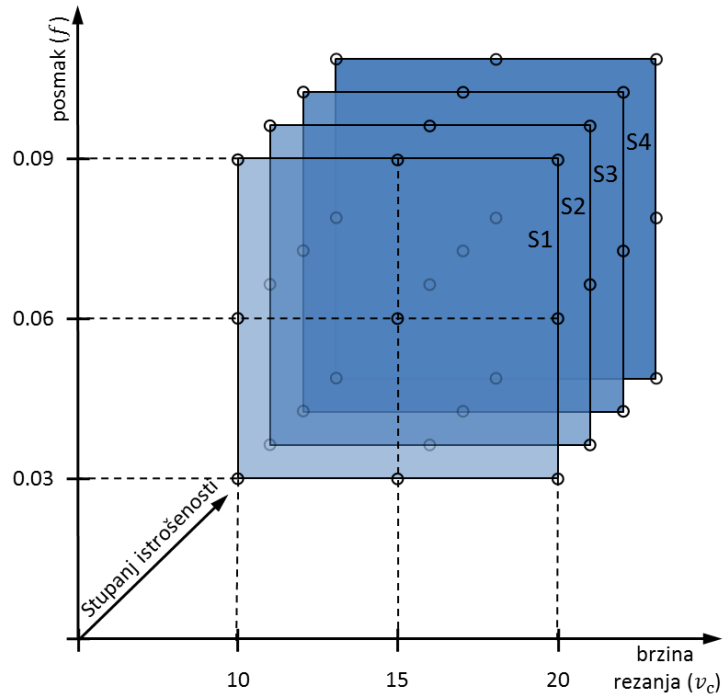


Slika 4.14 Aksijalna sila pri različitim parametrima obrade i stupnjevima istrošenosti

Gornja slika prikazuje vrijednosti aksijalne sile u odnosu na različite posmake i različite stupnjeve istrošenosti. Probna bušenja potpuno oštrim svrdlom rezultirala su aksijalnom silom od 45 N do 160 N ovisno o posmaku koji se kretao od 0,03 mm/okr do 0,09 mm/okr. Pri bušenju svrdlom maksimalne širine pojasa trošenja od 0,15mm, aksijalne sile su se kretale od 110 N do 200 N, ovisno o vrijednosti posmaka. Koristeći alat s maksimalnom širinom pojasa trošenja stražnje površine oko 0,25 mm razvijale su se sile od 200 N do 410 N. Također se može vidjeti da brzina rezanja nema utjecaja na aksijalnu silu. Probna bušenja su obavljena i na preostalim dvjema vrstama kamena,  $K_1$  i  $K_3$ . Međutim, preliminarna mjerenja nisu pokazala značajnija odstupanja u aksijalnoj sili, oko 30 –ak % u odnosu na  $K_2$ , što je u dozvoljenim granicama primjene na ispitnom stroju.

Nakon niza opisanih probnih mjerenja tijekom bušenja temeljem dobivenih rezultata odabrana su stanja pokusa, vidljivo na slici 4.15. Postavljeno je ukupno 108 kombinacija unutar glavnog eksperimenta, točnije 9 kombinacija posmaka i brzine rezanja za svaki

stupanj istrošenosti ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  i  $S_4$ ) i za svaku vrstu kamena ( $K_1$ ,  $K_2$  i  $K_3$ ) što je rezultiralo ukupnim brojem od 108 kombinacija. Svaka je kombinacija ponavljana 7 puta što je u konačnici rezultiralo ukupnim brojem od 756 mjerenja.



Slika 4.15 Parametri obrade prema planu pokusa

Režimi obrade korišteni u glavnom eksperimentu dani su u tablici 4.5 .

Tablica 4.5 Režimi obrade korišteni u glavnom eksperimentu

| Promjer svrdla | Brzina rezanja | Posmak  | Učestalost vrtnje GV            | Posmična brzina   | Dubina bušenja | Vrijeme bušenja                  | Broj ponavljanja (za svaki stupanj istrošenosti) |
|----------------|----------------|---------|---------------------------------|-------------------|----------------|----------------------------------|--|
| $d_A$          | $v_c$          | $f$     | $n = \frac{v_c}{d_A \cdot \pi}$ | $v_f = f \cdot n$ | $a_p$          | $t_b = \frac{a_p \cdot 60}{v_f}$ |  |
| mm             | m/min          | mm/okr. | min <sup>-1</sup>               | mm/min            | mm             | s                                |  |
| 5              | 10             | 0,03    | 636,94                          | 19,11             | 15             | 47,10                            | 7  |
|                | 15             |         | 955,41                          | 28,66             |                | 31,40                            |  |
|                | 20             |         | 1273,89                         | 38,22             |                | 23,55                            |  |
|                | 10             | 0,06    | 636,94                          | 38,22             |                | 23,55                            |  |
|                | 15             |         | 955,41                          | 57,32             |                | 15,70                            |  |
|                | 20             |         | 1273,89                         | 76,43             |                | 11,78                            |  |
|                | 10             | 0,09    | 636,94                          | 57,32             |                | 15,70                            |  |
|                | 15             |         | 955,41                          | 85,99             |                | 10,47                            |  |
|                | 20             |         | 1273,89                         | 114,65            |                | 7,85                             |  |

## 4.2 Snimanje i filtriranje signala

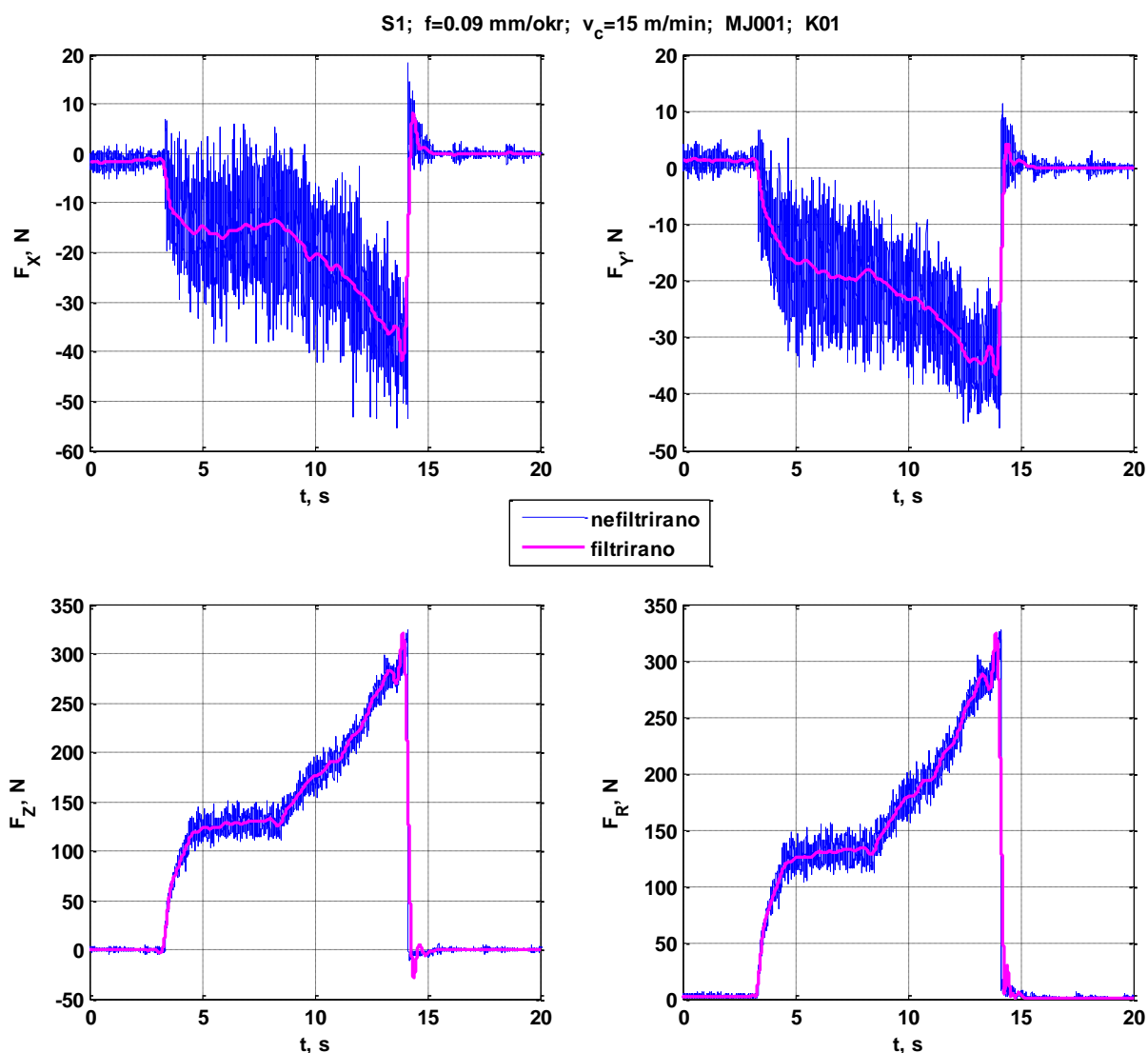
Kvalitetno snimanje signala procesa obrade prvi je i nužan uvjet za uspješno provođenje određivanja stupnja istrošenosti i klasifikacije vrste materijala uz pomoć indirektnih metoda nadzora procesa obrade. U okviru ovog istraživanja za tu svrhu su korištene četiri vrste mjernih sustava koji su detaljnije objašnjeni u poglavlju 3.3. Neke vrste mjerenih signala snimane su kontinuirano za vrijeme ciklusa bušenja, dok su neke zbog hardverskog ograničenja snimane u kraćim vremenskim intervalima. Odgovarajućom primjenom određenih filtara signali su pripremani za izdvajanje značajki osjetljivih na promjene stanja alata i vrste obrađivanog materijala.

**Signali sila rezanja.** Snimani su periodom uzrokovanja  $T_{uz}=1$  ms u sve tri osi  $X, Y$  i  $Z$  za vrijeme trajanja ciklusa bušenja te su potom filtrirani Butterworthovim niskopropusnim filtrom granične (cutoff) frekvencije  $f_c=1$  Hz. Izgled filtriranog i nefiltriranog signala sila rezanja  $F_x, F_y, F_z$  i rezultantne sile  $F_R$  je dan primjerom na slici 4.16 pri bušenju kamena  $K_1$  brzinom od 15 m/min i posmakom 0,09 mm/okr potpuno oštrom svrdlom.

Iz slike 4.16 vidljiv je prirast aksijalne sile  $F_z$  prilikom povećanja dubine bušenja, iako bi njen iznos trebao biti konstantan od potpunog ulaska oštrica u zahvat pa do kraja provrta koji se buši. Razlog tome leži u otežanom odvođenju kamene odvojene čestice koja se u obliku sitnog praha zadržava unutar provrta i djeluje na bočne strane svrdla. Uslijed navedenog dolazi do porasta trenja te se kao rezultat javlja povećanje aksijalne sile koja može biti i do tri puta veća od inicijalne. Pregledom prethodnih slika signala sila rezanja  $F_x, F_y$  i  $F_z$  jasno se vidi znatno veća vrijednost signala aksijalne sile  $F_z$  u odnosu na preostale radijalne komponente sila  $F_x$  i  $F_y$ . Zbog navedenog, utjecaj radijalnih komponenti  $F_x$  i  $F_y$  u daljnjoj je analizi sadržan u rezultantnoj sili rezanja,

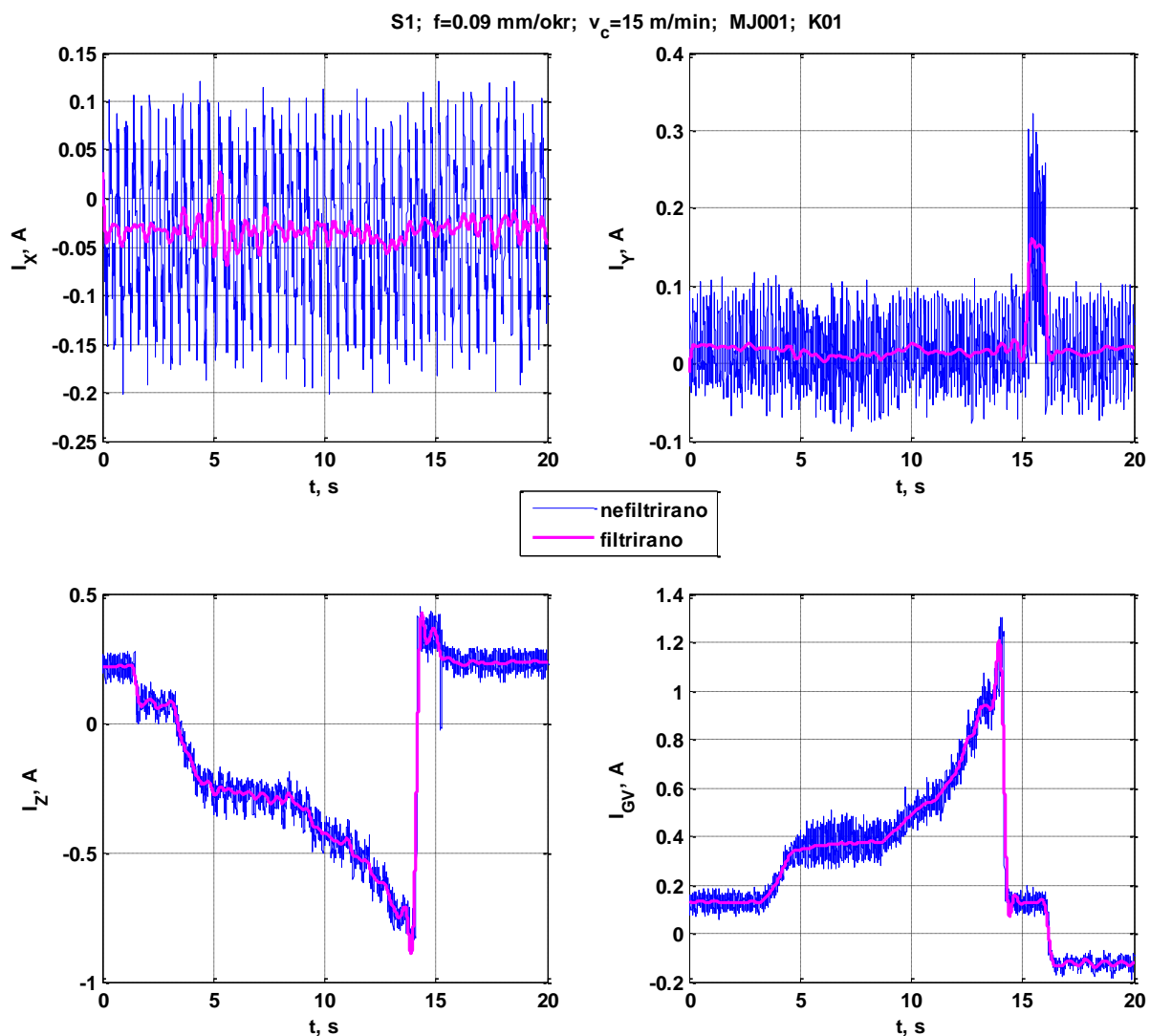
$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}. \quad (4.1)$$





Slika 4.16 Nefiltrirani i filtrirani signal sila rezanja  $F_X$ ,  $F_Y$ ,  $F_Z$  te resultantne sile  $F_R$

**Signali jakosti struja pogonskih motora.** Signali jakosti struja motora snimani su na motorima X, Y i Z osi te na motoru glavnog vretena za vrijeme trajanja ciklusa bušenja. Njihovim pregledom utvrđena je uska korelacija sa silama rezanja (slike 4.16 i 4.17), što odgovara navodima u literaturi. Nakon snimanja, navedeni signali su filtrirani Butterworthovim niskopropusnim filtrom granične frekvencije  $f_c=1$  Hz kakav je korišten i za filtriranje signala sila rezanja.



Slika 4.17 Nefiltrirani i filtrirani signal jakosti struja pogonskih motora  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $I_z$  i  $I_{GV}$

Signal jakosti struja pogonskih motora sadrži više informacija, od kojih je najvažnija ona o procesu obrade. Međutim, osim navedenog, signali sadrže informacije vezane uz dinamiku stroja (akceleracija i deceleracija) kao i informacije vezane za pogonske dijelove pojedinih osi obradnog stroja (gibanja osi stroja, trenje u vodilicama, ležajevima, navojnim vretenima i maticama). Ukoliko postoji neko oštećenje na pogonskim dijelovima stroja ono potencijalno može onečistiti snimane signale i dodatno otežati kasniju analizu.

**Vibracije.** Signali vibracija snimani su senzorom vibracija u radnom području od 0,5 Hz do 5000 Hz u smjeru  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  osi. Snimanje je provedeno frekvencijom uzorkovanja od 100 kHz u trajanju od 2 s od trenutka kada se svrdlo nalazilo 3mm od gornje površine kamenog uzorka. Snimljeni signali iz vremenskog područja su transformirani u frekvencijsko područje primjenom *FFT* transformacije.

**Akustična emisija.** Signali akustične emisije snimani su senzorom radnog područja od 50 kHz do 400 kHz. Snimanje je određeno frekvencijom uzorkovanja od 2 MHz u trajanju od 0,1 s od trenutka početka snimanja signala vibracija. Snimljeni signali iz vremenskog područja također su transformirani u frekvencijsko područje primjenom *FFT* transformacije, kao što je slučaj sa signalima vibracija.

### 4.3 Izdvajanje značajki

Nakon snimanja i filtriranja signala, izdvojene su značajke osjetljive na promjene tijekom procesa obrade. Odabirom dovoljnog broja značajki izdvojenih iz snimljenih signala osigurava se potencijalno veća razina uspješnosti klasifikacije stupnja istrošenosti i tvrdoće materijala. Iz navedenog razloga, odabirane su značajke u vremenskom i frekvencijskom području.

U nastavku je dan pregled izdvojenih značajki snimljenih iz signala sila rezanja, jakosti struja pogonskih motora, vibracija i akustične emisije koje su potencijalno osjetljive na promjenu stanja alata i vrste obrađivanog materijala.

#### 4.3.1 Značajke izdvojene iz signala sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora

Značajke izdvojene iz signala sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora najprije su izdvojene u vremenskoj domeni. Određene su maksimalne vrijednosti aksijalne sile  $F_Z$  i resultantne sile  $F_R$  izračunom prosječne vrijednosti 10 % vršnih iznosa vrijednosti sila. S obzirom na male vrijednosti jakosti struja pogonskih motora osi  $X$  i  $Y$ , one su izuzete iz daljnjih razmatranja te su uzeti signali jakosti struja pogonskog motora osi  $Z$  te pogonskog motora glavnog vretena. Njihove su značajke izdvojene na identičan način kao i kod sila rezanja. Odabranim načinom želio se spriječiti utjecaj kratkotrajnih pojava ekstremnih vrijednosti unutar snimanih signala. Navedene značajke s popratnim oznakama navedene su u tablici 4.6.

Tablica 4.6 Značajke u vremenskom području izdvojene iz signala sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora

| Oznaka           | Opis  |
|------------------|---|
| $(F_Z)_{MAX}$    | Aritmetička sredina 10 % najvećih vrijednosti signala sile $F_Z$                                      |
| $(F_R)_{MAX}$    | Aritmetička sredina 10 % najvećih vrijednosti signala resultantne sile $F_R$                          |
| $( I_Z )_{MAX}$  | Aritmetička sredina 10 % najvećih vrijednosti signala jakosti struja pogonskog motora $Z$ -osi        |
| $(I_{GV})_{MAX}$ | Aritmetička sredina 10 % najvećih vrijednosti signala jakosti struja pogonskog motora glavnog vretena |

Prethodno provedenom analizom utvrđeno je da se dominantne spektralne komponente u frekventijskom području nalaze u području frekvencije vrtnje i frekvencija reznih oštrica. Uslijed navedenog, snage spektralnih komponenti na tim frekvencijama (prikazano u tablici 4.7) korištene su za klasifikaciju istrošenosti svrdla i tvrdoće obrađivanog kamena.

Tablica 4.7 Značajke u vremenskom području izdvojene iz signala sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora

| Oznaka        | Opis   |
|---------------|--|
| $F_z(f_v)$    | Snaga spektralne komponente sile $F_z$ na frekvenciji vrtnje                                       |
| $F_z(f_o)$    | Snaga spektralne komponente sile $F_z$ na frekvenciji oštrice                                      |
| $I_{GV}(f_v)$ | Snaga spektralne komponente jakosti struje pogonskog motora glavnog vretena na frekvenciji vrtnje  |
| $I_{GV}(f_o)$ | Snaga spektralne komponente jakosti struje pogonskog motora glavnog vretena na frekvenciji oštrice |

#### 4.3.2 Značajke izdvojene iz signala vibracija

Signali vibracija su filtrirani za vrijeme učenja neuronske mreže, na način da su odabirane značajke koje su pokazale osjetljivost na promjene stanja alata, kao na i tvrdoću obrađivanog materijala.

Metoda odabira odgovarajućih značajki provedena je određivanjem snaga frekventijskog spektra signala vibracija u smjeru X, Y i Z osi kakva je korištena i u radu [76]. Signali vibracija prvo su obrađeni s *FFT* analizom s ciljem iznalaženja informacija o raspodjeli snaga komponenti spektra, u radnom području od 0.5 Hz do 5000 Hz. Nakon izračunatih snaga komponenti spektra pristupilo se izračunu energija za različite frekventijske pojaseve unutar radnog područja senzora koje su na kraju i korištene kao značajke osjetljive na promjenu stanja alata i tvrdoće kamena. Dobivene energije određenog frekventijskog pojasa određene su integriranjem pripadajuće krivulje spektralne gustoće snage

$$E(VIB_X) = \int_{f_D}^{f_G} VIB_X(f) df, \quad (4.2)$$

$$E(VIB_Y) = \int_{f_D}^{f_G} VIB_Y(f) df, \quad (4.3)$$

$$E(VIB_Z) = \int_{f_D}^{f_G} VIB_Z(f) df. \quad (4.4)$$

Pri tome su korišteni frekvencijski pojasevi različitih širina od  $s=\{5, 10, 20, 30\dots 90, 100, 200, 300\dots 900, 1000, 1500, 2500 \text{ i } 5000\}$  Hz. Primjerice, odabirom širine frekvencijskog pojasa od 500 Hz frekvencijsko područje je podijeljeno na pojaseve ( $[f_D, f_G]$ ):  $[5, 505]$ ,  $[505, 1005]$ ,  $[1005, 1505]$ ,  $[1505, 2005]$ ,  $[2005, 2505]$ ,  $[2505, 3005]$ ,  $[3005, 3505]$ ,  $[3505, 4005]$ ,  $[4005, 4505]$  i  $[4505, 5000]$ .

Pregled značajki izdvojenih iz signala vibracija prethodno definiranim pojasevima korištenih pri modeliranju trošenja alata i tvrdoće kod bušenja kamena dan je u tablici 4.8.

Tablica 4.8 Značajke izdvojene iz signala vibracija

| Oznaka         | Opis   |
|----------------|--|
| $E(VIB_X)$     | Energija spektra signala vibracija u smjeru X osi u intervalu frekvencija $[f_d, f_g]$             |
| $E(VIB_Y)$     | Energija spektra signala vibracija u smjeru Y osi u intervalu frekvencija $[f_d, f_g]$             |
| $E(VIB_Z)$     | Energija spektra signala vibracija u smjeru Z osi u intervalu frekvencija $[f_d, f_g]$             |
| $E(VIB_{XYZ})$ | Suma energija spektra signala vibracija u smjeru X, Y i Z osi u intervalu frekvencija $[f_d, f_g]$ |

### 4.3.3 Značajke izdvojene iz signala akustične emisije

Signali akustične emisije obrađeni su na identičan način kao i signali vibracija. Kao i u prethodnom poglavlju, odabir značajki temelji se na određivanju snaga frekvencijskog spektra signala akustične emisije uz pomoć FFT metode u frekvencijskom području od 50 kHz do 400 kHz. Iz dobivenih snaga spektra u navedenom frekvencijskom području zatim su izračunate energije spektra signala za frekvencijske pojaseve radnog područja senzora u definiranim širinama od  $s=\{5, 10, 15, 20, 30 \text{ i } 40\}$  kHz [76].

Dobivene energije određenog frekvencijskog pojasa određene su integriranjem pripadajuće krivulje spektralne gustoće snage

$$E(AE) = \int_{f_D}^{f_G} AE(f) df. \quad (4.5)$$

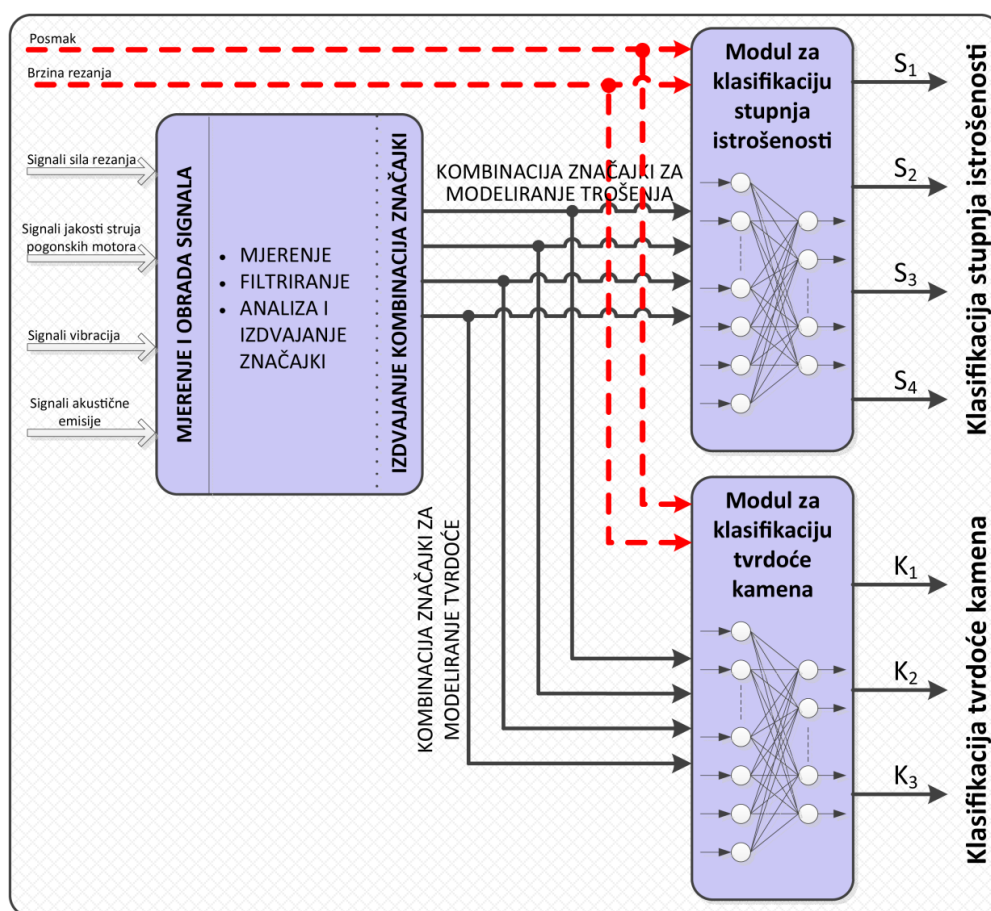
Pregled značajki izdvojenih iz signala akustične emisije prethodno definiranim pojasevima korištenih pri modeliranju trošenja alata i tvrdoće kod bušenja kamena dan je u tablici 4.9.

Tablica 4.9 Značajke izdvojene iz signala akustične emisije

| Oznaka | Opis  |
|--------|---|
| E(AE)  | Energija spektra signala akustične emisije u intervalu frekvencija $[f_d, f_g]$ |

## 5 Modeliranje stupnja istrošenosti alata i tvrdoće kamena

Procjena stupnja istrošenosti svrdla i tvrdoće kamena tijekom procesa bušenja realizirana je sustavom (slika 5.1) koji se sastoji od dva modula, pri kojem prvi modul služi za klasifikaciju stupnja istrošenosti svrdla, dok je drugi zadužen za klasifikaciju tvrdoće kamena. Navedeni moduli su temeljeni na neuronskim mrežama s radijalnim baznim funkcijama, opisanim u sljedećim poglavljima.



Slika 5.1 Sustav za klasifikaciju stupnja istrošenosti i tvrdoće kamena

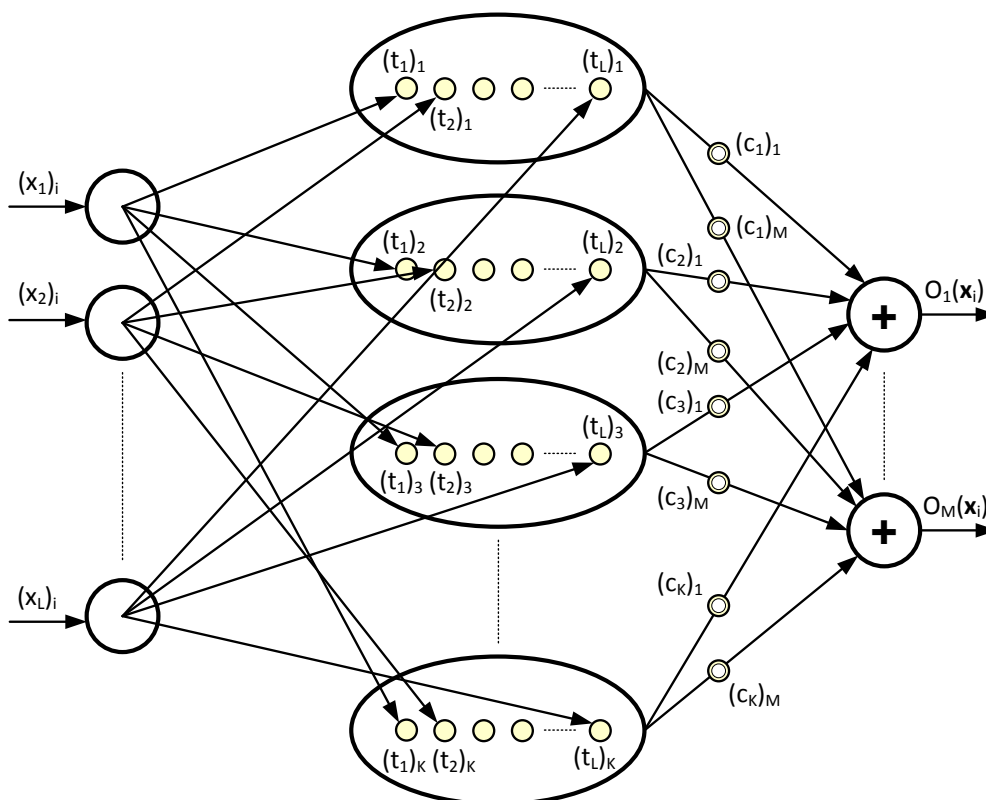
Iz snimljenih i filtriranih signala izdvojen je niz značajki iz vremenskog i frekvencijskog područja koje su potom korištene za klasifikaciju stupnja istrošenosti i tvrdoće. Analize izdvojenih značajki određene su u nekoliko koraka, pri čemu su prvo provedene zasebne analize kombinacijama značajki izdvojenim iz svake vrste signala. Značajke koje su ostvarile najbolju uspješnost klasifikacije potom su korištene u međusobnoj analizi koja je po uzoru na prijašnja istraživanja trebala povećati robusnost i uspješnost klasifikacije. Navedeni koraci provedeni su na oba modula.



## 5.1 Struktura mreže i matematički model

Model trošenja svrdla i tvrdoće kamena zasnovan je na primjeni neuronske mreže s radijalnim baznim funkcijama (RBF NM). Njezina je prvobitna arhitektura predložena krajem 80-ih godina [77], a s vremenom je došlo do nadogradnje predloženih i stvaranja novih modela učenja prilagođenih rješavanju klasifikacijskih i regresijskih problema [36]. Osnovna prednost RBF mreža spram, u ovom području, najčešće korištenih višeslojnih perceptronskih mreža učenih iterativnom metodom povratnog prostiranja pogreške je u brzini učenja (učenje u jednom koraku) i jednostavnoj adaptaciji strukture koja rezultira bržim postizanjem potrebnih generalizacijskih karakteristika mreže.

Korištena varijanta RBF mreže prilagođena je rješavanju klasifikacijskih problema, a njezina je struktura i matematički model učenja/testiranja [78] prikazan u nastavku. Neuronske mreže s radijalnim baznim funkcijama spadaju u skupinu unaprijednih ili statičkih (feed-forward) neuronskih mreža, a sastoje se od tri sloja: ulaznog, skrivenog i izlaznog (slika 5.2.). Ulazni je sloj određen problemom i definiran je s ( $L$ ) ulaznih neurona. Broj izlaznih neurona ( $M$ ) također je određen rješavanim problemom, dok se broj neurona skrivenog sloja ( $K$ ) određuje u fazi učenja od strane učitelja. Povezanost ulaznog i skrivenog sloja riješena je primjenom centara neurona skrivenog sloja. Naime, svaki je neuron skrivenog sloja opisan  $L$ -dimenzionalnim vektorom centara ( $t_j$ ) i parametrima aktivacijske funkcije. Elementi vektora centara povezani su s elementima pripadajućeg ulaznog neurona čime je ostvarena veza između razmatranog neurona skrivenog sloja i pripadajućeg neurona ulaznog sloja. S druge strane, neuroni skrivenog sloja povezani su s izlaznim neuronima preko pripadajućih težinskih faktora ( $c_j$ ). Time je ostvareno preslikavanje  $L$ -dimenzionalnog ulaznog vektora na  $M$ -dimenzionalni izlazni vektor ( $R^L \rightarrow R^M$ ).



Slika 5.2 Struktura RBF mreže

Glavni dio RBF mreže predstavlja struktura neurona u skrivenom sloju i težinski faktori, jer o njima ovise kvaliteta odziva mreže i njezina generalizacijska svojstva. Vektor centara  $(\mathbf{t}_j)$  neurona skrivenog sloja određuje se na temelju uzoraka za učenje. Uzorci za učenje svake klasifikacijske skupine dijele se na manje grupe uzoraka čije srednje vrijednosti čine centre tih grupa. Svaki neuron skrivenog sloja opisan je jednim takvim centrom. Što se tiče aktivacijske funkcije neurona skrivenog sloja, ona u slučaju ove vrste mreža mora biti odabrana iz skupine radijalnih baznih funkcija po kojima su mreže i dobile naziv. Radijalne bazne funkcije predstavljaju klasu funkcija čije su karakteristike monotono rastuće ili padajuće s obzirom na svoje središte. Njihova je primjena nužna, jer će prema Micchellijevom teoremu [77] regularnost matrice učenja ili matrice vrijednosti radijalnih baznih funkcija ( $\mathbf{H}$ ), a koja osigurava funkcionalnost RBF mreže, biti ostvarena ukoliko je prva derivacija aktivacijske funkcije u potpunosti monotona. Radijalne bazne funkcije zadovoljavaju navedeni uvjet. Invertibilnost matrice  $\mathbf{H}$  nužna je za izračunavanje težinskih parametara, tj. provedbe cjelokupnog postupka učenja. Iako postoji niz RBF funkcija koje zadovoljavaju gornji uvjet, u ovom radu je primijenjena najčešće korištena Gaussova aktivacijska funkcija. U nastavku je prikazan matematički model RBF mreže.

Prikaz matematičkog modela odabrane strukture RBF mreže za klasifikaciju započinjemo definiranjem veza između neurona izlaznog i skrivenog sloja:

$$O_w(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^K h(r_{ij})c_{jw}, \quad w = 1, \dots, M, \quad i = 1, \dots, N, \quad (5.1)$$

gdje je  $O_w$  element  $w$ -tog izlaznog neurona koji ovisi o ulaznom vektoru ( $\mathbf{x}$ ) sastavljenom od elemenata svih ulaznih neurona u  $i$ -tom koraku ( $i$ -ti uzorak za učenje),  $h(\bullet)$  aktivacijska funkcija,  $r_{ij}$  Mahalanobisova udaljenost između  $i$ -tih elemenata ulaznih neurona i elemenata  $j$ -tog vektora centra,  $c_{jw}$  težinski faktor koji povezuje  $j$ -i neuron sakrivenog sloja i  $w$ -ti izlazni neuron,  $K$  broj neurona sakrivenog sloja,  $M$  broj izlaznih, a  $L$  broj ulaznih neurona. Aktivacijska je funkcija izvedena u formi Gaussove funkcije oblika

$$h(r_{ij}) = H_{ij} = e^{-\frac{1}{2}r_{ij}^2}, \quad (5.2)$$

gdje je  $H_{ij}$  element matrice vrijednosti radijalnih baznih funkcija  $\mathbf{H}$ . Veza između elemenata ulaznih neurona i klasifikacijskih skupina ili, preciznije, udaljenost između svih  $N$  uzoraka za učenje i centara neurona sakrivenog sloja koji pripadaju svim razmatranim klasifikacijskim skupinama određena je Mahalanobisovom udaljenošću. Kvadratna Mahalanobisova udaljenost računa se prema izrazu

$$r_{ij}^2 = (\mathbf{x}_i - \mathbf{t}_j)^T \Sigma_j^{-1} (\mathbf{x}_i - \mathbf{t}_j), \quad (5.3)$$

gdje je  $\Sigma_j$  kovarijantna matrica definirana na temelju grupe uzoraka određene klasifikacijske skupine, koji su korišteni u izračunu  $j$ -og neurona (vektor centara,  $\mathbf{t}_j$ ) skrivenog sloja. Pri tome je za svaku klasifikacijsku skupinu potrebno odrediti niz kovarijantnih matrica koji je jednak broju grupa na koje je skupina podijeljena. Drugim riječima, bez obzira na to je li određena klasifikacijska skupina opisana s jednim ili, najčešće, više centara, svaki će centar te klasifikacijske skupine biti dodatno opisan i vlastitom kovarijantnom matricom. Prema [78], njezin je izgled definiran u formi matrice s ne-nula elementima na glavnoj dijagonali, a ostali su elementi jednaki nuli:

$$\Sigma_j = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_L^2 \end{bmatrix}, \quad (5.4)$$

gdje su elementi vektora  $\sigma$  određeni prema izrazu

$$\sigma_g |_j = 0,5 \cdot \min \|t_g |_j - t_g |_p\|, p = j = 1, \dots, K, p \neq j, \quad (5.5)$$

pri čemu je  $t_g |_j$   $g$ -ta komponenta vektora centra  $j$ -og neurona skrivenog sloja, a  $t_g |_p$   $g$ -ta komponenta svih  $p$  preostalih vektora centara neurona skrivenog sloja.

Ovako definirana kovarijantna matrica može biti singularna samo u slučaju da je barem jedna od vrijednosti na glavnoj dijagonali jednaka nuli. U tom se slučaju nula elementi mogu zamijeniti nekom proizvoljno malom vrijednosti koja neće utjecati na rezultat, ali će omogućiti invertibilnost matrice.

Izraz (5.6) može se zapisati u matricnoj formi

$$\mathbf{O} = \mathbf{H}\mathbf{C}, \quad (5.7)$$

gdje je  $\mathbf{O}$  matrica izlaza ( $L \times M$ ),  $\mathbf{H}$  je matrica vrijednosti radijalnih baznih funkcija ili matrica učenja ( $L \times K$ ), a  $\mathbf{C}$  je matrica težinskih faktora ( $K \times M$ ). Matrica težinskih faktora može se izračunati množenjem izraza (5.8) s inverzom kvadratne matrice  $\mathbf{H}$  s lijeve strane

$$\mathbf{C} = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{O}, \quad (5.9)$$

odnosno pseudoinverzom pravokutne matrice  $\mathbf{H}$

$$\mathbf{C} = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{O}, \quad (5.10)$$

gdje je  $\mathbf{H}^+$  Moore-Penroseov pseudoinverz matrice koji se računa prema izrazu

$$\mathbf{H}^+ = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T. \quad (5.11)$$

## 5.2 Učenje i testiranje mreže

Zadatak svake neuronske mreže je kvalitetno preslikavanje ulaznih na željene izlazne vrijednosti. Pritom navedeni cilj mora biti ispunjen kako u fazi učenja, tako i u fazi naknadnog korištenja mreže. Učenje mreže treba biti izvedeno na način da se postignu najbolja generalizacijska svojstva, tj. kvalitetni odziv na bilo koju kombinaciju ulaznih vrijednosti iz područja učenja. U tom je smislu potrebno osigurati dovoljan broj adekvatnih uzoraka koji kvalitetno opisuju prostor učenja, a odabir konačne strukture mreže temeljiti na rezultatima ostvarenim u fazi testiranja, tj. na uzorcima koji nisu korišteni u učenju.

Korištena metoda učenja RBF mreže spada u skupinu metoda učenja s učiteljem (*supervised learning*). To znači da je mreži u fazi učenja nužno osigurati skup uzoraka (koji predstavljaju klasifikacijske značajke) i informacije o njihovoj pripadnosti nekoj od aktualnih klasifikacijskih skupina. Na temelju poznatih ulaznih vektora i njima pridruženih izlaznih vektora određuje se potrebna struktura mreže. Prije samog izračuna težinskih faktora, koji se izvršava u jednom koraku, potrebno je najprije odrediti parametre vektora centara neurona skrivenog sloja kako bi se mogla izračunati matrica učenja  $H$ . Postupak učenja se dakle zasniva na određivanju sljedećih parametara:

- $K$   $L$ -dimenzionalnih vektora centara  $t_j$  neurona skrivenog sloja,
- $K \times L \times L$  dimenzionalnih kovarijantnih matrica  $\Sigma_j$  neurona skrivenog sloja,  $i$
- $K \times M$  dimenzionalne matrice težinskih faktora  $C$  izlaznog sloja.

Broj neurona skrivenog sloja ( $K$ ) može biti jednak ili manji od broja uzoraka za učenje ( $N$ ). U ovom je slučaju skriveni sloj mreže određen tako da je svakom uzorku za učenje pridijeljen jedan neuron skrivenog sloja ( $K=N$ ). To je izvedeno na način da je razmatrani uzorak za učenje postao centar tog pripadajućeg neurona ( $t_j = x_i, i=j=1, \dots, N$ ).

Postupak učenja definiran je u pet koraka:

1. Odrede se klasifikacijske značajke i skupine te se uzorci za učenje zatim razvrstaju po klasifikacijskim skupinama.
2. Za svaki se uzorak za učenje (centar neurona skrivenog sloja) izračuna kovarijantna matrica  $\Sigma_j$ . Kovarijantne matrice računaju se prema izrazima (5.4 i 5.5).
3. Na temelju dobivenih centara i kovarijantnih matrica računaju se Mahalanobisove

udaljenosti (5.3) između svih uzoraka za učenje i centara neurona sakrivenog sloja. Pritom se eventualna pojava nula-elemenata na glavnoj dijagonali zamjenjuje s nekom malom, proizvoljno odabranom vrijednošću koja osigurava regularnost matrice. Mahalanobisove udaljenosti predstavljaju ulazne parametre aktivacijskih funkcija.

4. Korištenjem izraza (5.2) računaju se vrijednosti radijalnih baznih funkcija (aktivacijskih funkcija), tj. elementi matrice učenja  $H$ .
5. Uz poznate (željene) izlaze zapisane u matrici izlaza  $O$  i korištenjem matrice  $H$ , pomoću izraza (5.7) ili (5.8, 5.9), određuju se težinski faktori izlaznog sloja mreže ili matrica  $C$ .

Centri i kovarijantne matrice neurona sakrivenog sloja, kao i težine izlaznog sloja, predstavljaju bazu znanja neuronske mreže o učenom problemu. Jednom definirani u fazi učenja, oni se više ne mijenjaju.

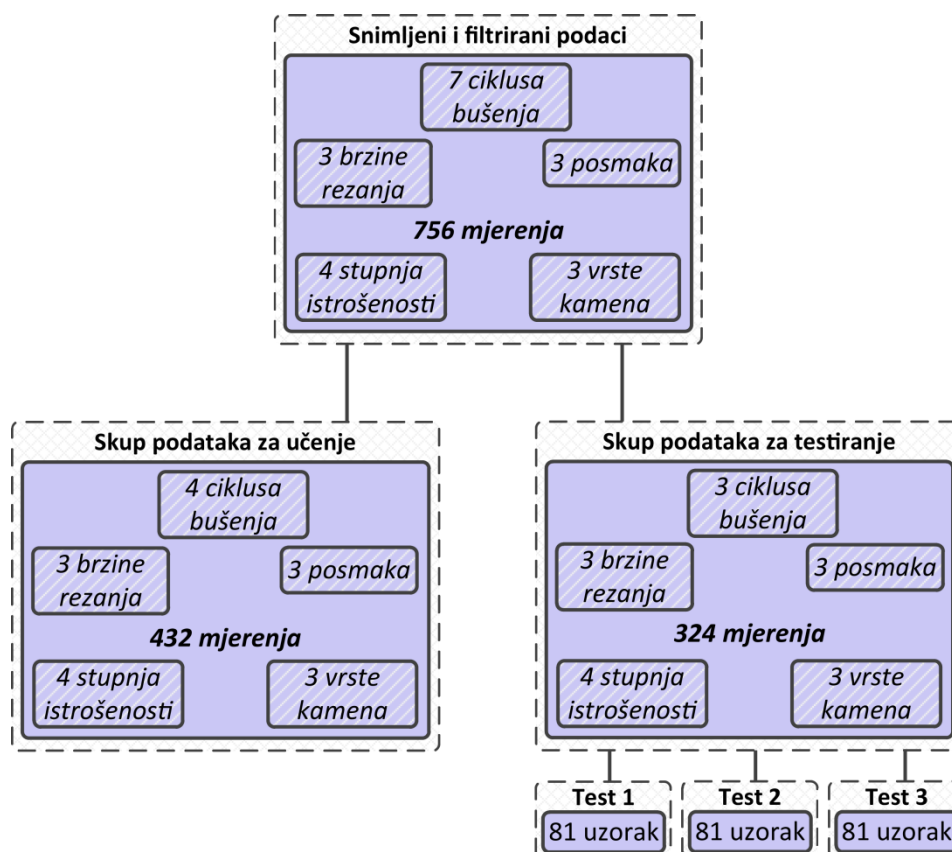
Testiranje ili naknadno korištenje mreže provodi se u četiri sljedeća koraka:

1. Izračunaju se Mahalanobisove udaljenosti svih uzoraka od svih centara neurona sakrivenog sloja.
2. Izračuna se nova matrica vrijednosti radijalnih baznih funkcija  $H$ .
3. Korištenjem izraza (5.12) odrede se pripadnosti uzoraka definiranim klasifikacijskim skupinama.
4. Konačna pripadnost uzorka određenoj skupini ocjenjuje se na temelju izlaznog neurona s najvećom vrijednošću.

### 5.3 Podaci za učenje i testiranje mreže

Generalizacijska svojstva mreže definiraju njenu sposobnost generiranja zadovoljavajućih rezultata na skupu ulaznih podataka različitim u odnosu na skupu podataka pomoću kojeg je učila. Stoga odabir podataka ima značajnu ulogu u procesu učenja mreže [76]. Prema planu glavnog eksperimenta (objašnjenom u poglavlju 4.1) provedeno je 7 ponavljanja za 4 različita stupnja istrošenosti s kombinacijom od 9 različitih parametara obrade bušenjem 3 različite vrste kamena. Po završetku eksperimentalnog dijela rada nastalo je 756 različitih mjerenja koji su potom podijeljeni na:

- Skup podataka za učenje *RBF NM*
- Skup podataka za testiranje *RBF NM*



Slika 5.3 Skup podataka za učenje i testiranje mreže

Skup podataka za učenje sastoji se od 432 različita mjerenja nastala ponavljanjem 4 ciklusa bušenja s 9 različitih kombinacija parametara obrade, 4 stupnja istrošenosti pri bušenju 3 vrste kamenih uzoraka, vidljivo na slici 5.3. Skup podataka za testiranje se sastoji

od mjerenja nastalih prilikom izvođenja 3 ciklusa bušenja, što čini ukupno 324 različita mjerenja. Navedeni skup je dodatno podijeljen na 3 manje grupe ili testa koji sadrže po 81 uzorak, tj. 81 mjerenje.

Klasifikacija trošenja svrdla i tvrdoće kamena provedena je primjenom dva neovisna modela zasnovana na algoritmu umjetne neuronske mreže s radijalnim baznim funkcijama objašnjene u poglavlju 5.1. Odziv mreže za procjenu stupnja istrošenosti svrdla formiran je na način da su uzorci za testiranje svrstani u četiri različite skupine ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  i  $S_4$ ) pa su izlazni neuroni izraženi binarnim vrijednostima, vidljivo u tablici 5.1.

Tablica 5.1 Izlazni neuroni mreže za procjenu stupnja istrošenosti svrdla

| Stupanj istrošenosti | Izlaz iz mreže |   |   |   | Broj izlaza |
|----------------------|----------------|---|---|---|-------------|
| $S_1$                | 1              | 0 | 0 | 0 | 4           |
| $S_2$                | 0              | 1 | 0 | 0 | 4           |
| $S_3$                | 0              | 0 | 1 | 0 | 4           |
| $S_4$                | 0              | 0 | 0 | 1 | 4           |

Odziv mreže za procjenu tvrdoće kamena formiran je na isti način kao odziv mreže za procjenu stupnja istrošenosti s tim da su uzorci za testiranje svrstani u tri različite grupe ( $K_1$ ,  $K_2$  i  $K_3$ ), vidljivo u tablici 5.2.

Tablica 5.2 Izlazni neuroni mreže za procjenu tvrdoće kamena

| Vrsta kamena | Izlaz iz mreže |   |   | Broj izlaza |
|--------------|----------------|---|---|-------------|
| $K_1$        | 1              | 0 | 0 | 3           |
| $K_2$        | 0              | 1 | 0 | 3           |
| $K_3$        | 0              | 0 | 1 | 3           |



## 5.4 Model stupnja istrošenosti svrdla

Modeliranje procjene stupnja istrošenosti svrdla u prvoj je fazi provedeno korištenjem značajki izdvojenih iz svake vrste snimljenih signala procesa (sile, struje, akustična emisija i vibracije). Značajke su analizirane individualno korištenjem parametra uspješnosti klasifikacije ( $UK$ ) definiranog izrazom:

$$UK = \frac{\text{Ispitni klasifikacijski uzorci}}{\text{Ukupni broj uzoraka}} * 100 [\%] \quad (5.13)$$

Značajke koje su zadovoljile prethodno definiranu graničnu vrijednost navedenog parametra međusobno su dodatno kombinirane u cilju postizanja robusnijeg modela trošenja. U zadnjoj je fazi modeliranja, a iz prethodno navedenog razloga, analizirana primjena kombinacija najboljih kombinacija svih vrsta značajki.

### 5.4.1 Klasifikacija stupnja istrošenosti značajkama sila i jakosti struja pogonskih motora

Iz prethodno snimljenih signala sila rezanja izdvojeno je nekoliko značajki u vremenskom i frekvencijskom području koje su detaljnije objašnjene u poglavlju 4.3. Navedene značajke uz parametre obrade (brzinu rezanja i posmak) su korištene kao ulazni neuroni mreže. U tablici 5.3 prikazani su rezultati uspješnosti klasifikacije istrošenosti svrdla za sve značajke sila rezanja i njihove kombinacije.

Tablica 5.3 Rezultati klasifikacije stupnja istrošenosti svrdla dobiveni značajkama sila rezanja

| Značajke sila rezanja                             | Uspješnost klasifikacije ( $UK$ ), % |       |       |              |           |           |           |           |
|---|--------------------------------------|-------|-------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|   | $T_1$                                | $T_2$ | $T_3$ | $T_{SR}$     | $S_{1SR}$ | $S_{2SR}$ | $S_{3SR}$ | $S_{4SR}$ |
| $(F_Z)_{MAX}$                                     | 62,04                                | 50,93 | 54,63 | 55,86        | 61,73     | 46,91     | 49,38     | 65,43     |
| $(F_R)_{MAX}$                                     | 63,89                                | 49,07 | 52,78 | 55,25        | 56,79     | 49,38     | 50,62     | 64,20     |
| $(F_Z)_{MAX} + (F_R)_{MAX}$                       | 62,96                                | 49,07 | 52,78 | 54,94        | 59,26     | 46,91     | 48,15     | 65,43     |
| $F_Z(f_v)$  | 69,44                                | 52,78 | 50,93 | 57,72        | 41,98     | 60,49     | 65,43     | 62,96     |
| $F_Z(f_o)$  | 28,70                                | 25,93 | 26,85 | 27,16        | 32,10     | 24,69     | 29,63     | 22,22     |
| $F_Z(f_v) + F_Z(f_o)$                             | 73,15                                | 61,11 | 65,74 | 66,67        | 65,43     | 61,73     | 65,43     | 74,07     |
| $(F_Z)_{MAX} + (F_R)_{MAX} + F_Z(f_v) + F_Z(f_o)$ | 70,37                                | 74,07 | 66,67 | <b>70,37</b> | 67,90     | 64,20     | 71,60     | 77,78     |

Plava polja u tablici označavaju značajke iz vremenskog područja, dok su crvena polja značajke u frekvencijskom području.

Vrijednosti stupaca  $T_1$ ,  $T_2$  i  $T_3$  predstavljaju uspješnost klasifikacije temeljene na pojedinoj ili grupi značajki unutar skupa podataka pojedinog testa. Vrijednosti unutar stupaca  $S_{1SR}...S_{4SR}$  prikazuju srednje vrijednosti uspješnosti klasifikacije pojedinog stupnja istrošenosti za sve kombinacije parametara obrade, na svim vrstama kamena unutar tri testa. Stupac  $T_{SR}$  označava srednje vrijednosti uspješnosti klasifikacije testova  $T_1$ ,  $T_2$  i  $T_3$ .

Pojedina značajka ili grupa značajki sila rezanja u vremenskom području, rezultirale su uspješnošću klasifikacije od oko 55 %. Pri tome su navedene značajke pokazale bolje rezultate pri klasifikaciji stupnja istrošenosti  $S_1$  i  $S_4$ , dok je kod stupnja istrošenosti  $S_2$  i  $S_3$  rezultat bio nešto lošiji.

Značajka snage spektralne komponente sile  $F_z$  na frekvenciji oštrice  $F_z(f_0)$  daje bitno lošije rezultate od značajke snage spektralne komponente sile  $F_z$  na frekvenciji vrtnje  $F_z(f_v)$ . Međutim, njihova kombinacija rezultira nešto boljom uspješnosti klasifikacije koja iznosi oko 66,67 %. Najbolji rezultat daju kombinacije značajki sila rezanja iz vremenskog i frekvencijskog područja čija je uspješnost klasifikacije oko 70,37 %.

Tablica 5.4 Rezultati klasifikacije stupnja istrošenosti svrdla dobiveni sa značajkama jakosti struja pogonskih motora Z osi i glavnog vretena

| Značajke jakosti struja pogonskih motora Z osi i glavnog vretena | Uspješnost klasifikacije (UK), % |       |       |              |           |           |           |           |
|--|----------------------------------|-------|-------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|  | $T_1$                            | $T_2$ | $T_3$ | $T_{SR}$     | $S_{1SR}$ | $S_{2SR}$ | $S_{3SR}$ | $S_{4SR}$ |
| $( I_z )_{MAX}$  | 54,63                            | 57,41 | 51,85 | 54,63        | 37,04     | 45,68     | 59,26     | 76,54     |
| $(I_{GV})_{MAX}$   | 47,22                            | 36,11 | 35,19 | 39,51        | 28,40     | 46,91     | 32,10     | 50,62     |
| $( I_z )_{MAX} + (I_{GV})_{MAX}$                                 | 67,59                            | 63,89 | 63,89 | 65,12        | 70,37     | 54,32     | 58,02     | 77,78     |
| $I_{GV}(f_v)$  | 34,26                            | 38,89 | 39,81 | 37,65        | 44,44     | 25,93     | 16,05     | 64,20     |
| $I_{GV}(f_0)$  | 28,70                            | 27,78 | 31,48 | 29,32        | 28,40     | 18,52     | 33,33     | 37,04     |
| $I_{GV}(f_v) + I_{GV}(f_0)$                                      | 47,22                            | 46,30 | 44,44 | 45,99        | 55,56     | 28,40     | 28,40     | 71,60     |
| $( I_z )_{MAX} + (I_{GV})_{MAX} + I_{GV}(f_v) + I_{GV}(f_0)$     | 62,04                            | 62,96 | 72,22 | 65,74        | 69,14     | 56,79     | 58,02     | 79,01     |
| $F_{SVE} + I_{SVE}$  | 72,22                            | 74,07 | 65,74 | <b>70,68</b> | 72,84     | 56,79     | 69,14     | 83,95     |

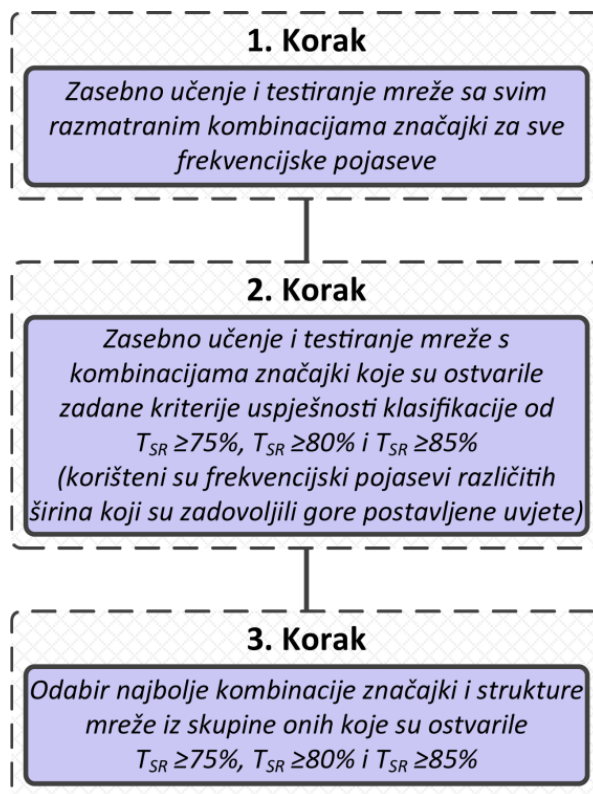
Analiza kombinacija značajki jakosti struja pogonskih motora provedena je na sličan način kao i analiza značajki sila rezanja. Uz parametre obrade kao ulazi u mrežu korištene su po dvije značajke iz vremenskog i frekvencijskog područja te njihove kombinacije. U tablici 5.4 prikazani su rezultati uspješnosti klasifikacije istrošenosti svrdla za značajke jakosti struja posmičnog motora Z osi i glavnog motora.

Značajka jakosti struje pogonskog motora Z osi  $(|I_z|)_{MAX}$  rezultirala je uspješnošću klasifikacije od 54,63% što potvrđuje dobru korelaciju sa značajkom maksimalne aksijalne sile  $(F_z)_{MAX}$ . Pri tome je navedena značajka pokazala višu uspješnost klasifikacije pri stupnju istrošenosti  $S_3$  i  $S_4$  dok su kod klasifikacije  $S_1$  i  $S_2$  rezultati nešto lošiji. Kombinacija značajki jakosti struja pogonskih motora Z osi i glavnog vretena iz vremenskog područja rezultirala je značajno većom uspješnošću klasifikacije u odnosu na značajke iz frekvencijskog područja.

Kombinacijom značajki iz vremenskog i frekvencijskog područja postiže se uspješnost klasifikacije od oko 65 %, što je za 5 % lošije u odnosu na istu kombinaciju značajki sila rezanja. Pri tome su navedene značajke ponovno ostvarile bolje rezultate pri klasifikaciji stupnja istrošenosti  $S_1$  i  $S_4$  u odnosu na  $S_2$  i  $S_3$ .

### 5.4.2 Klasifikacija stupnja istrošenosti značajkama vibracija

Analiza značajki izdvojenih iz signala vibracija provedena je u nekoliko koraka (Slika 5.4).



Slika 5.4 Analiza podataka iz signala vibracija

U prvom je koraku analizirana korelacija između svake značajke trošenja i stupnja istrošenosti alata. Pritom je provedena zasebna analiza za svaku značajku, tj. kombinaciju posmaka, brzine rezanja i energije spektra signala vibracija u smjeru osi X, Y i Z za svaki odabrani frekvencijski pojas. Popis oznaka navedenih značajki i njihovih kombinacija dan je tablicom 5.5. Nakon provedenog prvog koraka analize podataka, dobiveni su rezultati klasifikacije s obzirom na 23 različite širine frekvencijskih pojaseva, od kojih su najbolje vrijednosti svakog pojasa prikazane u tablici 5.6. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da su pojedine kombinacije značajki već u prvom koraku ostvarile uspješnost klasifikacije od preko 90 %. Također se može zaključiti da je najbolji rezultat ostvaren primjenom kombinacije značajki energija signala snimljenih u sve tri osi (XYZ) u pojasu od 4505 Hz do 5000 Hz ( $T_{SR}=93,52\%$ ).

Tablica 5.5 Kombinacije značajki korištene u prvom koraku analize podataka vibracija

| Oznaka kombinacije značajki | Ulazi u mrežu |   | Broj ulaza u mrežu                           |   |
|-----------------------------|---------------|---|--|---|
|                             | $v_c$         | f |  |   |
| X                           | $v_c$         | f | $E(VIB_x)$                                   | 3 |
| Y                           | $v_c$         | f | $E(VIB_y)$                                   | 3 |
| Z                           | $v_c$         | f | $E(VIB_z)$                                   | 3 |
| XY                          | $v_c$         | f | $E(VIB_x), E(VIB_y)$                         | 4 |
| YZ                          | $v_c$         | f | $E(VIB_y), E(VIB_z)$                         | 4 |
| XZ                          | $v_c$         | f | $E(VIB_x), E(VIB_z)$                         | 4 |
| XYZ                         | $v_c$         | f | $E(VIB_x), E(VIB_y), E(VIB_z)$               | 5 |
| $XYZ_{SUM}$                 | $v_c$         | f | $E(VIB_{xyz})$                               | 3 |
| $XYZ+XYZ_{SUM}$             | $v_c$         | f | $E(VIB_x), E(VIB_y), E(VIB_z), E(VIB_{xyz})$ | 6 |
| $XY_{SUM}$                  | $v_c$         | f | $E(VIB_{xy})$                                | 3 |
| $YZ_{SUM}$                  | $v_c$         | f | $E(VIB_{yz})$                                | 3 |
| $XZ_{SUM}$                  | $v_c$         | f | $E(VIB_{xz})$                                | 3 |
| $XY+XY_{SUM}$               | $v_c$         | f | $E(VIB_x), E(VIB_y), E(VIB_{xy})$            | 5 |
| $YZ+YZ_{SUM}$               | $v_c$         | f | $E(VIB_y), E(VIB_z), E(VIB_{yz})$            | 5 |
| $XZ+XZ_{SUM}$               | $v_c$         | f | $E(VIB_x), E(VIB_z), E(VIB_{xz})$            | 5 |

Tablica 5.6 Najbolji rezultat kombinacija značajki svakog od odabranih širina frekvencijskih pojaseva nakon prvog koraka analize signala vibracija

| Kombinacija značajki | $[f_D, f_G],$<br>Hz | $f_D,$ Hz | $f_G,$ Hz | Uspješnost klasifikacije (UK), % |           |           |           |           |
|----------------------|---------------------|-----------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                      |                     |           |           | $T_{SR}$                         | $S_{1SR}$ | $S_{2SR}$ | $S_{3SR}$ | $S_{4SR}$ |
| $XYZ+XYZ_{SUM}$      | 5                   | 4715      | 4720      | 85,49                            | 80,25     | 85,19     | 86,42     | 90,12     |
| $XYZ+XYZ_{SUM}$      | 10                  | 4715      | 4725      | 88,58                            | 80,25     | 79,01     | 96,30     | 98,77     |
| XYZ                  | 20                  | 4705      | 4725      | 88,58                            | 85,19     | 86,42     | 87,65     | 95,06     |
| XYZ                  | 30                  | 4655      | 4685      | 92,28                            | 92,59     | 90,12     | 96,30     | 90,12     |
| XYZ                  | 40                  | 4645      | 4685      | 91,98                            | 90,12     | 87,65     | 92,59     | 97,53     |
| $XYZ+XYZ_{SUM}$      | 50                  | 4805      | 4855      | 91,98                            | 87,65     | 90,12     | 96,30     | 93,83     |
| $XYZ+XYZ_{SUM}$      | 60                  | 4805      | 4865      | 90,74                            | 83,95     | 91,36     | 95,06     | 92,59     |
| XYZ                  | 70                  | 4625      | 4695      | 91,67                            | 87,65     | 92,59     | 90,12     | 96,30     |
| XYZ                  | 80                  | 4645      | 4725      | 90,43                            | 80,25     | 93,83     | 90,12     | 97,53     |
| XYZ                  | 90                  | 4595      | 4685      | 91,36                            | 87,65     | 88,89     | 95,06     | 93,83     |
| $YZ+YZ_{SUM}$        | 100                 | 4605      | 4705      | 91,05                            | 87,65     | 83,95     | 96,30     | 96,30     |
| XYZ                  | 200                 | 4605      | 4805      | 90,74                            | 85,19     | 92,59     | 91,36     | 93,83     |
| XYZ                  | 300                 | 4505      | 4805      | 92,90                            | 90,12     | 91,36     | 93,83     | 96,30     |
| XYZ                  | 400                 | 4405      | 4805      | 91,36                            | 82,72     | 95,06     | 93,83     | 93,83     |
| XYZ                  | 500                 | 4505      | 5000      | 93,52                            | 96,30     | 87,65     | 95,06     | 95,06     |

|                      |      |      |      |       |       |       |       |       |
|----------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| XYZ                  | 600  | 4205 | 4805 | 86,73 | 77,78 | 87,65 | 90,12 | 91,36 |
| XYZ                  | 700  | 4205 | 4905 | 87,04 | 75,31 | 86,42 | 93,83 | 92,59 |
| XYZ                  | 800  | 3205 | 4005 | 91,98 | 90,12 | 85,19 | 93,83 | 98,77 |
| XYZ                  | 900  | 1805 | 2705 | 83,95 | 97,53 | 81,48 | 77,78 | 79,01 |
| XYZ                  | 1000 | 3005 | 4005 | 87,65 | 77,78 | 83,95 | 93,83 | 95,06 |
| XY                   | 1500 | 3005 | 4505 | 82,41 | 76,54 | 70,37 | 91,36 | 91,36 |
| XYZ                  | 2500 | 5    | 2505 | 67,90 | 61,73 | 64,20 | 71,60 | 74,07 |
| XY+XY <sub>SUM</sub> | 5000 | 5    | 5000 | 68,83 | 72,84 | 67,90 | 75,31 | 59,26 |

Nakon provedene analize uspješnosti klasifikacije preko odabranih kombinacija značajki po svakom od unaprijed definiranih frekvencijskih pojaseva pristupilo se drugom koraku analize podataka. Pri tome su korištene one kombinacije značajki koje su zadovoljile postavljene kriterije odabira  $T_{SR} \geq 75\%$ ,  $T_{SR} \geq 80\%$  i  $T_{SR} \geq 85\%$  (popis njihovih oznaka dan je tablicom 5.7). One značajke koje su zadovoljile postavljeni kriterij, a pritom su bile vezane uz frekvencijske pojaseve koji su se djelomično ili potpuno preklapali s pojasevima vezanim uz već odabrane značajke, također su zanemarene. Opisani pristup analize podataka u drugom koraku odabran je zbog pretpostavke da će se kombinacijom najboljih značajki dobivenih u prvom koraku realizirati robusniji i pouzdaniji model klasifikacije istrošenosti alata [76].

Tablica 5.7 Kombinacije značajki korištene u drugom koraku analize podataka vibracija

| Oznaka kombinacije značajki | Ulazi u mrežu |   | Broj ulaza u mrežu   |        |
|-----------------------------|---------------|---|--|--------|
| X                           | $v_c$         | f | $E(VIB_X)_1 \dots E(VIB_X)_n$  | $2+n$  |
| Y                           | $v_c$         | f | $E(VIB_Y)_1 \dots E(VIB_Y)_n$  | $2+n$  |
| Z                           | $v_c$         | f | $E(VIB_Z)_1 \dots E(VIB_Z)_n$  | $2+n$  |
| XY                          | $v_c$         | f | $E(VIB_X)_1 \dots E(VIB_X)_n, E(VIB_Y)_1 \dots E(VIB_Y)_n$   | $2+2n$ |
| YZ                          | $v_c$         | f | $E(VIB_Y)_1 \dots E(VIB_Y)_n, E(VIB_Z)_1 \dots E(VIB_Z)_n$   | $2+2n$ |
| XZ                          | $v_c$         | f | $E(VIB_X)_1 \dots E(VIB_X)_n, E(VIB_Z)_1 \dots E(VIB_Z)_n$   | $2+2n$ |
| XYZ                         | $v_c$         | f | $E(VIB_X)_1 \dots E(VIB_X)_n, E(VIB_Y)_1 \dots E(VIB_Y)_n, E(VIB_Z)_1 \dots E(VIB_Z)_n$                                      | $2+3n$ |
| XYZ <sub>SUM</sub>          | $v_c$         | f | $E(VIB_{XYZ})_1 \dots E(VIB_{XYZ})_n$  | $2+n$  |
| XYZ+XYZ <sub>SUM</sub>      | $v_c$         | f | $E(VIB_X)_1 \dots E(VIB_X)_n, E(VIB_Y)_1 \dots E(VIB_Y)_n, E(VIB_Z)_1 \dots E(VIB_Z)_n, E(VIB_{XYZ})_1 \dots E(VIB_{XYZ})_n$ | $2+4n$ |
| XY <sub>SUM</sub>           | $v_c$         | f | $E(VIB_{XY})_1 \dots E(VIB_{XY})_n$  | $2+n$  |
| YZ <sub>SUM</sub>           | $v_c$         | f | $E(VIB_{YZ})_1 \dots E(VIB_{YZ})_n$  | $2+n$  |
| XZ <sub>SUM</sub>           | $v_c$         | f | $E(VIB_{XZ})_1 \dots E(VIB_{XZ})_n$  | $2+n$  |
| XY+XY <sub>SUM</sub>        | $v_c$         | f | $E(VIB_X)_1 \dots E(VIB_X)_n, E(VIB_Y)_1 \dots E(VIB_Y)_n, E(VIB_{XY})_1 \dots E(VIB_{XY})_n$                                | $2+3n$ |

|                      |                |   |  |      |
|----------------------|----------------|---|--|------|
| YZ+YZ <sub>SUM</sub> | v <sub>C</sub> | f | E(VIB <sub>Y</sub> ) <sub>1...n</sub> , E(VIB <sub>Z</sub> ) <sub>1...n</sub> , E(VIB <sub>YZ</sub> ) <sub>1...n</sub> | 2+3n |
| XZ+XZ <sub>SUM</sub> | v <sub>C</sub> | f | E(VIB <sub>X</sub> ) <sub>1...n</sub> , E(VIB <sub>Z</sub> ) <sub>1...n</sub> , E(VIB <sub>XZ</sub> ) <sub>1...n</sub> | 2+3n |

Rezultati klasifikacije stupnja istrošenosti prema uvjetima  $T_{SR} \geq 75\%$ ,  $T_{SR} \geq 80\%$  i  $T_{SR} \geq 85\%$  dobiveni u drugom koraku analize dani su tablicama 5.8, 5.9 i 5.10. Uz postojeću oznaku značajki dodana je još i oznaka prethodno navedenog uvjeta odabira značajke (npr. oznaka XYZ<sub>75</sub> predstavlja kombinaciju značajki XYZ koje su zadovoljile uvjet  $T_{SR} \geq 75\%$ ).

Tablica 5.8 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki signala vibracija uz uvjet  $T_{SR} \geq 75\%$

| Kombinacija značajki                    | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                 |                  |                  |                  |                  |
|---|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|   | T <sub>1</sub>                   | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | S <sub>1SR</sub> | S <sub>2SR</sub> | S <sub>3SR</sub> | S <sub>4SR</sub> |
| (Y) <sub>75</sub>                       | 93,52                            | 90,74          | 88,89          | 91,05           | 87,65            | 88,89            | 88,89            | 98,77            |
| (Z) <sub>75</sub>                       | 70,37                            | 71,30          | 78,70          | 73,46           | 40,74            | 69,14            | 92,59            | 91,36            |
| (XY) <sub>75</sub>                      | 97,22                            | 97,22          | 99,07          | 97,84           | 95,06            | 97,53            | 98,77            | 100,00           |
| (YZ) <sub>75</sub>                      | 95,37                            | 88,89          | 87,96          | 90,74           | 97,53            | 87,65            | 86,42            | 91,36            |
| (XZ) <sub>75</sub>                      | 96,30                            | 97,22          | 92,59          | 95,37           | 95,06            | 91,36            | 96,30            | 98,77            |
| (XYZ) <sub>75</sub>                     | 93,52                            | 94,44          | 95,37          | 94,44           | 86,42            | 95,06            | 96,30            | 100,00           |
| (XYZ <sub>SUM</sub> ) <sub>75</sub>     | 89,81                            | 90,74          | 82,41          | 87,65           | 82,72            | 82,72            | 95,06            | 90,12            |
| (XYZ+XYZ <sub>SUM</sub> ) <sub>75</sub> | 97,22                            | 96,30          | 91,67          | 95,06           | 92,59            | 92,59            | 97,53            | 97,53            |
| (XY <sub>SUM</sub> ) <sub>75</sub>      | 88,89                            | 92,59          | 91,67          | 91,05           | 81,48            | 93,83            | 90,12            | 98,77            |
| (YZ <sub>SUM</sub> ) <sub>75</sub>      | 92,59                            | 88,89          | 82,41          | 87,96           | 83,95            | 74,07            | 95,06            | 98,77            |
| (XZ <sub>SUM</sub> ) <sub>75</sub>      | 91,67                            | 79,63          | 84,26          | 85,19           | 83,95            | 77,78            | 92,59            | 86,42            |
| (XY+XY <sub>SUM</sub> ) <sub>75</sub>   | 93,52                            | 94,44          | 97,22          | 95,06           | 96,30            | 87,65            | 96,30            | 100,00           |
| (YZ+YZ <sub>SUM</sub> ) <sub>75</sub>   | 90,74                            | 93,52          | 91,67          | 91,98           | 96,30            | 86,42            | 91,36            | 93,83            |
| (XZ+XZ <sub>SUM</sub> ) <sub>75</sub>   | 91,67                            | 95,37          | 86,11          | 91,05           | 91,36            | 83,95            | 90,12            | 98,77            |

Tablica 5.9 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki signala vibracija uz uvjet  $T_{SR} \geq 80\%$

| Kombinacija značajki                | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                 |                  |                  |                  |                  |
|-------------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                                     | T <sub>1</sub>                   | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | S <sub>1SR</sub> | S <sub>2SR</sub> | S <sub>3SR</sub> | S <sub>4SR</sub> |
| (Y) <sub>80</sub>                   | 87,04                            | 82,41          | 85,19          | 84,88           | 77,78            | 83,95            | 88,89            | 88,89            |
| (Z) <sub>80</sub>                   | 86,11                            | 86,11          | 81,48          | 84,57           | 90,12            | 64,20            | 93,83            | 90,12            |
| (XY) <sub>80</sub>                  | 87,96                            | 93,52          | 89,81          | 90,43           | 96,30            | 82,72            | 85,19            | 97,53            |
| (YZ) <sub>80</sub>                  | 97,22                            | 95,37          | 93,52          | 95,37           | 96,30            | 91,36            | 93,83            | 100,00           |
| (XZ) <sub>80</sub>                  | 96,30                            | 94,44          | 95,37          | 95,37           | 98,77            | 88,89            | 95,06            | 98,77            |
| (XYZ) <sub>80</sub>                 | 97,22                            | 96,30          | 94,44          | 95,99           | 91,36            | 97,53            | 96,30            | 98,77            |
| (XYZ <sub>SUM</sub> ) <sub>80</sub> | 88,89                            | 91,67          | 87,04          | 89,20           | 83,95            | 85,19            | 97,53            | 90,12            |

|                        |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $(XYZ+XYZ_{SUM})_{80}$ | 93,52 | 93,52 | 91,67 | 92,90 | 91,36 | 90,12 | 91,36 | 98,77 |
| $(XY_{SUM})_{80}$      | 92,59 | 92,59 | 86,11 | 90,43 | 82,72 | 90,12 | 92,59 | 96,30 |
| $(YZ_{SUM})_{80}$      | 75,93 | 78,70 | 74,07 | 76,23 | 33,33 | 83,95 | 96,30 | 91,36 |
| $(XZ_{SUM})_{80}$      | 82,41 | 81,48 | 86,11 | 83,33 | 91,36 | 70,37 | 86,42 | 85,19 |
| $(XY+XY_{SUM})_{80}$   | 93,52 | 91,67 | 86,11 | 90,43 | 88,89 | 95,06 | 79,01 | 98,77 |
| $(YZ+YZ_{SUM})_{80}$   | 93,52 | 91,67 | 91,67 | 92,28 | 87,65 | 92,59 | 92,59 | 96,30 |
| $(XZ+XZ_{SUM})_{80}$   | 94,44 | 93,52 | 88,89 | 92,28 | 93,83 | 86,42 | 91,36 | 97,53 |

Tablica 5.10 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki signala vibracija uz uvjet  $T_{SR} \geq 85\%$

| Kombinacija značajki   | Uspješnost klasifikacije (UK), % |       |       |          |           |           |           |           |
|------------------------|----------------------------------|-------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                        | $T_1$                            | $T_2$ | $T_3$ | $T_{SR}$ | $S_{1SR}$ | $S_{2SR}$ | $S_{3SR}$ | $S_{4SR}$ |
| $(Y)_{85}$             | 88,89                            | 84,26 | 91,67 | 88,27    | 82,72     | 79,01     | 93,83     | 97,53     |
| $(XY)_{85}$            | 91,67                            | 93,52 | 93,52 | 92,90    | 92,59     | 85,19     | 96,30     | 97,53     |
| $(YZ)_{85}$            | 97,22                            | 95,37 | 93,52 | 95,37    | 96,30     | 91,36     | 93,83     | 100,00    |
| $(XZ)_{85}$            | 95,37                            | 92,59 | 91,67 | 93,21    | 95,06     | 86,42     | 93,83     | 97,53     |
| $(XYZ)_{85}$           | 91,67                            | 95,37 | 88,89 | 91,98    | 95,06     | 85,19     | 92,59     | 95,06     |
| $(XYZ_{SUM})_{85}$     | 88,89                            | 83,33 | 85,19 | 85,80    | 86,42     | 65,43     | 92,59     | 98,77     |
| $(XYZ+XYZ_{SUM})_{85}$ | 97,22                            | 92,59 | 91,67 | 93,83    | 95,06     | 93,83     | 88,89     | 97,53     |
| $(XY_{SUM})_{85}$      | 86,11                            | 87,96 | 87,04 | 87,04    | 77,78     | 81,48     | 96,30     | 92,59     |
| $(YZ_{SUM})_{85}$      | 87,96                            | 86,11 | 87,96 | 87,35    | 87,65     | 71,60     | 96,30     | 93,83     |
| $(XY+XY_{SUM})_{85}$   | 91,67                            | 88,89 | 89,81 | 90,12    | 90,12     | 83,95     | 88,89     | 97,53     |
| $(YZ+YZ_{SUM})_{85}$   | 93,52                            | 89,81 | 89,81 | 91,05    | 86,42     | 87,65     | 92,59     | 97,53     |
| $XZ+XZ_{SUM}$          | 93,52                            | 93,52 | 87,04 | 91,36    | 91,36     | 85,19     | 95,06     | 93,83     |

Pregledom rezultata dobivenih kombinacijama značajki koje su ostvarile uvjet  $T_{SR} \geq 75\%$  (tablica 5.8) može se uočiti da je 10 kombinacija značajki (od njih 14) ostvarilo prosječnu uspješnost klasifikacije veću od 90 %. Posebno se izdvaja kombinacija značajki  $(XY)_{75}$  čiji je  $T_{SR} = 97,84\%$ , što je za 15-ak % bolje od rezultata klasifikacije u prvom koraku, a one ujedno predstavljaju najbolji rezultat klasifikacije upotrebom značajki iz signala vibracija. Vrlo slični rezultati ostvareni su i korištenjem preostala dva uvjeta ( $T_{SR} \geq 80\%$ ,  $T_{SR} \geq 85\%$ ), pri čemu je uspješnost klasifikacije iznad 90 % ostvarilo 9, tj. 8 kombinacija značajki (tablice 5.9 i 5.10). Pri tome se najviše ističu kombinacije  $(XYZ)_{80}$  čiji je  $T_{SR} = 95,99\%$  i  $(YZ)_{85}$  čiji je  $T_{SR} = 95,37\%$ . Time je proveden i treći korak analize značajki.

Rezultati ostvareni primjenom tri prethodno navedene najbolje kombinacije značajki dodatno su analizirane za svaku vrstu kamena (tablice 5.11, 5.12 i 5.13).



Tablica 5.11 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla kombinacija značajki (XY)<sub>75</sub>

| Stupanj istrošenosti | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                 |                      |                |                |                 |                      |                |                |                 |
|----------------------|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|
|                      | Kamen K <sub>1</sub>             |                |                |                 | Kamen K <sub>2</sub> |                |                |                 | Kamen K <sub>3</sub> |                |                |                 |
|                      | T <sub>1</sub>                   | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | T <sub>1</sub>       | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | T <sub>1</sub>       | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> |
| S <sub>1</sub>       | 100                              | 88,9           | 88,9           | 92,6            | 100                  | 100            | 100            | 100             | 100                  | 100            | 100            | 100             |
| S <sub>2</sub>       | 88,8                             | 100            | 100            | 96,3            | 88,8                 | 77,7           | 100            | 88,8            | 100                  | 100            | 100            | 100             |
| S <sub>3</sub>       | 100                              | 100            | 100            | 100             | 88,8                 | 100            | 88,8           | 92,5            | 100                  | 100            | 100            | 100             |
| S <sub>4</sub>       | 100                              | 88,8           | 100            | 96,3            | 100                  | 100            | 100            | 100             | 100                  | 88,8           | 100            | 96,3            |

 Tablica 5.12 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla kombinacija značajki (XYZ)<sub>80</sub>

| Stupanj istrošenosti | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                 |                      |                |                |                 |                      |                |                |                 |
|----------------------|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|
|                      | Kamen K <sub>1</sub>             |                |                |                 | Kamen K <sub>2</sub> |                |                |                 | Kamen K <sub>3</sub> |                |                |                 |
|                      | T <sub>1</sub>                   | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | T <sub>1</sub>       | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | T <sub>1</sub>       | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> |
| S <sub>1</sub>       | 88,8                             | 88,8           | 100            | 92,5            | 88,8                 | 88,8           | 66,6           | 81,4            | 88,8                 | 88,8           | 66,6           | 81,4            |
| S <sub>2</sub>       | 100                              | 100            | 100            | 100             | 100                  | 100            | 100            | 100             | 100                  | 100            | 100            | 100             |
| S <sub>3</sub>       | 100                              | 77,7           | 88,8           | 88,8            | 100                  | 77,7           | 88,8           | 88,8            | 100                  | 100            | 100            | 100             |
| S <sub>4</sub>       | 100                              | 100            | 100            | 100             | 100                  | 100            | 100            | 100             | 88,8                 | 100            | 100            | 96,3            |

 Tablica 5.13 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla kombinacija značajki (YZ)<sub>85</sub>

| Stupanj istrošenosti | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                 |                      |                |                |                 |                      |                |                |                 |
|----------------------|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|
|                      | Kamen K <sub>1</sub>             |                |                |                 | Kamen K <sub>2</sub> |                |                |                 | Kamen K <sub>3</sub> |                |                |                 |
|                      | T <sub>1</sub>                   | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | T <sub>1</sub>       | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | T <sub>1</sub>       | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> |
| S <sub>1</sub>       | 77,7                             | 100            | 88,8           | 88,8            | 88,8                 | 88,8           | 88,8           | 88,8            | 100                  | 100            | 100            | 100             |
| S <sub>2</sub>       | 88,8                             | 88,8           | 88,8           | 88,8            | 100                  | 100            | 100            | 100             | 66,6                 | 55,5           | 77,7           | 66,6            |
| S <sub>3</sub>       | 100                              | 100            | 88,8           | 96,3            | 88,8                 | 88,8           | 100            | 92,5            | 100                  | 100            | 100            | 100             |
| S <sub>4</sub>       | 100                              | 100            | 100            | 100             | 100                  | 100            | 100            | 100             | 88,8                 | 100            | 88,8           | 92,6            |

Analizom tih rezultata je vidljivo da vrsta kamena ne utječe na rezultat klasifikacije, tj. da su dobiveni podjednako kvalitetni rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla kod obrade svake vrste kamena. Pritom su navedene kombinacije značajki najbolje rezultate dale klasificiranjem potpuno istrošenog svrdla S<sub>4</sub>, dok su najlošije klasificirale potpuno oštro svrdlo S<sub>1</sub>. Najlošiji rezultat dala je kombinacija značajki (YZ)<sub>85</sub> kod bušenja K<sub>3</sub> uz S<sub>2</sub> s rezultatom od T<sub>SR</sub>=66,6 %.

### 5.4.3 Klasifikacija stupnja istrošenosti značajkama akustične emisije

Postupak analize korelacije stupnja istrošenosti alata i kombinacija značajki izdvojenih iz signala akustične emisije proveden je na isti način kao i prethodno pojašnjena analiza

signala vibracija. Pri tome je za kombinaciju značajki, temeljenih na brzini rezanja, posmaku i energiji spektra signala akustične emisije (tablica 5.14) provedena zasebna analiza za svaki odabrani frekvencijski pojas od 50 kHz do 400 kHz.

Tablica 5.14 Značajke i njihove kombinacije korištene u prvom koraku analize podataka akustične emisije

| Oznaka kombinacije značajki | Ulazi u mrežu |   |       | Broj ulaza u mrežu |
|-----------------------------|---------------|---|-------|--------------------|
| AE                          | $v_c$         | f | E(AE) | 2+n                |

Nakon prvog koraka analize podataka dobiveni su rezultati uspješnosti klasifikacije s obzirom na 6 različitih širina frekvencijskih pojaseva, a najbolji rezultati po svakom pojasu prikazani su u tablici 5.15.

Tablica 5.15 Najbolji rezultati svakog od odabranih širina frekvencijskih pojaseva nakon prvog koraka analize signala akustične emisije

| Značajka | $[f_D, f_G]$ , Hz | $f_D$ , Hz | $f_G$ , Hz | Uspješnost klasifikacije (UK), % |           |           |           |           |
|----------|-------------------|------------|------------|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|          |                   |            |            | $T_{SR}$                         | $S_{1SR}$ | $S_{2SR}$ | $S_{3SR}$ | $S_{4SR}$ |
| AE       | 5000              | 120000     | 125000     | 69,14                            | 58,02     | 67,90     | 64,20     | 86,42     |
|          | 10000             | 60000      | 70000      | 64,51                            | 34,57     | 55,56     | 72,84     | 95,06     |
|          | 15000             | 50000      | 65000      | 71,60                            | 55,56     | 56,79     | 77,78     | 96,30     |
|          | 20000             | 50000      | 70000      | 65,43                            | 44,44     | 50,62     | 72,84     | 93,83     |
|          | 30000             | 50000      | 80000      | 69,75                            | 55,56     | 48,15     | 88,89     | 86,42     |
|          | 40000             | 50000      | 90000      | 70,06                            | 58,02     | 40,74     | 86,42     | 95,06     |

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da su kombinacije značajki u prvom koraku ostvarile uspješnost klasifikacije od približno 65 do 71 %. Najbolji rezultat ostvaren je primjenom značajki energija signala akustične emisije širine frekvencijskog pojasa 15 kHz između 50 i 65 kHz. Iz rezultata se može primijetiti da su izdvojene značajke najosjetljivije na promjene stanja alata u području od 50 kHz do 90 kHz.

Temeljem provedene analize uspješnosti klasifikacije preko odabranih kombinacija značajki po svakom od unaprijed definiranih frekvencijskih pojaseva pristupilo se drugom koraku analize podataka. Iako na isti način kao i kod signala vibracija, u ovom slučaju, s obzirom na nešto lošije rezultate iz prvog koraka, postavljeni kriteriji odabira su iznosili:  $T_{SR} \geq 50\%$ ,  $T_{SR} \geq 55\%$  i  $T_{SR} \geq 60\%$ . Značajke koje su zadovoljile navedene uvjete, uz kombinaciju posmaka i brzine rezanja, predstavljale su ulazne neurone mreže u drugom koraku, (tablica 5.16).

Tablica 5.16 Značajke i njihove kombinacije korištene u drugom koraku analize podataka akustične emisije

| Oznaka kombinacije značajki | Ulazi u mrežu |   |                         | Broj ulaza u mrežu |
|-----------------------------|---------------|---|-------------------------|--------------------|
| AE                          | $v_c$         | f | $E(AE)_1 \dots E(AE)_n$ | 2+n                |

Rezultati klasifikacije stupnja istrošenosti prema uvjetima  $T_{SR} \geq 50\%$ ,  $T_{SR} \geq 55\%$  i  $T_{SR} \geq 60\%$  dobiveni u drugom koraku analize dani su tablicama 5.17, 5.18 i 5.19.

 Tablica 5.17 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki signala akustične emisije uz uvjet  $T_{SR} \geq 50\%$ 

| Kombinacija značajki    | Uspješnost klasifikacije (UK), % |       |       |          |           |           |           |           |
|-------------------------|----------------------------------|-------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                         | $T_1$                            | $T_2$ | $T_3$ | $T_{SR}$ | $S_{1SR}$ | $S_{2SR}$ | $S_{3SR}$ | $S_{4SR}$ |
| $(AE_{5000})_{50}$      | 84,26                            | 87,04 | 86,11 | 85,80    | 82,72     | 77,78     | 82,72     | 100,00    |
| $(AE_{10000})_{50}$     | 84,26                            | 77,78 | 82,41 | 81,48    | 72,84     | 64,20     | 88,89     | 100,00    |
| $(AE_{15000})_{50}$     | 78,70                            | 82,41 | 77,78 | 79,63    | 65,43     | 65,43     | 87,65     | 100,00    |
| $(AE_{20000})_{50}$     | 75,93                            | 78,70 | 75,00 | 76,54    | 54,32     | 64,20     | 87,65     | 100,00    |
| $(AE_{30000})_{50}$     | 68,52                            | 79,63 | 74,07 | 74,07    | 60,49     | 55,56     | 83,95     | 96,30     |
| $(AE_{40000})_{50}$     | 71,30                            | 73,15 | 71,30 | 71,91    | 54,32     | 56,79     | 79,01     | 97,53     |
| $(AE_{RAZLIČITI})_{50}$ | 87,96                            | 87,96 | 90,74 | 88,89    | 90,12     | 75,31     | 90,12     | 100,00    |

 Tablica 5.18 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki signala akustične emisije uz uvjet  $T_{SR} \geq 55\%$ 

| Kombinacija značajki    | Uspješnost klasifikacije (UK), % |       |       |          |           |           |           |           |
|-------------------------|----------------------------------|-------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                         | $T_1$                            | $T_2$ | $T_3$ | $T_{SR}$ | $S_{1SR}$ | $S_{2SR}$ | $S_{3SR}$ | $S_{4SR}$ |
| $(AE_{5000})_{55}$      | 85,19                            | 85,19 | 88,89 | 86,42    | 81,48     | 72,84     | 92,59     | 98,77     |
| $(AE_{10000})_{55}$     | 80,56                            | 87,04 | 75,00 | 80,86    | 66,67     | 67,90     | 88,89     | 100,00    |
| $(AE_{15000})_{55}$     | 83,33                            | 83,33 | 81,48 | 82,72    | 77,78     | 64,20     | 88,89     | 100,00    |
| $(AE_{20000})_{55}$     | 65,74                            | 68,52 | 72,22 | 68,83    | 45,68     | 51,85     | 79,01     | 98,77     |
| $(AE_{30000})_{55}$     | 68,52                            | 79,63 | 74,07 | 74,07    | 60,49     | 55,56     | 83,95     | 96,30     |
| $(AE_{40000})_{55}$     | 74,07                            | 75,00 | 73,15 | 74,07    | 64,20     | 50,62     | 83,95     | 97,53     |
| $(AE_{RAZLIČITI})_{55}$ | 88,89                            | 82,41 | 81,48 | 84,26    | 77,78     | 71,60     | 88,89     | 98,77     |

Tablica 5.19 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki signala akustične emisije uz uvjet  $T_{SR} \geq 60$  %

| Kombinacija značajki    | Uspješnost klasifikacije (UK), % |       |       |          |           |           |           |           |
|-------------------------|----------------------------------|-------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                         | $T_1$                            | $T_2$ | $T_3$ | $T_{SR}$ | $S_{1SR}$ | $S_{2SR}$ | $S_{3SR}$ | $S_{4SR}$ |
| $(AE_{5000})_{60}$      | 79,63                            | 87,04 | 77,78 | 81,48    | 69,14     | 70,37     | 91,36     | 95,06     |
| $(AE_{10000})_{60}$     | 63,89                            | 64,81 | 62,04 | 63,58    | 34,57     | 51,85     | 72,84     | 95,06     |
| $(AE_{15000})_{60}$     | 79,63                            | 71,30 | 71,30 | 74,07    | 53,09     | 61,73     | 85,19     | 96,30     |
| $(AE_{20000})_{60}$     | 66,67                            | 64,81 | 66,67 | 66,05    | 43,21     | 54,32     | 72,84     | 93,83     |
| $(AE_{30000})_{60}$     | 69,44                            | 69,44 | 70,37 | 69,75    | 41,98     | 56,79     | 86,42     | 93,83     |
| $(AE_{40000})_{60}$     | 74,07                            | 75,00 | 73,15 | 74,07    | 64,20     | 50,62     | 83,95     | 97,53     |
| $(AE_{RAZLIČITI})_{60}$ | 83,33                            | 89,81 | 79,63 | 84,26    | 70,37     | 76,54     | 93,83     | 96,30     |

Iz rezultata analize kombinacija značajki koje su ostvarile uvjet  $T_{SR} \geq 50$  % vidljivo je da su 3 kombinacije (od njih 7) ostvarile prosječnu uspješnost klasifikacije veću od 80 %. Pri tome su se najboljima pokazale kombinacije značajki različitih frekvencijskih pojaseva  $(AE_{RAZLIČITI})_{50}$  s  $T_{SR} = 88,89$  %, što ujedno predstavlja najbolji rezultat klasifikacije istrošenosti svrdla upotrebom značajki iz signala akustične emisije.

Slični rezultati su ostvareni i za preostala dva uvjeta ( $T_{SR} \geq 55$  %,  $T_{SR} \geq 60$  %), pri čemu je uspješnost klasifikacije preko 80 % ostvarilo 4, tj. 2 kombinacije značajki (tablice 5.18 i 5.19). Uz navedeno, najbolji rezultati su ostvareni kombinacijama  $(AE_{RAZLIČITI})_{55}$  čiji je  $T_{SR} = 86,42$  % i  $(AE_{RAZLIČITI})_{60}$  čiji je  $T_{SR} = 84,26$  %.

Kombinacije značajki  $(AE_{RAZLIČITI})_{50}$ ,  $(AE_{RAZLIČITI})_{55}$  i  $(AE_{RAZLIČITI})_{60}$  dodatno su analizirane za svaku vrstu kamena, a njihovi su rezultati prikazani u tablicama 5.20, 5.21 i 5.22.

 Tablica 5.20 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla kombinacijama značajki  $(AE_{RAZLIČITI})_{50}$ 

| Stupanj istrošenosti | Uspješnost klasifikacije (UK), % |       |       |          |             |       |       |          |             |       |       |          |
|----------------------|----------------------------------|-------|-------|----------|-------------|-------|-------|----------|-------------|-------|-------|----------|
|                      | Kamen $K_1$                      |       |       |          | Kamen $K_2$ |       |       |          | Kamen $K_3$ |       |       |          |
|                      | $T_1$                            | $T_2$ | $T_3$ | $T_{SR}$ | $T_1$       | $T_2$ | $T_3$ | $T_{SR}$ | $T_1$       | $T_2$ | $T_3$ | $T_{SR}$ |
| $S_1$                | 100                              | 66,6  | 88,8  | 85,1     | 100         | 100   | 77,7  | 92,6     | 100         | 88,8  | 88,8  | 92,5     |
| $S_2$                | 77,7                             | 88,8  | 77,7  | 81,4     | 77,7        | 66,6  | 100   | 81,4     | 33,3        | 77,7  | 77,7  | 62,9     |
| $S_3$                | 100                              | 88,8  | 88,8  | 92,5     | 77,7        | 88,8  | 88,8  | 85,2     | 88,8        | 88,8  | 100   | 92,5     |
| $S_4$                | 100                              | 100   | 100   | 100      | 100         | 100   | 100   | 100      | 100         | 100   | 100   | 100      |

Tablica 5.21 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla kombinacijama značajki ( $AE_{5000}$ )<sub>55</sub>

| Stupanj istrošenosti | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                 |                      |                |                |                 |                      |                |                |                 |
|----------------------|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|
|                      | Kamen K <sub>1</sub>             |                |                |                 | Kamen K <sub>2</sub> |                |                |                 | Kamen K <sub>3</sub> |                |                |                 |
|                      | T <sub>1</sub>                   | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | T <sub>1</sub>       | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | T <sub>1</sub>       | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> |
| S <sub>1</sub>       | 77,7                             | 66,6           | 77,7           | 74,0            | 88,8                 | 88,8           | 88,8           | 88,8            | 77,7                 | 77,7           | 88,8           | 81,4            |
| S <sub>2</sub>       | 55,5                             | 77,7           | 77,7           | 70,3            | 77,7                 | 77,7           | 88,8           | 81,5            | 55,5                 | 66,6           | 77,7           | 66,6            |
| S <sub>3</sub>       | 100                              | 100            | 88,8           | 96,3            | 88,8                 | 88,8           | 88,8           | 88,8            | 100                  | 88,8           | 88,8           | 92,6            |
| S <sub>4</sub>       | 100                              | 100            | 100            | 100             | 100                  | 100            | 100            | 100             | 100                  | 88,8           | 100            | 96,3            |

Tablica 5.22 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla kombinacijama značajki ( $AE_{RAZLIČITI}$ )<sub>60</sub>

| Stupanj istrošenosti | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                 |                      |                |                |                 |                      |                |                |                 |
|----------------------|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|
|                      | Kamen K <sub>1</sub>             |                |                |                 | Kamen K <sub>2</sub> |                |                |                 | Kamen K <sub>3</sub> |                |                |                 |
|                      | T <sub>1</sub>                   | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | T <sub>1</sub>       | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | T <sub>1</sub>       | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> |
| S <sub>1</sub>       | 55,5                             | 66,6           | 66,6           | 62,9            | 77,7                 | 66,6           | 66,6           | 70,3            | 77,7                 | 88,8           | 66,6           | 77,7            |
| S <sub>2</sub>       | 55,5                             | 88,8           | 77,7           | 74              | 88,8                 | 100            | 55,5           | 81,4            | 66,6                 | 66,6           | 66,6           | 66,6            |
| S <sub>3</sub>       | 100                              | 88,8           | 100            | 96,3            | 100                  | 88,8           | 77,7           | 88,8            | 88,8                 | 100            | 100            | 96,3            |
| S <sub>4</sub>       | 88,8                             | 100            | 100            | 96,3            | 100                  | 100            | 88,8           | 96,3            | 100                  | 100            | 88,8           | 96,3            |

Pregledom dobivenih rezultata vidljivo je da vrsta kamena ne utječe na rezultat klasifikacije, što je bio slučaj i kod signala vibracija. Pri tome su iznova dobiveni podjednako dobri rezultati klasifikacije istrošenosti pri obradi svake od upotrijebljenih vrsta kamena. Navedene značajke najbolje su klasificirale potpuno istrošeno svrdlo S<sub>4</sub> (sve tri vrste kamena  $T_{SR} > 95\%$ ), dok su najlošije klasificirale djelomično oštro svrdlo S<sub>2</sub>.

#### 5.4.4 Klasifikacija stupnja istrošenosti značajkama sila rezanja, jakosti struja pogonskih motora, vibracija i akustične emisije

Nakon provedene analize posebno po svakoj grupi vrste signala, zadnji korak pri modeliranju svakako predstavlja analiza i izdvajanje povoljnih kombinacija značajki pojedinih vrsta signala i njihove međusobne kombinacije s ciljem iznalaženja što robusnijeg modela klasifikacije stupnja istrošenosti svrdla kod bušenja kamena. Rezultati provedenih analiza temeljeni na signalima sila rezanja, jakosti struja pogonskih motora, vibracija i akustične emisije znatno se razlikuju. Pri tome je najveća uspješnost klasifikacije ostvarena značajkama ( $XY$ )<sub>75</sub> iz signala vibracija u iznosu od  $T_{SR} = 97,84\%$ . Nešto lošiji rezultat ostvaren je značajkama signala akustične emisije ( $AE_{RAZLIČITI}$ )<sub>50</sub> s rezultatom od  $T_{SR} = 88,89\%$ . Značajke sila rezanja i

jakosti struja pogonskih motora ostvarile su najlošiji rezultat s uspješnošću klasifikacije manjim od 70 %.

Dosadašnja istraživanja [36, 76] pokazala su da se međusobnom kombinacijom značajki, koje su pojedinačno ostvarile visoki stupanj uspješnosti klasifikacije, može dodatno poboljšati uspješnost klasifikacije istrošenosti svrdla. Stoga je u zadnjem koraku analize provedeno modeliranje sustava za klasifikaciju istrošenosti svrdla zasnovano na kombinaciji parametrima obrade i kombinaciji značajki trošenja izdvojenih iz signala jakosti struja pogonskih motora, vibracija i akustične emisije. Kako su značajke izdvojene iz signala sila i struja pokazale vrlo sličan stupanj korelacije sa stupnjem istrošenosti svrdla (poglavlje 5.4.1), a primjena senzora sila u praksi često značajno podiže cijenu obradnog sustava, signali sila su ispušteni iz daljnje analize.

Najbolje kombinacije značajki svake vrste signala međusobno su kombinirane na nekoliko različitih načina. Uspješnosti klasifikacije modela trošenja zasnovanih na kombinacijama značajki izdvojenih iz signala vibracija i akustične emisije, struje i vibracija, struja i akustične emisije te struja, vibracija i akustične emisije dane su u tablicama 5.23 - 5.26.

Tablica 5.23 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki signala vibracija i akustične emisije

| Kombinacija značajki   | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                 |                  |                  |                  |                  |
|--|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|  | T <sub>1</sub>                   | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | S <sub>1SR</sub> | S <sub>2SR</sub> | S <sub>3SR</sub> | S <sub>4SR</sub> |
| (XY) <sub>75</sub> +(AE <sub>RAZLIČITI</sub> ) <sub>50</sub> | 97,22                            | 96,30          | 98,15          | 97,22           | 93,83            | 97,53            | 97,53            | 100,00           |
| (XY) <sub>75</sub> +(AE <sub>RAZLIČITI</sub> ) <sub>55</sub> | 96,30                            | 97,22          | 96,30          | 96,60           | 93,83            | 97,53            | 96,30            | 98,77            |
| (XY) <sub>75</sub> +(AE <sub>RAZLIČITI</sub> ) <sub>60</sub> | 92,59                            | 95,37          | 96,30          | 94,75           | 95,06            | 97,53            | 90,12            | 96,30            |
| (YZ) <sub>80</sub> +(AE <sub>RAZLIČITI</sub> ) <sub>50</sub> | 97,22                            | 95,37          | 92,59          | 95,06           | 97,53            | 92,59            | 90,12            | 100,00           |
| (YZ) <sub>80</sub> +(AE <sub>5000</sub> ) <sub>55</sub>      | 99,07                            | 95,37          | 91,67          | 95,37           | 97,53            | 88,89            | 96,30            | 98,77            |
| (YZ) <sub>80</sub> +(AE <sub>RAZLIČITI</sub> ) <sub>60</sub> | 98,15                            | 96,30          | 92,59          | 95,68           | 97,53            | 91,36            | 97,53            | 96,30            |
| (YZ) <sub>85</sub> +(AE <sub>RAZLIČITI</sub> ) <sub>50</sub> | 97,22                            | 95,37          | 92,59          | 95,06           | 97,53            | 92,59            | 90,12            | 100,00           |
| (YZ) <sub>85</sub> +(AE <sub>5000</sub> ) <sub>55</sub>      | 99,07                            | 95,37          | 91,67          | 95,37           | 97,53            | 88,89            | 96,30            | 98,77            |
| (YZ) <sub>85</sub> +(AE <sub>RAZLIČITI</sub> ) <sub>60</sub> | 98,15                            | 96,30          | 92,59          | 95,68           | 97,53            | 91,36            | 97,53            | 96,30            |

Tablica 5.24 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki signala vibracija i jakosti struja pogonskih motora

| Kombinacija značajki  | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                 |                  |                  |                  |                  |
|-----------------------|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                       | T <sub>1</sub>                   | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | S <sub>1SR</sub> | S <sub>2SR</sub> | S <sub>3SR</sub> | S <sub>4SR</sub> |
| (XY) <sub>75</sub> +I | 89,81                            | 83,33          | 85,19          | 86,11           | 77,78            | 91,36            | 82,72            | 92,59            |
| (YZ) <sub>80</sub> +I | 77,78                            | 73,15          | 75,00          | 75,31           | 80,25            | 62,96            | 72,84            | 85,19            |
| (YZ) <sub>85</sub> +I | 77,78                            | 73,15          | 75,00          | 75,31           | 80,25            | 62,96            | 72,84            | 85,19            |

Tablica 5.25 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki signala akustične emisije i jakosti struja pogonskih motora

| Kombinacija značajki                        | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                 |                  |                  |                  |                  |
|---|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|   | T <sub>1</sub>                   | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | S <sub>1SR</sub> | S <sub>2SR</sub> | S <sub>3SR</sub> | S <sub>4SR</sub> |
| (AE <sub>RAZLIČITI</sub> ) <sub>50</sub> +I | 69,44                            | 86,11          | 73,15          | 76,23           | 67,90            | 65,43            | 79,01            | 92,59            |
| (AE <sub>5000</sub> ) <sub>55</sub> +I      | 74,07                            | 75,00          | 76,85          | 75,31           | 69,14            | 60,49            | 79,01            | 92,59            |
| (AE <sub>RAZLIČITI</sub> ) <sub>60</sub> +I | 70,37                            | 72,22          | 74,07          | 72,22           | 50,62            | 67,90            | 79,01            | 91,36            |

Tablica 5.26 Rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla dobiveni kombinacijama značajki signala vibracija, akustične emisije i jakosti struja pogonskih motora

| Kombinacija značajki  | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                 |                  |                  |                  |                  |
|---|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|   | T <sub>1</sub>                   | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | S <sub>1SR</sub> | S <sub>2SR</sub> | S <sub>3SR</sub> | S <sub>4SR</sub> |
| (XY) <sub>75</sub> +(AE <sub>RAZLIČITI</sub> ) <sub>50</sub> +I | 97,22                            | 96,30          | 98,15          | 97,22           | 93,83            | 97,53            | 97,53            | 100,00           |
| (XY) <sub>75</sub> +(AE <sub>RAZLIČITI</sub> ) <sub>55</sub> +I | 96,30                            | 97,22          | 96,30          | 96,60           | 93,83            | 97,53            | 96,30            | 98,77            |
| (XY) <sub>75</sub> +(AE <sub>RAZLIČITI</sub> ) <sub>60</sub> +I | 92,59                            | 95,37          | 96,30          | 94,75           | 95,06            | 97,53            | 90,12            | 96,30            |
| (YZ) <sub>80</sub> +(AE <sub>RAZLIČITI</sub> ) <sub>50</sub> +I | 97,22                            | 95,37          | 92,59          | 95,06           | 97,53            | 92,59            | 90,12            | 100,00           |
| (YZ) <sub>80</sub> +(AE <sub>5000</sub> ) <sub>55</sub> +I      | 99,07                            | 95,37          | 91,67          | 95,37           | 97,53            | 88,89            | 96,30            | 98,77            |
| (YZ) <sub>80</sub> +(AE <sub>RAZLIČITI</sub> ) <sub>60</sub> +I | 98,15                            | 96,30          | 92,59          | 95,68           | 97,53            | 91,36            | 97,53            | 96,30            |
| (YZ) <sub>85</sub> +(AE <sub>RAZLIČITI</sub> ) <sub>50</sub> +I | 97,22                            | 95,37          | 92,59          | 95,06           | 97,53            | 92,59            | 90,12            | 100,00           |
| (YZ) <sub>85</sub> +(AE <sub>5000</sub> ) <sub>55</sub> +I      | 99,07                            | 95,37          | 91,67          | 95,37           | 97,53            | 88,89            | 96,30            | 98,77            |
| (YZ) <sub>85</sub> +(AE <sub>RAZLIČITI</sub> ) <sub>60</sub> +I | 98,15                            | 96,30          | 92,59          | 95,68           | 97,53            | 91,36            | 97,53            | 96,30            |

Pregledom rezultata međusobnih kombinacija najboljih kombinacija značajki svih vrsta signala vidljiva je visoka uspješnost klasifikacije istrošenosti svrdla. Pri tome su najbolji rezultati analize ostvareni kombinacijama značajki signala vibracija i akustične emisije. Međutim, navedene analize nisu rezultirale povećanjem uspješnosti klasifikacije usporedno s prethodno provedenom zasebnom analizom pojedinih vrsta signala. Najlošiji rezultat analize je ostvaren kombinacijom značajki jakosti struja pogonskih motora sa signalima vibracija ili akustične emisije. Shodno navedenom, primjena značajki izdvojenih iz signala jakosti struja

pogonskih motora nije opravdana u nadzoru istrošenosti svrdla kod bušenja kamena. Iako je najbolji rezultat ostvaren zasebnom analizom kombinacija značajki signala vibracija, kombinacijama značajki akustične emisije također su postignuti dobri rezultati. Prema navedenom, upotreba signala akustične emisije i vibracija preporučaju se u klasifikaciju istrošenosti svrdla.



## 5.5 Model klasifikacije tvrdoće kamena

Modeliranje tvrdoće kamena provedeno je istim pristupom kao i modeliranje stupnja istrošenosti svrdla, korištenjem značajki izdvojenih iz svake vrste snimljenih signala procesa (sile, struje, akustična emisija i vibracije). Značajke su također analizirane individualno putem parametra uspješnosti klasifikacije  $UK$ , a one najbolje, koje su zadovoljile graničnu vrijednost ( $UK_{SR}$ ), međusobno su dodatno kombinirane u cilju postizanja robusnijeg modela tvrdoće. U zadnjoj fazi modeliranja, analizirane su sve kombinacije najboljih kombinacija svih značajki te su njihovi rezultati dani u tablicama.

### 5.5.1 Klasifikacija tvrdoće kamena značajkama sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora

Pri modeliranju tvrdoće kamena također su korištene iste značajke signala sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora kao i pri modeliranju istrošenosti svrdla. Uz navedene značajke na ulaznim neuronima postavljene su brzina rezanja i posmak, dok je analiza temeljena na istoj ranije opisanoj vrsti neuronske mreže. Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena značajkama sila rezanja i njihovim kombinacijama prikazani su tablicom 5.5.

Tablica 5.27 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni značajkama sila rezanja i njihovim kombinacijama

| Značajke sila rezanja                             | Uspješnost klasifikacije ( $UK$ ), % |       |       |          |           |           |           |
|---|--------------------------------------|-------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|
|   | $T_1$                                | $T_2$ | $T_3$ | $T_{SR}$ | $K_{1SR}$ | $K_{2SR}$ | $K_{3SR}$ |
| $(F_Z)_{MAX}$                                     | 57,41                                | 50,00 | 51,85 | 53,09    | 56,48     | 52,78     | 50,00     |
| $(F_R)_{MAX}$                                     | 56,48                                | 46,30 | 51,85 | 51,54    | 53,70     | 51,85     | 49,07     |
| $(F_Z)_{MAX} + (F_R)_{MAX}$                       | 56,48                                | 50,00 | 53,70 | 53,40    | 58,33     | 51,85     | 50,00     |
| $F_Z(f_V)$  | 35,19                                | 34,26 | 35,19 | 34,88    | 36,11     | 39,81     | 28,70     |
| $F_Z(f_O)$  | 42,59                                | 35,19 | 48,15 | 41,98    | 27,78     | 39,81     | 58,33     |
| $F_Z(f_V) + F_Z(f_O)$                             | 62,04                                | 47,22 | 61,11 | 56,79    | 46,30     | 61,11     | 62,96     |
| $(F_Z)_{MAX} + (F_R)_{MAX} + F_Z(f_V) + F_Z(f_O)$ | 66,67                                | 70,37 | 62,96 | 66,67    | 63,89     | 75,93     | 60,19     |

Pojedina ili grupa značajki sila rezanja u vremenskom području rezultirale su uspješnošću klasifikacije od 51,54 do 53,40%. Detaljniji pregled rezultata po pojedinom stupnju istrošenosti otkriva približno jednaku uspješnost klasifikacije tvrdoće pri svim stupnjevima istrošenosti  $S_1$ - $S_4$ .

Značajka snage spektralne komponente sile  $F_Z$  na frekvenciji oštrice  $F_Z(f_o)$  kao i značajka snage spektralne komponente sile  $F_Z$  na frekvenciji vrtnje  $F_Z(f_v)$ , zasebno su dale bitno lošije rezultate od značajki u vremenskom području. Međutim, kombinacija značajki u frekvencijskom području rezultirala je nešto većom uspješnošću ( $T_{SR}=56,79\%$ ) od značajki i njihovih kombinacija u vremenskom području. Najbolji rezultat su ostvarile kombinacije svih korištenih značajki sila rezanja iz vremenskog i frekvencijskog područja s uspješnošću klasifikacije od 66,67 %.

Analiza kombinacija značajki jakosti struja pogonskih motora također je provedena na ranije opisan način, a rezultati su prikazani u tablici 5.28.

Tablica 5.28 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni značajkama jakosti struja pogonskih motora Z osi i glavnog vretena te njihovim kombinacijama

| Značajke jakosti struja pogonskih motora Z osi i glavnog vretena | Uspješnost klasifikacije (UK), % |       |       |          |           |           |           |
|--|----------------------------------|-------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|
|  | $T_1$                            | $T_2$ | $T_3$ | $T_{SR}$ | $K_{1SR}$ | $K_{2SR}$ | $K_{3SR}$ |
| $( I_Z )_{MAX}$  | 56,48                            | 49,07 | 47,22 | 50,93    | 51,85     | 45,37     | 55,56     |
| $(I_{GV})_{MAX}$   | 58,33                            | 46,30 | 39,81 | 48,15    | 50,93     | 48,15     | 45,37     |
| $( I_Z )_{MAX} + (I_{GV})_{MAX}$                                 | 62,04                            | 46,30 | 56,48 | 54,94    | 56,48     | 49,07     | 59,26     |
| $I_{GV}(f_v)$  | 34,26                            | 43,52 | 40,74 | 39,51    | 37,04     | 28,70     | 52,78     |
| $I_{GV}(f_o)$  | 41,67                            | 30,56 | 44,44 | 38,89    | 39,81     | 26,85     | 50,00     |
| $I_{GV}(f_v) + I_{GV}(f_o)$                                      | 58,33                            | 49,07 | 51,85 | 53,09    | 45,37     | 49,07     | 64,81     |
| $( I_Z )_{MAX} + (I_{GV})_{MAX} + I_{GV}(f_v) + I_{GV}(f_o)$     | 53,70                            | 61,11 | 56,48 | 57,10    | 59,26     | 59,26     | 52,78     |
| $F_{SVE} + I_{SVE}$  | 66,67                            | 62,96 | 68,52 | 66,05    | 69,44     | 64,81     | 63,89     |

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da su značajke iz vremenskog područja ostvarile bolje rezultate u odnosu na značajke iz frekvencijskog područja. Uspoređujući rezultate značajki jakosti struja pogonskih motora sa značajkama sila rezanja, primjetna je dobra međusobna korelacija. Pri tome je najbolji rezultat svim kombinacijama značajki jakosti struja iz vremenskog i frekvencijskog područja ostvaren s uspješnošću klasifikacije od 57,1 % što je približno 9 % lošije u odnosu na rezultate analize s istim kombinacijama značajki sila rezanja.

### 5.5.2 Klasifikacija tvrdoće kamena značajkama vibracija

Analiza značajki izdvojenih iz signala vibracija provedena je u koracima kojima se izvodilo i modeliranje stupnja istrošenosti svrdla. Prvi korak analize je temeljen na značajkama signala vibracija kao i na brzini rezanja te posmaku.

Nakon provedenog prvog koraka analize podataka, dobiveni su rezultati klasifikacije s obzirom na 23 različite širine frekvencijskih pojaseva, od kojih su najbolje vrijednosti prosječne uspješnosti klasifikacije tvrdoće kamena ( $T_{SR}$ ) svakog pojasa prikazani u tablici 5.29. Iz rezultata je vidljivo da su pojedine kombinacije značajki rezultirale uspješnošću klasifikacije od preko 70 %. Većina značajki osjetljivih na promjene tvrdoće kamena je ispod frekvencije od 4600 Hz te se većinom ne preklapaju s ranije dobivenim kombinacijama značajki osjetljivim na stanje alata. Najbolji rezultat u prvom koraku ostvaren je kombinacijama značajki XYZ širine frekvencijskog područja od 200 Hz u rasponu od 4405 Hz do 4605 Hz.

Tablica 5.29 Najbolji rezultati svakog od odabranih širina frekvencijskih pojaseva signala vibracija nakon prvog koraka klasifikacije tvrdoće kamena

| Kombinacija značajki   | $[f_D, f_G]$ ,<br>Hz | $f_D$ , Hz  | $f_G$ , Hz  | Uspješnost klasifikacije (UK), % |              |              |              |
|------------------------|----------------------|-------------|-------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|
|                        |                      |             |             | $T_{SR}$                         | $K_1$        | $K_2$        | $K_3$        |
| XYZ+XYZ <sub>SUM</sub> | 5                    | 95          | 100         | 65,12                            | 55,56        | 57,41        | 82,41        |
| XZ                     | 10                   | 95          | 105         | 66,05                            | 55,56        | 61,11        | 81,48        |
| XYZ+XYZ <sub>SUM</sub> | 20                   | 865         | 885         | 66,67                            | 58,33        | 65,74        | 75,93        |
| XYZ+XYZ <sub>SUM</sub> | 30                   | 695         | 725         | 67,59                            | 55,56        | 62,04        | 85,19        |
| XYZ+XYZ <sub>SUM</sub> | 40                   | 4085        | 4125        | 69,14                            | 60,19        | 75,93        | 71,30        |
| XYZ+XYZ <sub>SUM</sub> | 50                   | 4505        | 4555        | 69,14                            | 72,22        | 50,00        | 85,19        |
| XYZ                    | 60                   | 845         | 905         | 69,44                            | 65,74        | 62,04        | 80,56        |
| XYZ+XYZ <sub>SUM</sub> | 70                   | 4065        | 4135        | 68,83                            | 65,74        | 62,96        | 77,78        |
| XYZ                    | 80                   | 4485        | 4565        | 70,37                            | 70,37        | 60,19        | 80,56        |
| XYZ                    | 90                   | 4505        | 4595        | 70,06                            | 69,44        | 65,74        | 75,00        |
| XYZ                    | 100                  | 4505        | 4605        | 71,60                            | 70,37        | 61,11        | 83,33        |
| <b>XYZ</b>             | <b>200</b>           | <b>4405</b> | <b>4605</b> | <b>74,07</b>                     | <b>75,93</b> | <b>66,67</b> | <b>79,63</b> |
| XY+XY <sub>SUM</sub>   | 300                  | 3905        | 4205        | 71,30                            | 70,37        | 75,93        | 67,59        |
| XYZ+XYZ <sub>SUM</sub> | 400                  | 2405        | 2805        | 70,06                            | 65,74        | 64,81        | 79,63        |
| XYZ                    | 500                  | 2505        | 3005        | 70,68                            | 65,74        | 62,04        | 84,26        |
| XYZ                    | 600                  | 2405        | 3005        | 71,30                            | 66,67        | 60,19        | 87,04        |
| XY                     | 700                  | 3505        | 4205        | 69,75                            | 71,30        | 62,96        | 75,00        |

|                        |      |      |      |       |       |       |       |
|------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| XYZ                    | 800  | 3205 | 4005 | 71,30 | 73,15 | 62,96 | 77,78 |
| XYZ+XYZ <sub>SUM</sub> | 900  | 905  | 1805 | 69,44 | 52,78 | 71,30 | 84,26 |
| XYZ                    | 1000 | 3005 | 4005 | 69,14 | 73,15 | 56,48 | 77,78 |
| XYZ+XYZ <sub>SUM</sub> | 1500 | 1505 | 3005 | 66,67 | 55,56 | 67,59 | 76,85 |
| XY                     | 2500 | 2505 | 5000 | 66,67 | 68,52 | 61,11 | 70,37 |
| XYZ                    | 5000 | 5    | 5000 | 67,59 | 63,89 | 60,19 | 78,70 |

Nakon provedene analize uspješnosti klasifikacije preko odabranih kombinacija značajki po svakom od unaprijed definiranih frekvencijskih pojaseva pristupilo se drugom koraku analize podataka. Pri tome su korištene one kombinacije značajki koje su zadovoljile postavljene kriterije odabira  $T_{SR} \geq 55\%$ ,  $T_{SR} \geq 60\%$  i  $T_{SR} \geq 65\%$ . Odabir odgovarajućih značajki proveden je na jednak način kao i kod modeliranja istrošenosti svrdla, pri čemu su također zanemarene one kombinacije značajki kod kojih je došlo do djelomičnog ili potpunog preklapanja frekvencijskih pojaseva s već odabranim pojasevima.

Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena prema postavljenim kriterijima odabira  $T_{SR} \geq 55\%$ ,  $T_{SR} \geq 60\%$  i  $T_{SR} \geq 65\%$  dani su tablicama 5.30, 5.31 i 5.32.

Tablica 5.30 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki signala vibracija uz uvjet  $T_{SR} \geq 55\%$

| Kombinacija značajki                    | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                 |                  |                  |                  |
|---|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
|   | T <sub>1</sub>                   | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | K <sub>1SR</sub> | K <sub>2SR</sub> | K <sub>3SR</sub> |
| (X) <sub>55</sub>                       | 75,00                            | 66,67          | 66,67          | 69,44           | 58,33            | 60,19            | 89,81            |
| (Y) <sub>55</sub>                       | 58,33                            | 55,56          | 59,26          | 57,72           | 52,78            | 58,33            | 62,04            |
| (Z) <sub>55</sub>                       | 74,07                            | 77,78          | 73,15          | 75,00           | 67,59            | 71,30            | 86,11            |
| (XY) <sub>55</sub>                      | 86,11                            | 82,41          | 84,26          | 84,26           | 75,00            | 82,41            | 95,37            |
| (YZ) <sub>55</sub>                      | 87,04                            | 83,33          | 86,11          | 85,49           | 87,04            | 74,07            | 95,37            |
| (XZ) <sub>55</sub>                      | 86,11                            | 84,26          | 84,26          | 84,88           | 84,26            | 71,30            | 99,07            |
| (XYZ) <sub>55</sub>                     | 93,52                            | 82,41          | 79,63          | 85,19           | 78,70            | 79,63            | 97,22            |
| (XYZ <sub>SUM</sub> ) <sub>55</sub>     | 74,07                            | 67,59          | 70,37          | 70,68           | 74,07            | 58,33            | 79,63            |
| (XYZ+XYZ <sub>SUM</sub> ) <sub>55</sub> | 90,74                            | 81,48          | 75,93          | 82,72           | 78,70            | 75,93            | 93,52            |
| (XY <sub>SUM</sub> ) <sub>55</sub>      | 66,67                            | 62,96          | 57,41          | 62,35           | 67,59            | 51,85            | 67,59            |
| (YZ <sub>SUM</sub> ) <sub>55</sub>      | 68,52                            | 70,37          | 72,22          | 70,37           | 72,22            | 62,04            | 76,85            |
| (XZ <sub>SUM</sub> ) <sub>55</sub>      | 76,85                            | 75,93          | 70,37          | 74,38           | 60,19            | 68,52            | 94,44            |
| (XY+XY <sub>SUM</sub> ) <sub>55</sub>   | 92,59                            | 88,89          | 86,11          | 89,20           | 84,26            | 87,96            | 95,37            |
| (YZ+YZ <sub>SUM</sub> ) <sub>55</sub>   | 87,96                            | 90,74          | 85,19          | 87,96           | 82,41            | 91,67            | 89,81            |
| (XZ+XZ <sub>SUM</sub> ) <sub>55</sub>   | 83,33                            | 81,48          | 84,26          | 83,02           | 75,93            | 77,78            | 95,37            |

Tablica 5.31 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki signala vibracija uz uvjet  $T_{SR} \geq 60$  %

| Kombinacija značajki   | Uspješnost klasifikacije (UK), % |       |       |          |           |           |           |
|------------------------|----------------------------------|-------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|
|                        | $T_1$                            | $T_2$ | $T_3$ | $T_{SR}$ | $K_{1SR}$ | $K_{2SR}$ | $K_{3SR}$ |
| $(Z)_{60}$             | 75,93                            | 72,22 | 66,67 | 71,60    | 60,19     | 71,30     | 83,33     |
| $(XY)_{60}$            | 87,96                            | 87,96 | 84,26 | 86,73    | 83,33     | 81,48     | 95,37     |
| $(YZ)_{60}$            | 87,04                            | 80,56 | 81,48 | 83,02    | 76,85     | 78,70     | 93,52     |
| $(XZ)_{60}$            | 84,26                            | 81,48 | 80,56 | 82,10    | 75,93     | 74,07     | 96,30     |
| $(XYZ)_{60}$           | 88,89                            | 81,48 | 79,63 | 83,33    | 75,93     | 77,78     | 96,30     |
| $(XYZ_{SUM})_{60}$     | 69,44                            | 61,11 | 68,52 | 66,36    | 74,07     | 62,04     | 62,96     |
| $(XYZ+XYZ_{SUM})_{60}$ | 90,74                            | 87,04 | 80,56 | 86,11    | 76,85     | 87,96     | 93,52     |
| $(YZ_{SUM})_{60}$      | 68,52                            | 60,19 | 59,26 | 62,65    | 70,37     | 53,70     | 63,89     |
| $(XZ_{SUM})_{60}$      | 73,15                            | 68,52 | 63,89 | 68,52    | 61,11     | 62,96     | 81,48     |
| $(XY+XY_{SUM})_{60}$   | 91,67                            | 90,74 | 86,11 | 89,51    | 87,96     | 86,11     | 94,44     |
| $(YZ+YZ_{SUM})_{60}$   | 87,96                            | 87,96 | 82,41 | 86,11    | 81,48     | 86,11     | 90,74     |
| $(XZ+XZ_{SUM})_{60}$   | 81,48                            | 81,48 | 79,63 | 80,86    | 86,11     | 67,59     | 88,89     |

Tablica 5.32 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki signala vibracija uz uvjet  $T_{SR} \geq 65$  %

| Kombinacija značajki   | Uspješnost klasifikacije (UK), % |       |       |          |           |           |           |
|------------------------|----------------------------------|-------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|
|                        | $T_1$                            | $T_2$ | $T_3$ | $T_{SR}$ | $K_{1SR}$ | $K_{2SR}$ | $K_{3SR}$ |
| $(XY)_{65}$            | 81,48                            | 71,30 | 71,30 | 74,69    | 75,00     | 71,30     | 77,78     |
| $(YZ)_{65}$            | 84,26                            | 80,56 | 81,48 | 82,10    | 79,63     | 75,93     | 90,74     |
| $(XZ)_{65}$            | 77,78                            | 75,93 | 78,70 | 77,47    | 70,37     | 66,67     | 95,37     |
| $(XYZ)_{65}$           | 89,81                            | 82,41 | 78,70 | 83,64    | 75,00     | 80,56     | 95,37     |
| $(XYZ+XYZ_{SUM})_{65}$ | 93,52                            | 87,04 | 86,11 | 88,89    | 78,70     | 88,89     | 99,07     |
| $(XY+XY_{SUM})_{65}$   | 79,63                            | 66,67 | 70,37 | 72,22    | 70,37     | 72,22     | 74,07     |
| $(YZ+YZ_{SUM})_{65}$   | 80,56                            | 75,93 | 70,37 | 75,62    | 78,70     | 70,37     | 77,78     |
| $(XZ+XZ_{SUM})_{65}$   | 80,56                            | 76,85 | 84,26 | 80,56    | 76,85     | 71,30     | 93,52     |

Pregledom rezultata dobivenih s kombinacijama značajki koje su ostvarile uvjet  $T_{SR} \geq 55$  % (tablica 5.30) može se uočiti da je 8 kombinacija značajki (od njih 15) ostvarilo prosječnu uspješnost klasifikacije veću od 80 %. Pri tome se posebno izdvaja kombinacija značajki  $(XY+XY_{SUM})_{55}$  čiji je  $T_{SR}=89,2$  %. Slični rezultati su ostvareni i korištenjem preostalih dvaju uvjeta ( $T_{SR} \geq 60$  %,  $T_{SR} \geq 65$  %), pri čemu je uspješnost klasifikacije iznad 80 % ostvarilo 8, odnosno 4 kombinacije značajki (tablice 5.31 i 5.32). Posebno se izdvaja kombinacija značajki  $(XY+XY_{SUM})_{60}$  čiji je  $T_{SR}=89,51$  % te ona ujedno predstavlja i najbolji rezultat klasifikacije tvrdoće kamena upotrebom značajki iz signala vibracija.

U zadnjem, trećem koraku analize podataka, izdvojene su značajke koje su ostvarile najbolje rezultate klasifikacije,  $(XY+XY_{SUM})_{55}$ ,  $(XY+XY_{SUM})_{60}$  i  $(XYZ+XYZ_{SUM})_{65}$ , čije su vrijednosti uspješnosti klasifikacije po pojedinoj vrsti kamena dane u tablicama 5.33, 5.34 i 5.35.

Tablica 5.33 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena kombinacija značajki  $(XY+XY_{SUM})_{55}$

| Kamen          | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                |
|----------------|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                | Stupanj istrošenosti             |                |                |                |
|                | S <sub>1</sub>                   | S <sub>2</sub> | S <sub>3</sub> | S <sub>4</sub> |
| K <sub>1</sub> | 74,07                            | 85,19          | 70,37          | 100            |
| K <sub>2</sub> | 85,19                            | 92,59          | 92,59          | 96,30          |
| K <sub>3</sub> | 100                              | 96,30          | 92,59          | 70,37          |

Tablica 5.34 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena kombinacija značajki  $(XY+XY_{SUM})_{60}$

| Kamen          | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                |
|----------------|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                | Stupanj istrošenosti             |                |                |                |
|                | S <sub>1</sub>                   | S <sub>2</sub> | S <sub>3</sub> | S <sub>4</sub> |
| K <sub>1</sub> | 85,19                            | 92,59          | 74,07          | 100            |
| K <sub>2</sub> | 100                              | 77,78          | 88,89          | 77,78          |
| K <sub>3</sub> | 100                              | 92,59          | 92,59          | 92,59          |

Tablica 5.35 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena kombinacija značajki  $(XYZ+XYZ_{SUM})_{65}$

| Kamen          | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                |
|----------------|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                | Stupanj istrošenosti             |                |                |                |
|                | S <sub>1</sub>                   | S <sub>2</sub> | S <sub>3</sub> | S <sub>4</sub> |
| K <sub>1</sub> | 70,37                            | 70,37          | 77,78          | 96,30          |
| K <sub>2</sub> | 88,89                            | 100,00         | 92,59          | 74,07          |
| K <sub>3</sub> | 100,00                           | 100,00         | 100,00         | 96,30          |

Analizom dobivenih rezultata vidljivo je da pojedini stupanj istrošenosti svrdla ne utječe na rezultat klasifikacije, tj. da su dobiveni podjednako kvalitetni rezultati klasifikacije tvrdoće kamena bušenjem oštrim i istrošenim svrdlom. Pritom su navedene kombinacije

značajki najbolje rezultate dale klasificiranjem tvrdoće kamena  $K_3$  s prosječnom uspješnošću klasifikacije s  $T_{SR}(K_3)=94,4$  %, dok je najlošije klasificirana tvrdoća kamena  $K_1$  s  $T_{SR}(K_1)=83$  %.

### 5.5.3 Klasifikacija tvrdoće kamena značajkama akustične emisije

Proces analize podataka signala akustične emisije proveden je na identičan način kao i analiza kombinacija značajki izdvojenih iz signala vibracija. U prvom koraku su, osim brzine rezanja i posmaka, ulazne neurone predstavljale i energije spektra signala akustične emisije (tablica 5.14) izračunate za sve frekvencijske pojaseve u određenim rasponima.

Nakon prvog koraka analize podataka dobiveni su rezultati klasifikacije s obzirom na 6 različitih širina frekvencijskih pojaseva od kojih su najbolji rezultati po svakom pojasu prikazani u tablici 5.36.

Tablica 5.36 Najbolji rezultati klasifikacije tvrdoće kamena svakog od odabranih širina frekvencijskih pojaseva nakon prvog koraka analize signala akustične emisije

| Značajka | $[f_D, f_G]$ , Hz | $f_D$ , Hz | $f_G$ , Hz | Uspješnost klasifikacije (UK), % |           |           |           |
|----------|-------------------|------------|------------|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
|          |                   |            |            | $T_{SR}$                         | $K_{1SR}$ | $K_{2SR}$ | $K_{3SR}$ |
| AE       | 5000              | 120000     | 150000     | 41,98                            | 34,26     | 37,96     | 53,70     |
|          | 10000             | 60000      | 230000     | 40,43                            | 33,33     | 33,33     | 54,63     |
|          | 15000             | 50000      | 125000     | 39,51                            | 36,11     | 38,89     | 43,52     |
|          | 20000             | 50000      | 270000     | 39,81                            | 34,26     | 40,74     | 44,44     |
|          | 30000             | 50000      | 230000     | 41,67                            | 32,41     | 40,74     | 51,85     |
|          | 40000             | 50000      | 130000     | 40,43                            | 35,19     | 37,96     | 48,15     |

Iz rezultata najboljih vrijednosti uspješnosti klasifikacije tvrdoće  $T_{SR}$  svakog od odabranih širina frekvencijskih pojaseva vidljivo je da se njihove vrijednosti kreću oko približno 40 %. Također se može primijetiti da su spomenute značajke najosjetljivije na promjene stanja alata u području od 50 do 230 kHz.

Temeljem provedene analize uspješnosti klasifikacije preko odabranih kombinacija značajki po svakom od unaprijed definiranih frekvencijskih pojaseva pristupilo se drugom koraku analize podataka. Iako na isti način kao i kod signala vibracija, u ovom slučaju, obzirom na nešto lošije rezultate u prvom koraku, postavljeni kriteriji odabira iznosili su:  $T_{SR} \geq 30$  %,  $T_{SR} \geq 35$  % i  $T_{SR} \geq 40$  %.

Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena prema uvjetima  $T_{SR} \geq 30$  %,  $T_{SR} \geq 35$  % i  $T_{SR} \geq 40$  % dobiveni u drugom koraku analize dani su tablicama 5.37, 5.38 i 5.39.

Tablica 5.37 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki signala akustične emisije uz uvjet  $T_{SR} \geq 30\%$ 

| Kombinacija značajki    | Uspješnost klasifikacije (UK), % |       |       |          |           |           |           |
|-------------------------|----------------------------------|-------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|
|                         | $T_1$                            | $T_2$ | $T_3$ | $T_{SR}$ | $K_{1SR}$ | $K_{2SR}$ | $K_{3SR}$ |
| $(AE_{5000})_{30}$      | 53,70                            | 52,78 | 58,33 | 54,94    | 51,85     | 52,78     | 60,19     |
| $(AE_{10000})_{30}$     | 58,33                            | 57,41 | 47,22 | 54,32    | 58,33     | 45,37     | 59,26     |
| $(AE_{15000})_{30}$     | 54,63                            | 50,93 | 45,37 | 50,31    | 46,30     | 52,78     | 51,85     |
| $(AE_{20000})_{30}$     | 53,70                            | 49,07 | 46,30 | 49,69    | 50,93     | 48,15     | 50,00     |
| $(AE_{30000})_{30}$     | 43,52                            | 46,30 | 48,15 | 45,99    | 50,00     | 43,52     | 44,44     |
| $(AE_{40000})_{30}$     | 57,41                            | 48,15 | 43,52 | 49,69    | 50,00     | 47,22     | 51,85     |
| $(AE_{RAZLIČITI})_{30}$ | 57,41                            | 50,00 | 43,52 | 50,31    | 48,15     | 50,93     | 51,85     |

 Tablica 5.38 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki signala akustične emisije uz uvjet  $T_{SR} \geq 35\%$ 

| Kombinacija značajki    | Uspješnost klasifikacije (UK), % |       |       |          |           |           |           |
|-------------------------|----------------------------------|-------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|
|                         | $T_1$                            | $T_2$ | $T_3$ | $T_{SR}$ | $K_{1SR}$ | $K_{2SR}$ | $K_{3SR}$ |
| $(AE_{5000})_{35}$      | 55,56                            | 51,85 | 50,93 | 52,78    | 54,63     | 49,07     | 54,63     |
| $(AE_{10000})_{35}$     | 52,78                            | 50,00 | 51,85 | 51,54    | 51,85     | 54,63     | 48,15     |
| $(AE_{15000})_{35}$     | 49,07                            | 48,15 | 48,15 | 48,46    | 44,44     | 54,63     | 46,30     |
| $(AE_{20000})_{35}$     | 49,07                            | 50,93 | 43,52 | 47,84    | 50,93     | 47,22     | 45,37     |
| $(AE_{30000})_{35}$     | 46,30                            | 43,52 | 47,22 | 45,68    | 41,67     | 51,85     | 43,52     |
| $(AE_{40000})_{35}$     | 44,44                            | 49,07 | 45,37 | 46,30    | 45,37     | 42,59     | 50,93     |
| $(AE_{RAZLIČITI})_{35}$ | 59,26                            | 45,37 | 38,89 | 47,84    | 50,00     | 46,30     | 47,22     |

 Tablica 5.39 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki signala akustične emisije uz uvjet  $T_{SR} \geq 40\%$ 

| Kombinacija značajki    | Uspješnost klasifikacije (UK), % |       |       |          |           |           |           |
|-------------------------|----------------------------------|-------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|
|                         | $T_1$                            | $T_2$ | $T_3$ | $T_{SR}$ | $K_{1SR}$ | $K_{2SR}$ | $K_{3SR}$ |
| $(AE_{5000})_{40}$      | 50,93                            | 43,52 | 45,37 | 46,60    | 45,37     | 40,74     | 53,70     |
| $(AE_{10000})_{40}$     | 43,52                            | 38,89 | 45,37 | 42,59    | 42,59     | 33,33     | 51,85     |
| $(AE_{30000})_{40}$     | 47,22                            | 32,41 | 45,37 | 41,67    | 32,41     | 40,74     | 51,85     |
| $(AE_{40000})_{40}$     | 38,89                            | 43,52 | 38,89 | 40,43    | 35,19     | 37,96     | 48,15     |
| $(AE_{RAZLIČITI})_{40}$ | 46,30                            | 50,00 | 45,37 | 47,22    | 51,85     | 50,93     | 38,89     |

Iz rezultata dobivenih nakon drugog koraka analize kombinacija značajki akustične emisije, vidljivo je da su rezultati bitno lošiji u odnosu na analizu tvrdoće kamena korištenjem signala vibracija. Uz uvjet uspješnosti klasifikacije  $T_{SR} \geq 30\%$  vidljivo je da su 4 kombinacije (od njih 7) ostvarile prosječnu uspješnost klasifikacije veću od 50 %. Pri tome se



posebno izdvajaju kombinacije značajki  $(AE_{5000})_{30}$  čiji je  $T_{SR}=54,94$  %, predstavljajući tako i najbolji rezultat klasifikacije upotrebom značajki iz signala akustične emisije. Slični rezultati su ostvareni korištenjem preostala dva uvjeta ( $T_{SR} \geq 35$  %,  $T_{SR} \geq 40$  %), pri čemu su uspješnost preko 50 % ostvarile samo 2 značajke (uz uvjet  $T_{SR} \geq 35$  %) dok je uspješnost klasifikacije tvrdoće kamena svih kombinacija značajki uz uvjet  $T_{SR} \geq 40$  % ispod 50 %. Najbolje kombinacije značajki pri navedenim uvjetima su  $(AE_{5000})_{35}$  čiji je  $T_{SR}=52,78$  % i  $(AE_{RAZLIČITI})_{40}$  čiji je  $T_{SR}=47,22$  %.

Dodatnom analizom je za najbolju kombinaciju značajki  $(AE_{5000})_{30}$  utvrđeno u koje su skupine razvrstani uzorci za testiranje, tablica 5.40. Pregledom rezultata moguće je zaključiti da je navedena kombinacija značajki najlošije rezultate klasifikacije tvrdoće kamena ostvarila pri stupnju istrošenosti  $S_1$  i  $S_2$  dok su najbolji rezultati klasifikacije tvrdoće postignuti pri stupnju istrošenosti  $S_3$  i  $S_4$ . Pri tome se ističu rezultati klasifikacije potpuno istrošenim svrdlom  $S_4$  uz koje je uspješnost klasifikacije tvrdoće kamena po pojedinim vrstama uzoraka iznosila  $UK(K_1)=85$  %,  $UK(K_2)=70$  % i  $UK(K_3)=81$  %.

Tablica 5.40 Usporedba stvarnih i klasificiranih tvrdoća kamena za kombinaciju značajki  
 ( $AE_{5000}$ )<sub>30</sub>

| Brzina rezanja<br>$V_c$ | Posmak<br>$f$ | Stupanj istrošenosti<br>$S_x$ | $K_1$ |       |       | $K_2$ |       |       | $K_3$ |       |       |
|-------------------------|---------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         |               |                               | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ |
| 10,00                   | 0,03          | 1                             | 1     | 2     | 3     | 1     | 3     | 1     | 1     | 3     | 3     |
| 15,00                   | 0,03          | 1                             | 2     | 1     | 2     | 1     | 3     | 2     | 2     | 2     | 2     |
| 20,00                   | 0,03          | 1                             | 3     | 3     | 3     | 3     | 2     | 2     | 2     | 2     | 3     |
| 10,00                   | 0,06          | 1                             | 2     | 1     | 2     | 2     | 3     | 1     | 2     | 1     | 1     |
| 15,00                   | 0,06          | 1                             | 1     | 1     | 1     | 3     | 2     | 2     | 1     | 3     | 3     |
| 20,00                   | 0,06          | 1                             | 1     | 1     | 1     | 3     | 3     | 1     | 3     | 1     | 3     |
| 10,00                   | 0,09          | 1                             | 1     | 3     | 3     | 2     | 1     | 2     | 2     | 2     | 2     |
| 15,00                   | 0,09          | 1                             | 2     | 3     | 1     | 2     | 2     | 3     | 3     | 3     | 3     |
| 20,00                   | 0,09          | 1                             | 2     | 3     | 3     | 3     | 1     | 3     | 3     | 3     | 3     |
| 10,00                   | 0,03          | 2                             | 1     | 1     | 3     | 2     | 2     | 1     | 2     | 2     | 1     |
| 15,00                   | 0,03          | 2                             | 2     | 2     | 1     | 3     | 3     | 1     | 3     | 2     | 1     |
| 20,00                   | 0,03          | 2                             | 3     | 3     | 1     | 3     | 1     | 1     | 1     | 2     | 3     |
| 10,00                   | 0,06          | 2                             | 2     | 3     | 1     | 2     | 2     | 3     | 3     | 3     | 3     |
| 15,00                   | 0,06          | 2                             | 1     | 1     | 3     | 3     | 2     | 1     | 3     | 2     | 3     |
| 20,00                   | 0,06          | 2                             | 1     | 2     | 1     | 1     | 2     | 1     | 1     | 1     | 2     |
| 10,00                   | 0,09          | 2                             | 3     | 3     | 3     | 3     | 2     | 3     | 3     | 2     | 3     |
| 15,00                   | 0,09          | 2                             | 3     | 3     | 3     | 2     | 1     | 2     | 3     | 3     | 3     |
| 20,00                   | 0,09          | 2                             | 2     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 2     | 2     | 3     |
| 10,00                   | 0,03          | 3                             | 1     | 3     | 3     | 2     | 2     | 2     | 3     | 3     | 3     |
| 15,00                   | 0,03          | 3                             | 2     | 1     | 1     | 2     | 2     | 1     | 3     | 3     | 2     |
| 20,00                   | 0,03          | 3                             | 1     | 3     | 2     | 2     | 2     | 2     | 3     | 3     | 3     |
| 10,00                   | 0,06          | 3                             | 2     | 2     | 1     | 2     | 2     | 2     | 1     | 2     | 3     |
| 15,00                   | 0,06          | 3                             | 1     | 1     | 1     | 3     | 2     | 2     | 3     | 1     | 1     |
| 20,00                   | 0,06          | 3                             | 1     | 1     | 1     | 1     | 2     | 2     | 3     | 2     | 2     |
| 10,00                   | 0,09          | 3                             | 2     | 2     | 2     | 1     | 2     | 3     | 2     | 1     | 3     |
| 15,00                   | 0,09          | 3                             | 2     | 2     | 1     | 3     | 3     | 2     | 3     | 3     | 3     |
| 20,00                   | 0,09          | 3                             | 1     | 2     | 1     | 2     | 2     | 1     | 2     | 1     | 3     |
| 10,00                   | 0,03          | 4                             | 1     | 1     | 1     | 3     | 2     | 2     | 3     | 3     | 3     |
| 15,00                   | 0,03          | 4                             | 1     | 2     | 2     | 1     | 2     | 2     | 3     | 3     | 3     |
| 20,00                   | 0,03          | 4                             | 1     | 1     | 1     | 3     | 2     | 2     | 3     | 3     | 3     |
| 10,00                   | 0,06          | 4                             | 2     | 1     | 1     | 2     | 2     | 2     | 3     | 3     | 2     |
| 15,00                   | 0,06          | 4                             | 1     | 2     | 1     | 2     | 2     | 1     | 3     | 3     | 3     |
| 20,00                   | 0,06          | 4                             | 1     | 1     | 1     | 2     | 3     | 2     | 3     | 3     | 1     |
| 10,00                   | 0,09          | 4                             | 1     | 2     | 1     | 2     | 2     | 2     | 3     | 3     | 3     |
| 15,00                   | 0,09          | 4                             | 1     | 1     | 1     | 3     | 2     | 3     | 3     | 2     | 1     |
| 20,00                   | 0,09          | 4                             | 1     | 1     | 1     | 3     | 2     | 2     | 3     | 3     | 3     |

#### 5.5.4 Klasifikacija tvrdoće kamena značajkama sila rezanja, jakosti struja pogonskih motora, vibracija i akustične emisije

Nakon zasebne analize po svakoj grupi vrste signala, po uzoru na modeliranje stupnja istrošenosti svrdla, zadnji korak predstavlja analiza i izdvajanje povoljnih kombinacija značajki pojedinih vrsta signala i njihovih kombinacija s ciljem iznalaženja što robusnijeg modela klasifikacije tvrdoće kamena. Rezultati provedenih zasebnih analiza klasifikacije tvrdoće, bazirani na signalima sila rezanja, jakosti struja pogonskih motora, vibracijama i akustičnoj emisiji, nešto su lošiji u odnosu na rezultate analize klasifikacije istrošenosti svrdla. Pri tome je najveća uspješnost klasifikacije ( $T_{SR}=89,51\%$ ) ostvarena kombinacijama značajki  $(XY+XY_{SUM})_{55}$  iz signala vibracija. Kombinacija značajki iz signala akustične emisije dala je znatno lošiji rezultat u odnosu na prethodno navedene značajke signala vibracija. Pri tome je najbolji rezultat uspješnosti klasifikacije ostvaren kombinacijama značajki signala akustične emisije  $(AE_{5000})_{30}$  s rezultatom od  $T_{SR}=54,94\%$ . Signali sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora postigli su podjednake rezultate s uspješnošću klasifikacije oko 50 %.

Shodno navedenom, u zadnjem koraku analize provest će se modeliranje sustava za klasifikaciju tvrdoće kamena zasnovanog na kombinaciji parametara obrade i kombinacijama značajki tvrdoće izdvojenih iz signala jakosti struja pogonskih motora, vibracija i akustične emisije. Signali sila rezanja, po uzoru na modeliranje istrošenosti svrdla, a zbog velike korelacije sa signalima jakosti struja biti će ispušteni iz daljnje analize. Pri tome će najbolje kombinacije značajki svake vrste signala biti međusobno kombinirane u nekoliko različitih kombinacija. Uspješnosti klasifikacije modela tvrdoće kamena zasnovanih na kombinacijama značajki izdvojenih iz signala vibracija i akustične emisije, struje i vibracija, struja i akustične emisije te struja, vibracija i akustične emisije dani su u tablicama 5.41 -5.44, respektivno.

Tablica 5.41 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki signala vibracija i akustične emisije

| Kombinacija značajki                       | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                 |                  |                  |                  |
|--|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
|  | T <sub>1</sub>                   | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | K <sub>1SR</sub> | K <sub>2SR</sub> | K <sub>3SR</sub> |
| $(XY+XY_{SUM})_{55}+(AE_{5000})_{30}$      | 87,96                            | 84,26          | 87,04          | 86,42           | 73,15            | 93,52            | 92,59            |
| $(XY+XY_{SUM})_{55}+(AE_{5000})_{35}$      | 87,04                            | 83,33          | 83,33          | 84,57           | 73,15            | 90,74            | 89,81            |
| $(XY+XY_{SUM})_{55}+(AE_{RAZLIČITI})_{40}$ | 87,96                            | 88,89          | 84,26          | 87,04           | 84,26            | 84,26            | 92,59            |

|  |       |       |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $(XY+XY_{SUM})_{60}+(AE_{5000})_{30}$        | 86,11 | 83,33 | 79,63 | 83,02 | 73,15 | 85,19 | 90,74 |
| $(XY+XY_{SUM})_{60}+(AE_{5000})_{35}$        | 86,11 | 80,56 | 79,63 | 82,10 | 74,07 | 84,26 | 87,96 |
| $(XY+XY_{SUM})_{60}+(AE_{RAZLIČITI})_{40}$   | 90,74 | 86,11 | 77,78 | 84,88 | 85,19 | 79,63 | 89,81 |
| $(XYZ+XYZ_{SUM})_{65}+(AE_{5000})_{30}$      | 88,89 | 76,85 | 78,70 | 81,48 | 59,26 | 89,81 | 95,37 |
| $(XYZ+XYZ_{SUM})_{65}+(AE_{5000})_{35}$      | 87,04 | 80,56 | 81,48 | 83,02 | 62,96 | 92,59 | 93,52 |
| $(XYZ+XYZ_{SUM})_{65}+(AE_{RAZLIČITI})_{40}$ | 94,44 | 84,26 | 76,85 | 85,19 | 72,22 | 88,89 | 94,44 |

Tablica 5.42 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki signala vibracija i jakosti struja pogonskih motora

| Kombinacija značajki     | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                 |                  |                  |                  |
|--------------------------|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
|                          | T <sub>1</sub>                   | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | K <sub>1SR</sub> | K <sub>2SR</sub> | K <sub>3SR</sub> |
| $(XY+XY_{SUM})_{55}+I$   | 74,07                            | 82,41          | 81,48          | 79,32           | 82,41            | 76,85            | 78,70            |
| $(XY+XY_{SUM})_{60}+I$   | 79,63                            | 84,26          | 76,85          | 80,25           | 83,33            | 79,63            | 77,78            |
| $(XYZ+XYZ_{SUM})_{65}+I$ | 78,70                            | 82,41          | 78,70          | 79,94           | 80,56            | 79,63            | 79,63            |

Tablica 5.43 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki signala akustične emisije i jakosti struja pogonskih motora

| Kombinacija značajki      | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                 |                  |                  |                  |
|---------------------------|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
|                           | T <sub>1</sub>                   | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | K <sub>1SR</sub> | K <sub>2SR</sub> | K <sub>3SR</sub> |
| $(AE_{5000})_{30}+I$      | 64,81                            | 63,89          | 62,96          | 63,89           | 58,33            | 72,22            | 61,11            |
| $(AE_{5000})_{35}+I$      | 67,59                            | 68,52          | 63,89          | 66,67           | 62,04            | 75,00            | 62,96            |
| $(AE_{RAZLIČITI})_{40}+I$ | 56,48                            | 58,33          | 65,74          | 60,19           | 50,93            | 66,67            | 62,96            |

Tablica 5.44 Rezultati klasifikacije tvrdoće kamena dobiveni kombinacijama značajki signala vibracija, akustične emisije i jakosti struja pogonskih motora

| Kombinacija značajki                         | Uspješnost klasifikacije (UK), % |                |                |                 |                  |                  |                  |
|--|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
|  | T <sub>1</sub>                   | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>SR</sub> | K <sub>1SR</sub> | K <sub>2SR</sub> | K <sub>3SR</sub> |
| $(XY+XY_{SUM})_{55}+(AE_{5000})_{30}+I$      | 74,07                            | 76,85          | 78,70          | 76,54           | 71,30            | 81,48            | 76,85            |
| $(XY+XY_{SUM})_{55}+(AE_{5000})_{35}+I$      | 78,70                            | 80,56          | 79,63          | 79,63           | 73,15            | 86,11            | 79,63            |
| $(XY+XY_{SUM})_{55}+(AE_{RAZLIČITI})_{40}+I$ | 74,07                            | 81,48          | 77,78          | 77,78           | 73,15            | 80,56            | 79,63            |
| $(XY+XY_{SUM})_{60}+(AE_{5000})_{30}+I$      | 75,00                            | 76,85          | 76,85          | 76,23           | 72,22            | 81,48            | 75,00            |

|  |       |       |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $(XY+XY_{SUM})_{60}+(AE_{5000})_{35}+I$        | 74,07 | 75,93 | 76,85 | 75,62 | 72,22 | 81,48 | 73,15 |
| $(XY+XY_{SUM})_{60}+(AE_{RAZLIČITI})_{40}+I$   | 74,07 | 78,70 | 75,00 | 75,93 | 72,22 | 79,63 | 75,93 |
| $(XYZ+XYZ_{SUM})_{65}+(AE_{5000})_{30}+I$      | 76,85 | 78,70 | 76,85 | 77,47 | 65,74 | 88,89 | 77,78 |
| $(XYZ+XYZ_{SUM})_{65}+(AE_{5000})_{35}+I$      | 78,70 | 75,00 | 76,85 | 76,85 | 69,44 | 87,04 | 74,07 |
| $(XYZ+XYZ_{SUM})_{65}+(AE_{RAZLIČITI})_{40}+I$ | 75,93 | 78,70 | 77,78 | 77,47 | 71,30 | 86,11 | 75,00 |

Iz pregleda dobivenih rezultata proizlazi da međusobne kombinacije najboljih kombinacija značajki svake vrste signala ne poboljšavaju uspješnost klasifikacije tvrdoće kamena. Naprotiv, kombinacija značajki izdovoljenih iz signala vibracija i akustične emisije (najbolji rezultat u analizi međusobnih kombinacija značajki) rezultiraju 2 % manjom uspješnošću klasifikacije od zasebne analize kombinacija istih značajki. Iz navedenog se može izvesti zaključak da su kombinacije značajki dobivene iz signala vibracija najpogodnije za klasifikaciju tvrdoće kamena.

Razvojem industrije i rastom tržišta neprestano se otvaraju nova nalazišta kamena različitih mehaničkih svojstava koja neposredno utječu na njegovu obradivost. Mehanička svojstva kamena mogu značajno varirati u zoni obrade, a često ih je teško ili nemoguće prethodno kvalitetno izmjeriti. Imajući u vidu nehomogenu i anizotropnu strukturu kamena, tj. promjenu tvrdoće, dinamika trošenja reznih alata za obradu kamena izrazito je nelinearne prirode pa je u tom smislu identifikacija stupnja istrošenosti značajno otežana. S druge strane, implementacija preciznih i robusnih modela istrošenosti predstavlja imperativ u razvoju suvremenih automatiziranih obradnih sustava. Kvalitetna procjena istrošenosti alata nužna je i u realizaciji adaptivnih modela upravljanja obradnim sustavima čime se značajno podiže razina njihove autonomnosti.

Stoga je u ovom radu provedeno eksperimentalno istraživanje temeljeno na hipotezi da se iz odabranih i eksperimentalno snimljenih signala procesa bušenja kamena mogu izdvojiti značajke osjetljive na promjene stanja alata i strukturu obrađivanog materijala, na temelju kojih je moguće formirati robusne modele za klasifikaciju stupnja istrošenosti alata.

Određivanje stupnja istrošenosti i tvrdoće kamena provedeno je korištenjem značajki iz vremenskog i frekvencijskog područja, koje su izdvojene iz četiri vrste filtriranih signala obradnog procesa. Značajke su procesirane primjenom algoritma umjetne neuronske mreže s radijalnim baznim funkcijama u nekoliko koraka. U prvom je koraku provedena analiza značajki za svaku vrstu signala zasebno. Značajke su najprije analizirane individualno, a zatim i u kombinacijama formiranim od značajki koje su pokazale zadovoljavajući kapacitet procjene stupnja istrošenosti alata i tvrdoće obratka.

U drugom su koraku najbolje kombinacije značajki svake vrste signala dodatno međusobno kombinirane u cilju postizanja veće preciznosti i robusnosti sustava nadzora. Ovom metodologijom definirana su dva modula predloženog sustava nadzora procesa bušenja kamena.

Strukturiranje modula za klasifikaciju stupnja istrošenosti započelo je najprije primjenom značajki izdvojenih iz signala sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora. Značajke izdvojene iz ove dvije vrste signala ostvarile su uspješnost klasifikacije tek nešto

iznad 60 %. Glavni razlog tomu je nemogućnost kvalitetnog odvođenja odvojene čestice iz zone obrade, što pri povećanju dubine rezanja izaziva višestruki porast sila rezanja i jakosti struja.

Analizom značajki izdvojenih iz signala vibracija snimanih u području od 5Hz do 5000 Hz ostvarena je uspješnost klasifikacije istrošenosti 97,84 %, što je ujedno i najbolji rezultat klasifikacije stupnja istrošenosti svrdla.

Kombinacije značajki signala vibracija koje su ostvarile najbolje rezultate klasifikacije istrošenosti svrdla dodatno su analizirane, te je utvrđeno da vrsta kamena ne utječe na rezultat klasifikacije, tj. ostvareni su podjednako kvalitetni rezultati klasifikacije istrošenosti svrdla kod obrade uzoraka kamena različitih tvrdoća. Pritom je najbolje klasificirano potpuno istrošeno svrdlo, dok su najlošiji rezultati ostvareni klasifikacijom potpuno oštrog svrdla.

Modeliranje stupnja istrošenosti primjenom signala akustične emisije je provedeno sa značajkama izdvojenim iz frekvencijskih pojaseva od 50 kHz do 400 kHz. Pri tome su značajke trošenja ostvarile uspješnost klasifikacije od 88,89 %, pri čemu su, kao i kod signala vibracija, najbolje kombinacije značajki pokazale neosjetljivost na vrstu obrađivanog kamena.

Nakon analize značajki svake vrste signala zasebno, provedena je i analiza kombinacija značajki izdvojenih iz svih snimanih signala procesa. Ta je analiza pokazala lošije rezultate u odnosu na rezultate dobivene sa značajkama izdvojenim iz svake pojedine vrste signala. Shodno navedenom, za klasifikaciju stupnja istrošenosti svrdla kod bušenja kamena se predlaže upotreba signala vibracija i akustične emisije uz primjenu nove metodologije izdvajanja i odabira značajki trošenja.

Strukturiranje modula za klasifikaciju tvrdoće kamena provedeno je jednakom metodologijom kao i za modul za klasifikaciju stupnja istrošenosti. U analizi temeljenoj na značajkama iz signala sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora ostvareni su podjednaki rezultati s uspješnošću klasifikacije malo većom od 50 %.

Primjenom značajki izdvojenih iz signala vibracija ostvarena je uspješnost klasifikacije u iznosu od 89,51 %, što je i najbolji rezultat klasifikacije tvrdoće kamena. Uz navedeno, potvrđeno je da pojedini stupanj istrošenosti ne utječe na rezultat klasifikacije tvrdoće, tj. da su dobiveni podjednako kvalitetni rezultati klasifikacije tvrdoće kamena bušenjem oštrim i istrošenim svrdlom.

Značajke izdvojene iz signala akustične emisije ostvarile su uspješnost klasifikacije tvrdoće od oko 55 %. Stoga se može zaključiti da upotreba senzora akustične emisije u rasponu frekvencija od 50 kHz do 400 kHz nije primjenjiva za procjenu tvrdoće kamena.

I u ovom je slučaju, a nakon analize značajki svake vrste signala zasebno, provedena analiza kombinacija značajki izdvojenih iz svih snimanih signala procesa. Ona je također pokazala lošije rezultate u odnosu na modeliranje zasnovano na kombinacijama značajki izdvojenim iz svakog tipa signala zasebno. Stoga je na kraju zaključeno da su signali vibracija najpodesniji za identifikaciju tvrdoće kamenih obradaka u postupcima obrade odvajanjem čestica.

Nastavak istraživanja u ovom području biti će proveden u nekoliko pravaca. Eksperimentalni dio ovoga rada temelji se na strojnoj obradi tri vrste kamena pri čemu su korištena svrdla prethodno odabrane geometrije. U svrhu povećanja robusnosti modela za klasifikaciju istrošenosti alata i tvrdoće kamena provesti će se istraživanje s različitim dimenzijama i tipovima svrdala. S druge strane, zbog povećanja opsega primjene dobivenih modela preporučuje se također provesti ispitivanje i na ostalim vrstama kamena uključujući i granite i kvarcite. Osim navedenog, u budućim istraživanjima proširiti će se frekvencijsko područje signala akustične emisije i vibracija primjenom novih vrsta senzora. U konačnici, cilj navedenih istraživanja predstavlja razvoj industrijski primjenjivog sustava za nadzor istrošenosti reznog alata i tvrdoće obratka u strojnoj obradi kamena. Njegova primjena dodatno bi povećala sigurnost i kvalitetu obradnog procesa, te stvorila uvjete za realizaciju adaptivno upravljanih alatnih strojeva nove generacije.



---

## 7 Literatura

---

- [1] Tomislav Bužančić, *Klesarstvo i graditeljstvo.*, 2008.
- [2] Nikica Torbica, *Hram u životu starih Grka.*: Essehist : časopis studenata povijesti i drugih društveno-humanističkih znanosti, 2014.
- [3] Amfiteatar u Puli. [Online]. <http://arhitektonskerazglednice.com/#prettyPhoto/1/>
- [4] Dioklecijanova palača. [Online]. <http://www.visitadriatic.eu/hrvatske-regije/unesco-destinacije/dioklecijanova-palaca-i-srednjovjekovni-split/>
- [5] Ulomak grede s natpisom kneza Branimira. [Online]. <http://nova-akropola.hr/shop/arheoloske-reprodukcije/hrvatska-bastina/ulomak-grede-s-natpisom-kneza-branimira/>
- [6] Katedrala u Trogiru. [Online]. <https://metrouk2.files.wordpress.com/2017/03/148741568-e1488650152421.jpg?quality=80&strip=all>
- [7] Šibenska katedrala. [Online]. [https://hr.wikipedia.org/wiki/Katedrala\\_sv.\\_Jakova\\_u\\_%C5%A0ibeniku#/media/File:Šibenik\\_katedrala.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Katedrala_sv._Jakova_u_%C5%A0ibeniku#/media/File:Šibenik_katedrala.jpg)
- [8] Medvedgrad. [Online]. <http://www.journal.hr/wp-content/uploads/2015/06/medvedgrad.jpg?x21908>
- [9] Dubrovačke zidine. [Online]. <https://cache-graphicslib.viator.com/graphicslib/thumbs674x446/3494/SITours/dubrovnik-ancient-city-walls-historical-walking-tour-in-dubrovnik-114902.jpg>
- [10] E. M. Winkler, *Stone: Properties, Durability in Man's Environment.* Indiana, U.S.A.: Springer-Verlag Wien GmbH, 1975.

- 
- [11] Thomas P. Dolley, "U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries", 2015.
- [12] T. Heldal, P. R. Neeb, "Natural stone in Norway: production, deposits and developments", *Norges geologiske undersøkelse Bulletin*, Vol. 436, pp. 15-26, 2000.
- [13] S. H. Hoseinie, M. Ataei, R. Mikaiel, "Comparison of Some Rock Hardness Scales Applied in Drillability Studies", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 37, no. 5, pp. 1451–1458, 2012.
- [14] Erkki Jantunen, "A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, no. 9, pp. 997–1010, 2002.
- [15] H. C. Mohring, K. M. Litwinski, O. Gummer, "Process monitoring with sensory machine tool components", *CIRP Annals, Manufacturing Technology*, Vol. 59, no. 1, pp. 383-386, 2010.
- [16] R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, D. Dornfeld, "Advanced monitoring of machining operations", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 59, no. 1, pp. 717-739, 2010.
- [17] Danko Brezak, Tomislav Staroveški, Ivan Stiperski, Miho Klaić, Dubravko Majetić, "Tool condition monitoring in stone drilling with artificial neural network", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 772, pp. 268-273, 2015.
- [18] Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, "Ispitne metode prirodnog kamena- Određivanje tvrdoće prema Knoop-u HRN EN 14205:2003", 2004.
- [19] Aydin Salimiasl, Ahmet Özdemir, "Analyzing the performance of artificial neural network (ANN)-, fuzzy logic (FL)-, and least square (LS)-based models for online tool condition monitoring", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 87, no. 1, pp. 1145–1158, 2016.
- [20] Carlos Eduardo Dorigatti Cruz, Paulo Roberto de Aguiar, Álisson Rocha Machado,
-

- 
- Carlos Eduardo Bianchi, Gabriel João Contrucci, Castro Frederico Neto, "Monitoring in precision metal drilling process using multi-sensors and neural network", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, no. 1, pp. 151–158, April 2013.
- [21] Siegfried Siegesmund, *Stone in Architecture.*: Springer, 2014.
- [22] *Eksploatacija arhitektonsko-građevnog kamena.*, 2009.
- [23] Tamara Aleksandrov Fabijanić, "Razvoj referentnih pločica tvrdoće po vickersu postupkom metalurgije praha", Zagreb, 2014.
- [24] Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, "Ispitne metode prirodnoga kamena-  
Određivanje otpornosti na abraziju HRN EN 14157:2008", 2008.
- [25] Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, "Metode ispitivanja prirodnog kamena-  
Određivanje jednoosne tlačne čvrstoće HRN EN 1926:2008", 2008.
- [26] Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, "Metode ispitivanja prirodnog kamena-  
Određivanje gustoće i prostorne mase, ukupne i otvorene poroznosti HRN EN  
1936:2008", 2008.
- [27] Viktor P. Astakhov, *Drills: Science and Technology of Advanced Operations*. London:  
Taylor & Francis Group, 2014.
- [28] S. Ekinović, "Postupci obrade rezanjem", Mašinski fakultet, Zenica, 2003.
- [29] I. Seuček, "Prilog poboljšanju reznih svojstava spiralnog svrdla", Fakultet strojarstva i  
brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Doktorska disertacija 1992.
- [30] Ulrik Beste, Staffan Jacobson, Sture Hogmark, "Rock penetration into cemented  
carbide drill buttons", *Wear*, pp. 1142–1151, 2008.
- [31] D. Brezak, "Razvoj hibridnog estimatora trošenja alata i metoda vođenja alatnog

- 
- stroja", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Doktorski rad 2007.
- [32] T. Udiljak, "Doprinos razvoju metoda za ispitivanje i praćenje stupnja istrošenosti oštrice reznog alata", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Disertacija 1996.
- [33] M. Nouari, A. Molinari, "Experimental verification of a diffusion tool wear model using a 42CrMo4 steel with an uncoated cemented tungsten carbide at various cutting speeds", *Wear*, pp. 1151–1159, 2015.
- [34] U. Beste, T. Hartzell, H. Engqvist, N. Axén, "Surface damage on cemented carbide rock-drill buttons", *Wear*, pp. 324-329, 2001.
- [35] International Organization for Standardization, "Tool-life testing with single-point turning tools, ISO 3685:1993", 1993.
- [36] Tomislav Staroveški, "MODELIRANJE TROŠENJA MEDICINSKOG SVRDLA", Zagreb, 2013.
- [37] Chauhan Chetankumar K., "Growth and Characterization of struvite and related crystals", 2011.
- [38] Željko Alar, "Analiza utjecajnih faktora na mjernu nesigurnost etalonskog tvrdomjera", Zagreb, 2008.
- [39] W. E. Bamford, H. v. Duyse, C. Nieble, F. Rummel, E. Broch, J. A. Franklin, R. H. Atkinson, P. J. Tarkoy, D. U. Deere, "Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks", *Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Geomech. Abst*, pp. 89-97, 1977.
- [40] D. Brezak, "Inteligentni sustav za nadzor istrošenosti reznog alata", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Magistarski rad 2003.
- [41] Huseyin Metin Ertunc, Cuneyt Oysu, "Drill wear monitoring using cutting force signals", *Mechatronics*, pp. 533–548, 2004.

- 
- [42] R. Heinemann, S. Hinduja, G. Barrow, "Use of process signals for tool wear progression sensing in drilling small deep holes", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 243-250, 2007.
- [43] E. Jantunen, "A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 997-1010, 2002.
- [44] G. Exadaktylos, P. Tiano, C. Filareto, "Validation of a Model of Rotary Drilling of Rocks with the Drilling Force easurement System", *Aedificatio Publishers*, Vol. 6, no. 3, pp. 307-340, 2000.
- [45] Niyazi Bilim, "Determination of drillability of some natural stones and their association with rock properties", *Scientific Research and Essays*, Vol. 6, no. 1992-2248, pp. 382-387, 2011.
- [46] M. C. Stavropoulou, K. F. Giannakopoulos, G.E. Exadaktylos, "Experimental and numerical study of mechanical cutting of dionysos marble", in *7th National Congress on Mechanics*, Chania, 2004.
- [47] Emilio Valentini, Alessio Benincasa, Piero Tiano, Silvia Rescic, "On site drilling resistance profiles of natural stones", , 2008.
- [48] M. Pamplona, M. Kocher, R. Snethlage, L. Aires-Bar, "Drilling resistance: Overview and perspectives", , Stuttgart, 2007, pp. 665-676.
- [49] M. Al-naddaf, F. Wakid, Y. Abu Alhassan, "Micro-drilling resistance measurement: a new technique to estimate the porosity of a building stone", *Mediterranean Arhaeology and archeometry*, Vol. 13, no. 1, pp. 225-233, 2013.
- [50] M.A. Mannan, S. Broms, B. Lindustrom, "Monitoring and adaptive control of cutting process by means of motor power and current measurements", *Ann. CIRP*, pp. 347-350, 1989.
- [51] P.N. Botsaris, J.A. Tsanakas, "State-of-the-art in methods applied to tool condition

- 
- monitoring (tcm) in unmanned machining operations: A review", in *The International Conference of COMADEM*, Prague, 2008, pp. 73-87.
- [52] S. Rangwala, D. Dornfeld, "Sensor Integration Using Neural Networks for Intelligent Tool Condition Monitoring", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 112, pp. 219-228, 1990.
- [53] M. Yurdakul, H. Akdas, "The effect of rock mineralogic and petrographic properties on stone cutting feed rate", in *49th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*, San Francisco, 2015.
- [54] J. Delgado Rodrigues, D. Costa, "A new Method for Data Correction in drill Resistance Tests for the Effect of drill Bit Wear", *International Journal for Restoration*, Vol. 10, no. 3, pp. 1-18, 2004.
- [55] Marisa Pamplona, Mathias Kocher, Rolf Sneathlage, "Halite – A new calibration material for microdrilling resistance measurements", *Journal of cultural heritage*, Vol. 11, pp. 180-184, 2010.
- [56] T.I. El-Wardany, D. Gao, M.A. Elbestawi, "Tool condition monitoring in drilling using vibration signature analysis", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 36 (6), pp. 687–711, 1996.
- [57] M. H. S. Harun, M. F. Ghazali, A. R. Yusoff, "Analysis of tri-axial force and vibration sensors for detection of failure criterion in deep twist drilling process", *Int J Adv Manuf Technol*, doi:10.1007/s00170-016-9344-3, pp. 3535–3545, 2016.
- [58] Issam Abu Mahfouz, "Drilling wear detection and classification using vibration signals", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 707-720, 2003.
- [59] Lihui Wang, Robert X. Gao, *Condition Monitoring and control for intelligent manufacturing*. UK: Springer, 2006.
- [60] A.L. Quadro, J.R.T. Branco, "Analysis of the acoustic emission during drilling test",
-

- 
- Surface & Coating Technology*, Vol. 94-95, no. 1-3, pp. 691–695, 1997.
- [61] A. Velayudham, R. Krishnamurthy, T. Soundarapandian, "Acoustic emission based drill condition monitoring during drilling of glass/phenolic polymeric composite using wavelet packet transform", *Materials Science and Engineering*, pp. 141–145, 2005.
- [62] Harsha Vardhan, Rajesh Kumar Bayar, "Application of Sound Level for estimating rock properties", *Noise Control, Reduction and Cancellation Solutions in*, 2012.
- [63] Harsha Vardhan, G. R. Adhikari, Mandela Govinda Raj, "Estimating rock properties using sound levels produced during drilling", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 46, no. 3, pp. 604-612, 2009.
- [64] National Instruments Co. (2013, Mar.) NI PCI-6023E 200 kS/s, 12-Bit, 16 Analog Input Multifunction DAQ. [Online]. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/hr/nid/10967>
- [65] Measurement Computing Co. (2013, Mar.) PCI-DAS4020/12 12-Bit, Ultra High-Speed Multifunction Board. [Online]. <http://www.mccdaq.com/pci-data-acquisition/PCI-DAS4020-12.aspx>
- [66] Kistler Holding AG. (2013, Mar.) Multicomponent Dynamometer Type 9257B. [Online]. <http://www.kistler.com/us/en/product/force/9257B>
- [67] Kistler Holding AG. (2013, Mar.) Multichannel Charge Amplifier Type 5017B. [Online]. [http://www.intertechnology.com/Kistler/pdfs/ACC\\_5017B\\_Charge\\_Amplifier.pdf](http://www.intertechnology.com/Kistler/pdfs/ACC_5017B_Charge_Amplifier.pdf)
- [68] Kistler Holding AG. (2013, Mar.) Miniature PiezoBeam(r) Accelerometer Type 8688A. [Online]. <http://www.igel-ingenieure.de/us/en/product/acceleration/8688A10>
- [69] Kistler Holding AG. (2013, Mar.) Piezotron Coupler Type 5134B. [Online]. <http://www.helmar.com.pl/helmar/biblioteka/pdf/5134b0.pdf>
- [70] Kistler Holding AG. (2013, Mar.) Acoustic Emission - Piezotron Coupler Type 5125B. [Online]. <http://www.kistler.com/hr/en/product/monitoring-and-analysis->
-

---

[instruments/5125B1](#)

- [71] Opto Engineering S.r.l. (2013, Mar.) TC2309 1x Bi-Telecentric lens for Detectors up to 2/3". [Online]. <http://www.opto-engineering.com/brochure/TC2309.pdf>
- [72] The Imaging Source Europe GmbH. (2013, Mar.) FireWire 400 Monochrome Camrea DMK 41AF02. [Online]. [http://www.theimagingsource.com/en\\_US/products/cameras/firewire-ccd-mono/dmk41af02](http://www.theimagingsource.com/en_US/products/cameras/firewire-ccd-mono/dmk41af02)
- [73] Božo Prtoljan, "Izvešće o određivanju kvalitete arhitektonsko-građevinskog kamena u istražnom prostoru Konavala. "Sivac Konavoski"", Zagreb, 2008.
- [74] Paola Marini, "Determination of physical and mechanical properties on a sample of a natural stone named "Mironja"", Torino, April 2007.
- [75] V. Gorgievski, "Of tests of construction stone type "Sivec"", Skoplje, 2003.
- [76] Zrinka Murat, "Multisenzorski sustav za indirektni nadzor istrošenosti medicinskih svrdla", Zagreb, 2016.
- [77] B. Novaković, D. Majetić, M. Široki, "Umjetne neuronske mreže", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.
- [78] D. Brezak, T. Udiljak, D. Majetic, B. Novakovic, J. Kasac, "Tool Wear Monitoring Using Radial Basis Function Neural Network", in *Proceedings of IEEE International Joint Conference on Neural Networks - IJCNN 2004*, Vol. 3, Budapest, Hungary, 2004, pp. 1859-1863.



**Miho Klaić** rođen je 17. veljače 1988. godine u Dubrovniku, gdje je završio osnovnu školu, a potom I. Tehničku školu Tesla u Zagrebu. Fakultet strojarstva i brodogradnje, smjer strojarstvo upisuje akademske godine 2007/2008. Diplomirao je u srpnju 2012. godine na usmjerenju *Obradni sustavi* s temom diplomskog rada „*Konstrukcija glodaćeg obradnog centra za obradu kamena*“. Tijekom studija je nagrađen je srebrenom medaljom na svjetskom sajmu inovacija održanom u kineskom gradu Suzhou s radom „*Prijenosni stroj za graviranje kamena*“ te je također dvije godine bio demonstrator pri Zavodu za tehnologiju, Katedri za alatne strojeve te Katedri za oblikovanje deformiranjem.

U srpnju 2012. godine zapošljava se u tvrtci „Flintstones“ iz Dubrovnika gdje radi na poslovima vezanima uz tehnologiju i konstrukciju strojeva za obradu kamena. U studenom 2012. godine upisuje poslijediplomski studij strojarstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, smjer *Strojarske tehnologije*. Od svibnja 2013. godine zapošljava se na Fakultetu strojarstva i brodogradnje gdje radi kao asistent na Katedri za alatne strojeve, Zavoda za tehnologiju.

Godine 2013. postaje član Hrvatske udruge proizvodnog strojarstva (HUPS). Od iste je godine i član organizacijskog odbora međunarodnog savjetovanja International Scientific Conference on Production Engineering (CIM), koje organiziraju HUPS i PTW institut iz Darmstadt-a.

Područja kojima se bavi su konstrukcija alatnih strojeva, postupci obrade odvajanjem te modeliranje procesa trošenja alata. Aktivno sudjeluje u izvođenju nastave kolegija Katedre, te je također uključen u ostale znanstvene i stručne djelatnosti Katedre za alatne strojeve. Do sada je kao autor ili koautor objavio 8 znanstvena i stručna rada u zbornicima radova u zemlji i inozemstvu.

Govori i piše engleski jezik. Oženjen je i otac jednog djeteta.

## Short Biography

---

Miho Klaić was born on February 17th, 1988 in Dubrovnik, Croatia where he also attended elementary school. From 2003-2007, he attended high school, *1<sup>st</sup> Technic School "Tesla"* in Zagreb. During his high school education, he participated in several national and international contests for young machinists and innovators, and has received several rewards including gold medals for innovation on ARCA 2007 and IENA 2008.

He enrolled in the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture (FSB), University of Zagreb in 2007 and graduated in 2012 majoring in *Machining system* course with diploma thesis: *Design of milling center for stone machining*. During the study he was student assistant at the Chair of Metal Forming and also, at the Chair of Machine Tools.

In 2012 he was employee of „Flintstones“ ltd. in Dubrovnik, where worked on design of machine tools for stone machining.

Since 2013 he has been employed as junior researcher and teaching assistant at the Department of Technology, Chair of Machine Tools of FSB, and enrolled in the postgraduate study in the Mechanical Engineering Technology course. As teaching assistant, he is actively involved in several courses. Since the same year, he is a member of the Croatian Association for Production Engineering (HUPS) and also a member of the International Scientific Conference on Production Engineering Organizing Committee.

During postgraduate study he participated in the several technological projects financed by the Ministry of Science, Education and Sport.

His research interest is in the field of machine tools design, cutting process and tool wear modeling. He has published as author or co-author 8 scientific and professional papers in journals and conference proceedings.

He is fluent in English. He is married and a father of one son.