



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet šumarstva i drvne tehnologije

Alen Ibrišević

OPTIMIRANJE OBRADE FURNIRSKOGA USLOJENOG DRVA CNC GLODANJEM

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2026.



University of Zagreb
FACULTY OF FORESTRY AND WOOD TECHNOLOGY

Alen Ibrišević

OPTIMIZING THE PROCESSING OF VENEER PLYWOOD BY CNC MILLING

DOCTORAL DISSERTATION

Zagreb, 2026.



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet šumarstva i drvne tehnologije

Alen Ibrišević

OPTIMIRANJE OBRADJE FURNIRSKOGA USLOJENOG DRVA CNC GLODANJEM

DOKTORSKI RAD

Mentor: Prof.dr.sc. Goran Mihulja

Zagreb, 2026.

PODACI O MENTORU

Prof.dr. sc. Goran Mihulja rođen je 05. siječnja 1975. godine u Zagrebu, Republika Hrvatska. Po nacionalnosti Hrvat, oženjen, živi u Velikoj Gorici, gdje je završio osnovnu, te srednju Elektrotehničku školu.

Studij drvne tehnologije na Drvnotehnološkom odsjeku Šumarskoga fakulteta Sveučilišta u Zagrebu završio 1998. godine obranom diplomskog rada pod naslovom *Modifikacija površine bukovine ozračivanjem UV svjetlošću*.

Od 01.02.1999. godine zaposlen je na Sveučilištu u Zagrebu na Šumarskom fakultetu, u Zavodu za konstrukcije i tehnologiju proizvoda od drva (danas Zavodu za namještaj i drvo u graditeljstvu). Iste godine upisao je poslijediplomski studij na Šumarskom fakultetu u Zagrebu iz područja Tehnologije finalnih proizvoda. Veći dio 2000. godine proveo je na služenju vojnog roka. 2003. godine obranio je magistarski rad pod nazivom *Metode za ispitivanje čvrstoće lijepljenja drva na smik* u području Biotehničkih znanosti, polje Šumarstvo, grana Drvna tehnologija. 2008. godine obranio je doktorsku disertaciju pod nazivom *Činitelji koji utječu na slobodnu površinsku energiju drva* u području Biotehničkih znanosti, polje Drvna tehnologija, grana drvnotehnološki procesi.

U docenta je izabran 2009. godine, a u Višeg znanstvenog suradnika 2010. godine, u izvanrednog profesora 2018. godine, a u redovitog profesora 2023. godine.

Od listopada 2010. do listopada 2012. povjerena mu je dužnost prodekana za znanstveno istraživački rad Šumarskog fakulteta, kada postaje i članom Fakultetskog vijeća.

Prof. dr. sc. Goran Mihulja upisan je u Popis znanstvenika i istraživača Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa pod matičnim brojem 227456. Sudjelovao je na znanstvenim projektima Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske broj 0068012 *Trajnost i modifikacija površine drva*, 0068133 *Cjelovitost i postojanost površine drva*, 068-0680720-0710 *Novi materijali, tehnološki procesi i proizvodi u finalnoj obradi drva*, te na projektu HRZZ pod nazivom *Izrada hrvatskog drvnotehnološkog nazivlja*.

Od 2018 do 2022 sudjeluje na projektu HAMAG-BICRO-a pod nazivom *Istraživanje u poduzeću Spačva d.d. u svrhu razvoja inovativnih masivnih vrata od slavonske hrastovine*, Operativnog programa konkurentnost i kohezija 2014-2020, a od 2021 do 2023 na projektu oznake KK.01.2.1.02.0244 *Istraživanje i razvoj inovativnih drvnih zidnih obloga, pregradnih i nosivih zidova za održivu gradnju u poduzeću Spačva d.d*

Trenutno sudjeluje na sa projektima *Razvoj hibridne drveno-aluminijske staklene fasade s integriranim fotovoltaičima*, u okviru Programa Konkurentnost i kohezija 2021.-2027., *Razvoj drvenih obloga s integriranim električnim grijanjem (GRIpod)* Hrvatske zaklade za znanos, te Institucioalnom i istraživačkom projektu *Razvoj ekološki prihvatljivih proizvoda i procesa koji doprinose održivoj drvnoj gradnji i dobrobiti korisnika (Wood4Being)* financiran iz EU izvora 581 - Mehanizam za oporavak i otpornost.

Sudjelovao je u organizaciji nekoliko međunarodnih znanstvenih konferencija te je 2012. godine vodio konferenciju pod nazivom „*Drvo je prvo – znanjem i tehnologijom do konkurentnosti sektora šumarstva i prerade drva*“.

Do posljednjeg je izbora u redovitog profesora kao autor ili koautor sudjelovao na dvadesetišest znanstvenih i jedanaest ostalih radova, od kojih je sa doktorandom objavio tri od ukupno pet radova u koautorstvu sa studentima kojima je bio neposredni voditelj i/ili mentor.

Nakon revizije studijskih programa Fakulteta šumarstva i drvne tehnologije u školskoj godini 2025.-2026. dodijeljeni su mu kolegiji *Ljepila i lijepljenje drva* i *Tehnologija finalne obrade drva* prijediplomskog studija Drvne tehnologije, kolegij *Proizvodnja namještaja I* Srtučnog studija Drvne tehnologije, kolegiji *CNC tehnika u finalnoj obradi drva* i *Višeosna obrada drva* Diplomskog studija Drvnotehnološki procesi, kolegiji *Istraživanje lijepljenih spojeva* i *Obrada drva podržana računalom* Diplomskog studija Oblikovanje proizvoda od drva, te kolegiji *Istraživanje adhezije i adheziva pri lijepljenju* i *Vrednovanje računalom upravljane tehnologije obrade drva* Doktorskog studija Šumarstvo i drvna tehnologija.

Kao savjetodavni znanstveni voditelj mentorirao je dva studentska znanstveno-istraživačka projekta pod naslovom *Istraživanje parametara za najbolje učvršćivanje alata na CNC stroj (BesTFix)* studenta Alena Malčića i *Razvoj tehnologije izrade stožastog čepa u spoju drvnih elemenata (ConiPlugTech)* studentice Tare Crnković, te izradu jednog doktorskog rada pod naslovom *Svojstva lijepljenog spoja parenjem stabilizirane bukovine* doktora znanosti Dominika Poljaka obranjenog 2011.godine.

Od srpnja 2011. do listopada 2012. godine voditelj je projekta „*Opremanje studentskog poduzetničkog inkubatora*“, u sklopu projekta MINGORP-a „*Obrazovanje za poduzetništvo 2011.*“ Od kolovoza 2013. do veljače 2015. voditelj je projekta razvoja Drvnotehnološkog odsjeka pod naslovom „*Razvoj visokoobrazovnih standarda kvalifikacija i studijskih programa na osnovama HKO-a za sektor industrijske prerade drva*“.

Najznačajnije stručno djelovanje bilježi kao stručni suradnik u Laboratoriju za drvo u graditeljstvu, gdje sudjeluje u poslovima vezanima uz ispitivanje proizvoda i izdavanja Uvjerenja o kvaliteti, te kao stručni suradnik na projektu *Povećanje konkurentnosti hrvatske industrije drvenih podova na EU tržištu*.

Otkako radi na Šumarskom fakultetu kontinuirano se stručno usavršava na brojnim instalacijama i obukama novih tehnologija u drvnoindustrijskim pogonima te specijaliziranim ekskurzijama, sajmovima, seminarima u zemlji i inozemstvu.

Govori i piše engleskim jezikom, a član je društva Forest Products Society, Hrvatske komore inženjera šumarstva i drvne tehnologije te Udruge inženjera drvne tehnologije.

SAŽETAK

OPTIMIRANJE OBRADJE FURNIRSKOGA USLOJENOG DRVA CNC GLODANJEM

Alen Ibrišević

Računalno upravljani strojevi neizostavne su tehnologije u suvremenoj proizvodnji namještaja i drugih drvnih proizvoda. Pri obradi drva glodanjem ključno je da alat što duže ostane u stanju naoštrenosti kako bi obrađena površina bila što bolje kvalitete te kako bi se smanjili troškovi oštrenja i zamjene alata, koji kod računalno upravljanih strojeva mogu biti vrlo visoki. Cilj je doktorskoga rada bio istražiti mogućnosti obrade furnirskoga uslojenog drva CNC (od eng. Computer Numerical Control) glodanjem te utvrditi utjecaj parametara obrade – posmične brzine, frekvencije vrtnje alata i vrste alata na kvalitetu obrade, razinu i spektar zvučnoga tlaka, temperaturu alata te povećanje polumjera zaobljenosti oštrice. Povećanje temperature alata može dovesti do promjene svojstava materijala alata i ubrzavanja procesa zatupljivanja, te može doći do kritičnog opterećenja i loma alata. Furnirsko uslojeno drvo od breze glodano je s tri različita alata pri promjenjivim parametrima obrade. Tijekom eksperimenta mjerena je temperatura alata, razina zvučnoga tlaka i polumjer zaobljenosti oštrice. Optimiziranje parametara obrade provedeno je primjenom višekriterijskih metoda optimizacije procesa, s ciljem povećanja učinka obrade CNC strojeva i trajnosti alata. Pored toga istraživao je utjecaj duljine obrade na temperaturu alata, razinu zvučnoga tlaka, polumjer zaobljenosti oštrice te kvalitetu obrađene površine. Na temelju rezultata istraživanja može se zaključiti da geometrija i materijal alata imaju najveći utjecaj na kvalitativna svojstva obrade furnirskoga uslojenog drva. Regresijska analiza rezultata istraživanja pokazala je da se temperatura alata, razina zvučnoga tlaka i polumjer zaobljenosti oštrice povećavaju s povećanjem duljine obrade a kvaliteta obrade se smanjuje. Dobra korelacija utvrđena je između temperature alata i polumjera zaobljenosti oštrice alata. Parametri obrade imaju značajan utjecaj na temperaturu alata, razinu zvučnoga tlaka i zatupljenje alata. Primjena višekriterijskih metoda optimizacije parametara obrade omogućuje izbor optimalnih parametara obrade furnirskoga uslojenog drva za pojedine vrste glodala kako bi se maksimizirao učinak obrade i vijek trajanja alata a minimiziralo povećanje temperature alata i razina zvučnoga tlaka.

Ključne riječi: CNC glodanje, furnirsko uslojeno drvo, temperatura alata, razina zvučnoga tlaka, polumjer zaobljenosti oštrice, višekriterijska metoda optimizacije, kvaliteta obrade, duljina obrade

ABSTRACT

OPTIMIZING THE PROCESSING OF VENEER PLYWOOD BY CNC MILLING

Alen Ibrišević

CNC (*Computer Numerical Control*) milling machines are indispensable machines of modern technology for the mechanical processing of wood and wood materials. When processing wood by milling, it is crucial that the tool remains sharp for as long as possible in order to achieve the best possible surface quality and to reduce the costs of sharpening and replacing tools, which can be very high with computer-controlled machines. An increase in the temperature of the tool can lead to a change in the properties of the tool material and an acceleration of tool wear, and a critical load and ultimately tool breakage occur. In research thesis, we investigate the processing of veneer plywood by CNC milling, and determine the influence of processing parameters (feed speed, rotation speed and type of tool) on surface quality, sound emission level and sound spectrum, heat distribution in the tool and tool wearing. 9 -layers birch (*Betula Pendula*) plywood produced by Wisa UPM Plywood Oy (Lahti, Finland) was used for experimental research. This plywood is characterized by the following basic technical parameters: thickness 12 mm, thickness of each veneer 1,33 mm, density 680 kg/m³, bonding quality 3 class according to HRN-EN 314-2, bending strength 34 N/mm², modulus of elasticity 10719 N/mm², compression strength 27 N/mm², formaldehyde release E1 class. Milling was carried out with three different tools. A double-edged spiral milling cutters with a diameter of 12 mm was used. First tool was produced by CMT Utensili S.P.A, (Udine, Italy), second tool was produced by LEITZ GmbH (Oberkochen, Germany), and third tool was produced by ITA TOOLS Sp. z.o.o. (Cracow, Poland). The tools were mounted in different tool holders type HSK 63. First tool holders was produced by KLEIN S.r.l (Pesaro, Italy). There were two tool holders produced by AKE Knebel GmbH (Balingen, Germany), and the last tool holder was produced by LEUCO Ledermann GmbH & Co. KG (Horb am Neckar, Germany). Tools were mounted using two type of collet: 462E (AKE Knebel GmbH, Balingen, Germany) and ER32 Metal World (Udine, Italy). Experimental researches were divided in several parts. Aim of first part of researches were to investigate influence of type tool holder on the sound level emission. Milling was carried out with 5 different rotation speed of spindle (22 000 min⁻¹, 20 000

min⁻¹, 18 000 min⁻¹, 16 000 min⁻¹, 14 000 min⁻¹) and 20 different feed speed (10-30 m/min). Milling cutter CMT Utensili S.P.A, (Udine, Italy) was used. The best results was obtained with tool holder LEUCO Ledermann GmbH & Co. KG (Horb am Neckar, Germany). From the aspect of cost of processing and sound emission the best results were obtained for tool holder KLEIN S.r.l (Pesaro, Italy).

The aim of the second part of the study was to investigate the influence of the type of tool on sound emission level and sound spectrum, heat distribution in the tool, and tool wear. Tools were mounted on the tool holder KLEIN S.r.l (Pesaro, Italy), with a collet ER32. Five rotation speeds (14 000; 16 000; 18 000; 20 000; 22 000 min⁻¹), two feed speeds (10-20; 20-30 m/min), and three different tools were used. The results of this part of the study indicate that the maximal processing feed rate is the same as the maximal feed rate of the CNC machine, i.e. 30 m/min. During milling processing, the temperature in the tools, sound emission level, and tool wear were measured. Thermal camera type FLIR T560 produced by Teledyne FLIR LLC (Wilsonville, Oregon, SAD) was used to measure temperature in tools. The obtained results were processed using software Flir ResearchStudio i Flir ThermalStudio. Sound emission level was measured using sound level meter Delta OHM HD2110L (Padova, Italy), and the obtained results were processed with software NoiseStudio. Tool wear measurement was performed by microscope ZEISS axio zoom V16 produced by Carl Zeiss Microscopy GmbH (Munchen, Germany). Aim of this part of researches also was to find best combination of processing parameters which will influence increase in productivity, and decrease tool wear. PSI TOPSIS method was performed to optimize processing parameters with the aim of processing productivity of CNC machines and tool life.

Highest mean temperature for the tool CMT was obtained for rotation speed of 14 000 min⁻¹, and feed rate 20-30 m/min (118,3 °C). Lowest results of temperature of tool were obtained for rotation speed od 22 000 min⁻¹ and feed rate 10-20 m/min (87,67 °C). When using tool LEITZ highest temperature were obtained for rotation speed 18000 min⁻¹, and feed rate 20-30 m/min (82,65 °C), and lowest results were obtained for rotation speed 14 000 min⁻¹, and feed rate 10-30 m/min (62,25 °C). For tool ITA TOOLS highest results were obtained for rotation speed 14 000 min⁻¹ and feed rate 20-30 m/min, and lowest results were obtained for rotation speed 22 000 min⁻¹, and feed rate 20-30 m/min. Obtained results of tool temperature show that highest tool temperature were obtained for tool ITA TOOLS, then for CMT, and the lowest results were obtained for LEITZ tool.

The maximum temperature is placed on the top of tool. Increasing in feed rate influence increasing of tool temperature. Increasing in processing length also influence increasing of tool temperature. The degree of tool heating when milling plywood is influenced by both the processing parameters (feed speed, rotation speed) and the tool geometry, as well as the material from which the blade of tool is made.

Results obtained for sound analysis (sound emission) for different tools indicate that the geometry of the tool and materials are important factors that affect changes in sound emission level and spectrum of the sound. Results obtained in this study show that increasing in feed rate, causes an increase in sound emission level, and increase in rotation speed causes decrease in sound emission level

Geometric characteristics of tool, materials and tool temperature are most important parameters for tool wear.

Results obtained in second part of researches were used for optimization of processing parameters. The aim of optimization was to find best combination of parameters which will reduce tool wear, sound emission level, temperature of tool, and increase productivity. The best combination of processing parameters for tool CMT were: rotation speed 22 000 min^{-1} , feed rate 20-30 m/min. The best combination of processing parameters for tool LEITZ were: rotation speed 14 000 min^{-1} , feed rate 20-30 m/min. The best combination of processing parameters for tool ITA TOOLS were: rotation speed 16.000 min^{-1} , feed rate 20-30 m/min.

The aim of third part of experimental study was to investigate maximal length of milling for different tools. Optimal parameter obtained by PSI TOPSIS method of optimization were used for the processing parameters in this part of research. Tool wear was measurement as the main factor which indicate maximal milling length. In additional, tool temperature, sound emission level, and surface quality were measured, to research the influence of length of processing on this parameters. According to the results of this study the longest processing were done with tool LEITZ, then with CMT, then with ITA TOOLS. For all used tools with increasing in processing length, temperature, sound emission level, and blade wear also increase. Surface quality decrease with increasing in processing length.

According to the results of this study it can be concluded that geometry of tool and materials of the tools have most influence on the processing quality of plywood. The best results from the aspect of productivity and tool life were obtained with tool LEITZ.

Sadržaj

SAŽETAK	I
ABSTRACT	II
§ 1. UVOD	1
§ 2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA	5
2.1. Furnirsko uslojeno drvo	5
2.1.1. Fizička svojstva furnirskoga uslojenog drva	6
2.1.2. Mehanička svojstva furnirskoga uslojenog drva	7
2.2. Glodanje drva	8
2.2.1. Mehanička procesa glodanja drva	8
2.2.2. Utjecajni parametri procesa glodanja drva	12
2.3. Temperaturne pojave pri obradi drva	13
2.3.1. Temperatura držača alata	19
2.4. Zvuk i analiza zvuka	20
2.5. Kvaliteta obrade	24
2.6. Učinak obrade	28
2.6.1. Trajnost alata	29
2.6.2. Optimizacija	31
§ 3. MATERIJALI I METODE RADA	33
3.1. Eksperimentalne metode	33
3.2. CNC obradni centar	35
3.3. Alati i prihvat	38
3.3.1. Spiralno glodalo s kontinuiranim oštricama (TIP 1)	39
3.3.2. Spiralno glodalo s nazubljenim oštricama (TIP 2)	40
3.3.3. Glodalo s dijamantnim oštricama (TIP 3)	42

3.3.4. Sustav pritezanja	43
3.4. Materijali.....	48
3.4.1. Furnirsko uslojeno drvo	48
3.5. Oprema i metode mjerenja	49
3.5.1. Mjerenje zvučnoga tlaka	49
3.5.2. Mjerenje temperature alata.....	52
3.5.3. Mjerenje polumjera zaobljenosti oštrice	56
3.5.4. Mjerenje kvaliteta obrađene površine	58
3.6. Višekriterijska optimizacija parametara obrade	62
3.6.1. TOPSIS metoda	63
3.6.2. PSI TOPSIS metoda.....	64
3.7. Statistička obrada poodataka.....	68
§ 4. REZULTATI I RASPRAVA	69
4.1. Analiza utjecaja vrste držača alata na razinu zvučnoga tlaka	69
4.2. Analiza utjecaja parametara obrade na temperaturu alata	73
4.2.1. Temperatura spiralnog glodala s kontinuiranim oštricama (TIP 1).....	74
4.2.2. Temperatura spiralnog glodala s nazubljenim oštricama (TIP 2)	78
4.2.3. Temperatura glodala s dijamantnim oštricama (TIP 3).....	82
4.2.4. Analiza izmjerenih temperatura za tri tipa alata.....	86
4.3. Analiza utjecaja parametara obrade na ukupnu razinu i spektar zvučnoga tlaka.....	91
4.3.1. Analiza razine zvučnoga tlaka pri uporabi spiralnog glodala s kontinuiranim oštricama (TIP 1).....	91
4.3.2. Analiza razine zvučnoga tlaka pri uporabi spiralnog glodala s nazubljenim oštricama (TIP 2).....	96
4.3.3. Analiza razine zvučnoga tlaka pri uporabi glodala s dijamantnim oštricama (TIP 3).....	101
4.3.4. Analiza izmjerenih razina zvučnoga tlaka sva tri alata istovremeno.....	106
4.4. Analiza utjecaja parametara obrade na povećanje polumjera zaobljenosti oštrice	111
4.4.1. Analiza polumjera zaobljenosti oštrice kod spiralnog glodala s kontinuiranim oštricama (TIP 1).....	111

4.4.2. Analiza polumjera zaobljenosti oštrice kod spiralnog glodala s nazubljenim oštricama (TIP 2).....	114
4.4.3. Analiza polumjera zaobljenosti oštrice kod glodala s dijamantnim oštricama (TIP 3)	117
4.4.4. Analiza izmjerenih polumjera zaobljenosti oštrice za tri tipa alata	120
4.5. Rezultati višekriterijske optimizacije za različite alate.....	124
4.5.1. Višekriterijska optimizacija za spiralno glodalo s kontinuiranim oštricama (TIP 1).....	124
4.5.2. Višekriterijska optimizacija za spiralno glodalo s nazubljenim oštricama (TIP 2).....	127
4.5.3. Višekriterijska optimizacija za glodalo s dijamantnim oštricama (TIP 3)	130
4.6. Analiza temperature alata, razine zvučnog tlaka, zatupljenja oštrice i kvalitete obrade u ovisnosti o duljini obrade za različite tipove glodala	134
4.6.1. Analiza razine zvučnog tlaka u ovisnosti o duljini obrade	134
4.6.2. Analiza rezultata polumjera zaobljenosti oštrice u ovisnosti o duljini obrade.....	138
4.6.3. Analiza ovisnosti temperature alata o duljini obrade	146
4.6.4. Analiza kvaliteta površine u ovisnosti o duljini obrade.....	158
§ 5. ZAKLJUČAK.....	165
§ 6. LITERATURNI IZVORI	169
KAZALO SLIKA	III
KAZALO TABLICA	IV
KAZALO SKRAĆENICA	V
KAZALO SIMBOLA.....	VI
ŽIVOTOPIS	VII
AUTOROV POPIS OBJAVLJENIH RADOVA	VIII
ZAHVALA.....	IX
PRILOZI.....	X

§ 1. UVOD

U tehnologiji proizvodnje namještaja i drugih drvnih proizvoda važno mjesto zauzimaju računalno upravljani strojevi tj. CNC (Computer Numerical Control) strojevi, jer trendovi u proizvodnji namještaja sve više zahtijevaju oblike koje je teško ili gotovo nemoguće obraditi klasičnim strojevima za obradu drva. Primjena visoke tehnologije kao što su CNC strojevi i sustava automatizacije glavni su čimbenici porasta proizvodnje u industriji namještaja (Demir i dr., 2022). U industriji namještaja CNC strojevi najčešće se koriste u procesima kao što su glodanje, bušenje i tokarenje (Ohuchi i Murase, 2005; Sütçü i Karagöz, 2012; Sofuoğlu, 2017). Drvo i ploče na bazi drva materijali su koji su zastupljeni u mnogim industrijama. Tako se, primjerice, u metalnoj i prehrambenoj industriji koriste za pakiranja gotovih proizvoda, a u građevinskoj industriji za oblaganje zidova, konstrukciju krovova i slično. Ploče na bazi drva, kao što su furnirsko uslojeno drvo, ploče iverice i ploče vlaknatice, intenzivno se koriste u proizvodnji namještaja i uređenju interijera (Akbulut i Ayrilmis, 2019). Primjenom CNC strojeva u obradi drva i materijala na bazi drva povećava se kvaliteta i brzina obrade, što utječe na smanjenje cijene i povećanje konkurentnosti izrađenoga proizvoda. Suvremeni CNC strojevi u drvenoj tehnologiji opremljeni su sofisticiranim upravljačkim sustavima koji omogućuju preciznu izradu elemenata željenog oblika uz visoku dimenzijsku točnost (Iskra i Hernandez, 2012).

Učinkovitost uporabe CNC strojeva ovisi o parametrima obrade koji istodobno utječu na kvalitetu obrađene površine (Koç i dr., 2015). Na preciznost i kvalitetu obrađene površine utječe nekoliko ključnih čimbenika: postprocesor (softverski sustav koji generira program u format namjenjen upravljanju CNC stroja), sustav pogona za upravljanje, kinematika stroja te sam proces obrade (Petraček i dr., 2022). Uz navedeno, putanja, vrsta i kvaliteta alata izravno utječu na kvalitetu obrađene površine (Koç i dr., 2015; Curti i dr., 2018). Istraživanja obrade uzoraka bukovine na CNC stroju pokazala su da na kvalitetu obrađene površine utječu kut rezanja, posmična brzina i smjer vlakanaca drva u odnosu na obrađenu površinu, pri čemu širina obrade nema utjecaj na kvalitetu obrađene površine iako je zabilježeno povećanje intenziteta zvuka (Karagöz i dr., 2011). Smanjenjem posmične brzine i povećanjem frekvencije vrtnje alata smanjuje se hrapavost obrađene površine (Rawangwong i dr., 2011; Sütçü i Karagöz, 2012). Uz navedene parametre obrade, koji utječu na kvalitetu obrade i učinak obrade CNC strojeva, pri obradi drva i materijala na bazi drva, na kvalitetu obrade utječe i način prihvata alata. Prihvat

alata utječe na točnost pozicioniranja alata u odnosu na rotacijsku os, što utječe na vibracije alata, točnost obrade, kvalitetu obrade i razinu buke pri obradi. Tijekom obrade drva i materijala na bazi drva dolazi do zatupljenja alata tj. povećanja polumjera zaobljenosti oštrice alata što utječe na povećanje vibracija i smanjenje kvalitete obrađene površine. Vibracije alata smanjuju se sa smanjenjem posmične brzine (Igaz i dr., 2019). Na polumjer zaobljenosti oštrice alata, odnosno na njegovu trajnost, utječu brojni čimbenici kao što su materijal obrade, parametri obrade, geometrija i materijal alata, temperatura alata i način hlađenja (Kvasnová i dr., 2015; Igaz i dr., 2019). Tijekom obrade drva glodanjem dolazi do stvaranja topline zbog trenja između ledne plohe alata i obratka, te prsne plohe i odvajane strugotine (Igaz i dr., 2019). Za razliku od metala, drvo je materijal koji ima malu toplinsku vodljivost (Aguilera i Barros, 2011; Wei i dr., 2012; Troppová i dr., 2012) te se veći dio topline, koji nastaje obradom, prenosi na alat, što utječe na povećanje njegove temperature (Igaz i dr., 2019). Na temperaturu alata utječu i mnogi drugi parametri kao što su: materijal alata, kvaliteta izrade alata, trošenje alata, debljina obradka, brzina rezanja, smjer rezanja i kutovi oštrice alata (Aguilera i Barros, 2011; Chen i dr., 2012; De Deus i dr., 2015; Igaz i dr., 2019).

Upotreba drva je višestruka. Drvo je jedan on najstarijih materijala koji se koristio za pakiranje. Drvo je jeftin i čvrst materijal te se veoma lagano obrađuje. Jedan od najstarijih primjera masovnoga korištenja drva kao materijala za pakiranje je čuvanje i transport tekućina u drvenim bačvama. Danas se drvo kao materijal za pakiranje najčešće koristi za proizvodnju paleta i raznih sanduka za pakiranje i transport. Pored drva, kao materijal za pakiranje danas su u uporabi i razne vrste kompozitnih materijala na bazi drva, a najčešće se koriste iverice, furnirsko uslojeno drvo, ploče s orijentiranim iverjem (OSB – *oriented strand board*) i srednje guste ploče vlaknatice (MDF – *medium-density fibreboard*). Jedna od najznačajnijih prednosti drva kao materijala za pakiranje je njegovo prirodno porijeklo i obnovljivost, drvo je ekološki prihvatljiv materijal koji se lako reciklira te je CO₂ neutralan.

Furnirsko uslojeno drvo jedan je od najčešće korištenih materijala na bazi drva za izradu proizvoda za pakiranje. Zahvaljujući svojim mehaničkim svojstvima za izradu proizvoda za pakiranje upotrebljava se ploča manje debljine u odnosu na proizvodnju namještaja.



Slika 1. Proizvodi za pakiranje od drva

Općenito je cijena proizvoda za pakiranje niska te se taj nedostatak nastoji nadomjestiti s većom brzinom obrade prilikom njihove proizvodnje. Zbog prirode uporabe kvaliteta obrade pri proizvodnji nema značajnu ulogu kao kod proizvodnje namještaja, pa je pri proizvodnji proizvoda za pakiranje posmična brzina alata značajno veća u odnosu na proizvodnju namještaja, što za posljedicu ima i veći učinak. Danas se obrada materijala za izradu proizvoda za pakiranje najčešće obavlja suvremenim CNC strojevima raznim tehnološkim postupcima obrade.

Glodanje drva i materijala na bazi drva najčešće se izvodi na CNC strojevima uporabom različitih alata pri različitim tehnološkim parametrima obrade. Očekivano je da će različiti tehnološki parametri obrade furnirskoga uslojenog drva (posmična brzina, frekvencija vrtnje alata, vrsta alata) utjecati na zagrijavanje alata, kvalitetu obrađene površine, razinu emisije zvuka kao i vijek trajanja alata. Poznavanjem utjecaja pojedinih tehnoloških parametara obrade može se optimizirati obrada CNC glodanja, odnosno moguće je utjecati na povećanje učinka obrade furnirskoga uslojenog drva. Izbor parametara obrade kojima će se smanjiti vrijeme proizvodnje može rezultirati većim troškovima proizvodnje što će biti opravdano u određenome tržišnome trenutku. U nekome drugome tržišnome trenutku veći značaj imat će ekonomičnost proizvodnje zbog konkurentnosti proizvoda. Kako bi se ostvarili željeni ciljevi obrade furnirskoga uslojenog drva CNC glodanjem (veći učinak, manji troškovi), odnosno kako bi se optimizirala proizvodnja, potrebno je poznavati utjecaj pojedinih parametara tehnološkoga procesa na izlazne rezultate obrade. Stoga su postavljeni sljedeći ciljevi ovoga istraživanja:

1. Istražiti utjecaj vrste alata na mogućnosti povećanja učinka obrade furnirskoga uslojenog drva CNC glodanjem te utvrditi granične vrijednosti frekvencije vrtnje alata i posmične brzine s obzirom na sigurnosne granične vibracije alata.
2. Istražiti utjecaj posmične brzine, frekvencije vrtnje alata i vrste alata pri obradi furnirskoga uslojenog drva na razinu emisije zvučnoga tlaka, temperaturu alata, raspodjelu topline u alatu, polumjer zaobljenosti oštrice te kvalitetu obrađene površine.

3. Istražiti mogućnost povećanja posmične brzine i maksimalne duljine obrade optimizacijom izbora parametara obrade.

Na temelju analize rezultata dosadašnjih istraživanja postavljene su sljedeće hipoteze čija će se valjanost ispitati vlastitim eksperimentalnim istraživanjima, te tako ostvariti postavljene ciljeve. Hipoteza H1: Minimalni i maksimalni pomak po oštrici koji uzrokuje pojavu sigurnosnih graničnih vibracija i maksimalna duljina obrade razlikuju se za tri različite vrste alata za glodanje.

Hipoteza H2: Povećanje posmične brzine i povećanje frekvencije vrtnje alata imaju suprotan utjecaj na razinu emisije zvučnoga tlaka i zagrijavanje alata tijekom obrade furnirskog uslojenog drva.

Hipoteza H3: Izmjerena razina emisije zvučnoga tlaka tijekom obrade furnirskog uslojenog drva glodanjem u korelaciji je s kvalitetom obrađene površine.

Hipoteza H4: Količina odstranjenoga materijala obrade u jedinici vremena ograničavajući je čimbenik povećanja produktivnosti obrade furnirskog uslojenog drva glodanjem.

§ 2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

2.1. Furnirsko uslojeno drvo

Furnirsko uslojeno drvo materijal je izrađen od više međusobno slijepljenih furnira, čime se dobivaju veće površine, smanjuju se utezanje i bubrenje, te se poboljšavaju mehanička svojstva materijala. Razlikuju se tri vrste ploča uslojenog drva, i to: furnirsko uslojeno drvo, furnirsko oblikovano drvo i panel ploče (Jambreković, 2004).

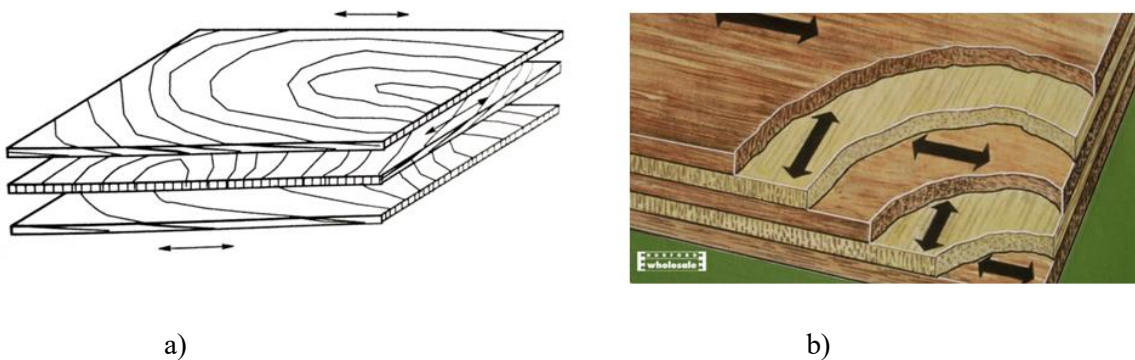
Furnirsko uslojeno drvo izrađuje se od listova ljuštenoga furnira koji se slažu ili sljepljuju pod pravim ili nekim drugim kutom, simetrično oko srednjega sloja furnira (Mešić, 1998).

Prema Mešiću (1998) furnirsko uslojeno drvo dijeli se na:

- normalno furnirsko uslojeno drvo i
- specijalno furnirsko uslojeno drvo.

Normalno furnirsko uslojeno drvo izrađuje se unakrsnim lijepljenjem simetrično raspoređenih listova furnira pod pravim kutom. Furnirsko uslojeno drvo uglavnom se izrađuje od neparnoga broja slojeva furnira. U slučaju izrade s parnim brojem furnira, dva srednja furnira lijepe se paralelno u odnosu na drvna vlakanca, dok se ostali furniri lijepe unakrsno. Kod konstrukcije furnirskoga uslojenog drva pravilo je da se konstrukcija promatra u odnosu na središnji list prema vanjskoj strani debljine ploče. Pri tome, listovi furnira moraju biti iste debljine, približnog sadržaja vode, istoga pravca protezanja vlakana i sličnih svojstava drva. Kod konstrukcija s neparnim brojem furnira povećana je dimenzijska stabilnost dobivene ploče. Debljina furnira od kojeg se izrađuje furnirsko uslojeno drvo iznosi maksimalno 3,6 mm, pri čemu se lijepljenjem tanjih listova furnira dobiva ploča boljih tehničkih svojstava (Jambreković, 2004). Povećanjem broja slojeva smanjuje se razlika vlačne čvrstoće po dužini i okomito na pravac vlakana.

Prema broju slojeva unutar konstrukcije furnirsko uslojeno drvo dijeli se na troslojno i višeslojno (Jambreković, 2004).



Slika 2. Shema konstrukcije furnirskoga uslojenog drva: a) troslojna (Izvor: Jambreković, 2004)
b) višeslojna (Izvor: <https://hurford.com.au/hw/plywood-about/>)

Povećanje mehaničko-fizičkih svojstava moguće je dobiti sa zvjezdastom konstrukcijom ploče gdje su listovi složeni pod kutom manjim od 90° ($10-90^\circ$).

Furnirsko uslojeno drvo koje se razlikuje od normalnoga furnirskoga drva po obliku, konstrukciji, obradi vanjskih površina, kemijskom tretmanu, mehaničko-fizičkim svojstvima i produžavanju po dužini vlakana spada u specijalno furnirsko uslojeno drvo (Mešić, 1998). Zahvaljujući svojim elastičnim i plastičnim svojstvima furnirsko uslojeno drvo može se oblikovati u razne forme, koje imaju različitu primjenu. Konstrukcija specijalnog furnirskoga uslojenog drva može biti raznovrsna, s dva sloja furnira slijepljenih po dužini vlakana, s različitim položajem slojeva furnira u odnosu na debljinu ploče, s različitim kutovima furnira u odnosu na površinu ploče, u kombinaciji s drugim materijalima. Furnirsko uslojeno drvo dobiveno prethodnim tretiranjem furnira kemijskim tvarima ili mješavinama, također spada u specijalno furnirsko uslojeno drvo.

2.1.1. Fizička svojstva furnirskoga uslojenog drva

Kod furnirskoga uslojenog drva najvažnija fizička svojstva su gustoća, tvrdoća, upijanje vode i bubrenje, toplinska, električna te akustična svojstva. Gustoća ovisi o vrsti drva, vrsti i količini nanesenoga ljepila te o veličini pritiska prilikom prešanja ploča. Gustoća furnirskoga uslojenog drva veća je od gustoće apsolutno suhog drva od kojega su ploče izgrađene što je posljedica uporabe ljepila i povećane gustoće drva uslijed prešanja.

Furnirsko uslojeno drvo higroskopian je materijal te se između furnirskoga uslojenog drva i okolnoga zraka uspostavlja ravnoteža. Higroskopska ravnoteža furnirskoga uslojenog drva nešto je niža nego od cjelovitog drva zbog volumena ljepila i njime blokiranoga drva koji imaju znatno manja upojna svojstva. Osim toga, javlja se pojava sporije reakcije upijanja zbog višeslojnih

polimerno nepropusnih ili slabo propusnih slojeva (barijera) od ljepila. Na higroskopnost utječu debljina furnira, količina nanesenoga ljepila i broj slojeva u ploči. Ploče s tanjim listovima imaju niži ravnotežni sadržaj vode. Smanjenje higroskopnosti moguće je postići uporabom vlagootpornoga ljepila. Kod furnirskoga uslojenog drva znatno je smanjeno bubrenje i utezanje po dužini i po širini ploče zbog unakrsno lijepljenih furnirskih listova u konstrukciji ploče. Time je utezanje i bubrenje po širini i dužini ploče približno utezanju i bubrenju drva u longitudinalnome smjeru te je furnirsko uslojeno drvo stabilnije od prirodnog drva. Međutim, po debljini ploče je i dalje prisutno znatno utezanje i bubrenje, te je ono gotovo jednako utezanju i bubrenju prirodnog drva, ali je zbog slojeva ljepila ta promjena izrazito usporena. Tvrdća furnirskoga uslojenog drva ovisi o anatomskoj građi drva, tipu lijepljenja, specifičnome pritisku i temperaturi.

Na toplinska svojstva furnirskoga uslojenog drva utječu brojni čimbenici, a to su vrsta drva, gustoća drva, sadržaj vode, temperatura, smjer vlakana drva te vrsta i količina nanesenoga ljepila. Toplinska vodljivost furnirskoga uslojenog drva određena je koeficijentom vodljivosti topline. Povećanjem gustoće drva i sadržaja vode raste i toplinska provodljivost. Koeficijent vodljivosti furnirskoga uslojenog drva iznosi 0,186–0,198 W/mK (Krpan, 1970).

Električna svojstva furnirskoga uslojenog drva ovise o vrsti drva, sadržaju vode furnirskih listova i temperaturi. Drvo je, a s tim i furnirsko uslojeno drvo električni izolator. Povećanjem sadržaja vode i temperature smanjuje se električni otpor u furnirskom uslojenom drvu. Bitno je napomenuti da furnirsko uslojeno drvo ipak u određenim uvjetima sadržaja vode i temperature, može biti i vodič struje.

Furnirsko uslojeno drvo odlikuje se svojstvom upijanja zvuka, što se odrazilo na njegovu široku primjenu. Furnirsko uslojeno drvo jedan dio energije zvuka odbija, dok veći dio utroši na titraje. Zbog ovoga svojstva tanje ploče pogodnije su za uporabu jer upijaju zvuk bez odzvanjanja (Mešić, 1998). Posebno je izraženo svojstvo upijanja dubokih tonova.

2.1.2. Mehanička svojstva furnirskoga uslojenog drva

Najznačajnija su svojstva furnirskoga uslojenog drva vlačna čvrstoća, čvrstoća savijanja, modul elastičnosti, čvrstoća na smicanje i savitljivost. Mehanička svojstva ovise o konstrukciji ploče, vrsti drva, sadržaju vode furnira, vrsti ljepila, tehnološkim režimima i načinu izrade furnira. Povećanjem sadržaja vode do točke zasićenosti vlakana dolazi do opadanja čvrstoće na savijanje, tlačne i vlačne čvrstoće. U usporedbi s prirodnim drvom, elastična svojstva furnirskoga

uslojenog drva znatno su veća. Povećanjem debljine ploče za parni broj slojeva dolazi do smanjenja elastičnih svojstava. Smjer vlakana utječe na modul elastičnosti, ali se povećanjem broja slojeva taj utjecaj smanjuje.

Prema Mešiću (1998) najveća je vlačna čvrstoća furnirskoga uslojenog drva u smjeru vlakana, nešto je manja okomito na smjer vlakana, dok je najmanja čvrstoća u dijagonalnome smjeru. Primjenom zvjezdaste konstrukcije te povećanjem broja slojeva i povećanjem kvalitete lijepljenja dolazi do povećanja izotropnosti čvrstoće i približavanju koeficijentu 1, što je slično svojstvima metala. Vlačna čvrstoća ovisi o sadržaju vode furnirskoga uslojenog drva, a povećanjem sadržaja vode dolazi do smanjenja čvrstoće.

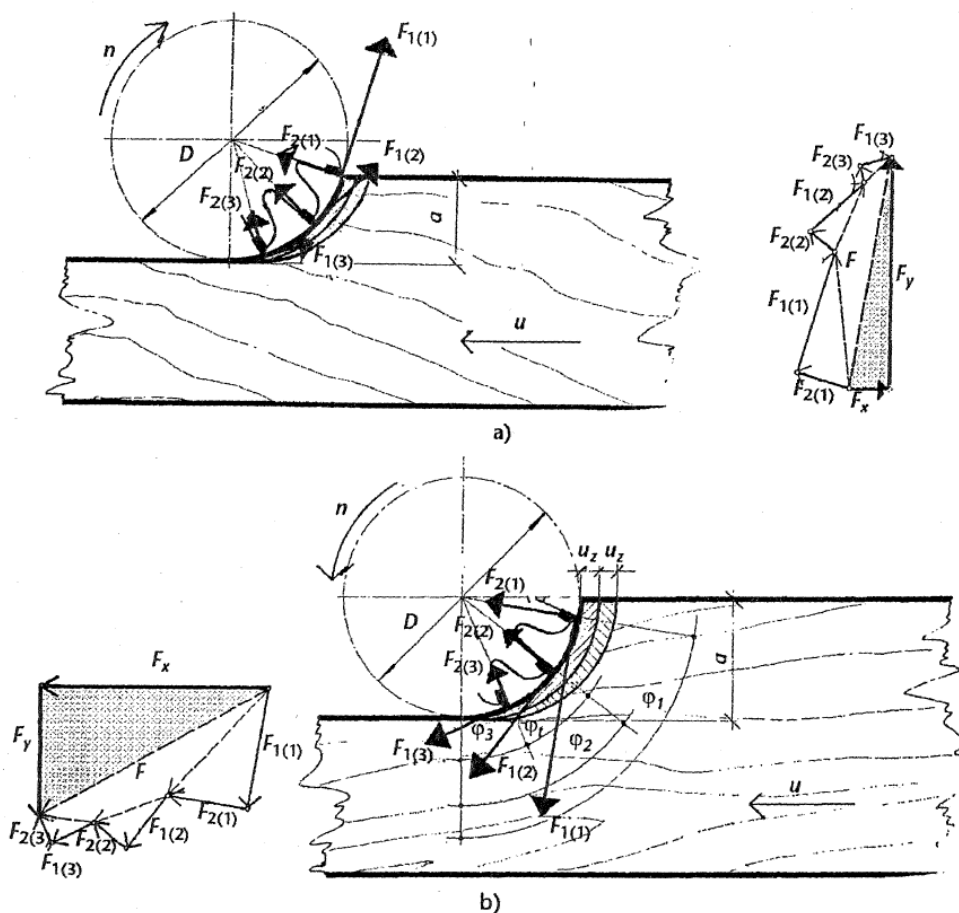
2.2. Glodanje drva

2.2.1. Mehanika procesa glodanja drva

Glodanje je postupak obrade drva u kojem se skidanje čestica vrši rotacijskim alatom, glodalom. Pri glodanju dolazi do odvajanja čestica drva od površine te se na taj način dobiva glatka, ravna ili profilna površina. Na mehaniku procesa glodanja utječu svojstva materijala koji se obrađuje i alata. Od svojstava materijala najznačajniji su anizotropnost, elastična i plastična svojstva (Csanady i Magoss, 2020).

Kod CNC glodalica gdje je radni stol fiksiran, alat obavlja glavno i pomoćno kretanje u isto vrijeme dok obradak miruje. Mehanička obrada drva glodanjem vrši se na različitim strojevima i to na glodalicama, kopirnim glodalicama, čeparicama, profilnim iveračima, bušilicama i drugima, što glodanje čini nezamjenjivim oblikom finalne, pa i primarne obrade drva (Škaljić, 2010).

S obzirom na smjer kretanja alata u odnosu na obradak razlikuju se dvije vrste glodanja: istosmjerno i protusmjerno (slika 3). Kod istosmjernog glodanja vrtnja glodala i posmična brzina imaju isti smjer. Oštrica alata pri ulazu u zahvat ima maksimalnu debljinu strugotine koja se kasnije smanjuje, da bi pri izlazu oštrice iz materijala debljina strugotine bila jednaka nuli. Kod protusmjernog glodanja vrtnja glodala i posmična brzina imaju suprotan smjer. Oštrica postepeno prodire u materijal pri čemu nastaje strugotina čija se debljina povećava od nule do maksimalne vrijednosti.



Slika 3. Shema sila pri glodanju: a) istosmjerno glodanje; b) protusmjerno glodanje (Izvor: Skakić, 1992)

Ukupna sila rezanja može se razdvojiti u dvije komponente: tangentnu F_1 i normalnu F_2 . U slučaju da više oštrica istovremeno djeluje u procesu glodanja, onda se ukupna sila dobije slaganjem sila po oštricama glodala. Ukupna sila po oštrici glodala, u slučaju ortogonalnog glodanja, razlaže se na dvije komponente $F_{1(i)}$ i $F_{2(i)}$.

Sila rezanja može se razložiti na horizontalnu F_x i vertikalnu F_y komponentu. Horizontalna komponenta sile računa se prema izrazu (Skakić, 1992):

$$F_x = F_{1(1)} \cos \varphi_1 + F_{1(2)} \cos \varphi_2 + \dots + F_{1(i_z)} \cos \varphi_{i_z} \pm F_{2(1)} \sin \varphi_1 + F_{2(2)} \sin \varphi_2 + \dots + F_{2(i_z)} \sin \varphi_{i_z} \quad (2.1.)$$

odnosno

$$F_x = \sum_{i=1}^{i_z} F_{1(i)} \cos \varphi_i \pm \sum_{i=1}^{i_z} F_{2(i)} \sin \varphi_i \quad (2.2.)$$

Znak „-“ koristi se za istosmjerno glodanje, a „+“ za protusmjerno glodanje.

Vertikalna komponenta sile rezanja računa se prema izrazu:

$$F_y = F_{1(1)} \sin \varphi_1 + F_{1(2)} \sin \varphi_2 + \dots + F_{1(i_z)} \sin \varphi_{i_z} \pm F_{2(1)} \cos \varphi_1 + F_{2(2)} \cos \varphi_2 + \dots + F_{2(i_z)} \cos \varphi_{i_z} \quad (2.3.)$$

odnosno

$$F_y = \sum_{i=1}^{i_z} F_{1(i)} \sin \varphi_i \pm \sum_{i=1}^{i_z} F_{2(i)} \cos \varphi_i \quad (2.4.)$$

Znak „-“ koristi se za protusmjerno glodanje, a „+“ za istosmjerno glodanje.

Ukupna sila rezanja računa se prema formuli:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (2.5.)$$

gdje je:

F – ukupna sila rezanja, N

F_x – horizontalna komponenta sile, N

F_y – vertikalna komponenta sile, N.

Moment glodanja računa se prema formuli:

$$M = \frac{D}{2} \cdot \sum F_{1(i)} = \frac{D}{2} \cdot F_o \quad (2.6.)$$

gdje je:

M – moment glodanja, Nm

D – promjer glodala, m

F_o – obodna komponenta sile, N.

Pri glodanju dolazi do odvajanja čestica drva i do stvaranja strugotine, koja je definirana trima parametrima – dužinom (l), širinom (b) i debljinom (a). Hrapavost obrađene površine ovisi o debljini strugotine. U slučaju kad je debljina strugotine mala, hrapavost je površine manja i obrnuto, pri većoj debljini strugotine dolazi do nepravilnog otkidanja strugotine i veća je hrapavost površine. Pri manjim debljinama strugotine dobije se manje hrapava površina obrađena neposredno s oštricom dok kod većih debljina strugotine dolazi do pojave predpukotina ispred oštrice. U ovome slučaju, raslojavanje drva vrši predpukotina koja prati smjer protezanja drvnih vlakana, a ne oštrica neposredno (Bojović i Janjić, 2013).

Debljina strugotine računa se prema izrazu:

$$a = p_z \cdot \sin \varphi \quad (2.7.)$$

gdje je:

a – debljina strugotine, mm

p_z – posmak po jednom zubu, mm

φ – kut zahvata rezne oštrice glodala za točku na luku kontakta, °.

Srednja debljina strugotine prema Šlezingeru određena je izrazom (Škaljić, 2010):

$$a_{sr} = p_z \sqrt{\frac{h}{D}} \quad (2.8.)$$

gdje je:

a_{sr} – srednja debljina strugotine, mm

p_z – posmak po zubu, mm

h – dubina glodanja, mm

D – promjer glodala, mm

Posmak po zubu računa se prema izrazu:

$$p_z = \frac{v_p \cdot 1000}{n \cdot z} \quad (2.9.)$$

gdje je:

p_z – posmak po zubu, mm

v_p – posmična brzina, m/min

n – broj okretaja alata, min^{-1}

z – broj zubi.

Ukupna brzina rezanja (v) predstavlja geometrijski zbroj vektora brzine rezanja $\vec{v}_0$ i posmične brzine $\vec{v}_p$ tj.:

$$v = \vec{v}_0 + \vec{v}_p, \quad (2.10.)$$

Kod obrade drva posmična brzina znatno je manja od brzine rezanja te je:

$$v = v_0 = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot 1000} \quad (2.11.)$$

gdje je:

v – posmična brzina, m/min

n – broj okretaja, min⁻¹

D – promjer alata, mm.

Snaga rezanja računa se prema formuli:

$$P_r = \frac{K \cdot b \cdot h \cdot v_p}{60} \quad (2.12.)$$

gdje je:

P_r – snaga rezanja, kW

v_p – posmična brzina, m/min

h – dubina glodanja, mm

b – širina obrade, mm

K – jedinični otpor rezanja, N/mm²

2.2.2. Utjecajni parametri procesa glodanja drva

Parametri glodanja su:

1. frekvencija vrtnje alata
2. posmična brzina
3. brzina rezanja
4. posmak po zubu
5. visina glodanja
6. radijalna dubina glodanja.

Frekvencija vrtnje alata parametar je koji označava koliko okretaja u jedinici vremena napravi alat i taj se parametar izražava u okretajima po minuti (min⁻¹). Frekvencija vrtnje alata utječe na kvalitetu obrađene površine, temperaturu alata, razinu emisije zvuka, sile rezanja, vibracije i sl. Istraživanja su pokazala da povećanje frekvencije vrtnje alata dovodi do smanjenja hrapavosti obrađene površine (Bojanović i Janjić, 2013; Ibrišević i dr., 2023).

Posmična brzina pri glodanju brzina je kojom se alat kreće u odnosu na drvni obradak. Posmična brzina pri obradi drva izražava se u metrima po minuti (m/min). Posmična brzina jedan je od parametara koji utječe na kvalitetu obrađene površine, vibracije (Chen i dr., 2012; Nemec i dr.,

2017), temperaturu alata (Igaz i dr., 2019) i dr. Dosadašnja istraživanja pokazala su da se s povećanjem posmične brzine povećava hrapavost površine (Gochev, 2014; Korčak i dr., 2018; Ibrišević i dr., 2023).

Posmak po zubu veličina je relativnoga puta glodala ili obratka u smjeru obrade pri okretanju glodala za jedan kutni korak, tj. za jedan zub glodala. Posmak po zubu parametar je koji utječe na kvalitetu obrade i temperaturu alata (Loc i Hung, 2021; Zhu i dr., 2022).

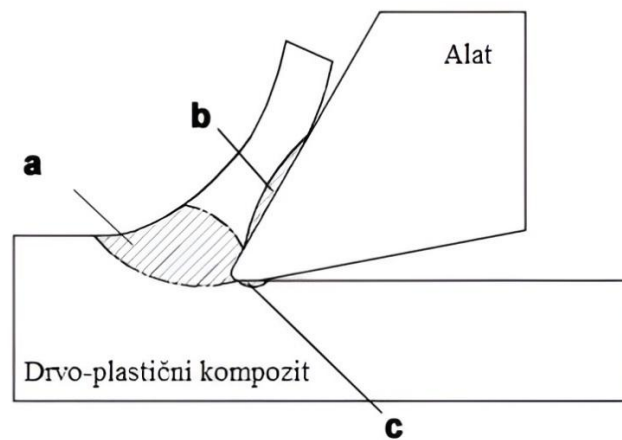
Brzina rezanja put je koji prijeđe glavna oštrica alata u odnosu prema obrađivanoj površini u jedinici vremena. Jedinica za mjerenje brzine rezanja je metar po sekundi (m/s). Utjecaj brzine rezanja na kvalitetu obrađene površine istraživali su brojni znanstvenici te su, u ovome slučaju, prisutna suprotna mišljenja. Neka su istraživanja pokazala da povećanje brzine rezanja povećava kvalitetu površine (Ispas i dr., 2016). Druga istraživanja pokazuju da brzina rezanja nema utjecaj na kvalitetu obrađene površine (Rajko i dr., 2021), ali da s povećanjem brzine rezanja dolazi do povećanja energije rezanja (Piernik i dr., 2023).

Povećanje dubine glodanja dovodi do povećanja sila rezanja (Đurković i dr., 2018). S povećanjem dubine glodanja dolazi i do povećanja površinske hrapavosti (Bal i Akcakaya, 2018).

2.3. Temperaturene pojave pri obradi drva

Prilikom strojne obrade drva strugotina klizi po površini alata što uzrokuje trenje, te se energija trenja pretvara u toplinsku energiju. Najveći dio energije odlazi u okolinu, dok se jedan dio zadržava u alatu povećavajući mu temperaturu. Toplina nastala trenjem jednim se dijelom prenosi na strugotinu, dok se veći dio prenosi na alat. Visoka temperatura na oštrici alata uzrokuje ubrzano trošenje oštrice, jer s povećanjem temperature omekšava i slabi metal, posebno kad se temperatura poveća iznad 500 – 600 °C (Csanady i Magoss, 2020). Prilikom vrtnje alata njegova se površina istovremeno hladi prijenosom energije na okolni zrak.

Pri glodanju drva dolazi do odvajanja čestica drva određenom brzinom u odnosu na površinu alata. U području *a* (slika 4) toplina nastaje kao posljedica deformacije materijala na kontaktu s vrhom alata. U području *b* toplina se generira kao posljedica trenja između prednje strane oštrice i strugotine, dok u području *c* toplina nastaje uslijed trenja leđne strane oštrice i obradka.



Slika 4. Raspodjela topline u zoni rezanja (Izvor: Zhang i dr., 2021)

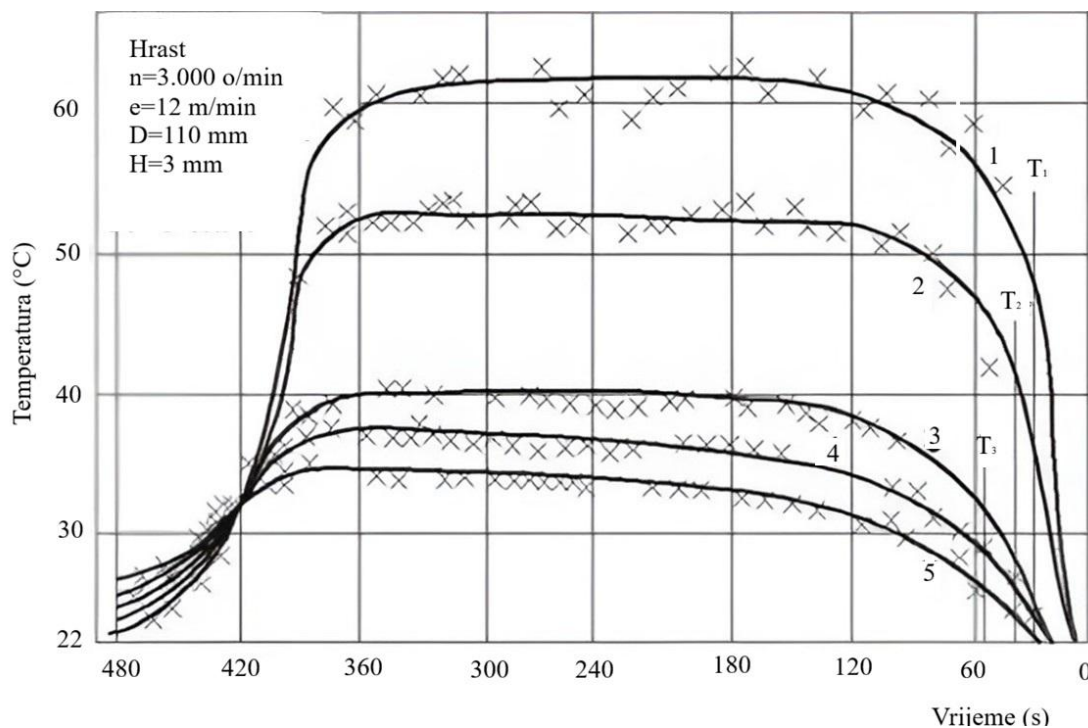
U početnoj fazi glodanja dolazi do brzoga porasta temperature u zoni glodanja, a nakon određenoga vremena se porast temperature uspori (Zhang i dr., 2021). To se događa jer veći dio nastale topline prelazi na strugotinu, a drugi se dio prenosi na površinu alata, a preostali dio prelazi u okolni zrak (Zhu i dr., 2022).

Temperatura alata ovisi o geometrijskim karakteristikama alata, toplinskoj vodljivosti materijala alata i njegovoj specifičnoj toplini.

Tijekom obrade kod alata se mogu pojaviti četiri toplinska stanja (Csanady i Magoss, 2020):

1. stabilno stanje, je stanje konstantne temperatura tijekom rada
2. prividno stabilno stanje, razlikuje se od stabilnog zbog promjene temperature površinskoga sloja u debljini od nekoliko desetih dijelova milimetra.
3. nestabilno stanje u dijelu alata kad se temperatura mijenja u površinskome sloju i u tankome sloju ispod površine
4. nestabilno stanje u cijelome volumenu alata, gdje konstantno dolazi do zagrijavanja i hlađenja alata tijekom rada.

Kod rotacijskih alata uvijek je prisutno nestabilno stanje gdje se temperatura konstantno mijenja tijekom rada po cijelome volumenu. Zagrijavanje alata počinje s ulaskom alata u zahvat. Intenzivno zagrijavanje alata prisutno je u prvih 60 s obrade, nakon čega alat dostigne radnu temperaturu. Nakon izlaska alata iz zahvata dolazi do hlađenja alata, koji se nakon 50–60 s potpuno ohladi na temperaturu okoline (slika 5).

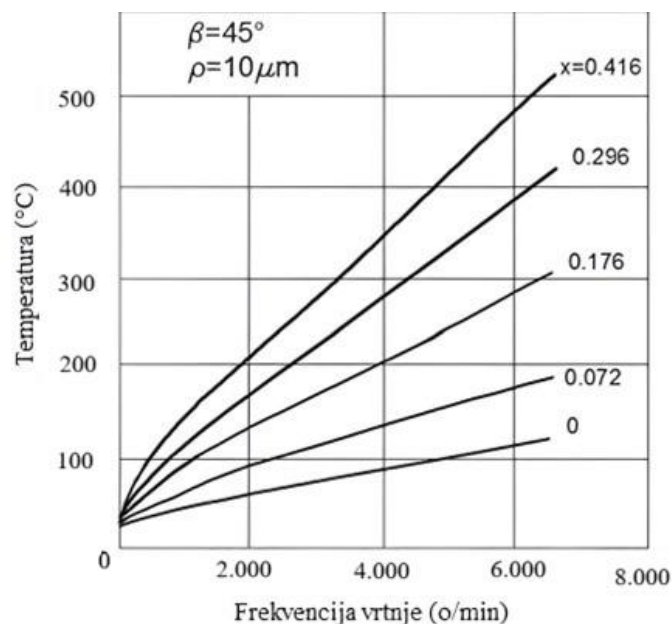


Slika 5. Zagrijavanje i hlađenje alata na različitim udaljenostima od površine alata (Izvor: Csanády i Magoss, 2020)

Temperatura alata ovisi o parametrima obrade, geometriji alata, te o karakteristikama drvnog materijala koji se obrađuje. Parametri obrade koji imaju najveći utjecaj na zagrijavanje alata su (Csanady i Magoss, 2020):

1. frekvencija vrtnje alata
2. posmična brzina
3. dubina glodanja
4. posmak po zubu
5. brzina rezanja.

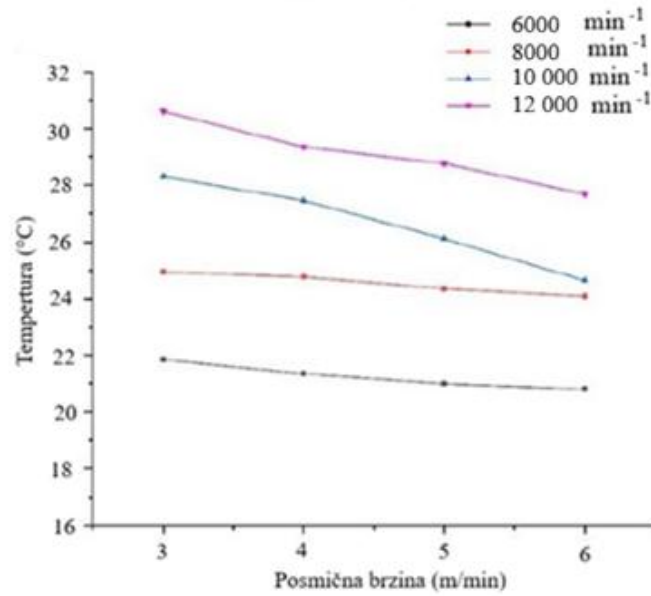
Značajan utjecaj na temperaturu glodala ima frekvencija vrtnje alata. S povećanjem frekvencije vrtnje dolazi do povećanja temperature alata (slika 6). Parametar x označava trajanje dovoda topline na površinu alata koja je u dodiru sa strugotinom i proporcionalan je debljini strugotine ($x = 1,2 \sim 1,3$ debljine strugotine).



Slika 6. Ovisnost temperature alata o frekvenciji vrtnje i duljini uvođenja topline (polumjeru zaobljenosti oštrice izraženom u milimetrima) (Izvor: Csanady i Magoss, 2020)

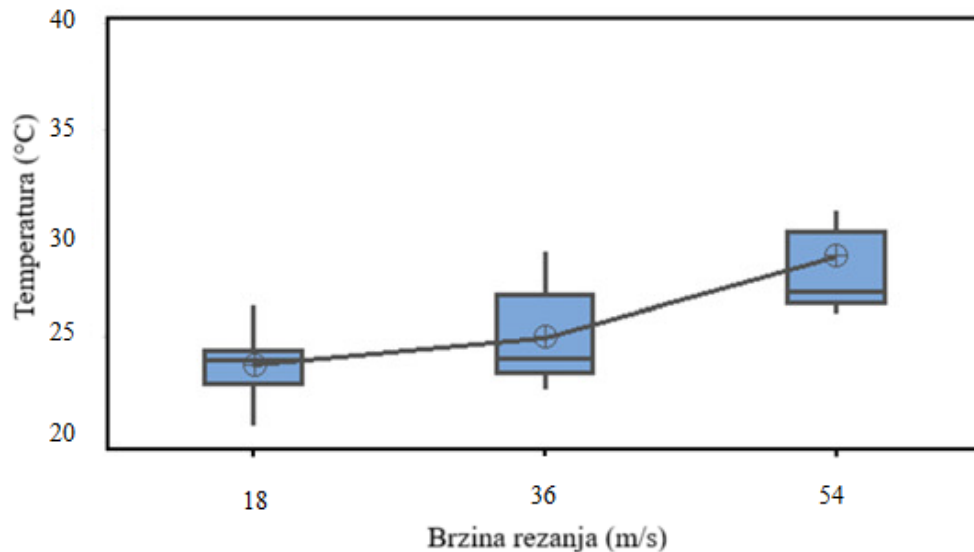
Ako se poveća dubina glodanja, raste i količina materijala koju je potrebno odstraniti. S povećavanjem dubine dolazi do povećanja debljine strugotine. S povećanjem debljine strugotine raste i energija koja je potrebna da bi se materijal odstranio, a s njime raste i toplina, što u konačnici dovodi do porasta temperature (Igaz i dr., 2019; Nasir i dr., 2021, Yu i dr., 2023).

Posmična brzina je u suprotnoj korelaciji s temperaturom alata (Zhang i dr., 2021). Povećanje posmične brzine uzrokuje smanjenje temperature alata. Povećanje frekvencije vrtnja alata dovodi do povećanja temperature alata (Igaz i dr. 201; Zhang i dr., 2021; Kminiak i dr., 2023) (slika 7). Povećanje frekvencije vrtnje alata dovodi do smanjenja debljine strugotine (Wenyong i dr., 2016), što dovodi do povećanoga trenja, te zbog toplinske vodljivosti drva dolazi do blagog povećanja temperature alata (Kminiak i dr., 2023)



Slika 7. Utjecaj posmične brzine i frekvencije vrtnje na temperaturu alata (Izvor: Zhang i dr., 2021)

S povećanjem brzine rezanja i dubine glodanja (Karaguzel i dr., 2016), dolazi do povećanja temperature alata. Uslijed povećanja brzine rezanja, dolazi do povećanja frekvencije trenja između alata i strugotine, što dovodi do povećanja temperature alata (Song i dr., 2023; Yu i dr., 2023) i ova je ovisnost prikazana na slici 8.

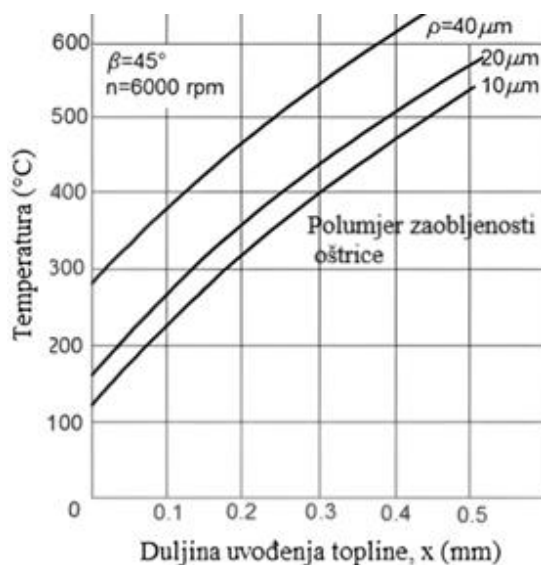


Slika 8. Utjecaj brzine rezanja na temperaturu alata (Izvor: Yu i dr., 2023)

Geometrijske karakteristike alata u velikoj mjeri utječu na temperaturu alatu, a najvažnije su:

1. polumjer zaobljenosti oštrice
2. kut oštrice
3. broj oštrica
4. promjer alata.

Povećanje polumjera zaobljenosti oštrice uzrokuje povećanje energije i sila rezanja, te povećanje hrapavosti površine obradka (Csanady i Magos, 2020). Povećanjem polumjera zaobljenosti oštrice povećava se trenje između strugotine i kontaktne površine alata što uzrokuje porast temperature alata (slika 9). Većina temperature generira se uslijed kontakta s prsnom (prednjom) stranom alata, međutim dio leđne strane također je u kontaktu s drvom i zbog njega, isto tako, dolazi do zagrijavanja alata. Što je polumjer zaobljenosti oštrice veći, veći je udio trenja leđnoga dijela alata, a s time je veći i udio topline koji nastaje upravo zbog tog kontakta.



Slika 9. Ovisnost temperature alata o polumjeru zaobljenosti oštrice (Izvor: Csanady i Magoss, 2020)

Broj oštrica glodala parametar je koji utječe na trenje u zoni glodanja, a samim time i na temperaturu u zoni glodanja. Naime, temperatura rezanja nastaje trenjem između strugotine i prednje strane alata. Sa smanjenjem broja oštrica povećava se količina materijala koja se odstranjuje po jednoj oštrici. Ovo uzrokuje veće trenje te se time povećava i temperatura alata (Song i dr., 2023).

Najznačajnija svojstva drva koja utječu na zagrijavanje alata pri obradi glodanjem su:

1. gustoća drva
2. smjer rezanja
3. sadržaj smole i površinska obrada
4. sadržaj vode.

Temperatura alata (glodala) ovisi o sadržaju vode drva koje se obrađuje. S povećanjem sadržaja vode generirana toplina smanjuje se zbog veće temperaturne vodljivosti vlažnog drva, pa toplina brže prelazi na drvo uzrokujući smanjenje temperature alata (Csanady i Magoss, 2020).

2.3.1. Temperatura držača alata

Automatizacija obrade drva ima pozitivne učinke poput visoke kvalitete obrade i kratkoga vremena proizvodnje. Uporaba CNC strojeva u industriji namještaja i obradi drva značajno je porasla posljednjih godina. Najčešće upotrebljavani CNC strojevi za obradu drva su obradni centri. Ovi strojevi kombiniraju različite metode obrade (glodanje, rezanje, bušenje) kako bi drvo doveli u odgovarajuće stanje. Glodanje je najčešća operacija koja se izvodi na CNC obradnim centrima. Pričvršćivanje alata na CNC strojevima utječe na obradu elemenata. Za pričvršćivanje alata na CNC strojevima koriste se različite vrste držača alata. Držač alata predstavlja sučelje između alata i stroja te ima ključnu ulogu u sigurnoj i preciznoj obradi materijala koji se koriste u raznim industrijama, uključujući metalurgiju i obradu drva. Kvalitetan držač alata ne samo da utječe na performanse CNC stroja, već ima i značajan utjecaj na kvalitetu proizvoda i na troškove proizvodnje. Postoji nekoliko vrsta oblika držača alata s različitim svojstvima. Neki su strukturno veliki, drugi imaju male promjere tijela, neki su kratki, drugi su posebno dugi, neki su s elastičnim čahurama i navojnom steznom glavom, drugi s termostežanjem, a treći s hidrauličkim stežanjem. Najčešće upotrebljavani držači alata su držači s navojnim stežanjem alata. Ovi se držači alata često upotrebljavaju prvenstveno zbog niže cijene u usporedbi s drugim vrstama držača alata. Razvoj držača alata intenzivirao se kao posljedica nastavka razvoja tehnologije. Cilj je razvoja novoga držača alata, prije svega, postići točnost pozicioniranja alata u steznoj glavi, tj. cilj je postići idealno centriranje osi alata u odnosu na os stezne glave, kako bi se povećala točnost obrade, smanjile vibracije i postigla najviša kvaliteta obrade. Na tržištu postoje različiti specijalni držači alata koji, ovisno o konstrukciji, umanjuju neželjene učinke poput buke, vibracija i zagrijavanja alata. Smanjenjem vibracija smanjuje se i zagrijavanje alata, što izravno utječe na njegovo zatupljenje. Nakon prestanka obrade dolazi do intenzivnoga hlađenja jer se toplina iz alata prenosi

na okolni zrak i njegov držač. S obzirom da svako tijelo nastoji postići stacionarno stanje, odnosno izjednačiti svoju temperaturu s temperaturom okoline, dio se temperature odvodi iz mjesta nastanka i u vrijeme obrade. Tako se jedan dio topline premješta iz zone zahvata prema tijelu alata i dalje na držač alata koji ovisno o masi materijala i njegovom volumenu te vodljivosti više ili manje odvodi toplinu te je njegova temperatura bliža temperaturi okoline. Od konstrukcije držača te materijala od kojih je izrađen ovisi i intenzitet prijenosa topline s alata na držač alata i dalje u okolinu.

2.4. Zvuk i analiza zvuka

Zvuk je fizička pojava koja nastaje uslijed vremenski promjenjivih mehaničkih poremećaja stacionarnih stanja elastične sredine (Prašćević i dr., 2018). Zvuk se definira kao promjena tlaka zraka koju ljudsko uho može registrirati, a opseg zvuka kreće se od jedva čujne razine do razine koja može oštetiti ljudsko uho. Zvuk je mehanički val određene frekvencije, a dijeli se na:

1. infrazvuk (frekvencije niže od 20 Hz)
2. zvuk iz čujnog opsega (20 Hz – 20 kHz)
3. ultrazvuk (frekvencije više od 20 kHz)
4. hiperzvuk (frekvencije više od 1 GHz)

Zvučne oscilacije nastaju djelovanjem vanjske sile koja dovodi do poremećaja stacionarnih stanja elastične sredine, a naziva se izvor zvuka (Prašćević i dr., 2018).

Zvučni val emitiran iz sfernog izvora prostire se u obliku sfere radijalno u svim smjerovima. Ako je dimenzija izvora manja od valne duljine emitiranoga zvuka, govori se o točkastome izvoru zvuka. Kod ovoga tipa izvora zvučni tlak opada na polovinu vrijednosti kad se udaljenost od izvora udvostruči, što odgovara padu razine zvučnoga tlaka za 6 dB. Drugi je tip izvora linijski izvor. Za linijski tip izvora zvučni tlak opada za oko 3 dB pri udvostručenju udaljenosti od izvora.

Izvor zvuka proizvodi zvuk određene snage (P) te se zvučna energija širi od izvora na susjedne molekule zraka koje ispunjavaju prostor. Energija zvuka širi se u obliku vala, prenoseći energiju s jednoga mjesta na drugo mjesto.

Osnovne fizičke karakteristike zvučnoga vala su:

1. frekvencija osciliranja f , Hz

2. valna duljina zvuka λ , m
3. brzina zvuka c , m/s

Frekvencija je fizikalna veličina kojom se izražava broj titraja u određenome vremenskom intervalu. Jedinica za mjerenje frekvencije je herc (Hz). Definiira se kao broj promjena položaja čestica oko ravnotežnog položaja u jedinici vremena (Prašćević i dr., 2018):

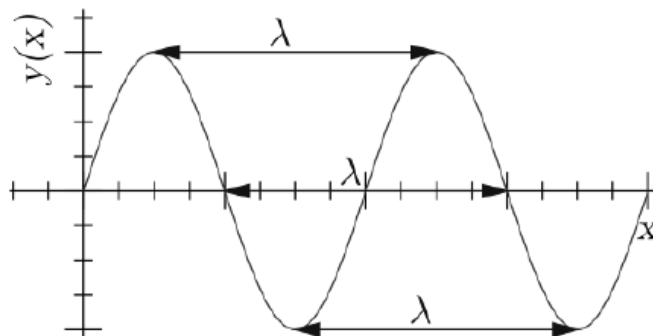
$$f = \frac{n}{t} \quad (2.13.)$$

f – frekvencija, Hz

n – broj titraja

t – jedinica vremena, s

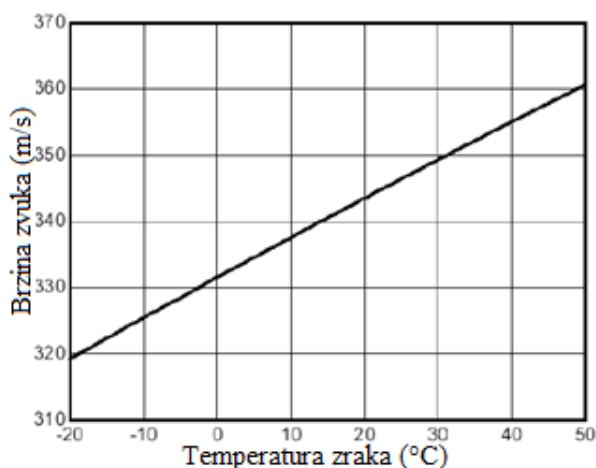
Valna duljina zvuka (λ) predstavlja udaljenost između dvaju maksimuma i dvaju minimuma u zvučnome signalu. Zvučni signal ima oblik sinusoide (slika 10). Zvučni val sastoji se od određenog broja ponovljenih maksimuma i minimuma koji odgovaraju područjima gdje dolazi do kompresije i ekspanzije čestica elastične sredine kroz koju se prostire zvučni val (Prašćević i dr., 2018). Valom se prenosi energija zvuka pri čemu val predstavlja titranje čestica tijela kroz koji se zvuk širi oko ravnotežnog položaja. Jedinica za mjerenje valne dužine je metar.



Slika 10. Valna duljina zvuka (Izvor: Prašćević i dr., 2018)

Valna duljina obrnuto je proporcionalna frekvenciji, tj. smanjenjem frekvencije, povećava se valna duljina zvuka. Brzina zvuka predstavlja udaljenost koju zvučni val prijeđe u jedinici vremena.

Brzina zvuka ovisi o gustoći i elastičnim silama u čvrstim tvarima i tekućinama te temperaturi sredine kroz koji se zvuk širi (slika 11). Povećanjem temperature povećava se i brzina zvuka.



Slika 11. Ovisnost brzine zvuka o temperaturi zraka (Izvor: Praščević i dr., 2018)

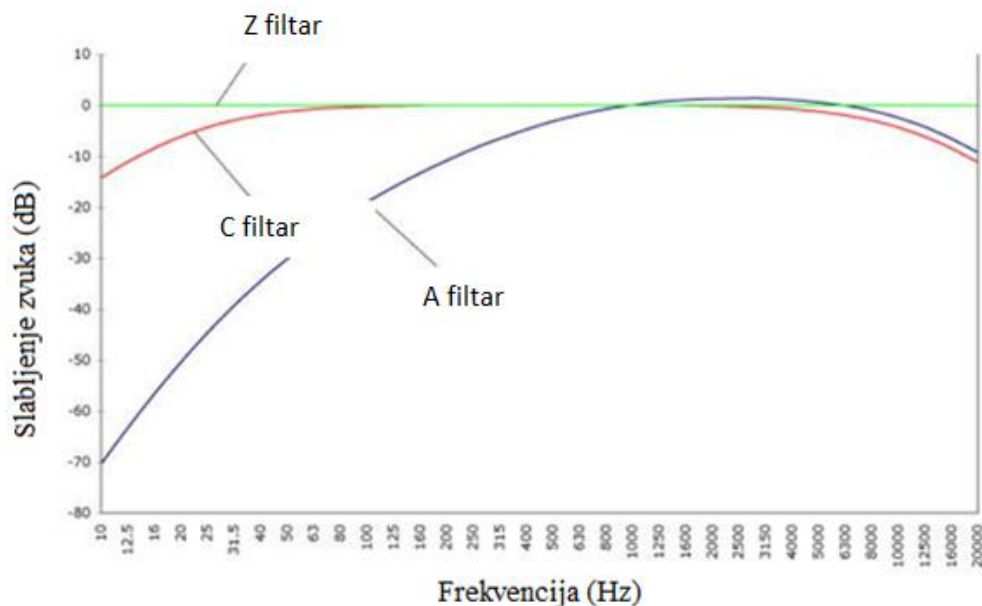
Zvučni izvor proizvodi određenu količinu zvučne energije u jedinici vremena (J/s), tj. izvor zvuka ima određenu zvučnu snagu iskazanu u vatima ($W = J/s$). Zvučna snaga osnovna je mjera toga koliko akustičke energije izvor može proizvesti i ne ovisi o okruženju. Zvuk se širi od izvora mijenjajući tlak zraka u prostoriji. Kolika će razina zvuka biti izmjerena ne ovisi samo o zvučnoj snazi izvora i njegovoj udaljenosti od određene točke u prostoriji, nego i o količini zvučne energije koju će apsorbirati zidovi i koja će se prenijeti kroz zidove i kroz prozore u okolinu.

Buka je zvuk koji stvara neugodu i uznemirujući osjećaj te je izuzetno štetna (Krilek i dr., 2015). Buka nastaje zbog turbulencija zraka oko zubi alata te zbog oscilacija alata tijekom obrade. Osjetljivost ljudskoga sluha varira s obzirom na frekvenciju i razinu zvuka. Budući da ljudski sluh nema ravnu spektralnu osjetljivost (frekvencijski odziv) te da se frekvencijski odziv ljudskoga sluha mijenja s amplitudom, rezultati mjerenja zvuka korigiraju se različitim filtrima kako bi rezultati odgovarali glasnoći koju bi percipirala prosječna osoba. Drugim riječima, filter prigušuje ili povećava amplitudu svake frekvencije. Filter razina zvuka može se shvatiti i kao faktor korekcije dodan mjerenju kako bi se ispravno odražavao mjereni objekt. Najčešće korišteni frekvencijski filteri su A, C i Z, kako je to definirano standardom EN 61672-1:2013.

Filtrirana frekvencija A najčešće je upotrebljavana frekvencija i prilagođena je osjetljivosti ljudskog uha. Ova frekvencija pokriva raspon od 20 Hz do 20 kHz te je definirana različitim standardima kao što su IEC 61672:2013, JIS C1509:2017 ili ANSI S1.4:1983. Filtrirana

frekvencija C standardna je frekvencija i koristi se za mjerenje visokih razina i vršnih razina zvučnoga tlaka.

Filtrirana frekvencija Z je nulta frekvencija uvedena normom IEC 61672-1 kao zamjena za linearnu filtriranu frekvenciju. Ova frekvencija koristi se za određivanje buke u okolišu. Grafički prikaz svih filtara frekvencije dat je na slici 12.



Slika 12. Filteri frekvencije zvuka (Izvor: <https://www.cirrusresearch.co.uk/blog/2020/03/what-are-a-c-z-frequency-weightings/>)

Pri obradi drva glodanjem dolazi do emitiranja zvučnoga tlaka. Istraživanjem zvuka pri glodanju drva bavili su se mnogi autori. Iskra i Tanaka (2005) istraživali su mogućnost uporabe zvuka za praćenje procesa glodanja drva pri različitim parametrima obrade. Rezultati su pokazali da se mjerenjem intenziteta zvuka može pratiti površinsku hrapavost i optimizirati posmičnu brzinu. Slična istraživanja proveli su Aguilera i Barros (2011), čiji su rezultati pokazali sličan rezultat, tj. pokazali su da se s praćenjem zvuka može pratiti hrapavost glodane površine. Peng i dr. (2021) istraživali su mogućnost mjerenja intenziteta zvuka upotrebom mikrofona i programa koji je razvio LabVIEW pri glodanju na CNC strojevima. Istraživanje je pokazalo da je ovakav način mjerenja intenziteta zvuka pouzdan te da se može koristiti za istraživanje. Kminiak i dr. (2023) ispitivali su utjecaj parametara obrade (posmične brzine, dubine glodanja, frekvenciju vrtnje alata) na razinu zvuka kod glodanja iverice. S povećanjem frekvencije vrtnje posmične brzine i dubine glodanja dolazi do porasta razine zvučnoga tlaka.

2.5. Kvaliteta obrade

Površina drva koja je obrađena na sebi ima brojne nepravilnosti koje predstavljaju hrapavost drva (Csanády and Magoss, 2011). Hrapavost površine može biti uzrokovana različitim čimbenicima: diskontinuitetima u materijalu, šupljinama u materijalu, lokalnim deformacijama koje nastaju uslijed obrade ili zatupljenjem alata (Csanády i Magoss, 2011). Nepravilnosti koje se mogu javiti kod drva definirane su standardom DIN 4760:1982 i prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Vidovi odstupanja stvarne površine od idealne površine (prema DIN 4760:1982)

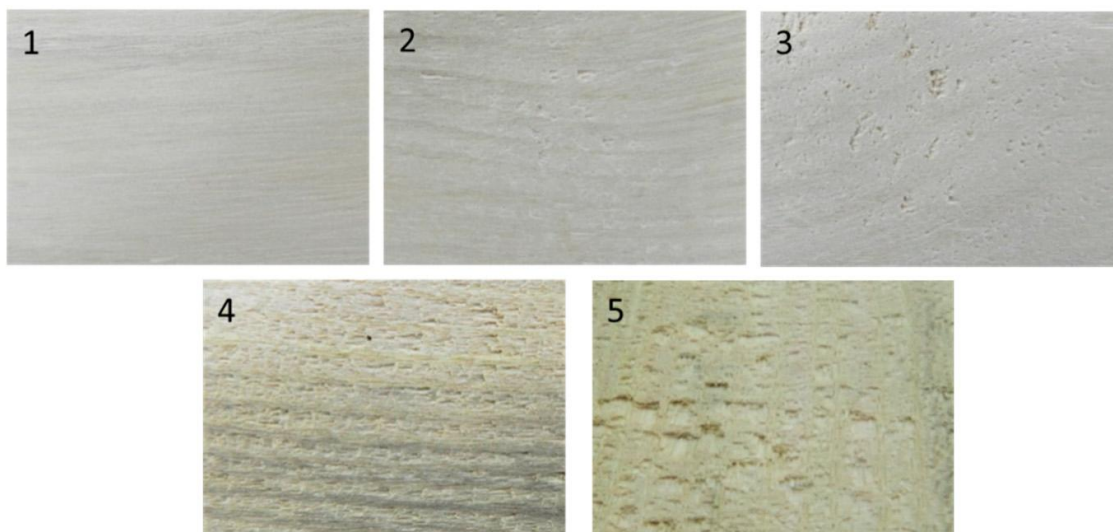
R.br.	Primjer odstupanja	Uzroci stvaranja
1.	odstupanje oblika (plošnost, zaobljenost, ravnost, cilindričnost itd.)	greške u vodilici stroja, greške fiksiranja alata, trošenje alata
2.	valovitost	ekscentrična rotacija alata ili obratka, vibracije, trošenje alata
3.	brazde	oblik alata, kinetika procesa, morfologija strugotine
4.	pukotine	trošenje vrha alata, način formiranja strugotine
5.	unutrašnja struktura	način kristalizacije, nepravilnosti uslijed kemijskih reakcija, oštećenja od korozije
6.	mrežasta građa materijala	fizikalne i kemijske pojave u strukturi materijala, naprezanja i deformacije rešetke

Kvaliteta površine drvnih materijala važna je za površinsku obradu i oplemenjivanje površine te za metodu strojne obrade u industriji namještaja (Islayen i Karamanoglu, 2019). Za kupca koji kupuje krajnji proizvod, kvaliteta površine jedan je od važnijih čimbenika koji utječe na cijenu proizvoda (Iskra i Hernadez, 2009). Hrapavost drva ovisi o mnogim faktorima koji se mogu povezati sa svojstvima drva i parametrima obrade (Hazir i Koc, 2019; Gurgen i dr., 2022; Ibrišević i dr., 2023). Hrapavost drva glavni je indikator kvalitete obrade drva kod CNC strojeva (Hazir i Koc, 2019) i ovisi o posmičnoj brzini, dubini rezanja, kvaliteti alata i obratka (Chen i dr., 2012). Posmična brzina najvažniji je faktor koji uzrokuje površinsku hrapavost (Ibrišević i dr., 2023). Važni su faktori i vrsta drva, gustoća drva, sadržaj vode, anatomska struktura (Sutcu i Karagoz, 2012; Ibrišević i dr., 2023). Hrapavost površine drva ovisi i o presjeku drva. Parametri hrapavosti definirani su standardom ISO 4287:1997, te se ovi parametri koriste kao uobičajan način

određivanja kvalitete površine. Najčešće korišteni parametri hrapavosti su prosječna visina profila R_z i srednje aritmetičko odstupanje mjernoga profila R_a .

Pri glodanju drva dolazi do pojave veće ili manje hrapavosti površine koja ovisi o parametrima obrade i o svojstvima materijala koji se obrađuje. Pinkowski i dr. (2012) istraživali su utjecaj frekvencije vrtnje alata, posmične brzine i vrste drva na površinsku hrapavost. Kod drva breze i jasena posmična brzina i frekvencija vrtnje alata imali su blagi utjecaj, dok je kod drva bukve na hrapavost utjecala samo frekvencija vrtnje alata. Sutcu i Karagoz (2012), De Deus i dr. (2015), te Isleyen i Karamanoglu (2019), pokazali su da frekvencija vrtnje alata i posmična brzina imaju značajan utjecaj na hrapavost obrađene površine dok dubina rezanja nema utjecaj na kvalitetu dobivene površine. Gurau i dr. (2021) istraživali su utjecaj kuta rezanja u odnosu na pravac pružanja vlaknaca i posmične brzine CNC stroja na hrapavost. Zaključeno je da vrijednosti hrapavosti opadaju s povećanjem posmične brzine, dok je najveća hrapavost dobivena pri rezanju vlaknaca pod kutovima od 15° i 60° . Brojna istraživanja potvrđuju da je kvaliteta obrađene površine u direktnoj vezi s parametrima obrade. S porastom frekvencije vrtnje alata smanjuje se hrapavost površine, dok se s povećanjem posmične brzine povećava hrapavost obrađene površine (Sutcu, 2012; Koc i dr. 2015; Sofuoglu, 2016; Zdravković i dr., 2020; Pelit, 2021).

Istraživanje Demira i dr. (2022) pokazalo je da se s povećanjem promjera alata povećava hrapavost. Mogućnost praćenja kvalitete obrađene površine vizualnom metodom istraživao je Merhar i sur. (2020) te je rad obuhvaćao istraživanje kvalitete obrađene površine pet invazivnih vrsta drva u Sloveniji. Mjerenje kvalitete obrađene površine provedeno je u skladu sa standardom ASTM D1666-17 nakon tri različite strojne obrade (blanjanje, glodanje i tokarenje). Metodologija optičke ocjene kvalitete obrađene površine temelji se na bodovanju kvalitativnih svojstava obrađene površine (slika 13). U okviru graničnih vrijednosti pojedinih svojstava kvalitete dodijeljene su ocjene određenim površinama koje predstavljaju etalone kvaliteta, pri čemu ocjena 5 predstavlja najbolju površinu, a ocjena 1 najlošiju promatranu površinu. Istraživanje je pokazalo da ova metoda daje pouzdane podatke o kvaliteti promatrane površine.



Slika 13. Kvaliteta površine: 1 – izvanredna, 2 – dobra, 3 – srednja, 4 – slaba, 5 – veoma slaba (prema Merhar i dr., 2022)

2.5.1. Utjecaj tehnoloških parametara na hrapavost glodanih površina

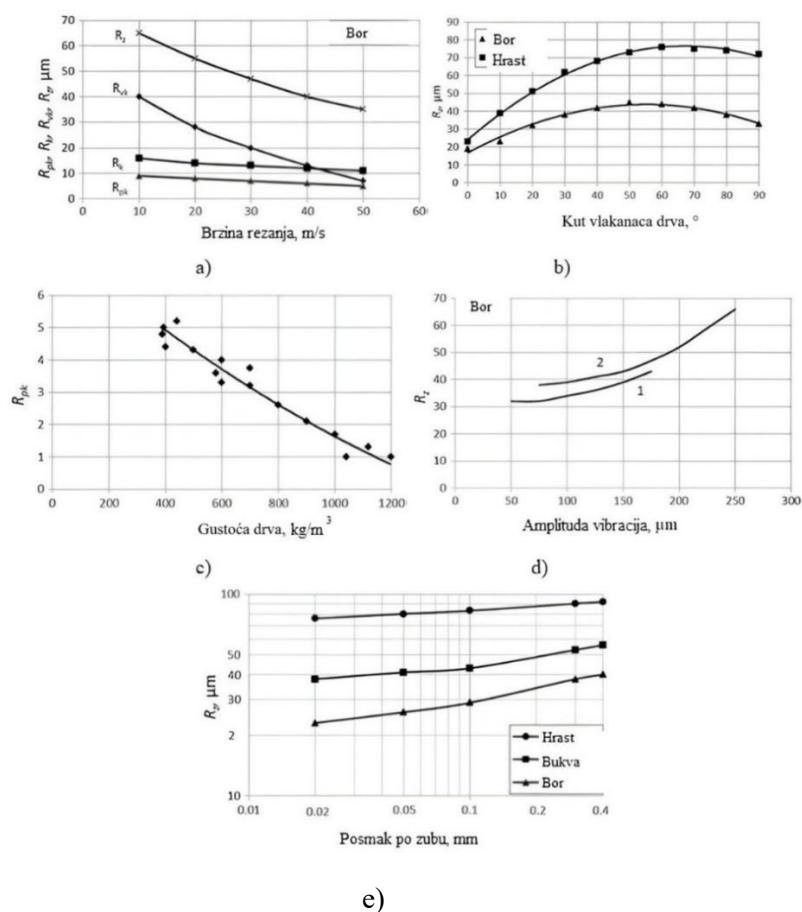
Hrapavost obrađenih površina glodanjem ovisi o brojnim parametrima koji se mogu svrstati u dvije kategorije, i to u parametre obrade i parametre materijala. Najvažniji su parametri obrade koji utječu na hrapavost drva (Csanády i dr. 2019):

- brzina rezanja
- dubina rezanja
- smjer rezanja
- kut rezanja u odnosu na drvena vlakna
- polumjer zaobljenosti oštrice
- zahvat po zubu
- promjer alata
- vibracija obratka.

Brzina rezanja ima veliki utjecaj na kvalitetu obrađene površine (hrapavost). Pri malim brzinama rezanja oštrica alata sporo prodire u drvo te se pojedina vlakna koja se nalaze na putu rezanja izmiču i ostaju nepresječena, već budu pomaknuta ili slomljena, što prouzrokuje hrapavu površinu. Pri velikim brzinama rezanja drvena vlakanca budu presječena, jer nemaju dovoljno vremena pomaknuti se odnosno izmaknuti se od reznih zubi u naletu. Na taj način dobije se površina koja je manje hrapava (Škaljić, 2010).

Parametri materijala koji utječu na hrapavost obrađenoga drva su (Csanády i dr., 2019, slika 14):

- gustoća drva
- udio ranog i kasnog drva
- tvrdoća drva
- modul elastičnosti
- anizotropnost drva
- homogenost strukture drva.



Slika 14. Utjecaj parametara obrade i parametara drva na hrapavost obrađene površine: a) utjecaj brzine rezanja; b) utjecaj kuta rezanja; c) utjecaj gustoće drva; d) utjecaj vibracija e) utjecaj posmaka po zubu (Izvor. Csanády i dr., 2019)

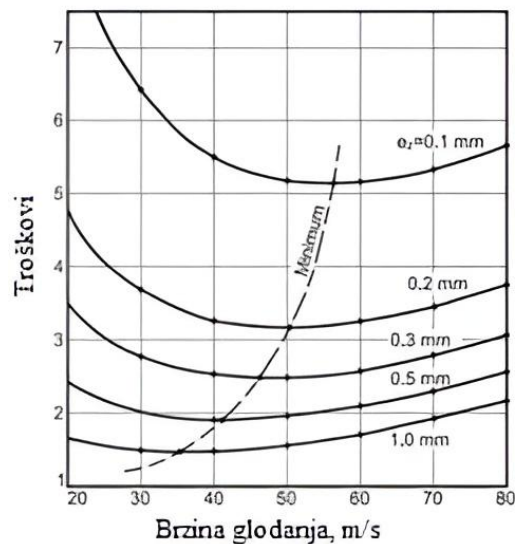
S povećanjem brzine rezanja dolazi do smanjenja vrijednosti parametara hrapavosti, tj. dolazi do povećanja kvalitete obrađene površine (14a). Kut rezanja u odnosu na vlakanca drva utječe na hrapavost površine (14b). Najmanja hrapavost dobije se pri rezanju drva paralelno s vlakancima.

S povećanjem kuta rezanja u odnosu na vlakanca drva hrapavost površine se povećava. S povećanjem gustoće drva hrapavost površine se smanjuje (14c). Povećanje amplitude vibracija (14d) i posmaka po zubu (14e) uzrokuje povećanje hrapavosti površine.

2.6. Učinak obrade

Cilj svake proizvodnje izrada je proizvoda koji će imati niske troškove proizvodnje, a visoke kvalitativne odlike. Ekonomija proizvodnje znatno je pod utjecajem strojne obrade. Brzina i kvaliteta strojne obrade imaju najveći utjecaj na cijenu i ekonomičnost gotovog proizvoda. U svim industrijskim procesima, uključujući procese obrade drva i kompozita na bazi drva, cilj je postići što bolji učinak obrade kako bi konačni proizvod bio što jeftiniji i konkurentniji na tržištu. Osnovni je parametar učinka obrade vrijeme proizvodnje, tj. vrijeme potrebno za oblikovanje materijala u gotov proizvod. Smanjenje vremena proizvodnje utječe na cijenu gotovog proizvoda. Ukupno vrijeme obrade može se raščlaniti na nekoliko komponenti, i to na vrijeme pripreme stroja, vrijeme ulaganja i odlaganja obratka u stroj, vrijeme prilagodbe procesa, vrijeme obrade, vrijeme zamjene alata (Csanady i Magoss, 2012). U današnjim tržišnim uvjetima, gdje se količina posla često mijenja, automatizacija je najbolje rješenje za poboljšanje učinka obrade. Jedan od osnovnih tipova automatizacije u obradi drva jest uporaba modernih CNC strojeva, koji u kombinaciji s odgovarajućim softverom omogućuju brzu proizvodnju uz minimalnu potrošnju materijala. Upotrebom CNC strojeva vrijeme obrade značajno se smanjuje. CNC strojevi dizajnirani su tako da omogućuju automatsku izmjenu alata, što značajno smanjuje ukupno vrijeme. Pored toga, razvoj novih prihvata i dodataka omogućuje brzu zamjenu alata, što u konačnici utječe na učinak obrade. Parametri obrade ključni su aspekti koji utječu na brzinu obrade te se izborom odgovarajućih parametara može postići znatno kraće vrijeme i odgovarajuća kvaliteta. Frekvencija vrtnje alata i posmična brzina međusobno su povezane veličine, tako da se s povećanjem frekvencije vrtnje može povećavati i posmična brzina, što utječe na povećanje brzine izrade (Sumbodo i dr., 2018). Maksimalni učinak obrade podrazumijeva velike posmične brzine i maksimalne dubine obrade što dovodi do relativno kratkoga vijeka alata (Csanady i dr., 2019). Učinak obrade ovisi o brzini uklanjanja materijala, što predstavlja količinu materijala koja se odstrani u jedinici vremena.

S aspekta ekonomičnosti, CNC strojevi skuplji su u odnosu na klasične strojeve. Pored toga, troškovi su održavanja i energije veći, kao i troškovi alata i opreme. Troškovi alata obuhvaćaju troškove nabave alata te troškove oštrenja. Kako bi se smanjili troškovi oštrenja, potrebno je povećati vrijeme između dvaju oštrenja alata. Kako se vidi na slici 15, povećanje zahvata po zubu alata dovodi do smanjenja troškova jer se smanjuje vrijeme obrade.



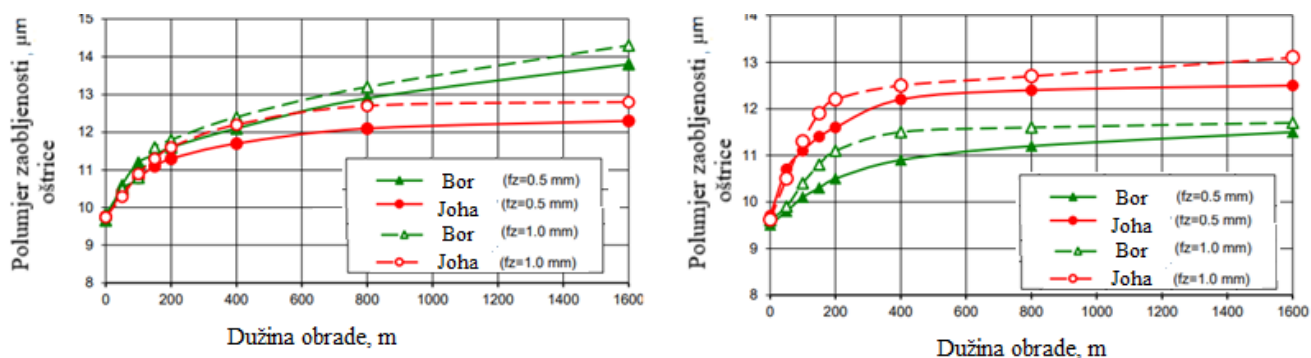
Slika 15. Ovisnost troškova o učinku obrade i zahvata po zubu (Izvor: Csanady i Magoss, 2012)

2.6.1.. Trajnost alata

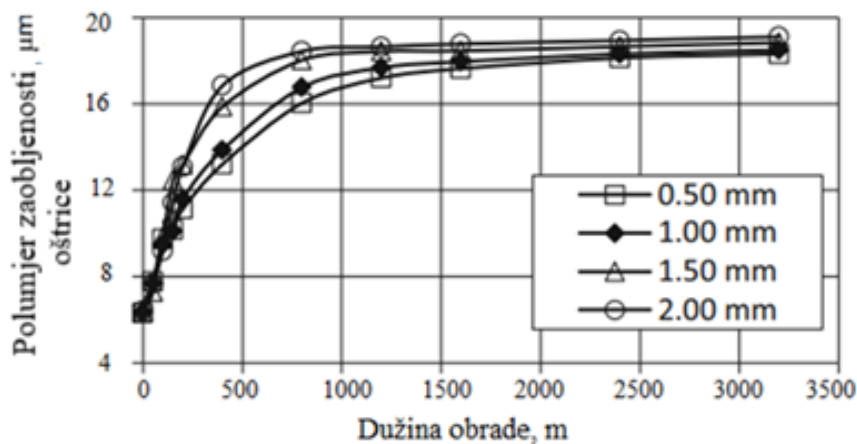
Prilikom glodanja drva oštrica alata vrši rezanje, strugotina klizi preko površine alata te zbog trenja i temperature koja se javlja u alatu dolazi do povećanja polumjera zaobljenosti oštrice. Povećanje polumjera zaobljenosti oštrice alata uzrokovano je različitim parametrima. Povećanjem dužine obrade povećava se polumjer zaobljenosti oštrice. Cilj je mnogih istraživanja pronalazak efikasnoga načina za smanjenje zatupljenja oštrice tijekom obrade. Fahrussiam i dr. (2015) istraživali su utjecaj različitih prevlake na glodalima na veličinu polumjera zaobljenosti oštrice. Alati s prevlakama pokazali su veću otpornost na trošenje u odnosu na alate bez prevlake. Dobiveni rezultati pokazuju da u prvih 200 metara obrade dolazi do intenzivnoga povećanja polumjera zaobljenosti oštrice, nakon čega dolazi do smanjenoga povećanja polumjera zaobljenosti oštrice. Wei i dr. (2019) analizirali su polumjer zaobljenosti oštrice pri glodanju kompozitnog drva u ovisnosti o parametrima obrade. Pozitivan trend u veličini polumjera zaobljenosti oštrice dobiven je upotrebom prevlaka na alatima. Parametri glodanja važan su faktor kojim se može utjecati na

intenzitet povećanja polumjera zaobljenosti oštrice. Rezultati istraživanja (Wei i dr. 2019) pokazali su da porastom posmične brzine dolazi do sporijeg zatupljenja oštrice tijekom obrade, a porastom frekvencije vrtnje alata, aksijalne i radijalne dubine glodanja, dolazi do bržeg povećanja polumjera zaobljenosti oštrice.

Istraživanja Keturakisa i dr. (2017), te Bendikiene i Keturakis (2017) obuhvatila su odnos zatupljenosti oštrice alata i površinske hrapavosti drva pri glodanju. Rezultati su pokazali da s povećanjem dužine obrade dolazi do povećanja polumjera zaobljenosti oštrice bez obzira na parametre obrade (slika 16). Pored kemijskoga sastava materijala i toplinska obrada ima veliki utjecaj na trošenje alata te upravo o veličini zahvata po zubu ovisi i stupanj zatupljenja oštrice (slika 17).



Slika 16. Utjecaj dužine obrade na polumjer zaobljenosti oštrice pri različitim parametrima obrade (Izvor: Keturakis i dr, 2017)



Slika 17. Utjecaj zahvata po zubu i dužine obrade na polumjer zaobljenosti oštrice (Izvor: Bendikiene i Keturakis, 2017)

2.6.2. Optimizacija

Strojna obrada drva odvija se u specifičnom sustavu koji se sastoji od ulaznih čimbenika kao što su obradak, alat, stroj, parametri obrade i drugih čimbenika. U strojnoj obradi svaki od ovih čimbenika može oscilirati u širokome rasponu, a to utječe na karakteristike obrade, odnosno na silu rezanja, temperaturu u zoni obrade, zvuk, formiranje strugotine, zatupljenje alata i sl. (Radovanović i Madić, 2010). Odgovarajući odabir materijala obratka, strojeva, parametara obrade te redoslijeda obrade ključni je čimbenik u postizanju minimalnih troškova proizvodnje ili maksimalnog učinka proizvodnje ili optimalne kombinacije oboje, uz bolju kvalitetu proizvoda (Rao, 2007). Određivanje optimalnih parametara obrade ima za cilj postići željenu kvalitetu proizvoda i smanjiti troškove proizvodnje. Optimizacija navedenih parametara obrade kontinuirani je inženjerski zadatak koji se svakodnevno provodi kako bi se poboljšao cijeli proces proizvodnje. Parametri obrade drva koji najviše utječu na kvalitetu i učinak obrade, kao i na troškove proizvodnje su frekvencija vrtnje alata, posmična brzina, dubina obrade, vijek trajanja alata. S ovim parametrima moguće je utjecati na kvalitetu obrađene površine, polumjer zaobljenosti oštrice, potrošnju električne energije, vrijeme obrade i sl. Pod optimizacijom podrazumijeva se izbor neke od alternativa kojima se rješava zadani problem. U problemu odlučivanja postoje ciljevi koji se žele postići, kriteriji kojima se mjeri postizanje ciljeva, težine tih kriterija koje odražavaju njihovu važnost i alternativa rješavanju problema. Ciljevi predstavljaju stanje sustava koje se želi postići nekom odlukom. Kriteriji daju informaciju o tome u kojoj se mjeri pojedinom alternativom ostvaruje željeni cilj. Razvijene su brojne metode i tehnike za rješavanje različitih vidova problema kao što su optimizacija, modeliranje, različiti modeli prognoziranja, višekriterijsko odlučivanje, fuzzy logika, Taguchi metoda i sl. Najviše se koriste višekriterijske metode (Multi Attribute Decision Making) kod kojih se uzima nekoliko kriterija (Diushenalieva i Romualda, 2012). Proces donošenja odluke uključuje nekoliko osnovnih koraka: (1) identifikaciju (definiranje) problema, (2) određivanje prioriteta, (3) vrednovanje alternativa i (4) rangiranje. Problematika rješavanja problema sastoji se u sagledavanju broja alternativa, mogućih odgovora, kao i neophodnih kriterija, čime se formira set mogućih rješenja. Sljedeći korak jest izbor prikladne metode višekriterijskog odlučivanja, koje će pomoći u vrednovanju i rangiranju alternativa, tj. odabiru optimalnoga rješenja. Razvijene su brojne tehnike i metode višekriterijskog odlučivanja. Analitički hijerarhijski proces (AHP) predstavlja jednu od najčešće korištenih metoda višekriterijskog odlučivanja. Ova metoda rastavlja problem na nekoliko elemenata, zatim se obavlja usporedba

mišljenja radi razvoja prioriteta na svim razinama (Catak i dr., 2012). Metoda TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) nastoji definirati idealno i najmanje idealno rješenje. Osnovni je princip da odabrana alternativa ima najmanje odstupanje od idealnoga pozitivnoga rješenja. Metoda PSI (Parameter Space Investigation) za razliku od većine metoda ne zahtijeva određivanje važnosti kriterija i stoga nije potrebno određivati težine kriterija. Ova metoda korisna je u slučajevima kad se pojave sukoba u odlučivanju o relativnoj važnosti kriterija (Singh i dr., 2015; Petković i dr., 2017).

Optimizacijom parametara obrade moguće je utjecati na kvalitetu obrađene površine te na vijek trajanja alata, povećanje učinka obrade i sl. Ovom problematikom bavili su se brojni autori. Sumbodo i dr. (2018) proučavali su optimizaciju obrade CNC strojevima s aspekta brzine obrade. Za eksperimentalna istraživanja koristili su simulator obrade, koji je baziran na parametrima obrade (posmična brzina, frekvencija vrtnje alata, dubina glodanja). Optimalna obrada s aspekta vremena izrade dobivena je pri *zig-zag* strategiji obrade, dok je najduže vrijeme izrade dobiveno pri *true spiral* strategiji.

Drugi autori u svojim radovima nastojali su razviti modele optimizacije obrade. Hazir i Koc (2019) razvili su model za optimizaciju kvalitete površine pri obradi na CNC stroju. Taguchijev pristup primijenjen je za ispitivanje učinka varijabli CNC obrade. Matematički model baziran je na Taguchijevu algoritmu ortogonalnoga niza kutova. Prema ovome matematičkome modelu, najmanja vrijednost parametra hrapavosti R_a dobije se pri frekvenciji vrtnje alata od 17.377 min^{-1} , posmičnoj brzini od $2,012 \text{ m/min}$, dubini glodanja $2,009 \text{ mm}$ te promjeru glodala od 8 mm . Najmanja vrijednost parametra R_z dobivena je pri rotaciji od 16.980 min^{-1} , pomaku $2,004 \text{ m/min}$, dubini $2,003 \text{ mm}$, te promjeru glodala $8,001 \text{ mm}$. Taguchijev pristup primijenjen je i u istraživanju Ayyildiza i dr. (2021), čiji je cilj bila optimizacija parametara obrade kod bušenja MDF-a, a istraživanje je pokazalo mogućnost primjene ovoga modela na optimizaciju bušenja. Gawronski (2013) je razvio matematički model za optimiziranje posmične brzine kod CNC glodanja drva. Razvijen je višestupanjski postupak optimizacije koji koristi binarnu metodu pretraživanja i genetski algoritam. Istraživanja Çakıroglua i suradnika (2022) usmjerena su na optimizaciju parametara obrade na CNC glodalica primjenom modela umjetnih neuronskih mreža (Artificial Neural Network – ANN), s ciljem postizanja površine najviše kvalitete, uz minimalnu potrošnju energije i najkraće vrijeme izrade. Podatci su optimizirani modelom ANN i pokazali su da se tim modelom mogu optimizirati parametri obrade CNC glodalice.

§ 3. MATERIJALI I METODE RADA

3.1. Eksperimentalne metode

S obzirom na postavljene ciljeve i potrebe utvrđivanja točnosti postavljenih hipoteza eksperimentalni dio istraživanja podijeljen je u tri faze.

Faza 1. Odabir držača alata

U prvoj fazi istraživanja utvrđen je utjecaj vrste držača na razinu zvučnoga tlaka pri glodanju furnirskog uslojenog drva. Cilj je istraživanja bio odrediti držač u kojem alat razvija najmanju razinu zvučnoga tlaka. Istražena su četiri držača različite konstrukcije: držačAKE s čahurom OZ25, držač AKE s čahurom ER32, držač KLEIN s čahurom ER32, te držač LEUCO s čahurom ER32. S glodalom TIP 1 provedena je linijska obrada u dužini od 1 m s varijabilnom promjenom posmične brzine (povećanje 1 m/min na svakih 100 mm obrade), dok je frekvencija vrtnje održavana konstantnom. Početna posmična brzina iznosila je 1 m/min, te je povećavana do maksimalnog iznosa od 30 m/min. Isti je proces obrade ponovljen za svaku frekvenciju vrtnje alata (14 000, 16 000, 18 000, 20 000, 22 000 min⁻¹). Uređaj za mjerenje razine zvučnog tlaka konstantno je mjerio razinu zvučnoga tlaka, bilježeći razine zvučnog tlaka u vremenskom intervalu od 0,5 s. Na osnovu zabilježenih razina zvučnog tlaka izračunata je prosječna razina zvučnoga tlaka pri obradi, za svaku frekvenciju vrtnje. Završetkom ove faze odabran je optimalni držač za drugu i treću fazu istraživanja. Ova faza eksperimenta provedena je na Fakultetu šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, u Praktikum za CNC tehnologije,

Faza 2. Određivanje utjecaja frekvencije vrtnje i posmične brzine na razinu zvučnoga tlaka, temperaturu alata i polumjer zaobljenosti oštrice

U ovoj fazi istražen je utjecaj promjene frekvencije vrtnje alata i posmične brzine na razinu i frekvencijski spektar emitiranog zvuka, zagrijavanje alata, te zatupljenje alata iskazano promjenom polumjera zaobljenosti oštrice pri glodanju furnirskog uslojenog drva. Istraživanja su provedena primjenom tri različita alata čija su svojstva opisana u dijelu 3.3. Za svaku vrstu alata

provedena su istraživanja pri pet različitih frekvencija vrtnje alata (14 000, 16 000, 18 000, 20 000, 22 000 min⁻¹). Pri svakoj promjeni frekvencije vrtnje glodanje je provedeno novim alatom, kako bi se osigurala usporedivost dobivenih rezultata, iz čega proizlazi da je istraživanje provedeno sa ukupno 15 alata. Pri svakoj frekvenciji vrtnje alata provedeno je glodanje furnirskoga uslojenog drva u pravolinijskoj obradi na duljini od 1 m uz promjenu posmične brzine od 10-20 m/min i 20-30 m/min, dok je frekvencija vrtnje održavana konstantnom. Početna posmična brzina iznosila je 10 m/min, te je povećavana za 1 m/min na svakih 100 mm obrade. Kako bi se mogle uspoređivati razlike i utvrđivati pouzdanost rezultata, isti je proces obrade ponovljen 30 puta za posmične brzine od 10-20 m/min, te 30 puta za posmične brzine od 20-30 m/min, za svaku frekvenciju vrtnje alata. Tijekom obrade kontinuirano je mjerena razina zvučnog tlaka uređajem za mjerenje zvučnog tlaka proizvođača Delta OHM, te je iz dobivenih podataka utvrđena prosječna razina zvučnog tlaka pri obradi. Temperatura alata mjerena je u kratkome vremenu nakon njegova izlaska iz obrade (nakon 5 s) u koracima duljine obrade od 1 m. Temperatura je mjerena termalnom kamerom FLIR T560, kojom je snimana termalna fotografija alata, naknadno obrađena softverom Research Studio, te je utvrđena maksimalna temperatura alata i distribucija topline na alatu. Polumjer zaobljenosti oštrice izmjeren je prije početka obrade kako bi se utvrdio početni polumjer zaobljenosti oštrice, te nakon pređenih 60 m obrade. Mjerenje je provedeno uz pomoć mikroskopa Zeiss V16 kojim je napravljeno topografsko snimanje oštrice, a podaci su obrađeni u softveru Gwyddion. Dobiveni podaci razine zvučnoga tlaka, temperature alata, te polumjera zaobljenosti oštrice korišteni su kao kriteriji za višekriterijsku optimizaciju parametara obrade. Optimizacijom parametara obrade objektivno je određena najbolja kombinacija ulaznih parametara (frekvencije vrtnje, posmične brzine) kojom se postiže minimalna temperatura alata, razina zvučnoga tlaka pri obradi i polumjer zaobljenosti oštrice, a maksimalni učinak obrade. Optimizacija parametara izvršeno je za svaki tip alata, tj. alat nije uzet kao ulazni parameter za optimizaciju.

Ova faza eksperimenta provedena je na Fakultetu šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu. Obrada s mjerenjima temperature alata i razine zvuka provedena je u Praktikum za CNC tehnologije, dok su mjerenja zatupljenosti oštrice napravljena u Laboratoriju za drvo u graditeljstvu.

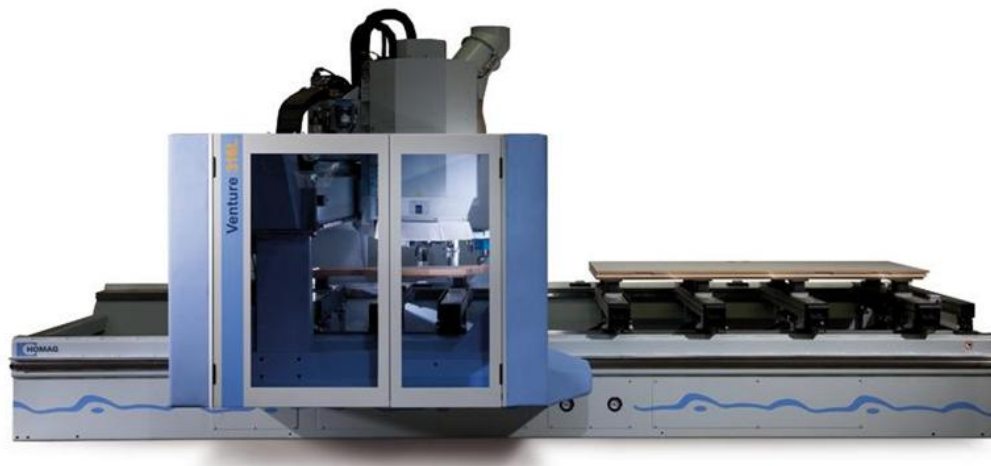
Faza 3. Istraživanje utjecaja duljine obrade na razinu zvučnoga tlaka, temperaturu alata, polumjer zaobljenosti oštrice i kvalitetu površine

Cilj je ove faze bio utvrditi ovisnost razine zvučnoga tlaka, temperature alata, polumjera zaobljenosti oštrice i kvalitete površine o duljini glodanja. Parametri obrade u ovoj fazi istraživanja postavljeni su sukladno dobivenim vrijednostima višekriterijske optimizacije parametara obrade. Na ovaj način utvrđeno je koji alat daje najbolje rezultate s gledišta ekonomičnosti proizvodnje, odnosno trajnosti oštrice. Kako bi pouzdanost rezultata bila zadovoljavajuća, provedena su tri mjerenja istih parametara obrade za svaku vrstu alata pri čemu se obrada odvijala po krivolinijskoj putanji. Na taj način, ujedno je simuliran proces obrade u stvarnim uvjetima serijske proizvodnje gdje se nakon svakoga segmenta obrade alat djelomično ohladi prije nego što nastavi s obradom drugog elementa. U ovoj fazi istraživanja upotrijebljena su glodala iz faze 2, tj. glodala koja su već obradila duljinu od 60 m, pri čemu su upotrijebljena glodala imala približno isti polumjer zaobljenosti oštrice. Duljina obrade u ovoj fazi iznosila je 80 m, pri čemu su temperatura, razina zvučnoga tlaka i kvaliteta površine mjerene kontinuirano tijekom obrade, dok je polumjer zaobljenosti oštrice mjeran nakon obrade od 40 i 80 m. Kako bi spoznaja utjecaja parametara obrade bila kompletna i omogućila vjerodostojnu usporedbu različitih alata u ovoj fazi istraživanja, paralelno su mjerene temperatura alata, razina zvučnoga tlaka, polumjer zaobljenosti oštrice te kvaliteta obrađene površine. Svi su eksperimenti provedeni na Fakultetu šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu. Obrada s mjerenjima temperature alata i razine zvuka provedena je u Praktikum za CNC tehnologije, dok su mjerenja zatupljenosti oštrice napravljena u Laboratoriju za drvo u graditeljstvu. Utvrđivanje kvalitete obrađene površine obavljeno je na izdvojenim uzorcima u laboratoriju Mašinskog fakulteta Univerziteta u Sarajevu.

3.2. CNC obradni centar

CNC obradni centar Venture 316M proizvođača HOMAG Group AG (Schopfloch, Njemačka) upotrijebljen je za sve procese obrade furnirskoga uslojenog drva. Homag Venture 316M (slika 18) jest 5-osni CNC stroj koji vakuumskim prihvatnicima može učvrstiti obratke na radni stol. Naziv obradni centar označava postojanje mogućnosti korištenja različitih tehnologija obrade. Glavno vreteno ima mogućnost korištenja alata za obradu glodanjem i piljenja, dok obradna

jedinica za bušenje ima mogućnost bušenja, ali i piljenja pilom promjera 125 mm ugrađenom u agregat za horizontalna bušenja. Ostala tehnička svojstva prikazana su u tablici 2.



Slika 18. Homag VENTURE 316M (https://wtp.hoechsmann.com/en/lexikon/19258/bmg_311_Venture_316)

Tablica 2. Homag Venture 316M

Dimenzije stroja (mm)	7800 × 5100 × 2900
Dužina radnog stola (mm)	3475
Širina radnog stola (mm)	1550
Vakuum pumpa (m ³ /h)	108
Jačina motora glavnog vretena (kW)	10
Maksimalna frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	24 000
Maksimalna brzina pomaka (m/min)	30
Prihvat	HSK 63
Glava za bušenje	12 vertikalnih vretena, 4 horizontalna vretena
Jačina motora glave za bušenje (kW)	2,2
Radni napon (Hz)	220 V, 60

Za prihvat i pozicioniranje elemenata upotrebljavani su vakuumski prihvatnici i kliješta. Na ovaj način, osigurana je standardna stabilnost obratka pri obradi. Softverom WoodWOP 7.1 proizvođača stroja Homag GmbH pripremljeni su svi upravljački programi za obradu. Homag VENTURE 316M opremljen je tvornički ugrađenim sigurnosnim sustavom. Namjena sigurnosnoga sustava zaštita je stroja od oštećenja ključnih dijelova te prevencija opasnosti za

korisnike stroja. Sastoji se od dvaju mehanizama zaštite s aktivnim senzorima vibracija i prekomjernog opterećenja elektromotornih pogona. Senzor vibracija djeluje tako da isključi stroj kad vibracije prekorače dopuštene vrijednosti koje je propisao proizvođač stroja. Senzor prekomjernog opterećenja elektromotornih pogona djeluje tako da uspori posmično kretanje alata u obradi ako se pojavi prekomjerno opterećenje motora koji ga pogoni. Ako je opterećenje naglo i veliko, stroj se u vrlo kratkome vremenu zaustavlja isključujući i vrtnju alata. Ako je opterećenje povećano, ali u određenim granicama, stroj uspori kretanje alata zadržavajući njegovu vrtnju aktivnom, a ako se opterećenje smanji, vraća obradu u zadane parametre. Ako se opterećenje nastavi, dovršava započetu obradu sa smanjenim parametrima dok se, u slučaju dodatnoga povećanja opterećenja, zaustavlja rad stroja kao u prvospomenutom slučaju.

S obzirom na očekivanu pojavu vibracija uslijed obrade furnirskoga uslojenog drva koje su povezane s parametrima obrade (frekvencijom vrtnje, posmičnom brzinom, dubinom glodanja), vrstom alata, te načinom prihvata elementa, određen je najveći mogući kontakt vakuumskih prihvatnika i materijala za obradu, odnosno površine njihova kontakta osiguravajući maksimalnu krutost obratka. Optimalni raspored vakuumskih prihvatnika napravljen je u odgovarajućem modulu u okviru WoodWOP-a, a fizički raspored prihvatnika na radnom stolu izrađen je upotrebom laserskog pokazivača. Pored upotrebe vakuumskih prihvatnika i kliješta za povećanje krutosti obratka u prvom dijelu pokusa pri pravolinijskoj obradi korišten je i graničnik načinjen od drvene grede koja je tijekom cijelog procesa obrade bila u kontaktu s obratkom, te su na taj način smanjene bočne vibracije. Osim što vibracije negativno utječu na rad stroja uzrokuju i pomicanje obratka, oštećenja ili lom alata ili oštećenja osnovnih dijelova stroja poput keramičkih ležajeva te dovode do zastoja u radu stvarajući gubitke korisnika stroja ili, u najgorem slučaju, ozljede na radu.

Sigurnosni sustavi sprječavaju mnoge negativne posljedice neodgovarajuće upotrebe stroja i upućuju korisnika da prilagodi parametre obrade. Stoga je za potrebe istraživanja ovaj sigurnosni mehanizam namijenjen kao pouzdani mehanizam označavanja graničnih dozvoljenih vibracija. Na taj način mogu se bilježiti pojave neodgovarajućih parametara obrade, ali i trenutak nastanka promjene na alatu poput zatupljene oštrice alata koja će promijeniti veličine vibracija i opterećenja stroja u obradi. U postavci eksperimenta granične vibracije postavljene su kao pokazatelj maksimalne posmične brzine. Međutim zbog konstrukcije stroja koji je projektiran na maksimalnu posmičnu brzinu od 30 m/min, te upotrebe alata malog promjera (12 mm), vibracije pri obradi nikada nisu bile intenzivne, tako da se sigurnosni mehanizam nije aktivirao ni pri maksimalnim

posmičnim brzinama. U pojedinim fazama dešavalo se da dođe do pucanja alata, a da se sigurnosni mehanizam nije aktivirao.

3.3. Alati i prihvat

Za eksperimentalni dio istraživanja odabrane su tri vrste glodala (slika 19) kojima se može obrađivati furnirsko uslojeno drvo i osigurati podjednaka kvaliteta obrađene površine te količina obrađenih ploča:

1. spiralno glodalo s kontinuiranim oštricama (TIP 1)
2. spiralno glodalo s nazubljenim oštricama (TIP 2)
3. glodalo s višestrukim dijamantnim oštricama (TIP 3).

Sve tri vrste glodala istoga su promjera ($\varnothing$ 12 mm) i vrlo slične konstrukcije tijela alata, odnosno istoga broja reznih oštrica po modelu $z_2 + 2$ sa smjerom njihova prostiranja spiralno u odnosu na tijelo glodala radnih duljina.

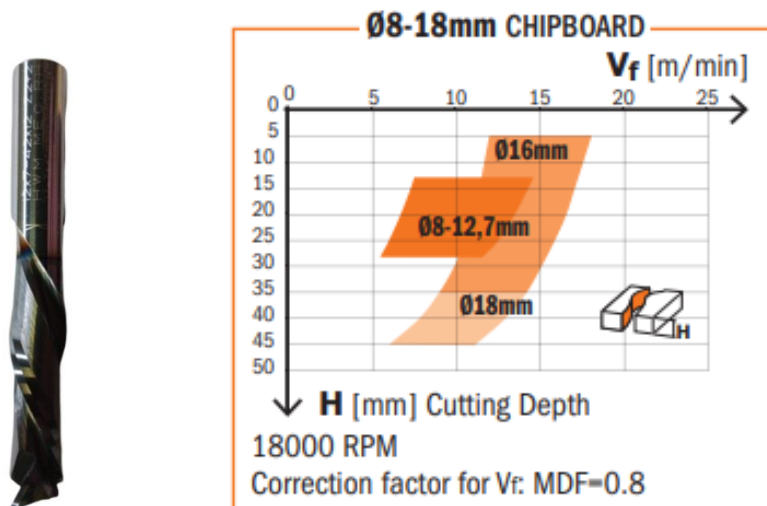


Slika 19. Alati korišteni u eksperimentalnome dijelu

Prije upotrebe alati su fizički izmjereni kako bi se utvrdile stvarne dimenzije alata, koje su se razlikovale od naznačenih tvorničkih dimenzija.

3.3.1. Spiralno glodalo s kontinuiranim oštricama (TIP 1)

Spiralno glodalo s kontinuiranim oštricama proizvođača CMT UTENSILI S.P.A, (Udine, Italija) prikazano je na slici 20. Uz alat, prikazan je i dijagram preporučenih posmičnih brzina koji ovisi o dubini obrade, a detaljna tehnička svojstva vidljiva su u tablici 3.



Slika 20. Glodalo TIP 1 i dijagram pomaka za glodalo (<https://www.cmtorangetools.com/>)

Tablica 3. Tehničke karakteristike glodala TIP 1

Tip	Glodalo s drškom
Promjer (mm)	12
Dužina (mm)	90,24
Dužina reznog dijela (mm)	42
Promjer drške (mm)	12
Broj zuba	2 + 2
Maksimalna frekvencija vrtnje (o/min)	24 000
Smjer rotacije	RH
Materijal oštrice	Volframov karbid (HW)

Ovo glodalo ima dvije kontinuirane oštrice izrađene spiralno u odnosu na tijelo glodala. Dodatne dvije (z2 + 2) oštrice postavljene su na vrhu alata u radnoj duljini od 7 mm i to tako da se prilikom rotacije glodala nagiba kut spirale zuba usmjerava iverje u suprotnome smjeru od ostalih dviju

oštrica. Na ovaj način, povećana je kvaliteta obrade jer je znatno umanjeno pojavljivanje pukotina na površini uzoraka.

Za eksperimentalni dio istraživanja odabran je alat koji će osigurati produljeno trajanje jer je oštrica presvučena s DLC prevlakom. DLC prevlake materijali su na bazi grafita, a naziv je dobio od skraćenice naziva Diamond Like Carbon. Osnovna svojstva prevlake su:

1. visoka tvrdoća (10 – 80 GPa)
2. nizak koeficijent trenja
3. povećana otpornost na abrazivno i adhezivno habanje
4. optička propustljivost – za vidljivu i infracrvenu svjetlost (60 – 90 %)
5. toplinska provodljivost od 4 do 18 W/mK
6. mikrotvrdoća 4000 – 7000 HV 0,025,
7. debljina sloja 1 – 3 μm ,
8. koeficijent trenja 0,05 – 0,15,
9. temperatura prevlačenja $\vartheta = 80 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

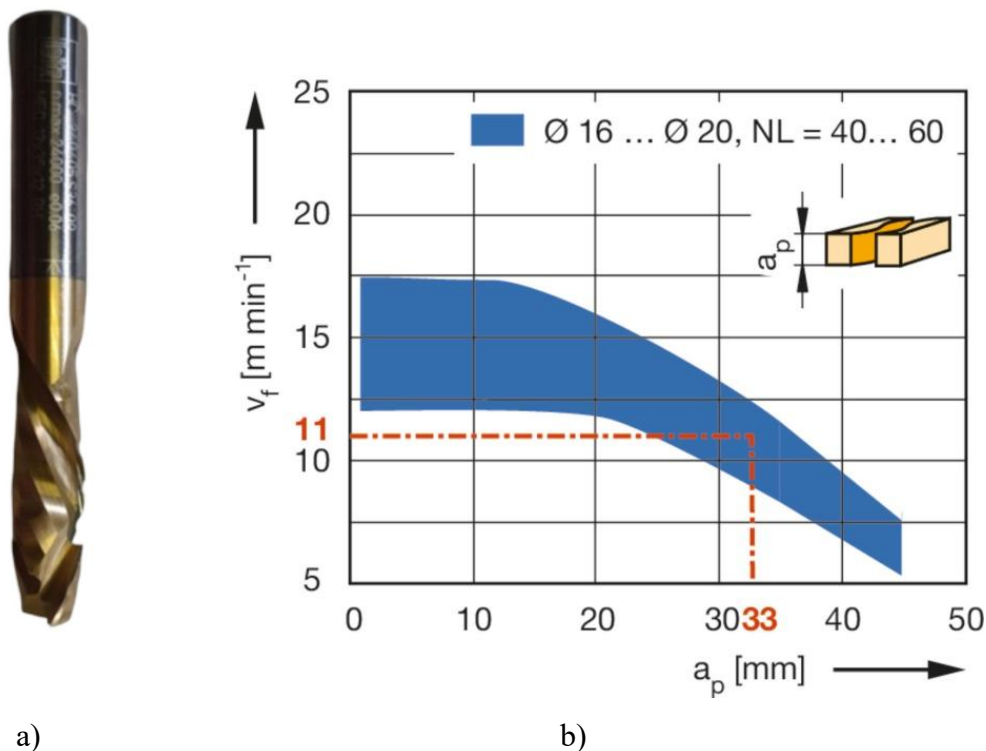
Prevlaka je navučena na naoštrenu oštricu alata. Time je početno zatupljenje oštrice uvećano za debljinu sloja prevlake.

Ovaj tip glodala korišten je u sve tri faze eksperimentalnog istraživanja. U prvoj fazi u kojoj je određivan najbolji sustav prihvata korišten je samo ovaj alat, iz razloga što ovaj alat ima najnižu cijenu u usporedbi s ostala dva tipa alata korištenih u istraživanju. Pored toga ovaj alat korišten je i u ostale dvije faze, tj. prilikom mjerenja temperature, razine zvučnog tlaka i polumjera zaobljenosti oštrice u ovisnosti o parametrima obrade te o duljini obrade.

3.3.2. Spiralno glodalo s nazubljenim oštricama (TIP 2)

Spiralno glodalo s nazubljenim oštricama tipa Marathon proizvođača LEITZ GmbH (Oberkochen, Njemačka) korišteno je kao jedno od glodala za obradu furnirskoga uslojenog drva u fazi 2. i 3. eksperimentalnog dijela istraživanja. Ovaj alat namijenjen je za obradu svih vrsta drva te za obradu kompozitnih materijala na bazi drva. Zbog svoje konstrukcije ima mogućnost rada s većim posmičnim brzinama i većim frekvencijama vrtnje u odnosu na ostala uobičajena komercijalna glodala. Ovo se glodalo također sastoji od dvije gornje i dvije donje oštrice s istim učinkom, a dodatna se razlika može primijetiti u radnoj duljini vršne oštrice od 11,7 mm. Zbog te razlike ovaj

je tip alata početno spušten u obradi kako bi gornji i donji nož jednakom radnom duljinom zahvaćao ploču promatrajući po njezinoj debljini, odnosno visini zahvata. Na ovaj način kod obiju strana obratka (lice i naličje) dolazi do potiskivanja rezanoga materijala prema obratku te se osigurava veća kvaliteta obrade površine. Izgled glodala te preporučena posmična brzina i dubina rezanja prikazani su na slici 21, dok su tehničke informacije o glodalu dane u tablici 4.



Slika 21. Glodalo TIP 2: a) izgled glodala; b) grafikon pomaka u ovisnosti o dubini glodanja (<https://www.leitz.org/>)

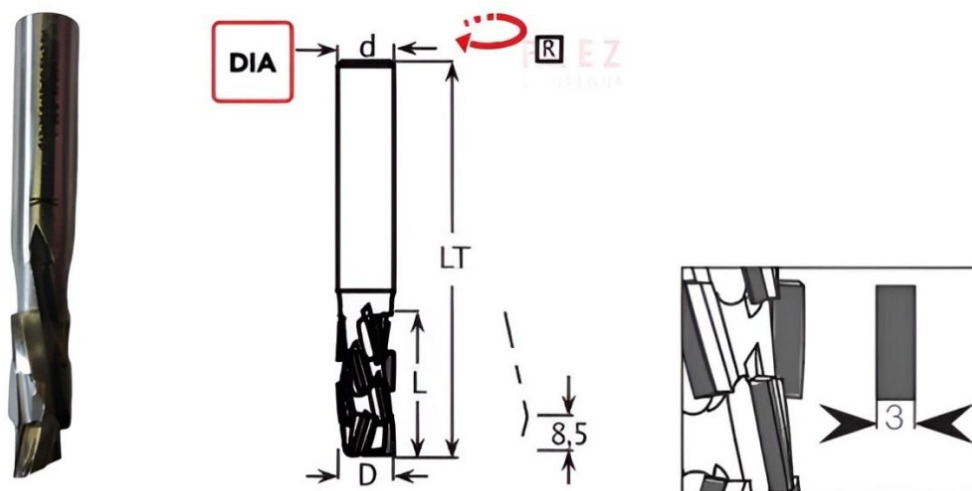
Oštrica alata izrađena je od Volframova karbida koji se uobičajeno koristi za izradu alata jer ima veliku otpornost na trošenje i izrazitu stabilnost pri povišenim temperaturama. Oštrica alata presvučena je prevlakom radi smanjenja otpora trenja drvnoga materijala u zahvatu. Razlika u odnosu na alat TIP 1 je u prevlaci koja je navučena prije završnog oštrenja prsne strane noža. Ovaj alat korišten je u fazama 2. i 3. eksperimentalnog dijela istraživanja.

Tablica 4. Tehničke karakteristike glodala TIP 2

Tip	Glodalo s drškom
Promjer (mm)	12
Dužina (mm)	89,65
Dužina reznog dijela (mm)	35
Promjer drške (mm)	12
Broj zuba	2 + 2
Maksimalna frekvencija vrtnje (min^{-1})	24 000
Smjer rotacije	RH
Minimalna dubina rezanja	13
Materijal oštrice	Volframov karbid (HW)

3.3.3. Glodalo s dijamantnim oštricama (TIP 3)

Glodala s oštricama od sintetskoga dijamanta (PCD, DIA itd.) najčešće su upotrebljavani alati za obradu kompozitnih materijala na bazi drva. U eksperimentalnome dijelu ovoga rada korišteno je dijamantno glodalo proizvođača ITA TOOLS Sp. z.o.o. (Krakov, Poljska). Dimenzije glodala (slika 22) slične su ostalim glodalima korištenima u eksperimentu, a ostala tehnička svojstva prikazana su u tablici 5.



Slika 22. Dijamantno glodalo TIP 3 (<https://www.ita.tools/>)

Tablica 5. Tehničke karakteristike glodala TIP 3

Tip	Glodalo s drškom
Promjer, D (mm)	12
Dužina, LT (mm)	79,92
Dužina reznog dijela, L (mm)	35
Promjer drške, d (mm)	12
Broj zuba, z	2 + 2
Maksimalna frekvencija vrtnje (o/min)	24 000
Smjer rotacije	RH
Materijal oštrice	DIA

Oštrice ovoga tipa alata napravljene su od polikristalnoga dijamanta, dok je tijelo izrađeno od nepoznate legure koja, prema masi alata ima manju gustoću od čelika ostalih dvaju tipova alata. Polikristalni sintetski dijamant odlikuje izuzetna tvrdoća te je zbog toga trajnost ovog alata u odnosu na dva prethodna alata povećana. Nedostatak ovoga tipa alata njegova je krhkost, zbog čega ih je preporučljivo koristiti samo kod posebno kvalitetnih strojeva s uravnoteženim i kontroliranim parametrima rada. Oštrice od PCD-a izuzetno su skupe zbog čega se izrađuju u dvjema izvedbenim debljinama. Kod jedne su izvedbe alata oštrice veće debljine s mogućnošću višekratnog oštrenja, dok su u ovom istraživanju korištene vrlo tanke oštrice tako da nije moguće njihovo ponovno oštrenje. Ovaj alat korišten je u fazama 2. i 3. eksperimentalnog dijela istraživanja.

3.3.4. Sustav pritezanja

Prihvat alata u CNC stroj izveden je s mehaničkim pritezanjem upotrebom elastičnih čahura visoke točnosti izrade. Ovaj način pritezanja izabran je zbog najčešće uporabe pri obradi drva, uglavnom zbog jednostavnosti uporabe i niskih troškova. U eksperimentalnome dijelu istraživanja korištena su dva tipa elastičnih čahura u četiri različita držača alata:

1. AKE25
2. AKE32
3. KLEIN32
4. LEUCO32

Svi navedeni sustavi korišteni su u fazi 1. eksperimenta, gdje je utvrđeno koji sustav daje najbolje rezultate s aspekta razine emisije zvučnog tlaka. Sustav KLEIN korišten je u fazi 2. i 3. eksperimentalnog dijela.

Držać alata AKE razvila je tvrtka AKE Knebel GmbH (Balingen, Njemačka). Ovaj je patentirani sustav pritezanja predstavljen javnosti 2023. godine što ga čini relativno novim na tržištu. Glavno je svojstvo ovoga sustava uklanjanje uvijanja elastične čahure prilikom pritezanja alata. Time ovo inovativno rješenje tvrtke AKE Knebel GmbH eliminira glavni nedostatak klasičnoga mehaničkoga sustava stezanja koji unosi uvijanje čahure što rezultira nepoklapanjem osi rotacije prihvata i alata te time smanjuje preciznost obrade. Ovaj sustav stezanja ima mogućnost vrtnje do $24\,000\text{ min}^{-1}$. Sila pritezanja je 40 % veća nego kod klasičnih mehaničkih prihvata, a potrebno ju je primijeniti zbog povećane površine trenja unutar prihvata zbog kliznih površina koje sprečavaju rotacijsko opterećivanje čahure. Držać AKE25 upotrebljava se zajedno s čahurom OZ25. Izgled sustava pritezanja, kao i dimenzije, prikazane su na slici 23.

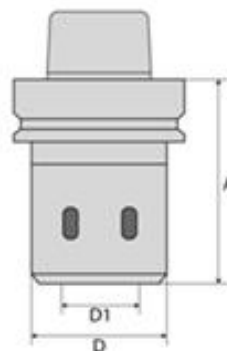


Slika 23. Držać alata AKE HSK 63 264E -OZ25 (<https://www.ake.de>)

Držać AKE32 koristi se sa standardnim čahurama ER32. Izgled držača, kao i dimenzije, prikazane su na slici 24.



A	76 mm
D ₁	12 mm
D	50 mm

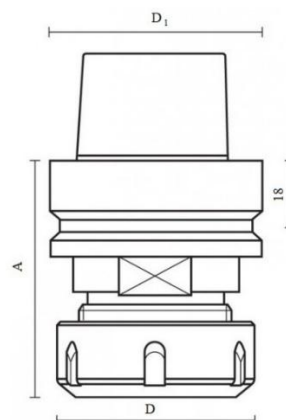


Slika 24. Držač alata AKE HSK 63 264E-ER32 (<https://www.ake.de>)

Držač alata KLEIN32 izradila je tvrtka KLEIN S.r.l (Pesaro, Italija). Odlika je ovoga sustava jednostavna, ali izuzetno precizna izrada, što omogućava frekvenciju vrtnje do $24\,000\text{ min}^{-1}$. Zbog svoje jednostavnosti ima niske troškove održavanja, jednostavan je za čišćenje te je dosta jeftiniji od drugih dvaju sustava prihvata alata. Izgled držača, kao i dimenzije, prikazane su na slici 25. Uz ovaj držač korištena je čahura ER32.



A	74 mm
D ₁	63 mm
D	50 mm



Slika 25. Držač alata KLEIN (<https://www.sistemiklein.com/>)

Držač LEUCO32 razvila je tvrtka LEUCO Ledermann GmbH & Co. KG (Horb am Neckar, Njemačka). Ovaj držač značajno je duži (L odnosno L_1) u odnosu na ostale držače. Maksimalna dozvoljena frekvencija vrtnje je $24\,000\text{ min}^{-1}$. Glavno je svojstvo ovoga sustava matica, koja prilikom pritezanja, vrši pritisak isključivo na gornji dio elastične čahure. Na taj se način uprkos većem trenju u kontaktu matice i elastične čahure sprečava utjecaj djelovanja konusa standardnih matice na uvijanje, smanjujući bočno djelovanje uzrokovano tolerancijama u navoju, te time povećava preciznost obrade. Uz ovaj držač korištena je čahura ER32. Izgled sustava pritezanja, kao i dimenzije, prikazane su na slici 26.

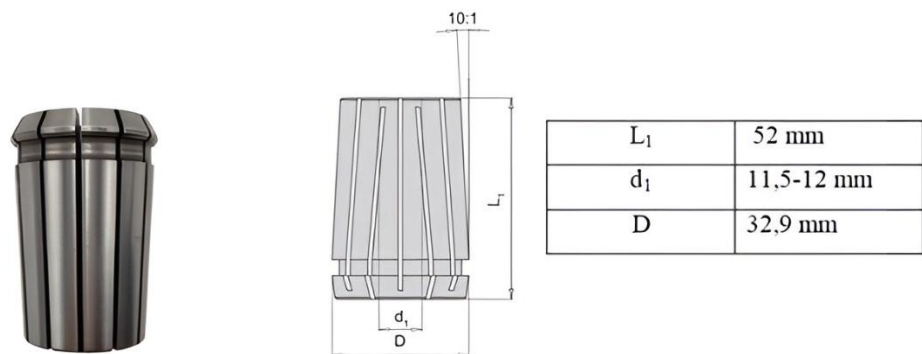


Slika 26. Držač alata LEUCO 32 (<https://www.leuco.com/>)

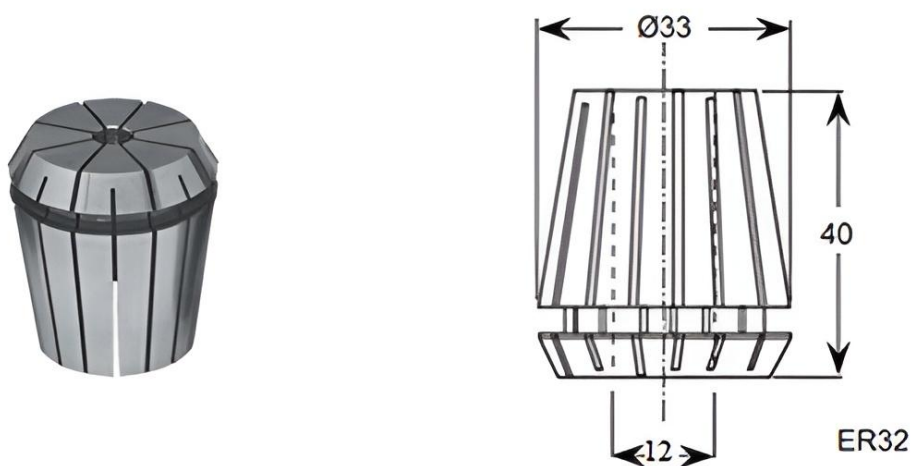
Sastavni je dio sustava stezanja elastična čahura za pritezanje. Kod eksperimentalnog ispitivanja za pritezanje korištene su dvije vrste čahura:

1. čahura OZ25
2. čahura ER32

Elastična čahura tipa OZ25 proizvođača AKE Knebel GmbH (Balingen, Njemačka) prikazana je na slici 27-a, dok je čahura tipa ER32 proizvođača Metal World (Udine, Italija), prikazana na slici 27-b. Glavna razlika između čahura zapravo je kut klina kojim se osigurava iznos trenja dovoljan za prenošenje energije potrebne za rezanje. To ujedno utječe na potreban moment pritezanja koji najviše ovisi o konstrukciji sustava pritezanja u prihvat. Oba tipa čahura korištena su u fazi 1. eksperimenta. Nakon što je utvrđen optimalni tip držača temeljem razine zvučnoga tlaka i cijene, u fazi 2. i 3. korištena je čahura tipa ER32.



a)



b)

Slika 27. Elastične čahure: a) OZ25; b) ER32

Pritezanje je izvedeno upotrebom moment ključa prema napatku proizvođača prihvata kako bi se osigurala provjereno najbolja sila pritezanja kod svih držača. Korištene sile pritezanja prikazane su u tablici 6.

Tablica 6. Korištene sile pritezanja alata

Oznaka	Proizvođač	Čahura	Sila pritezanja (N)
AKE25	Ake	OZ25	180
AKE32	Ake	ER32	180
LDU32	Leuco	ER32	130
KLE32	Klein	ER32	130

Prilikom učvršćivanja alata u držač vodilo se računa o različitim duljinama alata i oznakama minimalno potrebnih dimenzija duljine koju je potrebno postaviti u elastičnu čahuru te kraku udaljenosti središta izvora vibracija od prihvata alata. Prilikom postavljanja alata nastojalo se da krak udaljenosti središta izvora vibracija bude jednak za sva tri tipa alata kako bi imali idealnu izvedbu za usporedbu rezultata. Središte izvora vibracija predstavlja središte preklopa gornje i donje oštrice alata, te je prilikom postavljanja alata vođeno računa da se središte preklopa gornje i donje oštrice poklopi sa središtem reza u ploči. Kod alata TIP 1 i TIP 2 udaljenost središta reza ploče od prihvata postavljena je na 44,9 mm, dok je kod alata TIP 3 ova udaljenost iznosila 38 mm. Razlika u udaljenostima posljedica je različite duljine alata. Alati TIP 1 i TIP 2 nisu se mogli dublje staviti u prihvata zbog kanala za izbacivanje piljevine, a alat TIP 3 je bio prekratak da bi više virio iz prihvata. Postavljanje alata u držač izvedeno je upotrebom šablona različite debljine, kako bi se postigle navedene veličine.

3.4. Materijali

3.4.1. Furnirsko uslojeno drvo

U eksperimentu je obrađivano 9-slojno furnirsko uslojeno drvo izrađeno od drva breze (*Betula pendula*), proizvođača Wisa UPM Plywood Oy (Lahti, Finska). Ukupna debljina ploče iznosila je 12 mm, dok je debljina lista furnira u proizvedenoj ploči iznosila 1,33 mm. Svojstva uzoraka furnirskoga uslojenog drva navedena su u tablici 7, a tehnički list nalazi se u prilogu rada. Svi uzorci ploča proizvedeni su u klasi B-B, što znači da su na licu i naličju bili vidljivi tragovi naknadnih popravaka vizualno neodgovarajućih grešaka drva površinskoga sloja furnira. Prema standardu HRN EN 635:1999 na licu i naličju ploče dopuštena je pojavnost manje kvрге i druge greške poput promjene boje. Dimenzija nabavljenih ploča iznosila je 3000 × 1500 mm (*d*×*š*) te ih je zbog ograničenja veličine radnog stola CNC stroja i jednostavnijeg rukovanja prije istraživanja bilo potrebno dimenzionirati na veličinu 997×1500 mm (*d*×*š*). Nakon dimenzioniranja, ploče su u laboratorijskim uvjetima temperature 23±2 °C i relativne vlažnosti zraka od 50±5 % kondicionirane u trajanju od 30 dana. Sadržaj vode u furnirskome uslojenom drvu nakon kondicioniranja iznosio je 9-10 %.

Tablica 7. Svojstva uzoraka furnirskoga uslojenog drva

Naziv (mjerna jedinica)	Iznos
Paropropusnost	vlažni uvjeti 90 / suhi uvjeti 220
Gustoća (kg/m ³)	680
Sadržaj pentachlorophenol (ppm)	≤5
Apsorpcija zvuka	0,10/0,30
Toplinska provodljivost (W/mK)	0,17
Kvaliteta lijepljenja (HRN EN 314-2: 1999)	Klasa 3
Čvrstoća na savijanje (N/mm ²)	34,4; ⊥ 33,2
Modul elastičnosti pri savijanju (N/mm ²)	10719; ⊥ 6781
Čvrstoća na tlak (N/mm ²)	27,7; ⊥ 24,3
Vlačna čvrstoća (N/mm ²)	40,0; ⊥ 35
Vatrootpornost	D-s2, d0
Oslobađanje formaldehida	E1
Biološka otpornost	Klasa 2
-paralelno sa žicom površinskog sloja; ⊥ -okomito na žicu površinskog sloja	

3.5. Oprema i metode mjerenja

3.5.1. Mjerenje zvučnoga tlaka

Razina zvučnoga tlaka mjerena je uređajem HD2110L proizvođača Delta OHM (Padova, Italija). To je precizni prijenosni uređaj za mjerenje razine zvuka s mogućnostima višeparametarskoga bilježenja podataka te mogućnostima spektralne i statističke analize podataka (slika 28).



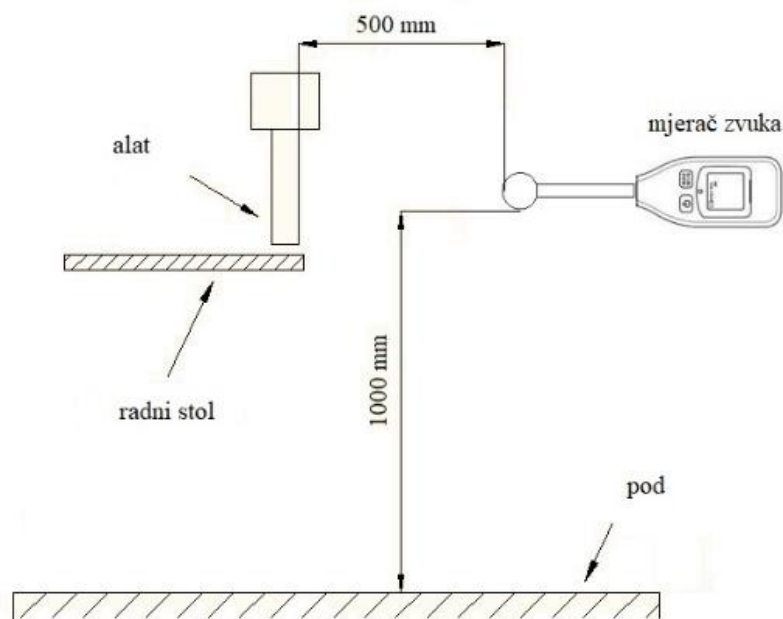
Slika 28. Uređaj za mjerenje zvučnoga tlaka Delta OHM HD2110L (Izvor: https://environmental.senseca.com/wp_content/uploads/document/DeltaOHM_HD2110L_manual_ENG.pdf)

Uređaj zadovoljava specifikacije klase 1 prema standardu UIEC 61672-1:2002. Oktavni i terčni filteri propusnosti zadovoljavaju specifikacije klase 0, sukladno standardu IEC 61260:1995. Mikrofon uređaja zadovoljava svojstva predviđena standardom IEC 61094-4: 1995. Uređaj ima mogućnost mjerenja spektra zvučnoga tlaka u oktavnom opsegu od 16 Hz do 16 kHz i terčnom opsegu od 16 Hz do 20 kHz. Frekvencijski raspon zvuka može se podijeliti na manje segmente koji se nazivaju oktave. Oktava se u akustici sastoji od različitih tonskih frekvencija, od kojih viši ton ima dvostruko veću frekvenciju od nižega. Tercna analiza je detaljnija jer je oktava podijeljena na tri pojasa, tako da obuhvaća širi frekvencijski sustav. Upravljački softver mjernog uređaja organiziran je u module posebno namijenjene za pojedine potrebe. Upotrijebljen je modul za mjerenje ukupne razine zvučnog tlaka u spektru terce. Kako bi se osigurao reprezentativni i usporedivi uzorak zvuka obrade, uređaj je postavljen na CNC stroj tako da je udaljenost između izvora zvuka (alat) i mikrofona uređaja konstantna. Način postavljanja uređaja prikazan je na slici 29. Postavljanjem uređaja u zaštitnu kabinu CNC stroja vanjski su izvori zvuka velikom većinom uklonjeni tako da je najveći negativni učinak na mjerni rezultat imao sustav odsisa drvnih čestica. Njegov se utjecaj uglavnom odnosio na ukupnu razinu buke. Zbog velike udaljenosti odsisnoga crijeva uslijed promjene položaja kabine može se mijenjati njegov smjer i iznos razine zvučnoga tlaka. Uređaj ima ograničenu mogućnost pohranjivanja rezultata mjerenja zbog čega je fizičkim povezivanjem uređaja za mjerenje zvuka s računalom omogućeno direktno pohranjivanje rezultata mjerenja te opsežna naknadna obrada podataka softverom NoiseStudio istoga proizvođača. U

vremenskim intervalima od 0,5 s mjerena razina zvučnoga tlaka u 32 različite frekvencije (16 Hz – 20 kHz) izražena u dB, kao i razina zvučnog tlaka izražena u dB(A). Kod obrade rezultata mjerenja uzete su u obzir samo vrijednosti razine zvučnoga tlaka koje su bilježene u fazi glodanja. Vrijeme mjerenja zvučnog tlaka u fazi 1 i 2 iznosilo je 3-5 s, dok je u fazi 3 iznosilo 19 s.



a)

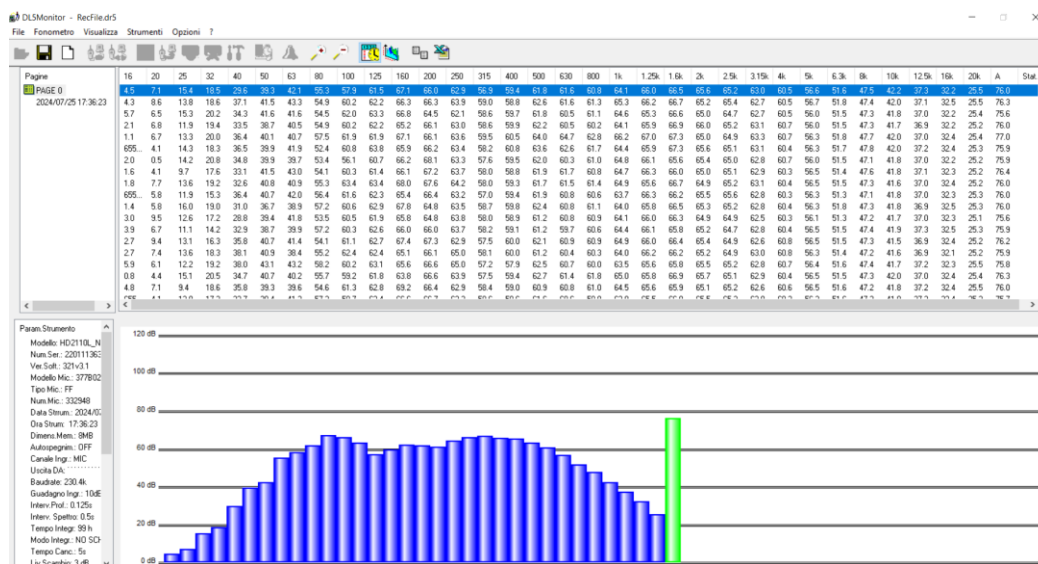


b)

Slika 29. a) Mjerenje zvuka s uređajem Delta OHM HD2110L; b) shema mjerenja

Za mjerenje je odabran modul „Monitor“ (slika 30) u kojem je moguće kontinuirano pratiti i registrirati razine zvučnog tlaka u vremenskom intervalu od 0,5 s. Kako bi mjerni rezultat bio

usporediv sa zvukom koji prepoznaje/registrira ljudsko uho te time u konačnici omogućio čovjeku da prepoznaje pojave pri obradi povezane s razinom emitiranoga zvuka, mjerenja ukupne razine zvuka provedena su primjenom A filtra.



Slika 30. Mjerenje i registriranje razina zvučnoga tlaka

Izmjerene vrijednosti razina zvučnog tlaka spremljene su u .xlsx formatu, kako je dano u prilogu rada. Dobiveni rezultati prvo su filtrirani na način da su razdvojeni rezultati razina zvučnoga tlaka prilikom obrade od izmjerenih razina zvučnoga tlaka kada alat nije u zahvatu. U posljednjoj koloni (prilog 1) zabilježena je ukupna razina zvučnoga tlaka u intervalima od 0,5 s izražene u dB(A). Praćenjem promjene razine zvučnoga tlaka jasno se uočava povećanje uzrokovano ulaskom oštice u zahvat (povećanje 5-7 dB(A)). Izlaskom alata iz zahvata uočava se pad vrijednosti razine zvučnoga tlaka na vrijednosti prije ulaska oštice u zahvat. Na temelju tako izdvojenih vrijednosti zvučnoga tlaka izračunane su prosječne vrijednosti razine zvučnoga tlaka za svako ponovljeno mjerenje te je napravljena njihova statistička obrada.

Za usporedbu frekventnih spektara razine zvuka pri različitim uvjetima glodanja izračunane su prosječne vrijednosti razine zvuka za pojedine frekvencije u spektru na temelju ponovljenih mjerenja.

3.5.2. Mjerenje temperature alata

Termalnom kamerom FLIR T560 proizvođača Teledyne FLIR LLC (Wilsonville, Oregon, SAD) mjerena je temperatura alata i distribucija topline u alatu pri obradi furnirskoga uslojenog drva.

Termalna kamera FLIR T560 ručna je kamera velike osjetljivosti s vidnim poljem od 24°. Tehničke karakteristike kamere prikazane su u tablici 8. Kamera je za potrebe mjerenja postavljena na stacionarno mjesto uz pomoć profesionalnoga fotografskog stalka vrlo dobre stabilnosti (slika 31).



Slika 31. Mjerenje temperature s termalnom kamerom FLIR T560

Tablica 8. Tehničke karakteristike termalne kamere FLIR T560

Naziv (mjerna jedinica)	Iznos
Rezolucija	640 × 480
Područje mjerenja temperature (°C)	–20 do +130 (točnost ± 2)
Termička osjetljivost (°C)	<0,04
Brzina osvježavanja slike (Hz)	30
Fokus slike	ručni, automatski
Veličina ekrana (in)	4
Korak piksela (μm)	12
Zoom	1 – 8 ×

Termalna slika snimana je kroz otvor na zaštitnome kućištu CNC stroja nakon završetka svake pojedinačne obrade tako da je stroj u vremenskom odsječku od 5 sekundi od izlaska alata iz obrade zaustavio njegovu vrtnju i svaki put postavio ga na isto mjerno mjesto kako bi se snimila slika emisije infracrvenoga zračenja alata i prihvata. Time je osigurana vremenska slijednost mjerenja uz uvijek istu udaljenost između alata i kamere, dok je uređajem za klimatizaciju osigurano konstantno stanje temperature i vlažnosti zraka kako bi i uvjeti koji doprinose hlađenju materijala bili konstantni. Vremenski period između završetka prvoga i početka svakoga sljedećega segmenta obrade približno je trajalo 25 s. Udaljenost objektiva kamere od alata u trenutku snimanja termalne slike iznosila je 1 m. Konstruktivna izvedba kamere zahtjeva posebne uvjete smještaja kako bi se održala kvaliteta mjerenja zbog čega je proizvođač preporučio parametre prikazane u tablici 9, te su isti podešeni i primijenjeni tijekom mjerenja temperature alata.

Tablica 9. Preporučeni parametri pri mjerenju termalnom kamerom

Naziv (mjerna jedinica)	Iznos
Udaljenost (m)	1
Temperatura zraka (°C)	20
Vlažnost zraka (%)	50
Reflektirana temperatura (°C)	20
Zračenje	0,95

Zračenje predstavlja mjeru koja označava koliko učinkovito tijelo zrači temperaturu. Vrijednost zračenja kreće se od 0 (tijelo reflektira svu energiju) do 1 (tijelo savršeno apsorbira energiju). Reflektirana temperatura (također poznata kao temperatura pozadine) svako je toplinsko zračenje koje potječe od drugih objekata i koje se reflektira od cilja koji se mjeri. Snimanje slika izvršeno je u modulu *Picture in picture* s automatskim fokusom na tijelo alata. U ovome modulu registrirana su temperaturna područja te je registrirana i naznačena najviša i najniža temperatura u mjernome području kamere. Dimenzije dobivene slike su 1280×960 piksela. Svaka slika pohranjena je u memoriji termalne kamere i označena je rednim brojem. Dobivene slike prenesene su u računalo memorijskom karticom te su dalje obrađene u specijaliziranim programima preporučenim od strane proizvođača kamere.

Podatci mjerenja (termalne slike) obrađeni su programima Flir ResearchStudio i Flir ThermalStudio. Primjenom tih softvera izrađeni su grafovi distribucije temperature po presjeku alata te su određena područja vrijednosti maksimalne i minimalne temperature alata. Za analizu ovisnosti temperature alata o parametrima obrade (frekvenciji vrtnje i posmičnoj brzini), za alate TIP 1 i TIP 2 uzete su maksimalne temperature, dok je za alat TIP 3 napravljena analiza prosječnih temperatura alata. Razlog tomu je činjenica da su za alate TIP 1 i TIP 2 maksimalne temperature u graničnim vrijednostima koje kamera može izmjeriti. Maksimalne temperature se vrlo jednostavno i brzo očitaju primjenom softvera FLIR ResearchStudio za obradu termalnih slika. Međutim, u alatu TIP 3, zbog svojstava materijala od kojega je alat izrađen, došlo je do zagrijavanja s maksimalnim temperaturama većim od 130 °C, te ih kamera nije mogla izmjeriti. Naime, termalna kamera koja je korištena u eksperimentu, mjeri temperaturu u rasponu od –20 do 130 °C (Tablica 3). Pri mjerenju temperatura većih od 130 °C, kamera pokaže vrijednosti od 130,2 °C. Iz tog razloga, nije provedena analiza dobivenih maksimalnih temperatura u ovisnosti o parametrima obrade, već je izvršena analiza prosječnih temperatura po presjeku alata, na temelju koje je ispitivan utjecaj parametara obrade na temperaturu alata TIP 3. Za tu je analizu korišten program FLIR ResearchStudio. Na temelju dobivene termalne slike i izmjerene temperature za svaki piksel unutar ograničene površine program automatski proračunava srednje temperature. Na termalnoj slici mjereno je područje alata ograničeno s pravokutnikom čija je površina obuhvatila površinu alata do njegova prihvata (slika 32).

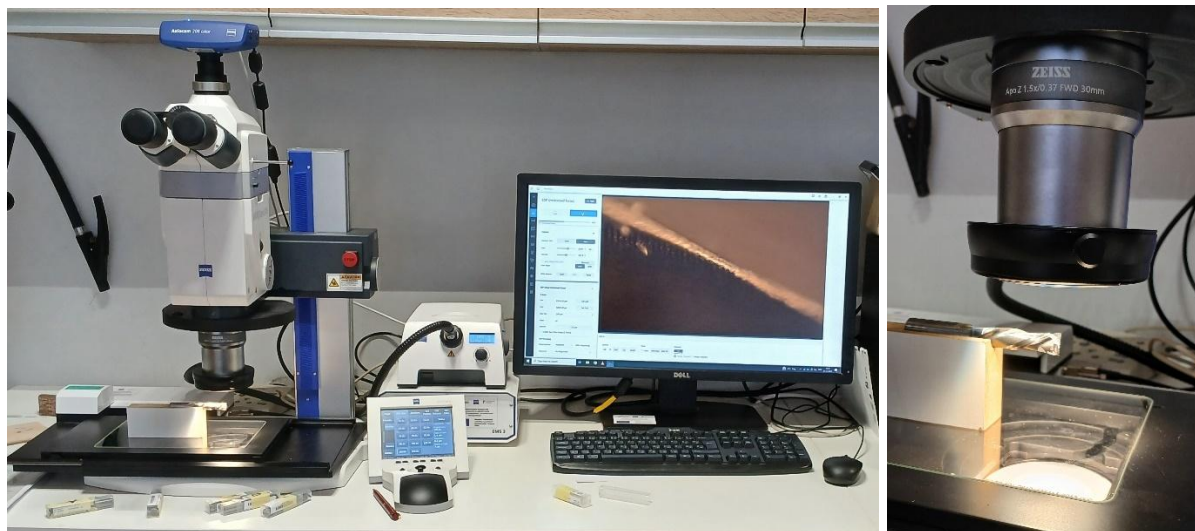


Slika 32. Termogram alata

U ograničenom području izračunata je prosječna temperatura za svaki red piksela po dužoj liniji pravokutnika. Temeljem tih temperatura izrađen je grafikon koji pokazuje kako se mijenja temperatura u području po promjeru alata. Na isti način izrađen je grafikon raspodjele temperature u alatu u smjeru osi rotacije alata, tako da je u svakom redu piksela po kraćoj liniji pravokutnika izračunana prosječna temperatura.

3.5.3. Mjerenje polumjera zaobljenosti oštrice

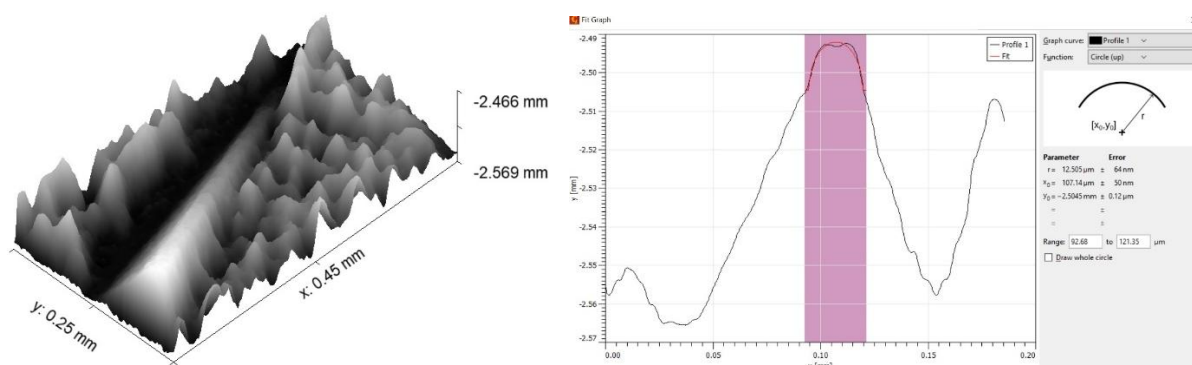
Polumjer zaobljenosti oštrice određen je snimanjem topografije oštrice alata mikroskopom ZEISS Axio Zoom V16 proizvođača Carl Zeiss Microscopy GmbH (München, Njemačka). Slika mikroskopa i načina mjerenja prikazani su na slici 33.



Slika 33. Mikroskop Zeiss V16

S obzirom na to da oštrice nisu idealno naoštrene te da različiti postupci izrade alata daju oštrice određenoga polumjera zaobljenosti, prije obrade je izmjeren početni polumjer zaobljenosti oštrice. Svim naknadnim mjerenjima pojedinih oštrica određen je utjecaj obrade na povećanje polumjera zaobljenosti oštrice. Topografija donje oštrice obuhvatila je područje oštrice duljine 45 μm koje je udaljeno od početka oštrice 4-5 mm, ovisno o tome koji je dio oštrice bio u zahvatu. Za gornju oštricu topografija je napravljena na udaljenosti 10-11 mm, gledano od vrha oštrice. Topografija je izrađena na dijelu oštrice koji je bio u zahvatu s drvom. Kada je oštrica u zahvatu s ljepilom dolazi do bržeg zatupljenja, tj. povećanja polumjera zaobljenosti oštrice, te ova područja nisu uzeta u obzir pri mjerenju. Kako bi se kvalitetno utvrdilo područje oštećeno obradom te kvalitetno

odredila topografija površine oštrice mjerenje je provedeno pri uvećanju mjernoga područja od 160 puta. Mjerenje gornje i donje oštrice jednoga noža alata izvedeno je uz pomoć posebno pripremljenih šablona za pozicioniranje alata u radno područje mikroskopa, kako bi se osiguralo da se mjerenje vrši na istoj udaljenosti od vrha oštrice. Zatim je elektromotornim sustavom mikroskopa, pomicanjem i izoštravanjem slike, odabrani odgovarajući dio oštrice postavljen u početni položaj za snimanje. Nakon toga, pokrenut je postupak slijednog snimanja fotografija automatski izoštravanih po dubini u dimenziji od $10\text{ }\mu\text{m}$ kako bi program iz tih fotografija izradio topografski model. Pri radu s mikroskopom korišten je softver ZEN lite, pomoću kojeg su snimljene fotografije topografskog modela. Izrađeni topografski model oštrice obrađen je u programu Gwyddion. Prvi je korak u obradi dobivenoga topografskoga modela filtriranje, kako bi se uklonile nepostojeće neravnine nastale aproksimacijom površine pri mjerenju i kako bi se model zagladio. Topografski model oštrice filtriran je Gausovim filterom, a izgled tako filtriranoga modela prikazan je slikom 34. Na prikazanome modelu, polumjer je izmjerena na 5 različitih mjesta, u jednakim razmacima po cijelome snimljenom topografskome modelu. Identičan postupak ponovljen je i za gornju oštricu koja je bila u zahvatu s drvom. U području zakrivljenja na oštrici, aproksimiran je polumjer, te je izmjerena njegova vrijednost. Izmjerene vrijednosti polumjera zaobljenosti oštrice za gornju i donju oštricu prvo su statistički uspoređene T-testom zavisnih uzoraka kako bi se utvrdilo postoji li statistička razlika između polumjera zatupljenosti gornje i donje oštrice. Prosječne vrijednosti polumjera zaobljenosti gornje i donje oštrice predstavljaju mjeru zatupljenosti oštrice za svako glodalo i svaku frekvenciju vrtnje te su predstavljale ulazne podatke za usporedbu zatupljenja alata pri različitim frekvencijama vrtnje alata.



Slika 34. Topografski model oštrice (lijevo) i način mjerenja polumjera zaobljenosti oštrice (desno)

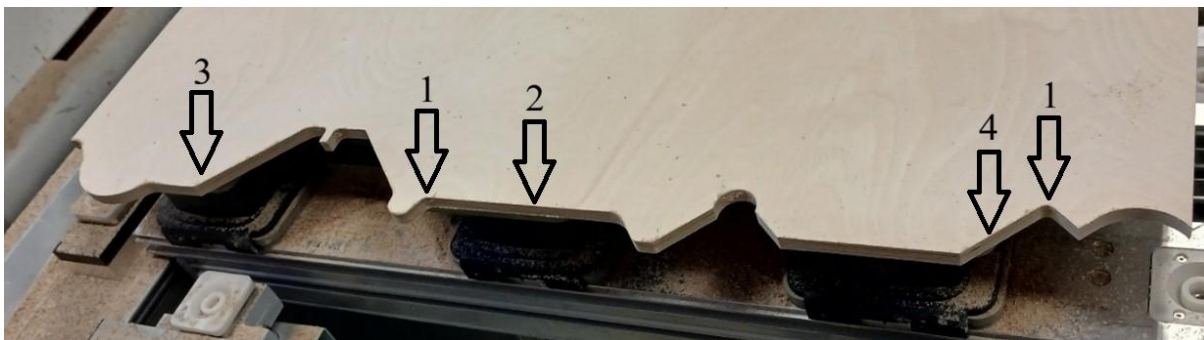
Širina područja aproksimacije radijusa ključna je za sljednost rezultata mjerenja i iznosila je 0,3 μm (širina označenog područja na grafu, slika 34)

3.5.4. Mjerenje kvalitete obrađene površine

U istraživanju je provedena i ocjena kvalitete obrađene površine rubova ploča uzoraka. Kvaliteta obrađene površine određena je metodom u skladu s normom ASTM D1666-17. Metodologija vizualne ocjene temelji se na bodovanju subjektivno odabranih svojstava obrađene površine. Početni korak provođenja ove metode određivanje je svojstava površine koja će se pratiti te postavljanje granica promatranih svojstava površine. Skala ocjenjivanja određena je u rasponu od 1 do 5, pri čemu je ocjena 5 dodijeljena kao ocjena za najbolje ostvarene vrijednosti, odnosno opisno je 5 – odličan, 4 – dobar, 3 – slab, 2 – loš, 1 – veoma loš. Za četiri promatrana svojstva površine dodijeljena je ocjena u skladu s njima postavljenim granicama:

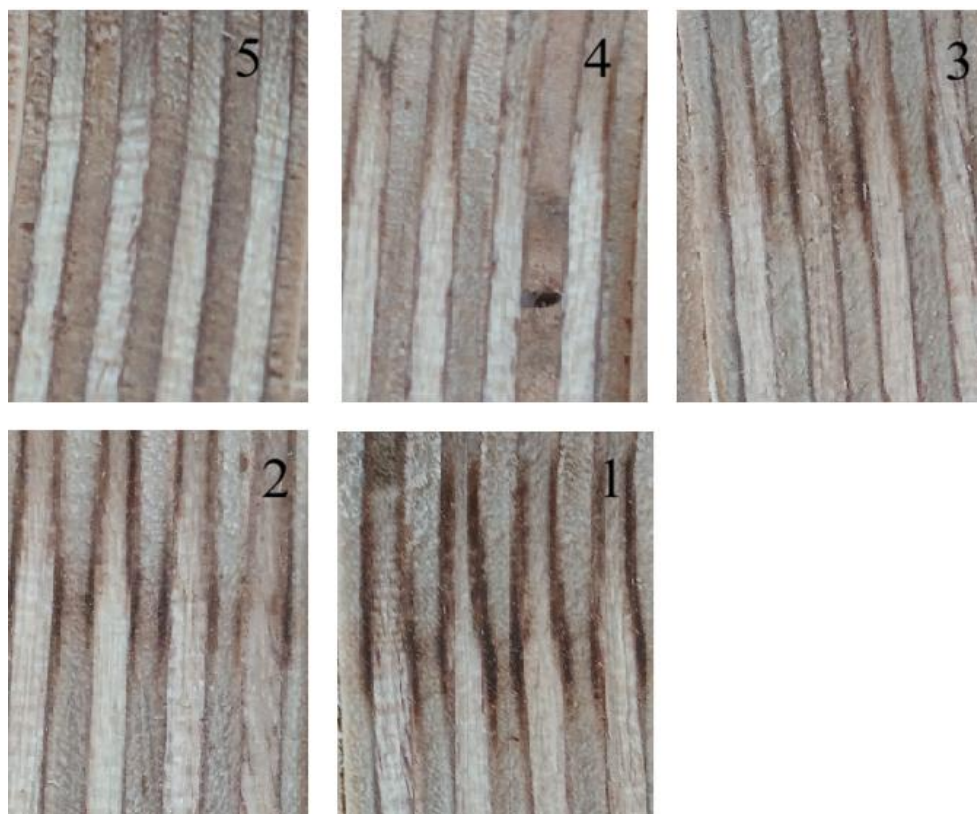
1. promjenu boje karakterističnu za pretjerano zagrijavanje materijala u dodiru s alatom
2. isprekidano pojavljivanje pukotina površine uz rub obrade karakteristično za cijepanje drva,
3. nepresječena drvena vlakna
4. valovitost karakterističnu kod obrade glodanjem (kružno gibanje oštrice alata uz njegov pomak).

Kvaliteta obrade ocjenjivana je na profilu obrade prikazanom na slici 35. Na slici su prikazana mjesta na kojima su ocjenjivana pojedina svojstva površine. Na naznačenim mjestima su najviše izražene pojedine karakteristike, te su iz tog razloga odabrana ta mjesta za ocjenu.



Slika 35. Profil obrade za mjerenje kvalitete površine

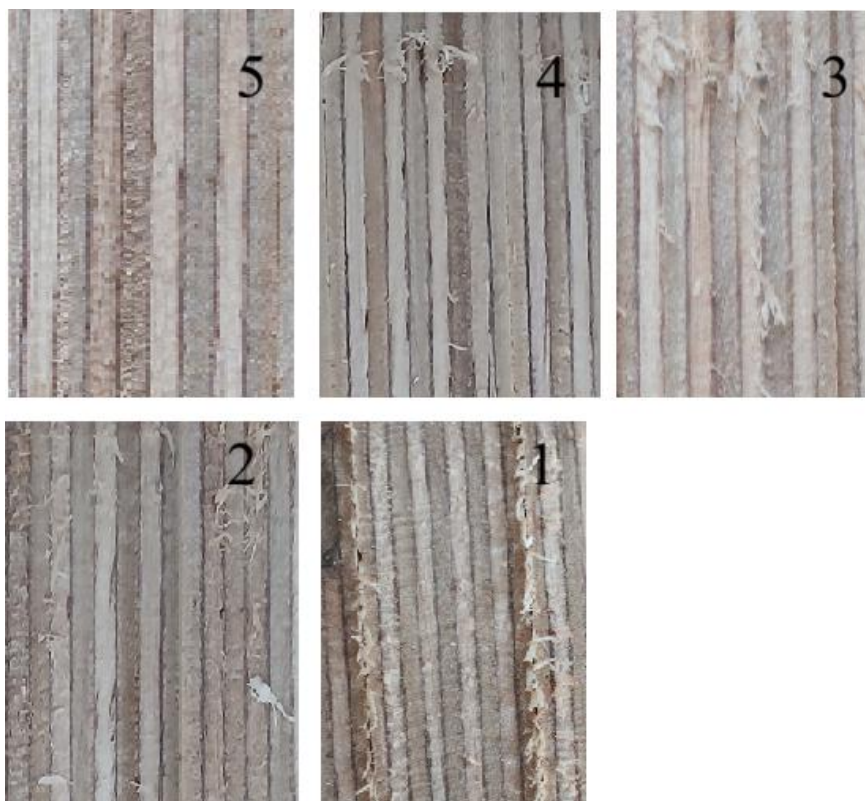
Dužina profila obrade iznosila je 1250 mm, te se profil sastojao od kombinacije krivolinijskih i pravolinijskih dijelova. Ovakvim oblikom nastojali smo simulirati procese u stvarnoj proizvodnoj obradi ploča, koja uglavnom nije pravolinijska. Granične vrijednosti pojedinih svojstava određene su po principu promatranja svih uzoraka među kojima su pronađeni oni s najlošijim i oni s najboljim površinama. Zatim su određene još tri podskupine, te je time utvrđen etalon za sva daljnja raspoređivanja uzoraka u svih pet skupina kvalitete. Za ocjenjivanje promjena boje određene su karakteristične površine za dodjeljivanje ocjena kvalitete prikazane na slici 36., etalon za ocjenjivanje isprekidanoga pojavljivanja pukotina prikazan je na slici 37., nedovoljno presječena vlakna na slici 38. i valovitost na slici 39. Pri ocjenjivanju kvalitete korištena je nešto izmijenjena tablica propisana normom ASTM D1666-17. Naime, standard je predvidio da se za ocjenjivanje kvalitete površine uzima 50 uzoraka, dok je u ovom istraživanju broj uzorka bio nešto manji (32 uzorka), a dodatno su u tablicu unesena i svojstva odabranih površina.



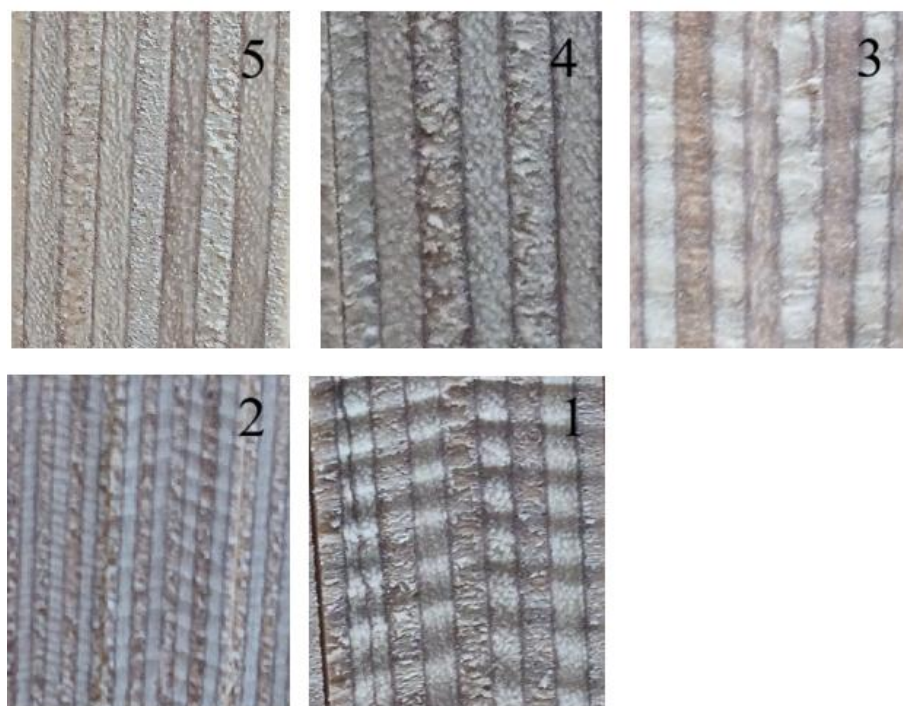
Slika 36. Etalon za ocjenjivanje promjene boje (paljevina)



Slika 37. Etalon za ocjenjivanje isprekidanog pojavljivanja pukotina



Slika 38. Etalon za ocenjevanje nedovoljno presječenih drvnih vlakana



Slika 39. Etalon za ocenjevanje valovitosti

3.6. Višekriterijska optimizacija parametara obrade

Optimizacijom parametara obrade nastoji se objektivno odrediti najbolja kombinacija parametara koja će minimizirati temperaturu alata, razinu emisije zvučnoga tlaka pri obradi i zatupljenje oštrice alata, a maksimizirati učinak obrade tj. posmičnu brzinu. U skladu s ciljem rada koji je postavljen, a kojim se nastojala istražiti mogućnost povećanja učinka obrade ili maksimalne duljine obrade optimiranjem izbora parametara obrade, povećanje učinka obrade stavljeno je kao prioritet. Pored povećanja učinka obrade izborom optimalnih parametara obrade cilj je sačuvati oštricu u dobrom stanju što dulje, kako bi kvaliteta obrade bila što bolja.

Količina materijala koju alat odstrani u jedinici vremena može se uzeti kao pokazatelj učinka obrade. S povećanjem posmične brzine povećava se i količina odstranjenoga materijala. Količina odstranjenog materijala u jedinici vremena računa se prema formuli:

$$Q = a \cdot b \cdot V_B \cdot 1000 \quad (\text{mm}^3/\text{min}) \quad (3.1.)$$

gdje je: Q - količina odstranjenog materijala u jedinici vremena (mm^3/min)

a – dubina obrade (mm)

b – širina obrade (mm)

V_B – posmična brzina (m/min)

Dubina i širina obrade bile su konstantne za sve kombinacije parametara obrade (frekvencije vrtnje i posmične brzine) i sva tri alata i iznosile su: dubina obrade 12 mm i širina obrade 12 mm). Iz toga proizlazi da je učinak obrade isključivo u funkciji povećanja posmične brzine.

Optimizacija parametara obrade izvršena je primjenom dviju metoda:

1. TOPSIS metoda
2. PSI TOPSIS modificirana metoda.

Svaka od metoda ima pozitivna i negativna svojstva te je cilj bio odrediti koja je od navedenih metoda prikladnija za ovo istraživanje.

Osnovni nedostatak TOPSIS metode subjektivno je određivanje težinskih vrijednosti zavisnih varijabli koje se razmatraju, te je moguće napraviti grešku u odabiru težinskih faktora. TOPSIS metoda ima prednosti kod preferencije donošenja odluke, tj. kada se želi pojačati neki kriterij u odnosu na drugi. Modificirana PSI TOPSIS metoda predstavlja nadograđenu standardnu PSI

TOPSIS metodu. Kod ove metode težinski faktori zavisnih varijabla određuju se objektivno putem proračuna. Na ovaj način eliminira se greška pri dodjeljivanju težinskih faktora.

3.6.1. TOPSIS metoda

Metoda *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) jedna je od metoda višekriterijskog odlučivanja. Ova metoda veoma je provjerena u praksi i zasniva se na matematičkome modelu (Pavić i Novoselac, 2013). Metoda se zasniva na formiranju dvaju rješenja, tj. prvo rješenje koje je idealno pozitivno prema svim kriterijima, a drugo je idealno negativno. Najbolja kombinacija je ona koja je najbliža idealno pozitivnome rješenju, a ujedno i najudaljenija od idealno negativnoga rješenja (Opricovic i Tzeng, 2004; Ozturk i Batuk, 2011). TOPSIS metoda pretpostavlja da svaki kriterij teži da monotonno raste ili opada.

Prednosti ove metode su (Kropivšek i dr., 2021; Madanchian i Taherdoost, 2023):

- mogućnost analiziranja velikoga broja kriterija i alternativa
- mogućnost predstavljanja ljudskog izbora
- brza i jednostavna upotreba
- brzo donošenje odluka.

Nedostatci korištenja ove metode su (Madanchian i Taherdoost, 2023):

- preklapanje informacija može utjecati na rezultat
- točno definiranje težinskog faktora
- osjetljivost na promjenu težine kriterija.

Primjena TOPSIS metode sastoji se od nekoliko koraka (Sulaiman i dr., 2024)

1. Izrada matrice odlučivanja

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{i1} & y_{i2} & \cdots & y_{ij} \end{pmatrix} \quad (3.2.)$$

gdje je:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (3.3.)$$

x_{ij} – izvedba svake alternative A_i , za svaki kriterij C_j

2. Izrada normalizirane matrice

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{i1} & v_{i2} & \cdots & v_{ij} \end{pmatrix}$$

gdje je:

$$v_{ij} = W_j \cdot y_{ij} \quad (3.4.)$$

3. Određivanje idealnoga pozitivnoga i idealno negativnoga rješenja

$$A^+ = [v_1^+ \quad v_2^+ \cdots v_J^+] \quad (3.5.)$$

$$A^- = [v_1^- \quad v_2^- \cdots v_J^-]$$

$$v_j^+ = \max \text{ ili } \min(v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{ij}) \quad (3.6.)$$

$$v_j^- = \max \text{ ili } \min(v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{ij})$$

4. Određivanje udaljenosti od idealno pozitivnoga i idealno negativnoga rješenja:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (3.7.)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (3.8.)$$

5. Određivanje relativne blizine idealnome rješenju:

$$V_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (3.9.)$$

6. Rangiranje alternativa na osnovi vrijednosti relativne blizine idealnome rješenju u rasponu od 0 do 1. Kada V_i ima vrijednosti 1, alternativa je jednaka idealnome pozitivnome rješenju, a ako je vrijednost 0 jednaka je idealno negativnome rješenju.

3.6.2. PSI TOPSIS metoda

Primjena PSI TOPSIS metode sastoji se od 13 koraka (Begić-Hajdarević i dr., 2024):

1. Određivanje skupova eksperimentalnih pokusa (alternativa):

$$E = [E_1, E_2, \dots, E_m], \quad (3.10.)$$

gdje je m broj eksperimenata.

2. Određivanje kriterija

$$C = [C_1, C_2, \dots, C_n] \quad (3.11.)$$

gdje je n broj kriterija.

3. Kreiranje matrice odluka:

$$D = [D_{ij}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n] \quad (3.12.)$$

gdje je D_{ij} vrijednost j -tog kriterija za i -ti broj eksperimenata:

4. Proračun normalizirane matrice:

a) ako je veće bolje (LB)

$$N_{ij} = \frac{D_{ij}}{D_j^{\max}}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (3.13.)$$

b) ako je manje bolje (SB):

$$N_{ij} = \frac{D_j^{\min}}{D_{ij}}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (3.14.)$$

5. Proračun srednje vrijednosti normalizirane matrice:

$$N_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m N_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (3.15.)$$

6. Proračun vrijednosti varijacija preferencija:

$$\varphi_j = \sum_{i=1}^m [N_{ij} - N_j]^2, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (3.16.)$$

7. Proračun odstupanja u preferiranoj vrijednosti:

$$\Delta_j = \left\{ 1 - \sum_{i=1}^m [N_{ij} - N_j]^2 \right\}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (3.17.)$$

8. Određivanje težinskih faktora svakog kriterija:

$$p_j = \frac{\Delta_j}{\sum_{j=1}^n \Delta_j}, j = 1, 2, \dots, n; \sum_{j=1}^n p_j = 1 \quad (3.18.)$$

9. Stvaranje normalizirane matrice odlučivanja:

$$w_{ij} = p_j \times N_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (21) \quad (3.19.)$$

10. Određivanje idealnog pozitivnoga (PS) i negativnog rješenja (NS):

$$PS = [w_1^+, \dots, w_j^+, \dots, w_n^+] \quad (3.20.)$$

$$w_j^+ = \begin{cases} \max w_{ij}, j \in LB \\ \min w_{ij}, j \in SB \end{cases}, j = 1, 2, \dots, n \quad (3.21.)$$

$$NS = [w_1^-, \dots, w_j^-, \dots, w_n^-] \quad (3.22.)$$

$$w_j^- = \begin{cases} \min w_{ij}, j \in LB \\ \max w_{ij}, j \in SB \end{cases}, j = 1, 2, \dots, n \quad (3.23.)$$

11. Određivanje razmaka između eksperimentalnih vrijednosti i idealnog rješenja:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (w_{ij} - w_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3.24.)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (w_{ij} - w_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3.25.)$$

12. Proračun vrijednosti indeksa blizine:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3.26.)$$

13. Rangiranje najbližih indeksiranih vrijednosti u padajućem redoslijedu (Begić-Hajdarević i dr., 2024.)

Modificirana metoda PSI TOPSIS korištena u radu razlikuje se od standardne PSI TOPSIS metode koja je opisana kroz prethodnih 13 koraka. Modifikacija je napravljena u proračunu normalizirane matrice i to (Pašić i dr., 2024):

$$N_{ij} = \frac{D_{ij} - D_j^{\min}}{D_j^{\max} - D_j^{\min}}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (3.27.)$$

D_{ij} – vrijednost j -tog kriterija za i -tu alternativu

m – broj alternativa

n – broj kriterija

Pri tome je srednja vrijednost normalizirane matrice određena s:

$$N_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m N_{ij} \quad (3.28.)$$

Težinski faktor pojedinačnih kriterija računa se kao:

$$w_j = \frac{\Delta_j}{\sum_{j=1}^n \Delta_j} \quad (3.29.)$$

gdje je:

$$\Delta_j = \left[1 - \sum_{i=1}^m (N_{ij} - N_j)^2 \right], \sum_{j=1}^m p_j = 1 \quad (3.30.)$$

Težinska matrica računa se prema:

$$W_{ij} = w_j \times N_{ij} \quad (3.31.)$$

Idealno pozitivno rješenje (W_j^+) i idealno negativno rješenje računa se kao:

$$W_j^+ = \left\{ \left(\max W_{ij}; j \in L \right) \right\}, \left(\min W_{ij}; j \in S \right), j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.32.)$$

$$W_j^- = \left\{ \left(\min W_{ij}; j \in L \right) \right\}, \left(\max W_{ij}; j \in S \right), j = 1, 2, 3, \dots, n$$

Najbliži koeficijent za svaki kriterij računa se prema formuli:

$$C_i = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n (W_{ij} - W_j^-)^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (W_{ij} - W_j^+)^2} + \sqrt{\sum_{j=1}^n (W_{ij} - W_j^-)^2}}, i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (3.33.)$$

Optimizacija primjenom TOPSIS metode napravljena je s dva ulazna parametra (frekvencija vrtnje, posmična brzina), i četiri izlazna parametra (razina zvučnoga tlaka, temperatura alata, učinak obrade, polumjer zaobljenosti oštrice). Izlaznim parametrima dodijeljeni su jednaki težinski faktori od 25 %, kako bi svaki izlazni parametar imao jednak utjecaj na ulazne parametre. Isti težinski faktori dodijeljeni su za sva tri tipa alata. Izlazni parametri (osim učinka obrade) dobiveni su mjerenjem u fazi 2. eksperimentalnog dijela dok je učinak obrade (količina odstranjenoga materijala u jedinici vremena) izračunata na osnovu izraza (3.1). Optimizacijom je dobivena najbolja kombinacija ulaznih parametara (frekvencije vrtnje i posmične brzine) kojima se minimizira razina zvučnoga tlaka, temperatura alata, te polumjer zatupljenosti oštrice, a maksimizira učinak obrade (količina odstranjenog materijala u jedinici vremena). Optimizacija je napravljena za svaki tip alata, tj. alat nije uzet kao ulazni parametar.

Modificiranom PSI TOPSIS metodom optimizacija je napravljena s istim ulaznim i izlaznim parametrima kao i TOPSIS metodom. Ova metoda proračunava i dodjeljuje težinske faktore izlaznim varijablama, te su težinski faktori bili sljedeći:

- Alat TIP 1 – temperatura 9,99 %, razina zvučnoga tlaka 6,45 %, polumjer zaobljenosti oštrice 30,74 %, brzina obrade 52,88 %.
- Alat TIP 2 – temperatura 13,54 %, razina zvučnoga tlaka 1,02 %, polumjer zaobljenosti oštrice 14,04 %, brzina obrade 71,41 %.
- Alat TIP 3 – temperatura 6,59 %, razina zvučnoga tlaka 7,05 %, polumjer zaobljenosti oštrice 15,63 %, brzina obrade 70,74 %.

3.7. Statistička obrada podataka

Statistička obrada podataka napravljena je u programu TIBCO Statistica 13.0. Dvofaktorska analiza varijance (ANOVA) s interakcijom primijenjena je kako bi se usporedili rezultati dobiveni mjerenjem razine zvuka, temperature i polumjera zaobljenosti oštrice grupirani prema vrstama glodala i vrstama prihvata. Tukeyjev test primijenjen je ako je analiza varijance pokazala da između grupa postoji statistički značajna razlika. T-test zavisnih uzoraka primijenjen je za usporedbu različitih skupina uzoraka. Regresijska analiza primijenjena je za obradu rezultata razina zvučnoga tlaka i temperature alata u ovisnosti o duljini obrade. Korelacijska analiza primijenjena je za usporedbu razina zvučnoga tlaka, temperature alata i polumjera zaobljenosti oštrice u ovisnosti o duljini obrade. Rezultati mjerenja prikazani su uz deskriptivnu statistiku. Podaci su grafički prikazani pomoću različitih grafikona, koji su crtani u programima TIBCO Statistica, te programu MS Excel. Rezultati su prikazani s 95 %-tnom točnošću.

§ 4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Analiza utjecaja vrste držača alata na razinu zvučnoga tlaka

U tablici 10. dana je deskriptivna statistika rezultata mjerenja razine zvučnoga tlaka pri glodanju furnirskoga uslojenog drva s glodalom TIP 1 uz primjenu tri vrste držača alata i pet različitih frekvencija vrtnje alata, a u tablici 11. dani su rezultati dvofaktorske ANOVA analize rezultata mjerenja.

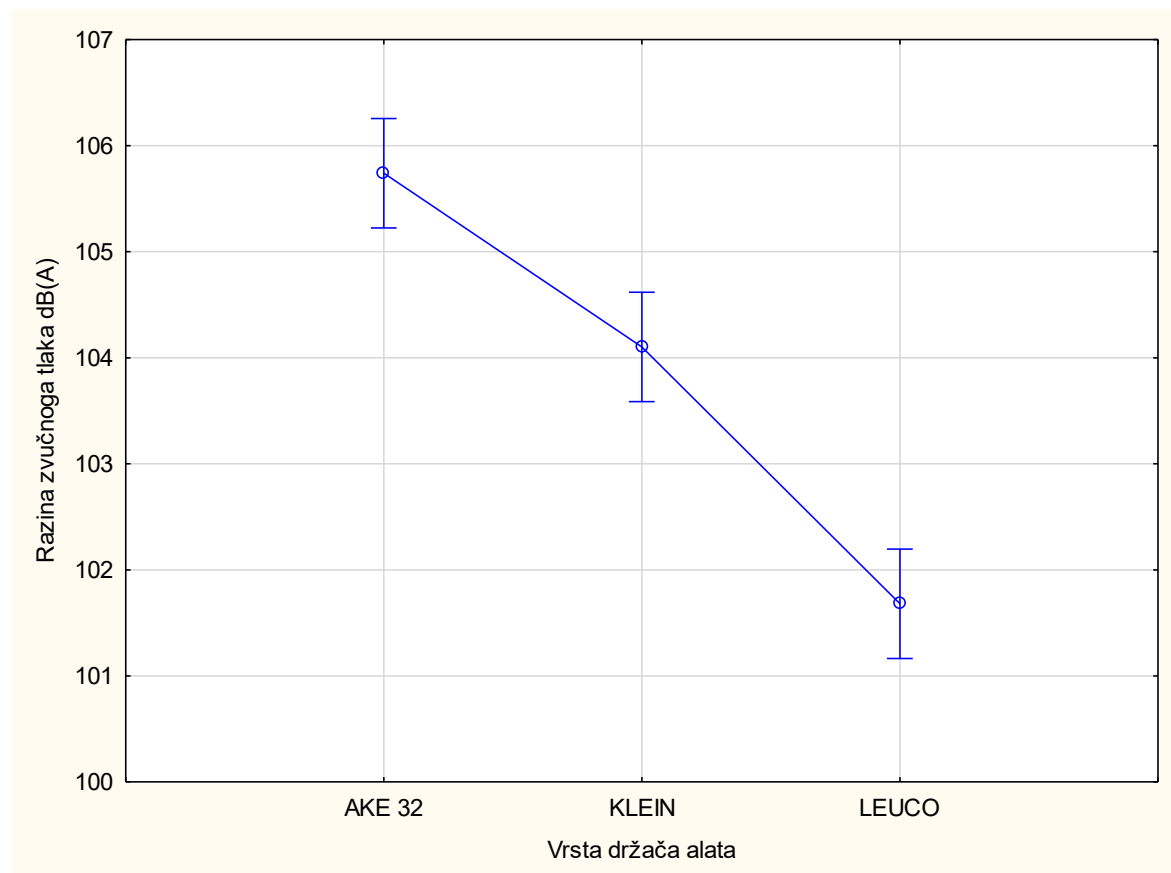
Tablica 10. Deskriptivna statistika utjecaja vrste držača i frekvencije vrtnje alata na razinu zvučnoga tlaka pri glodanju furnirskoga uslojenog drva s alatom TIP 1

Izvor varijacije	Razina faktora	Razina faktora	<i>N</i>	Razina zvučnoga tlaka dB(A) Aritmetička srednja vrijednost	Razina zvučnoga tlaka dB(A) Standardna devijacija	Razina zvučnoga tlaka dB(A) Standardna pogreška
Ukupno			780	103,84	4,98	0,17
Držač	AKE 32		260	105,74	4,42	0,27
Držač	KLEIN		260	104,10	4,73	0,29
Držač	LEUCO		260	101,68	4,93	0,30
Frekvencija vrtnje	14 000		156	102,61	4,53	0,36
Frekvencija vrtnje	16 000		156	104,01	4,50	0,36
Frekvencija vrtnje	18 000		156	104,64	5,16	0,41
Frekvencija vrtnje	20 000		156	105,68	4,59	0,36
Frekvencija vrtnje	22 000		156	102,23	5,30	0,42
Držač × frekvencija	AKE 32	14 000	52	101,30	4,38	0,60
Držač × frekvencija	AKE 32	16 000	52	105,78	2,78	0,38
Držač × frekvencija	AKE 32	18 000	52	108,99	3,67	0,51
Držač × frekvencija	AKE 32	20 000	52	106,82	3,94	0,54
Držač × frekvencija	AKE 32	22 000	52	105,78	3,37	0,46
Držač × frekvencija	KLEIN	14 000	52	103,44	3,22	0,44
Držač × frekvencija	KLEIN	16 000	52	105,89	3,90	0,54
Držač × frekvencija	KLEIN	18 000	52	103,12	4,19	0,58
Držač × frekvencija	KLEIN	20 000	52	107,50	4,03	0,55
Držač × frekvencija	KLEIN	22 000	52	100,54	5,01	0,69
Držač × frekvencija	LEUCO	14 000	52	103,09	5,48	0,76
Držač × frekvencija	LEUCO	16 000	52	100,38	4,28	0,59
Držač × frekvencija	LEUCO	18 000	52	101,80	4,49	0,62
Držač × frekvencija	LEUCO	20 000	52	102,73	4,32	0,60
Držač × frekvencija	LEUCO	22 000	52	100,38	5,46	0,75

Tablica 11. Utjecaj vrste držača i frekvencije vrtnje i njihove interakcije na razinu zvučnoga tlaka i rezultati post hoc Tukey testa

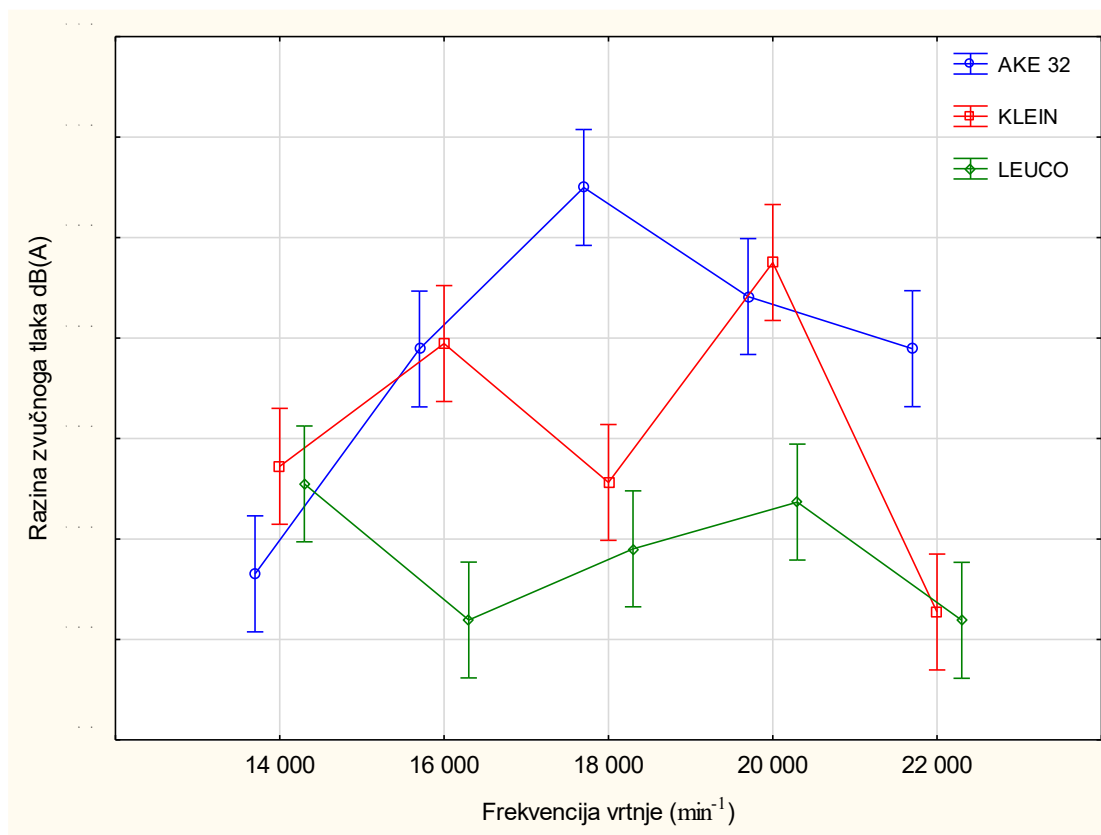
Izvor varijacije	<i>SS</i>	Stupanj slobode	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	Tukey test
Držač	2169	2	1085	60,4	0,00	(1)(2) (3)
Frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	1272	4	318	17,7	0,00	(1,5)(2,3)(3,4)
Držač × frekvencija	2199	8	275	15,3	0,00	
Pogreška	13 738	765	18			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						

Na razinu zvučnoga tlaka statistički signifikantno utječe vrsta držača (slika 40). Tako su pri istim parametrima frekvencije vrtnje alata i istim prosječnim posmičnim brzinama izmjerene različite vrijednosti razine zvučnoga tlaka za različite vrste držača. Na osnovu rezultata iz tablice 11, a na osnovu vrijednosti F vidimo da vrsta držača značajnije utječe na razinu zvučnoga tlaka nego frekvencija vrtnje.



Slika 40. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razina zvučnoga tlaka u ovisnosti o vrsti držača

Pri uporabi različitih držača glodala izmjerene su statistički značajne vrijednosti razina zvučnoga tlaka. Najmanja razina zvučnoga tlaka emitirana je pri upotrebi držača LEUCO. Rezultati analize podataka dvofaktorskom ANOVA-om s interakcijom (slika 41) pokazuju statistički značajnu interakciju između frekvencije vrtnje i vrste držača na razinu zvučnoga tlaka, što znači da promjena frekvencije vrtnje različito utječe na razinu zvučnoga tlaka ovisno o vrsti držača.



Slika 41. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i vrsti držača

Držačem AKE s čahurom OZ25 pri frekvenciji vrtnje od $22\,000\text{ min}^{-1}$ i $20\,000\text{ min}^{-1}$, nije došlo do aktiviranja senzora vibracije. Smanjenjem frekvencije vrtnje povećan je posmak po oštrici alata, a time i opterećenje pri obradi što utječe na pojavu vibracija, međutim senzor vibracija nije se aktivirao niti dodatnim smanjenjem frekvencije vrtnje na $18\,000\text{ min}^{-1}$. Međutim, povećanje posmaka po zubu uzrokovalo je značajno opterećenje alata u obradi te je izazvalo lom glodala. Zbog pojave loma glodala dalje istraživanje s ovim držačem nije nastavljeno.

Na temelju mjernih rezultata svih držača prikazanih dijagramom na slici 40. utvrđeno je da upotreba LEUCO držača uzrokuje najmanju ukupnu razinu zvučnoga tlaka, koja je statistički signifikantno manja u odnosu na ostala dva držača. Prema istraživanju Vitcheva i dr. (2019) emitirana razina zvučnoga tlaka u izravnoj je vezi s vibracijama alata, tj. što su veće vibracije, veća je razina emitiranog zvuka. Nemec i dr. (2017) pokazali su da su vibracije i kvaliteta obrađene površine međusobno povezani, tj. s porastom vibracija, raste i hrapavost obrađene površine. Stoga bi, s aspekta emisije zvuka LEUCO držač bio najbolji odabir. Međutim, potrebno je uzeti u obzir

i ekonomski čimbenik vrijednosti držača. Usporedba tržišne vrijednosti LEUCO prihvata u odnosu na druga dva držača te njegove velike dimenzije znatno umanjuju njegovu prikladnost upotrebe. Zbog toga je za provedbu daljnjih istraživanja izabran držač KLEIN, s čijom je primjenom izmjerena nešto veća razina zvučnoga tlaka nego pri glodanju s primjenom LEUCO držača.

4.2. Analiza utjecaja parametara obrade na temperaturu alata

Temperatura oštrice alata je uz udarna opterećenja u materijal, najutjecajniji čimbenik povećanja polumjera zaobljenosti oštrice jer utječe na smanjenje mehaničkih svojstava materijala alata u kontaktu s obratkom. Veliki dio topline razvija se kao izravna posljedica energije loma koju je potrebno utrošiti na mehaničko razdvajanje strugotine od osnovne strukture materijala koji se obrađuje. Što je energija loma veća, potrebna je veća energija za prodiranje oštrice alata u materijal. Osim energije loma, drugi veliki utjecaj na razvoj topline ima trenje uzrokovano kontaktom strugotine s materijalom alata. Što je više materijala potrebno odstraniti u jedinici vremena, potrebna je veća energija rezanja. Treći je očekivani izvor razvoja temperature u alatu titranje vlastitih molekula koje nastaje kao posljedica konstantnih deformacija alata uslijed njegovih vibracija za vrijeme obrade. S obzirom na tri glavna uzroka porasta temperature, može se očekivati da će povećanje brzine rezanja najviše pridonijeti porastu energije rezanja, dok će povećanje posmaka po zubu uzrokovati povećanje količine materijala koji je u jedinici vremena potrebno odstraniti iz zahvata. Zbog kružnoga gibanja oštrice i konstantnog udaranja u materijal, povećanje brzine rezanja i povećanje posmaka po zubu, povećavat će i vibraciju alata u obradi. Međutim, to nisu jedini čimbenici pojave vibracija, naime, povećanju vibracija doprinosi i neujednačena struktura građe drva koja nepredvidivo mijenja opterećenje oštrica alata.

Posljedica ovih povećanja jasno je uočena u prvoj fazi istraživanja gdje je primijećeno kako je porast vibracija toliko snažan da u određenim slučajevima izazove prekoračenja čvrstoće tijela alata i uzrokuje njegov lom iako te vibracije nisu bile dovoljno velike da negativno djeluju na elemente konstrukcije glavnoga vretena stroja. Zbog istoga mehaničkoga razloga, mala dimenzija alata nije mogla podržati toliko velike iznose ukupnih sila rezanja koje bi uzrokovale porast potrebe za snagom glavnoga vretena i aktiviranje sigurnosnoga mehanizma za preopterećenje agregata.

4.2.1. Temperatura spiralnog glodala s kontinuiranim oštricama (TIP 1)

Deskriptivna statistika rezultata mjerenja (tablica 12) zajedno s rezultatima dvofaktorske ANOVA analize i rezultatima Tukey-testa (tablica 13) pokazuje utjecaj frekvencije vrtnje alata i posmične brzine na maksimalnu temperaturu alata. Rezultati dvofaktorske ANOVA-e prikazani su na slikama 42. i 43.

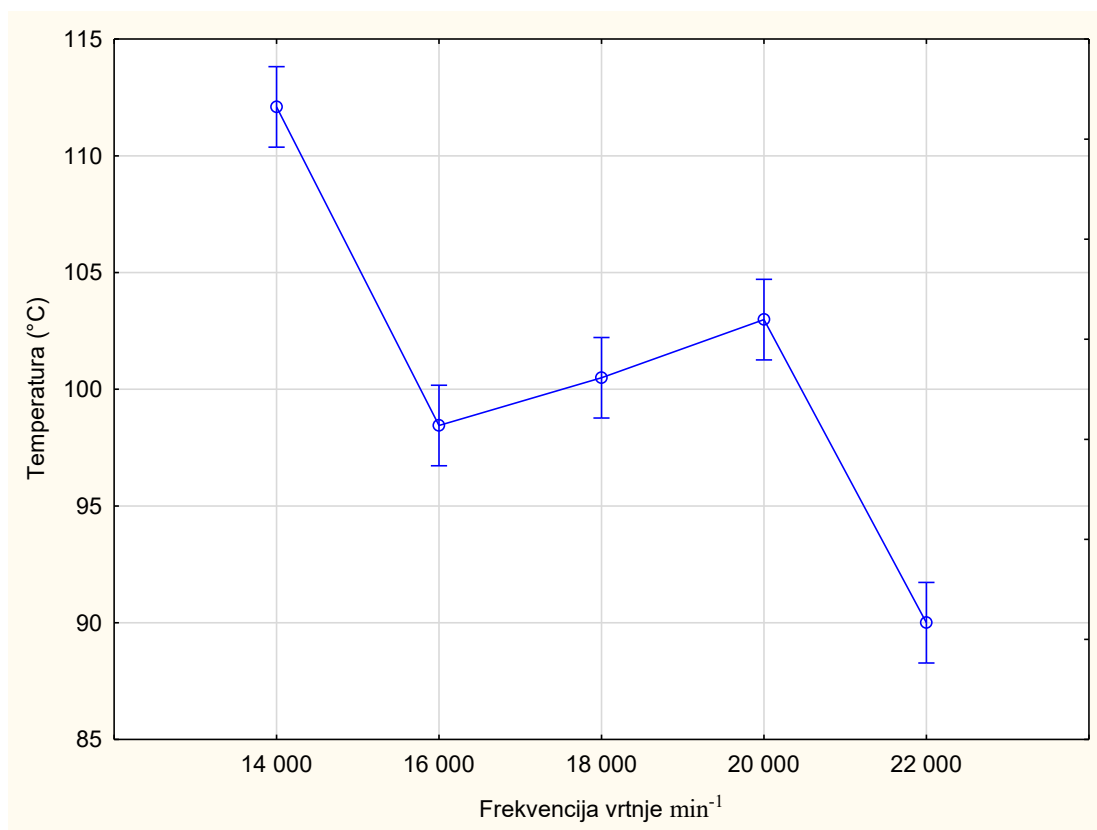
Tablica 12. Srednje vrijednosti, standardne devijacije i standardne pogreške maksimalne temperatura alata TIP 1 u ovisnosti o parametrima obrade

Izvor varijacije	Razina faktora	Razina faktora	N	Temperatura (°C) Aritmetička srednja vrijednost	Temperatura (°C) Standardna devijacija	Temperatura (°C) Standardna pogreška
Ukupno			300	100,80	10,56	0,60
Frekvencija vrtnje	14 000		60	112,09	9,88	1,27
Frekvencija vrtnje	16 000		60	98,45	8,66	1,11
Frekvencija vrtnje	18 000		60	100,49	6,92	0,89
Frekvencija vrtnje	20 000		60	102,98	6,96	0,89
Frekvencija vrtnje	22 000		60	90,00	6,10	0,78
Posmična brzina	15		150	97,44	9,04	0,73
Posmična brzina	25		150	104,16	10,92	0,89
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	14 000	15	30	106,17	7,28	1,32
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	14 000	25	30	118,01	8,56	1,56
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	16 000	15	30	92,72	6,33	1,15
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	16 000	25	30	104,18	6,68	1,22
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	18 000	15	30	97,87	6,60	1,20
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	18 000	25	30	103,11	6,31	1,15
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	20 000	15	30	102,29	6,92	1,26
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	20 000	25	30	103,67	7,05	1,28
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	22 000	15	30	88,14	4,40	0,80
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	22 000	25	30	91,85	7,01	1,28

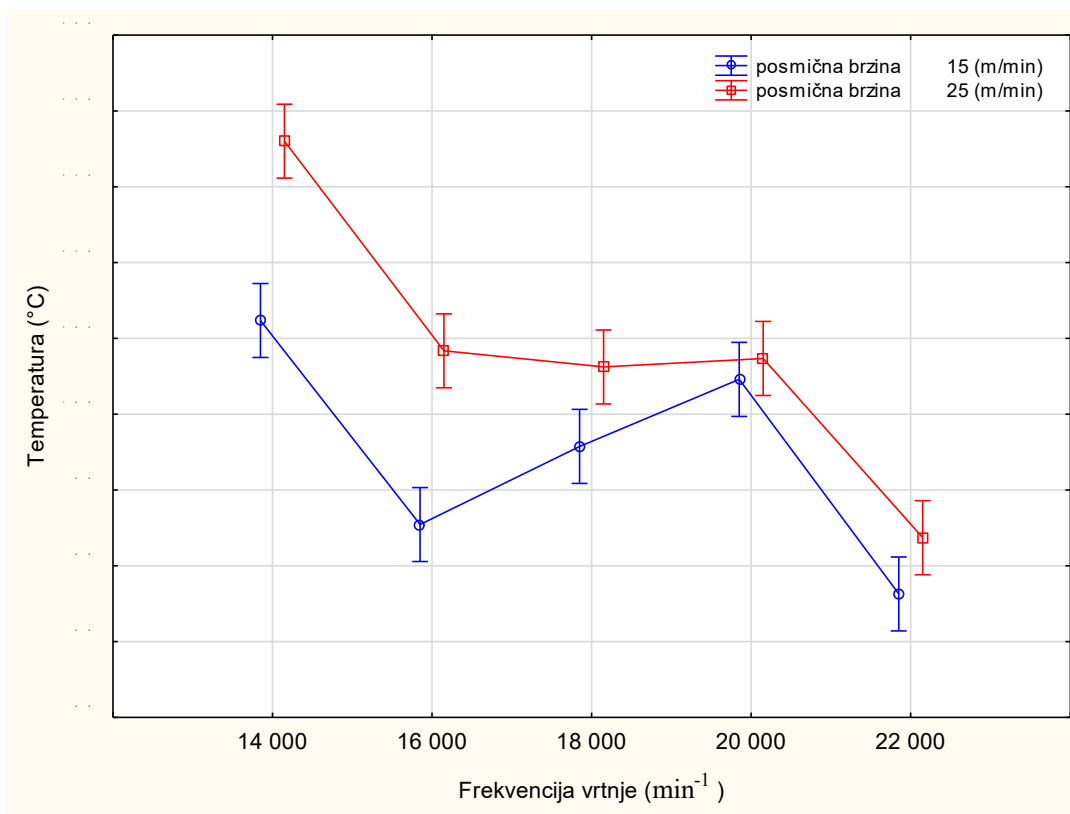
Tablica 13. Utjecaj frekvencije vrtnje i posmične brzine na maksimalnu temperaturu alata TIP 1 i rezultati Tukey testa

Izvor varijacije	<i>SS</i>	Stupanj slobode	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	Tukey test
Frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	15300	4	3818	82,80	0,00	(1)(2,3)(3,4)(5)
Posmična brzina (m/min)	3392	1	3392	73,60	0,00	
Frekvencija × posmična brzina	1326	4	331	7,20	0,00	
Pogreška	13369	290	46			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade pri $p < 0,05$						

Pri različitim frekvencijama vrtnje javlja se statistički značajna razlika u maksimalnim temperaturama alata, a rezultati Tukey testa prikazani su tablicom 13. Frekvencije vrtnje ima značajniji utjecaj na maksimalnu temperature alata nego posmična brzina, jer je F vrijednost za frekvenciju vrtnje veća nego za posmičnu brzinu (tablica 13).



Slika 42. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperatura alata TIP 1 izmjerene pri različitim frekvencijama vrtnje alata



Slika 43. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperature alata TIP 1 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i posmičnoj brzini

Povećanje posmične brzine uzrokuje statistički signifikantno povećanje temperature pri glodanju furnirskoga uslojenog drva breze s glodalom TIP 1 (tablica 13, slika 43). Porast temperature pri povećanju posmične brzine s prosječnih 15 m/min na 25 m/min iznosi 5-11 %. Ključni faktor koji utječe na porast temperature jest snaga rezanja. Povećanjem posmične brzine raste i snaga rezanja (Ispas i dr., 2016) koja se najvećim dijelom pretvara u toplinu u zoni rezanja koja se dalje prenosi na alat i strugotinu. Toplinska vodljivost drva je manja nego toplinska vodljivost alata te se najveći dio topline iz zone rezanja prenosi na alat. S povećanjem posmične brzine smanjuje se vrijeme odvođenja topline iz zone rezanja, što uzrokuje povećanje temperature alata. Istraživanja (Pei i dr., 2016) pokazuju da posmična brzina predstavlja jedan od značajnih čimbenika koji utječu na temperaturu alata pri glodanju drva. Istraživanje Jia i Zhua (2025) pokazalo je identične rezultate kao u ovom istraživanju, tj. da s povećanjem posmične brzine, raste i temperatura alata. Istraživanja (Igaz i dr., 2019; Zhang i dr, 2021), pokazala su suprotno, tj. povećanjem posmične brzine temperatura alata se smanjivala. Nekoliko čimbenika mogu se navesti kao uzrok ove suprotnosti u dobivenim rezultatima. Ta su istraživanja provedena pri nižim posmičnim brzinama

(1 – 6 m/min) pri čemu su posmične brzine bile konstantne. Rezultati prikazani na slici 42. dobiveni su pri posmičnim brzinama koje su višestruko veće (10 – 30 m/min) te je posmična brzina bila promjenjiva, tj. pri obradi je posmična brzina konstantno rasla. Zbog tih razloga, rezultati ovih istraživanja ne mogu se u potpunosti uspoređivati.

Slika 43. pokazuje statistički signifikantnu interakciju između frekvencije vrtnje i posmične brzine, što znači da frekvencije vrtnje alata nema isti utjecaj na maksimalne temperature alata pri različitim posmičnim brzinama. Pri nižim frekvencijama vrtnje ($14\,000 - 18\,000\text{ min}^{-1}$), interakcija pokazuje statistički značajnu razliku, dok pri višim frekvencijama vrtnje interakcija ne pokazuje statistički značajnu razliku. Tijekom procesa obrade, alat je izložen visokim mehaničkim pritiscima i visokim temperaturama (Trzepieciński i dr., 2025). Toplina nastaje u zoni rezanja te se dalje prenosi na materijal, alat i strugotinu. Toplina u zoni rezanja nastaje zbog plastične deformacije u zoni rezanja te zbog trenja između alata i materijala koji se obrađuje (Yu i dr., 2023). Prekomjerna toplina slabi strukturu materijala alata, što uzrokuje plastičnu deformaciju u području ruba oštrice alata. (Zhang i dr., 2019; Warcholinski i Gilewicz, 2022). Plastična deformacija uzrokuje povećanje polumjera oštrice. Plastična deformacija može se pojaviti u obliku savijanja oštrice duž ruba oštrice ili u obliku tlačne deformacije duž boka oštrice. Pri obradi drva strugotina klizi preko površine alata te se trenje transformira u temperaturu (Csanady i Magoss, 2020). Temperatura alata važan je čimbenik, jer svojstva materijala od kojih je alat izrađen, poput tvrdoće, žilavosti i kemijske stabilnosti, opadaju s porastom temperature (Ahmad i dr., 2003). Toplina koja se stvara u zoni glodanja odvodi se na različite načine. Toplinski tok prenosi se na alat i na obradak proporcionalno njihovoj toplinskoj vodljivosti, a inverzno njihovoj toplinskoj difuzivnosti (Csanady i Magoss, 2020). Toplinska vodljivost drva dosta je niža u odnosu na metal, te se toplina koja se razvija pri procesu obrade vrlo malo prenosi na drvo, a većim se dijelom prenosi na alat i strugotinu. Zbog toga, pri obradi drva, dolazi do značajnog zagrijavanja alata. Istraživanjima je utvrđeno da temperatura rezne oštrice ovisi o nekoliko različitih čimbenika koji uključuju brzinu rezanja, posmičnu brzinu, kontinuitet procesa glodanja, dubinu glodanja, te materijale alata i obratka (Ahmad i dr., 2003).

Osnovni čimbenici o kojima ovisi temperatura alata su debljina strugotine i snaga rezanja. Smanjenjem frekvencije vrtnje alata povećava se zahvat po zubu glodala, čime se istodobno povećava i debljina strugotine. Povećanjem debljine strugotine – strugotina dolazi u ravniji i dulji kontakt s površinom alata, pritom primjenjujući veću silu. To utječe na stvaranje veće količine

topline, koja se prenosi na alat. Što je strugotina deblja, potrebna je veća snaga rezanja kako bi glodalo uklonilo istu količinu materijala s površine obratka (Piernik i dr., 2023). Snaga rezanja predstavlja mehanički rad koji se utroši u jedinici vremena i mjeri se prema potrošnji električne energije prilikom obrade (Ispas i dr., 2016). Veći dio snage rezanja pretvara se u toplinu (Ahmad i dr., 2003), te se povećanjem snage rezanja povećava i temperatura u zoni glodanja.

Promatrajući slike 42. i 43. vidimo da povećanje frekvencije vrtnje alata (sa 14 000 na 22 000 min⁻¹) uzrokuje smanjenja temperature alata. Ahmad (2003) je pokazao u svom istraživanju da se udio snage rezanja provedene kroz alat kao toplina smanjuje povećanjem brzine rezanja. Pojednostavljeno, povećanjem frekvencije vrtnje alata smanjuje se toplina koja se provodi kroz alat, jer pri velikim frekvencijama vrtnje dolazi i do boljeg hlađenja alata tijekom obrade zbog strujanja zraka. Istraživanja drugih autora (Darmawan i dr., 2001; Pei i dr., 2016; Hu i dr., 2018; Zhang i dr., 2021; Li i dr., 2022; Yu i dr., 2023) pokazuju da povećanje frekvencije vrtnje dovodi do povećanja temperature alata. Istraživanja navedenih autora provedena su u znatno drugačijim uvjetima obrade, znatno nižim frekvencijama vrtnje alata (6000 – 12 000 min⁻¹) i posmičnim brzinama od 3 do 6 m/min, te su stoga dobiveni rezultati teško usporedivi.

4.2.2. Temperatura spiralnog glodala s nazubljenim oštricama (TIP 2)

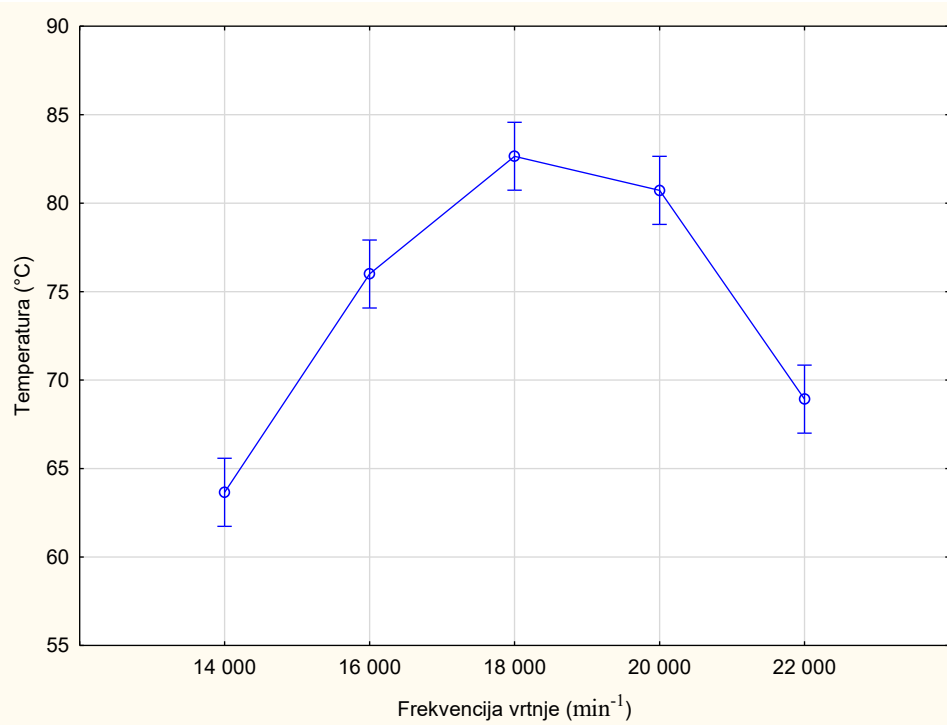
U tablici 14. dani su prosječni rezultati maksimalne temperature za alat TIP 2 pri glodanju furnirskoga uslojenog drva s različitim frekvencijama vrtnje i različitim posmičnim brzinama. Izmerene maksimalne temperature alata se statistički značajno razlikuju za različite frekvencije vrtnje i različite posmične brzine (tablica 15 i 16). Rezultati dvofaktorske ANOVA-e prikazani su na slikama 44. i 45.

Tablica 14. Srednje vrijednosti, standardne devijacije i standardne pogreške maksimalne temperature alata TIP 2 u ovisnosti o parametrima obrade

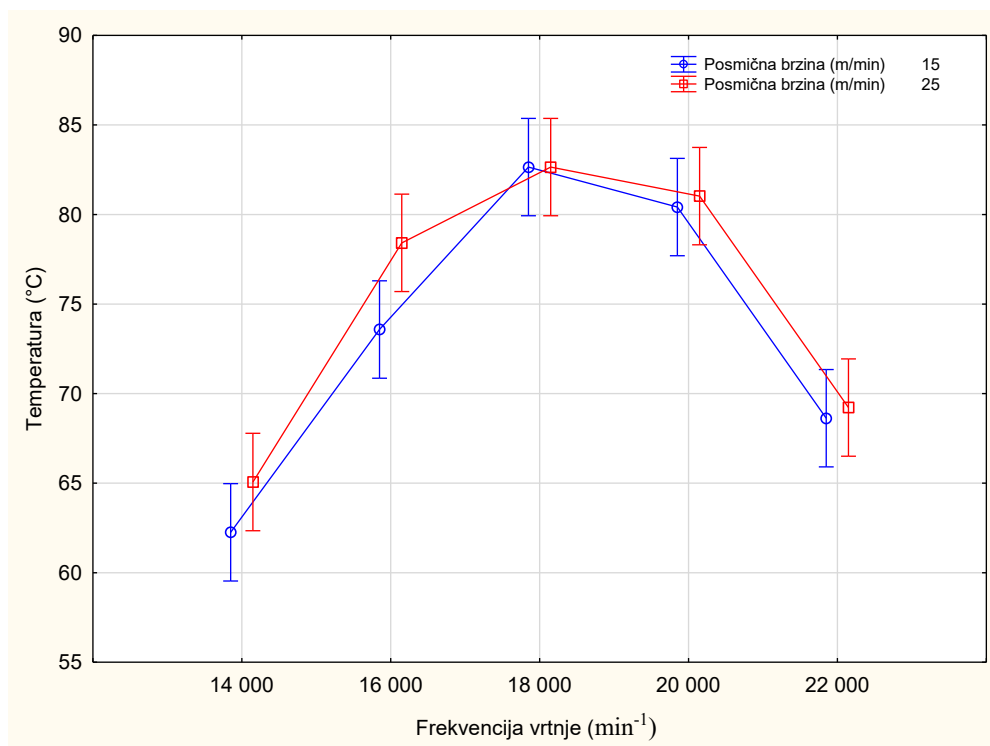
Izvor varijacije	Razina faktora	Razina faktora	<i>N</i>	Temperatura (°C) Aritmetička srednja vrijednost	Temperatura (°C) Standardna devijacija	Temperatura (°C) Standardna pogreška
Ukupno			300	74,39	10,41	0,60
Frekvencija vrtnje	14 000		60	63,66	4,75	0,61
Frekvencija vrtnje	16 000		60	76,00	8,04	1,04
Frekvencija vrtnje	18 000		60	82,65	10,50	1,36
Frekvencija vrtnje	20 000		60	80,72	5,34	0,69
Frekvencija vrtnje	22 000		60	68,93	7,96	1,03
Posmična brzina	15		150	73,51	10,74	0,88
Posmična brzina	25		150	75,28	10,03	0,82
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	14 000	15	30	62,25	4,48	0,82
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	14 000	25	30	65,06	4,67	0,85
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	16 000	15	30	73,58	8,89	1,62
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	16 000	25	30	78,42	6,36	1,16
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	18 000	15	30	82,65	10,59	1,93
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	18 000	25	30	82,65	10,59	1,93
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	20 000	15	30	80,42	5,84	1,07
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	20 000	25	30	81,03	4,87	0,89
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	22 000	15	30	68,63	7,50	1,37
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	22 000	25	30	69,22	8,52	1,55

Tablica 15. Utjecaj frekvencije vrtnje i posmične brzine na maksimalnu temperaturu alata TIP 2 i rezultati Tukey testa

Izvor varijacije	<i>SS</i>	Stupanj slobode	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	Tukey test
Frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	15 357	4	3.839	67,09	0,00	(1)(2)(3,4)(5)
Posmična brzina (m/min)	235	1	235	4,11	0,04	
Frekvencija × posmična brzina	245	4	61	1,07	0,37	
Pogreška	16.594	290	57			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						



Slika 44. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperatura alata TIP 2 izmjerene pri različitim frekvencijama vrtnje



Slika 45. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperature alata TIP 2 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i posmičnoj brzini

Povećanjem frekvencije vrtnje sa 14 000 na 22 000 min⁻¹, povećava se maksimalna temperatura alata (slika 46, 47). Maksimalne temperature alata pri frekvenciji od 18 000 i 20 000 statistički se značajno ne razlikuju (tablica 15). Prezentirani rezultati su u skladu s rezultatima koje su u svojim istraživanjima dobili Kminiak i sur. (2023), te Zhu i sur. (2024). Drvo ima nisku vrijednost toplinske vodljivosti (0,10–0,25 W·m⁻¹·K⁻¹) i toplinske difuznosti (0,15–0,25·10⁻⁶ m²·s⁻¹) u smjeru okomitom na vlakanca (Suleiman i dr., 1999) što uzrokuje slab transfer topline u drvo. Povećanjem frekvencije vrtnje alata trenje između prednje strane oštrice i strugotine, te trenje između bočne strane oštrice i strugotine raste. Jedan se dio temperature preko strugotine i alata odvodi iz zone rezanja. Ipak, stvorena toplina daleko je veća od odvedene topline te zbog toga s porastom frekvencije vrtnje raste i temperatura alata. Povećanjem frekvencije vrtnje preko 20 000 min⁻¹ uzrokuje smanjenje temperature. Prekretnica u temperaturi pojavljuje se zbog brzine mehaničkog odaziva elastične reakcije stanične stjenke drvnih vlakana. Kada oštrica napada drvo ledna strana oštrice tlači novonastalu površinu drva. To je naravno poznato međutim kod brzina većih od 18 000 min⁻¹ elastična deformacija stlačenih vlakana ne uspije se vratiti prije nego što naiđe sljedeća oštrica te se zbog toga otpor trenja ledne strane smanjuje i uzrokuje smanjenje intenziteta razvoja temperature.

Tukeyjev post-hoc test pokazao je statistički značajne razlike temperature alata pri različitim frekvencijama vrtnje alata (tablica 15). Rezultati u tablici 15. ukazuju na to da frekvencija vrtnje ima statistički signifikantan utjecaj na razvoj temperature u alatima, kao i to da frekvencija vrtnje ima značajniji utjecaj na temperaturu alata od posmične brzine. Interakcija između frekvencije vrtnje i posmične brzine ne pokazuje statistički značajnu razliku (slika 45) što znači da je utjecaj frekvencije vrtnje alata na maksimalnu temperaturu alata jednak pri različitim posmičnim brzinama.

Pored frekvencije vrtnje alata, drugi značajan parametar o kojemu ovisi temperatura alata pri glodanju jest posmična brzina. Pri glodanju s alatom TIP 2 utvrđeno je da promjena posmične brzine dovodi do statistički značajne promjene maksimalne temperature alata (tablica 15). Povećanjem posmične brzine dolazi do blagoga porasta temperature alata (slika 45), što potvrđuje ranije rezultate istraživanja (Ispas i dr., 2016; Busuladžić i dr., 2017). Povećanjem posmične brzine dolazi do povećanja sila rezanja (Shi i dr., 2022), što uzrokuje dodatni porast temperature (Li i dr., 2022). Povećanje posmične brzine rezultira i porastom energije obrade, jer stroj obrađuje veću količinu materijala po jedinici vremena te obavlja više rada, što u konačnici povećava

potrošnju energije obrade (Marthy i Cismaru, 2009). Dio energije obrade pretvara se u toplinu u zoni obrade, koja se dalje prenosi na materijal, alat i strugotinu.

Istraživanja (Kminiak i dr., 2023) pokazala su da posmična brzina značajnije utječe na promjenu temperature alata, nego frekvencija vrtnje alata. Ova istraživanja su provedene pri znatno nižim posmičnim brzinama (4-8 m/min), dok su frekvencije vrtnje bile slične kao u našem istraživanju (15 000 – 20 000 min⁻¹). Povećanje posmične brzine uzrokuje povećanje topline trenja tijekom procesa glodanja. Brzina kojom se materijal uklanja i količina uklonjenog materijala po jedinici vremena također se povećava, s posljedičnim povećanjem sile rezanja (Ispas i dr., 2017), što rezultira višim temperaturama. Pri porastu posmične brzine sve tri komponente sile (normalna, tangencijalna i bočna) rastu. Toplinska vodljivost alata veća je nego drva te se toplina brže prenosi na alat, nego na drvo. Porastom posmične brzine, kraće je vrijeme za odvođenje topline u obradak te se veća količina topline prenosi na alat. Druga istraživanja (Igaz i dr., 2019; Zhang i dr., 2021) pokazala su suprotno, tj. da povećanjem posmične brzine dolazi do smanjenja temperature alata, ali su ta istraživanja provedena pri drugačijim parametrima, tj. posmične brzine su bile značajno niže (1-5 m/min). Smanjenje temperature obrade u tom slučaju posljedica je skraćenog vremena obrade, što rezultira manjom količinom proizvedene topline. Ta istraživanja uzimala su obzir debljinu strugotine kao čimbenik koji utječe na toplinu alata. Povećanjem posmične brzine dolazi do povećanja debljine strugotine što dovodi do smanjenja temperature alata uslijed smanjenoga trenja između strugotine i alata.

4.2.3. Temperatura glodala s dijamantnim oštricama (TIP 3)

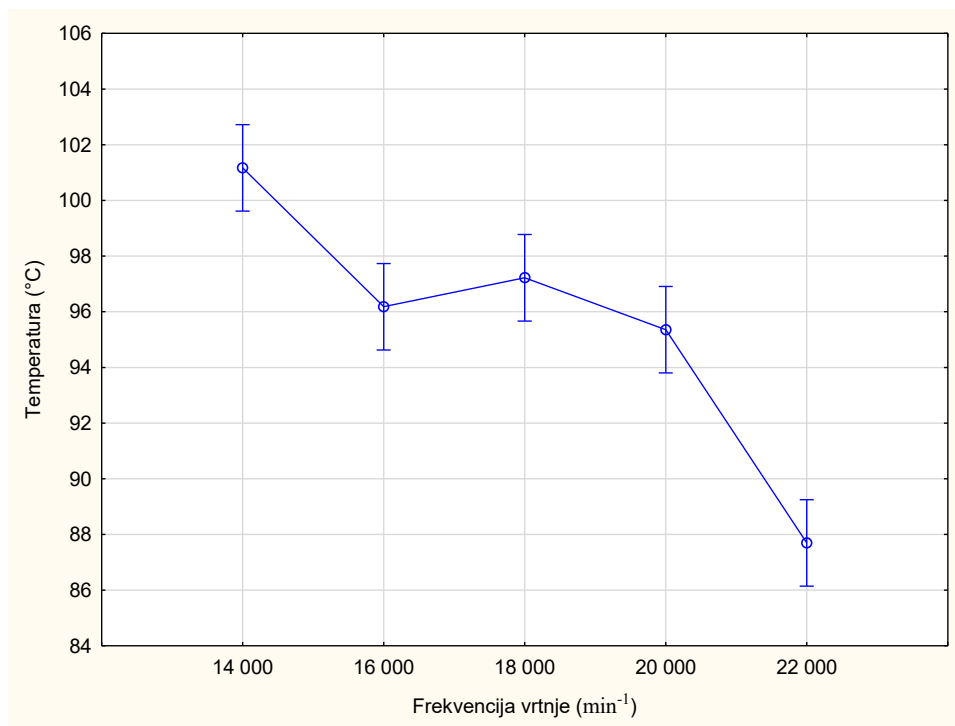
Deskriptivna statistika podataka o prosječnoj temperaturi alata TIP 3 dana je u tablici 16. Rezultati dvofaktorske ANOVA analize prosječnih temperatura alata TIP 3 prikazani su u tablici 17. Na slici 46. prikazana je ovisnost prosječne temperature alata o frekvenciji vrtnje, a na slici 47. o frekvenciji vrtnje i posmičnoj brzini.

Tablica 16. Prosječna temperatura alata TIP 3 u ovisnosti o parametrima obrade

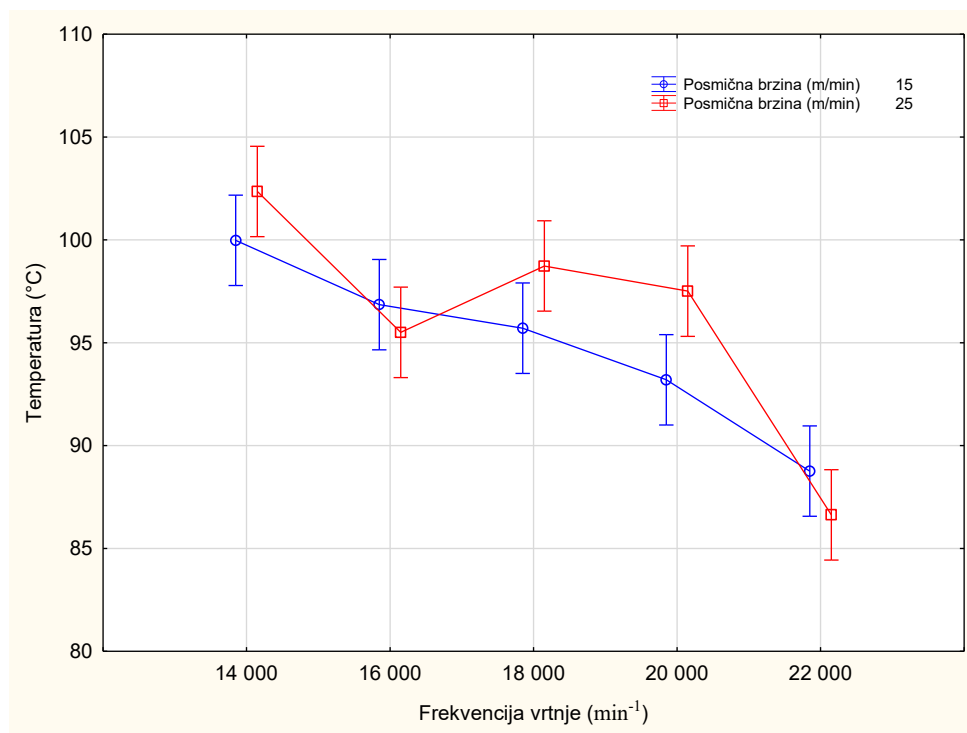
Izvor varijacije	Razina faktora	Razina faktora	<i>N</i>	Temperatura (°C) Aritmetička srednja vrijednost.	Temperatura (°C) Standardna devijacija	Temperatura (°C) Standardna pogreška
Ukupno			300	95,52	7,59	0,44
Frekvencija vrtnje	14 000		60	101,17	6,04	0,78
Frekvencija vrtnje	16 000		60	96,18	5,50	0,71
Frekvencija vrtnje	18 000		60	97,22	7,51	0,97
Frekvencija vrtnje	20 000		60	95,36	5,68	0,73
Frekvencija vrtnje	22 000		60	87,70	6,21	0,80
Posmična brzina	15		150	94,90	7,49	0,61
Posmična brzina	25		150	96,15	7,66	0,63
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	14 000	15	30	99,98	5,93	1,08
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	14 000	25	30	102,36	6,01	1,10
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	16 000	15	30	96,85	6,01	1,10
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	16 000	25	30	95,51	4,95	0,90
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	18 000	15	30	95,71	8,29	1,51
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	18 000	25	30	98,73	6,43	1,17
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	20 000	15	30	93,20	5,11	0,93
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	20 000	25	30	97,51	5,46	1,00
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	22 000	15	30	88,76	7,00	1,28
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	22 000	25	30	86,63	5,21	0,95

Tablica 17. Utjecaj frekvencije vrtnje i posmične brzine na prosječnu temperaturu alata TIP 3 i rezultati Tukey testa

Izvor varijacije	SS	Stupanj slobode	MS	F	<i>p</i>	Tukey test
Frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	5788	4	1447	36,68	0,00	(1)(2,3,4) (5)
Posmična brzina (m/min)	117	1	117	3,12	0,08	
Frekvencija vrtnje ×posmična brzina	479	4	120	3,20	0,01	
Pogreška	10848	290	37			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade <i>p</i> <0,05						



Slika 46. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti prosječne temperature alata TIP 3 izmjerene pri različitim frekvencijama vrtnje



Slika 47. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti prosječne temperature alata TIP 3 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i posmičnoj brzini

Kod alata TIP 3 promjena frekvencije vrtnje alata uzrokuje statistički signifikantnu promjenu prosječne temperature alata (tablica 17). Povećanje frekvencije vrtnje uzrokuje smanjenje temperature alata (slika 46). Alate s oštricom od PCD-a karakterizira visoka toplinska vodljivost ($\lambda \approx 400 \text{ W/mK}$) (Oosthuizen i dr., 2011). Zbog visoke toplinske vodljivosti veliki dio topline nastale pri glodanju drva prenosi se na alat, te su maksimalne temperature alata TIP 3 znatno više nego kod drugih dvaju korištenih alata. Maksimalna temperatura alata bila je viša od mjernog područja termalne kamere te je zbog toga kod ovoga glodala napravljena analiza prosječnih temperatura na način kako je to opisano u poglavlju 3.5.2.

Povećanjem frekvencije vrtnje alata dolazi do smanjenja temperature alata, tj. sa smanjenjem posmaka po zubu alata smanjuje se i temperatura alata. Rezultati istraživanja (Kopecky i dr., 2018; Palubicki, 2021) pokazuju da pri povećanju debljina strugotine raste sila rezanja. Što je veća debljina strugotine potrebna je veća snaga rezanja kako bi se strugotina uklonila s površine materijala. Snaga rezanja proporcionalna je količini topline koja se proizvede u zoni rezanja i koja se potom prenosi na alat. Povećanjem frekvencije vrtnje alata pri konstantnoj posmičnoj brzini, posmak se po zubu smanjuje, a samim time je i manja debljina strugotine. Smanjenje frekvencije vrtnje alata uzrokuje povećanje dužine strugotine (Yang i dr., 2023). Što je strugotina duža to je više u kontaktu s površinom alata te se javlja dulje trenje, te se razvija više topline. Pri frekvenciji vrtnje od $22\,000 \text{ min}^{-1}$ debljina strugotine je najmanja, što rezultira najmanjom potrebnom snagom rezanja, a time i najnižom prosječnom temperaturom alata. Pri frekvenciji od $14\,000 \text{ min}^{-1}$ potrebna je najveća snaga za odvajanje strugotine te je i temperatura alata najveća. Ovaj trend istovjetan je bez obzira na prosječnu brzinu. Kod glodala TIP 3 prsni kut značajno je veći nego kod ostalih glodala. Zbog većeg kuta dolazi do povećanja otpora rezanju, što utječe na povećanje temperature.

Na temelju rezultata iz tablice 16. vidimo da frekvencija vrtnje ima značajniji utjecaj na temperaturu alata nego posmična brzina. Povećanje posmične brzine ne uzrokuje statistički značajnu razliku u prosječnim temperaturama alata TIP 3 pri 95 %-tnom intervalu pouzdanosti (tablica 16), ali ima statistički signifikantan utjecaj pri intervalu pouzdanosti od 92 %. Slika 47. pokazuje da je utjecaj interakcije frekvencije vrtnje i posmične brzine statistički značajan što znači da utjecaj frekvencije vrtnje na temperaturu alata nije jednak za različite posmične brzine.

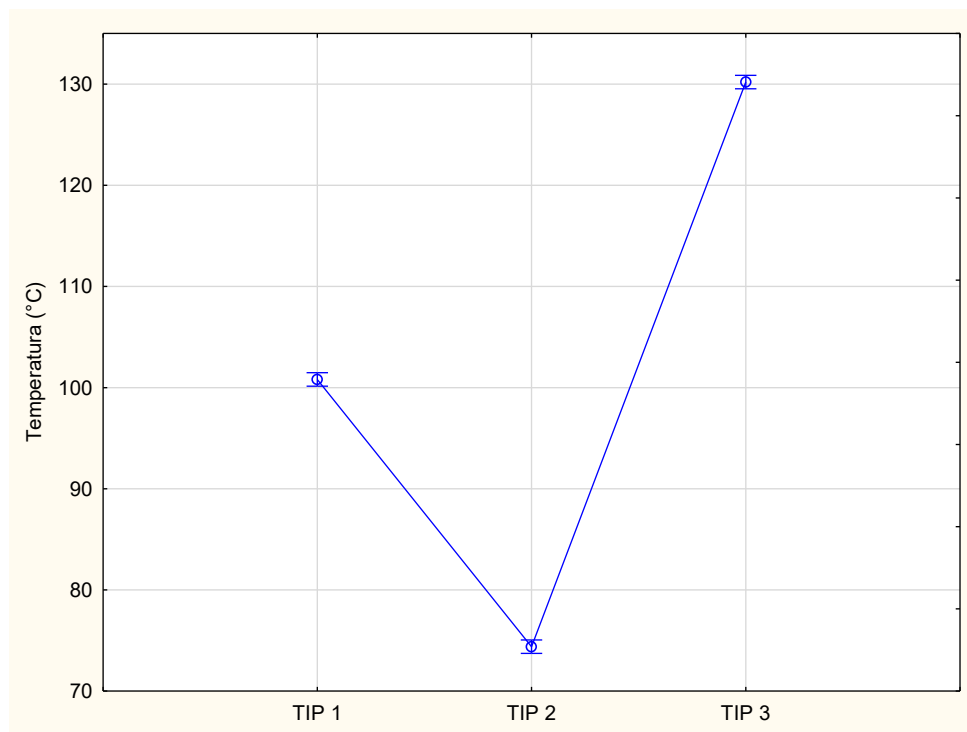
4.2.4. Analiza izmjerenih temperatura za tri tipa alata

Na temelju rezultata predstavljenih u poglavljima (4.2.1; 4.2.2; 4.2.3) formulirani su zbirni rezultati izmjerenih vrijednosti maksimalnih temperatura za sva tri korištena alata. Rezultati ANOVA-e izmjerenih vrijednosti maksimalnih temperatura za različite tipove alata prikazani su u tablici 18. i na slici 48. Rezultati dvofaktorske ANOVA-e za različite frekvencije vrtnje triju korištenih alata prikazani su na slici 49. dok su rezultati trofaktorske ANOVA-e s interakcijom alata prikazani na slici 50. Na slikama su prikazani rezultati za sva tri tipa alata, s time da za alat TIP 3 nije prikazana ovisnost temperature o frekvenciji vrtnje, jer je zbog ograničenja kamere pri svim frekvencijama izmjerena vrijednost od 130,2 °C.

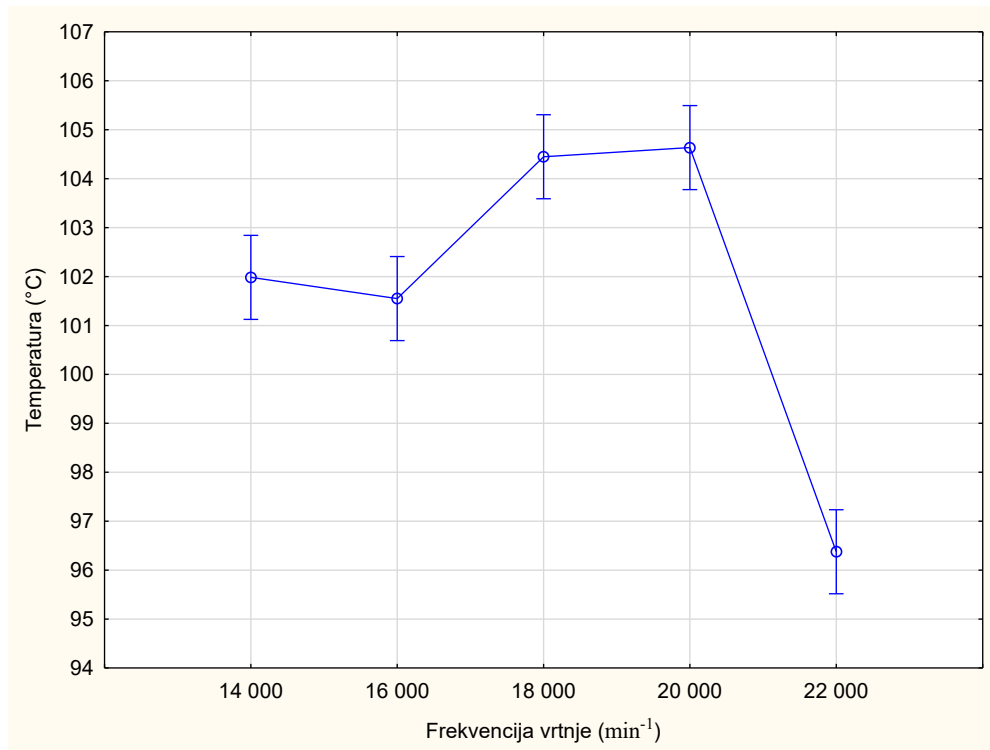
Tablica 18. Utjecaj frekvencije vrtnje, posmične brzine i tipa alata na maksimalnu temperaturu alata

Izvor varijacije	<i>SS</i>	Stupanj slobode	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	Tukey test
Alat	467 643	2	233 822	6789,1	0,00	(1)(2)(3)
Frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	8023	4	2006	58,2	0,00	(1,2)(3,4)(5)
Posmična brzina (m/min)	1804	1	1804	52,4	0,00	(1)(2)
Alat × frekvencija vrtnje	22 605	8	282	82	0,00	
Alat × posmična brzina	1823	2	911	26,5	0,00	
Frekvencija vrtnje × posmična brzina	846	4	211	6,1	0,00	
Alat × frekvencija vrtnje × posmična brzina	725	8	91	2,6	0,01	
Pogreška	29963	870	34			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						

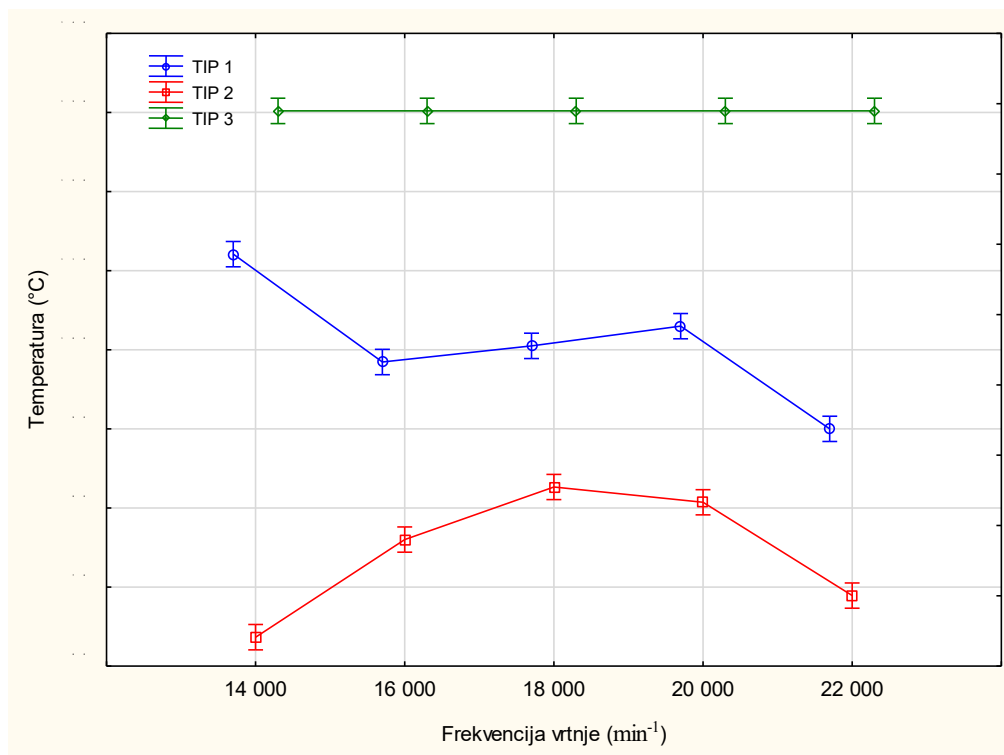
Na temelju rezultata iz tablice 18. vidimo da vrsta alata, frekvencije vrtnje i posmična brzina imaju signifikantan utjecaj na maksimalnu temperaturu alata. Na temelju vrijednosti *F* iz tablice uočavamo da vrsta alata ima najveći utjecaj na temperaturu alata, zatim frekvencija vrtnje a najmanji utjecaj ima posmična brzina.



Slika 48. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperature alata za različite tipove alata



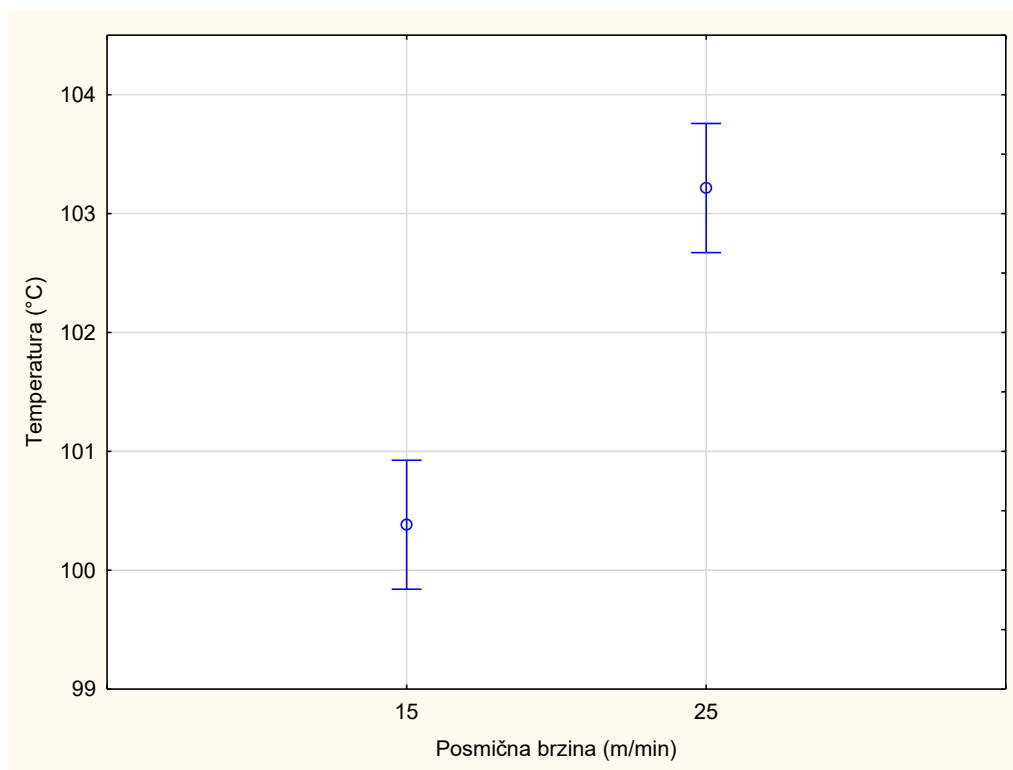
Slika 49. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperature alata izmjerene pri različitim frekvencijama vrtnje



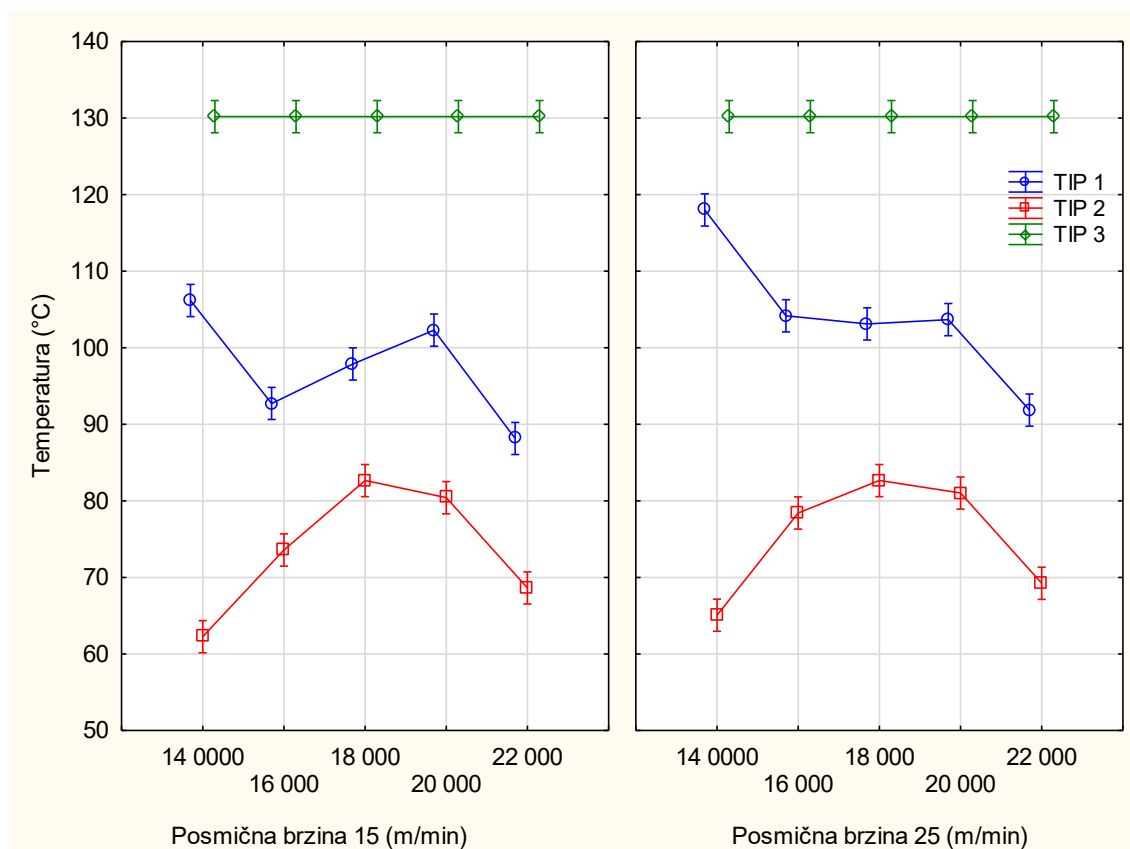
Slika 50. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperature alata u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i tipu alata

Prema prosječnim vrijednostima pri pojedinim frekvencijama vrtnje alata TIP 2 izmjerene su 15-35% niže temperature nego na alatu TIP 1, a u odnosu na alat TIP 3 temperature su niže 35-50 %. Maksimalne temperature alata TIP 1 niže su 16-33 % u odnosu na alat TIP 3. Uzrok najniže temperature alata TIP 2 je u nazubljenoj odnosno isprekidanoj oštrici kojom se za razliku od druga dva alata proizvodi strugotina manje dužine i zbog toga manje mase. Takvu je strugotinu lakše odstraniti te je i za znatno veći posmak po oštrici temperatura ovog alata niža nego temperatura alata TIP 1. Kod alata TIP 3 oštrica je segmentirana i trebala bi djelovati kao nazubljena međutim temperatura alata je bliža alatu TIP 1 jer je veliki napadni kut dominantniji faktor razvoja temperature od isprekidanosti odnosno "nazubljenosti" karakteristične za glodala namijenjena za grubu obradu. Zbog velikog broja ujednačenih čimbenika parametara obrade i konstrukcije alata, izmjerene razlike temperatura alata može se jedino obrazložiti pretpostavkom da je razlog u materijalu alata koji različito provodi toplinu. Oštrica alata TIP 3 izrađena je od PCD-a koji ima veliku toplinsku vodljivost, te se toplina koja nastaje kao posljedica trenja u zoni rezanja u velikoj mjeri prenosi na alat uzrokujući povećanje temperature alata. Pored toga, ključnu ulogu u zagrijavanju alata ima geometrija alata. Oštrica alata TIP 2 je nazubljena te se pri glodanju stvara

kraća strugotina, što uzrokuje manje trenje između strugotine i alata, i posljedično manje temperature u zoni glodanja. Pored toga, nazubljena oštrica omogućava brže hlađenje, jer je veća površina alata u kontaktu s okolnim zrakom. Promatrajući interakciju između alata TIP 1 i TIP 2 (slika 50) uočavamo da između ova dva alata postoji statistički signifikantna interakcija, što znači da se temperatura različito mijenja s obzirom na frekvenciju vrtnje. Utjecaj posmične brzine na maksimalne temperature alata prikazan je na slici 51. Posmična brzina ima statistički signifikantan utjecaj na temperaturu alata, te možemo konstatirati da se povećanjem posmične brzine temperatura alata povećava.



Slika 51. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperature alata izmjerene pri različitim posmičnim brzinama



Slika 52. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperature alata u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata, posmičnoj brzini i tipu alata

Rezultati analize pokazuju da je utjecaj frekvencije vrtnje i posmične brzine na zagrijavanje alata različit za tri različita tipa alata jer je interakcija statistički signifikantna (slika 52). Na stupanj zagrijavanja alata pri glodanju furnirskoga uslojenog drva utječu parametri obrade (posmična brzina, frekvencija vrtnje alata), ali i geometrija alata te materijal od kojeg je oštrica izrađena. Geometrijske karakteristike alata definiraju veličinu i smjer sila rezanja i njihovih komponenata, brzinu klizanja i trenje između alata i strugotine, toplinsku energiju stvorenu pri obradi, temperaturnu distribuciju u alatu i slično (Astakhov i Davim, 2008).

Ako pogledamo grafikone temperatura alata u ovisnosti o frekvenciji vrtnje (slike 42, 44, 48) uočavamo da pri promjeni frekvencije vrtnje od 16 000 do 22 000 min^{-1} dobije se gotovo identičan trend promjene temperature. To nas dovodi do zaključka da se pri najmanjoj frekvenciji vrtnje od 14 000 min^{-1} dešavaju značajne promjene u temperaturi alata do kojih dolazi zbog interakcije više različitih faktora, te da je ponašanje alata sa aspekta temperatura predvidljivo pri frekvencijama vrtnje iznad 14 000 min^{-1} . Ta frekvencija vrtnje kod CNC strojeva vrlo se rijetko koristi jer je većina alata projektirana za više frekvencije vrtnje.

4.3. Analiza utjecaja parametara obrade na ukupnu razinu i spektar zvučnoga tlaka

4.3.1. Analiza razine zvučnoga tlaka pri uporabi spiralnog glodala s kontinuiranim oštricama (TIP 1)

Tijekom obrade furnirskoga uslojenog drva s glodalom TIP 1 mjerena je razina zvučnoga tlaka u okviru mjerenoga spektra zvuka terce. Prosječne vrijednosti izmjerenih razina zvučnoga tlaka pri glodanju s alatom TIP 1 prikazane su u tablici 19. dok su rezultati dvofaktorske ANOVA-e, zajedno s Tukey post-hoc testom prikazani u tablici 20., kao i na slikama 53. i 54. Sve izmjerene vrijednosti razina zvučnoga tlaka pri uporabi glodala TIP 1 prikazane su u prilogu rada (prilog 3).

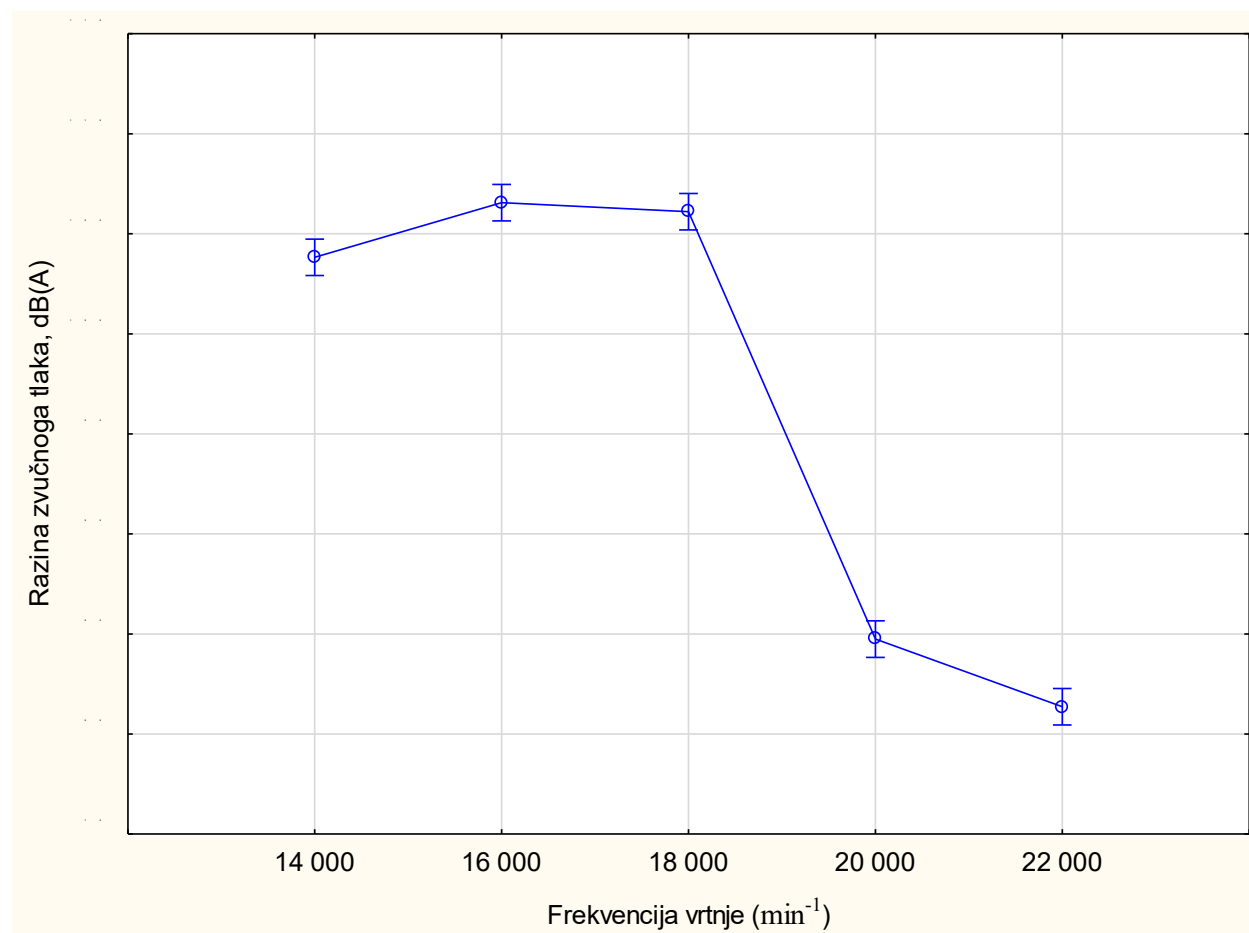
Tablica 19. Vrijednosti razina zvučnoga tlaka alata TIP 1 u ovisnosti o parametrima obrade

Izvor varijacije	Razina faktora	Razina faktora	<i>N</i>	Razina zvučnoga tlaka dB(A) Aritmetička srednja vrijednosti	Razina zvučnoga tlaka dB(A) Standardna devijacija	Razina zvučnoga tlaka dB(A) Standardna pogreška
Ukupno			300	96,52	11,74	0,68
Frekvencija vrtnje	14 000		60	103,82	2,60	0,34
Frekvencija vrtnje	16 000		60	106,55	1,38	0,18
Frekvencija vrtnje	18 000		60	106,10	3,09	0,39
Frekvencija vrtnje	20 000		60	84,74	6,29	0,81
Frekvencija vrtnje	22 000		60	81,37	4,02	0,52
Posmična brzina	15		150	95,55	12,04	0,98
Posmična brzina	25		150	97,48	11,39	0,93
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	14 000	15	30	101,83	1,69	0,31
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	14 000	25	30	105,82	1,64	0,29
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	16 000	15	30	107,24	1,33	0,24
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	16 000	25	30	105,87	1,07	0,19
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	18 000	15	30	104,59	3,75	0,68
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	18 000	25	30	107,61	0,88	0,16
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	20 000	15	30	84,70	6,48	1,18
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	20 000	25	30	84,78	6,20	1,13
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	22 000	15	30	79,39	4,98	0,91
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	22 000	25	30	83,34	0,07	0,012

Tablica 20. Utjecaj frekvencije vrtnje i posmične brzine na razinu zvučnoga tlaka alata TIP 1

Izvor varijacije	<i>SS</i>	Stupanj slobode	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	Tukey test
Frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	36 865	4	9214	716,13	0,00	(1)(2,3)(4)(5)
Posmična brzina (m/min)	279	1	279	21,7	0,00	
Frekvencija ×posmična brzina	357	4	89	6,9	0,00	
Pogreška	3731	290	13			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						

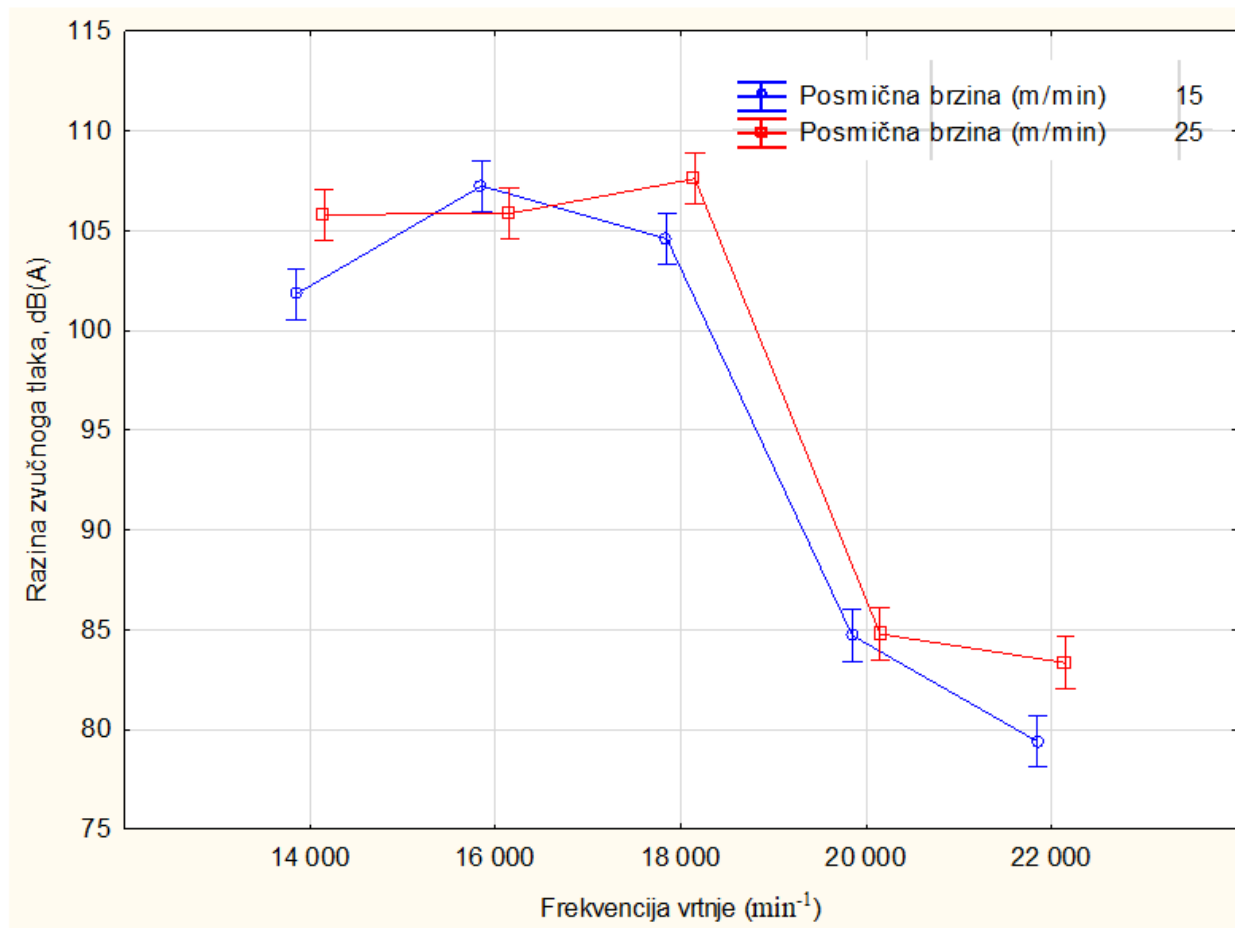
Statistički značajna razlika u razinama zvučnoga tlaka javlja se pri različitim posmičnim brzinama i frekvencijama vrtnje alata (tablica 20).



Slika 53. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka alata TIP 1 izmjerene pri različitim frekvencijama vrtnje alata

Ako usporedimo razine zvučnoga tlaka prikazane na slici 53. i tablici 19. možemo konstatirati da razina zvučnoga tlaka statistički značajno opada pri povećanju frekvencije vrtnje od 14 000 do 22 000 min^{-1} . S povećanjem prosječne posmične brzine s 15 na 25 m/min dolazi do statistički značajnog povećanja razine zvučnoga tlaka (tablica 20). Rezultati dobiveni u ranijim istraživanjima (Iskra i Tanaka, 2005; Aguilera i Barros, 2010; Brezin i Vitchev, 2014; Ajdinaj i dr., 2023; Kminiak i dr., 2023), pokazuju također da s povećanjem posmične brzine dolazi do povećanja razine zvučnoga tlaka. Navedena istraživanja su provedena pri različitim parametrima obrade, tj. frekvencija vrtnje bila je u rasponu od 3000 - 20 000 min^{-1} , posmična brzina 3 - 10 m/min, te su korišteni alati različitih geometrijskih karakteristika. Pored toga obrada je provedena

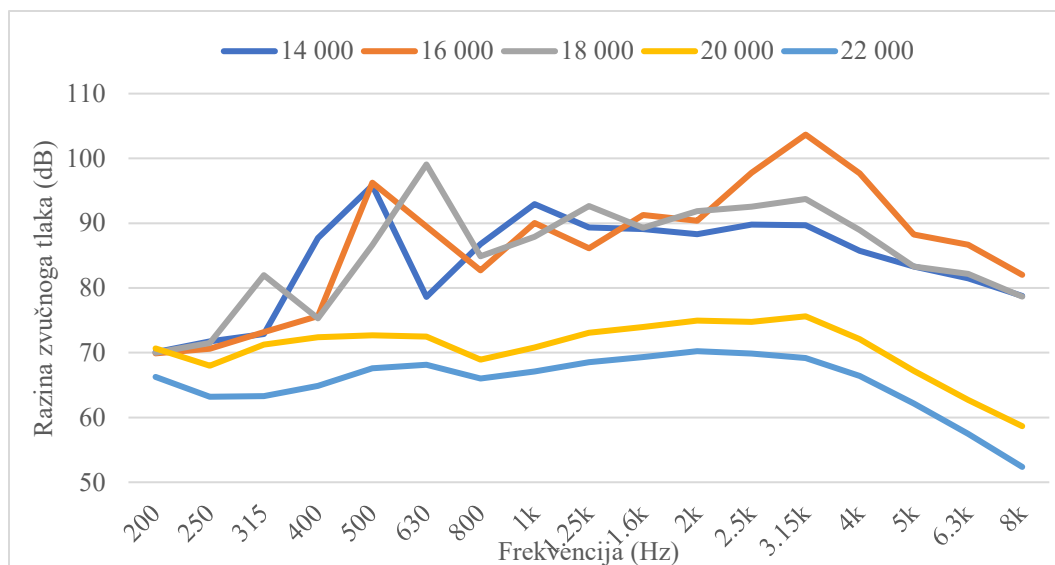
na različitim strojevima (CNC glodalice, stolne glodalice) i na različitim materijalima (MDF, iverica, masiv). Pored svih ovih različitosti rezultati su pokazali porast razine zvučnoga tlaka s povećanjem posmične brzine.



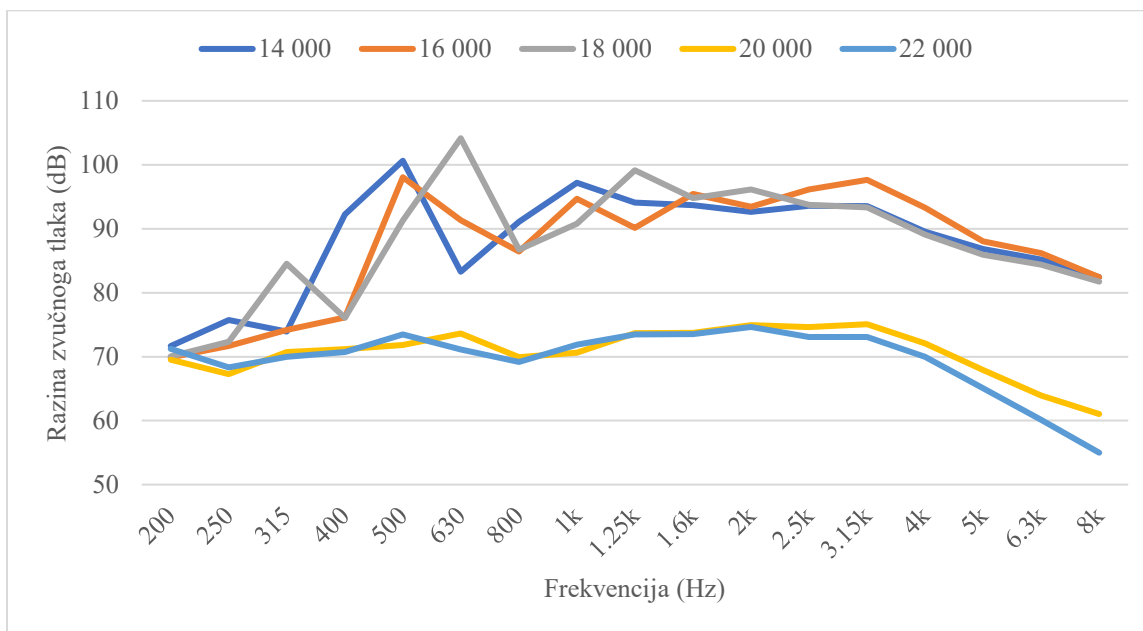
Slika 54. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka alata TIP 1 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i posmičnoj brzini

Analizirajući dijagram na slici 54. vidimo da je interakcija frekvencije vrtnje alata i posmične brzine na razinu zvučnoga tlaka statistički signifikantna, što znači da je utjecaj frekvencije vrtnje na razinu zvučnoga tlaka različit pri različitim posmičnim brzinama. Pri nekim frekvencijama vrtnje s povećanjem posmične brzine razina zvučnoga tlaka se povećava, a pri nekima se smanjuje. Spektralna analiza izmjerene razine zvučnoga tlaka provedena je primjenom tercnog filtera, dakle zvuk je podijeljen na terčne pojaseve frekvencija. U skladu s tim, provedena je spektralna analiza izmjerenoga zvučnoga tlaka kako bi se utvrdilo kako se spektar zvučnoga tlaka mijenja ovisno o promjeni frekvencije vrtnje alata i promjeni posmične brzine (slika 55, 56). Za svaku frekvenciju

spektra zvuka mjerena je trenutna razina zvučnoga tlaka, te je izračunata prosječna vrijednost za svaku frekvenciju u okviru spektra terce. Pri nižim (16-200 Hz) i višim frekvencijama (>8.000 Hz) razine zvučnog tlaka su približno jednake za sve frekvencije vrtnje alata, tako da se te vrijednosti nisu analizirale, ali su dane u prilogu radu (prilog 4).



Slika 55. Tercni spektri razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata TIP 1, pri prosječnoj posmičnoj brzini od 15 m/min



Slika 56. Tercni spektri razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata TIP 1, pri prosječnoj posmičnoj brzini od 25 m/min

Kod nižih frekvencija vrtnje alata ($14\ 000 - 18\ 000\ \text{min}^{-1}$) razina zvučnoga tlaka u svim frekvencijama treće je viša nego pri višim frekvencijama vrtnje alata ($20\ 000 - 22\ 000\ \text{min}^{-1}$). Kod nižih frekvencija vrtnje alata ($14\ 000 - 18\ 000\ \text{min}^{-1}$) uočavamo da u pojedinim frekvencijama dolazi do značajnog porasta razine zvučnoga tlaka. Tako pri frekvenciji vrtnje od $14\ 000\ \text{min}^{-1}$ najviše razine zvučnoga tlaka javljaju se u frekvenciji od 500 Hz, te 1000 Hz. Pri frekvenciji vrtnje od $16\ 000\ \text{min}^{-1}$ najviše razine zvučnoga tlaka javljaju se pri frekvencijama od 500 Hz i 3150 Hz. Kod frekvencije vrtnje od $18\ 000\ \text{min}^{-1}$ najviša razina zvučnoga tlaka prisutna je pri frekvencijama od 630 Hz i 2000 Hz. Na osnovu grafikona (slika 55 i 56) i prezentiranih rezultata uočavamo da se s povećanjem frekvencije vrtnje povećava i frekvencija treće u kojoj je izmjerena najveća razina zvučnoga tlaka. Pri višim frekvencijama vrtnje alata ($20\ 000 - 22\ 000\ \text{min}^{-1}$) spektar zvučnoga tlaka je približno jednak, te pri ovim frekvencijama vrtnje ne dolazi do velikog odstupanja zvučnoga tlaka u pojedinim frekvencijama treće. Pored toga, s povećanjem posmične brzine spektar zvuka pri frekvencijama vrtnje alata $20\ 000$ i $22\ 000\ \text{min}^{-1}$ postaje gotovo identičan (slika 56). Sa slika 55. i 56. vidimo da povećanjem posmične brzine dolazi do ujednačavanja spektra zvučnog tlaka.

4.3.2. Analiza razine zvučnoga tlaka pri uporabi spiralnog glodala s nazubljenim oštricama (TIP 2)

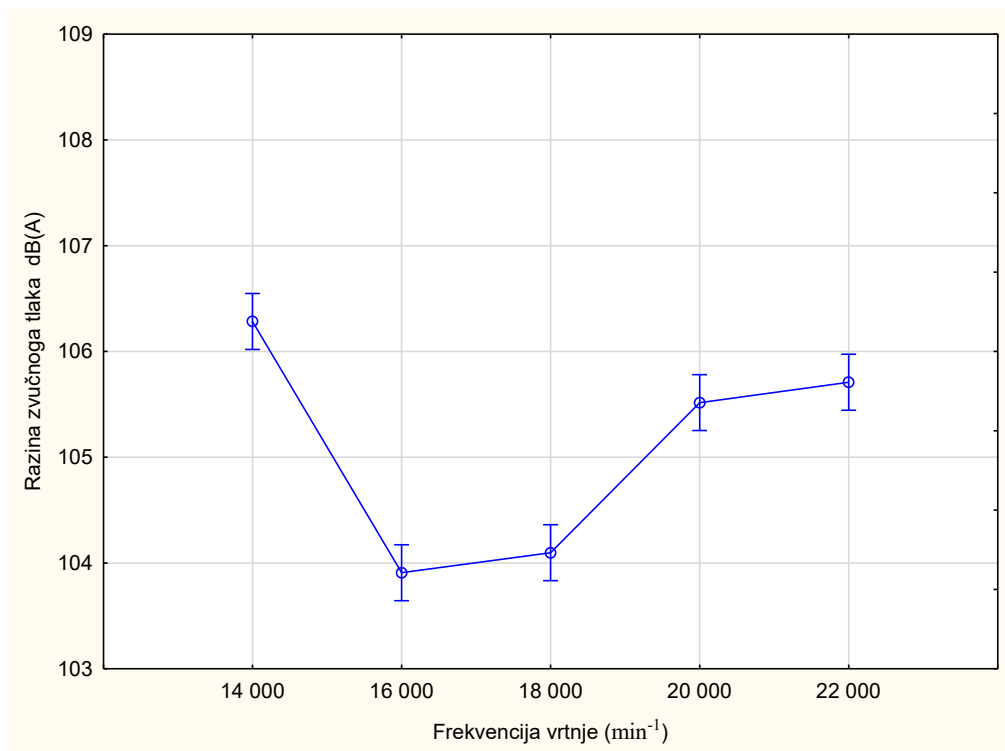
Deskriptivna statistika izmjerenih vrijednosti razine zvučnoga tlaka pri glodanju furnirskoga uslojenog drva sa spiralnim glodalom TIP 2 prikazana je u tablici 21. Dvofaktorska ANOVA s interakcijom prikazana je tablicama 22. i slikama 57. i 58. Sve izmjerene vrijednosti razine zvučnoga tlaka pri uporabi glodala TIP 2 prikazane su u prilogu rada (prilog 3).

Tablica 21. Vrijednosti razina zvučnoga tlaka alata TIP 2 u ovisnosti o parametrima obrade

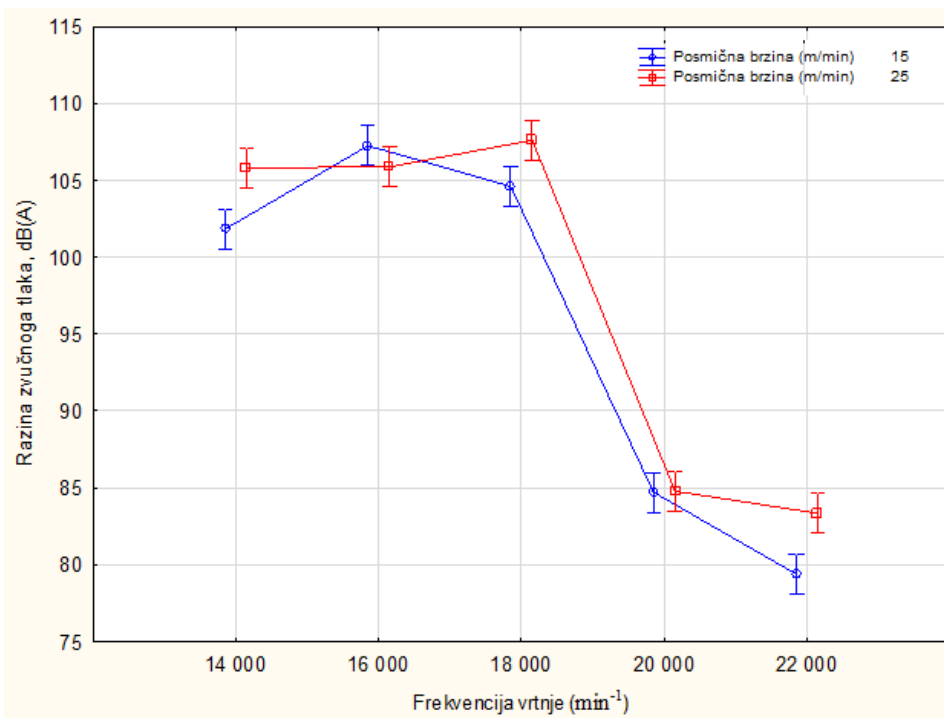
Izvor varijacije	Razina faktora	Razina faktora	<i>N</i>	Razina zvučnoga tlaka dB(A) Aritmetička srednja vrijednosti	Razina zvučnoga tlaka dB(A) Standardna devijacija	Razina zvučnoga tlaka dB(A) Standardna pogreška
Ukupno			300	96,52	11,74	0,68
Frekvencija vrtnje	14 000		60	103,82	2,60	0,34
Frekvencija vrtnje	16 000		60	106,55	1,38	0,18
Frekvencija vrtnje	18 000		60	106,10	3,09	0,39
Frekvencija vrtnje	20 000		60	84,74	6,29	0,81
Frekvencija vrtnje	22 000		60	81,37	4,02	0,52
Posmična brzina	15		150	95,55	12,04	0,98
Posmična brzina	25		150	97,48	11,39	0,93
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	14 000	15	30	101,83	1,69	0,31
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	14 000	25	30	105,82	1,64	0,29
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	16 000	15	30	107,24	1,33	0,24
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	16 000	25	30	105,87	1,07	0,19
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	18 000	15	30	104,59	3,75	0,68
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	18 000	25	30	107,61	0,88	0,16
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	20 000	15	30	84,70	6,48	1,18
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	20 000	25	30	84,78	6,20	1,13
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	22 000	15	30	79,39	4,98	0,91
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	22 000	25	30	83,34	0,07	0,012

Tablica 22. Utjecaj frekvencije vrtnje i posmične brzine na razinu zvučnoga tlaka alata TIP 2

Izvor varijacije	<i>SS</i>	Stupanj slobode	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	Tukey test
Frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	262	4	66	61	0,00	(1)(2,3)(4,5)
Posmična brzina (m/min)	861	1	861	795	0,00	
Frekvencija ×posmična brzina	44	4	11	10	0,00	
Pogreška	314	290	1			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						



Slika 57. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka alata TIP 2 izmjerene pri različitim frekvencijama vrtnje alata



Slika 58. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka alata TIP 2 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i posmičnoj brzini

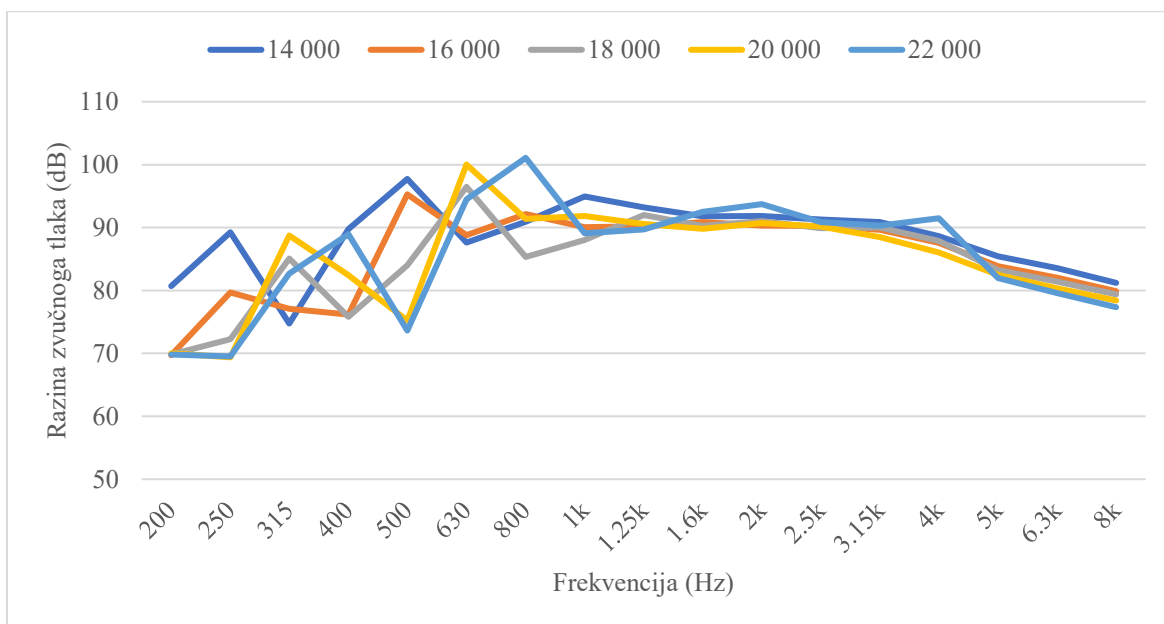
Razina zvučnoga tlaka u pravilu raste s povećanjem frekvencije vrtnje alata, međutim zbog pojave rezonancije ili nekih drugih čimbenika može doći do značajnog povećanja razine zvučnoga tlaka kod nekih frekvencija vrtnje, kao što je u ovom slučaju bila frekvencija od $14\,000\text{ min}^{-1}$. Međutim ako se pomaknemo od frekvencije vrtnje gdje se javlja rezonancija, dolazi do značajnog smanjenja razine zvučnoga tlaka, kao što je prikazano na slici 57. Pri povećanju frekvencije vrtnje od $16\,000 - 22\,000\text{ min}^{-1}$ dolazi do povećanja razine zvučnoga tlaka. S povećanjem frekvencije vrtnje alata, tj. brzine rezanja dolazi do povećanja snage rezanja (Koleda i dr. 2019). Istraživanje Koleda i dr. (2019) provedeno je s posmičnim brzinama 6-15 m/min, dok su frekvencije vrtnje bile znatno niže (do 8000 min^{-1}) u odnosu na naše istraživanje. Licow i dr. (2020), te Svrzić i dr. (2025) dokazali su vezu između snage rezanja i emisije zvučnoga tlaka, tj. povećanjem snage rezanja raste emisija zvučnoga tlaka. Istraživanja Brezina i Vitcheva (2014), te Kminiaka i dr. (2023) također su pokazala da pri povećanju frekvencija vrtnje alata dolazi do porasta razine zvučnoga tlaka.

Iz rezultata je vidljivo kako je posmična brzina značajan čimbenik koji utječe na emisiju zvuka. Posmična brzina ima daleko veći utjecaj na promjenu razine zvučnoga tlaka nego frekvencija vrtnje alata, što se vidi iz višestruko veće F vrijednosti (tablica 22). Pri povećanju posmične brzine dolazi do statistički značajnog povećanja razine zvučnoga tlaka (tablica 22). Ova je pojava izravno povezana s pozitivnom korelacijom između posmične brzine i sile rezanja, tj. snage rezanja. Povećanjem posmične brzine, povećava se i zahvat po zubu što uzrokuje povećanje debljine strugotine, što znači veću količinu uklonjene strugotine u jedinici vremena. To dovodi do povećanja sila rezanja, tj. korištenja veće snage rezanja zbog kompresije strugotine u zoni rezanja (Đurković i dr., 2018). S druge strane, dokazana je pozitivna korelacija između snage rezanja i emisije zvučnoga tlaka (Licow i dr, 2020). Aguilera i Barros (2010), zaključili su da pri rezanju drva s povećanjem debljine strugotine dolazi do povećanja razine zvučnoga tlaka. Ovaj rezultat u skladu je rezultatima ranijih istraživanja (Iskra i Tanaka, 2005; Ajdinaj i dr., 2023; Kminiak i dr., 2023), čija su istraživanja pokazala da sa povećanjem posmične brzine u intervalu 3-10 m/min raste i emisija zvučnoga tlaka.

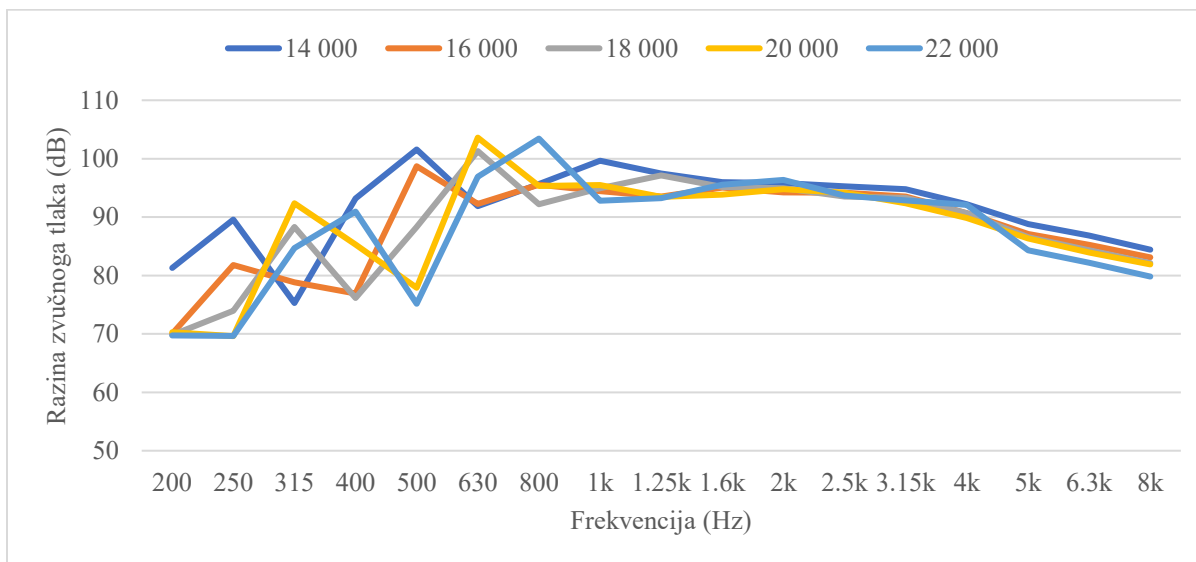
Analizirajući dijagram na slici 58. možemo zaključiti da je utjecaj interakcije posmične brzine i frekvencije vrtnje alata na emitiranu razinu zvučnoga tlaka statistički značajan. Povećanje posmične brzine uzrokuje povećanje razine zvučnoga tlaka pri svim frekvencijama vrtnje alata.

Spektralna analiza izmjerene razine zvučnoga tlaka provedena je kako bi se utvrdilo da se spektar razine zvučnoga tlaka mijenja ovisno o promjeni frekvencije vrtnje alata i posmičnoj brzini, te kako bi se utvrdila njihova interakcija (slika 59, 60).

Analiza tercnog spektra razine zvučnoga tlaka pri obradi s glodalom TIP 2 pokazuje da su najveće razine zvučnoga tlaka izmjerene na frekvencijama 500–1000 Hz. Na frekvencijama terce višim od 1000 Hz razine zvučnog tlaka su približno jednake neovisno o frekvenciji vrtnje alata.



Slika 59. Tercni spektar razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata TIP 2, pri prosječnoj posmičnoj brzini od 15 m/min



Slika 60. Tercni spektar zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata TIP 2, pri prosječnoj posmičnoj brzini od 25 m/min

Kod alata TIP 2 u frekventnom području 200-1000 Hz u pojedinim frekvencijama dolazi do pojave više razine zvučnoga tlaka, te se u ovom području spektar zvuka razlikuje u ovisnosti o frekvenciji vrtnje. Na frekvencijama višim od 1000 Hz spektar zvuka je sličan neovisno o frekvenciji vrtnje. Dodatno s povećanjem posmične brzine dolazi do daljeg ujednačavanja spektra zvučnoga tlaka. Pri frekvenciji vrtnje od $14\,000\text{ min}^{-1}$ najviše razine zvučnoga tlaka izmjerene su na frekvenciji 500 Hz te 1.000 Hz. Pri frekvenciji vrtnje $16\,000\text{ min}^{-1}$ najviše razine zvučnoga tlaka izmjerene se na frekvenciji 500 Hz. Pri frekvenciji vrtnje alata $18\,000\text{ min}^{-1}$ najviša razina zvučnoga tlaka izmjerena je na frekvenciji 630 Hz. Pri frekvenciji vrtnje alata $20\,000\text{ min}^{-1}$ najviša razina zvučnoga tlaka izmjerena je na frekvenciji 800 Hz. Pri frekvenciji vrtnje alata $22\,000\text{ min}^{-1}$ najviša razina zvučnoga tlaka izmjerena je na frekvenciji 630 Hz. Na osnovu grafikona (slika 55 i 56) i prezentiranih rezultata uočavamo da s povećanjem frekvencije vrtnje alata raste frekvencija na kojoj je izmjerena najveća razina zvučnoga tlaka.

4.3.3. Analiza razine zvučnoga tlaka pri uporabi glodala s dijamantnim oštricama (TIP 3)

Rezultati izmjerene prosječne razine zvučnoga tlaka pri glodanju s alatom TIP 3 prezentirani su u tablici 23., dok su rezultati dvofaktorske ANOVA-e prikazani u tablici 24. i na slikama 61. i 62. Sve vrijednosti izmjerenih razina zvučnoga tlaka pri uporabi glodala TIP 3 navedene su u prilogu rada (prilog 3).

Tablica 23. Vrijednosti razina zvučnoga tlaka alata TIP 3 u ovisnosti o parametrima obrade

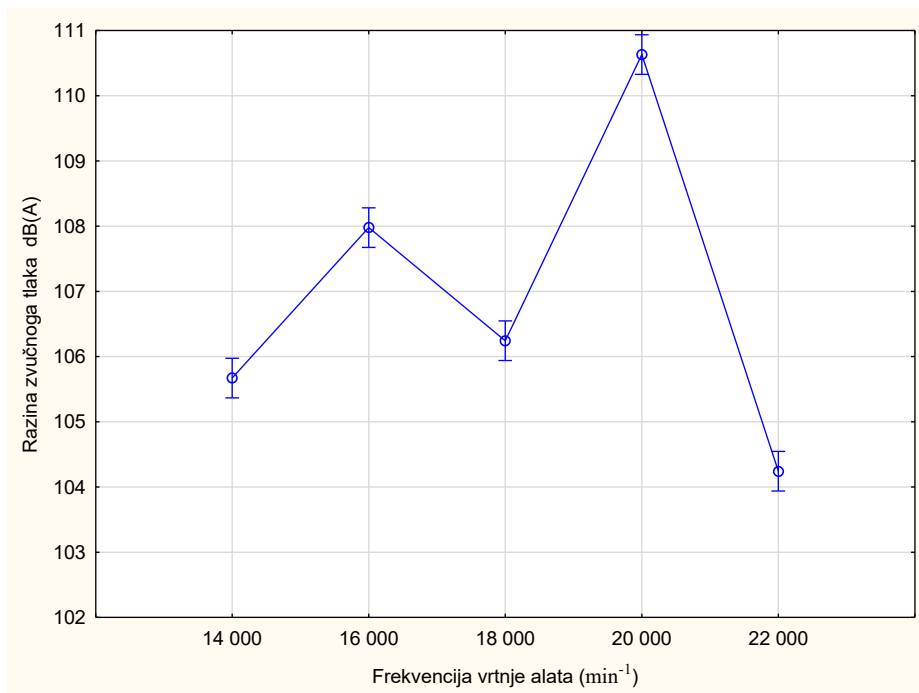
Izvor varijacije	Razina faktora	Razina faktora	N	Razina zvučnoga tlaka dB(A) Aritmetička srednja vrijednost	Razina zvučnoga tlaka dB(A) Standardna devijacija	Razina zvučnoga tlaka dB(A) Standardna pogreška
Ukupno			300	105,10	2,23	0,13
Frekvencija vrtnje	14 000		60	106,28	2,34	0,30
Frekvencija vrtnje	16 000		60	103,91	2,00	0,26
Frekvencija vrtnje	18 000		60	104,10	2,37	0,31
Frekvencija vrtnje	20 000		60	105,52	1,92	0,25
Frekvencija vrtnje	22 000		60	105,71	1,38	0,18
Posmična brzina	15		150	103,41	1,55	0,13
Posmična brzina	25		150	106,80	1,33	0,11
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	14 000	15	30	104,42	1,48	0,27
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	14 000	25	30	108,15	1,32	0,24
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	16 000	15	30	102,25	1,24	0,23
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	16 000	25	30	105,57	0,93	0,17
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	18 000	15	30	101,89	0,90	0,17
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	18 000	25	30	106,30	0,72	0,13
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	20 000	15	30	103,80	0,73	0,13
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	20 000	25	30	107,23	0,97	0,18
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	22 000	15	30	104,68	0,78	0,14
Frekvencija vrtnje×posmična brzina	22 000	25	30	106,74	1,04	0,19

Tablica 24. Utjecaj frekvencije vrtnje i posmične brzine na razinu zvučnoga tlaka alata TIP 3

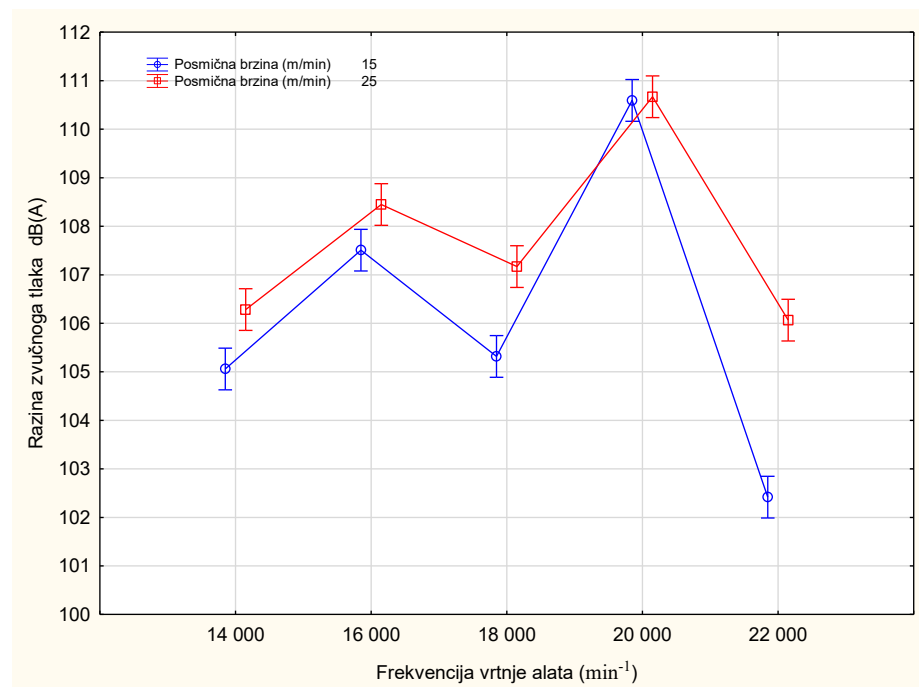
Izvor varijacije	SS	Stupanj slobode	MS	F	p	Tukey test
Frekvencija vrtnje (min^{-1})	262	4	66	61	0,00	(1,3)(2)(4)(5)
Posmična brzina (m/min)	861	1	861	795	0,00	
Frekvencija × posmična brzina	44	4	11	10	0,00	
Pogreška	314	290	1			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						

Frekvencija vrtnje i posmična brzina imaju statistički signifikantan utjecaj na razinu zvučnoga tlaka pri glodanju s glodalom TIP 3. Na osnovu vrijednosti F iz tablice 24. uočavamo da posmična

brzina ima značajniji utjecaj na razinu zvučnoga tlaka nego frekvencija vrtnje alata, što se može obrazložiti povećanjem volumena odstranjenog materijala koji djeluje na emitiranje zvuka.



Slika 61. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka alata TIP 3 izmjerene pri različitim frekvencijama vrtnje

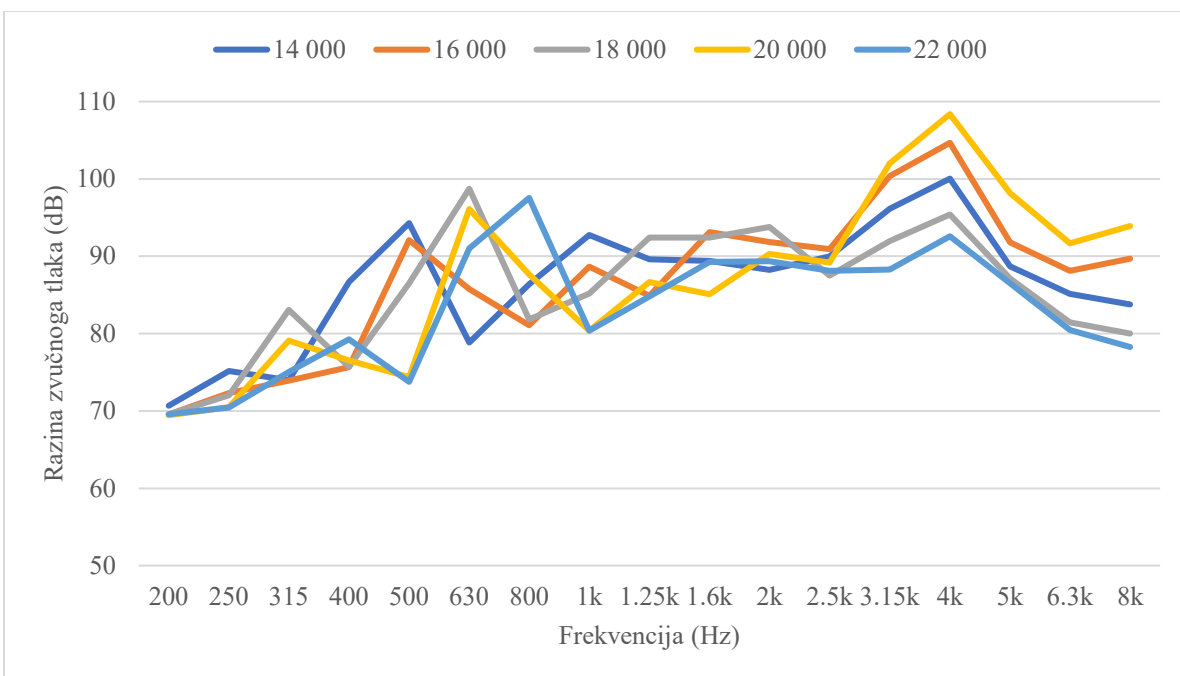


Slika 62. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka alata TIP 3 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i posmičnoj brzini

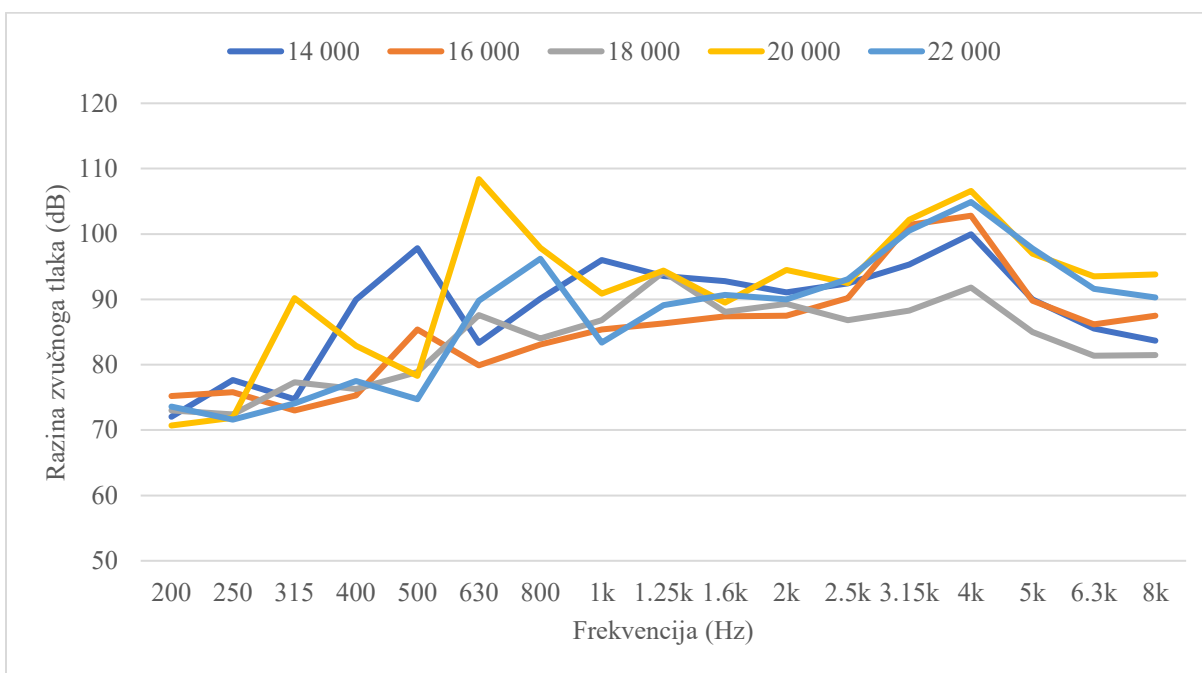
Pri promjeni frekvencije vrtnje uočava se da razina zvučnoga tlaka naizmjenično raste i opada. To nam pokazuje da razina zvučnoga tlaka ne ovisi dominantno o frekvenciji vrtnje alata, već ovisi o nizu drugih čimbenika (vibracijama, geometriji alata). Najvažniji čimbenik koji utječe na zvučni tlak kod alata je pojava rezonancija. Svaki alat ima vlastite frekvencije i pri određenim frekvencijama vrtnje alata dolazi do pojave rezonancije.. Ukoliko se frekvencija vrtnje poklopi s vlastitom frekvencijom alata dolazi do značajnog povećanja ukupne razine zvučnoga tlaka. S povećanjem ili smanjenjem frekvencije vrtnje alata, pomjeramo se iz područja rezonancije alata što se manifestira u smanjenju zvučnoga tlaka. Iz ovoga možemo zaključiti da sa promjenom frekvencije vrtnje možemo značajno utjecati na smanjenje razine zvučnoga tlaka, što je izuzetno važno jer prema zakonskim normama razina buke u zatvorenim prostorima ne smije prelaziti granične vrijednosti od 85 dB(A) prema HSE (2009).

Povećanje posmične brzine uzrokuje statistički signifikantnu promjenu razine zvučnoga tlaka (tablica 24). S povećanjem posmične brzine raste količina materijala koji se odstranjuje u jedinici vremena, uzrokujući povećanje snage rezanja, a koja dalje uzrokuje povećanje razine zvučnoga tlaka. Na temelju rezultata utjecaja interakcije parametara obrade (tablica 24, slika 62) vidljivo je da postoji statistički značajna interakcija između frekvencije vrtnje i posmične brzine na razinu zvučnoga tlaka, što znači da je utjecaj frekvencije vrtnje alata na razinu zvučnoga tlaka različit pri različitim posmičnim brzinama.

Tercni spektar razine zvučnoga tlaka za glodalo TIP 3 prikazan je na slikama 63. i 64. S obzirom na to da je razina zvučnoga tlaka najizraženija na frekvencijama u rasponu 200–8000 Hz, u tom području je prikazan spektar razine zvučnoga tlaka, dok su izmjereni rezultati cijelog frekvencijskog područja prikazani u prilogu rada.



Slika 63. Tercni spektar razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata TIP 3, pri prosječnoj posmičnoj brzini od 15 m/min



Slika 64. Tercni spektar razine zvučnoga tlaka u u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata TIP 3, pri prosječnoj posmičnoj brzini od 25 m/min

Kod alata TIP 3 u frekventnom području od 200 – 8000 Hz pri posmičnoj brzini od 10-20 m/min, kod frekvencije vrtnje od 14 000 min⁻¹ najviše razine zvuka prisutne su u frekvencijama 500 i 4000

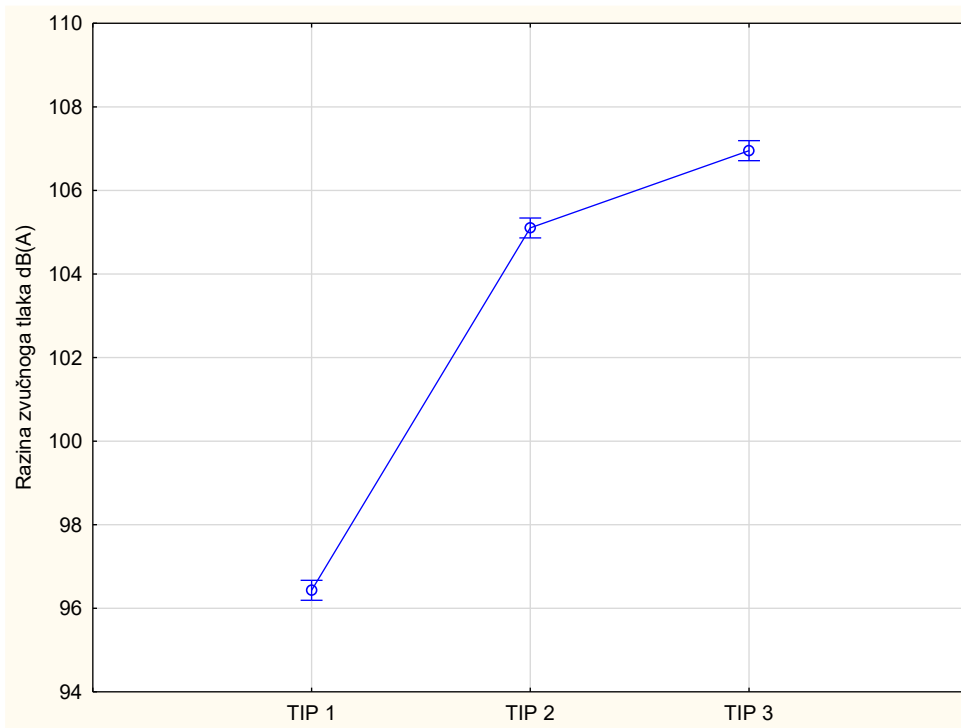
Hz. Pri frekvenciji vrtnje od 16 000 min⁻¹ najviše razine zvučnoga tlaka javljaju se pri frekvencijama od 3150 i 4000 Hz. Pri frekvenciji vrtnje od 18 000 min⁻¹ najviše razine zvučnoga tlaka javljaju se pri frekvencijama od 630 i 4000 Hz. Pri frekvenciji vrtnje od 20 000 min⁻¹ najviše razine zvučnoga tlaka javljaju se pri frekvencijama od 3150 i 4000 Hz. Pri frekvenciji vrtnje od 22 000 min⁻¹ najviše razine zvučnoga tlaka javljaju se pri frekvencijama od 800 i 4000 Hz.

4.3.4. Analiza izmjerenih razina zvučnoga tlaka sva tri tipa alata istovremeno

Na temelju rezultata predstavljenih u poglavljima (4.3.1; 4.3.2; 4.3.3) formulirani su zbirni rezultati izmjerenih vrijednosti razina zvučnoga tlaka za sva tri korištena alata. Rezultati trofaktorske ANOVA-e izmjerenih vrijednosti razina zvučnoga tlaka za različite vrste alata prikazani su u tablici 24. i na slikama 65. do 68.

Tablica 25. Utjecaj frekvencije vrtnje, posmične brzine i tipa alata na razinu zvučnoga tlaka

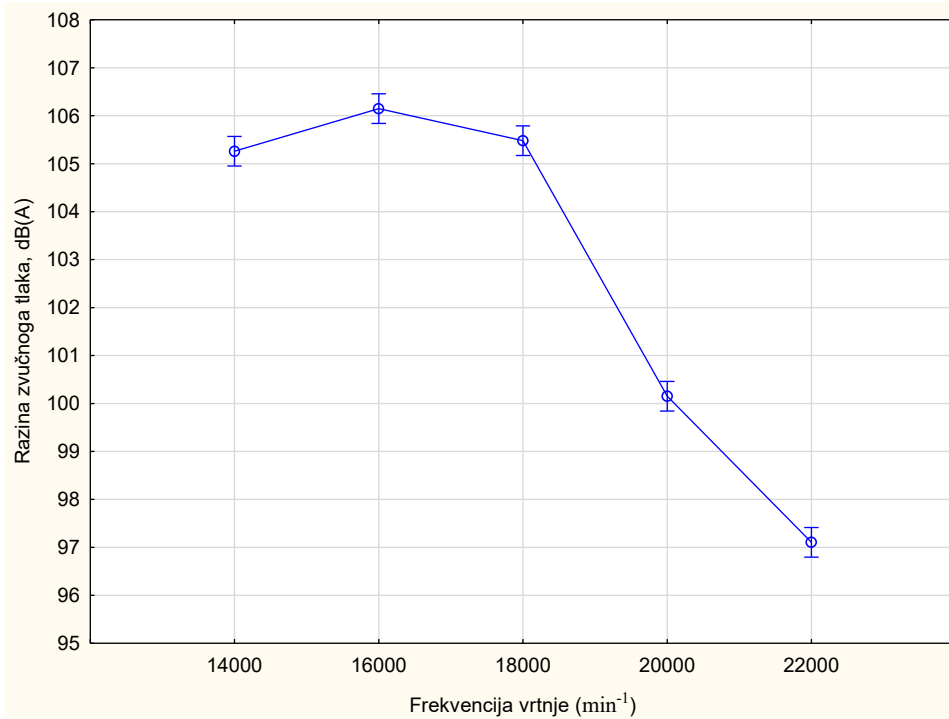
Izvor varijacije	SS	Stupanj slobode	MS	F	p	Tukey test
Alat	18934	2	9467	2126	0,00	(1)(2)(3)
Frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	11497	4	2874	646	0,00	(1,3,)(2)(4) (5)
Posmična brzina (m/min)	1239	1	1239	278	0,00	(1)(2)
Alat × frekvencija vrtnje	27687	8	3461	777	0,00	
Alat × posmična brzina	134	2	67	15	0,00	
Frekvencija × posmična brzina	197	4	49	11	0,00	
Alat × frekvencija × posmična brzina	273	8	34	8	0,00	
Pogreška	3874	870	4			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade p<0,05						



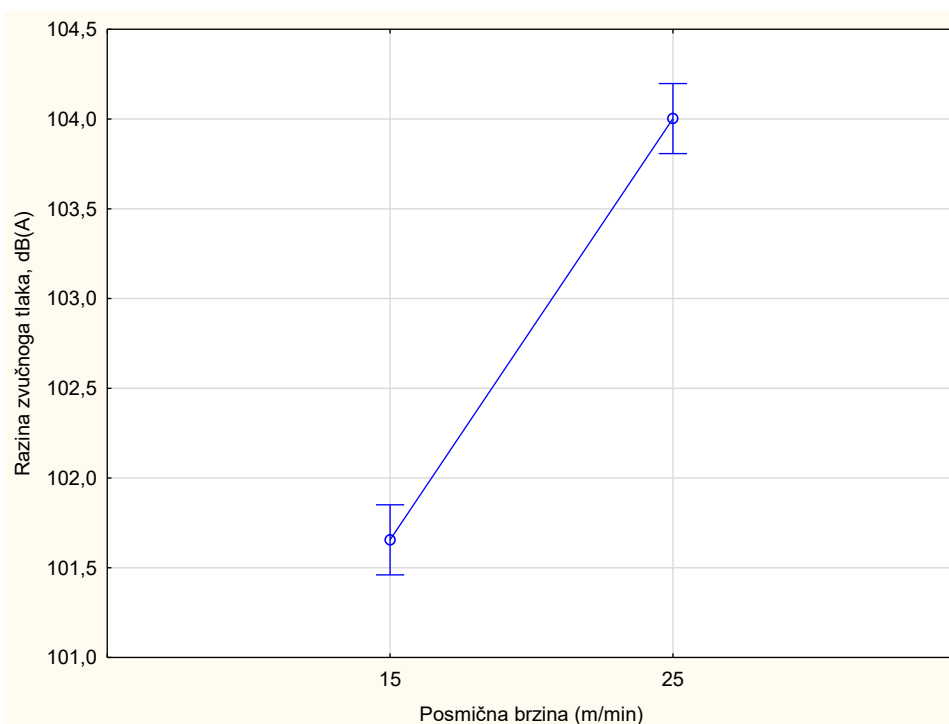
Slika 65. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka za različite tipove alata

Ostvarena vrijednosti prosječnih razina zvučnoga tlaka međusobno su statistički signifikantno različiti. Najmanje vrijednosti razine zvučnoga tlaka izmjerene su pri glodanju furnirskoga uslojenog drva alatom TIP 1. Na osnovu rezultata prikazanih na slici 65. također možemo zaključiti kako glodala s prevlakama (TIP 1, TIP 2) emitiraju niže razine zvučnoga tlaka u odnosu na glodalo TIP 3 koje nije presvučeno prevlakom. Kod alata s prevlakama strugotina uz manji otpor trenja klizi preko oštrice ostvarujući smanjuje emisija zvučnoga tlaka. Osim toga konstrukcija alata TIP 3 sa više odvojenih oštrica uzrokuje različita vrtloženja zraka između njih te time i drugačije razine zvučnoga tlaka kod različitih frekvencija zvučnog tlaka. Kut nagiba oštrice dodatni je utjecajni čimbenik različite frekvencije i razine emisije zvučnoga tlaka koji povećanjem kuta nagiba prsnog dijela oštrice uzrokuje povećanje emisija zvučnoga tlaka (Pangestua i dr., 2020).

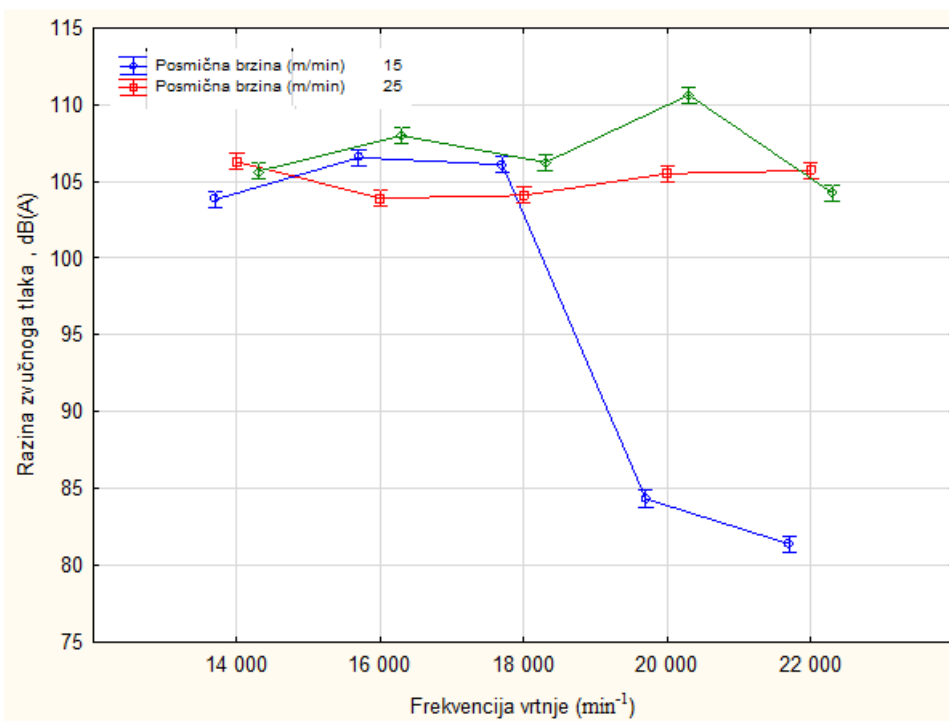
Rezultati analize razina zvučnoga tlaka za sva tri tipa alata zajedno u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata pokazuju da frekvencija vrtnje ima statistički signifikantan utjecaj na razinu zvučnoga tlaka (tablica 25, slika 66). Na slici 67. prikazani su rezultati trofaktorske ANOVA-e s interakcijom alata i frekvencije vrtnje alata.



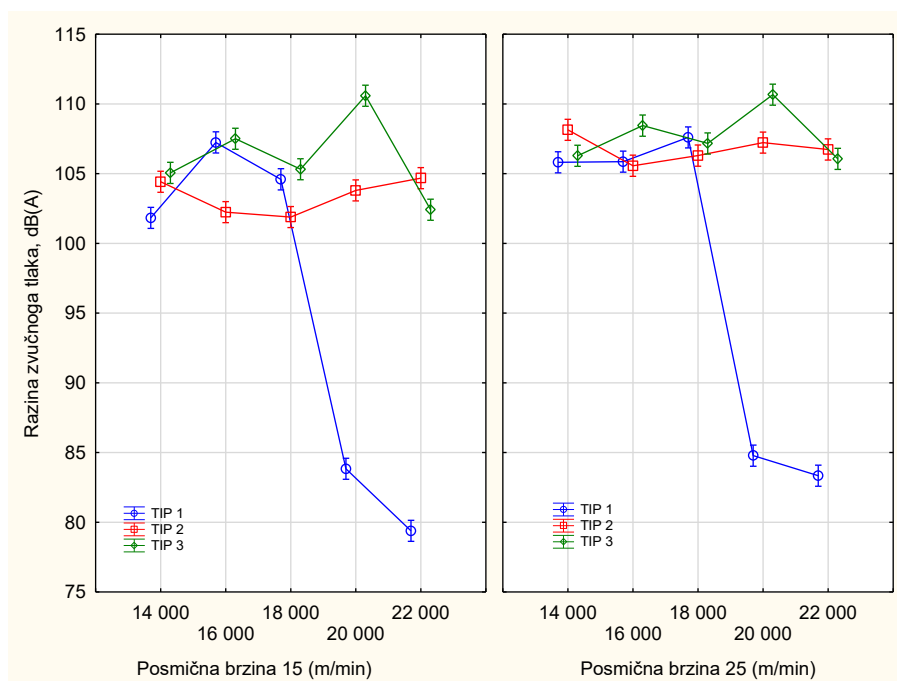
Slika 66. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje



Slika 67. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o posmičnoj brzini



Slika 68. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i tipu alata



Slika 69. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata, posmičnoj brzini i tipu alata

Pri frekvenciji vrtnje alata od $16\,000\text{ min}^{-1}$ zabilježena je najveća razina zvučnoga tlaka. Na temelju ovih rezultata možemo zaključiti da tu frekvenciju vrtnje treba izbjegavati pri glodanju na CNC strojevima, jer se pri toj frekvenciji znatno povećava emisija buke koja je nepoželjna u radnom okruženju. Slika 66. pokazuje da sa povećanjem frekvencije vrtnje alata dolazi do smanjenja razine zvučnoga tlaka. Na temelju predstavljenih rezultata vidimo da posmična brzina ima statistički signifikantan utjecaj na razinu zvučnoga tlaka pri glodanju furnirskoga uslojenog drva, te se može zaključiti da povećanje posmične brzine uzrokuje povećanje razine zvučnoga tlaka (slika 67). Slika 68. i tablica 25. pokazuje statistički signifikantan utjecaj interakcije frekvencije vrtnje i tipa alata na razinu zvučnoga tlaka, što znači da je utjecaj frekvencije vrtnje alata na razinu zvučnoga tlaka različit pri uporabi različitih tipova alata. Isto tako slika 69. i tablica 25. pokazuju statistički signifikantan utjecaj interakcije frekvencije vrtnje, posmične brzine i tipa alata na razinu zvučnoga tlaka. Analizom vrijednosti F i tablice 25. uočavamo da dominantan utjecaj na razinu zvučnoga tlaka ima tip alata, zatim frekvencija vrtnje alata, te na kraju posmična brzina. Iz dobivenih rezultata možemo zaključiti da pored parametara obrade na razinu zvučnoga tlaka utječe i dizajn i geometrija glodala (korištena glodala se geometrijski razlikuju) što je u svom istraživanju zaključio i Vitchev (2013).

4.4. Analiza utjecaja parametara obrade na povećanje polumjera zaobljenosti oštrice

4.4.1. Analiza polumjera zaobljenosti oštrice kod spiralnog glodala s kontinuiranim oštricama (TIP 1)

Zbog geometrijskih karakteristika alata TIP 1 (gornja i donja oštrica su pod različitim kutovima) proveden je T-test zavisnih uzoraka, kako bi se utvrdilo postoji li statistički signifikantna razlika u polumjerima zaobljenosti gornje i donje oštrice kod alata TIP 1, te su rezultati prikazani u tablici 26.

Tablica 26. T-test zavisnih uzoraka za polumjer zaobljenosti gornje i donje oštrice alata TIP 1

Frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	Izvor varijacije	Aritm. srednja vrijednost	Standar. devijacija	N	Razlika	Std.Dev. razlika	t	df.	p
14 000	Povećanje polumjera gornje oštrice	13,89	0,58						
	Povećanje polumjera donje oštrice	13,68	0,50	5	0,22	0,79	0,61	4,00	0,58
16 000	Povećanje polumjera gornje oštrice	16,10	1,21						
	Povećanje polumjera donje oštrice	15,02	0,57	5	1,08	1,65	1,46	4,00	0,22
18 000	Povećanje polumjera gornje oštrice	16,48	0,71						
	Povećanje polumjera donje oštrice	15,25	1,09	5	1,23	1,43	1,93	4,00	0,13
20 000	Povećanje polumjera gornje oštrice	7,53	2,19						
	Povećanje polumjera donje oštrice	9,20	0,44	5	-1,68	2,06	-1,82	4,00	0,14
22 000	Povećanje polumjera gornje oštrice	7,37	1,70						
	Povećanje polumjera donje oštrice	8,11	1,44	5	-0,74	2,51	-0,66	4,00	0,54

S obzirom na to da je T-test za sve frekvencije vrtnje pokazao kako između polumjera zaobljenosti gornje i donje oštrice na istom alatu ne postoji statistički signifikantna razlika, izmjereni polumjeri zaobljenosti gornje i donje oštrice nisu odvojeno analizirani. Ovakvi rezultati su bili očekivani, jer su obje oštrice bile u jednakom zahvatu s furnirskim uslojenim drvom.

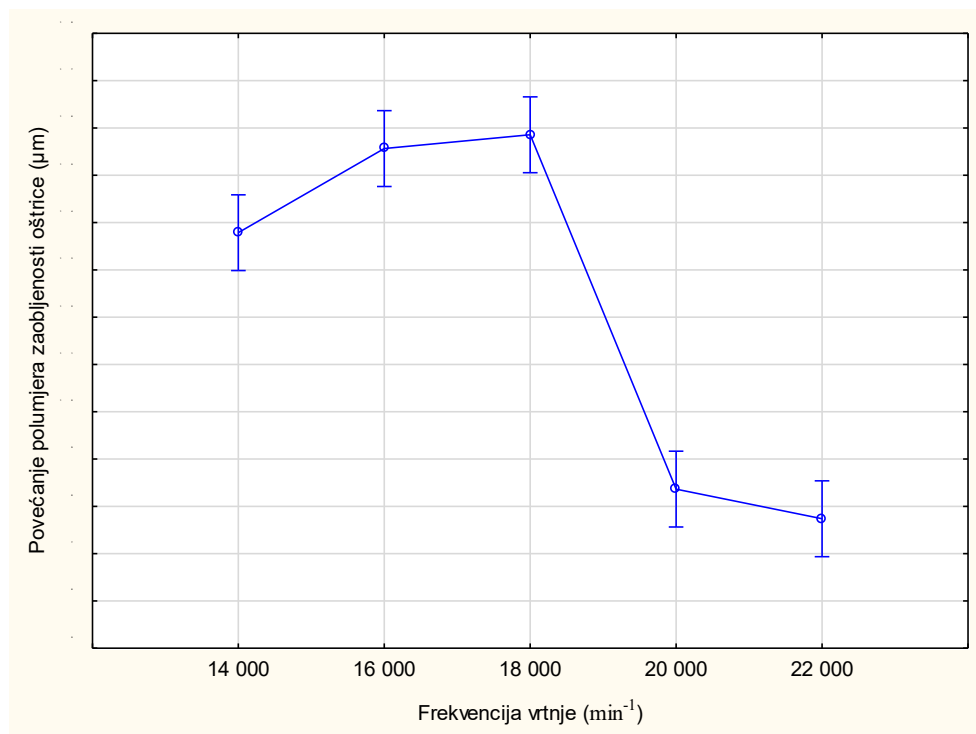
Deskriptivna statistika izmjerenih vrijednosti polumjera zaobljenosti oštrice pri glodanju furnirskoga uslojenog drva sa spiralnim glodalom TIP 1 prikazana je u tablici 27. Rezultati ANOVA-e zajedno sa Tukey testom prikazani su u tablici 28. i na slici 70.

Tablica 27. Vrijednosti polumjera zaobljenosti oštrice alata TIP 1 u ovisnosti o parametrima obrade

Frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	<i>N</i>	Početni polumjer zaobljenosti oštrice (μm) Aritmetička srednja vrijednost	Povećanje polumjera zaobljenosti oštrice (μm) Aritmetička srednja vrijednost	Povećanje polumjera zaobljenosti oštrice (μm) Standardna devijacija	Povećanje polumjera zaobljenosti oštrice (μm) Standardna pogreška
14 000	10	4,48	13,79	0,52	0,16
16 000	10	5,70	15,56	1,06	0,33
18 000	10	8,73	15,86	1,08	0,34
20 000	10	6,49	8,36	1,73	0,55
22 000	10	7,98	7,74	1,54	0,49

Tablica 28. Utjecaj frekvencije vrtnje na polumjer zaobljenosti oštrice alata TIP 1

Izvor varijacije	<i>SS</i>	Stupanj slobode	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	Tukey test
Frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	617,98	4,00	154,49	97,54	0,00	(1)(2,3)(4,5)
Pogreška	71,28	45,00	1,58			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						



Slika 70. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti povećanja polumjera zaobljenosti oštrice alata TIP 1 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje

Pri manjim frekvencijama vrtnje alata ($14\,000 - 18\,000 \text{ min}^{-1}$) nakon obrađenih 60 m furnirskoga uslojenog drva povećanje polumjera zaobljenosti oštrice je znatno veće. Pri većim frekvencijama vrtnje povećanje polumjera zaobljenosti oštrice je manje za 45-52 % u odnosu na niže frekvencije vrtnje. Na osnovu rezultata može se zaključiti da je s povećanjem frekvencije vrtnje s $14\,000$ na $22\,000 \text{ min}^{-1}$ zabilježeno smanjenje zatupljenja oštrice. Ranija istraživanja (Bendikiene i Keturakisa, 2017) pokazala su da s povećanjem posmaka po zubu, tj. debljine strugotine, dolazi do povećanja polumjera zaobljenosti oštrice. Smanjenjem frekvencije vrtnje alata povećava se posmak po zubu i debljina strugotine.

Oštrica alata TIP 1 presvučena je prevlakom. Prevlaka na oštrici alata omogućava bolje klizanje strugotine preko oštrice, smanjujući na taj način trenje. Energija trenja pretvara se u toplinsku energiju, koja se prenosi na alat uzrokujući zatupljenje oštrice. Početni polumjer zaobljenosti oštrice kreće se u rasponu od $4,48$ do $8,73 \mu\text{m}$ (Prilog 6).

4.4.2. Analiza polumjera zaobljenosti oštrice kod spiralnog glodala s nazubljenim oštricama (TIP 2)

Rezultati T-testa zavisnih varijabli izmjerenih vrijednosti povećanja polumjera zaobljenosti gornje i donje oštrice alata TIP 2 prikazani su u tablici 29. T- test zavisnih varijabli proveden je kako bi se utvrdilo postoji li statistički signifikantna razlika u izmjerenim polumjerima zaobljenosti gornje i donje oštrice. Deskriptivna statistika izmjerenih vrijednosti polumjera oštrica nakon obrađenih 60 m furnirskoga uslojenog drva sa spiralnim glodalom TIP 2 prikazana je u tablici 30. Jednofaktorska ANOVA prikazana je u tablici 31. i na slici 71.

Tablica 29. T-test zavisnih uzoraka za povećanje polumjera zaobljenosti gornje i donje oštrice alata TIP2

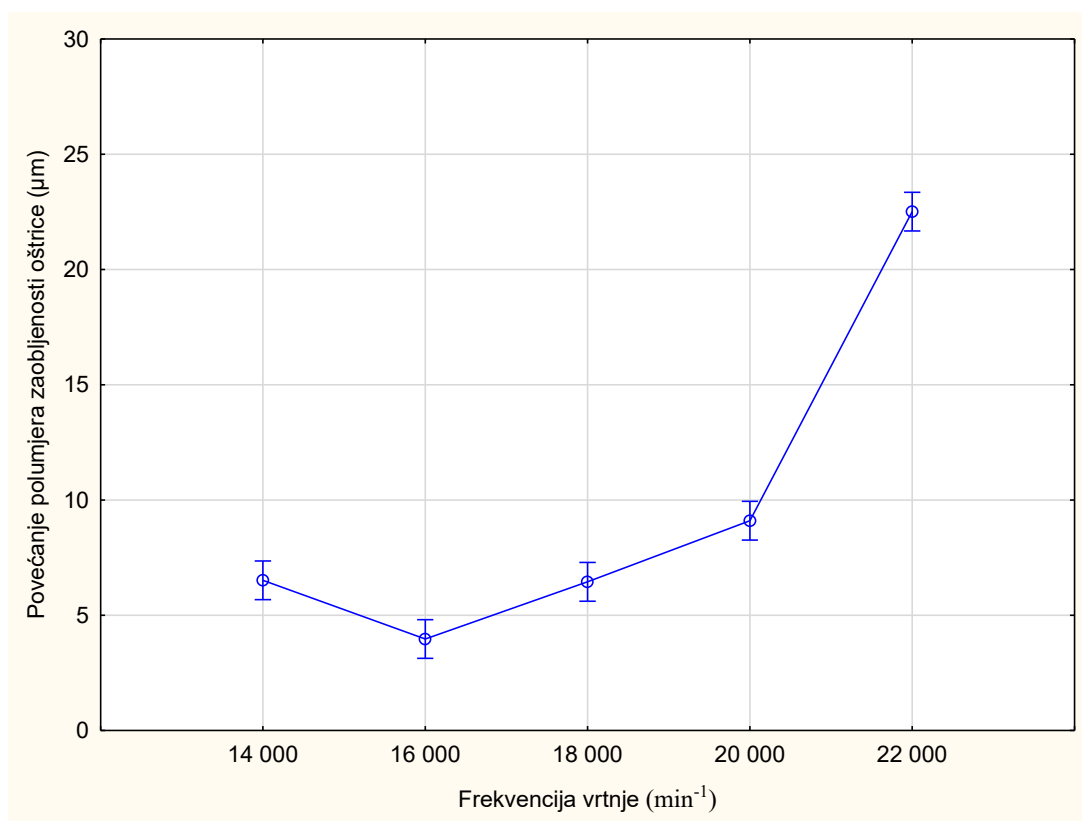
Frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	Izvor varijacije	Aritmetička srednja vrijednost	Standardna devijacija	N	Standardna devijacija razlika	t	df.	p
14 000	Povećanje polumjera zaobljenosti gornje oštrice	6,96	0,81					
	Povećanje polumjera zaobljenosti donje oštrice	6,07	1,22	5,00	1,05	1,89	4,00	0,13
16 000	Povećanje polumjera zaobljenosti gornje oštrice	4,92	0,89					
	Povećanje polumjera zaobljenosti donje oštrice	3,01	1,57	5,00	1,59	2,70	4,00	0,05
18 000	Povećanje polumjera zaobljenosti gornje oštrice	6,51	1,03					
	Povećanje polumjera zaobljenosti donje oštrice	6,39	1,65	5,00	2,34	0,12	4,00	0,91
20 000	Povećanje polumjera zaobljenosti gornje oštrice	8,41	0,53					
	Povećanje polumjera zaobljenosti donje oštrice	9,79	0,69	5,00	1,13	- 2,73	4,00	0,05
22 000	Povećanje polumjera zaobljenosti gornje oštrice	22,13	1,20					
	Povećanje polumjera zaobljenosti donje oštrice	22,90	1,95	5,00	2,92	- 0,59	4,00	0,59

Tablica 30. Vrijednosti polumjera zaobljenosti oštrice alata TIP 2 u ovisnosti o parametrima obrade

Frekvencija vrtnje (min^{-1})	N	Početni polumjer zaobljenosti oštrice (μm) Aritmetička srednja vrijednost	Povećanje polumjera zaobljenosti oštrice (μm) Aritmetička srednja vrijednost	Povećanje polumjera zaobljenosti oštrice (μm) Standardna devijacija	Povećanje polumjera zaobljenosti oštrice (μm) Standardna pogreška
14 000	10	6,66	6,52	1,09	0,34
16 000	10	7,33	3,97	1,57	0,5
18 000	10	9,41	6,45	1,30	0,41
20 000	10	7,72	9,10	0,93	0,29
22 000	10	5,4	22,51	1,58	0,50

Tablica 31. Utjecaj frekvencije vrtnje na povećanje polumjera zaobljenosti oštrice alata TIP 2

Izvor varijacije	SS	Stupanj slobode	MS	F	p	Tukey test
Frekvencija vrtnje (min^{-1})	4713,875	1	4713,875	2712,147	0,00	(1,3)(2) (4)(5)
Pogreška	2180,549	4	545,137	313,647	0,00	
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						



Slika 71. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti veličine povećanja polumjera zaobljenosti oštrice alata TIP 2 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje

Promjena frekvencije vrtnje alata utječe na zatupljenje oštrice alata. Najveće povećanje polumjera zaobljenosti oštrice zabilježeno je pri frekvenciji vrtnje alata od $22\,000\text{ min}^{-1}$ i iznosi $22,90\text{ }\mu\text{m}$ (slika 71). Povećanje frekvencije vrtnje (brzine rezanja) manifestira se u smanjenju vijeka trajanja alata (Csanady i Magos, 2020; Szwajka i Trzepiecinski, 2016;), a što je u vezi s povećanjem polumjera zaobljenosti oštrice. Povećanjem frekvencije vrtnje, raste i brzina rezanja, što uzrokuje veću silu trenja između materijala i oštrice. Alat i drvo izloženi su učestalijim mehaničkim i toplinskim udarima, koji proizvode veliku količinu topline koja povećava temperaturu alata, povećavajući polumjer zaobljenosti oštrice. Rezultati prikazani na slici 71. pokazuju da s povećanjem frekvencije vrtnje raste i polumjer zaobljenosti oštrice, što je potvrda rezultata Darmawan i dr. (2001), te Wei i dr., (2019). Porastom frekvencije vrtnje raste toplina alata (Kminiak i dr., 2023; Zhu i dr., 2024). Toplina alata i polumjer zaobljenosti oštrice su u korelaciji, tj. povećanjem topline povećava se i polumjer zaobljenosti oštrice. Visoke frekvencije vrtnje i velike posmične brzine uzrokuju nagli porast temperature u zoni glodanja. Povišene temperature dovode do smanjenja tvrdoće oštrice, pa se pri kontaktu oštrice s tvrdim česticama u materijalu stvaraju abrazivne brazde. Te abrazivne brazde predstavljaju početnu fazu zatupljenja, jer one predstavljaju osnovu za daljnje povećanje polumjera zaobljenosti oštrice (Wei i dr., 2019).

Analizirajući rezultate dobivene kod alata TIP 2 uočavamo da su oni suprotni od rezultata dobivenih kod alata TIP 1, gdje smo dobili da s povećanjem frekvencije vrtnje dolazi do smanjenja polumjera zaobljenosti oštrice. Razlog za suprotnost u dobivenim rezultatima treba tražiti u načinu nanošenja prevlake na oštricu alata. Kod alata TIP 2 prsna/prednja strana oštrice nije imala sloj premaza jer je naknadno brušena. Pored toga, ako analiziramo dobivene grafikone ovisnosti temperature o frekvenciji vrtnje (slika 42), uočavamo da kod alata TIP 1 s porastom frekvencije vrtnje, temperatura alata opada, a i polumjer zaobljenosti oštrice također sporije se povećava. Kod alata TIP 2 s porastom frekvencije vrtnje dolazi do povećanja kako temperature alata (slika 44), tako i polumjera zaobljenosti oštice, što nam ukazuje da su ove dvije veličine međusobno povezane, kako je i dokazano u istraživanjima Wei i dr. (2019).

4.4.3. *Analiza polumjera zaobljenosti oštrice kod glodala s dijamantnim oštricama*
(TIP 3)

Rezultati T-testa zavisnih varijabli izmjerenih vrijednosti povećanja polumjera zaobljenosti gornje i donje oštrice alata TIP 3 prikazani su u tablici 32. Deskriptivna statistika izmjerenih vrijednosti polumjera oštrica nakon obrađenih 60 m furnirskoga uslojenog drva sa spiralnim glodalom TIP 3 prikazana je tablicom 33. Jednofaktorska ANOVA prikazana je tablicom 34. i slikom 72.

Tablica 32. T-test zavisnih uzoraka za polumjer zaobljenosti gornje i donje oštrice alata TIP 3

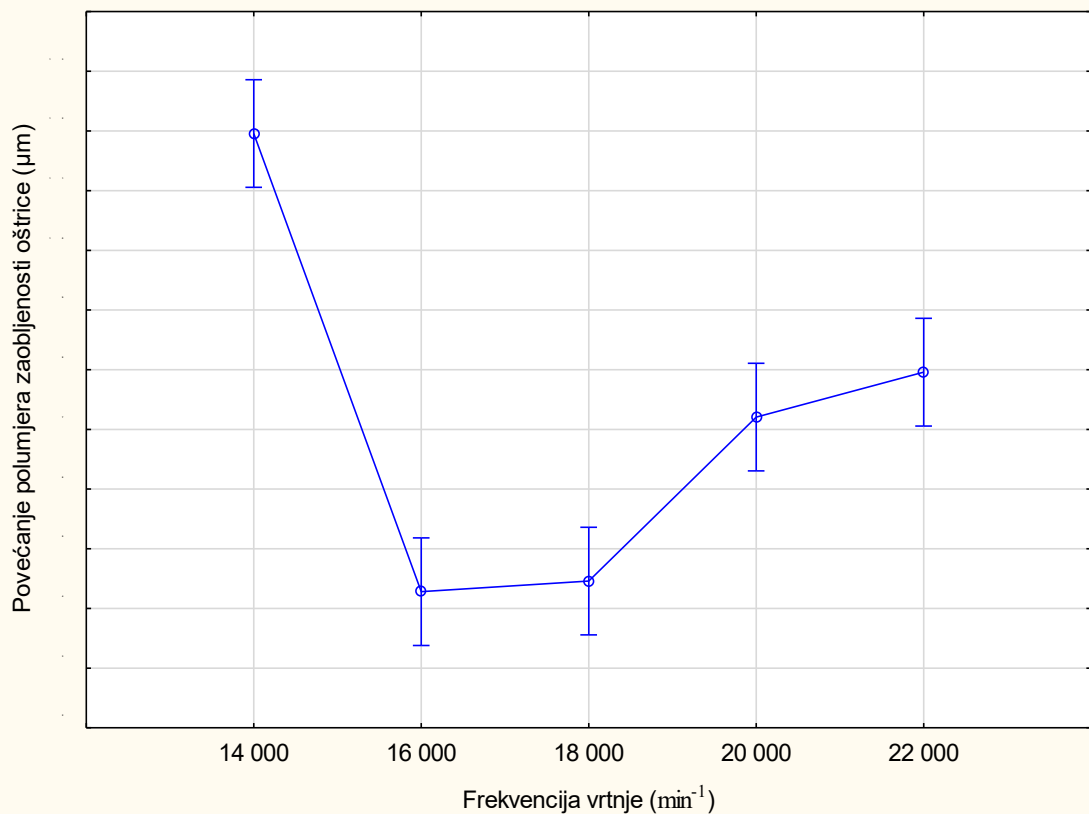
Frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	Izvor varijacije	Aritmetička srednja vrijednost	Standardna devijacija	<i>N</i>	Standardna devijacija razlika	<i>t</i>	<i>df.</i>	<i>p</i>
14 000	Povećanje polumjera zaobljenosti gornje oštrice	10,86	1,35		2,12	-2,50	4	0,06
	Povećanje polumjera zaobljenosti donje oštrice	13,24	1,25	5				
16 000	Povećanje polumjera zaobljenosti gornje oštrice	4,37	1,01		0,99	0,41	4	0,69
	Povećanje polumjera zaobljenosti donje oštrice	4,18	1,27	5				
18 000	Povećanje polumjera zaobljenosti gornje oštrice	5,19	1,71		1,58	2,08	4	0,10
	Povećanje polumjera zaobljenosti donje oštrice	3,71	1,01	5				
20 000	Povećanje polumjera zaobljenosti gornje oštrice	6,42	0,91		1,61	-2,72	4	0,05
	Povećanje polumjera zaobljenosti donje oštrice	8,38	1,28	5				
22 000	Povećanje polumjera zaobljenosti gornje oštrice	8,10	1,12		1,60	0,41	4	0,70
	Povećanje polumjera zaobljenosti donje oštrice	7,8	0,97	5				

Tablica 33 Vrijednosti povećanja polumjera zaobljenosti oštrice alata TIP 3 u ovisnosti o parametrima obrade

Frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	N	Početni polumjer zaobljenosti oštrice (μm) Arit. Sred. vrijednost	Povećanje polumjera zaobljenosti oštrice (μm) Arit. Sred. vrijednost	Povećanje polumjera zaobljenosti oštrice (μm) Std.Dev.	Povećanje polumjera zaobljenosti oštrice (μm) Std.pogr.
14 000	10	3,80	11,96	1,76	0,56
16 000	10	6,44	4,28	1,09	0,34
18 000	10	5,28	4,46	1,54	0,49
20 000	10	5,44	7,21	1,54	0,49
22 000	10	5,24	7,96	1,01	0,32

Tablica 34. Utjecaj frekvencije vrtnje na polumjer zaobljenosti oštrice alata TIP 3

Izvor varijacije	<i>SS</i>	Stupanj slobode	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	Tukey test
Frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	2572,06	1	2572,06	1281,68	0,00	(1)(2,3)(4,5)
Pogreška	392,45	4	98,11	48,89	0,00	
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						



Slika 72. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti povećanja polumjera zaobljenosti oštrice alata TIP 3 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje

Najveće povećanje polumjera zaobljenja oštrice zabilježeno je pri glodanju na najnižoj frekvenciji vrtnje alata, a najmanje pri frekvenciji vrtnje alata 16 000. Povećanjem frekvencije vrtnje alata od 16 000 do 22 000 raste i povećanje polumjera zaobljenosti oštrice alata. Najveći polumjer zaobljenosti oštrice dobiven je pri frekvenciji od 14.000 min^{-1} . Razlog ovakvom ekstremnome zatupljenju pri navedenoj frekvenciji može biti u velikim silama udaraca o drvo pri odstranjivanju strugotina velikih dimenzija za što kod velikog prednjeg kuta alata treba velika snaga, a ti udarci zasigurno ostavljaju tragove na krtoj oštrici dijamanta.

Razlog velikog povećanja polumjera zaobljenosti oštrice može biti i u malom početnom polumjeru zaobljenja oštrice. Početni polumjer zaobljenosti oštrice alata korištenoga pri frekvenciji vrtnje od 14.000 min^{-1} iznosio je 3,8 μm , što je približno 2 μm manje u odnosu na polumjer zaobljenosti alata korištenih pri drugim frekvencijama vrtnje. Zbog toga se taj alat dosta brže zatupljivao jer je oštrica alata bila veoma oštra. Kako bi se potvrdila navedena teza potrebno je napraviti više mjerenja pri navedenoj frekvenciji vrtnje alata, što će biti predmet nastavka ovog istraživanja.

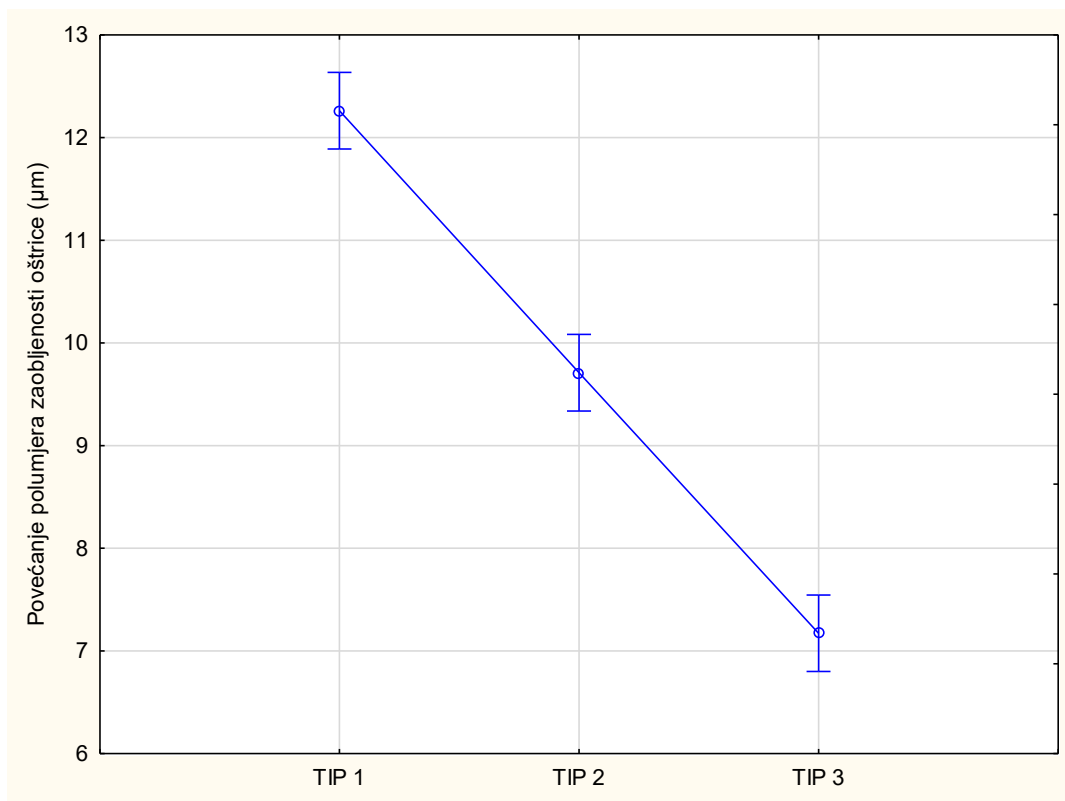
Kad se polumjer zaobljenosti oštrice poveća, efektivnost alata opada i kao takav postaje neupotrebljiv za rad nakon određenoga vremena. Vijek trajanja alata predstavlja vrijeme za koje se polumjer zaobljenosti oštrice poveća od početnog stanja, do veličine iznad koje je alat neupotrebljiv (Chladil i dr., 2019).

4.4.4. Analiza izmjerenih polumjera zaobljenosti oštrice za tri tipa alata

Na temelju rezultata predstavljenih u poglavljima (4.4.1; 4.4.2; 4.4.3) napravljeni su zbirni rezultati izmjerenih vrijednosti povećanja polumjera zaobljenosti oštrice za sva tri korištena alata. Rezultati ANOVA-e izmjerenih vrijednosti povećanja polumjera zaobljenosti oštrice za različite tipove alata prikazani su u tablici 35. i na slici 73., dok je ovisnost povećanja polumjera zaobljenosti oštrice o frekvenciji vrtnje alata prikazana slikom 74. Interakcija frekvencije vrtnje alata i tipa alata prikazana je slikom 75.

Tablica 35. Utjecaj frekvencije vrtnje i tipa alata na povećanje polumjera zaobljenosti oštrice

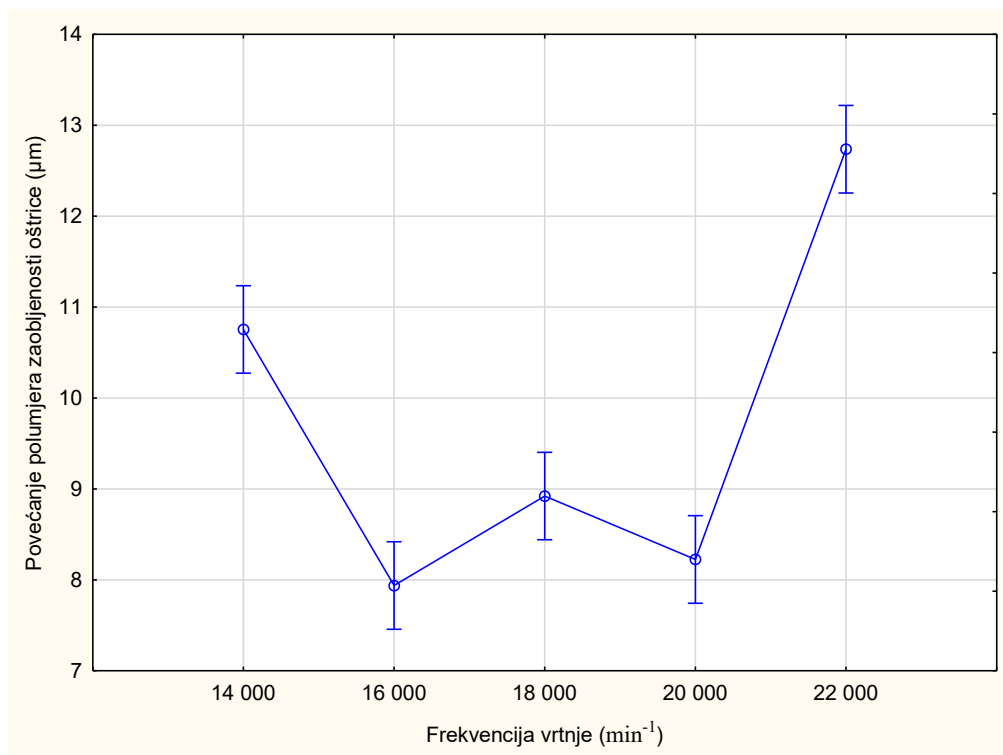
Izvor varijacije	<i>SS</i>	Stupanj slobode	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	Tukey test
Alat	647,7	2	323,85	182,32	0,00	(1)(2)(3)
Frekvencija vrtnje (min ⁻¹)	486,57	4	121,64	68,48	0,00	(1)(2,4)(3,4)(5)
Alat × frekvencija vrtnje	2704,41	8	338,05	190,32	0,00	
Pogreška	239,79	135	1,78			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						



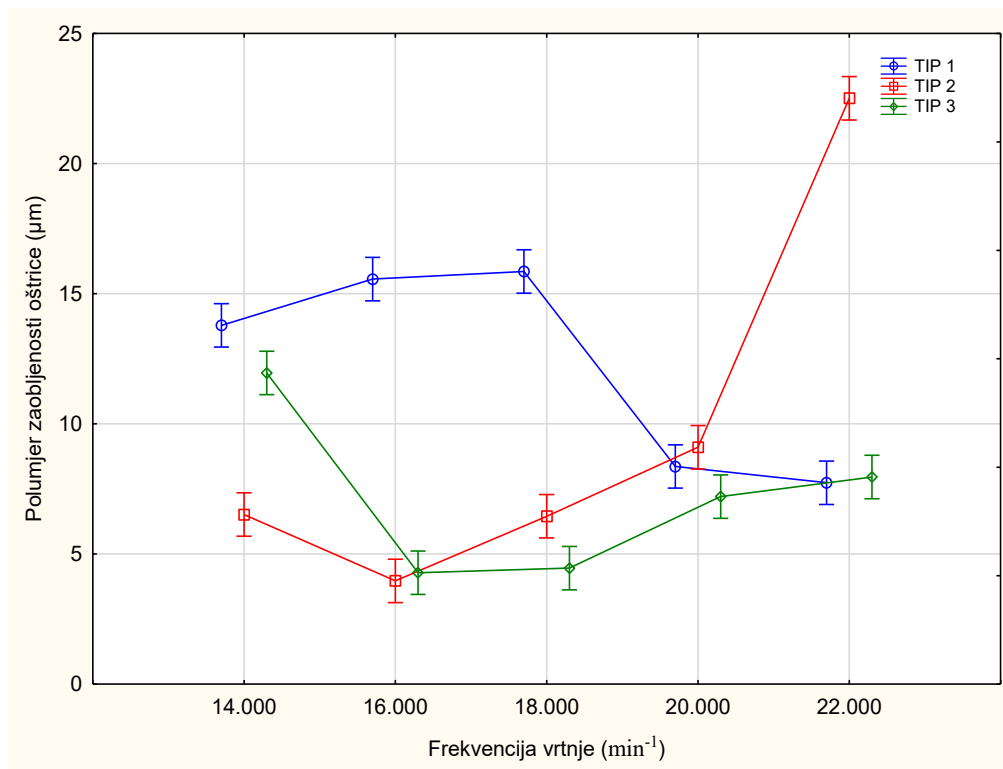
Slika 73. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti povećanja polumjera zaobljenosti oštrice u ovisnosti o tipu alata

Izmjerene vrijednosti povećanja polumjera zaobljenosti oštrice su statistički signifikantne za različite tipove alata. Kod alata TIP 3 dobivene su najmanje vrijednosti povećanja polumjera zaobljenosti oštrice i one su za 25 % manje nego kod alata TIP 2, a za 40 % manje nego kod alata TIP 1. Kod glodala TIP 3 oštrica alata izrađena je od PCD-a, koje je jedan od najtvrdijih materijala. Sintetski dijamanti koji su proizvedeni u laboratoriju u nekim svojstvima čak prednjače u odnosu na prirodne dijamante. Tvrdća, toplinska vodljivost i pokretljivost elektrona neka su od svojstava koja su superiornija kod sintetskih dijamanta. Zbog ovih svojstava, alati izrađeni od PCD-a imaju veću otpornost na habanje te dulji vijeka trajanja. PCD alati imaju mogućnost rada pri većim brzinama rezanja, što u kombinaciji s tvrdćom i manjom zatupljenošću rezultira povećanom kvalitetom površine.

Rezultati prezentirani slikom 75., u skladu su s rezultatima istraživanja Ahmada i Baileya (1999) koji su utvrdili da je tvrdća materijala u jakoj korelaciji sa zatupljenjem alata iskazanom veličinom polumjera zaobljenosti oštrice. Ova činjenica nam govori da je materijal oštrice dominantan čimbenik koji utječe na polumjer zaobljenosti oštrice.



Slika 74. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti povećanja polumjera zaobljenosti oštrice alata u ovisnosti o frekvenciji vrtnje



Slika 75. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti povećanja polumjera zaobljenosti oštrice alata u ovisnosti o frekvenciji vrtnje i tipu alata

Na temelju rezultata prezentiranih na slikama 74. i 75. ne može se utvrditi ovisnost povećanja polumjera zaobljenosti oštrice o frekvenciji vrtnje alata, ali je vidljivo da frekvencija vrtnje alata utječe na polumjer zaobljenosti oštrice. Očito je da drugi faktori na koje nismo mogli utjecati imaju veći utjecaj od frekvencije vrtnje alata. Povećanje polumjera zaobljenosti oštrice nastaje kao rezultat interakcije više faktora kao što su parametri obrade, materijal i geometrija alata, sile rezanja i sl. Konstrukcija i geometrija alata utječu na različito zagrijavanje/hlađenje alata pri različitim frekvencijama vrtnje, a onda posljedično i na polumjer zaobljenosti oštrice alata. Očito je da utjecaj frekvencije vrtnje alata na zatupljenje alata ovisi o konstrukciji alata i da za svaku vrstu alata može se odrediti optimalna frekvencija sa stajališta trajnosti alata. Analizom rezultata prezentiranih u poglavljima 4.2.4, 4.3.4, te 4.4.4 uočavamo vezu između razine zvučnoga tlaka, maksimalnih temperatura i polumjera zaobljenosti oštrice, ako je materijal oštrice i tijela alata izrađen od materijala sličnih svojstava. Kod alata TIP 1 dobivena je veća temperatura alata i veća razina zvučnoga tlaka, nego kod alata TIP 2. Polumjer zaobljenosti oštrice alata TIP 1 veći je nego alata TIP 2. Ovakav rezultat dobiven je uslijed interakcije brojnih faktora kao što su početno zaobljenje, nazubljenost oštrice, konstrukcija zakrivljenosti pazušnog prostora, vrsta premaza i površina na koju je nanesen premaz.

Temperatura alata jedan je od najznačajnijih čimbenika koji utječe na povećanje polumjera zaobljenosti oštrice u obradi drva jer svojstva materijala kao što su tvrdoća, žilavost i kemijska stabilnost opadaju s povećanjem temperature alata (Ahmad i dr., 2003; Porankiewicz i dr., 2008). Horman i dr. (2014) utvrdili su da su polumjer zaobljenosti oštrice i temperatura alata u direktnoj korelaciji. Porastom temperature dolazi do porasta polumjera zaobljenosti oštrice oštrice (Csanady i Magoss, 2020). Istraživanja Sejdiua i dr. (2024) pokazala su vezu između polumjera zaobljenosti oštrice i debljine strugotine. Porastom polumjera zaobljenosti oštrice dolazi do smanjenja debljine strugotine. Naime, pri povećanju polumjera zaobljenosti oštrice pri rezanju dolazi do sabijanje drva, te je debljina strugotine manja. S druge strane, smanjenje debljine strugotine dovodi do povećanja temperature. Uslijed smanjenja debljine strugotine, povećava se trenje između strugotine i alata što uzrokuje povećanje temperature (Igaz i dr., 2019). Temperatura nastala tijekom procesa obrade drva negativno utječu na kvalitetu i točnost proizvoda, a time i na vijek trajanja alata (Bendikiene i Keturakis, 2017).

4.5. Rezultati višekriterijske optimizacije za različite alate

U ovom poglavlju prikazani su rezultati višekriterijske optimizacije provedene metodama TOPSIS i PSI-TOPSIS (modificirana) za tri različita alata. Uz prikaz rangiranja alternativa i određivanja optimalne kombinacije parametara obrade, provedena je analiza varijance (ANOVA) s intervalom pouzdanosti od 95 %, radi utvrđivanja utjecaja parametara obrade na zavisne varijable korištenjem vrijednosti indeksa preferencije (koeficijenta blizine). Parametri s p -vrijednostima manjim od 0.05 smatrani su statistički značajnima, dok je F -vrijednost korištena za procjenu važnosti parametara obrade u objašnjenju varijabilnosti rezultata.

Kod primjene metode TOPSIS, težinski faktori su uzeti jednaki za sve četiri analizirane zavisne varijable (kriterija) kod sva tri alata (T -temperatura; Z_t – razina zvučnoga tlaka; Q – učinak obrade; r -polumjer zaobljenosti oštrice), i iznosili su 0.25 (25 %), čime se osigurava ravnomjeran doprinos svakog kriterija u procesu odlučivanja. Ulazni parametri bili su frekvencija vrtnje alata (n) i posmična brzina. Kod primjene metode PSI-TOPSIS (modificirana), težinski faktori su izračunati prema jednadžbi (3.14), a njihove vrijednosti su prikazane u tablici 36.

Tablica 36. Težinski faktori za svaki kriterij kod PSI-TOPSIS (modifikovana) metode

Zavisna varijabla (kriterij)	Alat TIP 1	Alat TIP 2	Alat TIP 3
T	0,09	0,14	0,07
Z_t	0,06	0,01	0,07
Q	0,53	0,71	0,71
r	0,31	0,14	0,16
T -temperatura, °C; Z_t -razina zvučnoga tlaka , dB(A); Q -učinak obrade, cm ³ /min; r -polumjer zaobljenosti oštrice, μm			

4.5.1. Višekriterijska optimizacija za spiralno glodalo s kontinuiranim oštricama (TIP 1)

Vrijednosti analiziranih zavisnih varijabli za svaku kombinaciju ulaznih parametara obrade, koje se odnose na alat TIP 1, prikazane su u tablici 37.

Tablica 37. Vrijednosti zavisnih varijabli za sve kombinacije ulaznih parametara – alat TIP 1

Red. broj	Ulazni parametri		Zavisne varijable (kriterij) – izlazni parametri			
	n	V_f	T	Z_t	Q	r
1	14 000	10-20	105,98	101,83	2160	13,78
2	16 000	10-20	93,39	107,24	2160	15,56
3	18 000	10-20	98,01	104,59	2160	15,86
4	20 000	10-20	103,18	108,10	2160	8,37
5	22 000	10-20	87,67	104,12	2160	7,74
6	14 000	20-30	118,9	105,92	3600	13,78
7	16 000	20-30	104,94	105,87	3600	15,56
8	18 000	20-30	103,72	107,61	3600	15,86
9	20 000	20-30	104,46	106,97	3600	8,37
10	22 000	20-30	92,52	105,57	3600	7,74
n - frekvencija vrtnje, min^{-1} ; V_f -posmična brzina, m/min ; T -temperatura, $^{\circ}\text{C}$; Z_t -razina zvučnoga tlaka, dB(A) ; Q -učinak obrade, cm^3/min ; r -polumjer zaobljenosti oštrice, μm						

Na temelju metoda opisanih u poglavlju 3.6., te težinskih faktora prikazanih u tablici 36., formirane su normalizirana matrica odlučivanja, težinska normalizirana matrica, indeksi preferencije te rangiranje alternativa. Rezultati dobiveni primjenom metode TOPSIS prikazani su u tablici 38., dok su rezultati dobiveni primjenom modificirane metode PSI-TOPSIS prikazani u tablici 39.

Tablica 38. Rezultati metode TOPSIS za alat TIP 1

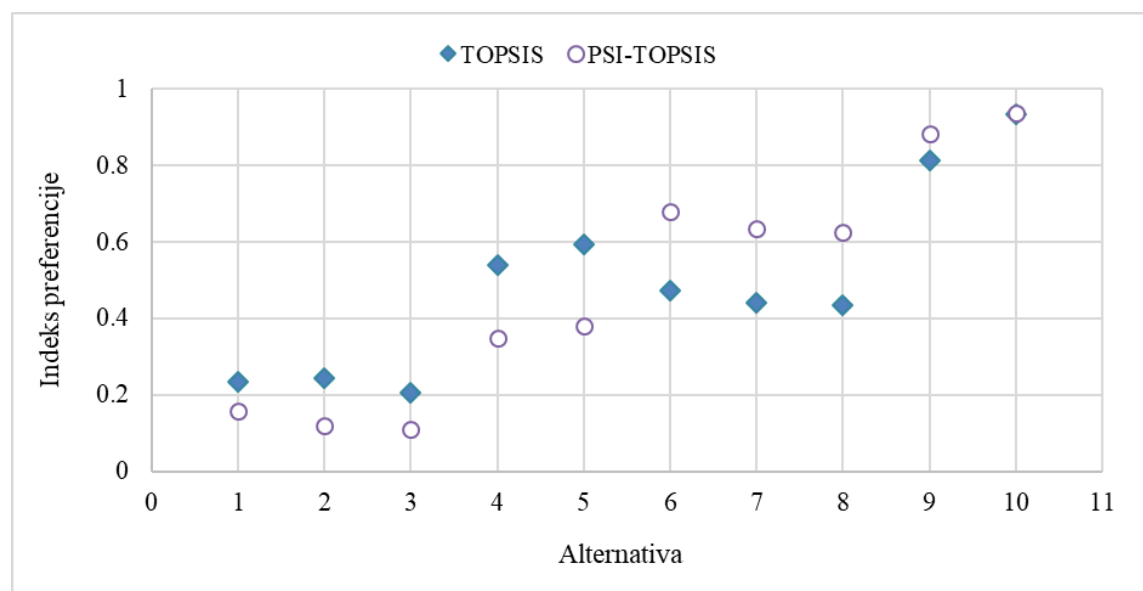
Red. broj	Normalizirana matrica				Težinska matrica				C_i	Rank
	T	Z_t	Q	r	T	Z_t	Q	r		
1	0,33	0,30	0,23	0,34	0,08	0,08	0,06	0,09	0,23	9
2	0,29	0,32	0,23	0,39	0,07	0,08	0,06	0,09	0,24	8
3	0,31	0,31	0,23	0,39	0,08	0,08	0,06	0,09	0,21	10
4	0,32	0,32	0,23	0,21	0,08	0,08	0,06	0,05	0,54	4
5	0,27	0,31	0,23	0,19	0,07	0,07	0,06	0,05	0,59	3
6	0,37	0,32	0,38	0,34	0,09	0,08	0,09	0,09	0,47	5
7	0,33	0,32	0,38	0,39	0,08	0,08	0,09	0,09	0,44	6
8	0,32	0,32	0,38	0,39	0,08	0,08	0,09	0,09	0,44	7
9	0,33	0,32	0,38	0,21	0,08	0,08	0,09	0,05	0,81	2
10	0,29	0,32	0,38	0,19	0,07	0,08	0,09	0,05	0,93	1
T -temperatura, $^{\circ}\text{C}$; Z_t -razina zvučnoga tlaka, dB(A) ; Q -učinak obrade, cm^3/min ; r -polumjer zaobljenosti oštrice, μm , C_i -koeficijent bliskosti										

Tablica 39. Rezultati modificirane metode PSI-TOPSIS (modifikovane) za alat TIP 1

Red. broj	Normalizirana matrica				Težinska matrica				C_i	Rank
	T	Z_t	Q	h	T	Z_t	Q	h		
1	0,58	0,00	0,00	0,74	0,06	0,00	0,00	0,23	0,16	8
2	0,18	0,86	0,00	0,96	0,02	0,06	0,00	0,29	0,12	9
3	0,33	0,44	0,00	1,00	0,03	0,03	0,00	0,31	0,11	10
4	0,49	1,00	0,00	0,08	0,05	0,06	0,00	0,02	0,35	7
5	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,38	6
6	1,00	0,65	1,00	0,74	0,09	0,04	0,53	0,23	0,68	3
7	0,55	0,64	1,00	0,96	0,05	0,04	0,53	0,29	0,64	4
8	0,51	0,92	1,00	1,00	0,05	0,06	0,53	0,31	0,63	5
9	0,54	0,82	1,00	0,08	0,05	0,05	0,53	0,02	0,88	2
10	0,16	0,59	1,00	0,00	0,02	0,04	0,53	0,00	0,94	1

T -temperatura, °C; Z_t -razina zvučnoga tlaka, dB(A); Q -učinak obrade, cm³/min; r -polumjer zaobljenosti oštrice, μm, C_i -koeficijent bliskosti

Na slici 76. prikazana je usporedba vrijednosti indeksa preferencije dobivenih primjenom metoda TOPSIS i PSI-TOPSIS (modifikovana). Na osnovu dobivenih rezultata jasno se uočava da je za alat TIP 1 najbolja opcija alternativa 10, budući da ostvaruje najveću vrijednost indeksa preferencije u obje primjenjene metode. Ovaj rezultat potvrđuje konzistentnost primjenjenih metoda u indentifikaciji optimalne alternative. Na temelju toga, optimalna kombinacija parametara obrade za alat TIP 1 je frekvencija vrtnje od 22 000 min⁻¹ i posmična brzina od 20-30 m/min.



Slika 76. Vrijednosti indeksa preferencije primjenom metoda TOPSIS i PSI-TOPSIS – alat TIP 1

Rezultati ANOVA analize za TOPSIS metodu prikazani su u tablici 40., dok su rezultati za metodu PSI-TOPSIS prikazani u tablici 41. Analiza je pokazala da su oba parametra obrade statistički značajna, budući da su njihove p -vrijednosti bile manje od 0,05. Ipak, posmična brzina je imala veću F -vrijednost u obje primijenjene metode u usporedbi s frekvencijom vrtnje, što ukazuje da posmična brzina ima presudnu ulogu u objašnjenju varijabilnosti indeksa preferencije.

Tablica 40. ANOVA rezultati za TOPSIS – alat TIP 1

Izvor varijacije	DF	SS	MS	F	p
Frekvencija vrtnje	4	0,36	0,09	61,81	0,00
Posmična brzina	1	0,16	0,16	113,54	0,00
Pogreška	4	0,00	0,00		
Ukupno	9	0,53			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$					

Tablica 41. ANOVA rezultati za PSI-TOPSIS – alat TIP 1

Izvor varijacije	DF	SS	MS	F	p
Frekvencija vrtnje	4	0,15	0,04	264,52	0,00
Posmična brzina	1	0,69	0,69	4788,55	0,00
Pogreška	4	0,00	0,00		
Ukupno	9	0,85			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$					

4.5.2. Višekriterijska optimizacija za spiralno glodalo s nazubljenim oštricama (TIP 2)

Tablica 42. prikazuje vrijednosti zavisnih varijabli za kombinacije ulaznih parametara obrade primijenjene na alat TIP 2. Na osnovu težinskih faktora iz tablice 36 izrađena je matrica odlučivanja i indeksi preferencije te provedeno rangiranje alternativa za alat TIP 2. Rezultati metode TOPSIS prikazani su u tablici 42., a rezultati metode PSI-TOPSIS (modifikovana) u tablici 43.

Tablica 42. Vrijednosti zavisnih varijabli za sve kombinacije ulaznih parametara – alat TIP 2

Red. broj	Ulazni parametri		Zavisne varijable (kriterij) – izlazni parametri			
	n	V_f	T	Z_t	Q	r
1	14 000	10-20	62,25	104,47	2160	6,2
2	16 000	10-20	72,31	102,25	2160	3,97
3	18 000	10-20	82,65	101,89	2160	6,38
4	20 000	10-20	80,42	103,80	2160	11,53
5	22 000	10-20	68,63	104,68	2160	22,51
6	14 000	20-30	64,90	108,27	3600	6,21
7	16 000	20-30	78,42	105,57	3600	3,97
8	18 000	20-30	82,65	106,30	3600	6,38
9	20 000	20-30	81,03	107,28	3600	11,53
10	22 000	20-30	69,23	106,74	3600	22,51
n - frekvencija vrtnje, min^{-1} ; V_f -posmična brzina, m/min ; T -temperatura, $^{\circ}\text{C}$; Z_t -razina zvučnoga tlaka, dB(A) ; Q -učinak obrade, cm^3/min ; r -polumjer zaobljenosti oštrice, μm						

Tablica 43. Rezultati metode TOPSIS za alat TIP 2

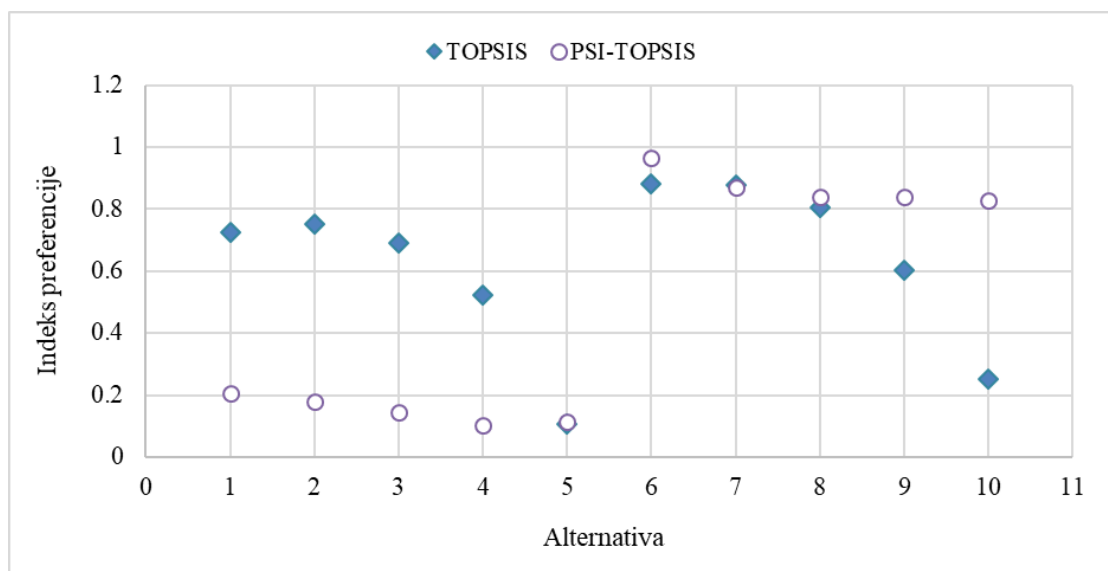
Red. broj	Normalizirana matrica				Težinska matrica				C_i	Rank
	T	Z_t	Q	h	T	Z_t	Q	r		
1	0,26	0,31	0,23	0,16	0,07	0,08	0,06	0,04	0,73	5
2	0,31	0,31	0,23	0,10	0,08	0,08	0,06	0,03	0,75	4
3	0,35	0,31	0,23	0,17	0,09	0,08	0,06	0,04	0,69	6
4	0,34	0,31	0,23	0,30	0,09	0,08	0,06	0,08	0,52	8
5	0,29	0,32	0,23	0,59	0,07	0,08	0,06	0,15	0,11	10
6	0,28	0,33	0,38	0,16	0,07	0,08	0,10	0,04	0,88	1
7	0,33	0,32	0,38	0,10	0,08	0,08	0,10	0,03	0,87	2
8	0,35	0,32	0,38	0,17	0,09	0,08	0,10	0,04	0,81	3
9	0,34	0,32	0,38	0,30	0,09	0,08	0,10	0,07	0,60	7
10	0,29	0,32	0,38	0,59	0,07	0,08	0,10	0,15	0,50	9
T -temperatura, $^{\circ}\text{C}$; Z_t -razina zvučnoga tlaka, dB(A) ; Q -učinak obrade, cm^3/min ; r -polumjer zaobljenosti oštrice, μm , C_i -koeficijent bliskosti										

Tablica 44. Rezultati metode PSI-TOPSIS (modifikovana) za alat TIP 2

Red. broj	Normalizirana matrica				Težinska matrica				C_i	Rank
	T	Z_t	Q	r	T	Z_t	Q	r		
1	0,00	0,40	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,02	0,20	6
2	0,49	0,06	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,18	7
3	1,00	0,00	0,00	0,13	0,14	0,00	0,00	0,02	0,14	8
4	0,89	0,29	0,00	0,41	0,12	0,00	0,00	0,06	0,10	10
5	0,31	0,44	0,00	1,00	0,04	0,00	0,00	0,14	0,11	9
6	0,13	1,00	1,00	0,12	0,02	0,01	0,71	0,02	0,97	1
7	0,79	0,58	1,00	0,00	0,11	0,01	0,71	0,00	0,87	2
8	1,00	0,69	1,00	0,13	0,14	0,01	0,71	0,02	0,84	3
9	0,92	0,84	1,00	0,41	0,12	0,01	0,71	0,06	0,84	4
10	0,34	0,76	1,00	1,00	0,05	0,01	0,71	0,14	0,83	5

T -temperatura, °C; Z_t -razina zvučnoga tlaka, dB(A); Q -učinak obrade, cm³/min; r -polumjer zaobljenosti oštrice, μm, C_i -koeficijent bliskosti

Slika 77. prikazuje usporedbu vrijednosti indeksa preferencije dobivenih metodama TOPSIS i PSI TOPSIS (modifikovan) za alat TIP 2. Najbolja alternativa 6 ima najveću vrijednost indeksa preferencije u obje metode. Ovakav rezultat potvrđuje usklađenost primijenjenih metoda u određivanju optimalne alternative. Na temelju toga, optimalna kombinacija parametara obrade za alat TIP 2 je frekvencija vrtnje od 14 000 min⁻¹ i posmična brzina od 20-30 min⁻¹.



Slika 77. Vrijednosti indeksa preferencije za obje primjenjene metode optimizacije parametara obrade – alat TIP 2

U tablici 45. prikazani su ANOVA rezultati za TOPSIS metodu, a u tablici 46. rezultati za PSI-TOPSIS (modifikovanu) metodu. Na temelju rezultata može se uočiti da su oba parametra obrade statistički značajna. Međutim, posmična brzina pokazuje veći utjecaj, budući da u PSI-TOPSIS (modifikovana) metodi postiže izuzetno visoku F -vrijednost, dok frekvencija vrtnje, iako značajna u TOPSIS metodi, ima relativno manji doprinos. Dakle, može se zaključiti da posmična brzina ima značajniju ulogu u procesu obrade u odnosu na frekvenciju vrtnje.

Tablica 45. ANOVA rezultati za TOPSIS – alat TIP 2

Izvor varijacije	DF	SS	MS	F	p
Frekvencija vrtnje	4	0,57	0,14	334,50	0,00
Posmična brzina	1	0,04	0,04	90,33	0,00
Pogreška	4	0,00	0,00		
Ukupno	9	0,61			

Tablica 46. ANOVA rezultati za PSI-TOPSIS – alat TIP 2

Izvor varijacije	DF	SS	MS	F	p
Izvor varijacije	4	0,02	0,01	11,20	0,02
Frekvencija vrtnje	1	1,29	1,29	3213,65	0,00
Posmična brzina	4	0,00	0,00		
Pogreška	9	1,32			

4.5.3. Višekriterijska optimizacija za glodalo s dijamantnim oštrocima (TIP 3)

U tablici 47. dane su vrijednosti zavisnih varijabli za kombinacije ulaznih parametara obrade primijenjene na alat TIP 3. Na temelju težinskih faktora iz tablice 36. formirana je matrica odlučivanja i izračunati indeksi preferencije, nakon čega je provedeno rangiranje alternativa za alat TIP 3. Rezultati dobiveni metodom TOPSIS prikazani su u tablici 48., a rezultati metodom PSI-TOPSIS (modifikovane) u tablici 49.

Tablica 47. Vrijednosti zavisnih varijabli za sve kombinacije ulaznih parametara – alat TIP 3

No.	Ulazni parametri		Zavisne varijable (kriterij) – izlazni parametri			
	n	V_f	T	Z_t	Q	r
1	14 000	10-20	99,61	104,92	2160	11,97
2	16 000	10-20	96,85	107,51	2160	4,28
3	18 000	10-20	95,71	105,32	2160	4,46
4	20 000	10-20	93,19	110,59	2160	7,17
5	22 000	10-20	88,76	102,42	2160	7,96
6	14 000	20-30	108,06	106,60	3600	11,97
7	16 000	20-30	95,51	108,45	3600	4,28
8	18 000	20-30	98,54	107,17	3600	4,46
9	20 000	20-30	97,59	110,67	3600	7,17
10	22 000	20-30	86,63	106,07	3600	7,96

n - frekvencija vrtnje, min^{-1} ; V_f -posmična brzina, m/min ; T -temperatura, $^{\circ}\text{C}$; Z_t -razina zvučnoga tlaka, dB(A) ; Q -učinak obrade, cm^3/min ; r -polumjer zaobljenosti oštrice, μm

Tablica 48. Rezultati metode TOPSIS za alat TIP 3

Red. broj	Normalizirana matrica				Težinska matrica				C_i	Rank
	T	Z_t	Q	h	T	Z_t	Q	h		
1	0,32	0,31	0,23	0,49	0,08	0,07	0,05	0,12	0,05	10
2	0,32	0,31	0,23	0,17	0,08	0,07	0,05	0,04	0,66	3
3	0,31	0,31	0,23	0,18	0,07	0,07	0,05	0,04	0,66	5
4	0,32	0,32	0,23	0,29	0,07	0,08	0,05	0,07	0,50	7
5	0,29	0,30	0,23	0,32	0,07	0,07	0,05	0,08	0,44	8
6	0,34	0,31	0,38	0,49	0,08	0,07	0,09	0,12	0,32	9
7	0,31	0,32	0,38	0,17	0,07	0,08	0,09	0,04	0,91	1
8	0,32	0,31	0,38	0,18	0,08	0,07	0,09	0,04	0,89	2
9	0,32	0,32	0,38	0,29	0,08	0,08	0,09	0,07	0,66	4
10	0,29	0,31	0,38	0,32	0,07	0,07	0,09	0,08	0,60	6

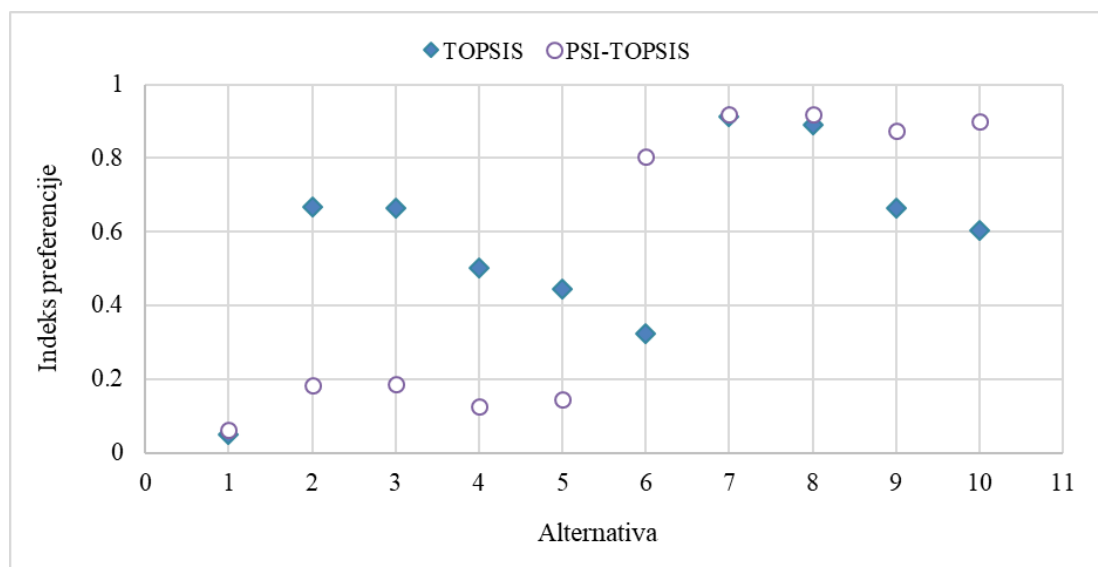
T -temperatura, $^{\circ}\text{C}$; Z_t -razina zvučnoga tlaka, dB(A) ; Q -učinak obrade, cm^3/min ; r -polumjer zaobljenosti oštrice, μm , C_i -koeficijent bliskosti

Tablica 49. Rezultati metode PSI-TOPSIS (modifikovana) za alat TIP 3

Red. broj	Normalizirana matrica				Težinska matrica				C_i	Rank
	T	Z_t	Q	h	T	Z_t	Q	h		
1	0,84	0,30	0,00	1,00	0,05	0,02	0,00	0,15	0,06	10
2	0,66	0,61	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,18	7
3	0,58	0,35	0,00	0,02	0,03	0,02	0,00	0,00	0,18	6
4	0,42	0,99	0,00	0,37	0,02	0,06	0,00	0,05	0,12	9
5	0,13	0,00	0,00	0,47	0,00	0,00	0,00	0,07	0,14	8
6	1,00	0,50	1,00	1,00	0,06	0,03	0,70	0,15	0,80	5
7	0,57	0,73	1,00	0,00	0,03	0,05	0,70	0,00	0,92	1
8	0,77	0,57	1,00	0,02	0,05	0,04	0,70	0,00	0,91	2
9	0,71	1,00	1,00	0,37	0,04	0,07	0,70	0,05	0,87	4
10	0,00	0,44	1,00	0,47	0,00	0,03	0,70	0,07	0,89	3

T -temperatura, °C; Z_t -razina zvučnoga tlaka, dB(A); Q -učinak obrade, cm³/min; r -polumjer zaobljenosti oštrice, μm, C_i -koeficijent bliskosti

Slika 78. prikazuje usporedbu vrijednosti indeksa preferencije dobivenih metodama TOPSIS i PSI-TOPSIS (modifikovana) za alat TIP 3. Najbolja alternativa 7. ostvaruje najveću vrijednost indeksa u obje metode, što potvrđuje usklađenost rezultata. Prema tome, optimalna kombinacija parametara obrade za alat TIP 3 jest frekvencija vrtnje od 16 000 min⁻¹ i posmična brzina od 20-30 m/min.



Slika 78. Vrijednosti indeksa preferencije za obje primjenjene metode optimizacije parametara obrade – alat TIP 3

Na temelju rezultata ANOVA analize prikazanih u tablici 50. za TOPSIS metodu i tablici 51. za PSI-TOPSIS (modifikovana) metodu potvrđena je statistička značajnost oba parametra obrade ($p < 0.05$). Kod TOPSIS metode frekvencija vrtnje alata pokazuje nešto veći utjecaj od posmične brzine, dok u PSI-TOPSIS metodi posmična brzina ima znatno izraženiju ulogu u odnosu na frekvenciju vrtnje alata. Usporedba rezultata obje metode upućuje na zaključak da posmična brzina ima značajniju ulogu u procesu obrade za alat TIP 3, dok frekvencija vrtnje također pokazuje statističku važnost, ali s relativno manjim doprinosom.

Tablica 50. ANOVA rezultati za TOPSIS – alat TIP 3

Izvor varijacije	<i>DF</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Izvor varijacije	4	0,48	0,12	92,15	0,00
Frekvencija vrtnje	1	0,11	0,11	87,22	0,00
Posmična brzina	4	0,01	0,00		
Pogreška	9	0,59			

Tablica 51. ANOVA rezultati za PSI-TOPSIS – alat TIP 3

Izvor varijacije	<i>DF</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Izvor varijacije	4	0,02	0,00	136,76	0,00
Frekvencija vrtnje	1	1,37	1,37	39 833,07	0,00
Posmična brzina	4	0,00	0,00		
Pogreška	9	1,39			

Jednaki rezultati dobiveni su uporabom obje višekriterijske metode optimizacije, što nam govori da su obje primjenjene metode prikladne za optimizaciju parametara obrade kod glodanja furnirskoga uslojenog drva. Primjenom dviju metoda višekriterijske optimizacije nastojali smo pojačati sigurnost u dobivene rezultate optimizacije. Primjenom metoda višekriterijske optimizacije određena je najbolja kombinacija frekvencije vrtnje alata i posmične brzine, koja minimizira temperaturu alata i prosječnu razinu zvučnoga tlaka, te polumjer zatupljenosti oštrice, a maksimizira učinak obrade. Analizom rezultata višekriterijske optimizacije može se uočiti da je učinak obrade (količina odstranjenog materijala) najvažniji kriterij optimizacije, jer je kod svih triju alata dobivena optimalna kombinacija parametara obrade s posmičnom brzinom od 25 m/min, dok je s druge strane kod sva tri alata najlošija kombinacija parametara obrade s posmičnom brzinom od 15 m/min.

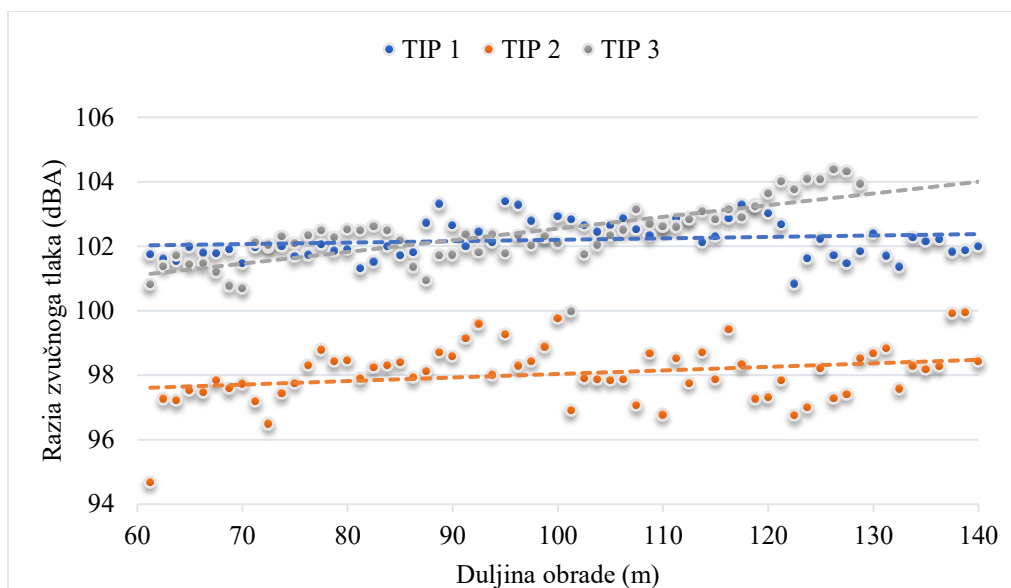
4.6. Analiza temperature alata, razine zvučnoga tlaka, zatupljenja oštrice i kvalitete obrade o ovisnosti o duljini obrade za različite tipove glodala

Na temelju rezultata optimizacije prikazanih u tablicama 42. i 43., 47. i 48., 52. i 53., proveden je dio eksperimenta, čiji je cilj bio analizirati svojstva površine i alata u ovisnosti o duljini obrade. Profil glodanja u drugome dijelu eksperimenta prikazan je na slici 35. Uslojena furnirska ploča glodana je po krivolinijskoj putanji te je prilikom obrade dolazilo do promjene pravca glodanja uz česta zaustavljanja. Na taj način simulirano je stvarno kretanje glodala u proizvodnji koje je gotovo uvijek krivolinijsko. Na temelju podataka dobivenih u poglavlju 4.5. posmična brzina podešena je na vrijednost od 25 m/min, kako bi se dobila optimalna brzina obrade. Zbog česte promjene pravca kretanja glodalo nije moglo postići maksimalnu zadanu posmičnu brzinu, već je prosječna posmična brzina u ovom dijelu eksperimenta bila 3,75 m/min, što je utvrđeno proračunom prijednoga puta i vremena obrade. U ovome dijelu eksperimenta mjerena je razina zvučnoga tlaka, temperatura alata, polumjer zaobljenosti oštrice i kvaliteta obrađene površine ovisno o duljini glodanja, te je napravljena poveznica između ovih veličina.

4.6.1. Analiza razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o duljini obrade

Na slici 81. prikazani su dijagrami ovisnosti razine zvučnoga tlaka o duljini glodanja pri obradi furnirskoga uslojenog drva s tri vrste alata. Rezultati regresijske analize prikazani su u tablicama 52., 53. i 54.

Na temelju izmjerenih vrijednosti razina zvučnoga tlaka u intervalu obrade 60-140 m putem jednofaktorske ANOVA-e izačunata je ovisnost emitiranih razina zvučnoga tlaka o tipu alata, te su rezultati prikazani u tablici 55. i na slici 79.



Slika 79. Dijagram ovisnosti razine zvučnog tlaka o duljini obrade za tri vrste alata

Tablica 52. Regresijska analiza razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP 1

R=0,181; R ² =0,033; Prilagođeno R ² =0,017; F(1,62)=2,089 p<0,153 Pogreška : 0,565						
N=64	b*	Standardna pogreška. b*	B	Standardna pogreška. b*	T(62)	p
Presjek			101,758	0,316	322,014	0,000
Duljina obrade za alat TIP 1	0,181	0,125	0,004	0,003	1,445	0,153

Tablica 53. Regresijska analiza razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP 2

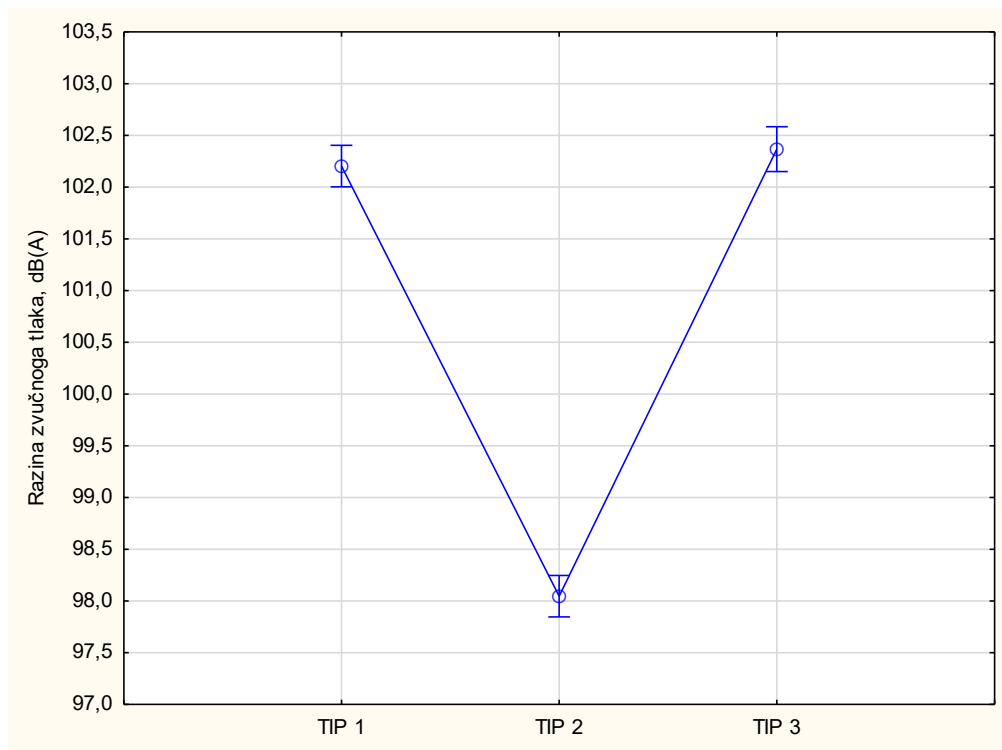
R=0,291; R ² =0,084; Prilagođeno R ² =0,069; F(1,62)=5,717 p<0,019 Pogreška : 0,8573						
N=64	b*	Standardna pogreška. b*	B	Standardna pogreška. b*	T(62)	p
Presjek			96,938	0,475	203,887	0,000
Duljina obrade za alat TIP 2	0,291	0,121	0,011	0,005	2,391	0,019

Tablica 54. Regresijska analiza razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP 3

R=0,759; R ² =0,577; Prilagođeno R ² =0,569; F(1,62)=72,256 p<0,000 Pogreška : 0,6277						
N=64	b*	Standardna pogreška. b*	B	Standardna pogreška. b*	T(62)	p
Presjek			98,922	0,414	238,958	0,000
Duljina obrade za alat TIP 3	0,759	0,089	0,036	0,004	8,500	0,000

Tabela 55. Jednofaktorska ANOVA-e ovisnosti emitiranih razina zvučnoga tlaka o vrsti alata

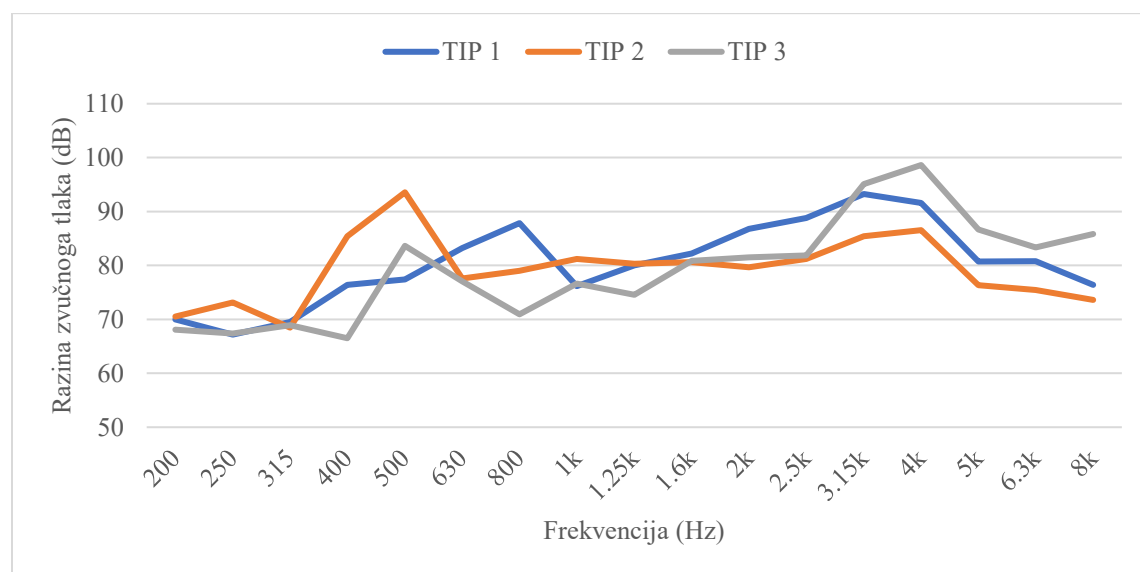
Izvor varijacije	<i>SS</i>	Stupanj slobode	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	Tukey test
Razina zvučnoga tlaka u ovisnosti o vrsti alata	747	2	373	565	0,00	(1,3)(2)
Pogreška	119	180	1			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						



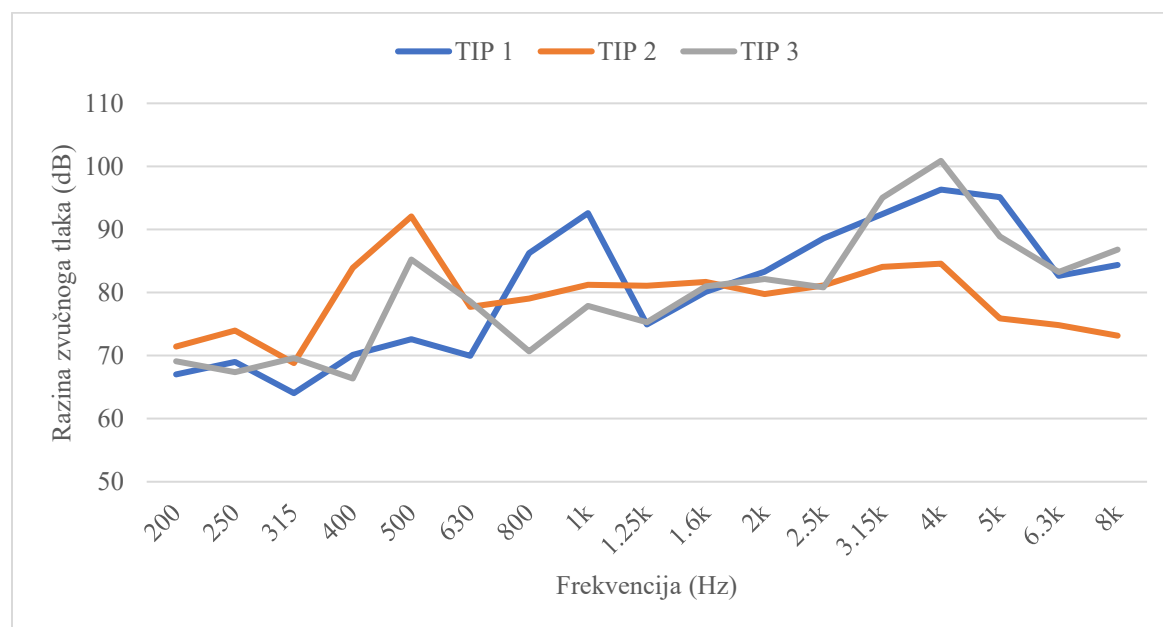
Slika 80. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka pri intervalu duljine obrade od 60-140 m u ovisnosti o vrsti alata

Povećanjem duljine obrade povećava se i razina zvučnoga tlaka pri glodanju sa sva tri tipa glodala. Regresijska analiza razina zvučnog tlaka u ovisnosti o duljini obrade i vrsti alata prikazana tablicama 55., 56. i 57. pokazuje da s povećanjem duljine obrade dolazi do povećanja razine zvučnoga tlaka pri glodanju sa sva tri alata. Kod alata TIP 1 povećanje razine zvučnoga tlaka pri intervalu obrade od 60-140 m nije statistički signifikantno, dok je kod ostala dva alata povećanje razine zvučnoga tlaka statistički signifikantno. Emitirana razina zvučnoga tlaka pri uporabi alata TIP 1 i TIP 3 znatno je veća nego pri glodanju s alatom TIP 2. Na temelju rezultata (tablica 55, slika 80) može se uočiti da se razine zvučnoga tlaka pri glodanju alatima TIP 1 i TIP 3 statistički

značajno ne razlikuju pri intervalu duljine obrade od 60-140 m, dok se emitirane razine zvučnoga tlaka za alat TIP 2 statistički značajno razlikuju u odnosu na prethodna dva alata. Emitirani zvuk sastoji se od više frekvencija. Zvuk određenih frekvencija ljudsko uho registrira, dok zvuk određenih frekvencija ljudsko uho ne može čuti. Spektralna analiza emitiranoga zvuka za intervale obrade 60-100 m i 100-140 m prikazana je dijagramima na slici 81.



a)



b)

Slika 81. Spektar zvuka: a) u intervalu obrade 60-100 m; b) u intervalu obrade 100-140 m

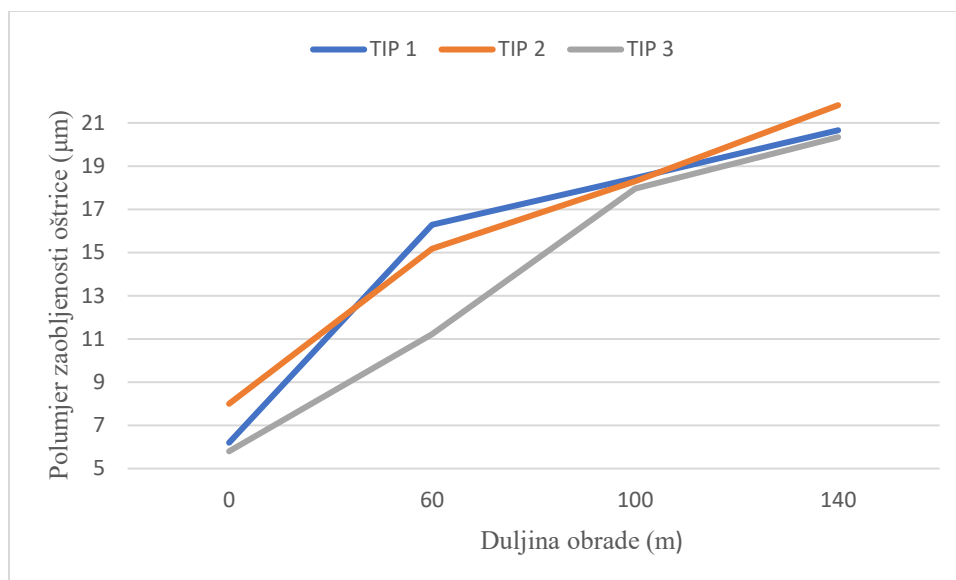
Bez obzira na duljinu obrade, spektar zvučnoga tlaka ostaje sličan. Pri glodanju s glodalom TIP 1 najveća razina zvučnoga tlaka izmjerena je na frekvenciji 800 Hz (94 dB) i 4000 Hz (92 Hz). Pri glodanju s glodalom TIP 2 najveća razina zvučnoga tlaka izmjerena je na frekvencijama 500 Hz (94 dB) i 4000 Hz (89 dB). Za glodalo TIP 3 najveća razina zvučnoga tlaka izmjerena je na frekvencijama 4000 Hz (99 dB) i 3150 Hz (92 dB).

Prilikom obrade glodalo TIP 2 prošlo je ukupnu duljinu obrade od 140 metara u svim ponavljanjima, dok su se glodala TIP 1 i TIP 3 slomila u određenim ponavljanjima. Glodalo TIP 1 prošlo je put od 100 metara u svim serijama. Prilikom obrade dodatnih 40 metara dva glodala obradila su planiranu dužinu od 140 m, dok je jedno glodalo puklo nakon obrađenih 120,8 m. Kod ovog glodala pri obradi emitirana razina zvučnoga tlaka bila je viša za 5,4 dBA u odnosu na ostala dva glodala koja se nisu slomila. Pretpostavka je da je viša razina zvučnoga tlaka posljedica povećanih vibracija, koje su rezultat greške pri stezanju alata, a koja se javila zbog netočnosti u čahurama. Ovaj je problem predviđen u samoj postavci eksperimenta, pa su korištene čahure veće preciznosti, no i kod njih je prisutna određena pogreška, bilo zbog netočnosti izrade ili zbog nedovoljne preciznosti balansiranja. Kod uporabe glodala TIP 3 došlo je do pucanja svih glodala pri obradi. Kod ovog tipa glodala, jedno glodalo prešlo je put od 129,8 m, drugo 91,1 m, a treće samo 70,6 m. Ova pojava ukazuje da glodalo s PCD oštricom prilikom obrade treba imati manju posmičnu brzinu ili veću frekvenciju vrtnje kod krivolinijske obrade kako ne bi došlo do prevelikih vibracija ili prevelikog zagrijavanja, a što za posljedicu ima pucanje alata.

Povećanjem duljine obrade dolazi do povećanja polumjera zaobljenosti oštrice alata, što utječe na promjenu razine zvučnoga tlaka (Raja i dr., 2013).

4.6.2. Analiza rezultata polumjera zaobljenosti oštrice u ovisnosti o duljini obrade

Ovaj odjeljak sadržava analizu polumjera zaobljenosti oštrice u ovisnosti o duljini obrade. Način mjerenja zatupljenja oštrice određen je postupkom opisanim u poglavlju 3.5.3. Na slici 82. prikazana je ovisnost polumjera zaobljenosti oštrice o duljini obrade, dok je u tablicama 56., 57. i 58. prikazana deskriptivna statistika polumjera zaobljenosti oštrice za različite tipove alata. U tablici 59. i slikom 83. prikazani su rezultati jednofaktorske ANOVA-e polumjera zaobljenosti oštrice nakon duljine obrade od 140 m, dok su u tablici 60. te na slikama 84. i 85. prikazani rezultati dvofaktorske ANOVA-e s interakcijom.



Slika 82. Dijagram promjene polumjera zaobljenosti oštrice u ovisnosti o duljini obrade

Tablica 56. Veličina polumjera zaobljenosti oštrice pri različitim duljinama obrade s alatom TIP 1

Izvor varijacije	<i>N</i>	Polumjer zaobljenosti oštrice (μm) Aritmetička srednja vrijednost	Polumjer zaobljenosti oštrice (μm) Standardna devijacija	Polumjer zaobljenosti oštrice (μm) Standardna pogreška
Ukupno	150	18,90	3,23	0,26
Duljina 60 m	30	16,28	1,98	0,36
Duljina 100 m	60	18,45	2,72	0,35
Duljina 140 m	60	20,66	3,19	0,41

Tablica 57. Veličina polumjera zaobljenosti oštrice pri različitim duljinama obrade s alatom TIP 2

Izvor varijacije	<i>N</i>	Polumjer zaobljenosti oštrice (μm) Aritmetička srednja vrijednost	Polumjer zaobljenosti oštrice (μm) Standardna devijacija	Polumjer zaobljenosti oštrice (μm) Standardna pogreška
Ukupno	150	19,08	3,65	0,30
Duljina 60 m	30	15,17	2,07	0,38
Duljina 100 m	60	18,30	2,57	0,33
Duljina 140 m	60	21,82	2,98	0,38

Tablica 58. Veličina polumjera zaobljenosti oštrice pri različitim duljinama obrade s alatom TIP 3

Izvor varijacije	<i>N</i>	Polumjer zaobljenosti oštrice (μm) Aritmetička srednja vrijednost	Polumjer zaobljenosti oštrice (μm) Standardna devijacija	Polumjer zaobljenosti oštrice (μm) Standardna pogreška
Ukupno	150	16,48	4,02	0,39
Duljina 60 m	30	11,22	1,90	0,35
Duljina 100 m	60	17,96	2,43	0,31
Duljina 120 m	60	20,34	1,60	0,38

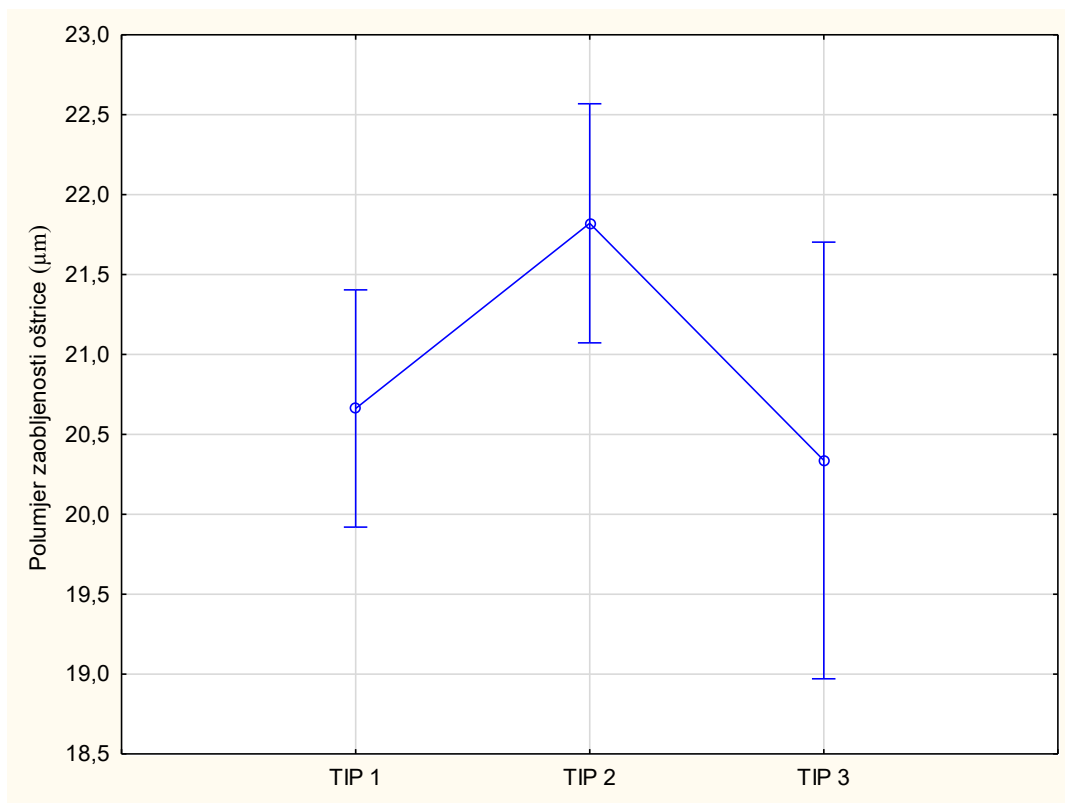
Povećanjem duljine obrade dolazi do povećanje polumjera zaobljenosti oštrice, što je sukladno s istraživanjima Kowaluka i dr. (2009), Keturakisa i dr. (2017), Kolede i dr. (2019), Chayeuskia i dr. (2022). Najveći polumjer zaobljenosti oštrice nakon obrade od 100 m izmjeren je kod glodala TIP 1 (18,402 μm), a zatim kod glodala TIP 2 (17,838 μm), dok je najmanje zatupljenje glodala zabilježeno kod glodala TIP 3 (17,578 μm). Dijamantna glodala unatoč najmanjem zatupljenju oštrice nisu uspjela odraditi 140 metara, već su se sva tri glodala slomila. Glavni nedostatak PCD alata jest mala žilavost (Astakhov i Davim, 2008), te zbog toga lako dolazi do loma glodala. U našem slučaju žilavost PCD-a nije uzrok loma glodala jer se desilo pucanje tijela alata. Glavni razlog pucanja alata leži u kutu oštrice. Naime kut oštrice kod alata s dijamantskim oštricama je znatno veći nego kod ostala dva glodala, te se prilikom glodanja stvaraju znatno veće sile koje uzrokuju povećanje temperature alata. Kada temperature prijeđu granične vrijednosti dolazi do narušavanja strukture materijala alata što uzrokuje lom alata. Iz navedenoga se može zaključiti da na učinak obrade CNC strojeva pri glodanju, pored posmične brzine i frekvencije vrtnje alata, značajnu ulogu imaju geometrija i materijal alata. Alati čija je oštrica izrađena od PCD-a ne mogu vršiti obradu drva pri velikim posmičnim brzinama, jer je kod tih glodala kut oštrice značajno veći nego u ostalih glodala, što stvara veliki otpor rezanju, uzrokujući povećane temperature zbog čega dolazi do loma alata. Ovi alati namijenjeni su za visokokvalitetnu obradu i koriste se tamo gdje je kvaliteta obrade značajnija od brzine obrade.

Nakon obrađenih 100 metara duljine na svim je alatima izmjeren polumjer zaobljenosti oštrice manji od 20 μm , te se smatraju još uvijek ostrim alatom. Nakon priđenih 140 m duljine obrade, polumjer zaobljenosti oštrice svih triju alata veći je od 20 μm , što znači da je alat prešao u fazu zatupljenog alata. Prema Keturakis i dr. (2017) ostrim alatom se smatra onaj alat čiji je polumjer zaobljenosti oštrice manji od 20 μm , zatupljenim onaj čiji se polumjer oštrice kreće od 20 do 40

μm , dok je tup alat onaj čiji je polumjer oštrice veći od 40 μm . Trend povećanja polumjera zaobljenosti oštrice sličan je za sve tri vrste glodala. Prema istraživanju Keturakisa i dr. (2017), pri obradi drva, povećanje polumjera zaobljenosti oštrice intenzivno je u prvih 400 metara obrade, dok se nakon toga polumjer zaobljenosti oštrice sporije povećava. U prvih 200 metara obrade povećanje polumjera zaobljenosti oštrice je intenzivno, te je krivulja polumjera zaobljenosti oštrice linearna s duljinom obrade (Chladil i dr., 2019). Daljnim povećanjem duljine obrade dolazi do sporijeg povećanja polumjera zaobljenosti oštrice alata, te krivulja teži tome da postane ravna linija (slike 20 i 21). Glavni je razlog povećanja polumjera zaobljenosti oštrice trenje koje se javlja između oštrice alata i drva (Beer i dr., 2003). Prema istraživanjima Bendikienea i Keturakisa (2017), Kowaluka i dr. (2009), kemijski sastav materijala alata, geometrija alata i parametri obrade imaju najveći utjecaj na povećanje polumjera zaobljenosti oštrice alata. Osim toga, svojstva sastavnica materijala koji se obrađuje (furnirsko uslojeno drvo) kao što su ljepilo, smola, kemijska sredstva i sl. izravno utječu na zatupljenje oštrice alata (Trzepieciniski, 2025). Prema istraživanju može se zaključiti da parametri obrade i materijal alata najviše utječu na povećanje polumjera zaobljenosti oštrice alata, dok u manjoj mjeri utječe konstrukcija alata. Pri optimalnim parametrima obrade povećanje polumjera zaobljenosti oštrice je minimalno.

Tablica 59. Utjecaj tipa alata na polumjer zaobljenosti oštrice nakon duljine obrade od 140 m izračunat pomoću ANOVA-e.

Izvor varijacije	<i>DF</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Alat	2	53,29	26,64	3,102	0,05163
Pogreška	136	1168,25	8,95		



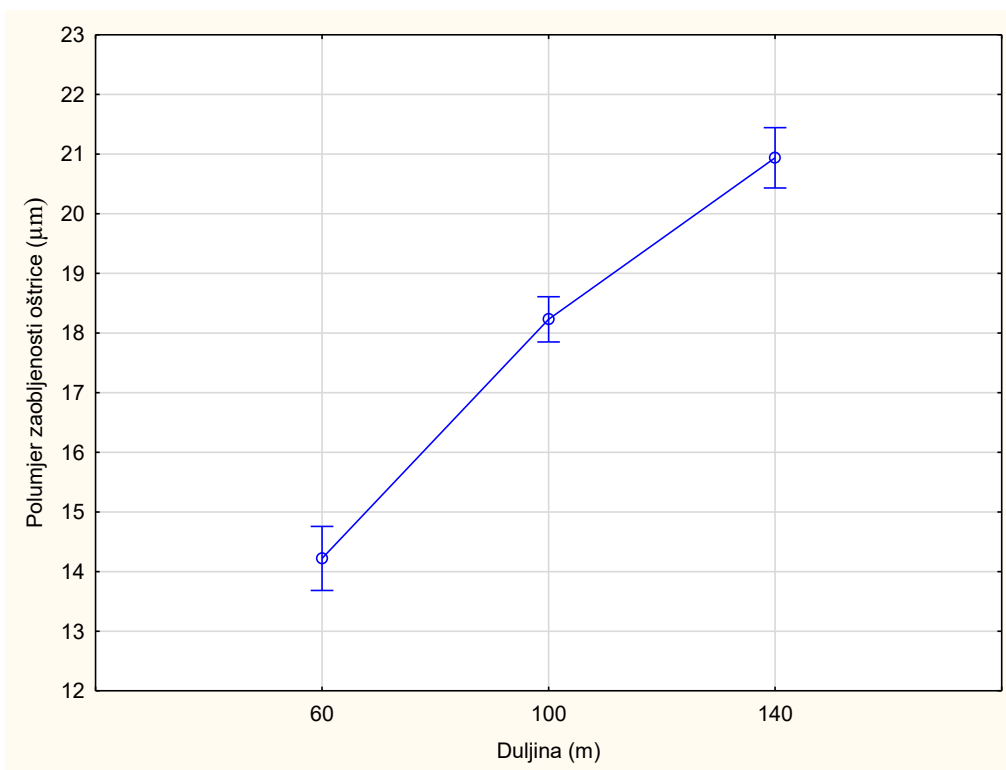
Slika 83. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti polumjera zaobljenosti oštrice nakon duljine obrade od 140 m pri uporabi različitih alata

Nakon obrade 140 metara furnirskoga uslojenog drva kod glodala TIP 2 polumjer zaobljenosti oštrice je nešto veći u odnosu na ostala dva glodala, ali se statistički signifikantno ne razlikuju (tablica 59, slika 83) pri 95% značajnosti, dok je pri značajnosti od 93% postoji statistički značajna razlika u polumjerima zaobljenosti oštrice.

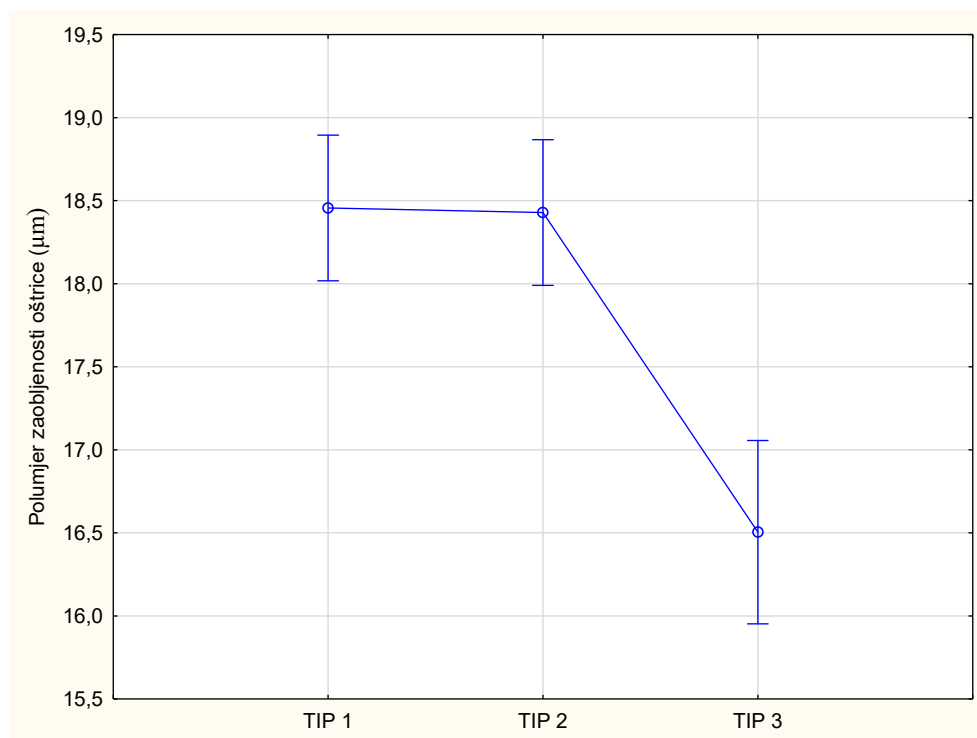
Rezultati dvofaktorske ANOVA-e (tablica 60, slika 84) pokazuju da postoji statistički značajna razlika u polumjeru zaobljenosti oštrice alata s obzirom na duljinu obrade. Povećanje duljine obrade uzrokuje statistički signifikantno povećanje polumjera zaobljenosti oštrice.

Tablica 60. Rezultati dvofaktorske ANOVA-e sa interakcijom alata i duljine obrade na polumjer zaobljenosti oštrice

Izvor varijacije	<i>SS</i>	Stupanj slobode	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	Tukey test
Alat	243,4	2	121,7	18,12	0,00	(1,2) (3)
Duljina obrade (60, 100,140)	2168,6	2	1084,3	161,42	0,00	(1)(2)(3)
Alat × duljina obrade	290,0	4	72,5	10,79	0,00	
Pogreška	2680,1	399	6,7		0,00	
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						

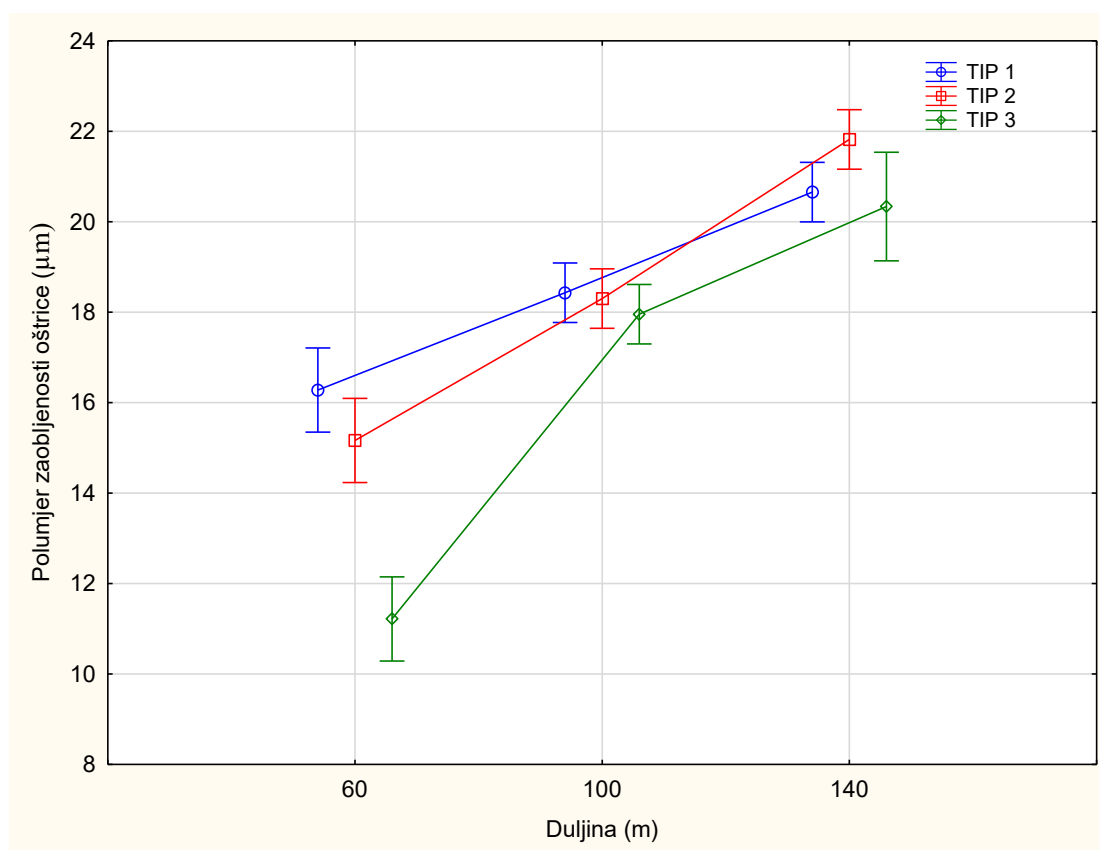


Slika 84. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti polumjera zaobljenosti u ovisnosti o duljini obrade



Slika 85. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti polumjera zaobljenosti oštrice u ovisnosti o tipu alata

Kod glodala TIP 3 polumjer zaobljenosti oštrice je nešto manji u odnosu na ostala dva glodala i statistički se signifikantno razlikuje. Kod alata TIP 1 i TIP 2 ne postoji statistički signifikantna razlika u polumjerima zaobljenosti oštrice u intervalu duljine obrade od 60-140 m. Na temelju veličine F iz tablice 60. vidimo da duljina obrade ima dominantniji utjecaj na polumjer zaobljenosti oštrice nego tip alata.



Slika 86. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti polumjera zaobljenosti oštrice u ovisnosti o duljini obrade i vrsti alata

Na temelju rezultata (tablica 60, slika 86) vidljivo je da postoji statistički značajan utjecaj interakcije duljine obrade i vrste alata na polumjer zaobljenosti oštrice, što znači da je utjecaj duljine obrade na veličinu polumjera zaobljenosti oštrice različit za različite vrste glodala.

Ako se napravi paralela između zatupljenja oštrice (slika 84) i razine zvučnoga tlaka (slika 79) vidi se da kod svih glodala s porastom polumjera zaobljenosti oštrice dolazi do porasta razine zvučnoga tlaka. Kako bi se statistički dokazala ova tvrdnja napravljena je korelacija izmjerenih vrijednosti, a rezultati su prikazani u tablici 61.

Tablica 61. Pearsonova korelacija između izmjerenih vrijednosti polumjera zaobljenosti oštrice i razine zvučnoga tlaka

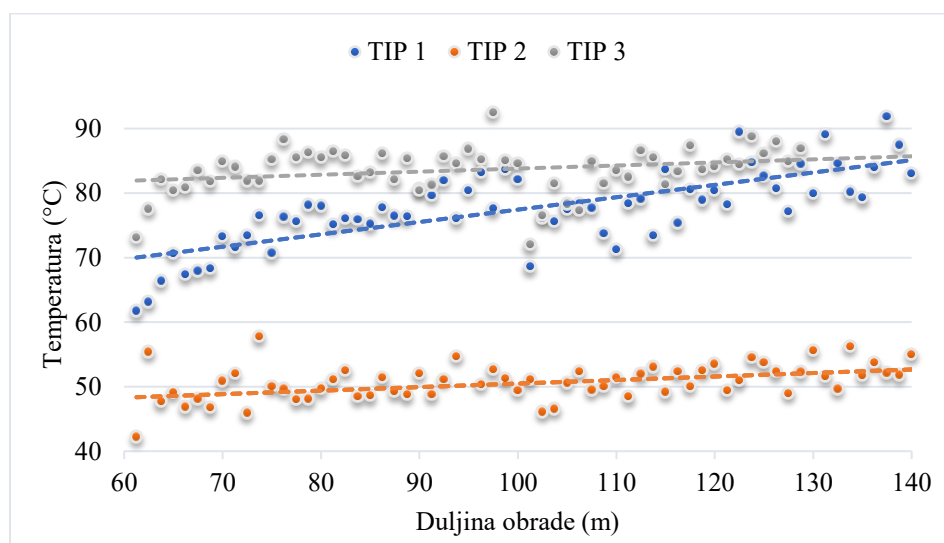
Alat	Koeficijent korelacije	Standardna devijacija
TIP 1	0,1858	3,526
TIP 2	0,0910	3,382
TIP 3	0,5251	3,770

Iz tablice vidimo da su za sva tri alata koeficijenti korelacije pozitivni, tj. s porastom polumjera zaobljenosti oštrice raste razina zvučnoga tlaka. Kod TIP 1 radi se o vrlo slaboj povezanosti, kod TIP 2 radi se o zanemarivoj korelaciji dok je kod TIP 3 to umjerena korelacija

Ovi rezultati su potvrđeni i u istraživanjima koje su proveli Darmawan i Tanaka (2001), a koja su pokazala da s povećanjem polumjera zaobljenosti oštrice dolazi do povećanja sile rezanja i razine zvučnoga tlaka. Porastom polumjera zaobljenosti oštrice, potrebna je veća sila za odvajanje čestica drva, što se manifestira u povećanoj razini zvučnoga tlaka.

4.6.3. Analiza ovisnosti temperature alata o duljini obrade

Ovaj odjeljak sadrži analizu temperature alata u ovisnosti o duljini obrade furniranoga uslojenog drva. Za razliku od dijela eksperimenta u kojem su analizirane maksimalne temperature alata, u ovome dijelu analizirane su prosječne temperature alata. Na slici 87. prikazani su dijagrami ovisnosti temperature alata o duljini glodanja pri obradi furnirskoga uslojenog drva.



Slika 87. Dijagram ovisnosti prosječnih temperatura alata o duljini obrade

S povećanjem duljine obrade dolazi do porasta temperature alata, neovisno o konstrukciji te vrsti materijala od kojeg su izrađeni tijelo i oštrica alata. Ova rezultati su istovjetni rezultatima Ahmada (1997). Temperatura alata raste na početku glodanja dok ne postigne radnu temperaturu. Rezultati regresijske analize prosječnih temperature u ovisnosti o duljini obrade dani su u tablicama 62., 63., i 64. Deskriptivna statistička analiza izmjerenih vrijednosti prosječnih temperature prikazana je u tablici 65., dok su rezultati dvofaktorske ANOVA-e s interakcijom dani u tablici 66., te na slikama 88., 90. i 91.

Tablica 62. Regresijska analiza prosječnih temperatura u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP 1

R=0,7442; R ² =0,5538; Prilagođeno R ² =0,5466; F(1,62)=76 p<0,000 Pogreška : 4,036						
N=64	b*	Standardna pogreška. b*	B	Standardna pogreška. b*	T(62)	p
Presjek			58,274	2,255	25,837	0,000
Duljina obrade za alat TIP 1	0,744	0,085	0,192	0,022	8,772	0,000

Tablica 63. Regresijska analiza prosječnih temperatura u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP 2

R=0,376; R ² =0,141; Prilagođeno R ² =0,127; F(1,62)=10,178 p<0,002 Pogreška : 3,159						
N=64	b*	Standardna pogreška. b*	B	Standardna pogreška. b*	T(62)	p
Presjek			45,026	1,766	25,501	0,000
Duljina obrade za alat TIP 1	0,376	0,118	0,055	0,017	3,190	0,002

Tablica 64. Regresijska analiza prosječnih temperatura u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP 3

R=0,260; R ² =0,068; Prilagođeno R ² =0,050; F(1,53)=3,858 p<0,055 Pogreška : 3,566						
N=55	b*	Standardna pogreška. b*	B	Standardna pogreška. b*	T(62)	p
Presjek			79,037	2,352	33,605	0,000
Duljina obrade za alat TIP 1	0,260	0,133	0,048	0,024	1,964	0,055

Tablica 63. Deskriptivna statistička analiza izmjerenih temperatura glodala za različite duljine obrade

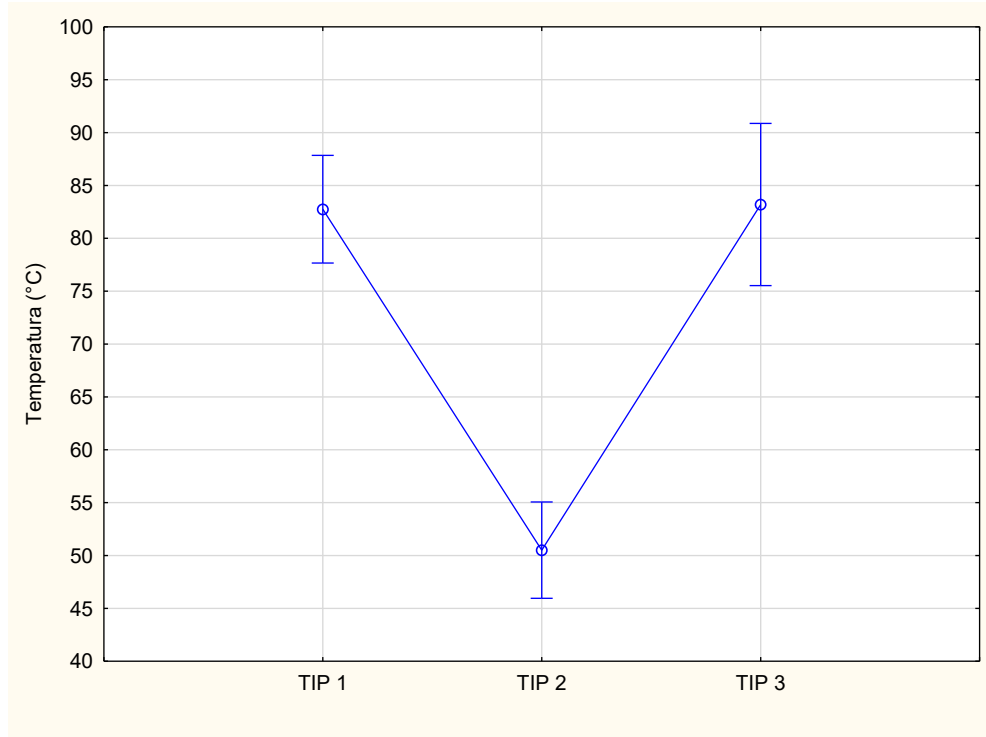
Izvor varijacije	Razina faktora	Razina faktora	<i>N</i>	Temperatura Aritmetička srednja vrijednost	Temperatura Standardna devijacija	Temperatura Standardna pogreška
Ukupno			433	68,14	35,72	1,72
Alat TIP 1	1		158	81,24	52,71	4,19
Alat TIP 2	2		190	50,52	6,48	0,47
Alat TIP 3	3		85	83,17	4,65	0,50
Duljina	100		250	67,33	15,81	1,00
Duljina	140		183	69,23	51,81	3,83
Alat×duljina	1	100	94	74,76	7,14	0,74
Alat×duljina	1	140	64	90,75	81,81	10,23
Alat×duljina	2	100	94	49,48	7,65	0,79
Alat×duljina	2	140	96	51,53	4,92	0,50
Alat×duljina	3	100	62	83,15	4,89	0,62
Alat×duljina	3	140	23	83,25	4,05	0,84

Tablica 64. Rezultati dvofaktorske ANOVA-e s utjecajem interakcije alata i duljine obrade na temperaturu alata

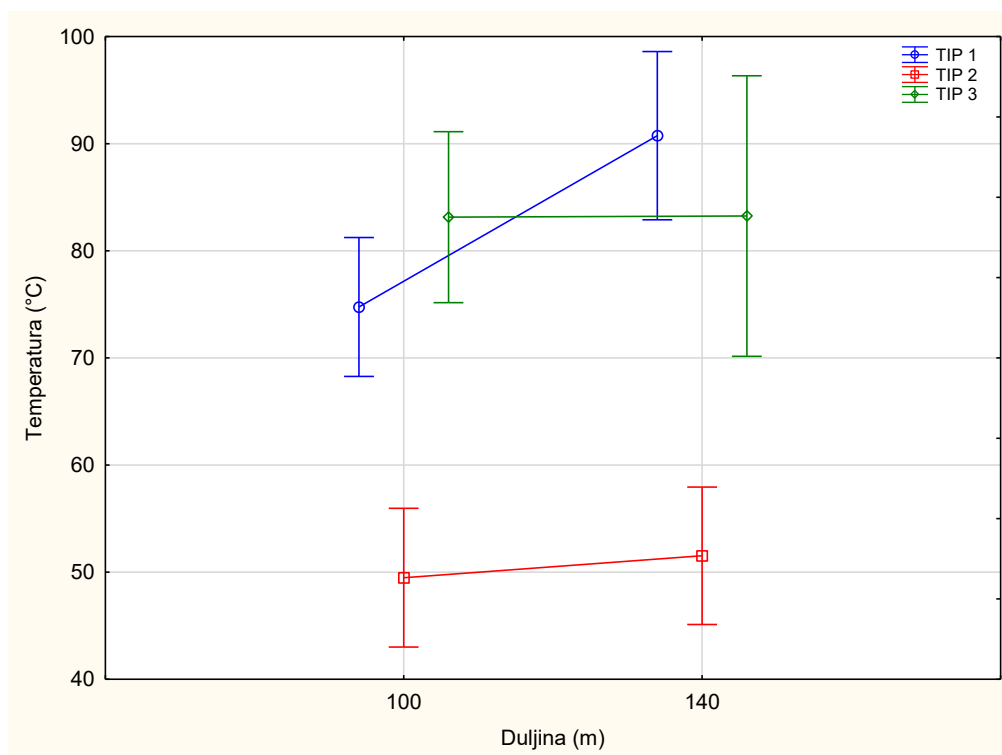
Izvor varijacije	<i>SS</i>	Stupanj slobode	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	Tukey test
Alat	106774	2	53387	52.29	0,000	(1,3)(2)
Duljina obrade	3080	1	3080	3,016	0,083	
Alat × duljina obrade	5044	2	2522	2,47	0,086	
Pogreška	435996	427	1021			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						

Najveće vrijednosti temperature dobivene su pri uporabi alata TIP 3, ali temperature ovog alata na pokazuju statistički signifikantnu razliku u odnosu na alat TIP 1, dok se izmjerena temperatura alata TIP 2 statistički signifikantno razlikuje od izmjerenih temperatura druga dva alata.

Prosječna temperatura glodala TIP 3 za 3% je veća od prosječne temperature glodala TIP 1, a za 40% veća od prosječne temperature glodala TIP 2. Prosječna temperature glodala TIP 1 veća je za 38 % od prosječne temperature glodala TIP 2.



Slika 88. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti prosječne temperature alata u ovisnosti o vrsti glodala



Slika 89. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti prosječne temperature alata u ovisnosti o duljini obrade i vrsti glodala

Na temelju rezultata ANOVA-e (tablica 64, slika 88) vidljivo je da ne postoji statistički značajan utjecaj interakcije duljine obrade i tipa alata, što znači da je utjecaj duljine obrade jednak za različite vrste alata.

Kako bi se utvrdila veza između polumjera zaobljenosti oštrice i temperature alata napravljena je njihova korelacija, a rezultati su prikazani u tablici 65.

Tablica 65. Pearsonova korelacija između izmjerenih vrijednosti polumjera zaobljenosti oštrice i prosječnih temperature alata

Alat	Koeficijent korelacije	Standardna devijacija
TIP 1	0,6930	3,526
TIP 2	0,3124	3,393
TIP 3	0,1806	3,770

Na temelju rezultata iz tablice 65. vidljivo je da postoji pozitivna korelacija između polumjera zaobljenosti oštrice, te temperature alata. Kod alata TIP 1 prisutna je jaka korelacija, dok je kod alata TIP 2 prisutna umjerena korelacija, dok je kod alata TIP 3 zanemariva korelacija. Ako promatramo grafikon promjene temperature (slika 88) i grafikon polumjera zaobljenosti oštrice (slika 84) u ovisnosti o duljini obrade, također se može zaključiti da porast temperature alata nastaje kao posljedica povećanja polumjera zaobljenosti oštrice. Ovaj rezultat istovjetan je rezultatu istraživanja Hormana i dr. (2014), gdje je utvrđeno da je povećanje polumjera zaobljenosti oštrice u direktnoj vezi s temperaturom alata. Povećanjem polumjera zaobljenosti oštrice dolazi do većeg trenja između oštrice alata i drva, te je potrebna veća energija kako bi se čestice drva odvojile. Povećanje trenja dovodi do generiranja veće topline, koja se zbog toplinske vodljivosti drva prenosi na alat, što se manifestira u povećanju temperature alata. Najveće povećanje temperature u ovisnosti o duljini obrade zabilježeno je kod glodala TIP 1.

Na duljini obrade od 100 m uočava se veći pad temperature alata, što je posljedica mjerenja polumjera zaobljenosti oštrice, pri čemu dolazi do hlađenja alata. Nakon nekoliko metara obrade temperatura se ponovno povećava i dostiže razinu koja je bila prije hlađenja, nakon čega nastavlja linearno rasti.

Rast temperature može se podijeliti u tri faze (Zhang i dr., 2021). Temperatura naglo raste u prvoj fazi i glavni razlog ovog fenomena jest da temperatura u prvoj i drugoj deformacijskoj zoni naglo raste s porastom debljine strugotine od 0 do maksimuma. U drugoj fazi temperatura oscilira, ali je

stabilna. Drvo se odlikuje slabim odvođenjem topline, zbog čega se temperatura zadržava u zoni rezanja, a glodanjem se dodatno proizvodi nova temperatura. U trećoj fazi temperatura se stabilizira kroz prijenos topline te postaje stalna. Isti trend uočava se pri svim mjerenim frekvencijama vrtnje alata. Dobiveni rezultati (slika 86) potvrđuju nalaze istraživanja Stribicka i Pahmeyera (2023). Njihovo istraživanje pokazalo je da u prvih 1,5 m temperatura naglo raste. Nakon 5 m obrade glodalo dostiže radnu temperaturu te je nakon toga temperatura alata gotovo jednaka, bez obzira na duljinu obrade, uz trend blagog porasta.

Prema prijašnjim istraživanjima (Guo i dr., 2014; Tratar i dr., 2014) pri povećanju dužine obrade zatupljuje se oštrice alata, što uzrokuje povećanje otpora pri rezanju a što se manifestira u povećanoj temperaturi alata. Pri obradi drva uslijed trenja koje se javlja između oštrice alata i drva dolazi do razvoja topline. Drvo je poznato kao izvrstan izolator topline te se sva generirana toplina odvodi putem strugotine ili se prenosi na alat (Merhar, 2021), što utječe na zagrijavanje alata (Igaz i dr., 2018). Ovisno o materijalu alata razvijaju se veće ili manje temperature. Zagrijavanje alata utječe na to da se polumjer zaobljenosti oštrice povećava, zbog toga što svojstva materijala kao što su tvrdoća, žilavost i kemijska stabilnost opadaju s porastom temperature (Porankiewicz i dr., 2008). Temperatura alata pri obradi utječe na trajnost alata, kvalitetu površine (pojava paljevine) i sigurnost procesa obrade (Igaz i dr., 2018).

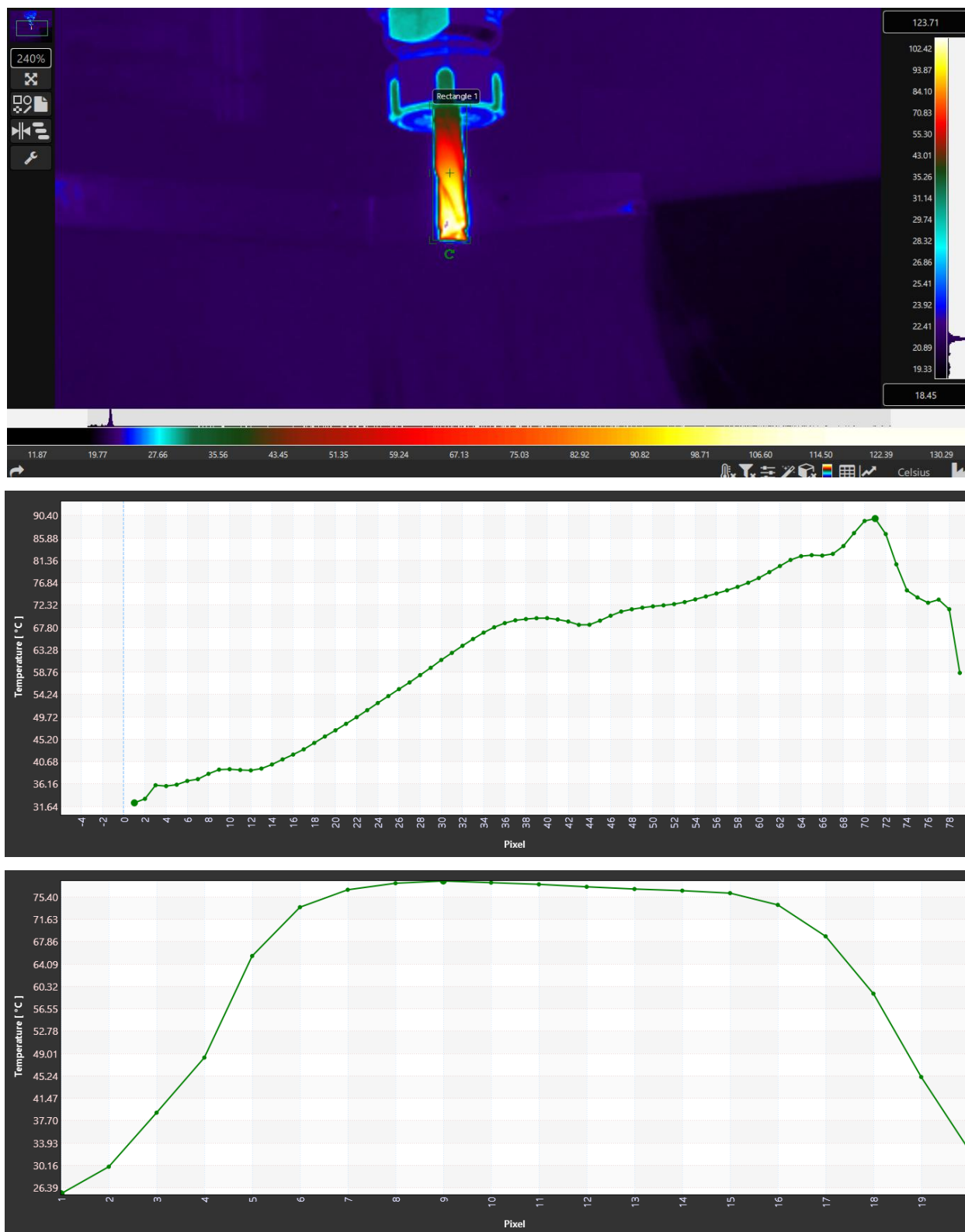
Na temelju rezultata analize temperatura (slika 86) i razine zvučnoga tlaka (slika 79) u ovisnosti o duljini obrade, može se zaključiti da se kod različitih glodala može naći zajednička poveznica između razine zvučnoga tlaka i izmjerenih temperatura, tj. što je veća temperatura alata, veća je razina zvučnoga tlaka. Da bi se ova tvrdnja statistički dokazala napravljena je Pearsonova korelacija između izmjerenih temperatura i razina zvučnoga tlaka, te su rezultati prikazani u tablici 66.

Tablica 66. Pearsonova korelacija između izmjerenih vrijednosti temperature alata i razine zvučnoga tlaka

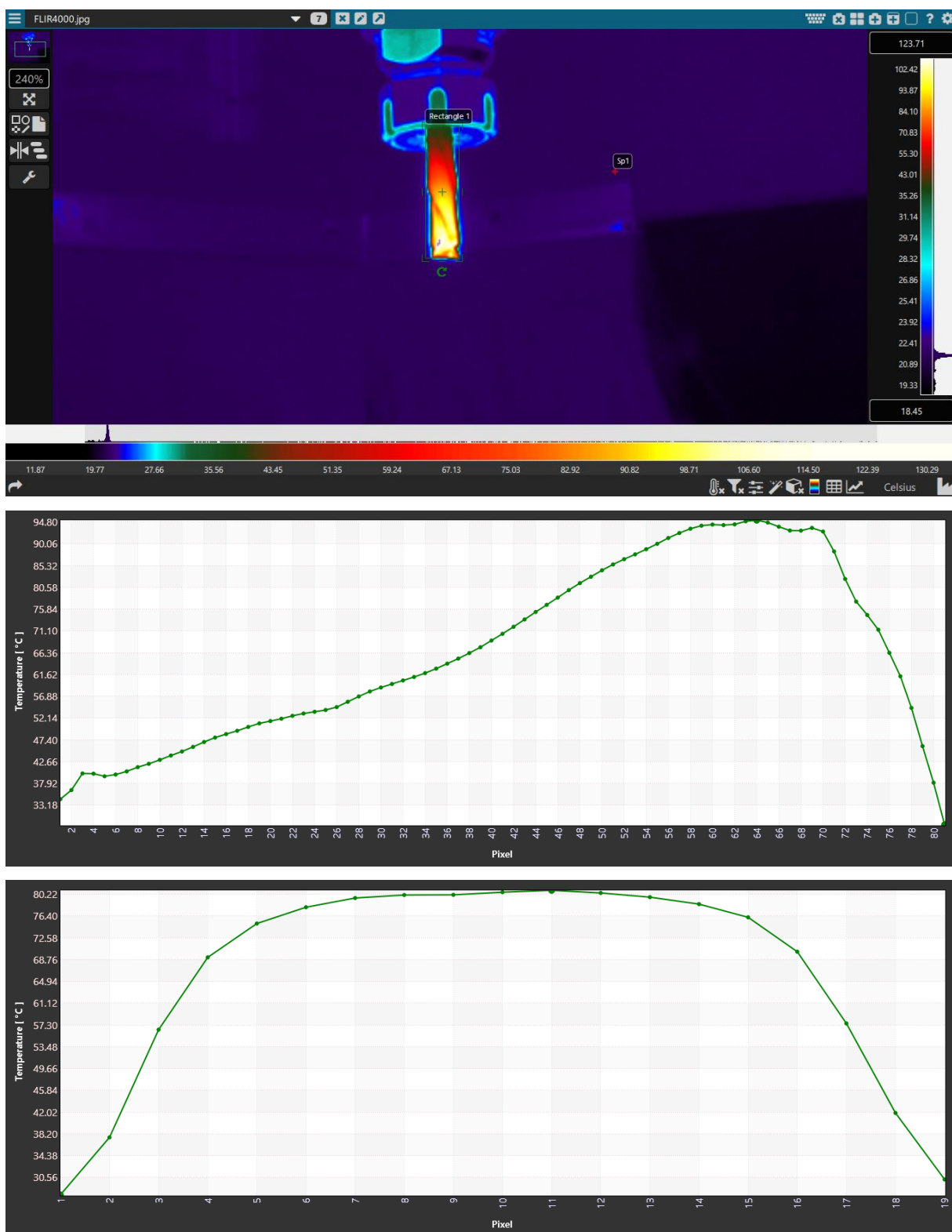
Alat	Koeficijent korelacije	Standardna devijacija
TIP 1	0,0845	5,994
TIP 2	0,091	3,822
TIP 3	0,500	3,659

Na temelju prikazanih rezultata Pearsonove korelacije vidimo da je za svaki alat koeficijent korelacije pozitivan, tako da tvrdnja koju smo naveli ranije je statistički dokazana. Kod TIP 1 i TIP 2 radi se o zanemarivoj korelaciji, tj. ne postoji korelacija a za TIP 3 radi se o umjerenoj korelaciji.

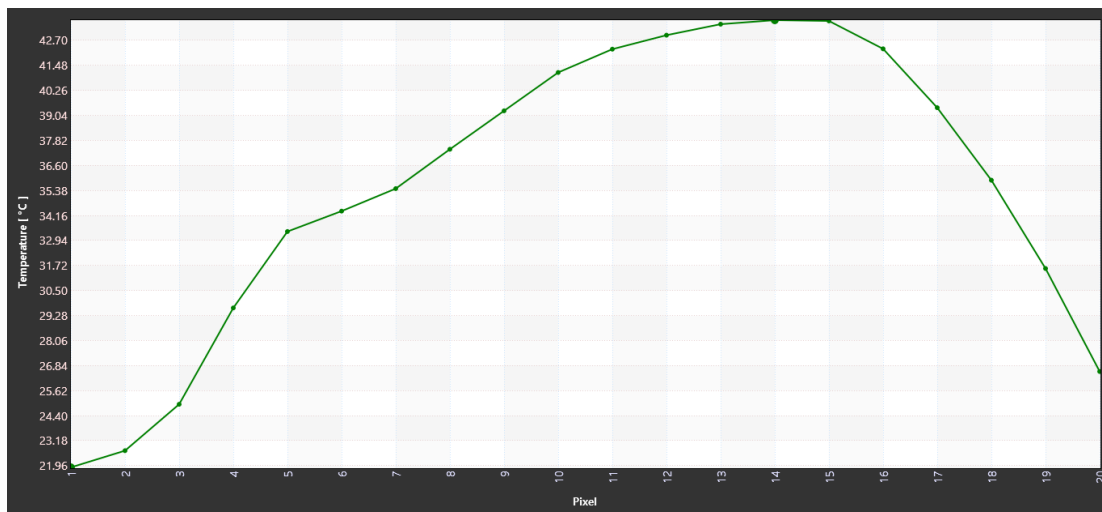
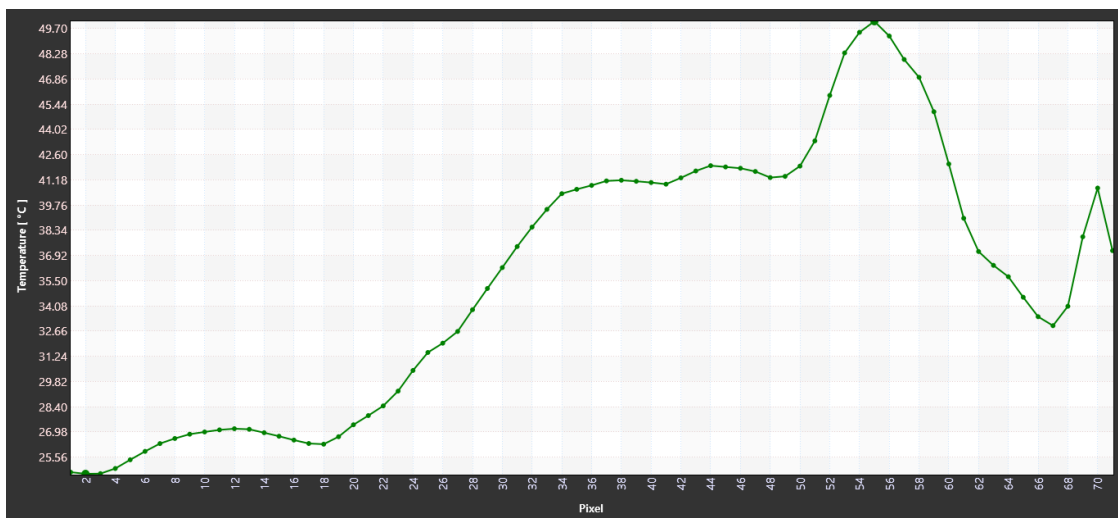
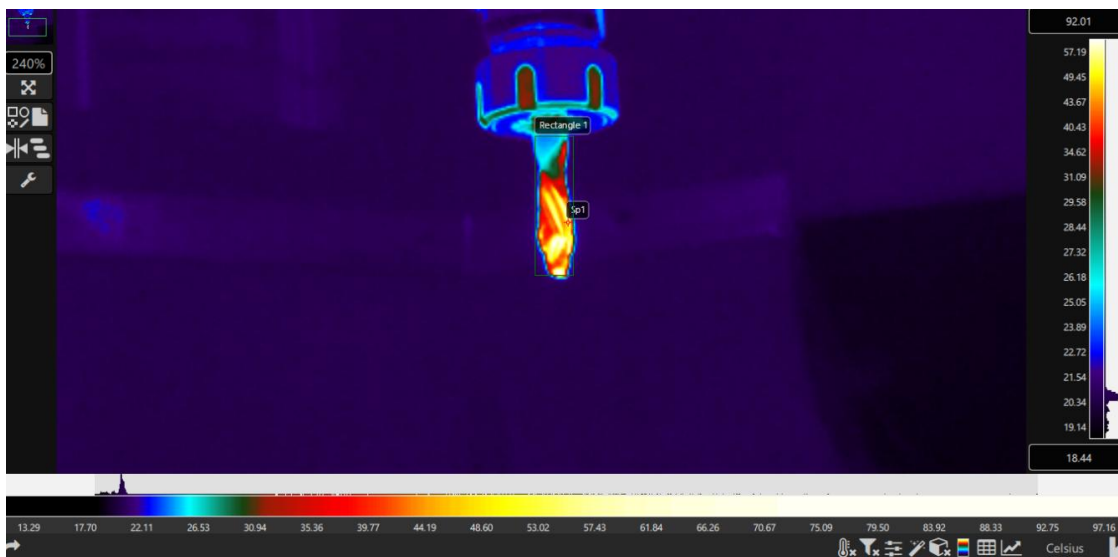
Distribucija temperature po profilu glodala nakon obrađenih 100 m i 140 m za sve tipove korištenih glodala prikazane su na slikama 90 - 95. Na gornjim slikama prikazan je termogram alata, na srednjim slikama prikazan je profil prosječnih temperatura vidljivog dijela alata po vertikali alata (odozgor prema dolje), a na donjim slikama prikazan je profil prosječnih temperature vidljivog dijela alata po horizontali (s lijeva na desno).



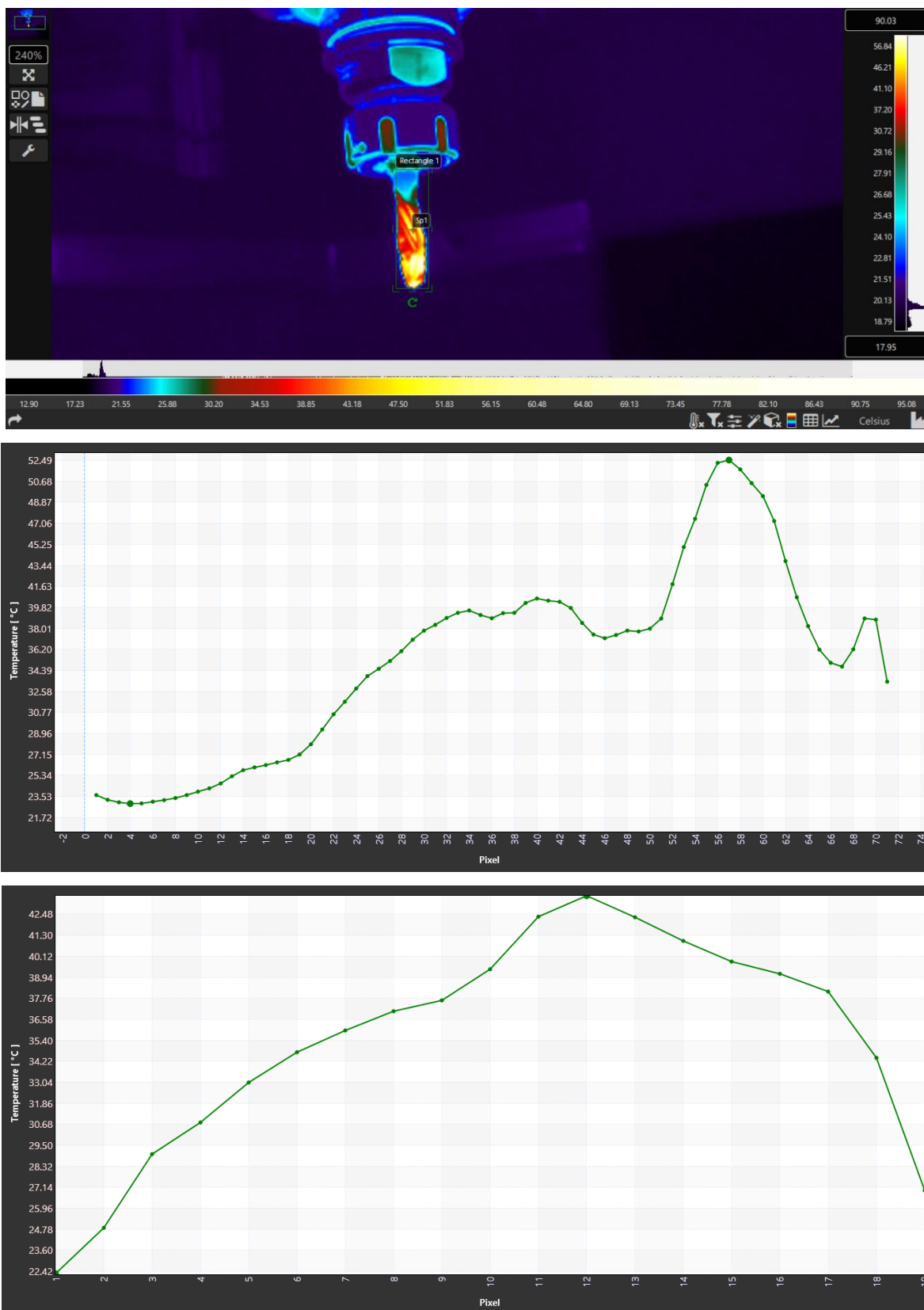
Slika 90. Distribucija temperature glodala TIP 1 nakon obrađenih 100 m



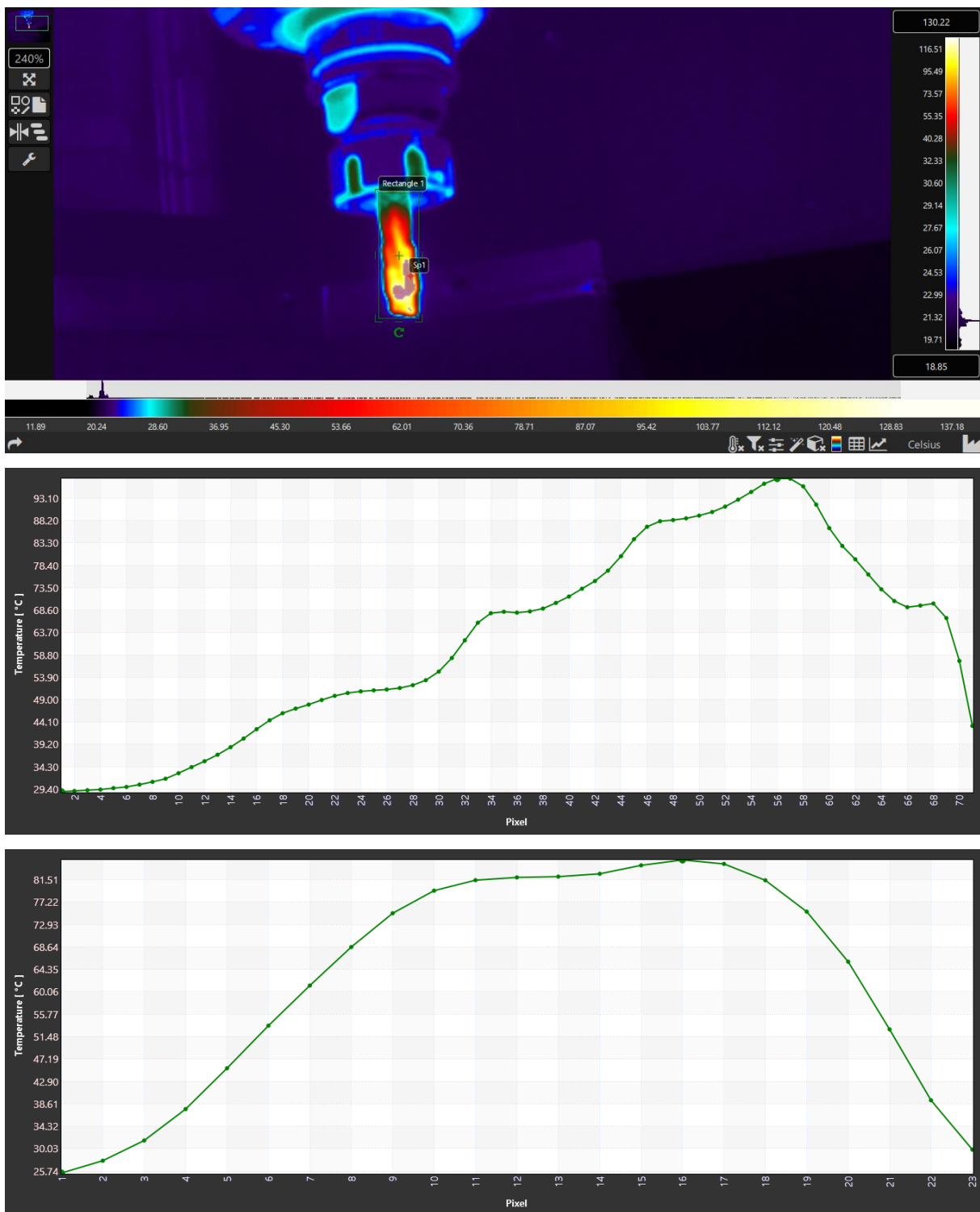
Slika 91. Distribucija temperature glodala TIP 1 nakon obrađenih 140 m



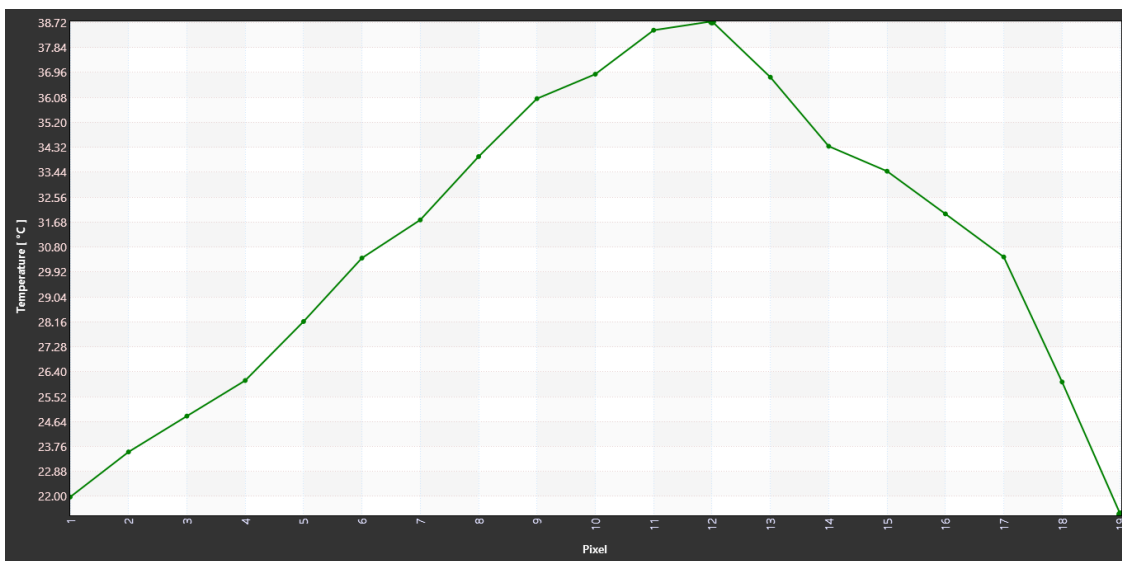
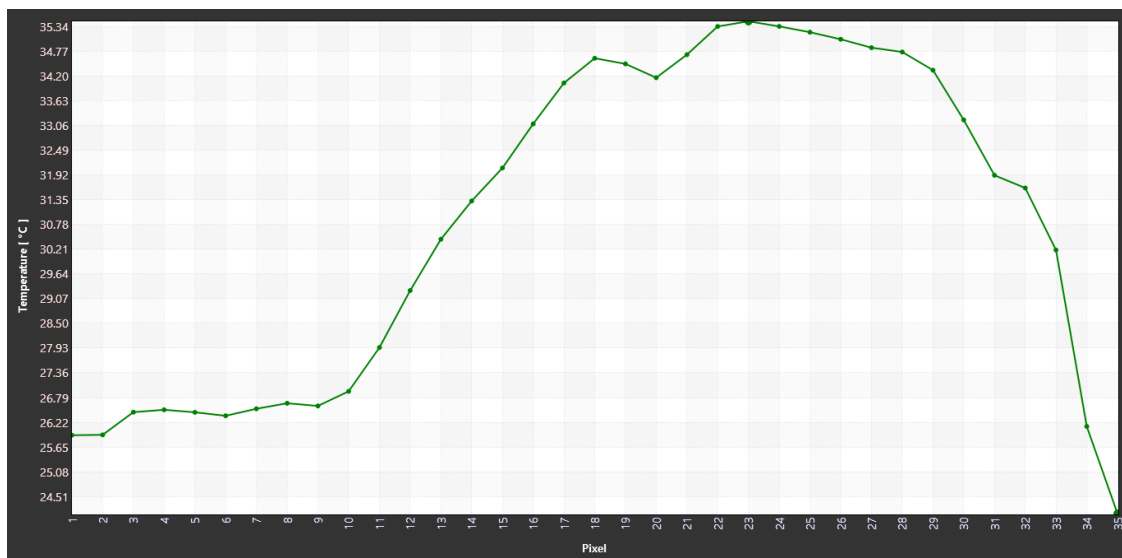
Slika 92. Distribucija temperature glodala TIP 2 nakon obrađenih 100 m



Slika 93. Distribucija temperature glodala TIP 2 nakon obrađenih 140 m



Slika 94. Distribucija temperature glodala TIP 3 nakon obrađenih 100 m



Slika 95. Distribucija temperature glodala TIP 3 nakon obrađenih 120 m

Kod glodala TIP 1 (slika 90 i 91) najveće su temperature u donjem dijelu alata. Ovaj je dio alata u zahvatu te je bilo i za očekivati da će najveće temperature biti u ovome dijelu alata. Prema gornjem dijelu alata, tj. prema dršci temperatura konstantno opada. Prema Ahmadu i dr. (2003), najveće temperature su po obodu oštrice alata. Povećanjem udaljenosti od oštrice alata temperature opadaju. Krajevi alata nisu hladniji nego se zbog konstrukcije mjestimično vidi prostor zraka između oštrica pa je prosječna temperatura na krajevima pravokutnika manja. Isto se vidi u prikazu rasporeda temperature po visini alata gdje sami vrh ima nižu temperaturu i to iz dva razloga: jedan je taj što se brže hladi i manje zagrijava jer mali dio oštrice viri s donje strane ploče, a drugi je taj što se u prosjek uračunava i dio temperature zraka u promatranom pravokutniku u kojem se u svakom trenutku ili poziciji u kojoj je postavljen alat ne vidi cijela oštrica već samo jedan njezin dio. Na temelju grafikona prikazanih na slici 89. i 90., može se zaključiti da se najveće temperature javljaju na dijelu alata koji je bio u sredini debljine ploče jer se najmanje mogao hladiti i u tom se području od nekoliko milimetara preklapaju sve četiri oštrice.

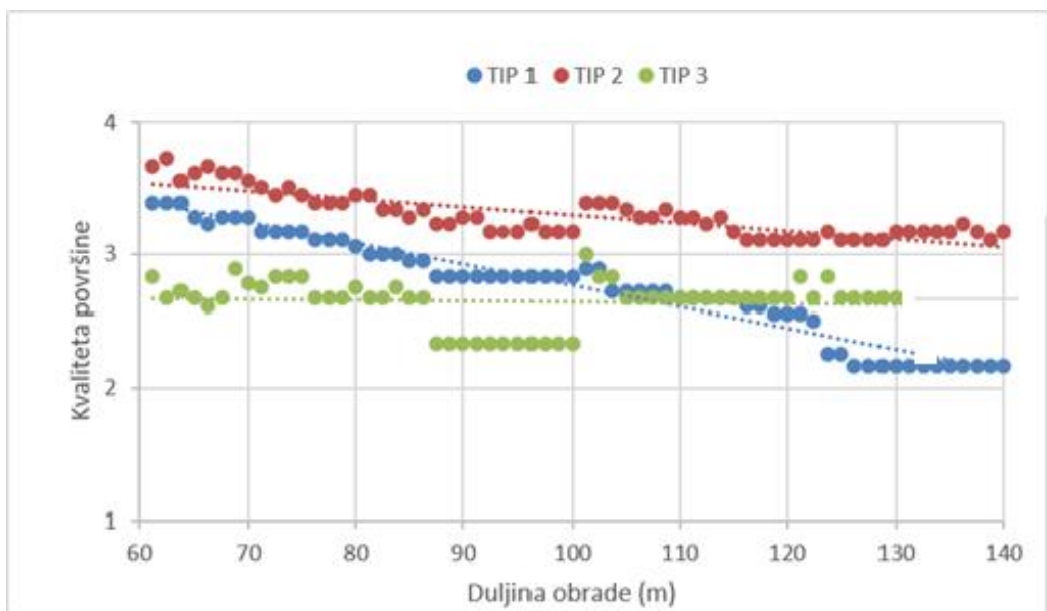
Na slikama 92. i 93. prikazan je temperaturni spektar alata TIP 2. Najveće zagrijavanje alata prisutno je u donjem dijelu alata, dok se, prema dršci temperatura smanjuje. Kod ovog alata najveća temperatura ne javlja se na vrhu donje oštrice već su maksimalne temperature malo pomjerene prema unutrašnjosti.

Kod glodala TIP 3 (slike 94 i 95) temperaturni spektar sličan je kao kod prethodna dva glodala tj. najveće temperature ne javljaju se na vrhu donje oštrice, nego su pomaknute prema unutrašnjosti. Alat TIP 3 nije uspio preći planiranu putanju od 140 m, već se uslijed preopterećenja slomio, te je zbog toga na slici 95. prikazan samo dio alata.

4.6.4. Analiza kvaliteta površine u ovisnosti o duljini obrade

U ovom dijelu prikazani su rezultati vizualne ocjene kvalitete obrađene površine. Ocjene kvalitete površine za svako promatrano svojstvo i svaki alat prikazane su u prilogu rada. Na slici 96. prikazani su dijagrami ovisnosti kvalitete o duljini glodanja pri obradi furnirskoga uslojenog drva s tri različita alata. Rezultati regresijske analize prikazani su tablicama 67., 68. i 69.

Na temelju ocijenjenih vrijednosti kvalitete u intervalu obrade 60-140 m putem jednofaktorske ANOVA-e izačunata je ovisnost kvalitete površine o vrsti alata, te su rezultati prikazani u tablici 70. i na slici 97.



Slika 96. Usporedne vrijednosti kvalitet površine u ovisnosti o duljini obrade

Tablica 67. Regresijska analiza kvalitete površine u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP1

R=0,976; R ² =0,952; Prilagođeno R ² =0,951; F(1,62)=1234,9 p<0,000 Pogreška : 0,083						
N=64	b*	Standardna pogreška. b*	B	Standardna pogreška. b*	T(62)	p
Presjek			4,344	0,046	93,542	0,000
Duljina obrade za alat TIP 1	-0,975	0,0278	-0,016	0,000	-35,141	0,000

Tablica 68. Regresijska analiza kvalitete površine u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP2

R=0,838; R ² =0,702; Prilagođeno R ² =0,697; F(1,62)=145,87 p<0,000 Pogreška : 0,092						
N=64	b*	Standardna pogreška. b*	B	Standardna pogreška. b*	T(62)	p
Presjek			3,902	0,052	75,546	0,000
Duljina obrade za alat TIP 1	-0,838	0,069	-0,006	0,001	-12,078	0,000

Tablica 69. Regresijska analiza kvaliteta površine u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP3

R=0,085; R ² =0,007; Prilagođeno R ² =0,007; F(1,62)=0,448 p<0,506 Pogreška : 0,169						
N=64	<i>b</i> *	Standardna pogreška. <i>b</i> *	<i>B</i>	Standardna pogreška. <i>b</i> *	<i>T</i> (62)	<i>p</i>
Presjek			2,698	0,094	28,587	0,000
Duljina obrade za alat TIP 1	-0,085	0,127	-0,001	0,001	-0,669	0,506

S povećanjem duljine obrađene površine kao posljedica povećanja polumjera zaobljenosti oštrice (slika 88) dolazi do smanjenja kvalitete obrađene površine (slika 98), a što su u svome istraživanju potvrdili Ketakuris i dr. (2017). Trend smanjenja kvalitete obrađene površine prisutan je pri uporabi svih glodala, najmanje je izražen pri uporabi glodala TIP 3, a najviše pri uporabi glodala TIP 1. Najčešće greške koje se javljaju prilikom glodanja drva, a koje utječu na kvalitetu obrađene površine su valovitost, promjena boje uslijed paljevine, isprekidana pojava pukotina, te nepresječena vlakna drva. Kvaliteta površine ovisi o parametrima obrade i o svojstvima drva (Gurgen i dr., 2022). U nekim slučajevima kvaliteta obrađene površine uslojenoga furnirskog drva ovisi i o kvaliteti lijepljenja (Li i dr., 2020). Pod kvalitetom površine podrazumijeva se stupanj odstupanja od idealno glatke površine (Adamcik i dr., 2024). Kvalitetu površine mogu karakterizirati nepravilnosti obrađene površine ili površinska hrapavost (Merhar i dr., 2020).

Na slici 95. vidljivo je da povećanjem duljine obrade dolazi do smanjenja kvalitete površine uslojenoga furnirskog drva obrađene glodanjem, ako se promatraju svi analizirani elementi kvalitete, uključujući valovitost, promjenu boje, isprekidanu pojavu pukotina te nepresječena vlakna drva.

Jednofaktorska ANOVA je provedena kako bi se usporedila promatrana svojstva površine pri uporabi različitih tipova alata, a rezultati provedene analize prikazani su u tablicama 70., 71., 72., te na slikama 97., 98., 99. i 100.

Tablica 70. Rezultati ANOVA-e za utjecaj vrste alata na kvalitetu površine (promjenu boje)

Izvor varijacije	<i>SS</i>	Stupanj slobode	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	Tukey test
Alat	438,36	2	219,18	475,68	0,000	(1)(2)(3)
Pogreška	425,29	923	0,46			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						

Tablica 71. Rezultati ANOVA-e za utjecaj vrste alatana kvalitetu površine (valovitost)

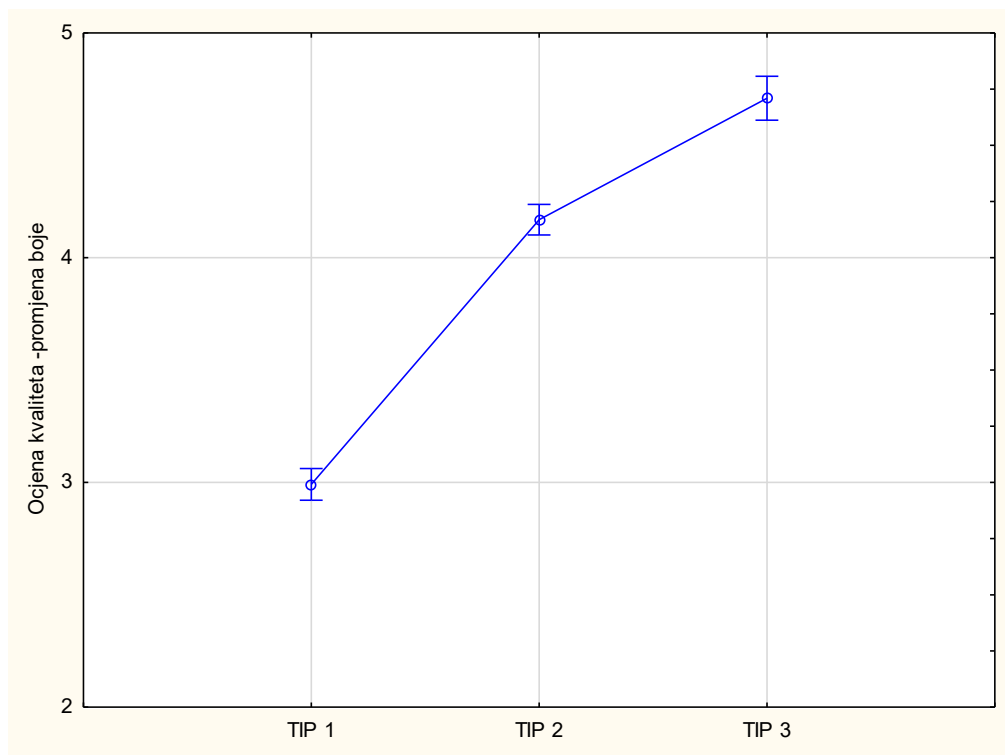
Izvor varijacije	<i>SS</i>	Stupanj slobode	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	Tukey test
Alat	234,256	2	117,128	875,50	0,00	(1)(2)(3)
Pogreška	61,54	460	0,134			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						

Tablica 72. Rezultati ANOVA-e za utjecaj vrste alata na kvalitetu površine (isprekidanu pojavu pukotina)

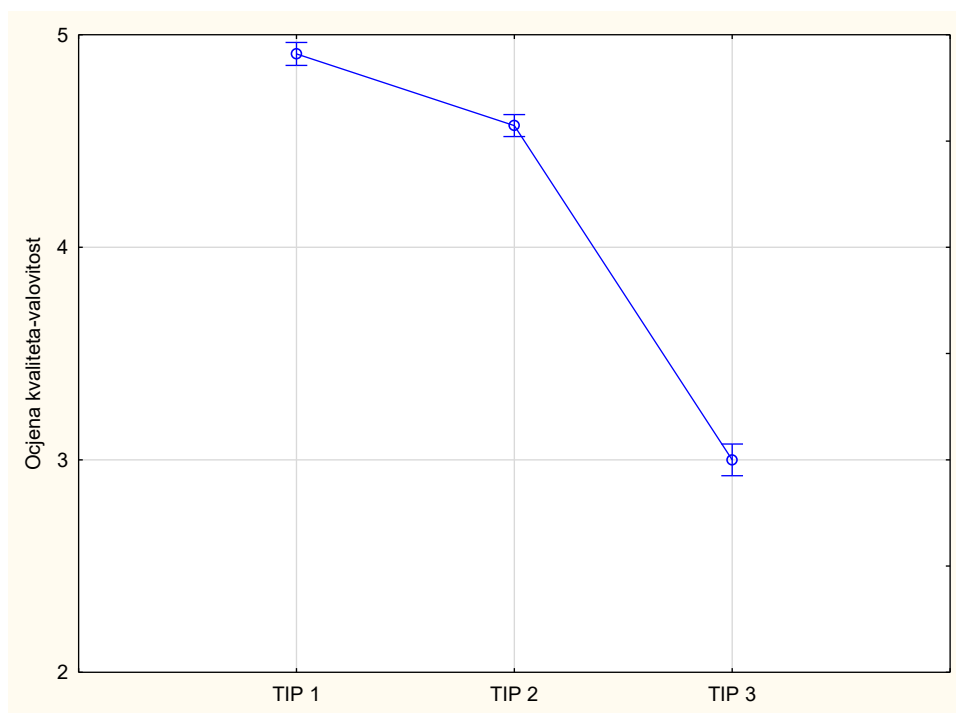
Izvor varijacije	<i>SS</i>	Stupanj slobode	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	Tukey test
Alat	113,428	2	56,714	208,03	0,00	(1,2)(3)
Pogreška	125,406	460	0,273			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						

Tablica 73. Rezultati ANOVA-e za utjecaj vrste alata na kvalitetu površine (nepresječena vlakanca drva)

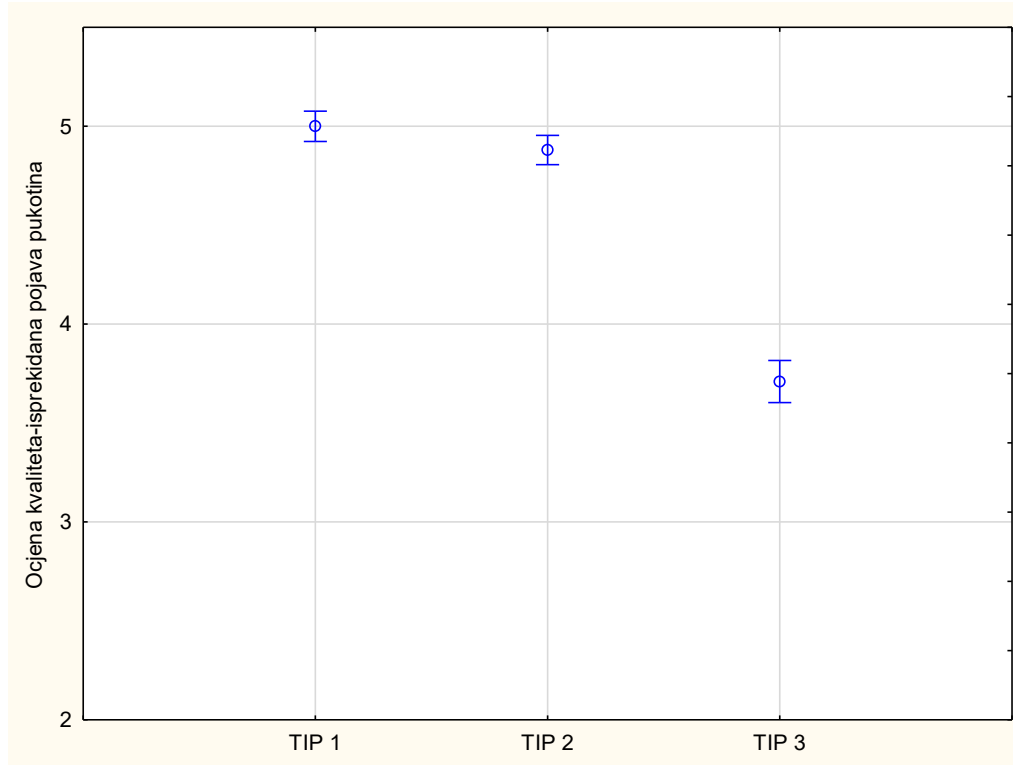
Izvor varijacije	<i>SS</i>	Stupanj slobode	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	Tukey test
Alat	45,614	2	22,807	54,05	0,00	(1)(2)(3)
Pogreška	129,829	457	0,422			
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj parametara obrade $p < 0,05$						



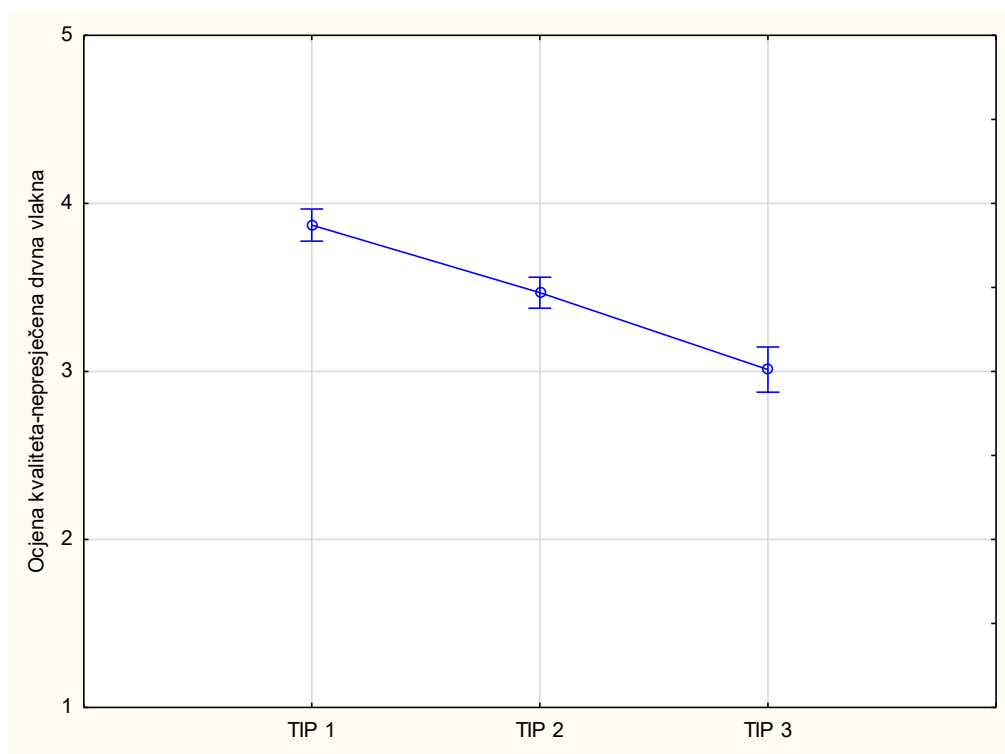
Slika 97. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti kvalitete površine (promjena boje) u ovisnosti o vrsti alata



Slika 98. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti kvalitete površine (valovitosti) u ovisnosti o vrsti alata



Slika 99. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti kvalitete površine (isprekidana pojava pukotina) u ovisnosti o vrsti alata



Slika 100. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti kvalitete površine (nepresječena drvena vlakna) u ovisnosti o vrsti alata

Pri uporabi različitih alata dobije se statistički signifikantna razlika u kvaliteti obrađenih površina. Uporaba alata TIP 1 uzrokuje veću promjenu boje (paljevina) drva, za razliku od druga dva alata (slika 96). Promjena boje najviše je evidentna na kutevima, gdje dolazi do usporavanja glodala uslijed promjene pravca kretanja.

Najveća valovitost površine dobivena je uporabom glodala TIP 3, dok je najmanja valovitost zabilježena uporabom glodala TIP 1. Nakon obrade glodalom TIP 1 valovitost praktično nije ni prisutna, na mjerenoj duljini obrade (ocjena 5). Nakon obrade glodalom TIP 2 prisutna je minimalna valovitost obrađene površine. Isprekidana pojava pukotina, kao i nepresječena drvena vlakna najviše se javljaju pri uporabi dijamantnoga glodala TIP 3, dok su ova dva parametra kvalitete površine najmanje prisutna na površinama obrađenim glodalom TIP 1. Kod alata TIP 3 dobijena je najlošija kvaliteta površine, aiko je uobičajno da se glodala sa dijamantskom oštricom koriste tamo gdje nem je potrebna povećanja kvaliteta obrade. Razlog za ovo je Velika posmična brzina koja je korištena u eksperimentalnom dijelu. Naime zbog povećanog kuta oštrice, pri radu sa glodalima sa dijamantskom oštricom potrebno je koristiti znatno manje posmične brzine kako bi kvaliteta bila zadovoljavajuća.

Kvaliteta površine određena na način opisan u poglavlju Metode i materijali predstavlja diskretnu veličinu, ovu veličinu ne možemo staviti u korelaciju s razinom zvučnoga tlaka, temperaturom i polumjerom zaobljenosti oštrice. Jedino na temelju prikazanih grafikona promjene razine zvučnoga tlaka, temperature, polumjera zaobljenosti oštrice te kvalitete površine (slike 79., 82., 86. i 96) možemo konstatirati da kvaliteta površine obrnuto proporcionalna razini zvučnoga tlaka, temperaturi alata i polumjeru zaobljenosti oštrice, ali ovu tvrdnju ne možemo statistički dokazati. Prema ovom istraživanju, može se zaključiti da je moguće pratiti kvalitetu obrađene površine na temelju temperature alata, razine zvučnoga tlaka i polumjera zaobljenosti oštrice. S porastom duljine obrade smanjuje se kvaliteta obrađene površine. Na svojstva kvalitete obrađene površine (promjenu boje, isprekidanu pojavu pukotina, valovitost, nepresječena drvena vlakanca) prvenstveno utječe geometrija alata u kombinaciji s parametrima obrade. Vizualnom ocjenom moguće je procijeniti kvalitetu obrađene površine.

§ 5. ZAKLJUČAK

Na temelju postavljenih ciljeva i hipoteza, provedenih eksperimentalnih istraživanja te prezentiranih rezultata mjerenja možemo iznijeti sljedeće zaključke.

1. Utjecaj držača alata CNC stroja na razinu emisije zvučnoga tlaka pri obradi furnirskoga uslojenog drva statistički je signifikantan. Najmanja razina zvučnoga tlaka izmjerena je pri uporabi držača alata LEUCO s čahurom E32 a najveća pri uporabi držača alata AKE32 s istom čahurom ER32.
2. CNC stroj, na kojem je provedeno eksperimentalno glodanje, ima mogućnost povećanja posmične brzine maksimalno do 30 m/min. U uvjetima obrade tijekom provedbe eksperimenta, povećanje posmične brzine do 30 m/min nije prouzročilo dovoljno velike vibracije alata da bi se aktivirao zaštitni mehanizam koji zaustavlja stroj uslijed prekoračenja granične razine vibracija. U takvim uvjetima nije bilo moguće utvrditi minimalni i maksimalni pomak po oštrici koji uzrokuje pojavu graničnih vibracija te nije bilo moguće dokazati niti opovrgnuti prvi dio hipoteze H1.
3. Na temelju činjenice da maksimalna duljina obrade ovisi o brzini zatupljenja oštrice alata te dobivene statistički signifikantne razlike povećanja polumjera zaobljenosti oštrice alata za tri vrste glodala nakon duljine obrade 60 m i statistički signifikantne razlike polumjera zaobljenosti oštrice alata nakon duljine obrade 100 i 140 m možemo zaključiti da se maksimalna duljina obrade razlikuje za tri istraživane vrste alata za glodanje, čime je dokazan drugi dio hipoteze H1. Razlika u maksimalnim duljinama obrade za tri istraživana alata postala je očita u trećoj fazi eksperimenta kada je u uvjetima obrade s ciljem maksimalnoga učina došlo do loma sva tri uzorka alata TIP 3 i jednog uzorka alata TIP 1 a sva tri uzorka alata TIP 2 završila su obradu do ciljane duljine obrade od 140 m. Takav ishod obrade navodi nas na zaključak da kumulativni efekt prouzročen zagrijavanjem alata i njegovom vibracijom u obradi potenciran povećanjem zaobljenosti oštrice mogu izdržati samo alati odgovarajuće visoke kvalitete materijala i vrhunski izvedene konstrukcije te da su oni jedini dovoljno dobar zaštitni mehanizam od neželjenih opterećenja i loma alata u uvjetima obrade koja ima za cilj maksimalni učinak.

4. Konstrukcija i geometrija glodala dominantni su čimbenik koji utječe na zagrijavanje alata pri obradi furnirskoga uslojenog drva. Utjecaj frekvencije vrtnje alata i posmične brzine na maksimalnu temperaturu alata statistički je značajan, ali je njihov utjecaj znatno manji. Razlika maksimalnih temperatura tri tipa istraživanih glodala u uvjetima obrade provedenog eksperimenta glodanja furnirskoga uslojenog drva statistički je signifikantna. S povećanjem frekvencije vrtnje alata temperatura alata se smanjuje a s povećanjem posmične brzine temperature alata se povećava. Povećanje frekvencije vrtnje alata i posmične brzine ima suprotan utjecaj na zagrijavanje alata tijekom obrade furnirskoga uslojenog drva te rezultati dokazuju drugi dio hipoteze H2.
5. Količina odstranjenoga materijala obrade u jedinici vremena povećava se s povećanjem posmične brzine i smanjenjem frekvencije vrtnje alata. S obzirom na prezentirane rezultate utjecaja posmične brzine i frekvencije vrtnje alata na temperaturu alata može se zaključiti da je povećanje količine odstranjenog materijala ograničavajući čimbenik povećanja učinka obrade i da je radi smanjenja temperature alata nužno pri povećanju posmične brzine povećavati proporcionalno i frekvenciju vrtnje alata što je potvrda hipoteze H4.
6. Parametri obrade su dominantan čimbenik koji utječe na razinu zvučnoga tlaka pri obradi furnirskoga uslojenog drva. Pri promjeni frekvencije vrtnje dolazi do smanjenja razine zvučnoga tlaka. Povećanje posmične brzine utječe na povećanje razine zvučnoga tlaka čime je dokazan prvi dio hipoteze H2. Posmična brzina ima najznačajniji utjecaj na razinu zvučnoga tlaka. I utjecaj vrste alata je statistički signifikantan, najniža razina zvučnoga tlaka izmjerena je pri glodanju s alatom TIP 2. Frekventni spektri zvučnoga tlaka pokazali su da visoke razine zvučnoga tlaka na frekvencijama 4000 i 5000 Hz najviše pridonose visokim ukupnim razinama zvučnoga tlaka pri pojedinim frekvencijama vrtnje alata.
7. Dominantan čimbenik koji utječe na povećanje polumjera zaobljenosti oštrice je geometrija i materijal alata, te je ovaj čimbenik višestruko utjecajniji od frekvencije vrtnje alata. Veličina polumjera zaobljenosti oštrice nakon obrade od 60 m statistički signifikantno se razlikuje za sva tri istraživana glodala. Najmanje povećanje polumjera zaobljenosti oštrice izmjereno je na glodalu TIP 3 s PCD oštricama.

8. Optimizacijom parametara obrade primjenom višekriterijskih metoda odlučivanja odabrani su parametri obrade uzimajući u obzir kriterije najvećeg učinka, najmanje razine zvučnoga tlaka, najmanje temperature alata i najmanjega zatupljenja alata tj. minimalnog povećanja polumjera zaobljenosti oštrice. S obzirom na značajne razlike u utjecaju parametara obrade na zagrijavanje alata, razinu zvučnoga tlaka i zatupljenje alata, optimalni parametri obrade razlikuju se za tri tipa istraživanih alata. Međutim, razlika je u odabranoj optimalnoj frekvenciji vrtnje alata, dok je zbog kriterija najvećeg učinka kao optimalna za sve tipove alata odabrana veća posmična brzina.
9. Povećanjem duljine obrade povećava se razina zvučnoga tlaka, međutim regresijska analiza pokazala je jaku povezanost samo za alat TIP 3 ($R=0,759$; $R^2=0,577$; $p < 0,000$) dok je slaba povezanost zabilježena za alate TIP 1 ($R=0,181$; $R^2=0,033$; $p < 0,153$) i TIP 2 ($R=0,291$; $R^2=0,084$; $p < 0,019$). Sa stajališta razine emisije zvučnoga tlaka najbolji rezultati postignuti su pri obradi glodalom TIP 2.
10. Povećanjem duljine obrade povećava se temperatura alata. Regresijska analiza pokazala je jaku povezanost za alat TIP 1 ($R=0,7442$; $R^2=0,5538$; $p<0,000$) i umjerenu povezanost za alat TIP 2 ($R =0,376$; $R^2=0,141$; $p <0,002$) i alat TIP 3 ($R =0,260$; $R^2=0,068$; $p <0,055$). Najmanje prosječne temperature alata zabilježene su na glodalu TIP 2.
11. Povećanjem duljine obrade povećava se polumjer zaobljenosti oštrice alata. Razlika polumjera zaobljenosti oštrice nakon duljine obrade 60 m, 100 m i 140 m statistički je signifikantna a duljina obrade ima značajniji utjecaj od vrste alata. Između izmjerenih vrijednosti razine zvučnoga tlaka i polumjera zaobljenosti utvrđena je pozitivna umjerena korelacija za glodalo TIP 3 ($r = 0,5251$) dok je za glodala TIP 1 ($r = 0,1858$) i TIP 2 ($r = 0,0910$) korelacija zanemariva.
12. Između prosječne temperature alata i polumjera zaobljenosti oštrice alata utvrđena je za glodalo TIP 1 jaka povezanost (koeficijent korelacije $r=0,6930$), za alat TIP 2 umjerena povezanost ($r=0,3124$) dok je za alat TIP 3 ($r=0,1806$) utvrđena vrlo slaba korelacija. Korelacija između temperature alata i razine zvučnoga tlaka zanemariva je za alate TIP 1 i TIP 2 dok je za alat TIP 3 utvrđena umjerena povezanost ($r=0,5$). Rezultati pokazuju bolju povezanost prosječne temperature alata i polumjera zaobljenosti oštrice nego razine zvučnoga tlaka i zaobljenosti polumjera oštrice.

13. Povećanje duljine obrade utjecalo je na smanjenje kvalitete obrađene površine te je regresijskom analizom utvrđena vrlo jaka povezanost za alate TIP 1 ($R=0,976$; $R^2=0,952$; $p<0,000$) i TIP 2 ($R=0,838$; $R^2=0,702$; $p<0,000$) a za TIP 3 povezanost je zanemariva ($R=0,085$; $R^2=0,007$; $p<0,506$). S obzirom na to da je kvaliteta obrade izražena kao diskretna veličina, ne može se staviti u korelaciju s razinom zvučnog tlaka, međutim kako je pokazano da kvaliteta obrade s povećanjem duljine obrade opada a razina zvučnog tlaka raste time je potvrđena hipoteza H3.
14. Na temelju dobivenih rezultata i provedenih analiza može se zaključiti da usklađivanje izabranog alata i parametara obrade furnirskoga uslojenog drva ima značajan utjecaj na trajnost alata i kvalitetu obrađene površine. Stoga, iznimno su vrijedne kvalitetne preporuke proizvođača alata za primjenu prikladnih parametara obrade za pojedine vrste drva i materijala na bazi drva, čemu mogu pridonijeti i rezultati ovih istraživanja.

§ 6. LITERATURNI IZVORI

1. Aguilera, A.; Barros, J.L. (2010): *Sound pressure as a tool in the assessment of the surface roughness on medium density fibreboard rip sawing process*. Maderas Ciencia y tecnología. 12(3). DOI: 10.4067/S0718-221X2010000300001
2. Aguilera, A.; Barros, J.L. (2011): *Surface roughness assessment on medium density fibreboard rip sawing using acoustic signals*. Eur. J. Wood Prod. 70: 369–372, DOI 10.1007/s00107-011-0528-0
3. Ahmad, J.S. (1997): *Measurement of Tool Wear and Dulling in the Machining of Particleboard*. In: Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar, Canada, Vancouver, June, 1997. DOI: 10.13140/2.1.4579.8086
4. Ahmad, J.S.; Bailey, J.A. (1999): *High-temperature wear of cemented tungsten carbide tools while machining particleboard and fiberboard*. Journal of Wood Science, 45(6):445-455. DOI: 10.1007/BF00538952
5. Ahmad, J.S.; Lewandowski, C.; Bailey, J. A.; Stewart, J. S. (2003): *Experimental and Numerical Method for Determining Temperature Distribution in a Wood Cutting Tool*, Experimental Heat Transfer, 16(4): 255-271. DOI: 10.1080/08916150390223092
6. Ahsan, A.; Kahlmeyer, M.; Fedotov, E.; Böhm, S. (2023): *Polycrystalline Diamond Tool for Milling of Granite*. In: Proceedings of the 19th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Argentina, Buenos Aires, December, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-77429-4_69
7. Ajdinaj, D., Çota, H., Zejnullahu, F., Sejdiu, R., Bajraktari, A., & Mustafaraj, K. (2023): *Noise emission and quality of surface of thermally modified silver fir wood planed by horizontal milling machine*. Wood Research, 68(4): 718-731. DOI: 10.37763/wr.1336-4561/68.4.718731
8. Akbulut, T.; Ayırlmis, N. (2019): *Some advantages of three-layer medium-density fibreboard as compared to the traditional singlelayer one*. Journal of Wood Science, 65(1). DOI:10.1186/s10086-019-1822-4
9. Ayyıldız, E.A.; Ayyıldız, M.; Kara, F. (2021): *Optimization of Surface Roughness in Drilling Medium-Density Fiberboard with a Parallel Robot*. Advances in Materials Science and Engineering, 7: 1-8, <https://doi.org/10.1155/2021/6658968>

10. Bal, B.C.; Akçakaya, E. (2018): *The effects of step over, feed rate and finish depth on the surface roughness of fiberboard processed with CNC machine*. Furniture and Wooden Material Research Journal, 1(2): 86-93. DOI: 10.33725/mamad.481278
11. Barčík, Š.; Kminiak, R.; Řehák, T., Kvietková, M. (2010): *The influence of selected factors on energy requirements for plain milling of beech wood*. Journal of Forest Science, 56(5): 243-250. DOI: 10.17221/119/2009-JFS
12. Begić-Hajdarević, Đ.; Klančnik, S.; Muhamedagić, K.; Čekić, A.; Čohodar Husić, M.; Ficko, M.; Gusel, L. (2024): *FDM process parameter selection by hybrid MCDM approach for flexural and compression strength maximization*. Advances in Production Engineering & Management, 19(1):108–116. <https://doi.org/10.14743/apem2024.1.496>
13. Beer, P., Rudnicki, J., Ciupinski, L., Djouadi, M. A., and Nouveau, C. (2003): *Modification by composite coatings of knives made of low alloy steel for wood machining purposes*. Surface and Coatings Technology, 174: 434-439. DOI: 10.1016/S0257-8972(03)00588-7
14. Bendikiene, R.; Keturakis, G.(2017): *The influence of technical characteristics of wood milling tools on its wear performance*, Journal of Wood Science, 63:606–614. DOI: 10.1007/s10086-017-1656-x
15. Bojović, I.; Janjić, M. (2013): *Uticaj broja obrtaja glavnog vretena na hrapavost obrađene površine bukovog drva*. In: Proceedings 9th International Scientific Conference on Production Engineering RIM, Crna Gora, Budva, Septembar, 2013
16. Brezin, V.; Vitchev, P. (2014): *Influence of wood cutting process on noise generated during milling*. In: Proceedings of the 9-th international science conference: Chip and chipless woodworking processes. Slovakia, Zvolen, September, 2014.
17. Busuladžić, I.; Horman, I.; Hajdarević, S. (2017): *Prediction of Wear of Woodworking Tools Depending of the Chip Thickness by Boundary Element Method Simulation*. In: Proceedings of the 28th International DAAAM Symposium. Croatia, Zadar, November, 2017. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.052
18. Cakiroğlu, E. O.; Demir, A.; Aydın, İ.; Büyüksarı, Ü. (2022): *Prediction of optimum CNC cutting conditions using artificial neural network models for the best wood surface quality, low energy consumption, and time savings*. BioResources 17(2), 2501-2524. DOI: 10.15376/biores.17.2.2501-2524

19. Catak O. F.; Karabas S.; Yildirim S.(2012): *Fuzzy Analitic Hierarchy Based DBMS Selection in Turkish National Identity Card Management Project*. International Journal of Information Sciences and Techniques, 2(4): 29-38. DOI: 10.5121/ijist.2012.2403
20. Chayeuski, V.V; Kuleshov, A. K.; Barcik, Š.; Koleda, P.; Rudak, O. G.; Rudak, P. V. (2022): *Influence of MoC Coatings on Wear of Edges of Steel Knives and Cutting Parameters for Milling Oak Wood*. Journal of Friction and Wear, 43(6):370-376. DOI: 10.3103/S1068366622060034
21. Chen, C.C.; Liu, N.M.; Chiang, K.T.; Chen, H.L. (2012): *Experimental investigation of tool vibration and surface roughness in the precision end-milling process using the singular spectrum analysis*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 63:797–815. DOI 10.1007/s00170-012-3943-4
22. Chladil, J.; Sedlák, J.; Šebelova, E.R.; Kučera, M.; Dado, M. (2019): *Cutting conditions and tool wear when machining wood-based materials*. Bioresources, 14(2):3495–3505. DOI: 10.15376/biores.14.2.3495-3505
23. Curti, R.; Marcon, B.; Denaud, L.; Collet, R.(2018): *Effect of Grain Direction on Cutting Forces and Chip Geometry during Green Beech Wood Machining*. BioResources, 13(3): 5491-5503. DOI: 10.15376/biores.13.3.5491-5503
24. Darmawan , W.; Tanaka, C.; Usuki, H.; Ohtani, T. (2001): *Performance of coated carbide tools in turning wood-based materials: Effect of cutting speeds and coating materials on the wear characteristics of coated carbide tools in turning wood-chip cement board* . Journal of Wood Science, 47:342-349. <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/28041>
25. Demir, A.; Evren Osman Cakiroglu, E.O.; Aydin, I. (2022): *Effects of CNC Processing Parameters on Surface Quality of Wood-Based Panels Used in Furniture Industry*. Drvna industrija, 73(4): 363-371. DOI:10.5552/drvind.2022.2109
26. De Deus, P.R.; Alves, M.C.D.S.; Vieira, F.H.A. (2015): *The quality of MDF workpieces machined in CNC milling machine in cutting speeds, feedrate, and depth of cut*. Meccanica, 50: 2899–2906. DOI 10.1007/s11012-015-0187-z
27. Diushenalieva, E.; Ginevičius, E. (2012): *Multiple attribute decision making model for analysis of the crisis situation in the enterprise*. In: Proceedings of 7th International

- Scientific Conference “Business and Management, Lithuania, Vilnius, May, 2012, 10-11. doi:10.3846/bm.2012.135
28. Đurković, M.; Mladenović, G.; Tanović, L.; Danon, G. (2018): *Impact of feed rate, milling depth and tool rake angle in peripheral milling of oak wood on the cutting force*. Maderas: Ciencia y Tecnología 20: 25-34. DOI: 10.4067/S0718-221X2018005001301
 29. Fahrussiam, F.; Praja, I.A.; Darmawan, W.; Wahyudi, I.; Usuki, H.; Koseki, S. (2015): *Wear Characteristics of Multilayer-Coated Cutting Tools in Milling Wood and Wood Based Composites*. Tribology in Industry, 38(1):66-73
 30. Gawroński, T. (2012): *Optimisation of CNC routing operations of wooden furniture parts*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67: 2259–2267. DOI 10.1007/s00170-012-4647-5
 31. Gholamiyan, H., Gholampoor, B., and Hassanpoor Tichi, A. H. (2022): *Effects of cutting parameters on the sound level and surface quality of sawn wood*. BioResources 17(1): 1397-1410. DOI: 10.15376/biores.17.1.1397-1410
 32. Gochev, Z. (2014): *Examination the process of longitudinal solid wood profile milling. Part II: Influence of the revolution frequency and feed rate on the roughness of the treated surfaces*. Innovation in woodworking industry and engineering design, 5(1): 40–47.
 33. Gürgen, A.; Cakmak, A.; Yildiz, S.; Malkoçoğlu, A. (2022): *Optimization of CNC operating parameters to minimize surface roughness of Pinus sylvestris using integrated artificial neural network and genetic algorithm*. Maderas Ciencia y tecnología, 24(1):1-22. DOI: 10.4067/S0718-221X2022000100401
 34. Guo, X.; Ekevad, M.; Grönlund, A.; Marklund, B.; and Cao, P. (2014): *Tool wear and machined surface roughness during wood flour/polyethylene composite peripheral up-milling using cemented tungsten carbide tools*. BioResource, 9(3): 3779-3791. DOI: 10.15376/biores.9.3.3779-3791
 35. Hazir, E.; Koc, H. (2019): *Optimization of wood machining parameters in CNC routers: Taguchi orthogonal array based simulated angling algorithm*. Maderas Ciencia y tecnología, 21(4): 493-510. DOI: 10.4067/S0718-221X2019005000406
 36. Horman, I.; Busuladžić, I.; Azemović, E. (2014): *Temperature Influence on Wear Characteristics and Blunting of the Tool in Continuous Wood Cutting Process*. Procedia Engineering 69: 133 – 140. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.213

37. Hortobágy, A.; Koleda, P.; Koleda, P.; Kminiak, R. (2023): *Effect of Milling Parameters on Amplitude Spectrum of Vibrations during Milling Materials Based on Wood*. Applied science, 13 (8): 5061. <https://doi.org/10.3390/app13085061>
38. Hu, W.G.; Guan, H.Y. (2018): *Experimental and numerical investigation on compression creep behavior of wood*. For. Prod. Journal, 68(2):138–146. DOI: 10.13073/FPJ-D-17-00030
39. Ibrisević, A.; Busuladžić, I.; Obućina, M.; Hajdarević, S. (2023): *Influence of different cutting speeds on CNC milling on surface roughness of objects made from steamed and heat-treated beech wood*. 14th Annual Days of BHAAAS in BiH. International Symposium on Innovative and Interdisciplinary Applications of Advanced Technologies, Tuzla, Bosnia and Herzegovina
40. Igaz, R.; Kminiak, R.; Krišták, L.; Nemec, M.; Gergel, T. (2019): *Methodology of Temperature Monitoring in the Process of CNC Machining of Solid Wood*. Sustainability, 11: 95. doi:10.3390/su11010095
41. Iskra, P.; Tanaka, C. (2005): *The influence of wood fiber direction, feed rate, and cutting width on sound intensity during routing*. Holz als Roh- und Werkstoff 63: 167–172. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-004-0541-7>
42. Iskra, P.; Hernandez, R.E. (2009): *The influence of cutting parameters on the surface quality of routed paper birch and surface roughness prediction modeling*. Wood and Fiber Science, 41(1): 28–37. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1241>
43. Iskra, P.; Hernandez, R.E. (2012): *Toward a process monitoring of CNC wood router. Sensor selection and surface roughness prediction*. Wood Science and Technology, 46: 115–128. DOI 10.1007/s00226-010-0378-7
44. Isleyen, U. K.; Karamanoğlu, M. (2019): *The influence of machining parameters on surface roughness of MDF in milling operation*. BioResource, 14(2): 3266-3277. DOI:10.15376/biores.14.2.3266-3277. DOI: 10.15376/biores.11.4.9095-9111
45. Ispas, M.; Gurau, L.; Campean, M.; Hacibektasoglu, M.; Racasan, S. (2016): *Milling of heat-treated beech wood (Fagus sylvatica L.) and analysis of surface quality*. BioRes. 11(4): 9095-9111. DOI: 10.15376/biores.11.4.9095-9111

46. Ji, F.; Zhu, Z. (2025): *Investigation of Cutting Forces and Temperature in Face Milling of Wood–Plastic Composite Using Radial Basis Function Neural Network*. Materials 18(20): 4731. <https://doi.org/10.3390/ma18204731>
47. Karagöz, U.; Akyıldız, M. H.; Isleyen, O. (2011): *Effect of Heat Treatment on Surface Roughness of Thermal Wood Machined by CNC*. PRO LIGNO, 7(4): 4226-4238. DOI:10.15376/biores.10.3.4226-4238
48. Karaguzela, U.; Bakkala, M.; Budakb, E. (2016): *Modeling and measurement of cutting temperatures in milling*. In: Proceedings of 7th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Germany, Chemnitz, 2016, 173 – 176. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.182>
49. Keturakis, G.; Bendikiene, R.; Baltrusaitis, A. (2017): *Tool Wear Evolution and Surface Formation in Milling Various Wood Species*. BioResources, 12(4): 7943-7954. DOI: 10.15376/biores.12.4.7943-7954
50. Kminiak, R.; Nemec, M.; Igaz, R; Gejdoš, M. (2023): *Advisability-Selected Parameters of Woodworking with a CNC Machine as a Tool for Adaptive Control of the Cutting Process*. Forests 14(2):173. <https://doi.org/10.3390/f14020173>
51. Koc, K.H.; Erdinler, E.S.; Hazır, E.; Öztürk, E. (2015): *Effect of CNC Application Parameters on Wooden Surface Quality*. In: Proceedings of the 58th International Convention of Society of Wood Science and Technology, Jackson, Wyoming, USA, 12-18; DOI: 10.1016/j.measurement.2017.05.001
52. Koleda, P.; Barcik, Š.; Svoren, J.; Naščák, L.; Dobrik, A. (2019): *Influence of cutting wedge treatment on cutting power, machined surface quality, and cutting edge wear when plane milling oak wood*. BioResources, 14(4): 9271–9286. DOI: 10.15376/biores.14.4.9271-9286
53. Koleda, P.; Barcik, Š.; Naščák, L.; Svoreň, J.; Štefková, J. (2019): *Cutting power during lengthwise milling of thermally modified oak wood*. Wood research, 64(3): 537-548. <https://www.woodresearch.sk/wr/201903/14.pdf>
54. Kopecky, Z.; Hanincova, L.; Solar, A.; Nesazal, P. (2019): *Cutting forces in quasi-orthogonal CNC milling*. Wood research, 64(5): 879-890

55. Kowaluk, G.; Szymanski, W.; Palubicki, B.; Beer, P. (2009): *Examination of tools of different materials edge geometry for MDF milling*, *Eur. J. Wood Wood Prod.*, 67(2): 173–176. DOI: 10.1007/s00107-008-0302-0
56. Korčok, M.; Vančo, M.; Barčík, S.; Koleda, P.(2018): *Influence of feed rate and cutting speed on final surface quality after plane milling on oak wood*. Katedra výrobnej a automatizačnej techniky, Fakulta environmentálnej a výrobnej techniky, Technická univerzita vo Zvolene.
57. Krilek, J.; Kovač J.; Barčík, Š.; Svoreň, J.; Štefanek, M.; Kuvík, T. (2015): *The influence of chosen factors of a circular saw blade on the noise level in the process of cross cutting wood*. *Wood Research*, 61(3):475-486. <https://www.woodresearch.sk/wr/201603/13.pdf>
58. Kropivšek, J. Grošelj, P.; Oblak, L.; Jošt, M. (2021): *A Comprehensive Evaluation Model for Wood Companies Websites Based on the AHP/R-TOPSIS Method*, *Forests*, 12(6):706. DOI:10.3390/f12060706
59. Kvasnová, P.; Novák, D.; Novák, V. (2017): *Laser welding of aluminium alloys*. *Manufacturing Technology*, 17(6): 892-898. DOI:10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/6/892
60. Li, R.R.; Yao, Q.; Xu, W.; Li, J.Y.; Wang, X.D. (2022): *Study of Cutting power and power efficiency during straight-tooth cylindrical milling process of particle boards*. *Materials*, 15(3):879. <https://doi.org/10.3390/ma15030879>
61. Licow, R.; Chuchala, D.; Deja, M.; Orłowski, K.; Taube, P. (2020): *Effect of pine impregnation and feed speed on sound level and cutting power in wood sawing*. *J. Clean Prod*, 272:122833. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122833>
62. Loc, N.H.; Hung, T.Q. (2021): *Optimization of Cutting Parameters on Surface Roughness and Productivity when Milling Wood Materials*. *Journal of Machine Engineering*, 21(4):72-89. DOI: <https://doi.org/10.36897/jme/144426>
63. Madanchian, M.; Taherdoost, H. (2023): *A comprehensive guide to the TOPSIS method for multi-criteria decision making*. *Sustainable Social Development*, 1(1). doi: 10.54517/ssd.v1i1.222
64. Marthy, M., and Cismaru, I. (2009): *Experimental study concerning the power consumption at the milling of pear wood*, *ProLigno* 5(3), 47-52. <https://www.proligno.ro/en/articles/2009/3/paper5.htm>

65. Merhar, M.; Bučar, D.G.; Merela, M. (2020): *Machinability Research of the Most Common Invasive Tree Species in Slovenia*. *Forests*, 11(7): 752; DOI:10.3390/f11070752
66. Nasir, V.; Kooshkbaghi, M.; Cool, J.; Sassani, F. (2021): *Cutting tool temperature monitoring in circular sawing: measurement and multi-sensor feature fusion-based prediction*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 112:2413–2424. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06473-6>
67. Nemec, M.; Kminiak, R.; Danihelova, A.; Ondrejka, V. (2017): *Vibrations and workpiece surface quality at changing feed speed of CNC machine*. *Akustika* 28:117-123
68. Ohuchi, T.; Murase, Y. (2005): *Milling of wood and wood-based materials with a computerized numerically controlled router IV: development of automatic measurement system for cutting edge profile of throw-away type straight bit*. *Journal of Wood Science*, 51: 278–281. DOI 10.1007/s10086-004-0663-x
69. Opricovic, S.; Tzeng, G.H. (2004): *Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS*, *European Journal of Operational Research*, 156(2): 445–455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
70. Oosthuizen, G.A.; Akdogan, G.; Treurnicht, N. (2011): *The performance of PCD tools in high-speed milling of Ti6Al4V*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52: 929–935. DOI 10.1007/s00170-010-2804-2
71. Ozturk, D.; Batuk, F. (2011): *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) for Spatial Decision Problem*. In *Proceedings of ISPRS*. <http://www.isprs.org/proceedings/2011/Gi4DM/PDF/PP12.pdf>
72. Pangestu, K.T.P.; Darmawan, W.; Nandika, D.; Wahyudi, I.; Usuki, H. (2020): *Performance of helical router bit in milling of composite boards*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 935(1):012066, DOI: 10.1088/1757-899X/935/1/012066
73. Pałubicki, B. (2021): *Cutting Forces in Peripheral Up-Milling of Particleboard. Materials*, 14(9): 2208. <https://doi.org/10.3390/ma14092208>
74. Pavić, Z.; Novoselac, V. (2013): *Notes on TOPSIS Method*, *International Journal of Research in Engineering and Science*, 1(2): 05-12. <https://www.ijres.org/papers/v1-i2/B120512.pdf>

75. Pašić, M.; Marinković, D.; Lukić, D.; Begić-Hajdarević, D.; Živković, A.; Milošević, M.; Muhamedagić, K. (2024): *Prediction and Optimization of Surface Roughness and Cutting Forces in Turning Process Using ANN, SHAP Analysis, and Hybrid MCDM Method*. Appl. Sci. 14(23):11386. <https://doi.org/10.3390/app142311386>
76. Pei, Z., Zhu, N., and Gong, Y. (2016): *A study on cutting temperature for wood-plastic composite*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 29(12): 1627-1640. DOI:10.1177/0892705715570988
77. Pelit, H.; Korkmaz, M.; Budakc, M. (2021): *Surface Roughness of Thermally Treated Wood Cut with Different Parameters in CNC Router Machine*. BioResources, 16(3): 5133-5147. DOI: 10.15376/biores.16.3.5133-5147
78. Peng, C.Y.; Raihany, U.; Kuo, S.W.K.; Chen, Y.Z. (2021): *Sound Detection Monitoring Tool in CNC Milling Sounds by K-Means Clustering Algorithm*. Sensors, 21(13), 4288. <https://doi.org/10.3390/s21134288>
79. Petković, D.; Madić, M.; Radovanović, M.; Gacevska, V. (2017): *Application of the performance selection index method for solving machining MCDM problems*. Fasta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, 15(1): 96-107. DOI: 10.22190/FUME151120001
80. Petraček, P.; Fojt, P.; Kozlok, T.; Sulitka, M. (2022): *Effect of CNC Interpolator Parameter Settings on Toolpath Precision and Quality in Corner Neighborhoods*. Applied Sciences, 12(19): 9496. <https://doi.org/10.3390/app12199496>
81. Piernik, M.; Pinkowski, G.; and Krauss, A. (2023): *Effect of chip thickness, wood cross-sections, and cutting speed on surface roughness and cutting power during up-milling of beech wood*, BioResources, 18(4): 6784-6801. DOI: 10.15376/biores.18.4.6784-6801
82. Pinkowski, G.; Szymanski, W.; Nosowski, T. (2012): *Analyses of surface roughness in selected wood species after machining on a CNC woodworking centre*. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Forestry and Wood Technology, 79: 164-169. <https://wulsannals.com/article/72533/en?language=de>
83. Porankiewicz, B.; Iskra, P.; Jozwiak, K.; Tanaka, C.; Zborowski, W. (2008): *High speed steel tool wear after wood milling in the presence of high temperature tribochemical reactions*. BioResources 3(3):838–858. DOI: 10.15376/biores.3.3.838-858

84. Radovanović, M.; Madić, M. (2010): *Methodology of neural network based modeling of machining processes*. International Journal of Modern Manufacturing Technologies, 2(2): 77-82. https://ijmmt.ro/vol2no22010/Miroslav_Radovanovic.pdf
85. Raja, J.E.; Loo, C.K.; Lim, W.S. (2013): *Hilbert-Huang transform based emitted sound signal analysis for tool flank wear monitoring*. Arabian Journal for Science and Engineering, 38(8): 2219–2226. doi:10.1007/s13369-013-0580-7
86. Rajko, L.; Koleda, P.; Barcik, Š.; Koleda, P. (2021): *Technical and technological factors' effects on quality of the machined surface and energetic efficiency when planar milling heat-treated meranti wood*. BioResources 16(4):7884-7900.
DOI: 10.15376/biores.16.4.7884-7900
87. Rawangwong, S.; Chatthong, J.; Rodjananugoon, F. (2011): *The Study of Proper Conditions in Face Coconut Wood by CNC Milling Machine*. In: Proceedings of the 2011 IEE ICQR, Bangkok, Thailand, pp. 455-459. DOI: 10.1109/ICQR.2011.6031760
88. Rao, R. V. (2007): *Decision Making in the Manufacturing Environment: using graph theory and fuzzy multiple attribute decision making methods*, Springer-Verlag, London.
DOI: 10.1007/978-1-84628-819-7
89. Sedlecky, M.; Gašparik, M.(2017): *Power consumption during edge milling of medium-density fiberboard and edge-glued panel*. BioResources, 12(4):7413-7426.
DOI: 10.15376/biores.12.4.7413-7426
90. Sejdiu, R.; Osmani, H.; Sogutlu, C; Sejdiu, K.; Jakupi, K. (2024): *The influence of machining parameters on the surface roughness quality of beech wood (Fagus sylvatica L.—a comprehensive study)*. Journal of Engineering Science and Technology, 19(3): 853-868.https://jestec.taylors.edu.my/Vol%2019%20Issue%203%20June%202024/19_3_08.pdf
91. Shi, W.Y.; Fang, W.B.; Jiang, B.; Li, Z. (2022): *Analysis of cutting technology and energy consumption model of polyethylene WPC*. Ferroelectrics, 593(1): 112–123.
DOI: 10.1080/00150193.2022.2076440
92. Singh, T.; Patnaik, A.; Gangil, B.; Chauhan, R. (2015): *Optimization of tribo- performance of brake friction materials: effect of nano filler*. Wear, 324: 10-16.
DOI: 10.1016/j.wear.2014.11.020

93. Song, M.; Buck, D.; Yu, Y.; Du, X.; Guo, X.; Wang, J.; Zhu, Z. (2023): *Effects of Tool Tooth Number and Cutting Parameters on Milling Performance for Bamboo–Plastic Composite*. *Forests*, 14(2): 433. <https://doi.org/10.3390/f14020433>
94. Sofuoglu, S.D. (2017): *Determination of optimal machining parameters of massive wooden edge glued panels which is made of Scots pine (Pinus sylvestris L.) using Taguchi design method*. *European Journal of Wood and Wood Products*, 75(1): 33-42. DOI: 10.1007/s00107-016-1028-z
95. Stribick, S.; Pahmeyer, R. (2023): *Temperature and Wear Analysis of Adhesively Bonded and Soldered Cutting Tools for Woodcutting*. *Journal of Manufacturing Materials Processin*, 7(6): 223. <https://doi.org/10.3390/jmmp7060223>
96. Sumbodo, W.; Murdani, K.; Suwanda, I.; Allam, T.S. (2018): *Optimization of CNC Milling Machining Time through Variation of Machine Parameters and Toolpath Strategy in Various Cross-sectional Shape on Tool Steels and Die Steels Materials* In: *Proceedings of the 7th Engineering International Conference on Education, Concept and Application on Green Technology EIC, Indonesia, Semarang, July, 2018*, 1:84-92, DOI: 10.5220/0009006800840092
97. Suleiman, B.M.; Larfeldt, J.; Leckner, B.; Gustavsson, M. (1999): *Thermal Conductivity and Diffusivity of Wood*. *Wood Science and Technology*, 33(6): 465–473. DOI: 10.1007/s002260050130
98. Sulaiman, R.; Yuliani P. Astuti, Y.P.; Yuniarti, D.N.; Awang, N.A. (2024): *On The Picture Fuzzy-TOPSIS*. *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, 17(3): 1727-1736. DOI: 10.29020/nybg.ejpam.v17i3.5225
99. Sütçü, A. (2012): *Investigation of Parameters Affecting Surface Roughness in CNC Routing Operation on Wooden EGP*. *BioResources* 8(1): 795-803. DOI: 10.15376/biores.8.1.795-805
100. Sütçü, A., Karagöz, U. (2012): *Effect of machining parameters on surface quality after face milling of MDF*. *Wood research*. 57(2): 231-240. <https://www.woodresearch.sk/wr/201202/05.pdf>
101. Svrzić, S.; Djurković, M.; Vukućević, A.; Nikolić, Z.; Mihailović, V.; Dedić, A. (2025): *Sound classification and power consumption to sound intensity relation as a tool for wood*

- machining monitoring*. European Journal of Wood and Wood Products 82(6):1953-1962. DOI: 10.1007/s00107-024-02139-2
102. Szwajka, K., and Trzepieciński, T. (2016): *Effect of tool material on tool wear and delamination during machining of particleboard*. Journal of Wood Science, 62(4): 305-315. DOI: 10.1007/s10086-016-1555-6
 103. Tratar, J.; Pusavec, F.; Kopac, J. (2014): *Tool wear in terms of vibration effects in milling medium-density fibreboard with an industrial robot*. Journal of Mechanical Science and Technology, 28(11): 4421- 4429. DOI: 10.1007/s12206-014-1010-9
 104. Trzepieciński, T.; Szwajka, K.; Zielinska-Szwajka, J.; Szewczyk, M. (2025): *Current Trends in Monitoring and Analysis of Tool Wear and Delamination in Wood-Based Panels Drilling*. Machines, 13(3): 249. <https://doi.org/10.3390/machines13030249>
 105. Vitchev, P.; Angelski, D.; Mihailov, V. (2019): *Influence of The Processed Material on the Sound Pressure Level Generated by Sliding Table Circular Saw*. Acta Facultatis Xylologiae Zvolen, 61(2): 73–80. DOI: 10.17423/afx.2019.61.2.07
 106. Vitchev, P. (2013): *Influence of the cutter heads construction on the noise level produced by woodworking milling machines*. In: Proceedings of International Scientific Conference“Wood Technology & Product Design”, Macedonia, Ohrid, May, 2013
 107. Warcholinski, B.; Gilewicz, A. (2022): *Surface Engineering of Woodworking Tools, a Review*. Appl. Sci. 12(20): 10389. <https://doi.org/10.3390/app122010389>
 108. Wei, W.; Li, Y.; Xue, T.; Li, Y.; Sun, P.; Yang, B.; Yin, Z.; Mei, C. (2019): *Tool Wear During High-speed Milling of Wood-plastic Composites*. BioResources 14(4), 8678-8688
 109. Wei, W.H.; Xu, J.H.; Fu, Y.C.; Yang, S.B. (2012): *Tool wear in turning of titanium alloy after thermohydrogen treatment*. Chinese journal of mechanical engineering, 25(4): 776-780. DOI:10.3901/CJME.2012.04.776
 110. Wenyong, S.; Yan, M.; Zhe, W.; Chunmei, Y. (2016): *Experimental Evaluation on Shape and Control of Chip in Milling of PE WPC*. International Journal of u- and e- Service, Science and Technology, 9(7): 299-308, <http://dx.doi.org/10.14257/ijunesst.2016.9.7.30>
 111. Yang, C.; Liu, T.; Ma, Y.; Qu, W.; Ding, Y.; Zhang, T.; Song, W.(2023): *Study of the Movement of Chips during Pine Wood Milling*. Forests, 14(4): 849. <https://doi.org/10.3390/f14040849>

112. Yu, Y.; Buck, D.; Yang, H.; Du, X.; Song, M.; Wang, J.; Zhu, Z. (2023): *Cutting Power, Temperature, and Surface Roughness: A Multiple Target Assessment of Beech during Diamond Milling*. *Forests*, 14(6): 1163. <https://doi.org/10.3390/f14061163>
113. Zdravković, V.; Palija, T.; Karadolamović, Z. (2020): *Influence of thermal modification of ash wood (*fraxinus excelsior* L.) and machining parameters in cnc face milling on surface roughness using response surface methodology (RSM)*. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 11(2): 231-241. <https://dergipark.org.tr/en/pub/sigma/issue/65382/1007851>
114. Zhang, F.; Bakkala, M.; Budakb, E. (2021): *Prediction of cutting temperature in the milling of wood-plastic composite using artificial neural network*. *BioResources* 16(4): 6993-7005. DOI: 10.15376/biores.16.4.6993-7005
115. Zhu, Z.; Buck, D.; Wang, J.; Wu, Z.; Xu, W.; Guo, X. (2022): *Machinability of Different Wood-Plastic Composites during Peripheral Milling*. *Materials*, 15(4): 1303. <https://doi.org/10.3390/ma15041303>
116. Zhu, Y.; Buck, D.; Guan, J.; Song, M.; Tang, Q.; Guo, X.; Zhu, Z. (2024): *Effects of Milling Methods on Cutting Performance of Wood-Plastic Composites Based on Principal Component Analysis*. *Forests*, 15(9): 1516. <https://doi.org/10.3390/f15091516>

Knjige

1. Astakhov, V.P.; Davim, J.P. (2008): *Tools (Geometry and Material) and Tool Wear*. In book: *Machining*, Springer, 29-57. DOI: 10.1007/978-1-84800-213-5_2
2. Csanády, E., Magoss, E. (2020): *Mechanics of Wood Machining*, Springer nature, DOI: 10.1007/978-3-642-29955-1
3. Csanády, E., Kovacs, Z.; Magoss, E.; Ratnasingam, J. (2019): *Optimum Design and Manufacture of Wood Products*. Springer nature. DOI: 10.1007/978-3-030-16688-5
4. Demjanovskyj, K. I (1975): *Resistance of Wood Milling Tools*. Wood Industry, Moscow
5. Garvey, P.R. (2008): *Analytical Methods for Risk Management: A System Engineering Perspective*. Chapman and Hall/CRC, New York, 243-250. DOI: 10.1201/9781420011395
6. Jambrečković, V. (2004): *Drvene ploče i emisija formaldehida*. Šumarski fakultet Zagreb

7. Krpan, J. (1970): *Tehnologija furnira i ploča*. Tehnička knjiga. Zagreb
8. Kršljak, B. (1996): *Mašine i alati za obradu drva I dio*, Univerzitet u Beogradu, Beograd
9. Mešić, N. (1998): *Furniri, furnirske i stolarske ploče*. Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo
10. Praščević, M.; Cvetković, D.; Mihajlov, D. (2018): *Buka u životnoj sredini*. Univerzitet u Nišu, Fakultet zaštite na radu, Niš
11. Skakić, D. (1992): *Finalna prerada drva I*. Mikro knjiga Beograd
12. Škaljić, N. (2010): *Analiza utjecajnih parametara na hrapavost blanjanje površine drva*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Sarajevo
13. Triantaphyllou, E. (2000): *Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Springer-Science
14. Tzeng, G.H.; Huang, J.J. (2011): *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, CRC Press, Taylor & Francis Group
15. Wilks J, Wilks E (1994): *Properties and applications of diamond*, 1st edition. Elsevier, Boston
16. Health and safety executive (HSE) (2009): *Noise at woodworking machines*, Woodworking Information Sheet No 13.
17. Zotov, G.; Panfilov, E.(1991): *Increased Resistance of Wood Cutting Tool*. Moscow: Ecology
18. Ivanovskyj, E. G.; Vasilevskaja, P. B.; Lautner, E. M. (1971): *Wood and Wood Based Material Milling and Cutting*. Moscow. Lesnaja promyshlennostj,

Diplomski rad

1. Malčić, A. (2025): *Izbor najboljeg načina učvršćivanja alata u CNC stroj za obradu drva*, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije
Zavod za namještaj i drvo u graditeljstvu

Internetske stranice

1. Willis, C., (2021): *Understanding A-C-Z noise frequency weightings*. URL: <https://pulsarinstruments.com/news/understanding-a-c-z-noise-frequency-weightings/> (5.4. 2024)
2. Ake Knebel Gmbh & Co.KG. (2023): *Clamping systems*. URL: <https://ake.de/en/clamping-systems/> (18.4. 2024)
3. Leitz GmbH & Co. KG (2022): *Leitz Online Lexicon*. URL: <https://www.leitz.org/en-gb/product-finder/productdetails/>
4. Hudek doo (2025): URL: <https://hudek-zagreb.hr/proizvod/svrdlo-5/>
5. Drvo tehnika.info, portal drvne industrije (2023): *Održiva drvena ambalaža*. URL: <https://drvotehnika.info/clanci/odrziva-drvena-ambalaza>
6. Ita tools Sp.z.o.o. (2023): *Tools blog*. URL: <https://www.ita.tools/>
7. Export corporation (2023): *Advantages & Applications of Wood Packaging*. URL: <https://www.exportcorporation.com/benefits-and-applications-of-wood-packaging/>
8. (2023): *Parametri kod glodanja*. URL: <https://cnc.com.hr/parametri-kod-glodanja/>
9. Carl Zeiss NTS Ltd. (2022): *ZEISS Axio Zoom.V16 for Materials*. URL: <https://www.zeiss.com/microscopy/en/products/light-microscopes/stereo-and-zoom-microscopes/axio-zoom-v16-for-materials.html>
10. Wirutex S.r.l. (2025): *What is polycrystalline diamond?* URL: <https://www.wirutex.com/en/polycrystalline-diamonds-tools/>

NORME

1. IEC 61672-1 (2013): Noise Monitoring with 1/1 & 1/3 Octave Band Filters
2. ISO 13061-1 (2014): Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens
3. EN 61672-1:2013
4. JIS C1509:2017
5. ANSI S1.4:1982
6. DIN 4760:1982
7. ISO 4287:1997

8. ASTM D16666-17
9. HRN EN 635:1999

KAZALO SLIKA

Slika 1. Proizvodi za pakiranje od drva.....	3
Slika 2. Shema konstrukcije furnirskoga uslojenog drva: a) troslojna (Izvor: Jambreković, 2004) b) višeslojna (Izvor: https://hurfords.com.au/hw/plywood-about/).....	6
Slika 3. Shema sila pri glodanju: a) istosmjerno; b) protusmjerno (Izvor: Skakić, 1992).....	9
Slika 4. Raspodjela topline u zoni rezanja (Izvor: Zhang i dr., 2021).....	14
Slika 5. Zagrijavanje i hlađenje alata na različitim udaljenostima od površine alata (Izvor: Csanády i Magoss, 2020).....	15
Slika 6. Ovisnost temperature alata o frekvenciji vrtnje i duljini uvođenja topline (polumjeru zaobljenosti oštrice izraženom u milimetrima (Izvor: Csanady i Magoss, 2020).....	16
Slika 7. Utjecaj posmične brzine i frekvencije vrtnje na temperaturu alata (Izvor: Zhang i dr., 2021).....	17
Slika 8. Utjecaj brzine rezanja na temperaturu alata (Izvor: Yu i dr., 2023).....	17
Slika 9. Ovisnost temperature alata o polumjeru zaobljenosti oštrice (Izvor: Csanady i Magoss, 2020).....	18
Slika 10. Valna duljina zvuka (Izvor: Praščević i dr., 2018).....	21
Slika 11. Ovisnost brzine zvuka o temperaturi zraka (Izvor: Praščević i dr., 2018).....	22
Slika 12. Filteri frekvencije zvuka (Izvor: https://www.cirrusresearch.co.uk/blog/2020/03/what-are-a-c-z-frequency-weightings/).....	23
Slika 13. Kvaliteta površine: 1 – izvanredna, 2 – dobra, 3 – srednja, 4 – slaba, 5 – veoma slaba (prema Merhar i dr., 2022).....	26
Slika 14. Utjecaj parametara obrade i parametara drva na hrapavost obrađene površine: a) utjecaj brzine rezanja; b) utjecaj kuta rezanja; c) utjecaj gustoće drva; d) utjecaj vibracija e) utjecaj posmaka po zubu (Izvor. Csanády i dr., 2015).....	27
Slika 15. Ovisnost troškova o učinku obrade i zahvata po zubu (izvor: Csanady i Magoss, 2012).....	29
Slika 16. Utjecaj dužine obrade na polumjer zaobljenosti oštrice pri različitim parametrima obrade (izvor: Keturakis i dr, 2017).....	30

Slika 17. Utjecaj zahvata po zubu i dužine obrade na polumjer zaobljenosti oštrice (Izvor: Bendikiene i Keturakis, 2017).....	30
Slika 18. Homag VENTURE 316m (https://wtp.hoechsmann.com/en/lexikon/19258/bmg_311_venture_316).....	36
Slika 19. Alati korišteni u eksperimentalnome dijelu.....	38
Slika 20. Glodalo TIP 1 i dijagram pomaka za glodalo (https://www.cmtorangetools.com/).....	39
Slika 21. Glodalo TIP 2: a) izgled glodala; b) grafikon pomaka u ovisnosti o dubini glodanja (https://www.leitz.org/).....	41
Slika 22. Dijamantno glodalo TIP 3 (https://www.ita.tools/).....	42
Slika 23. Držać alata AKE HSK 63 264E-OZ25 (https://www.ake.de).....	44
Slika 24. Držać alata AKE HSK 63 264E-ER32 (https://www.ake.de).....	45
Slika 25. Držać alata KLEIN (https://www.sistemiklein.com/).....	45
Slika 26. Držać alata LEUCO 32 (https://www.leuco.com/).....	46
Slika 27. Elastične čahure: a) OZ25; b) ER32.....	47
Slika 28. Uređaj za mjerenje razine zvučnoga tlaka Delta OHM HD2110L (Izvor: https://environmental.senseca.com/wp_content/uploads/document/DeltaOHM_HD2110L_manual_ENG.pdf).....	50
Slika 29. a) Mjerenje zvuka s uređajem Delta OHM HD2110L; b) shema mjerenja.....	51
Slika 30. Mjerenje i registriranje razina zvučnoga tlaka.....	52
Slika 31. Mjerenje temperature sa termalnom kamerom FLIR T560.....	53
Slika 32. Termogram alata.....	55
Slika 33. Mikroskop Zeiss V16.....	56
Slika 34. Topografski model oštrice (lijevo) i način mjerenja polumjera zaobljenosti oštrice (desno).....	57
Slika 35. Profil obrade za mjerenje kvalitete površine.....	59
Slika 36. Etalon za ocjenjivanje promjene boje (paljevina).....	60
Slika 37. Etalon za ocjenjivanje isprekidanog pojavljivanja pukotina.....	60
Slika 38. Etalon za ocjenjivanje nedovoljno presječenih drvnih vlakana.....	61
Slika 39. Etalon za ocjenjivanje valovitosti.....	61

Slika 40. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razina zvučnoga tlaka u ovisnosti o vrsti držača.....	71
Slika 41. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i vrsti držača.....	72
Slika 42. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperatura alata TIP 1 izmjerene pri različitim frekvencijama vrtnje alata.....	75
Slika 43. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperature alata TIP 1 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i posmičnoj brzini.....	76
Slika 44. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperatura alata TIP 2 izmjerene pri različitim frekvencijama vrtnje.....	80
Slika 45. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperature alata TIP 2 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i posmičnoj brzini.....	80
Slika 46. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti prosječne temperature alata TIP 3 izmjerene pri različitim frekvencijama vrtnje.....	84
Slika 47. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti prosječne temperature alata TIP 3 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i posmičnoj brzini	84
Slika 48. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperature alata za različite tipove alata.....	87
Slika 49. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperature alata izmjerene pri različitim frekvencijama vrtnje	87
Slika 50. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperature alata u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i tipu alata.....	88
Slika 51. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperature alata izmjerene pri različitim posmičnim brzinama.....	89
Slika 52. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti maksimalne temperature alata u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata, posmičnoj brzini i tipu alata.....	90
Slika 53. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka alata TIP 1 izmjerene pri različitim frekvencijama vrtnje alata	93
Slika 54. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka alata TIP 1 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i posmičnoj brzini	94

Slika 55. Tercni spektri razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata TIP 1, pri prosječnoj posmičnoj brzini od 15 m/min.....	95
Slika 56. Tercni spektri razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata TIP 1, pri prosječnoj posmičnoj brzini od 25 m/min.....	95
Slika 57. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka alata TIP 2 izmjerene pri različitim frekvencijama vrtnje alata	98
Slika 58. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka alata TIP 2 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i posmičnoj brzini	98
Slika 59. Tercni spektar razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata TIP 2, pri prosječnoj posmičnoj brzini od 15 m/min.....	100
Slika 60. Tercni spektar zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata TIP 2, pri prosječnoj posmičnoj brzini od 25 m/min.....	100
Slika 61. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka alata TIP 3 izmjerene pri različitim frekvencijama vrtnje	103
Slika 62. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka alata TIP 3 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i posmičnoj brzini	103
Slika 63. Tercni spektar razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata TIP 3, pri prosječnoj posmičnoj brzini od 15 m/min.....	105
Slika 64. Tercni spektar razine zvučnoga tlaka u u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata TIP 3, pri prosječnoj posmičnoj brzini od 25 m/min.....	105
Slika 65. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka za različite tipove alata.....	107
Slika 66. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje.....	108
Slika 67. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o posmičnoj brzini.....	108
Slika 68. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata i tipu alata.....	109
Slika 69. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o frekvenciji vrtnje alata, posmičnoj brzini i tipu alata.....	109

Slika 70. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti povećanja polumjera zaobljenosti oštrice alata TIP 1 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje.....	113
Slika 71. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti veličine povećanja polumjera zaobljenosti oštrice alata TIP 2 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje.....	115
Slika 72. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti povećanja polumjera zaobljenosti oštrice alata TIP 3 u ovisnosti o frekvenciji vrtnje.....	119
Slika 73. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti povećanja polumjera zaobljenosti oštrice u ovisnosti o tipu alata.....	121
Slika 74. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti povećanja polumjera zaobljenosti oštrice alata u ovisnosti o frekvenciji vrtnje.....	122
Slika 75. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti povećanja polumjera zaobljenosti oštrice alata u ovisnosti o frekvenciji vrtnje i tipu alata.....	122
Slika 76. Vrijednosti indeksa preferencije primjenom metoda TOPSIS i PSI-TOPSIS – alat TIP 1.....	126
Slika 77. Vrijednosti indeksa preferencije za obje primjenjene metode optimizacije parametara obrade – alat TIP 2.....	129
Slika 78. Vrijednosti indeksa preferencije za obje primjenjene metode optimizacije parametara obrade – alat TIP 3.....	132
Slika 79. Dijagram ovisnosti razine zvučnog tlaka o duljini obrade za tri vrste alata.....	135
Slika 80. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti razine zvučnoga tlaka pri intervalu duljine obrade od 60-140 m u ovisnosti o vrsti alata	136
Slika 81. Spektar zvuka: a) u intervalu obrade 60-100 m; b) u intervalu obrade 100-140 m.....	137
Slika 82. Dijagram promjene polumjera zaobljenosti oštrice u ovisnosti o duljini obrade.....	139
Slika 83. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti polumjera zaobljenosti oštrice nakon duljine obrade od 140 m pri uporabi različitih alata.....	142
Slika 84. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti polumjera zaobljenosti u ovisnosti o duljini obrade.....	143
Slika 85. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti polumjera zaobljenosti oštrice u ovisnosti o tipu alata.....	143
Slika 86. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti polumjera zaobljenosti oštrice u ovisnosti o duljini obrade i vrsti alata.....	144

Slika 87. Dijagram ovisnosti prosječnih temperatura alata o duljini obrade.....	146
Slika 88. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti prosječne temperature alata u ovisnosti o vrsti glodala.....	148
Slika 89. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti prosječne temperature alata u ovisnosti o duljini obrade i vrsti glodala.....	149
Slika 90. Distribucija temperature glodala TIP 1 nakon obrađenih 100 m.....	152
Slika 91. Distribucija temperature glodala TIP 1 nakon obrađenih 140 m.....	153
Slika 92. Distribucija temperature glodala TIP 2 nakon obrađenih 100 m.....	154
Slika 93. Distribucija temperature glodala TIP 2 nakon obrađenih 140 m.....	155
Slika 94. Distribucija temperature glodala TIP 3 nakon obrađenih 100 m.....	156
Slika 95. Distribucija temperature glodala TIP 3 nakon obrađenih 120 m.....	157
Slika 96. Usporedne vrijednosti kvalitet površine u ovisnosti o duljini obrade.....	159
Slika 97. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti kvalitete površine (promjena boje) u ovisnosti o vrsti alata	162
Slika 98. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti kvalitete površine (valovitosti) u ovisnosti o vrsti alata.....	162
Slika 99. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti kvalitete površine (isprekidana pojava pukotina) u ovisnosti o vrsti alata	163
Slika 100. Aritmetičke sredine i 95% intervali pouzdanosti kvalitete površine (nepresječena drvena vlakna) u ovisnosti o vrsti alata	163

KAZALO TABLICA

Tablica 1. Vidovi odstupanja stvarne površine od idealne površine (prema DIN 4760:1982)...	24
Tablica 2. Homag Venture 316M.....	36
Tablica 3. Tehničke karakteristike glodala TIP 1.....	39
Tablica 4. Tehničke karakteristike glodala TIP 2.....	42
Tablica 5. Tehničke karakteristike glodala TIP 3.....	43
Tablica 6. Korištene sile pritezanja alata.....	47
Tablica 7. Svojstva uzoraka furnirskoga uslojenog drva.....	49
Tablica 8. Tehničke karakteristike termalne kamere FLIR T560.....	53
Tablica 9. Preporučeni parametri pri mjerenju termalnom kamerom.....	54
Tablica 10. Deskriptivna statistika utjecaja vrste držača i frekvencije vrtnje alata na razinu zvučnoga tlaka pri glodanju furnirskoga uslojenog drva s alatom TIP 1.....	70
Tablica 11. Utjecaj vrste držača i frekvencije vrtnje i njihove interakcije na razinu zvučnoga tlaka i rezultati post hoc Tukey testa.....	70
Tablica 12. Srednje vrijednosti, standardne devijacije i standardne pogreške maksimalne temperatura alata TIP 1 u ovisnosti o parametrima obrade.....	74
Tablica 13. Utjecaj frekvencije vrtnje i posmične brzine na maksimalnu temperaturu alata TIP 1 i rezultati Tukey testa.....	75
Tablica 14. Srednje vrijednosti, standardne devijacije i standardne pogreške maksimalne temperature alata TIP 2 u ovisnosti o parametrima obrade.....	79
Tablica 15. Utjecaj frekvencije vrtnje i posmične brzine na maksimalnu temperaturu alata TIP 2 i rezultati Tukey testa.....	79
Tablica 16. Prosječna temperatura alata TIP 3 u ovisnosti o parametrima obrade.....	83
Tablica 17. Utjecaj frekvencije vrtnje i posmične brzine na prosječnu temperaturu alata TIP 3 i rezultati Tukey testa.....	83
Tablica 18. Utjecaj frekvencije vrtnje, posmične brzine i tipa alata na maksimalnu temperaturu alata	86
Tablica 19. Vrijednosti razina zvučnoga tlaka alata TIP 1 u ovisnosti o parametrima obrade.....	92
Tablica 20. Utjecaj frekvencije vrtnje i posmične brzine na razinu zvučnoga tlaka alata TIP1.....	92

Tablica 21. Vrijednosti razina zvučnoga tlaka alata TIP 2 u ovisnosti o parametrima obrade.....	97
Tablica 22. Utjecaj frekvencije vrtnje i posmične brzine na razinu zvučnoga tlaka alata TIP 2.....	97
Tablica 23. Vrijednosti razina zvučnoga tlaka alata TIP 3 u ovisnosti o parametrima obrade.....	102
Tablica 24. Utjecaj frekvencije vrtnje i posmične brzine na razinu zvučnoga tlaka alata TIP 3...	102
Tablica 25. Utjecaj frekvencije vrtnje, posmične brzine i tipa alata na razinu zvučnoga tlaka.....	106
Tablica 26. T-test zavisnih uzoraka za polumjer zaobljenosti gornje i donje oštrice alata TIP 1...	111
Tablica 27. Vrijednosti polumjera zaobljenosti oštrice alata TIP 1 u ovisnosti o parametrima obrade.....	112
Tablica 28. Utjecaj frekvencije vrtnje na polumjer zaobljenosti oštrice alata TIP 1.....	112
Tablica 29. T-test zavisnih uzoraka za povećanje polumjera zaobljenosti gornje i donje oštrice alata TIP 2.....	114
Tablica 30. Vrijednosti polumjera zaobljenosti oštrice alata TIP 2 u ovisnosti o parametrima obrade.....	115
Tablica 31. Utjecaj frekvencije vrtnje na povećanje polumjera zaobljenosti oštrice alata TIP 2...	115
Tablica 32. T-test zavisnih uzoraka za polumjer zaobljenosti gornje i donje oštrice alata TIP ..	117
Tablica 33. Vrijednosti povećanja polumjera zaobljenosti oštrice alata TIP 3 u ovisnosti o parametrima obrade.....	118
Tablica 34. Utjecaj frekvencije vrtnje na polumjer zaobljenosti oštrice alata TIP 3.....	118
Tablica 35. Utjecaj frekvencije vrtnje i tipa alata na povećanje polumjera zaobljenosti oštrice	120
Tablica 36. Težinski faktori za svaki kriterij kod PSI-TOPSIS (modifikovana) metode.....	124
Tablica 37. Vrijednosti zavisnih varijabli za sve kombinacije ulaznih parametara alat TIP 1...	125
Tablica 38. Rezultati metode TOPSIS za alat TIP 1.....	125
Tablica 39. Rezultati modificirane metode PSI-TOPSIS (modifikovane) za alat TIP 1.....	126
Tablica 40. ANOVA rezultati za TOPSIS – alat TIP 1.....	127
Tablica 41. ANOVA rezultati za PSI-TOPSIS – alat TIP 1.....	127
Tablica 42. Vrijednosti zavisnih varijabli za sve kombinacije ulaznih parametara alat TIP 2....	128
Tablica 43. Rezultati metode TOPSIS za alat TIP 2.....	128

Tablica 44. Rezultati metode PSI-TOPSIS (modifikovana) za alat TIP 2.....	129
Tablica 45. ANOVA rezultati za TOPSIS – alat TIP 2.....	130
Tablica 46. ANOVA rezultati za PSI-TOPSIS – alat TIP 2.....	130
Tablica 47. Vrijednosti zavisnih varijabli za sve kombinacije ulaznih parametara alat TIP 3...131	
Tablica 48. Rezultati metode TOPSIS za alat TIP 3.....	131
Tablica 49. Rezultati metode PSI-TOPSIS (modifikovana) za alat TIP.....	132
Tablica 50. ANOVA rezultati za TOPSIS – alat TIP 3.....	133
Tablica 51. ANOVA rezultati za PSI-TOPSIS – alat TIP 3.....	133
Tablica 52. Regresijska analiza razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP 1.....	135
Tablica 53. Regresijska analiza razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP 2.....	135
Tablica 54. Regresijska analiza razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP 3.....	135
Tabela 55. Jednofaktorska ANOVA-e ovisnosti emitiranih razina zvučnoga tlaka o vrsti alata.....	136
Tablica 56. Veličina polumjera zaobljenosti oštrice pri različitim duljinama obrade s alatom TIP 1.....	139
Tablica 57. Veličina polumjera zaobljenosti oštrice pri različitim duljinama obrade s alatom TIP 2.....	139
Tablica 58. Veličina polumjera zaobljenosti oštrice pri različitim duljinama obrade s alatom TIP 3.....	140
Tablica 59. Utjecaj tipa alata na polumjer zaobljenosti oštrice nakon duljine obrade od 140 m izračunat pomoću ANOVA-e.....	141
Tablica 60. Rezultati dvofaktorske ANOVA-e sa interakcijom alata i duljine obrade na polumjer zaobljenosti oštrice.....	142
Tablica 61. Pearsonova korelacija između izmjerenih vrijednosti polumjera zaobljenosti oštrice i razine zvučnoga tlaka	145
Tablica 62. Regresijska analiza prosječnih temperatura u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP 1.....	147

Tablica 63. Regresijska analiza prosječnih temperatura u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP 2.....	147
Tablica 64. Regresijska analiza prosječnih temperatura u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP 3.....	147
Tablica 63. Deskriptivna statistička analiza izmjerenih temperatura glodala za različite duljine obrade.....	148
Tablica 64. Rezultati dvofaktorske ANOVA-e s utjecajem interakcije alata i duljine obrade na temperaturu alata.....	148
Tablica 65. Pearsonova korelacija između izmjerenih vrijednosti polumjera zaobljenosti oštice i prosječnih temperature alata	149
Tablica 66. Pearsonova korelacija između izmjerenih vrijednosti temperature alata i razine zvučnoga tlaka	150
Tablica 67. Regresijska analiza kvalitete površine u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP 1.....	159
Tablica 68. Regresijska analiza kvalitete površine u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP 2.....	159
Tablica 69. Regresijska analiza kvaliteta površine u ovisnosti o duljini obrade pri uporabi glodala TIP3.....	160
Tablica 70. Rezultati ANOVA-e za utjecaj vrste alata na kvalitetu površine (promjenu boje).....	161
Tablica 71. Rezultati ANOVA-e za utjecaj vrste alatana kvalitetu površine (valovitost).....	161
Tablica 72. Rezultati ANOVA-e za utjecaj vrste alata na kvalitetu površine (isprekidanu pojavu pukotina).....	161
Tablica 73. Rezultati ANOVA-e za utjecaj vrste alata na kvalitetu površine (nepresječena vlakanca drva).....	161

KAZALO KRATICA

Kratika	Puni naziv
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANN -	Artificial neural network
ANOVA	analiza varijance
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
DIA	dijamant
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLC	Diamond Like Carbon
EN	oznaka europske norme
GA	genetski algoritam
H	hipoteza
HRN	oznaka hrvatske norme
HSE	Health and Safety Executive
HW	Volframov karbid
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
JIS	Japanese Industrial Standards
koef. var.	koeficijent varijacije
MDF	Medium Density Fibreboard
OSB	Oriented Strand Board
PCD	polikristalni dijamant
PCP	Pentachlorophenol

PSI	Parameter Space Investigation
RH	right hand
Arit.sred. vri.	Aritmetička srednja vrijednost
MCMD	Multi-criteria decision making
CO ₂	karbon dioksid
std. dev.	standardna devijacija
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

KAZALO SIMBOLA

Simbol	puni naziv
A	površina
A, C, Z	frekvencijski ponderi zvuka
a	debljina strugotine
α	ugao nagiba
α	apsorpcija zvuka
b	širina strugotine
c	brzina zvuka
D	promjer glodala
d	duljina
E	energija gustoće zvuka
E_m	modul elastičnosti pri savijanju
e, V_B	posmična brzina
F	sila
F_i	otpor po oštrici glodala
F_x	horizontalna komponenta sile
F_y	vertikalna komponenta sile

M	moment glodanja
F_o	obodna komponenta sile
l	dužina strugotine,mm
f	frekvencija
n	broj titranja
f_m	čvrstoća na savijanje
f_c	čvrstoća na tlak
f_t	rastezna čvrstoća
h	dubina glodanja
I	intenzitet zvuka
K	specifični otpor glodanja
L	dužina obrade
n	broj okretaja alata
n	broj titraja
P_r	snaga glodanja
P	zvučna snaga
p_v	tlak
P_z	posmak po zubu
Q	generirana toplina
R_z	prosječna visina profila
R_{max}	maksimalna visina profila
R_a	srednje aritmetičko odstupanje mjernoga profila
R_q	odstupanje srednjega korijena mjernoga profila
R_{sk}	zakrivljenost (treći moment amplitude profila)
R_{ku}	kurtoza (četvrti moment amplitude profila)
R_{zi}	dubina profila

R_p	visina profila
R_v	dubina profila
t	vrijeme
Q	količina uklonjenog materijala
v	brzina glodanja
n	frekvencija vrtnje
W	energija zvuka
v_p	posmična brzina
v_0	vektor brzine glodanja
W_t	dubina vala
z	broj zubi
μ	paropropusnost
μ	koeficijent trenja
φ	kut zahvata rezne oštrice glodala za točku na luku kontakta
λ	valna duljina zvuka
λ	toplinska provodljivost
T	temperatura
Z_t	razina zvučnoga tlaka
r	polumjer zaobljenosti oštrice

ŽIVOTOPIS

Alen Ibrišević rođen je 16. srpnja 1987. godine u Gračanici u Bosni i Hercegovini. Nakon završetka osnovne škole i gimnazije „Dr. Mustafa Kamarić“ u Gračanici, upisuje 2006. godine Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, smjer Tehnologija drva. Prvi ciklus studija završava 2009. godine te je, kao najbolji student u generaciji, nagrađen Zlatnom značkom Univerziteta u Sarajevu. Iste godine upisuje drugi ciklus studija na istome fakultetu koji završava 2011. sa završnim radom „Utjecaj oplemenjivanja ploča od usitnjenog drva na čvrstoću savijanja i modul elastičnosti“. Kao najbolji student na drugome ciklusu studija nagrađen je Zlatnom značkom Univerziteta u Sarajevu.

U kolovozu 2011. godine zapošljava se u drvnjoj industriji „Jadrina doo“ u Gračanici u Bosni i Hercegovini gdje je, tijekom 12 godina rada prošao sve pozicije od pogorskog inženjera do direktora proizvodnje. U studenome 2023. godine zapošljava se u kompaniji „Isowood doo“ u Gračanici na poziciji menadžera proizvodnje. U travnju 2024. godine zapošljava se u kompaniji „Berina shoes“ gdje je zamjenik direktora. Akademsku karijeru započeo je 2019. godine, kada je zaposlen na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Sarajevu na mjestu asistenta u znanstvenome području tehnologije drva. U zvanje višeg asistenta izabran je 2023. godine u istome znanstvenome području. Kao autor i koautor do sada je objavio 20 znanstvenih radova i sudjelovao je na više međunarodnih konferencija u zemlji i u inozemstvu.

Kao suradnik sudjeluje na trima znanstveno-istraživačkim projektima: ENAMSN 2023 „Eksperimentalna i numerička analiza mehaničkih svojstava namještaja“ koji je financiralo Ministarstvo za nauku, visoko obrazovanje i mlade Kantona Sarajevo, „Uspostava laboratorije za analizu površinske obrade u drvnjoj i metalnoj industriji“, 2021–2022., koji se realiziran u suradnji s razvojnom agencijom SERDA i koji je financirao GIZ te „Development Education Centre for Contemporary Furniture Design and Manufacture Technologies“, 2019–2020, projekt koji je financirao Strojarski fakultet Sarajevo, USAID-WHAM i federalni zavod za zapošljavanje.

AUTOROV POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

Objavljen znanstveni rad u časopisu A1 skupine:

1. **Ibrisevic, A.**; Obucina, M.; Hajdarevic, S.; Mihulja, G. (2025): *Bending Properties of Finger-Jointed Elements of Differently Modified Beech (Fagus sylvatica L.) Wood*. Forests, 16, 1400. <https://doi.org/10.3390/f16091400>
2. Seid Hajdarevic, S.; Obucina, M.; Jusufagic, M.; Busuladzic, I.; **Ibrisevic, A.**; Martinovic, S. (2025): *Withdrawal Capacity of Double-Threaded Nuts Mounted in 3D-Printed Wood-Plastic Composites*. Drvna industrija, 76(4). <https://doi.org/10.5552/drvind.2025.0254>

Objavljen znanstveni rad u časopisu A2 skupine:

1. **Ibrisevic, A.**; Obucina, M.; Hajdarevic, S.; Mihulja, G.; Kitek Kuzman, M.; Busuladzic, I. (2023): *Effects of cutting parameters and grain direction on surface quality of three wood species obtained by CNC milling*. Bulletin of Transilvania University of Brasov Series II, Vol. 16(65) No.2, **DOI**: <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.3>.

Izlaganje na međunarodnom znanstvenom skupu (A3 skupina)

1. Hajdarević S.; Obućina M.; Delić M.; **Ibrisevic, A.**; Cisića M. (2019). *Dimensional and shape stability of plywood seat*, 30th DAAM international symposium of intelligent manufacturing and automation, 23-26th October 2019, Zadar, Croatia, Volume 30, No.1, ISSN 1726-9679, Ed. B. Katalinic / Published by DAAAM International, Vienna, Austria, EU, 2019 DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.042
2. **Ibrisevic, A.**; Obucina, M.; Hajdarevic, S. (2019): *Effect of the particleboard coating on the flexural strength and modulus of elasticity*, 30th DAAM international symposium of intelligent manufacturing and automation, 23-26th October 2019, Zadar, Croatia, Volume 30, No.1, ISSN 1726-9679, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.xxx
3. **Ibrisevic, A.**; Obucina, M.; Hajdarevic, S. (2020). *Dimensional stability and shape stability of massive board*, Proceedings of the 31st DAAAM International Symposium,

pp.xxxx-xxxx, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISSN 1726-9679, Vienna, AustriaDOI: 10.2507/31st.daaam.proceedings.xxx

4. Hajdarevic, S; Obucina, M; Busuladzic, I.; **Ibrisevic, A.** (2020). *Strength of Corner Tenon Joints Made from the Heat-treated Wood*, Proceedings of the 31st DAAAM International Symposium, pp.xxxx-xxxx, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISSN 1726-9679, Vienna, AustriaDOI: 10.2507/31st.daaam.proceedings.xxx
5. Hajdarevic, S.; Obucina, M.; **Ibrisevic, A.**; Busuladzic, I. (2021): *Strength and stiffness of reinforced L-shaped and T-shaped mortise and tenon joint*, 14th International Scientific Conference WoodEMA “The response of the forest-based sector to changes in the global economy”, Published by International Association for Economics and Management in Wood Processing and Furniture Manufacturing - WoodEMA, i.a.
https://www.woodema.org/proceedings/WoodEMA_2021_Proceedings.pdf
6. **Ibrisevic, A.**; Obucina, M.; Hajdarevic, S; Mihulja, G. (2021): *Influence of moisture content on the strength of finger joints bonded beech wood*, Proceedings of the 32nd DAAAM International Symposium, pp.0270-0274, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978- 3- 902734-33-4, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria: DOI: 10.2507/32nd.daaam.proceedings.038-
7. Hajdarevic, S.; Obucina, M.; **Ibrisevic, A.**; Busuladzic, I. (2022): *Strength and stiffness of the T- shaped mortise and stub tenon joints*, 15th International Scientific Conference WoodEMA “Crisis management and safety foresight in forest.based sector and smes operating in the global environment”, Published by WoodEMA, i.a. International Association for Economic, Management Marketing, Quality and Human Resources in Forestry and Forest Based Industry, ISBN 978-953-8446- 00-9.
https://www.woodema.org/proceedings/WoodEMA_2022_Proceedings.pdf
8. Obucina, M.; Hajdarevic, S.; **Ibrisevic, A.**; Smajic, S. (2022): *Effect of radial and tangential cut on the strength width-joint bonded solid wood*, Proceedings of the 33rd DAAAM International Symposium, Published by DAAAM International ,ISBN 9783-902734-XX-X, ISSN 1726-9679, DOI: 10.2507/33rd.daaam.proceedings.014
9. **Ibrisevic, A.**; Busuladzic, I.; Obucina, M.; Hajdarevic, S.(2023): *Influence of different*

- cutting speeds on CNC milling on surface roughness of objects made from steamed and heat-treated beech wood*, 14th Annual Days of BHAAAS in BiH. International Symposium on Innovative and Interdisciplinary Applications of Advanced Technologies, Tuzla, Bosnia and Herzegovina. DOI: 10.1007/978-3-031-43056-5_37
10. Busuladzic, I; **Ibrisevic, A.**; Obucina, M.; Hajdarevic, S. (2023): *Analysis of CNC milling parameters on roughness of ordinary, steam treated and heat treated beech wood, using spiral cutter*. 16th International Scientific Conference WoodEMA, Prague, Czech Republic.
https://www.woodema.org/proceedings/WoodEMA_2023_Proceedings.pdf
 11. **Ibrisevic, A.**; Busuladzic, I.; Mihulja, G.; Obucina, M.; Hajdarevic, S.; Smajic, S. (2023): *Effect of CNC machining parameters on surface quality of different kind of wood*, 16th International Scientific Conference WoodEMA, Prague, Czech Republic.
https://www.woodema.org/proceedings/WoodEMA_2023_Proceedings.pdf
 12. **Ibrisevic, A.**; Hajdarevic, S.; Obucina, M.; Busuladzic, I.; Mihulja, G. (2023): *The effect of wooden material type and additional adhesive fortification on the withdrawal capacity of the double-thread nuts*. 32th International Conference on Wood Science and Technology-ICWST 2023 “Unleashing the Potential of Wood-based Materials”, Zagreb, Croatia. <https://www.sumfak.unizg.hr/site/assets/files/5970/proceedings---icwst-32th---2023.pdf>
 13. Hajdarevic, S.; Busuladzic, I.; Martinovic, S.; **Ibrisevic, A.**; Obucina, M. (2024): *End-to-end grain joints in the construction of solidwood furniture*. Conference: WoodEMA 2024 - Green Deal Initiatives, Sustainable Management, Market Demands, and New Production Perspectives in the Forestry-Based Sector At: Sofia, Bulgaria, May 15th-17th 2024. https://www.woodema.org/proceedings/WoodEMA_2024_proceedings.pdf
 14. **Ibrisević, A.**; Obućina, M.; Hajdarević, S.; Hasanić, S.; Mihulja, G. (2025): *Mechanical properties of finger joints, exposed to different environmental conditions*. In: Proceedings of 18th International Scientific Conference WoodEMA 2025: „WOOD FOR THE FUTURE: INTEGRATING SUSTAINABILITY ACROSS INDUSTRIES“. At: Ohrid, North Macedonia, September 15th-17th, 2025
 15. Busuladžić, I.; Hajdarević, S.; Obućina, M.; **Ibrišević, A.**; Martinović, S. (2025): *Analysis of wood cutting using different circular saws at different processing*

parameters. In: Proceedings of 18th International Scientific Conference WoodEMA 2025: „WOOD FOR THE FUTURE: INTEGRATING SUSTAINABILITY ACROSS INDUSTRIES“. At: Ohrid, North Macedonia, September 15th-17th, 2025

16. Hajdarevic, S.; Obucina, M.; Busuladzic, I.; **Ibrisevic, A.**; Martinovic, S. (2025): *Strength analysis of end-to-end grain puzzle joint*. In: Proceedings of 18th International Scientific Conference WoodEMA 2025: „WOOD FOR THE FUTURE: INTEGRATING SUSTAINABILITY ACROSS INDUSTRIES“. At: Ohrid, North Macedonia, September 15th-17th, 2025
17. Obućina, M.; **Ibrišević, A.**; Mahmutspahić, E.; Mihulja, G. (2025): *Bonding Properties of Differently Modified Beech (Fagus sylvatica L.) Wood*. In: Proceedings of 33th International Conference on Wood Science and Technology - ICWST 2025 “UNLEASHING THE POTENTIAL OF WOOD-BASED MATERIALS. At: Zagreb, Croatia, December 4th-5th, 2025

ZAHVALA

Za nesebičnu pomoć pri definiranju teme doktorskog rada, pomoći pri ekperimentalnom istraživanju te usmjerenju pri pisanju doktorskog rada najiskrenije se zahvaljujem mentoru prof. dr. Goranu Mihulji. Čast mi je bilo raditi sa njim.

Zahvaljujem se prof. dr. Murčo Obućina na poticaju i savjetima u toku cijelog doktorskog studija, koji me je nesebično pomagao i usmjeravao kroz cijeli moj doktorski studij. Zahvala ide i prof. dr. Ružica Beljo-Lučić na pomoći prilikom prijave teme doktorskog rada, kao i na učešću u povjerenstvu za ocjenu doktorskog rada.

Zahvaljujem se prof.dr. Anamarija Jazbec za pomoći pri statističkoj obradi podataka.

Prof. dr. Đerzija Begić-Hajdarević sa Strojarskog fakulteta Univerziteta u Sarajevu zahvaljujem na pomoći pri optimizaciji parametara obrade, te na učešću u povjerenstvu za ocjenu doktorskog rada.

Zahvaljujem se prof. dr. Seid Hajdarević i prof. dr. Ibrahim Busuladžić sa Strojarskog fakulteta Univerziteta u Sarajevu na pomoći pri pisanju znanstvenih radova.

Velika zahvala u potpori i razumijevanju dugujem svojoj obitelji: roditeljima, supruzi Emini, te kćerkama Sajri i Ajli

PRILOG 1: Tehnički list za furnirsko uslojeno drvo



7. Declared performance:

Essential characteristics	Performance	Harmonised standard
Point load strength and stiffness	NPD	EN 13986:2004+A1:2015
Racking resistance	Calculation according to EN 1995-1-1	
Impact resistance	NPD	
Water vapour permeability μ	Wet 90, dry 220 (uncoated)	
	Mean density 680 kg/m ³	
Release of formaldehyde	E1	
Content of pentachlorophenol (PCP)	≤ 5 ppm	
Airborne sound insulation	NPD	
Sound absorption α	0,10/0,30	
Thermal conductivity λ	0,17 W/mK	
Embedment strength	Calculation according to EN 1995-1-1	
Air permeability	NPD	
Bonding quality (acc. to EN 314-2)	Class 3	
Biological durability	Use class 2 (uncoated)	
	Use class 3 (coated and edge sealed)	

Reaction to fire			
End use condition ⁽⁶⁾	Minimum thickness (mm)	Class ⁽⁷⁾ (excluding floorings)	Class ⁽⁸⁾ (floorings)
Without an air gap behind the wood-based panel ^{(1), (2), (5)}	9	D-s2, d0	D _f -s1
With a closed or an open air gap not more than 22 mm behind the wood-based panel ^{(3), (5)}	9	D-s2, d2	-
With a closed air gap behind the wood-based panel ^{(4), (5)}	15	D-s2, d1	D _f -s1
With an open air gap behind the wood-based panel ^{(4), (5)}	18	D-s2, d0	D _f -s1
Any ⁽⁵⁾	4	E	E _f

- ⁽¹⁾ Mounted without an air gap directly against class A1 or A2-s1, d0 products with minimum density 10kg/m³ or at least class D-s2, d2.
⁽²⁾ A substrate of cellulose insulation material of at least class E may be included if mounted directly against the wood-based panel, but not for floorings.
⁽³⁾ Mounted with an air gap behind. The reverse face of the cavity shall be at least class A2-s1, d0 products with minimum density 10 kg/m³.
⁽⁴⁾ Mounted with an air gap behind. The reverse face of the cavity shall be at least class D-s2, d2 products with minimum density 400 kg/m³.
⁽⁵⁾ Veneered, phenol- and melamine-faced panels are included for class excl. floorings.
⁽⁶⁾ A vapour barrier with a thickness up to 0,4 mm and a mass up to 200 g/m² can be mounted in between the wood-based panel and a substrate if there are no air gaps in between.
⁽⁷⁾ Class as provided for in Table 1 of the Annex to Decision 2000/147/EC.
⁽⁸⁾ Class as provided for in Table 2 of the Annex to Decision 2000/147/EC.



Nominal thickness		6,5	9	12	15	18	21	24	27	30	32	35	40	45	50
Number of plies		5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	29	33	37
Essential characteristics															
Characteristic bending strength N/mm ²	$f_{m }$	44,6	46,4	42,9	41,3	40,2	39,4	38,9	38,4	38,1	37,8	37,6	37,2	36,9	36,7
	$f_{m\perp}$	18,5	27,4	33,2	33,8	34,1	34,3	34,4	34,5	34,6	34,6	34,7	34,7	34,8	34,8
Characteristic compression strength N/mm ²	$f_{c }$	29,3	28,3	27,7	27,4	27,2	27,0	26,9	26,8	26,7	26,7	26,6	26,5	26,5	26,4
	$f_{c\perp}$	22,8	23,7	24,3	24,6	24,8	25,0	25,1	25,2	25,3	25,3	25,4	25,5	25,5	25,6
Characteristic tension strength N/mm ²	$f_{t }$	42,2	40,8	40,0	39,5	39,2	39,0	38,8	38,7	38,5	38,4	38,4	38,3	38,2	38,1
	$f_{t\perp}$	32,8	34,2	35,0	35,5	35,8	36,0	36,2	36,3	36,5	36,6	36,6	36,8	36,8	36,9
Mean MOE in bending N/mm ²	$E_{m }$	11400	10850	10719	10316	10048	9858	9717	9607	9519	9448	9389	9296	9227	9173
	$E_{m\perp}$	4270	6060	6781	7184	7452	7642	7783	7893	7981	8052	8111	8204	8273	8327
Mean MOE in compression and tension N/mm ²	$E_{tc }$	9844	9511	9333	9223	9148	9093	9052	9019	8993	8972	8953	8925	8904	8887
	$E_{tc\perp}$	7656	7989	8167	8277	8352	8407	8448	8481	8507	8528	8547	8575	8596	8613
Char. panel shear N/mm ²	$f_{v }$	9,5	9,5	9,5											
	$f_{v\perp}$	9,5	9,5	9,5											
Char. Planar shear N/mm ²	$f_{r }$	3,2	2,6	2,6											
	$f_{r\perp}$	1,8	2,4	2,4											
Mean MOR in panel shear N/mm ²	$G_{v }$	620	620	620											
	$G_{v\perp}$	620	620	620											
Mean MOR in planar shear N/mm ²	$G_{r }$	170	205	205											
	$G_{r\perp}$	120	160	180											
Strength and stiffness under point load	NPD														
Impact resistance	NPD														
k _{mod} and k _{ser} values according to EN 1995-1-1															

Harmonised standard EN 13986-2:2004+A1:2015

The performance of the product identified above is in conformity with the set of declared performances. This declaration of performance is issued, in accordance with Regulation (EU) No 305/2011, under the sole responsibility of the manufacturer identified above.

Signed for and on behalf of the manufacturer by:

Lahti, Finland, July 1st, 2022

Sirkku Salmikuukka, Product Manager
UPM Plywood

UPMPLYWOOD

PRILOG 2: Izmjerene maksimalne i prosječne temperature alata

Maksimalna temperatura alata, °C						
Alat	Posmična brzina, m/min	Frekvencija vrtnje, min ⁻¹				
		14 000	16 000	18 000	20 000	22 000
TIP 1	10-20	84,3	73,4	85,3	80,1	75,3
		85,9	73,4	85,3	80,1	75,3
		100,7	85,3	96,4	96,3	82,7
		103,1	90,8	92,2	96,6	89,6
		112,7	95,1	94,9	104,1	90,9
		102,2	92,7	95,8	100,2	87,4
		103,6	95	98,3	106,6	90,2
		110,4	93,2	99,3	105,6	92
		106,9	96,8	102,3	105,9	88,1
		112,5	93	95,4	109,9	88,9
		92,1	91,5	95,2	106,1	89,2
		108,8	90,5	97,3	95,5	89,5
		106,1	93,6	97,9	103,4	86,3
		112,9	93,8	101,4	102	86,7
		110,1	94,5	105,8	107	91,5
		105,1	91,7	105,4	102,4	90,5
		111,2	98,2	101,2	106,8	87,5
		107,7	95,1	101,9	107,6	85,1
		104,2	98,4	105,6	108,8	87,5
		105,5	97	98,4	104,1	87
		110,1	93,1	94	102,6	84,2
		106,9	95,2	101,7	102	89,2
		111,5	97,7	103,1	105,4	88
		113,7	97,3	76,4	105	91,4
		107	98,8	93,5	102,5	93,5
		110,3	93,2	104,1	105,9	90,1
		112,8	98,7	101,1	104,5	90,7
		109	96,8	102,5	102,7	95,9
		109	83,4	102	103,1	91,4
		109	94,4	102,5	106	88,8

Alat	Posmična brzina, m/min	Frekvencija vrtnje, min ⁻¹				
		14 000	16 000	18 000	20 000	22 000
TIP 1	20-30	92,2	83,9	85	81,5	73,2
		109,8	94,2	91,8	96,3	84,6
		117,6	102	100	101,2	82,5
		121,6	107	106,2	100	87,7
		122,2	106,6	106,1	102,6	87,5
		113,1	106,1	103,3	109	91,6
		120,8	108,7	108,6	103,9	96,6
		120,7	104,4	105,3	107	93
		123,1	106,1	102,3	109,6	96,8
		125,4	104,4	107,6	108,9	91,5
		110,5	109,5	104,5	97,2	82,9
		109,6	105,5	104,1	103,9	91,1
		118,4	109	104,5	107,6	92,7
		116,1	104,1	109,4	108,1	94,7
		122,3	106,8	110	108,6	95,9
		120,5	106,4	107,9	107,7	92,8
		117,1	105,7	105,2	105,3	93,6
		124,9	105,2	96,6	109,3	92,1
		126,3	110,6	104,9	107,2	93,6
		123,2	112,2	105,7	96,8	99,2
		113,2	98,4	103,5	105,3	93,2
		113,6	101,6	108,8	107,7	92,5
		123,9	108,1	107,7	106,9	92,7
		124	110,6	101,7	107,4	100,8
		125,4	109,2	104,6	107,1	97,9
		123,9	104,1	106,2	105,9	93,2
		124,1	107,9	98,4	106	104,7
		123,6	103,2	107,7	105,5	96,2
		121	100	100,9	105,2	97,7

Maksimalna temperatura alata, °C						
Alat	Posmična brzina, m/min	Frekvencija vrtnje, min ⁻¹				
		14 000	16 000	18 000	20 000	22 000
TIP 2	10-20	53,4	65,9	56,9	62,9	55,6
		59,40	67,5	65,2	75,4	62,1
		61,6	72,9	81,1	88,1	66,8
		62,1	69,7	71,3	82,4	71,7
		62,1	78,7	77,3	68,6	63,4
		64,6	67,2	66,7	79,3	65,4
		64,5	84,9	77	76,3	64
		68,1	61,8	83,3	73,9	61,4
		55,6	74,6	81,4	75,9	66,5
		63,2	76,9	84,8	87,1	64,7
		60,3	58,7	69,8	85,9	64,7
		62,4	71	92,9	75,8	62,1
		58,9	67,5	93,9	84	67,6
		61,4	80,5	93,5	89,6	67,1
		67,6	59,9	83,5	76,3	65,2
		58,7	79,9	79,3	82,6	93,1
		59,1	61,3	71,9	84,9	81,3
		66,2	94,1	76,9	83,4	69,7
		63,6	75	93,1	77,7	77,9
		54,3	80	84,2	83,1	67,5
		65,2	65	99,3	82,8	64,2
		57,7	77,3	81,2	79,1	73,2
		67	72,9	85	83,6	63,2
		58,4	94,1	98,3	86,6	67,4
		73,3	75	92,5	79,06	70,7
		66,7	80	90,6	79,7	68,7
		63,8	65	77,3	86,4	76
		62	77,3	83,8	82,2	83
		67,9	72,9	87,5	82,8	64,5
		58,5	79,9	100	77,1	70,1

Alat	Posmična brzina, m/min	Frekvencija vrtnje, min ⁻¹				
		14 000	16 000	18 000	20 000	22 000
TIP 2	20-30	54,1	62,8	56,9	65,3	53,7
		62,4	76,7	65,2	80,4	66,9
		60	86,6	81,1	85	64,3
		68,1	67,2	71,3	78,8	81
		65,9	83	77,3	84,7	72,2
		61,3	77,2	66,7	79,9	63,5
		67,1	85,1	77	82,6	69,1
		64,2	78,3	83,3	76,8	72
		70,2	94,7	81,4	77,3	70,2
		76,9	78,5	84,8	78,2	89,6
		65,2	73,8	69,8	80,1	67,1
		64,8	74,8	92,9	78,9	62,5
		65	76,6	93,9	81,1	63,4
		63,1	84,1	93,5	78,8	62,6
		55,6	82,5	83,5	77,4	68,3
		68,8	77,2	79,3	72,1	63,8
		66,9	80,9	71,9	80,5	74,2
		62,6	70,6	76,9	77	83,7
		63,2	78,8	93,1	81,6	83,1
		68,5	76,5	84,2	80,5	73,4
		65,8	78,2	99,3	86,2	60,2
		63,1	88,6	81,2	82	64,6
		57,2	75,4	85	86	64,3
		67,2	78,5	98,3	85,2	78,1
		65,4	75	92,5	90,5	64,3
		63,9	85	90,6	85,9	82,6
		64,9	77,2	77,3	84,8	72,5
		70,9	77,8	83,8	86,8	61,7
		69,8	80,7	87,5	82,3	66,5
		69,8	70,2	100	84,1	57,3

Prosječna temperatura alata, °C						
Alat	Posmična brzina, m/min	Frekvencija vrtnje, min ⁻¹				
		14 000	16 000	18 000	20 000	22 000
TIP 3	10-20	79,05	79,08	68,67	80,98	66,36
		91,8	86,08	101,15	90,61	81,16
		102,3	96,7	104,35	85,68	88,17
		99,62	92,7	87,84	89,05	80,94
		102,78	102,12	86,32	90,93	81,89
		99,28	96,69	92,96	86,84	79,14
		99,32	89,25	109,92	97,29	86,69
		94,42	95,42	92,64	91,52	84,84
		93,42	97,98	92,4	91,18	92,99
		95,91	101,48	102	98,55	86,99
		95,92	101,11	93,4	91,3	90,45
		94,14	104,26	93,4	95,02	82,19
		100,1	94,45	93,55	95,64	93,73
		100,8	98,76	106,24	96,74	92,89
		102,13	97,48	89,96	94,32	91,44
		100,28	93,08	89,96	90,99	98,98
		98,3	89,32	91,02	87,7	90,33
		108,88	90,24	93,73	102,77	91,93
		99,22	96,72	106,99	89,28	92,41
		95,4	96,62	98,22	99,36	91,08
		105	100,88	103,38	87,21	91,08
		103,23	99,36	87,58	90,65	84,22
		100,68	97,34	96,25	96,33	99,33
		108,46	99,22	95,7	99,48	100,08
		104,39	103,22	103,8	94,25	91,09
		104	92,8	103,8	93,25	81,71
		104,65	105,84	92,28	95,5	94,16
		105,64	105,26	92,24	92,54	90,29
		104,65	98,22	95,52	103,5	92,7
		105,64	103,95	105,94	97,52	93,54

Alat	Posmična brzina, m/min	Frekvencija vrtnje, min ⁻¹				
TIP 3	20-30	14 000	16 000	18 000	20 000	22 000
		96,2	91,08	86,13	93,84	79,75
		103,25	96,33	91,48	101,94	92,01
		101,04	92	103,67	93,69	85,57
		108,66	94,68	94,08	92,49	79,36
		105,66	98,88	96,35	108,3	83,99
		97,3	99,5	97,1	96,68	91,84
		100,06	100,82	94,8	97,48	90,59
		105,9	100,03	104,18	98,55	90,89
		93,66	94,65	106,08	106,3	87,32
		106,24	98,42	97,6	94,22	84,94
		107,61	96,47	104,5	100,56	85,01
		102,24	94,08	99,25	99,24	92,77
		102,42	104,83	100,01	105,56	90,76
		107,24	99,52	107,78	96,7	86,21
		95,75	90,3	95,7	99,92	92,09
		106,68	93,15	97,72	86,96	84,44
		92,25	96,25	93,58	92,66	89,74
		104,67	91,75	102,44	96,98	84,78
		108,4	98,15	96,99	98,92	81,53
		100,92	91,4	95,25	100,02	79,17
		108,42	91,7	97,62	101,38	87,66
		106,78	97,6	108,8	99,92	87,29
		101,36	99,27	103,8	86,96	86,58
		102,78	102,26	96,82	92,66	86,86
		99,76	95,95	101,82	96,98	84,15
		108,68	93,1	100,26	98,92	90,12
		102,94	92,92	101,91	100,02	93,23
		108,03	97,52	104,23	101,38	90,48
		104,02	94,98	104,23	101,38	90,63

PRILOG 3: Izmjerene razine zvučnoga tlaka

Razina zvučnoga tlaka, dB(A)						
Alat	Posmična brzina, m/min	Frekvencija vrtnje, min ⁻¹				
		14 000	16 000	18 000	20 000	22 000
TIP 1	10-20	100,37	107,73	113,88	83,17	75,58
		99,84	107,59	111,78	83,15	75,58
		99,40	107,11	110,30	83,17	75,52
		99,74	107,72	111,61	83,20	75,46
		101,03	106,78	106,02	83,12	75,92
		99,97	106,03	102,43	83,18	75,45
		100,51	106,78	108,07	83,21	75,51
		100,40	107,02	109,43	83,14	75,76
		102,23	107,31	102,82	83,07	75,64
		102,88	107,68	108,16	83,14	76,22
		103,61	107,46	109,30	83,22	77,06
		106,81	107,30	102,12	83,18	76,11
		102,68	109,15	101,65	83,15	75,54
		102,59	108,67	103,98	83,14	75,51
		103,30	108,84	103,17	83,13	75,62
		103,44	108,17	102,51	82,56	75,50
		102,22	107,36	103,16	108,52	76,01
		102,11	107,48	102,14	78,29	76,78
		102,13	108,10	101,71	83,16	83,23
		102,18	108,39	102,96	83,15	83,26
		101,83	108,26	101,33	83,13	83,34
		102,79	107,53	101,09	82,46	83,26
		102,61	108,36	101,66	106,84	83,27
		104,63	108,16	102,15	77,94	83,25
		103,54	104,58	102,06	83,72	83,27
		100,69	104,29	103,10	83,10	83,28
		100,27	104,31	102,58	83,03	83,33
		99,64	107,60	101,92	87,32	83,55
		100,72	104,15	102,99	83,03	95,17
		100,78	107,40	101,89	87,32	88,59

Alat	Posmična brzina, m/min	Frekvencija vrtnje, min ⁻¹				
TIP 1	20-30	14 000	16 000	18 000	20 000	22 000
		105,53	106,97	108,28	78,82	83,33
		104,48	104,58	108,30	79,68	83,43
		104,77	104,05	107,43	83,54	83,39
		105,23	105,35	107,67	83,19	83,31
		104,75	106,03	108,65	83,13	83,30
		104,98	105,62	108,18	83,10	83,39
		106,20	105,22	107,73	82,58	83,35
		106,35	105,27	108,12	93,83	83,28
		109,18	105,95	107,28	89,08	83,40
		110,52	105,18	106,77	77,25	83,33
		108,42	105,78	106,73	82,61	83,37
		106,40	108,22	105,68	84,09	83,36
		106,12	108,85	107,52	83,14	83,36
		106,08	106,28	108,48	83,14	83,40
		105,82	104,88	108,52	83,33	83,32
		106,18	105,57	108,18	82,64	83,31
		105,85	105,57	108,25	91,89	83,32
		105,77	104,43	108,42	93,20	83,33
		107,83	104,62	106,98	76,96	83,25
		105,60	105,88	107,77	83,84	83,20
		108,67	105,87	105,85	83,16	83,23
		105,07	106,07	106,52	83,06	83,31
		103,93	106,95	105,98	83,23	83,33
		103,97	107,52	106,90	83,12	83,33
		104,03	105,70	109,27	82,78	83,42
		104,33	106,68	108,03	85,96	83,58
		104,50	106,38	107,05	95,57	83,29
		104,33	106,00	108,20	76,96	83,31
		104,50	104,70	107,33	83,74	83,33

Alat	Posmična brzina, m/min	Frekvencija vrtnje, min ⁻¹				
TIP 2	20-30	14 000	16 000	18 000	20 000	22 000
		106,50	105,38	106,32	106,05	105,32
		107,70	104,60	108,40	107,22	105,93
		109,75	104,38	105,92	109,02	105,15
		106,83	104,60	106,22	108,30	105,93
		106,28	105,33	106,37	107,45	106,93
		106,43	104,68	106,68	107,33	107,05
		108,97	106,30	106,63	107,65	107,93
		107,65	106,83	106,77	107,15	107,95
		109,32	106,50	106,22	106,57	106,52
		111,98	105,68	105,77	107,83	106,30
		108,88	107,38	106,22	107,22	106,15
		107,98	107,33	106,18	105,98	105,98
		107,08	106,93	107,17	107,95	105,85
		107,35	105,32	107,05	108,48	106,23
		106,68	106,25	106,35	106,33	106,40
		107,18	104,38	106,05	107,70	105,63
		107,73	105,15	106,05	108,32	108,10
		108,22	104,60	106,27	106,98	107,92
		109,22	104,45	106,35	106,30	106,97
		106,98	105,15	107,07	106,82	106,55
		108,67	104,32	106,48	106,47	106,92
		109,63	106,02	106,25	107,55	107,03
		110,45	105,55	105,95	108,28	107,10
		108,50	106,67	106,15	109,72	107,62
		108,63	106,10	106,77	106,57	108,07
		107,78	104,77	105,15	106,27	107,70
		108,45	106,23	105,13	106,75	109,47
		108,20	106,02	104,72	106,27	106,97
		109,02	105,32	105,15	106,75	105,32

Razina zvučnoga tlaka, dB(A)						
Alat	Posmična brzina, m/min	Frekvencija vrtnje, min ⁻¹				
		14 000	16 000	18 000	20 000	22 000
TIP 3	10-20	104,97	106,36	105,72	109,76	101,98
		105,04	107,51	106,04	110,18	102,23
		104,99	106,67	104,88	111,57	101,41
		105,06	106,26	105,36	110,09	99,98
		104,74	107,59	105,44	111,14	99,34
		104,51	107,34	105,40	112,24	100,10
		105,69	107,78	106,09	110,89	102,54
		106,23	107,54	105,02	110,64	103,60
		105,12	107,50	105,36	109,96	105,29
		105,78	106,89	105,27	110,54	103,14
		106,08	107,38	104,41	110,47	103,10
		105,81	108,30	104,54	110,67	103,14
		105,29	108,71	104,96	109,59	103,05
		104,73	108,32	106,03	110,49	103,00
		104,99	107,38	106,73	109,80	102,56
		105,43	107,02	106,67	111,84	100,75
		104,34	108,04	106,98	111,40	102,06
		104,37	107,25	105,78	110,87	103,96
		104,74	107,61	105,31	110,97	104,53
		104,34	107,68	105,00	110,77	103,48
		104,03	106,92	104,50	110,64	101,25
		104,81	106,93	104,56	110,90	100,26
		105,11	108,00	105,92	110,31	101,71
		105,36	107,72	105,40	109,47	103,05
		104,91	108,89	105,58	109,98	102,30
		104,94	108,42	105,12	110,48	102,80
		105,11	107,37	106,02	111,30	105,16
		105,36	107,05	103,44	109,29	104,90
		104,91	107,65	104,34	109,41	101,28
		104,94	107,15	103,64	112,18	100,59

Alat	Posmična brzina, m/min	Frekvencija vrtnje, min ⁻¹				
TIP 3	20-30	14 000	16 000	18 000	20 000	22 000
		104,20	108,32	107,37	110,12	102,65
		102,96	107,82	106,72	109,93	102,28
		104,27	107,60	109,14	110,37	102,28
		106,42	109,30	107,27	110,27	102,60
		107,03	109,00	106,73	111,30	105,35
		106,15	108,92	107,62	109,78	107,06
		105,10	108,75	108,63	109,90	108,62
		105,72	108,40	108,47	109,70	106,60
		106,55	108,43	107,52	110,65	106,22
		106,78	109,02	107,35	110,75	106,46
		107,00	109,93	106,75	110,87	108,70
		109,68	110,75	107,03	110,95	107,60
		111,52	109,13	108,43	110,80	105,98
		108,30	108,12	109,48	111,23	105,62
		107,07	108,25	108,20	112,45	108,02
		106,15	108,20	104,40	112,02	109,26
		106,12	108,17	107,22	110,93	109,38
		105,65	107,83	108,64	110,93	105,20
		106,53	107,92	107,88	110,30	105,96
		107,03	107,40	106,03	110,03	103,84
		106,55	109,18	106,35	110,40	104,00
		106,90	107,78	106,85	110,88	104,68
		107,03	108,92	106,05	110,40	105,92
		106,32	107,90	106,43	109,63	105,24
		104,83	107,72	108,65	111,40	107,20
		105,50	108,00	107,34	112,32	109,98
		104,93	108,58	105,68	110,57	109,06
		105,77	107,68	105,53	110,23	105,74
		105,63	107,67	105,27	110,54	106,34

PRILOG 4: Spektar izmjerenog zvučnog tlaka

TIP 1																																	
14 000	Posmična brzina, m/min	15																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5k	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka , dB	-1	12	26	32	40	49	54	60	58	63	71	68	70	73	91	100	77	90	98	94	93	90	93	93	87	84	81	79	77	75	72	71
	Posmična brzina, m/min	25																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5k	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka , dB	8,7	12	23	35	37	49	56	58	62	63	71	74	74	75	95	104	86	96	102	96	96	96	96	96	92	90	88	85	82	80	77	74
16 000	Posmična brzina, m/min	15																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5k	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka , dB	3,4	15	24	31	39	48	56	62	60	64	70	68	71	75	77	104	97	85	96	89	93	92	98	107	102	88	89	84	81	76	71	67
	Posmična brzina, m/min	25																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5k	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka , dB	3,4	12	20	26	40	47	55	58	63	64	68	68	72	75	76	105	98	86	104	96	99	93	97	98	92	88	86	82	80	78	75	71
18 000	Posmična brzina, m/min	15																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5k	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka , dB	5,3	13	23	30	35	44	55	60	63	63	69	68	71	84	75	84	97	82	85	90	91	93	89	89	85	81	80	76	74	70	68	64
	Posmična brzina, m/min	25																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5k	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka , dB	8,6	15	25	31	37	47	54	62	61	63	69	70	76	83	77	90	104	89	94	104	94	95	93	94	89	87	85	83	80	78	75	73
20 000	Posmična brzina, m/min	15																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5k	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka , dB	5,1	12	24	33	40	51	60	62	65	70	75	74	69	71	72	73	70	67	71	73	74	74	73	74	70	66	61	56	51	45	39	32
	Posmična brzina, m/min	25																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5k	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka , dB	8	12	27	34	38	51	58	61	66	71	73	70	69	72	72	72	71	67	70	73	74	74	73	74	70	66	61	56	51	45	39	30
22 000	Posmična brzina, m/min	15																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5k	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka , dB	1	2,5	14	25	35	39	44	56	60	61	64	62	58	58	60	64	64	60	63	64	66	67	67	66	63	59	54	48	42	37	32	25
	Posmična brzina, m/min	25																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5k	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka , dB	6,6	13	26	30	42	51	57	62	65	70	74	71	69	71	71	74	71	70	72	74	74	75	73	73	70	65	60	55	50	44	38	29

			TIP 2																															
14 000	Posmična brzina, m/min	15																																
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k	
	Razina zvučnoga tlaka, dB	7	13	23	31	39	49	55	60	60,5	66	73	81	89	74,7	89,8	98	88	91	95	93	92	92	91	91	89	85	84	81	79	76	73	70	
	Posmična brzina, m/min	25																																
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k	
16 000	Razina zvučnoga tlaka, dB	7	13	23	32	39	49	55	60	60,4	66	73	81	90	75,3	93,2	102	92	96	##	97	96	96	95	95	92	89	87	84	82	79	76	72	
	Posmična brzina, m/min	15																																
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k	
	Razina zvučnoga tlaka, dB	7	13	23	31	38	49	55	60	61,8	63	70	70	80	77,1	76,2	95	89	92	90	90	91	90	90	90	88	84	82	80	77	74	72	68	
	Posmična brzina, m/min	25																																
18 000	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k	
	Razina zvučnoga tlaka, dB	8	13	23	31	39	49	55	60	61,6	63	70	70	82	78,8	76,9	99	92	96	94	94	95	94	94	93	91	87	85	83	80	77	74	70	
	Posmična brzina, m/min	15																																
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k	
	Razina zvučnoga tlaka, dB	7	12	23	31	38	49	55	60	61,5	63	70	70	72	85,1	75,8	84	96	85	88	92	90	91	90	90	88	83	81	79	76	73	70	67	
20 000	Posmična brzina, m/min	25																																
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k	
	Razina zvučnoga tlaka, dB	8	13	22	31	39	50	56	60	64,1	67	72	70	68	71,5	71,7	73	74	70	73	74	74	75	74	74	72	68	63	60	55	50	44	37	
	Posmična brzina, m/min	15																																
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k	
22 000	Razina zvučnoga tlaka, dB	7	13	23	31	38	49	55	60	61,6	63	70	70	69	88,7	82,4	75	100	91	92	91	90	91	90	89	86	82	80	78	76	74	71	67	
	Posmična brzina, m/min	25																																
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k	
	Razina zvučnoga tlaka, dB	8	13	22	30	39	49	56	60	64,1	67	72	70	67	71	72,1	72	74	70	72	74	74	74	73	74	71	67	63	59	54	49	44	36	
	Posmična brzina, m/min	15																																
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k	
	Razina zvučnoga tlaka, dB	7	13	23	31	38	48	55	60	61,8	64	71	70	70	82,7	88,9	74	94	101	89	90	93	94	91	90	91	82	80	77	75	73	71	67	
	Posmična brzina, m/min	25																																
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k	
	Razina zvučnoga tlaka, dB	8	13	22	31	39	49	56	60	64,2	67	72	70	68	71,3	73,2	72	73	71	72	74	74	75	75	74	72	68	64	60	56	51	46	39	

TIP 3																																	
14 000	Posmična brzina, m/min	15																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka, dB	8	13	23	31	39	49	55	60	63,8	68	72,5	71	70,1	71	73	75	72,8	72	74	75	76	76	74	74	72	68	64	61	56	51	46	39
	Posmična brzina, m/min	25																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka, dB	8	13	23	31	40	49	56	60	63,9	68	72,7	71	69,7	71	73	75	72,7	71	74	75	76	75	74	74	72	68	64	61	56	51	46	39
16 000	Posmična brzina, m/min	15																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka, dB	8	13	22	31	39	49	56	60	64	67	71,5	70	68,5	70	72	75	73	71	73	74	75	75	74	75	72	68	64	61	55	50	45	38
	Posmična brzina, m/min	25																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka, dB	8	13	23	31	39	50	56	60	64,1	67	71,6	70	68,4	71	72	75	72,7	71	73	74	74	75	74	75	72	68	63	60	55	50	45	37
18 000	Posmična brzina, m/min	15																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka, dB	8	13	22	31	39	49	56	60	63,8	67	71,4	70	67,6	72	72	74	74,6	71	73	75	75	75	74	75	72	68	64	61	56	51	46	39
	Posmična brzina, m/min	25																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka, dB	8	13	22	31	39	50	56	60	64,1	67	71,6	70	67,6	72	72	73	73,9	70	73	74	74	75	74	74	72	68	63	60	55	50	44	37
20 000	Posmična brzina, m/min	15																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka, dB	8	13	22	31	39	50	56	60	63,8	67	71,5	70	67,3	73	73	72	75,4	72	74	75	75	75	75	75	72	68	64	61	57	52	46	39
	Posmična brzina, m/min	25																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka, dB	8	13	22	30	39	49	56	60	64,1	67	71,5	70	66,9	71	72	72	73,5	70	72	74	74	74	73	74	71	67	63	59	54	49	44	36
22 000	Posmična brzina, m/min	15																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka, dB	8	13	22	31	39	48	56	60	64	67	72,1	70	67,6	71	74	72	73,5	72	72	74	75	75	75	75	73	68	64	61	57	52	47	40
	Posmična brzina, m/min	25																															
	Frekvencija, Hz	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25	1.6k	2k	2.5k	3.15	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5	16k	20k
	Razina zvučnoga tlaka, dB	8	13	22	31	39	49	56	60	64,2	67	72,1	70	67,5	71	73	72	73,1	71	72	74	74	75	75	74	72	68	64	60	56	51	46	39

PRILOG 5: Izmjerene vrijednosti razine zvučnoga tlaka u ovisnosti od držača alata

Frekvencija vrtnje, min ⁻¹	AKE 32					KLEIN					LEUCO				
	14 000	16 000	18 000	20 000	22 000	14 000	16 000	18 000	20 000	22 000	14 000	16 000	18 000	20 000	22 000
Razina zvučnoga tlaka, dB(A)	102,1	105,8	106,8	103,5	105,4	105,5	104,8	102,6	105,6	99,5	105,8	104,3	100,8	102,4	94,4
	102,7	104,4	107,3	104,4	104,1	106,7	105,7	105,8	104,3	99,8	105,8	104,9	101,2	102,0	95,2
	100,9	103,5	104,0	99,7	101,8	103,6	101,9	108,2	102,5	98,0	104,9	102,7	98,3	99,3	95,4
	99,8	98,4	103,4	100,8	102,7	100,7	99,1	106,0	101,0	98,9	99,9	98,6	102,5	99,4	94,9
	100,7	98,9	100,4	102,9	104,1	105,5	100,0	99,0	100,1	99,3	100,1	100,2	102,3	100,6	94,8
	101,0	102,8	102,5	104,0	105,8	106,3	97,9	98,6	98,9	99,6	102,4	100,6	101,4	101,6	94,9
	97,3	103,4	104,9	104,7	105,4	105,0	99,1	100,2	101,7	98,8	103,4	103,7	100,8	103,1	93,5
	98,2	103,6	104,3	107,2	105,7	103,5	100,2	103,7	105,3	97,1	104,5	103,5	98,5	103,4	95,4
	102,4	103,9	104,4	105,2	105,7	103,1	102,6	105,8	103,2	93,8	105,5	101,0	95,6	101,9	94,2
	100,2	103,8	104,3	99,0	103,9	101,5	101,4	103,8	101,8	93,4	105,1	97,6	97,1	102,2	94,4
	98,5	105,1	105,4	97,7	104,4	101,6	102,2	100,1	103,6	94,1	103,9	98,1	98,6	102,7	94,8
	99,9	106,7	107,0	99,4	106,5	102,9	103,9	100,8	105,4	94,3	104,2	96,3	99,2	102,0	95,1
	100,6	108,9	107,8	99,0	106,2	102,1	105,4	99,1	104,3	95,1	105,4	97,8	99,2	103,2	97,2
	102,3	109,3	109,3	101,8	103,4	102,8	104,3	105,8	104,3	96,3	104,6	96,8	97,2	103,1	96,6
	98,6	105,7	106,8	102,6	102,8	102,8	101,6	107,1	102,4	95,5	104,0	99,8	99,0	101,8	96,4
	99,2	105,6	107,1	105,9	109,2	104,0	103,3	101,8	101,6	94,4	105,3	101,7	99,5	100,6	94,6
	103,2	108,7	108,9	106,8	112,6	104,2	103,0	104,6	106,4	97,7	106,3	100,9	99,6	98,8	93,7
	102	110,9	106,4	105,0	108,2	104,3	104,0	112,0	105,6	98,4	104,6	103,1	98,0	99,0	94,8
	101,8	105,2	107,8	105,1	108,6	103,8	104,8	112,7	109,0	96,9	96,8	101,2	98,0	97,0	94,9
	100,4	106,4	108,5	109,6	108,7	105,7	106,5	106,7	108,1	97,9	98,6	99,6	93,9	98,6	96,4
	99,8	104,3	108,3	108,4	107,0	103,3	105,5	102,7	105,8	98,5	101,0	99,5	93,3	101,0	99,2
	100,1	107,9	107,6	110,2	106,6	103,2	111,7	95,2	102,9	97,5	94,7	99,3	95,7	101,2	97,4
	99,8	109,9	109,5	110,9	104,7	105,3	111,1	100,8	106,5	97,5	100,7	101,2	94,7	95,5	95,8
	99,7	108,0	108,7	107,5	106,5	104,3	110,1	104,0	104,9	98,2	101,7	98,4	97,7	97,2	97,3
	96,2	108,6	111,4	108,6	105,5	105,2	108,2	98,5	105,8	99,7	100,9	94,1	104,5	97,5	100,4

	95,7	109,5	114,6	109,2	109,4	105,5	111,1	97,4	108,7	99,2	100,3	95,1	99,6	98,2	102,1
	96,2	106,4	111,8	108	110,8	104,0	109,7	96,6	112,7	97,9	100,5	95,2	101,4	98,6	100,6
	92,0	105,7	112,1	110,6	108,5	104,8	107,3	96,1	109,7	99,8	95,5	94,4	101,1	100,2	101,7
	93,7	104,0	115,4	106,3	101,0	102,8	108,9	96,2	111,9	96,8	100,6	92,8	103,9	105,6	99,3
	97,2	107,9	112,2	107,0	100,4	101,4	112,6	103,0	110,4	97,4	106,2	99,1	98,7	110,5	101,0
	101,1	106,6	110,9	113,2	96,8	105,3	108,6	99,9	111,5	96,8	107,7	95,4	99,5	111,0	99,7
	100,0	107,7	111,7	113,5	100,9	103,7	110,4	102,5	112,0	100,4	99,2	95,2	100,7	105,8	99,4
	100,6	107,7	112,8	110,1	104,5	104,0	109,9	102,2	110,6	100,9	98,7	95,1	107,7	101,0	99,1
	101,0	108,0	108,9	109,1	100,7	102,3	108,1	109,1	110,3	96,9	95,9	95,7	110,8	104,6	101,4
	93,1	105,4	113,7	109,0	98,5	94,4	107,2	105,8	111,5	100,7	93,4	96,1	102,0	106,5	103,2
	100,5	102,9	109,0	108,3	106,3	100,8	107,5	100,7	110,6	103,2	98,1	100,7	106,9	103,6	105,9
	109,6	107,9	102,9	105,8	103,9	98,0	97,5	99,5	110,1	106,2	95,9	98,2	100,6	98,7	102,1
	112,2	107,7	110,5	105,0	106,5	94,9	106,4	99,6	109,0	104,1	95,9	95,0	103,2	101,3	107,1
	100,5	106,7	111,2	108,3	107,3	97,6	109,0	104,9	109,1	100,4	101,5	102,5	104,0	104,2	106,8
	105,5	103,9	112,3	113,3	105,5	103,1	106,5	103,6	111,4	105,8	101,7	105,7	105,3	104,2	110,3
	111,1	109,0	111,7	111,9	107,4	110,4	104,6	104,5	112,5	106,7	107,9	106,0	107,6	103,3	110,6
	103,1	104,2	111,6	107,0	103,3	106,9	104,8	102,2	113,0	101,0	111,9	98,8	101,5	102,6	106,5
	96,8	102,6	113,0	110,7	106,6	100,7	108,3	104,8	111,3	106,3	118,0	107,6	103,0	102,3	106,9
	98,9	105,0	113,8	111,9	104,9	106,6	108,0	108,7	113,9	105,0	119,5	108,6	110,7	106,9	108,4
	104,5	103,8	113,1	108,6	104,2	107,2	109,3	107,6	110,8	106,5	102,7	108,7	105,3	106,1	107,6
	106,6	104,8	109,4	106,4	107,4	100,6	103,6	104,1	103,4	103,1	96,9	101,2	103,0	98,1	103,3
	107,7	106,1	101,5	109,8	106,8	97,8	103,2	97,0	110,0	106,0	101,1	100,4	105,4	99,6	102,7
	109,6	106,9	111,1	106,1	108,1	99,6	104,2	102,3	108,1	109,1	111,9	99,7	109,8	103,4	104,7
	103,0	110,9	111,6	109,5	111,7	106,4	109,4	104,0	113,0	112,2	109,8	105,9	110,6	112,5	109,8
	107,7	107,9	112,0	113,1	109,9	106,9	112,7	104,1	112,1	112,8	113,3	109,0	110,5	112,7	110,0
	109,6	100,9	112,8	108,1	111,5	110,9	111,5	112,4	111,9	111,6	106,9	110,0	107,2	116,7	107,1
	103,0	100,9	113,5	105,3	112,7	105,7	107,7	108,1	109,7	111,4	99,9	103,1	107,2	108,9	110,8

PRILOG 6: Izmjerene vrijednosti polumjera zaobljenosti oštrice nakon duljine obrade od 60 m

TIP 1															
Frekvencija vrtnje, min ⁻¹	Početni polumjer zaobljenosti oštrice (μm)					Polumjer zaobljenosti donje oštrice (μm)					Polumjer zaobljenosti gornje oštrice (μm)				
14 000	4,94	4,50	4,29	3,81	4,87	18,79	18,82	17,46	18,15	18,65	18,59	18,06	18,07	18,65	17,42
16 000	5,81	5,74	6,77	5,07	5,11	22,70	23,30	21,33	21,40	20,25	20,31	20,50	20,23	20,94	21,59
18 000	8,24	7,37	9,29	8,90	9,82	24,90	24,72	24,61	25,44	26,34	24,23	25,10	24,05	22,17	24,31
20 000	6,02	6,56	6,69	6,99	6,19	16,85	15,23	11,05	13,92	13,04	15,50	16,20	15,29	16,14	15,35
22 000	9,94	8,31	6,13	9,14	6,39	13,85	17,97	14,87	14,02	16,04	14,49	15,32	17,84	17,38	15,42
TIP 2															
Frekvencija vrtnje, min ⁻¹	Početni polumjer zaobljenosti oštrice (μm)					Polumjer zaobljenosti donje oštrice (μm)					Polumjer zaobljenosti gornje oštrice (μm)				
14 000	7,52	7,41	5,80	6,48	6,11	13,50	14,18	14,56	13,46	12,43	14,42	12,40	13,49	12,03	11,33
16 000	7,61	7,06	6,82	7,61	7,54	12,25	11,53	11,54	13,71	12,24	12,99	8,90	9,52	10,23	10,07
18 000	9,17	9,91	8,66	9,67	9,65	16,48	14,26	15,82	17,01	16,05	14,29	17,56	16,84	16,48	13,81
20 000	8,42	7,74	8,16	6,94	7,32	15,41	16,44	15,72	16,62	16,48	18,71	17,53	17,11	17,13	17,08
22 000	5,68	5,70	5,41	5,29	4,93	27,58	26,06	28,53	26,62	28,85	29,96	29,25	25,25	29,54	27,48
TIP 3															
Frekvencija vrtnje, min ⁻¹	Početni polumjer zaobljenosti oštrice (μm)					Polumjer zaobljenosti donje oštrice (μm)					Polumjer zaobljenosti gornje oštrice (μm)				
14 000	3,63	3,76	3,45	4,68	3,47	16,19	13,58	14,75	13,04	15,77	16,68	17,73	15,00	18,01	17,79
16 000	6,46	6,56	6,17	6,47	6,53	11,25	10,29	12,10	10,97	9,45	11,99	10,86	11,67	9,22	9,34
18 000	5,83	4,56	4,98	5,51	5,54	8,63	12,53	11,74	10,59	8,90	8,99	10,61	7,92	9,05	8,42
20 000	5,48	5,42	5,34	4,97	6,01	13,32	11,09	12,21	11,29	11,40	14,77	14,98	11,74	13,82	13,84
22 000	5,46	4,74	5,13	5,58	5,31	14,62	13,89	12,02	13,90	12,29	13,26	13,39	12,34	11,88	14,39

PRILOG 7: Prosječne temperature alata u ovisnosti o duljini obrade

60-100 m				
ALAT	Duljina, m	TIP 1	TIP 2	TIP 3
Temperatura, °C	61,25	61,76	42,22	73,13
	62,50	63,11	55,42	77,54
	63,75	66,41	47,70	82,15
	65,00	70,65	49,16	80,42
	66,25	67,39	46,89	80,87
	67,50	67,92	48,10	83,46
	68,75	68,28	46,76	81,76
	70,00	73,32	50,90	84,92
	71,25	71,59	52,03	84,06
	72,50	73,46	45,93	81,88
	73,75	76,54	57,76	81,87
	75,00	70,70	50,1	85,22
	76,25	76,33	49,63	88,34
	77,50	75,56	48,01	85,54
	78,75	78,15	48,09	86,30
	80,00	77,99	49,68	85,48
	81,25	75,11	51,11	86,43
	82,50	76,01	52,56	85,80
	83,75	75,94	48,47	82,63
	85,00	75,22	48,61	83,23
	86,25	77,76	51,39	86,10
	87,50	76,46	49,24	82,09
	88,75	76,38	48,77	85,41
	90,00	80,67	52,06	80,46
	91,25	79,71	48,78	81,28
	92,50	81,99	51,17	85,70
	93,75	76,07	54,70	84,65
	95,00	80,45	35,00	86,82
	96,25	83,16	50,38	85,22
	97,50	77,63	52,69	92,52
	98,75	83,63	51,21	85,08
	100,00	82,18	49,44	84,60

100-140 m				
ALAT	Duljina, m	TIP 1	TIP 2	TIP 3
Temperatura, °C	101,25	68,60	51,14	72,00
	102,50	76,08	46,06	76,56
	103,75	75,63	46,59	81,51
	105,00	77,54	50,60	78,30
	106,25	78,43	52,42	77,35
	107,50	77,71	49,48	84,85
	108,75	73,75	50,11	81,50
	110,00	71,32	51,50	83,50
	111,25	78,41	48,46	82,54
	112,50	79,11	52,00	86,61
	113,75	73,43	53,06	85,56
	115,00	83,70	49,19	81,37
	116,25	75,38	52,32	83,44
	117,50	80,58	50,07	87,34
	118,75	78,97	52,48	83,72
	120,00	80,40	53,53	84,15
	121,25	78,25	49,42	85,26
	122,50	89,47	50,93	84,39
	123,75	84,74	54,50	88,80
	125,00	82,68	53,72	86,13
	126,25	80,73	52,32	88,00
	127,50	77,14	49,02	84,90
	128,75	84,53	52,29	86,96
	130,00	79,96	55,58	
	131,25	89,09	51,62	
	132,50	84,63	49,65	
	133,75	80,20	56,30	
	135,00	79,28	51,78667	
	136,25	83,975	53,73	
	137,50	91,825	52,14	
	138,75	87,465	51,85333	
	140,00	83,065	55,04	

PRILOG 8: Izmjerene razine zvučnoga tlaka u ovisnosti o duljini obrade, za različite vrste glodala

60-100 m				
TIP 1	Duljina, m	GLODALO 1	GLODALO 2	GLODALO 3
Razina zvučnoga tlaka, dB(A)	61,25	99,58	104,88	100,78
	62,50	99,33	103,86	101,60
	63,75	98,87	104,37	101,37
	65,00	99,78	104,13	102,01
	66,25	99,34	104,63	101,39
	67,50	100,01	104,02	101,32
	68,75	100,38	103,88	101,44
	70,00	99,25	103,56	101,58
	71,25	100,00	104,50	101,42
	72,50	101,01	103,47	101,46
	73,75	100,20	104,11	101,67
	75,00	99,65	103,53	101,86
	76,25	99,84	104,03	101,31
	77,50	100,39	103,10	102,65
	78,75	100,22	103,73	101,60
	80,00	100,60	103,04	102,05
	81,25	99,86	102,61	101,44
	82,50	100,22	102,80	101,51
	83,75	101,04	103,18	101,78
	85,00	99,67	103,38	102,08
	86,25	99,75	103,34	102,32
	87,50	101,89	103,79	102,49
	88,75	103,14	103,95	102,82
	90,00	100,86	104,80	102,28
	91,25	99,84	103,69	102,43
	92,50	101,25	104,28	101,81
	93,75	101,09	103,61	101,61
	95,00	102,95	104,36	102,89
	96,25	101,70	104,85	103,285
	97,50	100,85	104,56	102,9325
	98,75	101,06	103,79	102,0075
	100,00	101,09	105,11	102,5175

100 -140 m				
TIP 1	Duljina, m	GLODALO 1	GLODALO 2	GLODALO 3
Razina zvučnoga tlaka, dB(A)	101,25	99,33	106,73	102,40
	102,50	98,97	105,90	103,08
	103,75	98,70	105,81	102,83
	105,00	98,79	106,40	102,77
	106,25	98,46	107,75	102,40
	107,50	97,93	106,94	102,71
	108,75	98,55	105,85	102,60
	110,00	99,35	105,93	102,53
	111,25	99,73	107,24	101,66
	112,50	100,18	106,37	102,08
	113,75	99,28	106,04	101,04
	115,00	99,29	105,50	102,13
	116,25	99,79	107,25	101,52
	117,50	100,57	107,60	101,66
	118,75	100,55	106,93	102,35
	120,00	100,12	107,33	101,61
	121,25	99,14	107,09	101,76
	122,50	98,94		102,72
	123,75	100,19		103,04
	125,00	100,79		103,66
	126,25	100,79		102,65
	127,50	100,74		102,19
	128,75	101,46		102,21
	130,00	101,70		103,12
	131,25	101,34		102,07
	132,50	100,55		102,16
	133,75	101,32		103,22
	135,00	101,22		103,06
	136,25	100,99		103,42
	137,50	100,87		102,78
	138,75	101,67		102,07
	140,00	101,40		102,57

60-100 m				
TIP 2	Duljina, m	GLODALO 1	GLODALO 2	GLODALO 3
Razina zvučnoga tlaka, dB(A)	61,25	95,86	95,92	95,2
	62,50	97,66	96,71	97,41
	63,75	97,45	96,86	97,33
	65,00	97,57	97,68	97,31
	66,25	97,67	97,28	97,42
	67,50	98,47	97,57	97,45
	68,75	98,92	96,06	97,75
	70,00	98,66	96,76	97,76
	71,25	98,61	96,29	96,63
	72,50	99,08	95,26	95,12
	73,75	99,50	96,44	96,32
	75,00	99,44	97,13	96,67
	76,25	100,51	97,35	97,06
	77,50	100,24	98,67	97,44
	78,75	99,61	98,35	97,28
	80,00	100,05	97,85	97,48
	81,25	99,20	96,94	97,56
	82,50	99,19	98,12	97,39
	83,75	99,80	98,08	97,0
	85,00	99,25	98,11	97,84
	86,25	99,16	97,86	96,72
	87,50	100,06	98,21	96,08
	88,75	100,43	99,37	96,32
	90,00	101,46	96,99	97,31
	91,25	101,99	97,93	97,53
	92,50	102,27	98,17	98,30
	93,75	100,04	96,57	97,40
	95,00	99,00	96,87	96,23
	96,25	99,97	96,91	97,98
	97,50	100,23	97,40	97,68
	98,75	100,18	98,34	98,09
	100,00	100,40	99,58	99,30

100 -140 m				
TIP 2	Duljina, m	GLODALO 1	GLODALO 2	GLODALO 3
Razina zvučnoga tlaka, dB(A)	101,25	96,23	96,12	95,25
	102,50	98,24	96,39	96,06
	103,75	97,09	96,68	96,81
	105,00	97,78	95,85	96,8
	106,25	97,65	96,52	97,01
	107,50	97,06	96,03	97,08
	108,75	96,85	96,47	96,67
	110,00	98,76	95,30	96,24
	111,25	95,88	96,81	94,56
	112,50	97,98	97,94	97,30
	113,75	98,28	95,28	96,56
	115,00	98,02	97,26	96,94
	116,25	98,11	96,88	97,25
	117,50	99,26	95,81	96,92
	118,75	98,97	96,36	96,45
	120,00	97,33	96,11	98,51
	121,25	97,13	95,30	98,07
	122,50	97,53	96,54	97,17
	123,75	97,35	96,41	97,27
	125,00	98,47	95,59	97,54
	126,25	97,63	97,05	97,13
	127,50	97,51	97,75	98,97
	128,75	98,97	98,53	98,48
	130,00	99,62	98,21	98,15
	131,25	99,03	96,01	98,03
	132,50	98,05	98,45	98,35
	133,75	98,26	98,10	98,14
	135,00	97,10	94,06	97,40
	136,25	97,53	96,10	97,14
	137,50	97,95	98,91	96,87
	138,75	98,67	97,52	
	140,00	96,98	98,54	

60-100 m				
TIP 3	Duljina, m	GLODALO 1	GLODALO 2	GLODALO 3
Razina zvučnoga tlaka, dB(A)	61,25	97,51	101,82	103,09
	62,50	99,19	102,27	102,69
	63,75	99,93	102,46	102,76
	65,00	100,13	102,85	101,34
	66,25	100,70	102,79	100,91
	67,50	100,84	103,16	99,61
	68,75	100,80	103,33	98,17
	70,00	101,04	103,12	97,89
	71,25	101,01	103,24	
	72,50	100,78	103,31	
	73,75	101,08	103,53	
	75,00	101,03	103,14	
	76,25	101,16	103,50	
	77,50	101,65	103,33	
	78,75	101,33	103,20	
	80,00	101,99	103,04	
	81,25	101,48	103,51	
	82,50	101,40	103,84	
	83,75	101,42	103,55	
	85,00	101,81	102,53	
	86,25	101,67	101,03	
	87,50	101,73	100,15	
	88,75	102,13	101,30	
	90,00	102,43	101,04	
	91,25	102,36		
	92,50	101,81		
	93,75	102,36		
	95,00	101,77		
	96,25	102,34		
	97,50	102,02		
	98,75	102,30		
	100,00	102,10		

100 -140 m				
TIP 3	Duljina, m	GLODALO 1	GLODALO 2	GLODALO 3
Razina zvučnoga tlaka, dB(A)	61,25	97,51	101,82	103,09
	62,50	99,19	102,27	102,69
	63,75	99,93	102,46	102,76
	65,00	100,13	102,85	101,34
	66,25	100,70	102,79	100,91
	67,50	100,84	103,16	99,61
	68,75	100,80	103,33	98,17
	70,00	101,04	103,12	97,89
	71,25	101,01	103,24	
	72,50	100,78	103,31	
	73,75	101,08	103,53	
	75,00	101,03	103,14	
	76,25	101,16	103,50	
	77,50	101,65	103,33	
	78,75	101,33	103,20	
	80,00	101,99	103,04	
	81,25	101,48	103,51	
	82,50	101,40	103,84	
	83,75	101,42	103,55	
	85,00	101,81	102,53	
	86,25	101,67	101,03	
	87,50	101,73	100,15	
	88,75	102,13	101,30	
	90,00	102,43	101,04	
	91,25	102,36		
	92,50	101,81		
	93,75	102,36		
	95,00	101,77		
	96,25	102,34		
	97,50	102,02		
	98,75	102,30		
	100,00	102,10		

PRILOG 9: Izmjerene vrijednosti polumjera zaobljenosti oštrice nakon duljine obrade od 100 i 140 m

	TIP 1																				Duljina, m
	Polumjer zaobljenosti oštrice, μm																				
Alat 1	15,65	13,28	16,60	16,69	16,07	15,62	22,67	17,03	18,51	21,48	23,72	12,47	18,62	14,36	15,05	14,39	22,08	18,14	16,60	18,39	100
Alat 2	19,02	15,35	15,06	21,31	16,91	16,50	17,51	17,13	19,74	19,07	19,09	17,61	17,27	20,60	24,50	17,01	17,47	23,55	17,19	25,13	
Alat 3	18,27	19,69	16,59	16,89	17,19	17,97	20,59	16,25	22,09	17,25	19,79	17,29	19,01	19,93	18,71	22,15	20,24	19,34	19,41	20,03	
Alat 1	15,45	16,68	14,49	15,14	16,70	19,44	15,34	22,06	15,07	16,49	21,39	16,30	19,52	18,77	26,33	26,25	23,96	22,88	17,44	22,00	140
Alat 2	21,17	20,64	19,69	20,46	23,07	20,18	23,58	24,15	23,77	21,60	22,13	19,71	23,38	20,97	19,49	18,62	18,89	19,24	17,03	20,80	
Alat 3	23,35	20,95	24,14	19,27	22,15	21,35	21,77	20,47	22,06	20,83	26,04	21,69	19,11	20,39	28,84	28,90	18,23	19,92	18,62	21,00	
	TIP 2																				Duljina, m
	Polumjer zaobljenosti oštrice, μm																				
Alat 1	16,22	22,33	17,81	15,38	17,58	16,77	18,88	17,99	19,01	18,18	18,35	22,52	20,58	21,32	17,06	19,32	17,95	21,73	19,84	20,00	100
Alat 2	18,15	19,37	22,22	17,79	19,08	20,07	18,61	21,86	21,94	23,03	18,15	19,37	22,22	17,79	19,08	20,07	18,61	21,86	21,94	23,03	
Alat 3	17,28	14,00	14,68	15,88	18,85	14,49	16,26	16,97	14,09	15,48	14,68	14,49	16,26	16,96	14,09	18,27	16,49	14,96	15,48	15,31	
Alat 1	23,44	21,84	24,78	20,78	20,30	22,86	20,88	20,14	22,96	22,00	21,20	22,10	23,52	21,77	23,71	25,01	23,30	22,76	20,73	22,76	140
Alat 2	26,99	22,90	27,15	27,37	27,96	23,31	27,25	26,57	20,48	22,00	26,00	27,25	22,29	23,67	24,45	21,62	22,29	25,03	21,36	20,92	
Alat 3	18,72	15,54	17,05	18,95	19,83	17,61	16,22	17,05	18,95	19,83	18,71	21,32	18,77	18,66	18,71	19,81	21,53	20,32	18,92	19,03	
	TIP 3																				Duljina, m
	Polumjer zaobljenosti oštrice, μm																				
Alat 1	17,70	15,13	16,27	16,28	15,56	17,94	16,12	18,41	16,22	16,68	15,47	16,08	16,04	16,20	17,60	17,28	18,53	16,43	17,31	17,47	100
Alat 2	19,40	20,41	20,20	21,97	21,80	17,04	19,40	19,41	22,43	24,43	24,78	15,74	21,60	21,22	17,87	19,93	22,16	17,21	20,31	20,84	
Alat 3	16,3	17,05	19,5	16,51	16,5	17,45	16,633	15,25	15,46	17,05	15,39	15,96	14,8	17,67	14,2	18,71	17,72	19,35	18,85	14,25	
Alat 1	21,13	21,25	20,77	19,84	18,15	18,78	21,34	19,81	19,92	18,98	21,47	22,50	20,77	18,02	19,34	23,97	21,66	18,36			140
Alat 2	SLOMLJEN ALAT																				
Alat 3	SLOMLJEN ALAT																				

PRILOG 10: Ocjena kvalitete obrađene površine

TIP 1- Glodalo 1					
Broj uzorka	Promjena boje 1	Promjena boje 2	Valovitost	Pojava pukotina	Nepresječena drvena vlakna
1.	4	4	5	5	5
2.	4	4	5	5	5
3.	4	4	5	5	5
4.	4	4	5	5	4
5.	4	4	5	5	4
6.	4	4	5	5	5
7.	4	3	5	5	5
8.	4	3	5	5	5
9.	3	3	5	5	4
10.	3	3	5	5	4
11.	3	3	5	5	4
12.	3	3	5	5	4
13.	3	3	5	5	4
14.	3	3	5	5	4
15.	3	3	5	5	4
16.	3	3	5	5	4
17.	3	3	5	5	4
18.	3	3	5	5	4
19.	3	3	5	5	4
20.	3	3	5	5	4
21.	3	3	5	5	4
22.	3	3	5	5	4
23.	3	3	5	5	4
24.	3	3	5	5	4
25.	3	3	5	5	4
26.	3	3	5	5	4
27.	3	3	5	5	4
28.	3	3	5	5	4
29.	3	3	5	5	4
30.	3	3	5	5	4
31.	3	3	5	5	4
32.	3	3	5	5	4
33.	3	3	5	5	4
34.	3	3	5	5	4
35.	3	3	5	5	4
36.	3	3	5	5	4
37.	3	3	5	5	4
38.	3	3	5	5	4

39.	3	3	5	5	4
40.	3	4	5	5	4
41.	3	2	5	5	4
42.	3	2	5	5	4
43.	3	2	5	5	4
44.	3	2	5	5	4
45.	3	2	5	5	4
46.	3	2	5	5	4
47.	2	2	5	5	4
48.	2	2	5	5	4
49.	2	2	5	5	4
50.	2	2	5	5	4
51.	2	2	5	5	4
52.	2	2	5	5	4
53.	2	1	5	5	4
54.	2	1	5	5	4
55.	2	1	5	5	4
56.	2	1	5	5	4
57.	2	1	5	5	4
58.	2	1	5	5	4
59.	2	1	5	5	4
60.	2	1	5	5	4
61.	2	1	5	5	4
62.	2	1	5	5	4
63.	2	1	5	5	4
64.	2	1	5	5	4

TIP 1- Glodalo 2					
Broj uzorka	Promjena boje 1	Promjena boje 2	Valovitost	Pojava pukotina	Nepresječena drvena vlakna
1.	4	5	5	5	4
2.	4	5	5	5	4
3.	4	5	5	5	4
4.	4	5	5	5	4
5.	4	5	5	5	4
6.	4	5	5	5	4
7.	4	5	5	5	4
8.	4	5	5	5	4
9.	4	5	5	5	4
10.	4	5	5	5	4

11.	4	5	5	5	4
12.	4	5	5	5	4
13.	4	5	5	5	4
14.	4	5	5	5	4
15.	4	5	5	5	4
16.	4	4	5	5	4
17.	4	4	5	5	4
18.	4	4	5	5	4
19.	4	4	5	5	4
20.	4	4	5	5	4
21.	4	4	5	5	4
22.	4	4	5	5	4
23.	4	4	5	5	4
24.	4	4	5	5	4
25.	4	4	5	5	4
26.	4	4	5	5	4
27.	4	4	5	5	4
28.	4	4	5	5	4
29.	4	4	5	5	4
30.	4	4	5	5	4
31.	4	4	5	5	4
32.	4	4	5	5	4
33.	4	4	5	5	5
34.	4	4	5	5	5
35.	4	4	4	5	3
36.	4	4	4	5	3
37.	4	4	4	5	3
38.	4	4	4	5	3
39.	4	4	4	5	3
40.	4	4	4	5	3
41.	4	4	4	5	3
42.	4	4	4	5	3
43.	4	4	4	5	3
44.	4	4	4	5	3
45.	4	4	4	5	3
46.	4	4	4	5	3
47.	4	4	4	5	3
48.	4	4	4	5	3
49.	4	4	4	5	3
50.	4	4	4	5	3

TIP 1- Glodalo 3					
Broj uzorka	Promjena boje 1	Promjena boje 2	Valovitost	Pojava pukotina	Nepresječena drvena vlakna
1.	4	3	5	5	4
2.	4	3	5	5	4
3.	4	3	5	5	4
4.	4	3	5	5	4
5.	4	3	5	5	4
6.	4	3	5	5	4
7.	4	3	5	5	4
8.	4	3	5	5	4
9.	4	3	5	5	4
10.	4	3	5	5	4
11.	4	3	5	5	4
12.	4	3	5	5	4
13.	3	3	5	5	4
14.	3	3	5	5	4
15.	3	3	5	5	4
16.	3	3	5	5	4
17.	3	3	5	5	4
18.	3	3	5	5	4
19.	3	3	5	5	4
20.	3	3	5	5	4
21.	3	3	5	5	4
22.	2	2	5	5	4
23.	2	2	5	5	4
24.	2	2	5	5	4
25.	2	2	5	5	4
26.	2	2	5	5	4
27.	2	2	5	5	4
28.	2	2	5	5	4
29.	2	2	5	5	4
30.	2	2	5	5	4
31.	2	2	5	5	4
32.	2	2	5	5	4
33.	2	2	5	5	4
34.	2	2	5	5	4
35.	2	2	5	5	4
36.	2	2	5	5	4
37.	2	2	5	5	4
38.	2	2	5	5	4
39.	2	2	5	5	4

40.	2	2	5	5	4
41.	2	2	5	5	4
42.	2	2	5	5	4
43.	2	2	5	5	4
44.	2	2	5	5	4
45.	2	2	5	5	4
46.	2	2	5	5	4
47.	2	2	5	5	4
48.	2	2	5	5	4
49.	2	2	5	5	4
50.	2	2	5	5	3
51.	2	2	5	5	3
52.	2	2	5	5	3
53.	2	2	5	5	3
54.	2	2	5	5	3
55.	2	2	5	5	3
56.	2	2	5	5	3
57.	2	2	5	5	3
58.	2	2	5	5	3
59.	2	2	5	5	3
60.	2	2	5	5	3
61.	2	2	5	5	3
62.	2	2	5	5	3
63.	2	2	5	5	3
64.	2	2	5	5	3

TIP 2 - Glodalo 1					
Broj uzorka	Promjena boje 1	Promjena boje 2	Valovitost	Pojava pukotina	Nepresječena drvena vlakna
1	5	5	5	5	4
2	5	5	5	5	4
3	3	4	5	5	3
4	3	4	5	5	3
5	3	4	5	5	4
6	3	4	5	5	3
7	3	4	5	5	3
8	3	4	4	5	3
9	3	4	4	5	3
10	3	4	4	5	3
11	3	4	4	5	3
12	3	4	4	5	3
13	3	4	4	5	3
14	4	4	4	5	3
15	4	4	4	5	3
16	4	4	4	5	3
17	4	4	4	5	4
18	4	4	4	5	3
19	4	4	4	5	4
20	4	4	4	5	4
21	4	4	4	5	4
22	4	4	4	5	4
23	4	4	4	5	4
24	4	4	4	5	4
25	4	4	4	5	3
26	4	4	4	5	3
27	4	4	4	5	3
28	4	4	4	5	3
29	4	4	4	5	3
30	4	4	4	5	3
31	4	4	4	5	3
32	4	4	4	5	3
33	5	5	5	5	4
34	5	5	5	5	4
35	5	5	5	5	4
36	5	5	5	5	3
37	5	4	5	5	4
38	5	4	5	5	3

39	5	4	5	5	4
40	5	4	5	5	3
41	4	4	5	5	4
42	4	4	5	5	3
43	4	4	5	5	3
44	4	4	5	5	3
45	4	4	5	5	3
46	4	4	5	5	3
47	4	4	5	5	3
48	4	4	5	5	3
49	4	4	5	5	3
50	4	4	5	5	3
51	4	4	5	5	3
52	4	4	5	5	3
53	4	4	5	5	3
54	4	4	5	5	3
55	4	4	5	5	3
56	4	4	5	5	3
57	4	4	5	5	3
58	4	4	5	5	3
59	4	4	5	5	3
60	4	4	5	5	3
61	4	4	5	5	4
62	4	4	5	5	4
63	4	4	5	5	4
64	4	4	5	5	4

TIP 2- Glodalo 2					
Broj uzorka	Promjena boje 1	Promjena boje 2	Valovitost	Pojava pukotina	Nepresječena drvena vlakna
1	5	5	5	4	4
2	5	5	5	4	4
3	5	5	5	5	4
4	5	5	5	5	4
5	5	5	5	5	4
6	5	5	5	5	4
7	5	5	5	5	4
8	5	5	5	5	4
9	5	5	5	4	4
10	4	5	5	4	4
11	4	5	5	5	4
12	4	5	5	5	4

13	4	5	5	4	4
14	4	5	5	4	4
15	4	5	5	4	4
16	4	5	5	5	4
17	4	5	5	4	4
18	4	5	5	4	4
19	4	5	5	5	3
20	4	5	5	5	3
21	4	4	5	5	4
22	4	4	5	4	4
23	4	4	5	5	3
24	4	4	5	5	4
25	4	4	5	4	4
26	4	4	5	4	4
27	4	4	5	4	4
28	4	4	5	4	4
29	4	4	5	4	4
30	4	4	4	4	4
31	4	4	4	4	4
32	4	4	4	4	4
33	4	4	4	4	3
34	4	4	4	4	3
35	4	4	4	4	3
36	4	4	4	4	3
37	4	4	4	5	3
38	4	4	4	5	4
39	4	4	4	5	4
40	4	4	4	5	4
41	4	4	4	5	4
42	4	4	4	5	4
43	4	4	5	5	4
44	4	4	4	5	4
45	4	4	4	5	3
46	4	4	4	5	3
47	4	4	4	5	3
48	4	4	4	5	3
49	4	4	4	5	3
50	4	4	4	5	3
51	4	4	4	5	4
52	4	4	4	5	3
53	4	4	4	5	3
54	4	4	4	5	3
55	4	4	4	5	3

56	4	4	4	5	4
57	4	4	4	5	4
58	4	4	4	5	4
59	4	4	4	5	4
60	4	4	4	5	4
61	4	4	4	5	4
62	4	4	4	5	3
63	4	4	4	4	3
64	4	4	4	5	3

TIP 2- Glodalo 3					
Broj uzorka	Promjena boje 1	Promjena boje 2	Valovitost	Pojava pukotina	Nepresječena drvena vlakna
1	4	5	4	5	4
2	4	5	5	5	4
3	4	5	4	5	4
4	4	5	5	5	4
5	4	5	5	5	4
6	4	5	5	5	4
7	4	5	5	5	4
8	4	5	5	5	4
9	4	5	5	5	4
10	4	5	5	5	4
11	4	5	5	5	4
12	4	5	4	5	4
13	4	5	4	5	4
14	4	5	4	5	4
15	4	5	4	5	4
16	4	5	4	5	4
17	4	5	4	5	4
18	4	5	4	5	4
19	4	5	4	5	3
20	4	4	4	5	3
21	4	4	4	5	4
22	4	4	4	5	3
23	4	4	4	5	3
24	4	4	4	5	3
25	4	4	5	5	4
26	4	4	4	5	3
27	4	4	4	5	3
28	4	4	4	5	3
29	4	4	4	5	4

30	4	4	4	5	4
31	4	4	4	5	4
32	4	4	4	5	4
33	4	4	5	5	3
34	5	4	4	5	4
35	4	4	5	5	4
36	4	4	5	5	4
37	4	4	5	5	3
38	4	4	5	5	3
39	4	4	5	5	3
40	4	4	5	5	3
41	4	4	5	5	3
42	4	4	5	5	3
43	4	4	5	5	3
44	4	4	5	5	3
45	4	4	5	5	3
46	4	4	5	5	3
47	4	4	5	5	3
48	4	4	5	5	3
49	4	4	5	5	3
50	4	4	5	5	3
51	4	4	5	5	3
52	4	4	5	5	3
53	4	4	5	5	3
54	4	4	5	5	3
55	4	4	5	5	3
56	4	4	5	5	3
57	4	4	5	5	3
58	4	4	5	5	3
59	4	4	5	5	3
60	4	4	5	5	3
61	4	4	5	5	3
62	4	4	5	5	3
63	4	4	5	5	3
64	4	4	5	5	3

TIP 3- Glodalo 1					
Broj uzorka	Promjena boje 1	Promjena boje 2	Valovitost	Pojava pukotina	Nepresječena drvena vlakna
1.	5	5	5	5	5
2.	5	5	2	5	5
3.	5	5	2	4	4
4.	5	5	2	5	4
5.	5	5	2	5	4
6.	5	5	2	5	4
7.	5	5	2	3	4
8.	5	5	2	3	4
9.	5	4	2	3	4
10.	5	5	2	3	4
11.	5	5	2	3	4
12.	5	5	2	3	4
13.	5	4	2	4	4
14.	5	4	2	4	4
15.	5	4	2	4	4
16.	5	4	2	3	4
17.	5	4	2	3	4
18.	5	4	2	3	4
19.	5	4	2	2	4
20.	5	4	2	3	4
21.	5	4	2	3	4
22.	5	4	2	3	4
23.	5	4	2	3	4
24.	5	4	2	3	4
25.	5	4	2	3	4
26.	5	4	2	3	4
27.	5	4	2	3	4
28.	5	4	2	3	4
29.	5	4	2	3	4
30.	5	4	2	3	4
31.	5	4	2	3	4
32.	5	4	2	3	4
33.	5	4	1	1	1
34.	5	4	1	1	2
35.	5	4	1	1	2
36.	5	4	1	2	2

37.	5	4	1	2	2
38.	5	4	1	2	2
39.	5	4	1	2	2
40.	5	4	1	2	2
41.	5	4	1	2	2
42.	5	4	1	2	2
43.	5	4	1	2	2
44.	5	4	1	2	2
45.	5	4	1	2	2
46.	5	4	1	2	2
47.	5	4	1	2	2
48.	5	4	1	2	2
49.	5	4	2	2	2
50.	5	4	1	2	2
51.	5	4	2	2	2
52.	5	4	1	2	2
53.	5	4	1	2	2
54.	5	4	1	2	2
55.	5	4	1	2	2
56.	5	4	1	2	2
57.	5	4	1	2	2
58.	5	4	2	2	2
59.	5	4	2	2	3
60.	4	4	1	2	3
61.	5	4	1	2	3
62.	5	4	1	2	3
63.	5	4	2	2	3
64.	5	4	2	2	3

TIP 3- Glodalo 2					
Broj uzorka	Promjena boje 1	Promjena boje 2	Valovitost	Pojava pukotina	Nepresječena drvena vlakna
1.	5	5	1	5	5
2.	5	5	1	5	5
3.	5	5	1	5	4
4.	5	5	1	5	4
5.	5	5	1	5	4
6.	5	5	1	5	4
7.	5	5	1	5	4
8.	5	5	1	5	4
9.	5	5	1	5	4
10.	5	5	1	5	4

11.	5	5	1	5	4
12.	5	5	1	5	4
13.	5	5	1	5	4
14.	5	5	1	5	4
15.	5	5	1	5	4
16.	5	5	1	5	4
17.	5	5	1	5	3
18.	5	5	1	5	3
19.	5	5	1	5	3
20.	5	5	1	5	3
21.	5	5	1	5	3

TIP 3- Glodalo 3					
Broj uzorka	Promjena boje 1	Promjena boje 2	Valovitost	Pojava pukotina	Nepresječena drvena vlakna
1.	5	5	2	3	5
2.	5	5	2	3	5
3.	5	5	2	3	5
4.	5	5	2	3	5
5.	5	5	2	3	5
6.	5	5	1	4	4
7.	5	5	2	4	3
8.	5	5	1	3	3