

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

ШУМАРСКИ ФАКУЛТЕТ

Марија Д. Мандић

**АНАЛИЗА ОБРАДЉИВОСТИ
ХРАСТОВИНЕ ПРИ ОБИМНОМ
ГЛОДАЊУ**

докторска дисертација

Београд, 2014

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF FORESTRY

Marija D. Mandić

**AN ANALYSIS OF PERIPHERAL MILLING
MACHINABILITY OF OAK WOOD**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2014.

Ментор:

др **Градимиr Данон**, редовни професор
Универзитет у Београду Шумарски факултет

Чланови комисије:

др **Здравко Поповић**, редовни професор
Универзитет у Београду Шумарски факултет

др **Љубодраг Тановић**, редовни професор
Универзитет у Београду Машински факултет

др **Драган Милутиновић**, редовни професор
Универзитет у Београду Шумарски факултет

др **Владислав Здравковић**, ванредни професор
Универзитет у Београду Шумарски факултет

ИЗЈАВЕ ЗАХВАЛНОСТИ

Неизмерну захвалност дугујем свом ментору професору др **Градимиру Данону** који је увек веровао у мене. Хвала на несебичној помоћи, на поверењу, на инспиративним разговорима, на стрпљењу и непрестаној подршци у току израде ове докторске дисертације. Хвала на храбрењу, а често и критиковању зарад мог напретка.

Велику захвалност за сугестије и стручну помоћ упућујем свим члановима Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације, професору др Здравку Поповићу, професору др Љубодрагу Тановићу, професору др Драгану Милутиновићу и професору др Владиславу Здравковићу.

Посебно се захваљујем драгим колегама Горану Милутиновићу и Горану Младеновићу за подршку и помоћ у реализацији експерименталног дела ове докторске дисертације.

Хвала породици Кантар на техничкој и моралној подршци коју су ми пружали током израде дисертације.

Хвала драгим колегиницама др Мири Мирић Милосављевић и др Владислави Михаиловић на сугестијама при обради и уређењу текста дисертације.

На корисним саветима током различитих фаза израде докторске дисертације, захваљујем се колегама др Срђану Сврзићу, Младену Фуртули и Борису Радићу.

Хвала драгим пријатељима Милану Миодраговићу и Слађани Скакић на пријатељству и помоћи кад је била потребна.

Желим да захвалим својој мајци Цвети, оцу Драгану, сестри Јелени и брату Милојку за несебичну подршку, љубав и вечиту инспирацију у животу.

Хвала Душану јер је разумео.

Уз велику захвалност овај рад посвећујем својим родитељима

КЉУЧНЕ ДОКУМЕНТАЦИОНЕ ИНФОРМАЦИЈЕ

Редни број (РБ):	
Идентификациони број (ИБР):	
Тип документације (ТД):	Монографска публикација
Тип записа (ТЗ):	Текстуални штампани документ
Врста рада (ВР):	Докторска дисертација
Аутор (АУ):	Марија Мандић, дипл.инж. шумарства за прераду дрвета
Ментор (МН):	др Градимир Данон, редовни професор Универзитет у Београду Шумарски факултет
Наслов рада (НР):	Анализа обрадљивости хростовине при обимном глодању
Језик публикације (ЈЗ):	Српски / ћирилица
Земља публикације (ЗП):	Србија
Географско подручје (УГП):	Србија
Година (ГО):	2014
Издавач (ИЗ):	Ауторски репринт
Место и адреса (МА):	11 030 Београд, Кнеза Вишеслава 1
Физички опис рада:	8 поглавља, 219 страница, 82 литературна навода, 105 илустрација, 49 табела
Научна област (НО):	Биотехничке науке
Научна дисциплина (DIS):	Машине и уређаји у преради дрвета
Предметна одредница / кључне речи (ПО)	обрадљивост, квалитет обрађене површине, снага и силе резања, хростово дрво, обрада глодањем
УДК:	630*812.8:674.055:621.9.01(043.3)
Чува се (ЧУ):	Библиотека Шумарског факултета, Кнеза Вишеслава 1, 11030 Београд, Србија
Важна напомена (ВН):	Нема
Извод (ИЗ):	Основни циљ истраживања је био успостављање методологије за одређивање обрадљивости различитих врста дрвећа. Критеријуми, на основу којих је оцењена обрадљивост дрвета, су снага резања, силе резања и квалитет обрађене површине (храпавост и валовитост). Развијени математички модел се користи за одређивање зависности параметара снаге и сила резања, као и квалитета обрађене површине у функцији од режима резања и геометрије алата. Предложени модел се показао као адекватан и са довољном тачношћу описује зависности испитиваних критеријума обрадљивости од изабраних утицајних фактора при усвојеним условима испитивања.
Датум прихватања теме од стране НН:	18.07.2012.
Датум одбране (ДО):	
Чланови комисије (КО):	др Градимир Данон, редовни професор Универзитет у Београду Шумарски факултет др Здравко Поповић, редовни професор Универзитет у Београду Шумарски факултет др Љубодраг Тановић, редовни професор Универзитет у Београду Машински факултет др Драган Милутиновић, редовни професор Универзитет у Београду Машински факултет др Владислав Здравковић, ванредни професор Универзитет у Београду Шумарски факултет

АНАЛИЗА ОБРАДЉИВОСТИ ХРАСТОВИНЕ ПРИ ОБИМНОМ ГЛОДАЊУ

Резиме

Истраживања, спроведена у оквиру докторске дисертације, односе се на домен унапређивања познавања карактеристика и функција обрадљивости храста лужњака (*Quercus robur*) при обимном глодању. Основни циљ истраживања је био успостављање методологије за одређивање обрадљивости различитих врста дрвећа.

Елементи обраде глодањем који су разматрани у дисертацији су брзина помоћног кретања и дубина резања. Испитивања су спроведена за различите геометрије алата. Критеријуми, на основу којих је оцењена обрадљивост дрвета, су снага резања, силе резања и квалитет обрађене површине (храпавост и валовитост).

Истраживања су била фокусирана на развој поузданог аналитичког и симулационог модела за анализу и предикцију снаге и сила резање, као и квалитета обрађене површине при уздужном глодању, а на основу хипотезе да ће различити технолошки параметри обраде узроковати и различиту потребну енергију за резање, као и различит квалитет обрађене површине при истој брзини резања.

За математичко моделирање, при испитивању критеријума обрадљивости, коришћен је метод тоталних ортогоналних експерименталних планова. Развијени математички модел се користи за одређивање зависности параметара снаге и сила резања, као и квалитета обрађене површине у функцији од режима резања и геометрије алата. Предложени модел се показао као адекватан и са довољном тачношћу описује зависности испитиваних критеријума обрадљивости од изабраних утицајних фактора при усвојеним условима испитивања. Модел се може применити у пракси на одговарајући реални процес обраде обимним глодањем и за подручје варираних улазних фактора.

Кључне речи: обрадљивост, квалитет обрађене површине, снага и силе резања, храстово дрво, обрада глодањем.

KEY WORD DOCUMENTATION

Accession number (ANO):	
Identification number (INO):	
Document type (DT):	Monograph documentation
Type of record (TR):	Textual printed document
Contains code (CC):	Doctoral dissertation
Author (AU):	Marija Mandić, graduate engineer
Menthor (MN):	PhD Gradimir Danon, full professor University of Belgrade Faculty of Forestry
Title (TI):	An analysis of peripheral milling machinability of oak wood
Language of text (LT):	Serbian/ Cyrillic alphabet
Country of publication (CP):	Serbia
Locality of publication (LP):	Belgrade
Publication year (PY):	2014
Publisher (PU):	The authors reprint
Publication place (PP):	11 030 Belgrade, Kneza Višeslava 1
Physical description (PD):	8 chapters, 219 pages, 82 references, 105 illustrations, 49 tables
Scientific field (SF):	Biotechnological sciences
Scientific discipline (SD):	Machines and apparatus in wood processing
Subject/Key words (CX):	machinability, surface quality, cutting power and cutting forces, oak wood, milling
UC:	630*812.8:674.055:621.9.01(043.3)
Holding Data (HD):	Library of Faculty of Forestry, Kneza Višeslava 1, 11030Belgrade
Note (N):	None
Abstract (AB):	The main aim of this research was to establish a methodology for determining the machinability of various tree species. The criteria for the assessment of the machinability of wood are cutting power, cutting forces and the quality of the processed surface (its roughness and waviness). The developed mathematical model was used for determining the dependence of the parameters of cutting power, cutting forces and quality of the processed surface on the cutting regime and tool geometry. The proposed model proved to be adequate, as it describes the dependence of the examined machinability criteria on the selected impact factors with sufficient accuracy under the experimental conditions adopted in this research.
Accepted by Scientific Board on (ACB):	18.07.2012.
Defended on (DE):	
Thesis Defend Board (DB):	PhD Gradimir Danon, full professor University of Belgrade Faculty of Forestry PhD Zdravko Popović, full professor University of Belgrade Faculty of Forestry PhD Ljubodrag Tanović, full professor University of Belgrade Faculty of Mechanical Engineering PhD Dragan Milutinović, full professor University of Belgrade Faculty of Mechanical Engineering PhD Vladislav Zdravković, associate professor University of Belgrade Faculty of Forestry

AN ANALYSIS OF PERIPHERAL MILLING MACHINABILITY OF OAK WOOD

Abstract

The research of this doctoral dissertation was conducted in the domain of improvement of the knowledge on the properties and functions characterizing the machinability of common oak (*Quercus robur*) wood during peripheral milling. The main aim of this research was to establish a methodology for determining the machinability of various tree species.

The elements of milling considered in this thesis are feed rate and cutting depth. The investigations were carried out for a variety of tool geometries. The criteria for the assessment of the machinability of wood are cutting power, cutting forces and the quality of the processed surface (its roughness and waviness).

The research focused on the development of a reliable analytical and simulation model for the analysis and prediction of the cutting power and cutting forces of longitudinal milling, as well as the quality of a surface processed by that machining operation. The basic hypothesis was that different technological parameters of processing result in different amounts of energy needed for cutting, as well as different surface qualities at the same cutting speed.

The method of total orthogonal experimental plans was used as the mathematical model for the investigation of the machinability criteria. The developed mathematical model was used for determining the dependence of the parameters of cutting power, cutting forces and quality of the processed surface on the cutting regime and tool geometry. The proposed model proved to be adequate, as it describes the dependence of the examined machinability criteria on the selected impact factors with sufficient accuracy under the experimental conditions adopted in this research. In practice, this model can be applied to a corresponding real-world process of peripheral milling processing, as well as for varied input factors.

Key words: machinability, surface quality, cutting power and cutting forces, oak wood, milling.

САДРЖАЈ

СПИСАК СЛИКА	IV
СПИСАК ТАБЕЛА	X
СПИСАК КОРИШЋЕНИХ ОЗНАКА	XIII
1 УВОД	1
2 ПРЕДМЕТ И ЦИЉ РАДА	4
2.1 Циљ истраживања и очекивани резултати.....	5
2.1.1 Очекивани научни резултати.....	6
2.1.2 Очекивани стручни резултати.....	6
2.2 Хипотезе.....	7
3 ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ	9
3.1 Структура дрвета.....	9
3.1.1 Формирање дрвета.....	9
3.1.2 Макроскопска грађа дрвета.....	10
3.1.3 Микроскопска грађа дрвета.....	14
3.1.4 Субмикроскопска грађа дрвета.....	14
3.1.5 Својства дрвета значајна за механичку обраду.....	16
3.2 Механичка обрада дрвета.....	20
3.2.1 Основи теорије резања.....	22
3.2.1.1 Основни видови резања.....	25
3.2.1.2 Формирање струготине при резању.....	27
3.2.1.3 Силе резања при праволинијском резању.....	32
3.2.1.4 Силе на грудној површини.....	34
3.2.1.5 Силе на резном сечиву.....	35
3.2.1.6 Силе на леђној површини.....	36
3.2.1.7 Укупна сила на резном клину алата.....	37
3.2.2 Теорија сложеног резања.....	38
3.2.2.1 Параметри процеса сложеног резања – обрада глодањем.....	39
3.2.2.2 Кинематика глодања.....	39
3.2.2.3 Силе резања при обради глодањем.....	44
3.2.2.4 Фактори који утичу на силу резања при обради глодањем.....	46
3.3 Квалитет површине.....	57

3.3.1	Основни појмови геометрије површине техничких тела.....	57
3.3.2	Храпавост површине	58
3.3.3	Критеријуми квалитета при обимном глодању	62
3.4	Досадашња истраживања.....	67
3.4.1	Модели за предикцију сила резања	67
3.4.2	Истраживања обрадљивости дрвета	73
3.4.3	Истраживања храпавости обрађене површине	75
4	МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА	78
4.1	Основне карактеристике дрвета	80
4.2	Избор и припрема узорака	81
4.3	Карактеризација материјала за истраживање	84
4.3.1	Одређивање физичких својстава узорака.....	84
4.3.2	Одређивање механичких својстава узорака.....	84
4.4	Експериментална истраживања обрадљивости	85
4.4.1	Вишефакторни ортогонални планови.....	86
4.4.2	Поставка математичког модела.....	95
4.4.3	Избор варијабли - фактора обраде	99
4.4.4	Обрадни систем.....	101
4.4.5	Експериментална мерења	103
4.4.5.1	Мерење снага резања.....	103
4.4.5.2	Мерење сила резања	106
4.4.5.3	Мерење храпавости површине	109
4.4.5.4	Мерење валовитости површине	111
4.5	Статистичка анализа параметара модела	112
4.5.1	Оцена сигнификантности параметара модела	112
4.5.2	Провера адекватности математичких модела.....	113
5	РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА	115
5.1	Својства дрвета	116
5.1.1	Физичка и механичка својства комплетног узорка	116
5.1.2	Анализа физичких и механичких својстава	119
5.1.3	Избор узорка за испитивање обрадљивости	121
5.2	Мерење снаге резања при обимном глодању.....	123
5.2.1	Резултати мерења снаге резања.....	123

5.2.2	Анализа резултата мерења снаге резања и формирање модела обрадљивости.....	124
5.3	Мерење сила резања при обимном глодању.....	135
5.3.1	Резултати мерења сила резања.....	136
5.3.2	Анализа резултата мерења сила резања и формирање модела обрадљивости.....	140
5.4	Мерење храпавости обрађене површине.....	148
5.4.1	Резултати мерења храпавости обрађене површине.....	148
5.4.2	Анализа резултата мерења храпавости обрађене површине и формирање модела обрадљивости.....	150
5.5	Мерење валовитости обрађене површине.....	156
5.5.1	Резултати мерења валовитости обрађене површине.....	157
5.5.2	Анализа резултата мерења валовитости обрађене површине.....	159
5.6	Упоредна анализа резултата мерења снаге и сила резања.....	160
5.7	Анализа утицаја густине дрвета на измерену снагу резања.....	162
5.8	Анализа утицаја угла између вектора брзине резања и правца протезања влакана на измерене силе резања.....	165
6	ЗАКЉУЧЦИ.....	173
7	ЛИТЕРАТУРА.....	177
8	ПРИЛОЗИ.....	182
8.1	Резултати мерења физичких и механичких својстава храстовине.....	182
8.2	Резултати мерења снаге резања.....	199
8.3	Резултати мерења сила резања.....	201
8.4	Резултати мерења параметара храпавости површине.....	204
8.5	Резултати испитивања утицаја густине на снагу резања.....	210
8.6	Резултати испитивања утицаја орјентације влакана на силе резања...	211
8.7	Програм за обраду резултата измерених сила резања.....	213
	БИОГРАФИЈА АУТОРА.....	219

СПИСАК СЛИКА

Слика 3.1: Структура дрвета.....	10
Слика 3.2: Основни пресеци у дрвету: попречни, радијални и тангенцијални	11
Слика 3.3: Попречни пресек храста	12
Слика 3.4: Приказ хијерархијске структуре дрвета до нивоа елементарних фибрила, (Fang et al., 2014)	15
Слика 3.5: Разлике у понашању дрвета при оптерећењу на притисак и затезање, (Кораћ, Šali, 2003).....	19
Слика 3.6: Зависност чврстоће дрвета и модула еластичности од правца протезања влакана, (Кораћ, Šali, 2003)	19
Слика 3.7: Методе механичке обраде дрвета, (Csanady, Magoss, 2013).....	21
Слика 3.8: Параметри елементарног резања, (Kršljak, 2013)	23
Слика 3.9: Приказ елементарног резања, (Davim, 2011).....	24
Слика 3.10: Образовање површине резања, (Goglia, 1994).....	24
Слика 3.11: Основни видови резања.....	25
Слика 3.12: Прелазни видови резања: а) уздужно-тангенцијално, б) уздужно- попречно, в) тангенцијално-попречно	26
Слика 3.13: Основни правци резања: а) уз дрвна влакна, б) попречно на влакна, с) низ влакна, d) паралелно са влакнима, (Porankiewicz, Goli, 2014).....	26
Слика 3.14: Формирање струготине за различите правце резања: а) уз дрвна влакна, б) попречно на дрвна влакна, с) низ дрвна влакна, d) паралелно са дрвним влакнима, (Porankiewicz, Goli, 2014).....	27
Слика 3.15: Основни типови струготине и формиране површине, (Franz, 1958). 28	
Слика 3.16: Приказ деловања отпорних сила на резни клин, (Goglia, 1994).....	33
Слика 3.17: Силе на грудној површини, (Goglia, 1994)	34
Слика 3.18: Силе на резном сечиву, (Goglia, 1994).....	35
Слика 3.19: Силе на леђној површини, (Goglia, 1994)	36
Слика 3.20: Резултујућа сила на резном клину, (Goglia, 1994).....	37

Слика 3.21: Сложено резање при праволинијском кретању алата; а) полузатворено резање: 1 – главна површина резања, 2 – бочна површина резања и б) затворено резање: 1 – главна површина резања, 2 – бочне површине резања	38
Слика 3.22: Сложено резање при ротационом (кружном) кретању алата	39
Слика 3.23: Супротносмерно глодање.....	40
Слика 3.24: Истосмерно глодање.....	40
Слика 3.25: Крива резултујућег кретања глодала – циклоида, а) резултујуће кретање за глодало са једним зубом, б) резултујуће кретање за глодало са два зуба.....	41
Слика 3.26: Приказ обимног глодања.....	42
Слика 3.27: Силе резања при кружном кретању	45
Слика 3.28: Специфична главна сила резања F_p (N/mm) и специфична нормална сила резања F_n (N/mm) у функцији средње дебљине струготине e (mm), (Kivimaa, 1950).....	47
Слика 3.29: Главна сила резања (N) у функцији дебљине струготине e (mm), при различитим грудним угловима, (Franz, 1958).....	47
Слика 3.30: Специфичан отпор резања K (N/mm ²) и специфичан рад резања K' (Nm/cm ³) у функцији дебљине резања e (mm), (Gronlund, 2004).....	48
Слика 3.31: Утицај средње дебљине струготине e_{sr} (mm) на специфичан отпор резања K (N/mm ²)	49
Слика 3.32: Елементи геометрије сечива, (Davim, 2011).....	50
Слика 3.33: Специфична главна сила резања F_p (N/mm) и специфична нормална сила резања F_n (N/mm) у функцији грудног угла, при различитим дебљинама струготине, код уздужног вида резања, (Kivimaa, 1950).....	51
Слика 3.34: Специфична главна сила резања F_p (N/mm) и специфична нормална сила резања F_n (N/mm) у функцији грудног угла, при различитим дебљинама струготине, код тангенцијалног вида резања, (Kivimaa, 1950).....	51
Слика 3.35: Специфична главна сила резања F_p (N/mm) и специфична нормална сила резања F_n (N/mm) у функцији леђног угла, при различитим дебљинама струготине код уздужног вида резања, (Kivimaa, 1950).....	52

Слика 3.36: Специфична главна сила резања (N/mm) у функцији дужине резања, (Kivimaa, 1950).....	53
Слика 3.37: Одвајање појединих видова одступања у систему „M“: а – сложени профил површине са свим видовима одступања, b – хрпавост представљена састављеним и исправљеним деловима профила l_1 , c – валовитост представљена састављеним и исправљеним деловима профила l_2 , d – одступање облика за укупну дужину профила l_3 , (Јаић, Живановић-Трбојевић, 2000).....	59
Слика 3.38: Приказ таласа циклоиде	63
Слика 3.39: Упоредни приказ валовитости површине, а) бољи квалитет са већим бројем валова по јединици дужине, б) лошији квалитет са мањим бројем валова по јединици дужине, (Davim, 2011)	64
Слика 3.40: Приказ радијалних бацања зуба код сва три глодала.....	65
Слика 3.41: Траг зуба са највећим радијалним бацањем, (Davim, 2011)	66
Слика 3.42: Утицај радијалног бацања зуба на величину компоненти силе резања за један обрт алата	66
Слика 3.43: Зависност снаге резања од брзине резања при рендисању дрвета канадске тополе, (Barcik et al., 2008)	73
Слика 3.44: Зависност снаге резања од брзине помоћног кретања при рендисању дрвета канадске тополе, (Barcik et al., 2008)	74
Слика 3.45: Средње аритметичко одступање профила R_a и максимална висина профила R_z при брзинама помоћног кретања 2,5 m/min и 15 m/min, (Barcik et al., 2009).....	77
Слика 4.1: План истраживања обрадљивости.....	79
Слика 4.2: Изглед епрувета потребних за истраживање.....	83
Слика 4.3: Блок шема методологије експеримента	95
Слика 4.4: Комбинована машина Minimax CU410K	101
Слика 4.5: Радни алати	102
Слика 4.6: Конструктивни приказ алата.....	102
Слика 4.7: Изглед епрувете за мерење снага резања.....	103
Слика 4.8: Аквизициона картица	104
Слика 4.9: Екрански приказ снимљених података	104
Слика 4.10: Инсталација за формирање записа снага резања	105

Слика 4.11: Инсталација за формирање записа компонената сила глодања	106
Слика 4.12: Изглед епрувете за мерење силе резања	107
Слика 4.13: Изглед аквизиционе картице NI 9215	108
Слика 4.14: Шема изрезивања епрувете за испитивање утицаја угла ϕ_s	108
Слика 4.15: Изглед мерача храпавости типа Mitutoyo SJ 301	109
Слика 4.16: Изглед епрувете за мерење храпавости површине	110
Слика 4.17: Графички приказ подешавања уређаја Mitutoyo SJ 301	111
Слика 4.18: Уређај за мерење валовитости површине	112
Слика 5.1: Измерене густине узорака храста	116
Слика 5.2: Измерене густине узорака храста у апсолутно сувом стању	117
Слика 5.3: Измерене влажности узорака храста	118
Слика 5.4: Зависност бочне тврдоће од густине у апсолутно сувом стању	120
Слика 5.5: Зависност савојне чврстоће од густине у апсолутно сувом стању	120
Слика 5.6: Зависност модула еластичности од густине у апсолутно сувом стању	121
Слика 5.7: Зависност израчунате снаге резања од измерене снаге резања	129
Слика 5.8: Зависност снаге резања од дубине глодања и брзине помоћног кретања за грудни угао алата $\gamma = 20^\circ$	130
Слика 5.9: Зависност снаге резања од грудног угла алата и дубине глодања за брзину помоћног кретања 8 m/min	131
Слика 5.10: Зависност снаге резања од грудног угла алата и брзине помоћног кретања за дубину глодања $a = 3$ mm	131
Слика 5.11: Утицај густине у апсолутно сувом стању на измерене снаге резања	133
Слика 5.12: Утицај савојне чврстоће на измерене снаге резања	133
Слика 5.13: Утицај бочне тврдоће на измерене снаге резања	134
Слика 5.14: Утицај модула еластичности при савијању на измерене снаге резања	134
Слика 5.15: Записи компонената сила глодања	135
Слика 5.16: Упоредни приказ компоненти сила глодања	136
Слика 5.17: Дијаграм укупне силе резања	137
Слика 5.18: Приказ укупне силе резања за један обртај алата	137

Слика 5.19: Компоненте силе резања код супротносмерног обимног глодања .	138
Слика 5.20: Зависност израчунате обимне силе од измерене обимне силе	143
Слика 5.21: Зависност средње обимне силе од брзине помоћног кретања и дубине глодања за грудни угао $\gamma=20^\circ$	144
Слика 5.22: Зависност средње обимне силе од грудног угла алата и дубине глодања за брзину помоћног кретања $u= 8 \text{ m/min}$	144
Слика 5.23: Зависност израчунате укупне силе од измерене укупне силе	147
Слика 5.24: Зависност укупне силе резања од брзине помоћног кретања и дубине глодања за грудни угао $\gamma=20^\circ$	147
Слика 5.25: Зависност израчунате храпавости од измерене храпавости управно на дрвна влакна	152
Слика 5.26: Зависност храпавости обрађене површине од дубине глодања и брзине помоћног кретања за грудни угао $\gamma=20^\circ$	152
Слика 5.27: Зависност храпавости обрађене површине од снаге резања.....	155
Слика 5.28: Зависност храпавости обрађене површине од обимне силе резања	156
Слика 5.29: Профил валовитости на храстовим епруветама.....	158
Слика 5.30: Изглед полиетиленских епрувете.....	159
Слика 5.31: Профил валовитости на полиетиленским епруветама	160
Слика 5.32: Зависност директно мерене обимне силе резања (F_{om}) и посредно мерене силе резања (F_{om}^*).....	161
Слика 5.33: Упоредни приказ директно мерене обимне силе резања (F_{om}) и посредно мерене силе резања (F_{om}^*).....	162
Слика 5.34: Зависност снаге резања од густине дрвета у влажном стању.....	164
Слика 5.35: Зависност снаге резања од густине дрвета у апсолутно сувом стању	164
Слика 5.36: Испитивани правци резања: а) паралелно са дрвним влакнима, б) низ дрвна влакна и с) управно на дрвна влакна	166
Слика 5.37: Зависност средње обимне силе резања од дубине глодања и угла између правца брзине резања и правца протезања дрвних влакана	167
Слика 5.38: Зависност средње обимне силе резања од грудног угла алата и угла између правца брзине резања и правца протезања дрвних влакана	168

Слика 5.39: Зависност обимне силе од угла протезања дрвних влакана за грудни угао од 16°.....	169
Слика 5.40: Зависност обимне силе од угла протезања дрвних влакана за грудни угао од 20°.....	170
Слика 5.41: Зависност обимне силе од угла протезања дрвних влакана за грудни угао од 25°.....	171
Слика 5.42: Упоредни приказ измерене обимне силе резања и израчунате силе резања при дубини глодања $a=4,5$ mm и за грудни угао од 20°	172

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 3.1: Коефицијенти корекције C_e за различите дебљине струготине, при резању тврдог и меког дрвета, (Kršljak, 2013)	49
Табела 3.2: Коефицијенти корекције C_p за различите полупречнике заобљења сечива, (Goglia, 1994)	54
Табела 3.3: Коефицијенти корекције C_d за различите врсте дрвета, (Goglia, 1994; Kršljak, 2013)	55
Табела 3.4: Коефицијенти корекције C_v за различите брзине резања, (Kršljak, 2013).....	56
Табела 3.5: Видови одступања стварне површине од идеалне површине (DIN 4760).....	58
Табела 3.6: Параметри храпавости обрађене површине, (1*, 2*, 3*, Јаић, Живановић-Трбојевић, 2000).....	61
Табела 4.1: Преглед својстава храста лужњака	81
Табела 4.2: Једначине дисперзионе анализе	92
Табела 4.3: План матрица са кодираним факторима.....	98
Табела 4.4: Вредности коришћених параметара обраде	100
Табела 4.5: План матрица експеримента са стварним вредностима.....	100
Табела 4.6: Карактеристике игле уређаја Mitutoyo SJ 301.....	109
Табела 4.7: Избор референтних дужина на основу вредности параметра R_a (ISO 4288: 1996).....	110
Табела 5.1: Основна статистичка анализа физичких својстава узорака храстовине одабране за испитивање	118
Табела 5.2: Основна статистичка анализа механичких својстава узорака храстовине одабране за испитивање.....	119
Табела 5.3: Просечне вредности физичких и механичких својстава за груписане узорке	119
Табела 5.4: Својства дасака изабраних за анализу обрадљивости храстовине ..	122

Табела 5.5: Основна статистичка анализа дасака храстовине изабраних за анализу обрадљивости	123
Табела 5.6: Средње вредности измерених снага резања (P)	124
Табела 5.7: План матрица мерења снаге резања.....	125
Табела 5.8: Средње вредности измерених обимних сила резања (F_{om}) и укупних сила резања (F_{uk})	140
Табела 5.9: План матрица експерименталног мерења обимних сила резања.....	141
Табела 5.10: План матрица експерименталног мерења укупних сила резања...	145
Табела 5.11: Средње вредности храпавости обрађене површине измерених управно са правцем протезања дрвних влакана ($R_{a\perp}$) и паралелно са правцем протезања дрвних влакана ($R_{a\parallel}$)	149
Табела 5.12: План матрица експерименталног мерења храпавости површине управно на правац протезања дрвних влакана.....	150
Табела 5.13: План матрица експерименталног мерења храпавости површине паралелно са правцем протезања дрвних влакана.....	153
Табела 5.14: Математички израчунате дужине и дубине валова за карактеристичне режиме обраде	157
Табела 5.15: Измерене дужине и дубине валова за карактеристичне режиме обраде.....	158
Табела 5.16: Измерене дужине и дубине валова на полиетиленским епруветама	159
Табела 5.17: Средње вредности посредно измерених обимних сила резања (F_{om}^*) и директно измерених обимних сила резања (F_{om}).....	161
Табела 5.18: Средње вредности снага резања измерених при нултом режиму обраде обимним глодањем	163
Табела 5.19: Просечне вредности густине у влажном и у апсолутно сувом стању, влажности и тврдоће узорака коришћених у испитивању.....	165
Табела 5.20: Средње вредности обимних сила резања (F_{om}) за различите правце протезања дрвних влакана	167
Табела 8.1: Физичка својства храстовог дрвета.....	182
Табела 8.2: Механичка својства храстовог дрвета	191

Табела 8.3: Измерене вредности снага резања при брзини помоћног кретања $u = 4$ m/min.....	199
Табела 8.4: Измерене вредности снага резања при брзини помоћног кретања $u = 8$ m/min.....	200
Табела 8.5: Измерене вредности снага резања при брзини помоћног кретања $u = 16$ m/min.....	201
Табела 8.6: Измерене вредности сила резања при брзини помоћног кретања $u = 4$ m/min.....	201
Табела 8.7: Измерене вредности сила резања при брзини помоћног кретања $u = 8$ m/min.....	202
Табела 8.8: Измерене вредности сила резања при брзини помоћног кретања $u = 16$ m/min.....	203
Табела 8.9: Измерене вредности храпавости површине за брзину помоћног кретања $u = 4$ m/min.....	204
Табела 8.10: Измерене вредности храпавости површине за брзину помоћног кретања $u = 8$ m/min.....	205
Табела 8.11: Измерене вредности храпавости површине за брзину помоћног кретања $u = 16$ m/min.....	206
Табела 8.12: Измерене вредности храпавости површине за брзину помоћног кретања $u = 4$ m/min.....	207
Табела 8.13: Измерене вредности храпавости површине за брзину помоћног кретања $u = 8$ m/min.....	208
Табела 8.14: Измерене вредности храпавости површине за брзину помоћног кретања $u = 16$ m/min.....	209
Табела 8.15: Измерене вредности снага резања за испитивање утицаја густине на снагу резања	210
Табела 8.16: Измерене вредности сила резања за различиту орјентацију дрвних влакана	211

СПИСАК КОРИШЋЕНИХ ОЗНАКА

$\rho_0 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$	– густина дрвета у апсолутно сувом стању
$\rho_v \left[\frac{g}{cm^3} \right]$	– густина дрвета у влажном стању
$v_a [\%]$	– садржај воде дрвета
$\sigma_s \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	– савојна чврстоћа дрвета
$H \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	– тврдоћа дрвета
$E_s \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	– модул еластичности дрвета
$K \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	– специфичан отпор резања
$K' \left[\frac{J}{cm^3} \right]$	– специфичан рад резања
c_p	– коефицијенти корекције за раличите полупречнике заобљења сечива
c_d	– коефицијенти корекције за различите врсте дрвета
c_v	– коефицијенти корекције за различите брзине резања
c_e	– коефицијент корекције за дебљину струготине
c_γ	– коефицијент корекције за промену грудног угла
c_x	– коефицијент корекције за промену неког утицајног параметра
$r [\mu m]$	– радијус заобљења оштрице
$v \left[\frac{m}{s} \right]$	– брзина резања
$u \left[\frac{m}{min} \right]$	– брзина помоћног кретања
$n [min^{-1}]$	– број обртаја алата
$s_z [mm]$	– корак по зубу

s_o [mm]	– корак по обртају
a [mm]	– дубина резања
e [mm]	– дебљина струготине
e_{sr} [mm]	– средња дебљина струготине
e_{max} [mm]	– максимална дебљина струготине
D [mm]	– пречник алата
R [mm]	– полупречник алата
z	– број зуба алата
γ [°]	– грудни угао
α [°]	– леђни угао
δ [°]	– угао резања
β [°]	– угао оштрења
φ_0 [°]	– угао захвата (контакта) сечива глодала
φ [°]	– тренутни угао захвата сечива глодала
R_{max} [μm]	– максимална висина неравнина
R_z [μm]	– средња висина неравнина у 10 тачака
R_a [μm]	– средње одступање профила
$R_{a\perp}$ [μm]	– храпавост површине мерено управно са правцем протезања влакана
$R_{a\parallel}$ [μm]	– храпавост површине мерено паралелно са правцем протезања влакана
R_{pm} [μm]	– допунски параметри
h_c [mm]	– дубина таласа
l_v [mm]	– дужина кинематских валова
P [W]	– снага резања
F_g [N]	– укупна сила на грудној површини
F_o [N]	– укупна сила на резном сечиву
F_l [N]	– укупна сила на леђној површини
F_t [N]	– тангенцијална сила
F_n [N]	– нормална сила
F_{om} [N]	– обимна сила резања
F_r [N]	– радијална сила резања
F_{uk} [N]	– укупна сила на резном клину

1 УВОД

Дрво је јединствен материјал који се користи од самог почетка људске цивилизације. Тешко би било и замислити неки други материјал са тако широком применом и таквом важношћу за људски род. С обзиром да се ради о природној и обновљивој сировини његов утицај на даљи развој човечанства биће и надаље веома велики. Технички гледано дрво се може дефинисати као хигроскопни, ортотропни и биолошки композитни материјал која има изузетну хемијску разноликост и комплексну физичку структуру што у великој мери доприноси разликама у облику, величини, карактеристикама и функцији различитих врста дрвећа. Све ово отежава развијање стандардне технике машинске обраде која би била подједнако добра за све врсте дрвећа.

Дрво до израде готовог дела пролази кроз различите фазе прераде које укључују и механичке обраде као што су: расечање, глодање, рендисање, љуштење, итд. За све те фазе је карактеристична лака обрадљивост дрвета. Добра обрадљивост није деловала стимулативно на продубљивање знања у преради дрвета. Посебно су запостављене механичке обраде, иначе веома важне за коришћење дрвета. До средине 20. века у области механичке обраде дрвета направљен је велики помак. У то доба значајан број аутора из Европе и САД се бавио фундаменталним истраживањима у области теорије резања масивног дрвета. Након почетног узлета почиње заостајање. Истраживања у области машина и алата за обраду масивног дрвета из истраживачких центара и са универзитета прелазе у развојне центре великих фабрика. Број објављених резултата са смањује, а технолошка решења конструкција машина се преузимају из проверених конструкцијских решења машина за обраду других материјала. У последње време у фабрикама за прераду дрвета превлађују CNC (Computer Numerical Control) машине, па и роботи који се користе у обради, а не само за манипулацију и наношење превлака. Већина тих машина је првобитно пројектована за обраду метала или пластике и само су прилагођене потребама прераде дрвета. Прилагођавања су

углавном заснована на истраживањима у области теорије резања масивног дрвета из педесетих година прошлог века када се за CNC технологије није ни знало.

Истраживања која су планирана у оквиру предложене дисертације се односе на домен унапређење познавања технолошких својстава дрвета при обради глодањем, као једним широко примењеним методом обраде у завршној преради дрвета. Технолошка својства су важна код избора (пројектовања нових) алата, као и за дефинисање режима резања за машине нове генерације. Боље познавање процеса резања дрвета може да допринесе побољшању квалитета обрађене површине, тачности обраде, економичности и продуктивности. Квалитет обрађене површине, тачност обраде и утрошак енергије у реалности представљају стални изазов у истраживању проблематике резних алата са циљем да се постигне њихов оптималан однос.

У сваком процесу обраде присутно је више утицајних фактора и њихових интеракција па је изузетно тешко теоријски и помоћу аналитичких модела поуздано одредити оптималне параметре. Зато је примена експеримента и анализа тако добијених резултата незаменљива у развоју нових и усавршавању постојећих обрадних процеса и система. У великом броју експеримената уочава се веза између две или више променљивих. Формирањем одговарајућег математичког модела може се дефинисати утицај независних фактора на зависно променљиве величине, односно могу се одредити вредности параметара који фигуришу у математичком моделу. До модела се може доћи на разне начине, међутим, основни критеријум за оцену модела је колико адекватно описује стање процеса обраде. Познато је да експериментални модели обрадног процеса најтачније описују реалне процесе који важе само за подручје варираних улазних фактора. Главни циљеви моделирања обрадног процеса су повећање производности, економичности, квалитета производа, смањење утрошка материјала, енергије, времена обраде и трошкова обраде по јединици производа.

За избор типа математичког модела обрадног процеса не постоји општеважеће правило. Заправо, за сваки истраживани процес или систем треба изабрати одговарајући модел и проверити његову тачност и адекватност у односу на

реалан процес. Облик једначине која повезује зависно променљиву (снага резања, силе резања и храпавост обрађене површине дрвета) са независно променљивим величинама (режим резања, геометрија сечива, својства материјала) представља математички модел, односно моделски облик регресионе једначине. Установљена зависност открива узрочно последичне везе између променљивих и даје могућност, у већој или мањој мери, поузданог предвиђања или процењивања зависно променљиве.

Структура овог рада се састоји од осам поглавља у којима су обрађени: увод, предмет и циљ рада, теоријске основе, методологија истраживања, резултати и анализа резултата истраживања, закључци, литература и на крају, прилози са детаљним резултатима добијеним у оквиру истраживања.

2 ПРЕДМЕТ И ЦИЉ РАДА

Истраживања, која су планирана у оквиру предложене дисертације се односе на домен унапређивања познавања технолошких својстава дрвета при обради резањем, односно карактеристика и функција обрадљивости домаћих врста дрвета. Планирана истраживања су била фокусирана на сам процес обраде глодањем и развој поузданих аналитичких и симулационих модела за анализу и предикцију сила и снаге резање, као и квалитета обрађене површине.

Обрадљивост представља један од најважнијих појмова у теорији процеса обраде резањем конструктивних материјала уопште, па тако и дрвета. Обрадљивост се дефинише као способност (могућност) материјала да се обрађује резањем уобичајеним економичним производним техникама и технологијама (машинама, алатима, методама). Оцењује се скупом основних карактеристика, односно критеријума или функцијама (Stanić, 1989):

1. Постојаности алата,
2. Силе и моменти резања,
3. Квалитета обрађене површине,
4. Тачности и карактеристика квалитета,
5. Облика струготине.

Већина основних карактеристика обрадљивости, као што су силе и моменти резања, постојаност алата и др., могу се изразити степеним функцијама параметара обрадљивости.

У наведене основне функције, које се односе на процесе обраде резањем метала, нису директно сврстане тзв. допунске функције везане за температуру и снагу резања. Међутим, због специфичности дрвета, као и машина за обраду дрвета, показало се да је од посебног интереса и функција снаге резања, коју индиректно

одређују функција постојаности алата и функција сила резања, и коју би требало укључити у разматрање као допунску функцију обрадљивости дрвета.

За оцену обрадљивости материјала, па и дрвета, најчешће се користе изрази за главне факторе обраде (силе и брзине резања), који се одређују експерименталним путем, а који у случају обраде дрвета зависе од: материјала који се обрађује (врсте, структуре и влажности дрвета), вида резања¹, односно правца резања у односу на правац дрвних влакана, материјала и геометрије сечива алата, услова резања и друго. У ужем смислу, истраживања у оквиру ове тезе су усмерена на одређивање параметара обрадљивости храста лужњака код уздужног резања (алат се креће у правцу дрвних влакана, а сечиво је управно на правац дрвних влакана) при обради обимним ортогоналним глодањем.

Полазне претпоставке за ова истраживања подразумевају спровођење потребних испитивања физичких и механичких својстава дрвета која су у складу са важећим домаћим и европским стандардима. За испитивања обрадљивости, у оквиру ове докторске дисертације, одабран је метод тоталних ортогоналних планова који спада у комплексне и дуготрајне методе али чијом се применом, као што је познато, добијају најтачнији и најпоузданији резултати. Елементи обраде глодањем, разматрани у оквиру експеримента, су: **брзина помоћног кретања** и **дубина резања**. Испитивања су спроведена за **различите геометрије алата**. Критеријуми на основу којих је оцењивана обрадљивост су **снага резања, односно сила резања и квалитет обрађене површине**.

2.1 Циљ истраживања и очекивани резултати

Општи научни циљ је допринос теорији резања у домену обраде дрвета и представља прилог процесу бољег познавања обимног глодања кроз развој модела за анализу и предикцију снаге и сила глодања, као и квалитета обрађене површине. Допринос се огледа првенствено у развоју аналитичког модела и алгоритму који се на том моделу заснива, са једне стране и научном ставу о процесима који се јављају између алата и обрађиваног дрвета, са друге стране.

¹ Видови могу бити основни, прелазни и комбиновани. Основни видови резања код дрвета (уздужно, попречно и тангенцијално) дефинишу се правцем кретања сечива и положајем равни резања према правцу пружања дрвних влакана.

Основни циљ овог истраживања је успостављање методологије за одређивање обрадљивости дрвета. Као критеријуми за оцену обрадљивости одређени су снага резања, силе резања и квалитет обрађене површине. Односно, циљ је да се применом регресионе анализе одреди функционална зависност критеријума обрадљивости од параметара обраде.

Предвиђено је да се методологија провери на храсту лужњаку (*Quercus robur*) који, због својих добрих својстава, има широку примену у грађевинарству, унутрашњем уређењу, за израду подних облога, намештаја и фурнира. Анализирана метода обраде је обимно глодање, као једна од најсложенијих метода и у оквиру тога уздужна обрада као најраспрострањенији вид у завршној преради дрвета.

На основу постављених модела и експерименталних испитивања за изабране репрезентативне обратке храста лужњака утврђени су коефицијенти специфичних отпора резања и параметри обрадљивости при обради дрвета глодањем.

2.1.1 Очекивани научни резултати

У теоријском смислу, очекивани резултати истраживања, у оквиру предложене дисертације, се односе на успостављање методологија испитивања обрадљивости дрвета, односно одређивање константи и одговарајућих параметара обрадљивости у постављеним математичким моделима. Овако постављени математички модели би били од вишеструке користи за:

- Избор машина, алата и режима обраде, односно за пројектовање технолошких процеса у обради дрвета;
- Техноекономску оптимизацију технолошких процеса, режима и услова обраде у савременим технологијама машинске обраде.

2.1.2 Очекивани стручни резултати

Постављене методе испитивања, усвојени модели, протоколи и начини обраде и презентације резултата, након експерименталне верификације, могли би бити основа за дефинисање општије експерименталне методе испитивања

обрадљивости за друге врсте дрвета и материјала на бази дрвета и различите методе обраде.

У практичном смислу, спровођење у суштини комплексних експерименталних истраживања обрадљивости, подразумевају надоградњу и унапређење постојеће експерименталне инсталације за мерење снаге резања. Ове инсталације би касније биле коришћене за даља истраживања и потребе наставе у оквиру Центра за машине и алате за обраду дрвета.

2.2 Хипотезе

Један од веома распрострањених видова обраде у финалној преради дрвета је обрада глодањем којом се могу изводити различити технолошки захвати и то равнање, профилисање, обрада отвора и криволинијска обрада при различитим технолошким параметрима обраде и уз различите енергетске учинке. Неки од ових захвата се изводе дуж дрвних влакана, неки попречно, а неки под углом у односу на правац протезања дрвних влакана. Уобичајено је да се при обради дрвета спроводе захвати по дужини и попречно на правац протезања влакана. При обради на CNC глодалици јављају се сва три правца обраде. Угао између правца резања и правца протезања влакана значајно утиче на величину силе резања и квалитет обрађене површине.

Постављене хипотезе су:

- различита физичка и механичка својства материјала утичу на силе и снагу резања;
- различити углови између правца резања и правца протезања влакана утичу на величину снаге и сила резања;
- различита геометрија алата узрокује различиту снагу, односно силе резања;
- различита геометрија алата узрокује различит квалитет обрађене површине;
- различити технолошки параметри обраде узрокују различиту снагу, односно силе резања;

- различити технолошки параметри обраде узрокују и различит квалитет обрађене површине.

За анализу ових претпоставки коришћена су властита експериментална истраживања.

Развијени математички модел за одређивање параметара снаге резања, силе резања и квалитета обрађене површине у функцији од режима резања и геометрије алата послужио је за предвиђање обрадљивости при обимном, ортогоналном, равном глодању храстовине.

3 ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

Теорија обраде дрвета је развијена на основу теорије обраде метала уз поштовање сложене анатомске грађе и анизотропије дрвета које имају великог утицаја на процес и исход резања дрвета. Због великих физичких, механичких и хемијских варијација дрвета, процес резања дрвета спада у један од сложенијих процеса за контролисање.

3.1 Структура дрвета

Обрадљивост дрвета, као и његове употребне карактеристике зависе од структуре и хемијског састава дрвета. У поређењу са металима дрво као материјал карактеришу хетерогеност, анизотропност, порозност, хигроскопност, подложност нападу гљива и инсеката и деградабилност услед деловања климатских фактора. Овако комплексна структура дрвета резултира различитим проблемима у току обраде дрвета, који свакако нису присутни када се ради о обради метала. На пример, као последица велике дебљине струготине или веома ниског садржаја влаге на обратку могу се појавити пукотине, док веома танка струготина и висок садржај влаге у дрвету могу довести до гњечења дрвног ткива уместо до резања (McKenzie, 1961). Затим, угао између правца брзине резања и правца протезања дрвних влакана утиче на облик струготине, а самим тим на силе резања и квалитет обрађене површине (Franz, 1958). Уколико се узме у обзир интензитет и правац брзине помоћног кретања, као и влажност дрвета (која утиче на механичка својства), јасно је због чега је резање дрвета различито од резања метала.

3.1.1 Формирање дрвета

Хетерогеност у саставу и структури дрвета настаје још у периоду формирања дрвета. Појам формирања дрвета подразумева повећање пречника стабла, грана и корена, као и раст у висину што је повезано је са активношћу творног

меристемског ткива чије су ћелије задржале способност деобе. Постоје примарни и секундарни меристем који се разликују, пре свега, у погледу развоја. Примарни меристем се формира у првој години живота и одговоран је за формирање дрвета – примарног ксилема и живог дела коре – примарног флоема. При крају прве године (при крају периода вегетације) између примарног ксилема и флоема формира се секундарни меристем – васкуларни камбијум. Камбијум је танки концентрични слој ћелија који, деобом камбијалних ћелија, производи дрво или секундарни ксилем према унутрашњости дрвета и секундарни флоем или ткиво унутрашње коре ка спољашњости дрвета (Слика 3.1).



Слика 3.1: Структура дрвета

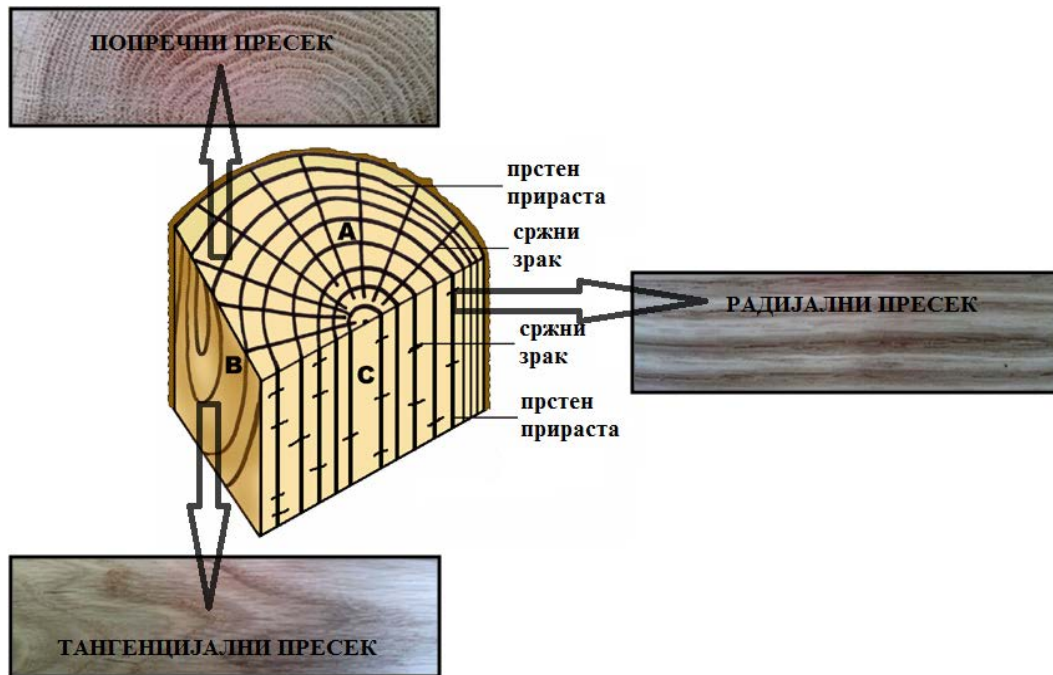
Ксилем функционише као потпорно и спроводно ткиво за транспорт воде и минералних материја од корена ка лишћу и пупољцима, док је флоем главно спроводно ткиво за хранљиве материје од лишћа и пупољака ка корену.

3.1.2 Макроскопска грађа дрвета

Макроскопска грађа дрвета подразумева карактеристике дрвета које су видљиве голим оком, а манифестација су унутрашње структуре дрвета.

Слика 3.2 приказује три основна пресека дрвета:

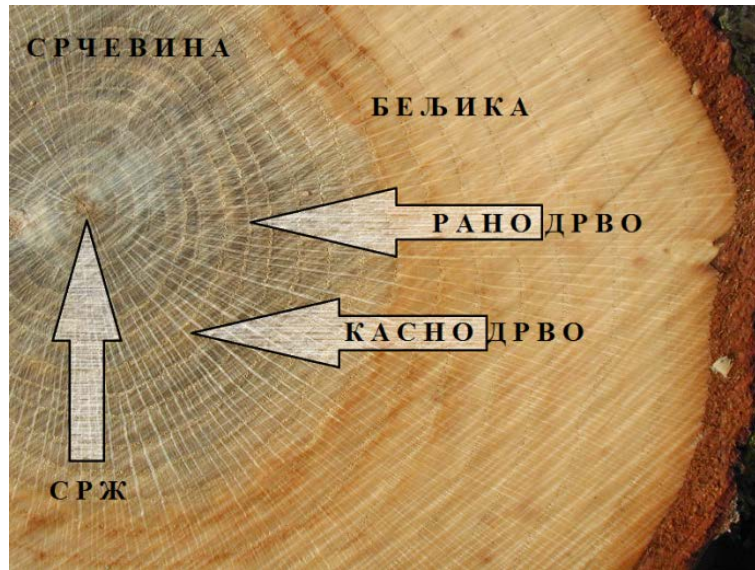
- раван која управно пресеца аксијални смер стабла даје попречни пресек,
- раван која пресеца стабло аксијално у радијалном смеру даје радијални пресек,
- раван која пресеца стабло аксијално у тангенцијалном смеру даје тангенцијални пресек.



Слика 3.2: Основни пресеци у дрвету: попречни, радијални и тангенцијални

Према томе, дрво је ортотропан материјал јер има три основна узајамно управна правца различитих физичко-механичких својстава.

Пресецањем дрвета попречним, радијалним или тангенцијалним пресеком уочавају се различити делови дрвног ткива као што су: прстенови прираста, срчевина и белјика и сржни зраци. Слика 3.3 приказује попречни пресек храста са карактеристичним деловима дрвног ткива. Прстенови прираста су најмаркантнији део макроскопске грађе дрвета и представљају прираштаје дрвне масе који се додају сваке године на раније створене прстенове прираста. На попречном пресеку се уочавају као приближно концентрични кругови, на радијалном као паралелне линије, а на тангенцијалном се виде као параболе или њихови делови (Слика 3.2).



Слика 3.3: Попречни пресек храста

Нехомогеност грађе дрвета јавља се у оквиру сваког прстена прираста дрвета. У зачетку вегетације због великих циркулационих потреба, јавља се рано растреситије дрво (ћелије дрвог ткива су танкозидне са великим луменима), док на крају вегетације, у јесен јавља се тамније и гушће касно дрво прстена прираста (елементи ужих лумена и дебљих мембрана). На основу разлике у грађи елемената који се формирају у пролеће и јесен разликује се пролећно (рано) и јесење (касно) дрво. Разлика у физичко-механичким својствима између раног и касног дрвета имају утицаја на силу резања и квалитет обрађене површине. На основу броја прстенова прираста код већине врста дрвећа може се одредити њихова старост. Граница прстена прираста је израженија код четинара него код лишћара, док у оквиру лишћара изразитији прелаз имају врсте код којих су трахеје раног дрвета прстенасто распоређене (храст, јасен, брест, багрем и питоми кестен) у односу на дифузан распоред трахеја код осталих лишћара.

Периферни, мање збијени и обично светлији прстенови прираста познати су као бељика, док унутрашњи збијенији (компактнији), махом тамнији годишњи прстенови, познати су као срчевина (срчика). Срчевина је део ксилема који је изгубио физиолошку функцију. Настаје осржавањем бељике, тако што сваке године један прстен прираста прелази у срчевину. Ова појава је последица правила да старије дрво трпи промене животних функција које у принципу конзервирају дрво и повећавају његову густину, као што су: одумирање

паренхимских ћелија, смањивања циркулационих функција, испуњавања ћелија старским уљима и смолом код четинара, а танинским и другим бојеним материјама код лишћара и др. Процес осржавања се одвија до краја живота дрвета тако што се граница између срчевине и белјике помера ка спољашњем делу стабла. Белјика и срчевина се не могу лако макроскопски уочити код сваке врсте дрвета, међутим увек постоји разлика у њиховим механичким својствима, при чему срчевина има далеко боље механичке карактеристике од белјике. С тим у вези постоје врсте дрвећа код којих постоји јасна разлика између срчевине и белјике, тзв. једричаве врсте (храст, багрем, топола, јасен, брест, питоми кестен, бор, тиса, ариш, клека и дуглазија) и бакуљаве врсте код којих је та разлика неприметна (граб, бреза, јова, јела, смрча, оморика, липа, јавор, буква и сл.). Неке од бакуљавих врста, на пример буква, могу имати тамнији централни део који личи на срчевину, тзв. лажну срчевину која настаје услед патолошких промена у живом стаблу.

Централни део попречног пресека дрвета чини срж (срце), пречника неколико милиметара. Граде га крупне ћелије без живог садржаја са широким интерцелуларним просторима. Одликује се затворенијом бојом и мањом тврдоћом у односу на прстенове унутар дрвне масе. Због слабијих техничких својстава, овај део ксилема се при изради квалитетних сортимената одстрањује.

Кора дрвета представља његов заштитни омотач и састоји се од спољашње коре дебљине од 2÷35 mm зависно од врсте дрвета и унутрашње коре (флоема) која представља танки слој физиолошки активног ткива. Како се нови слојеви флоема нижу из године у годину, спољашњи слојеви пропадају, престају учествовати у активним физиолошким процесима и трансформишу се у релативно инертну, тамну спољашњу кору, чију основу чини фелоген. Код већине дрвенастих биљака првобитно зачети фелоген после одређеног времена престаје да функционише јер потпуно прелази у плуту. Уместо њега се у дубљим слојевима ствара други фелоген који касније на исти начин прелази у плуту, а потом трећи итд.

3.1.3 Микроскопска грађа дрвета

Основни елемент микроструктуре дрвета је жива ћелија коју производи секундарни меристем – камбијум и која је опкољена чврстом ћелијском мембраном односно ћелијским зидом. Форма ћелије се мења почевши од живе и активне ћелије па све до мртве ћелије, која представља саставни део зрелог ткива и носилац је особина дрвета као материјала. Физиолошка и проводна активност је карактеристична за белу, док тих активности у срчевини нема или су прилично редуковане.

Ћелије груписане према облику и функцији формирају различите врсте ткива: проводно ткиво које се састоји од трахеида и трахеја, дрвни паренхим састављен од живих ћелија, траке лигнума (сржни зраци) и механичка ткива која чине дрвна влакна – либриформ (Гајић, 1987).

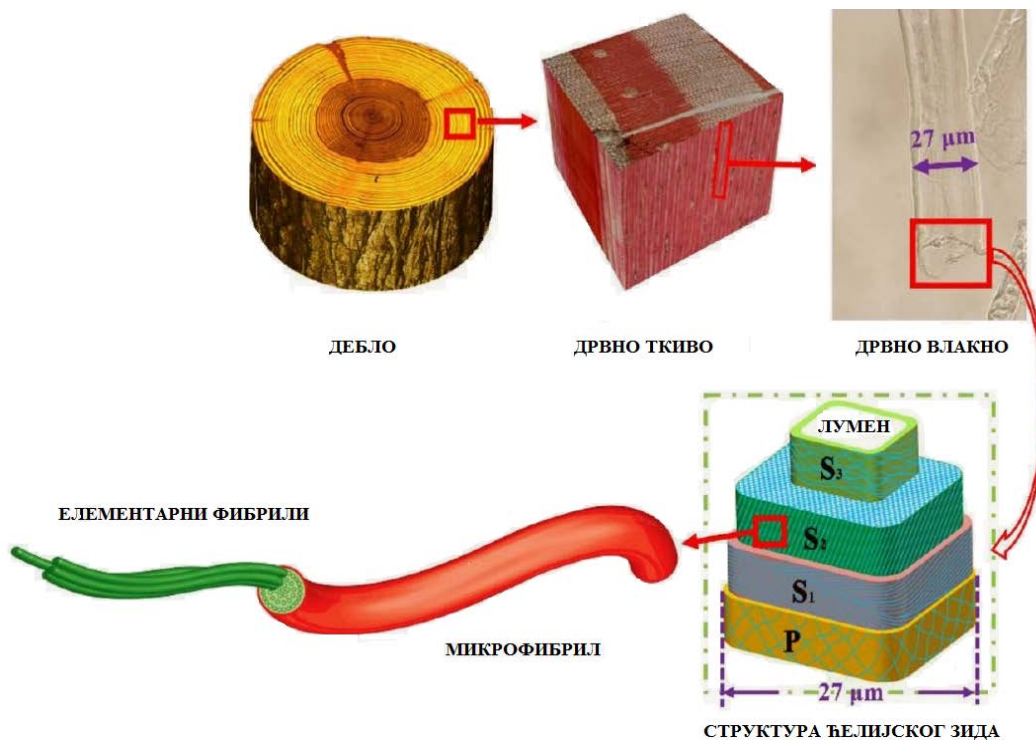
Трахеиде су неживи елементи у облику издужених ћелије које чине основу грађе четинара (90 – 95 %) и имају и проводну и механичку функцију (Vilotić, 2000). Ови елементи су обично дугачки 2–5 mm са пречником од око 0,02–0,04 mm (Кораћ, Šali, 2003). Код лишћара механичку улогу имају либриформска влакна састављена од ћелија са уским луменима, одрвењеним мембранама и зашиљеним крајевима, која чине најмање 50% масе дрвета. Ови механички елементи су дугачки 1–2 mm са пречником од око 0,01–0,05 mm (Кораћ, Šali, 2003). Проводну функцију код лишћара имају цевасте трахеје које су настале повезивањем већег броја ћелија у дугачке низове. Паренхим је важан саставни део грађе и лишћара и четинара, образује траке лигнума које се зракасто протежу од центра ка периферији. Траке лигнума имају проводну функцију, проводе воду и минералне материје из ксилема до камбијалних ћелија и секунданог флоема, а хранљиве материје из флоема преко камбијума у живи део ксилема. Између трака лигнума се налазе велики интерцелуларни простори.

3.1.4 Субмикроскопска грађа дрвета

Субмикроскопска грађа дрвета се пре свега односи на структуру ћелијске мембране, односно ћелијског зида. Преко ћелијског зида биљка се штити од прекомерног одавања воде и сушења, а исто тако и од прекомерног продирања воде и распрскавања. Основну јединицу ћелијског зида представља елементарни

фибрил (кристалит) који се састоји од снопа паралелно повезаних ланаца целулозе. Кристалити су међусобно повезани ланчаним молекулима образујући микрофибриле. Код формирања микрофибрила прво се формира целулозни скелет, чије међушупљине испуњавају дрвне полиозе (хемицелулозе). Тек пред завршетак формирања целулозног скелета почиње лигнификација, односно таложење лигнина у интерфибриларне просторе целулозног скелета, чиме се постиже чврстоћа ћелијског зида.

Зреле ћелије дрвета имају ћелијску мембрану која се састоји из танког примарног и дебелог секундарног слоја (Слика 3.4). Код примарне ћелијске мембране микрофибрили имају мрежаст распоред и нису густо испреплетани. Секундарна ћелијска мембрана није тако хомогене структуре и састоји се од три слоја (S_1 , S_2 , и S_3) који се међусобно разликују по распореду, густоћи и протезању микрофибрила, што узрокује различито утезање и бубрење слојева зида ћелије.



Слика 3.4: Приказ хијерархијске структуре дрвета до нивоа елементарних фибрила, (Fang et al., 2014)

У слоју S_1 протезање микрофибрила је управно у односу на уздужну осу, зато је бубрење и утезање у том смеру занемарљиво, а у основном смеру велико. Слој S_2 чини око 70% зида ћелије са микрофибрилима који су скоро паралелно

оријентисани са уздужном осом. Овај слој је знатно дебљи од осталих слојева, па и бубрење и утезање знатно утичу на промене димензија зида ћелије. У слоју S_3 микрофibriли су управно оријентисани у односу на уздужну осу па је и бубрење и утезање у осном смеру велико.

3.1.5 Својства дрвета значајна за механичку обраду

Велика варијабилност хистолошке грађе дрвета између појединих врста дрвета, као и унутар једне исте врсте има пресудан утицај на формирање технолошких својстава дрвета. Поједине врсте елемената грађе које имају исте функције у живом дрвету, немају једнак утицај на та својства. Типичан случај су ћелије паренхима које у живом дрвету имају физиолошку функцију, док у мртвом дрвету представљају један од важних фактора који утиче на техничка својстава. У овом случају важнију улогу имају радијалне паренхимске ћелије (сржни зраци) у односу на аксијалне, без обзира што су обе врсте идентичне у анатомском смислу.

Отпор продирању сечива пружају углавном механичка ткива као што су дрвна влакна и трахеиде. Дрвна влакна (либриформска влакна) чине основну дрвну супстанцу грађе лишћара у којој су инкорпорирани остали елементи грађе. Правост, дужина и дебљина влакана, начин груписања и процентуални удео влакана у укупној дрвној маси имају значајан утицај на техничка својства дрвета. Правост влакана лишћара је мања у односу на правост трахеида четинара. На то додатни утицај имају и сржни зраци који се пробијају кроз снопове влакана и изазивају њихову девијацију. Што су крупнији сржни зраци и што их је више то се повећава и степен девијације. Дебелозидна влакна дају тврдо дрво, док танкозидна дају меко дрво. Што је веће учешће влакана у дрвној маси то је дрво тврђе и теже, што утиче на повећање чврстоће. Слично томе, трахеиде као главни носиоци грађе четинара са проводном и механичком функцијом својом грађом и процентуалним уделом у укупној дрвној маси утичу на техничка својства дрвета. Па тако дебелозидне трахеиде касног дрвета повећавају тежину, тврдоћу и чврстоћу дрвета. Трахеје (судови) утичу на техничка својства дрвета својом грађом, начином груписања и према томе да ли су у мртвом дрвету празне или испуњене тилама (израслинама ћелија паренхима кроз отвор јамице).

Бројнији судови великих отвора и танких зидова дају лакше и мекше дрво, док запуњеност тилама повећава тежину, тврдоћу и трајност дрвета.

Дрво је хигроскопан материјал што значи да има способност да упија воду. Вода делимично продире у зидове ћелија и ту се депонује међу структурним елементима (микрофибрилама), а делимично се задржава на површини. Хигроскопска влага која се налази у зидовима ћелија (везана вода) везана је јаким физичко хемијским везама за микрофибриле и не може се одстранити сечивом при стварању струготине у процесу резања. Промена садржаја везане воде из дрвета утиче на промену свих физичких и механичких својстава дрвета, док промена садржаја слободне воде утиче само на промену масе и густине дрвета. Слободна вода се налази у макрокапиларима и луменима ћелија и није везана за зидове ћелија. Лако се одстрањује сечивом у процесу отвореног резања и не пружа скоро никакав отпор, док код затвореног резања може доћи до повећања отпора дрвета при резању. Међутим ако се ова вода у дрвету замрзне, представљаће значајан отпор при резању, јер има утицаја на утрошак енергије.

Још једно својство дрвета које има јак утицај на густину тј. запреминску масу је и порозност дрвета. С тим у вези разликујемо запреминску масу дрвета као порозног тела (разликује се по врстама дрвета) и запреминску масу дрвне супстанце (разликује се у уским границама и приближно је $1,50 \text{ g/cm}^3$).

Температура дрвета има утицаја на чврстоћу дрвета, а самим тим и на процес резања. У неким случајевима температура дрвета се намерно повећава, у оквиру припремне фазе обраде (производња фурнира или савијање дрвета) ради добијања бољег квалитета производа.

Различите врсте дрвета имају различита механичка својства. Разлике у својствима различитих врста последица су разлика у анатомској структури тих врста, међутим, постоје велике разлике и унутар исте врсте дрва, али и унутар истог стабла, па чак и унутар једног прстена прираста истог пресека (нпр. рано дрво има $3\div 5$ пута мању чврстоћу на притисак, истезање и савијање од касног дрвета у истом прстену прираста). Зато је познавање утицаја анатомске структуре дрвета на својства врло важно за оцену квалитета дрвета и његове подесности за одређену обраду. Постоји узајамна веза између механичких

својстава дрвета и његове запреминске масе па се уопштено може рећи: што је неко дрво унутар исте врсте теже, то је оно чвршће и тврђе. Механичка својства дрвета су најбоља у смеру влакана, а најлошија управно на влакна.

Механичка својства дрвета читавају се у границама пропорционалности и еластичности. Граница еластичности је номинални напон код ког је дрво још увек еластично, односно ако се пређе ова граница деформације дрвета постају трајне (пластичне). Заправо, дрво је вискозно - еластичан материјал што значи да и релативно мале еластичне деформације ако трају довољно дуго могу довести до пластичних (трајних) деформација.

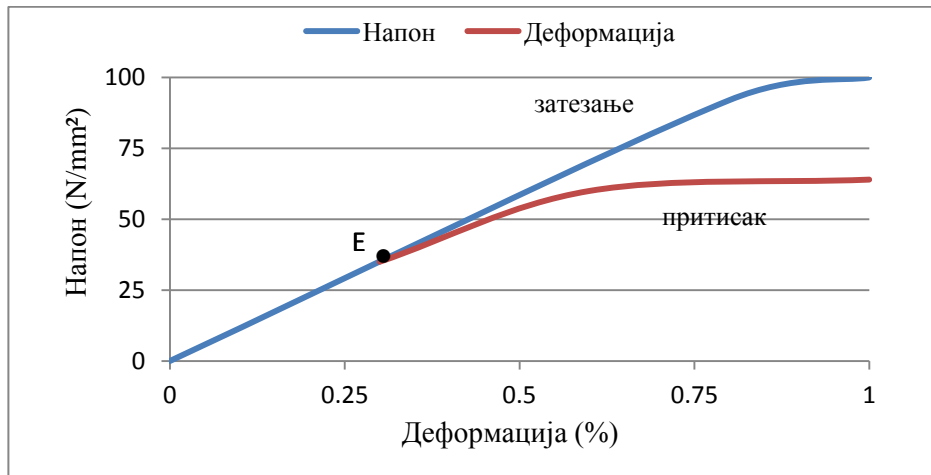
Модул еластичности дрвета зависи од врсте дрвета, структуре дрвета, запреминске масе, садржаја воде, температуре, смера влакана, правилности раста и старости дрвета. Модул еластичности се испитује код нормалних напона (притисак и затезање) и код напона на савијање. Испитивање модула се врши у аксијалном, радијалном и тангенцијалном правцу. Највеће вредности модула еластичности се добијају у аксијалном правцу. Са повећањем садржаја хигроскопне воде у дрвету долази до смањења садржаја дрвне супстанце у јединици запремине и до међусобног удаљавања микрофибрила у зидовима ћелија што резултира смањењем модула еластичности дрвета (Šoškić, Popović, 2002).

Чврстоћа (максимални напон) дрвета представља једно од најважнијих механичких својстава које се тражи у свакој носивој конструкцији од дрвета и укључује чврстоћу на притисак, чврстоћу на затезање, чврстоћу на савијање, чврстоћу на смицање и чврстоћу на цепање.

Чврстоће на притисак паралелно са влакнима варира у широком дијапазону вредности и просечно се може узети да код лишћара износи 45–109 МПа, а код четинара 26–75 МПа. Чврстоће на притисак управно на влакна није детаљније испитан и у просеку варира 0,6–9 МПа (Šoškić, Popović, 2002).

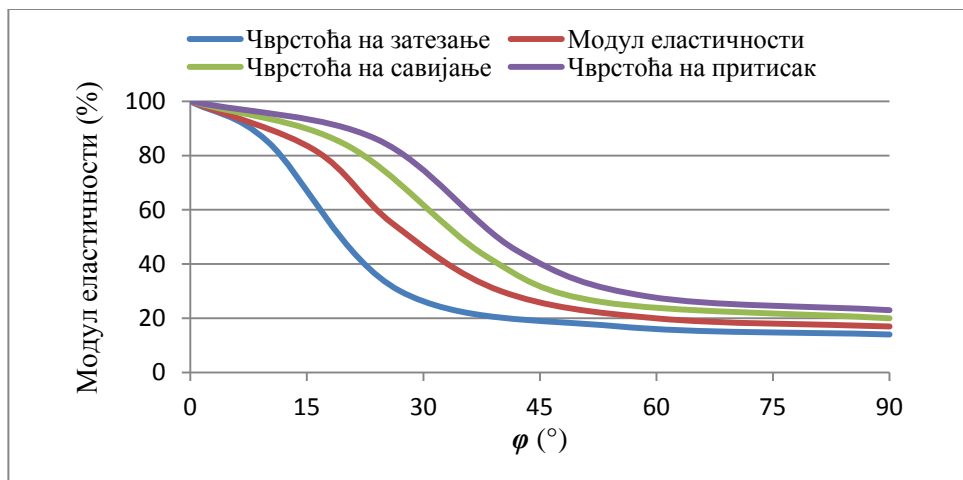
Чврстоће на затезање се, такође, веома разликују с обзиром на смер оптерећења. Много већу чврстоћу (3–10 пута) показује дрво оптерећено у смеру влакана него управно на њихов смер. Практично, анизотропија напона на затезање спада у највеће анизотропије својстава дрвета и креће се 10–40 зависно од анатомског

правца и врсте дрвета (Šoškić, Popović, 2002). Слика 3.5 приказује разлике у понашању дрвета при оптерећењу на притисак и затезање. До тачке Е важи линеарна пропорционалност између напона и деформације (Хуков закон) и при оптерећењу на притисак и на затезање.



Слика 3.5: Разлике у понашању дрвета при оптерећењу на притисак и затезање, (Кораћ, Šali, 2003)

Слика 3.6 приказује зависност чврстоће дрвета и модула еластичности од правца пружања влакана, где је евидентан утицај анизотропије својстава дрвета зависно од анатомског правца.



Слика 3.6: Зависност чврстоће дрвета и модула еластичности од правца пружања влакана, (Кораћ, Šali, 2003)

Смицање дрвета може бити паралелно са влакнима, управно и попречно на влакна. Овде је исто присутна анизотропија која је утолико већа уколико су развијеније траке дрвета.

Чврстоћа на цепање креће се у границама 0,1–1 МПа (Šoškić, Popović, 2002). На чврстоћу на цепање утиче више фактора, на првом месту то је правилност тока влакана, јер уколико је дрво правилнијег тока влакана то је отпор на цепање дрвета мањи. Затим на чврстоћу на цепање утичу и присуство трака дрвета, густина дрвета, влажност, температура итд.

Чврстоћа на савијање спада у сложене напоне с обзиром да се приликом савијања јављају напони на притисак, на затезање и на смицање. Вредности ове чврстоће варирају 5–250 МПа при стандардној влажности. На чврстоћу на савијање густина дрвета, као и код осталих механичких својстава, има позитиван утицај, а влажност, температура и присуство грешака грађе дрвета имају негативан утицај.

Тврдоћа дрвета је отпор који дрво пружа продирању некога другог тела (нпр. алата) у своју масу, односно запремину под дејством силе сталног или ударног дејства. Тврдоћа дрвета која се израчунава под дејством силе постепеног повећања интензитета назива се статичка тврдоћа, а тврдоћа која се одређује ударом куглице у површину дрвета је динамичка тврдоћа. Дрво има највећу тврдоћу на попречној површини, односно при дејству силе паралелно са влакнима. У просеку ова тврдоћа је код четинара већа за 40%, а код лишћара за 30% од бочних тврдоћа дрвета које су код већине врста приближно исте (Šoškić, Popović, 2002). Поред врсте дрвета и анатомског правца на тврдоћу утичу и густина и влажност дрвета. Тврдоћа по правилу расте са порастом густине дрвета, а опада са порастом влаге. Суво дрво је тврђе од влажног, дрво из горњег дела стабла је тврђе од оног у доњем делу, а срчевина је тврђа од белике.

3.2 Механичка обрада дрвета

Механичка технологија дрвета је наука која изучава обраду дрвета променом његове форме и запремине без измене квалитета материјала.

Механичке технологије се заснивају на својствима пластичности и дељивости дрвета. Наиме, дрво поседује способност да сачува остварену деформацију тј. форму после прекида деловања спољашњих сила (пластичност) и способност да

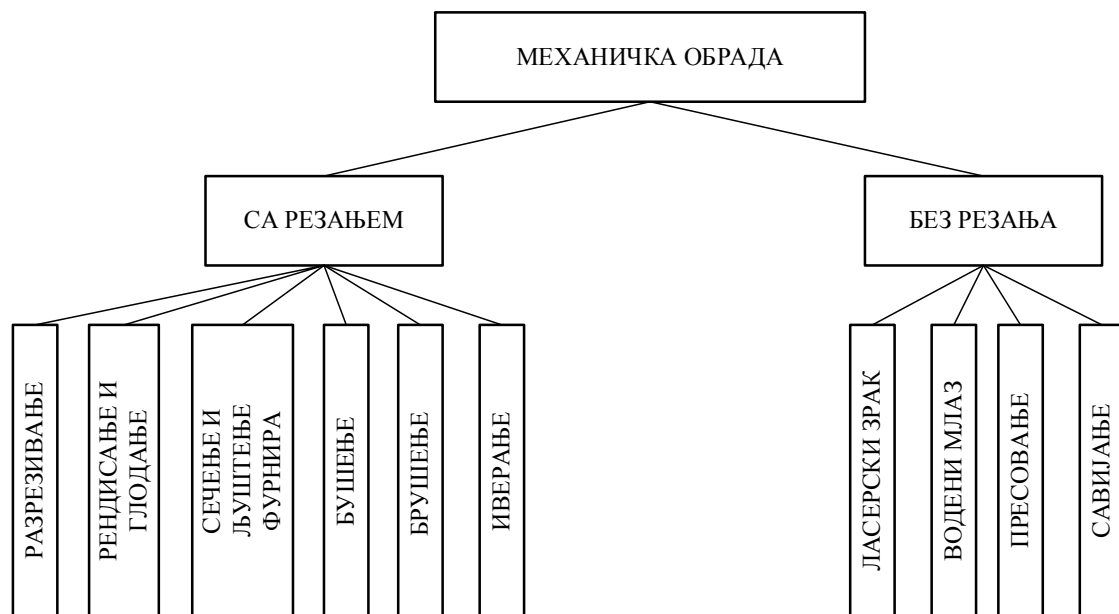
се раздваја под дејством спољашњих сила (дељивост). У зависности од ових својстава механичку обраду дрвета можемо да систематизујемо у две групе:

- обрада дрвета пластичним деформисањем и
- обрада дрвета резањем

Поступке механичке обраде дрвета могуће је класификовати на разне начине. Према (Kršljak, 2013) механичка технологија дрвета се такође, одвија у два вида:

- обрада дрвета без нарушавања веза међу дрвним влакнима, која обухвата савијање и сабијање (пресовање) дрвета и
- обрада дрвета са нарушавањем веза међу дрвним влакнима, која обухвата ситњење, цепање и резање.

Такође, механичка обрада дрвета се може поделити и на обраду са резањем и обраду без резања (Слика 3.7).



Слика 3.7: Методе механичке обраде дрвета, (Csanady, Magoss, 2013)

Механичка обрада резањем, с обзиром на дрво као материјал још увек има доминантан значај у односу на механичку обраду без резања. Теорија резања дрвета проистекла је из теорије резања метала користећи како научна тако и технолошка искуства и достигнућа, али се због специфичности дрвета као материјала изучава као посебна дисциплина.

Према (Zubčević, 1988), изучавање теорије резања, историјски гледано, имало је неколико праваца:

- Механичко-математичка теорија базира се на законитостима отпорности, односно чврстоће материјала и повезана је са израчунавањима реолошких својстава дрвета, проучавајући деформације модела у границама и преко граница еластичности.
- Физичка теорија резања испитује молекуларне промене које настају на површини клизања сечива по дрвету, што доводи до затупљивања сечива и одражава се на режим резања.
- Физичко-технолошка теорија је произашла на основу систематизације лабораторијских и технолошких резултата дајући им потребна теоретска тумачења.

Између наведених теорија не постоје оштре границе и оне се и данас настоје објединити у јединствено гледиште.

3.2.1 Основи теорије резања

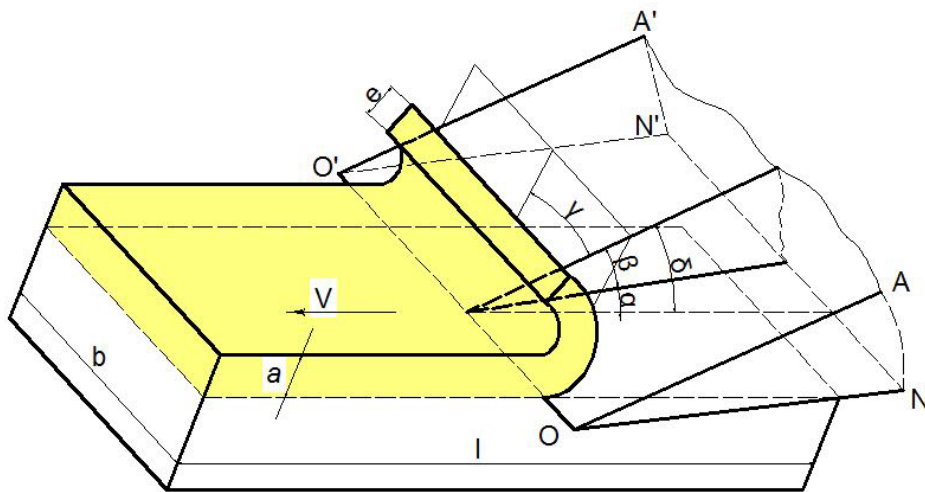
Ради лакшег разумевања интеракције алата и материјала (дрвета), пре свега је потребно размотрити елементарно резање, па потом сложеније захвате који се могу срести у пракси. Такво резање се назива елементарно резање, а сечиво у облику клина елементарно сечиво.

Према (Kršljak, 2013) карактеристике елементарног резања су:

- по целој ширини и дужини резања струготина је једнаке дебљине,
- у резању учествује само сечиво, при чему је дужина сечива већа од ширине резања
- путања сваке тачке сечива је праволинијска,
- сечиво се креће приближно једнаком брзином,
- раван резања и правац кретања сечива у тој равни, у току пролаза сечива кроз дрво, оријентисани су под одређеним (сталним углом) у односу на ток дрвних влакана.

Слика 3.8 приказује параметре елементарног (простог) резног клина: OO' – главно сечиво, OA и $O'A'$ – помоћна резна сечива, $OAO'A'$ – грудна површина, $ONON'$ – леђна површина, AON и $A'O'N'$ – бочне површине, γ – грудни угао, β – угао клина (угао оштрења), α – леђни угао, δ – угао резања.

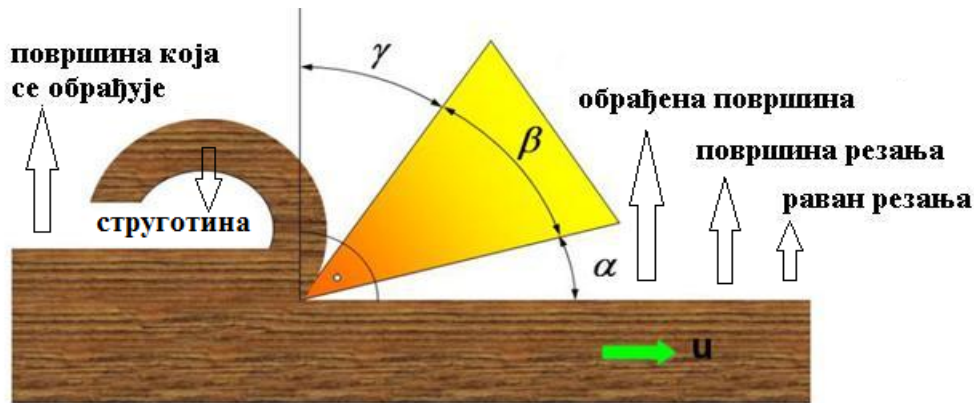
Поред ових основних елемената, који чине геометрију сечива, приказани су и параметри резног слоја (струготине): ширина резања (ширина струготине) – b , дебљина резног слоја (дебљина струготине) – e , и дужина струготине – l .



Слика 3.8: Параметри елементарног резања, (Kršljak, 2013)

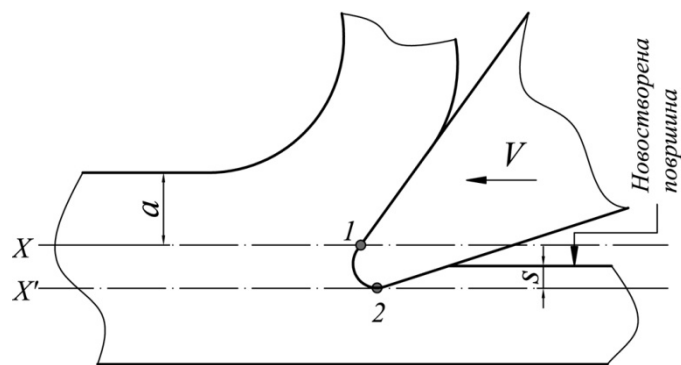
Резно сечиво има најважнију улогу при резању, да одваја, односно пресеца, дрвна влакна, у зависности од правца кретања у односу на дрвна влакна. Истовремено са пресецањем, односно одвајањем дрвних влакана, резно сечиво формира и површину резања чија храпавост зависи од радијуса заобљења. Грудна површина својим напредовањем деформише и одваја струготину од обратка. Леђна површина за разлику од грудне, нема активну улогу при резању, али између ње и обрађене површине дрвета при проласку алата долази до трења, што доводи до повећања отпора резања. Алат при резању врши притисак на дрвна влакна и утискује их. Један део те деформације је трајан, међутим, други је еластичан и настоји вратити материјал у првобитан положај. При том враћању влакана долази до трења, између леђне површине сечива и предмета рада (дрвета).

Слика 3.9 даје приказ карактеристичних површина код елементарног резања: површина која се обрађује (обрађивана површина), обрађена површина, раван резања и површина резања које се у овом случају поклапају јер је у питању праволинијско кретање сечива.



Слика 3.9: Приказ елементарног резања, (Davim, 2011)

Приликом скидања струготине најистуренија тачка на сечиву под утицајем спољне силе врши продирање у обрадак у правцу резања. Тај правац резања представља линију резања која се не поклапа са обрађеном површином (Слика 3.10).



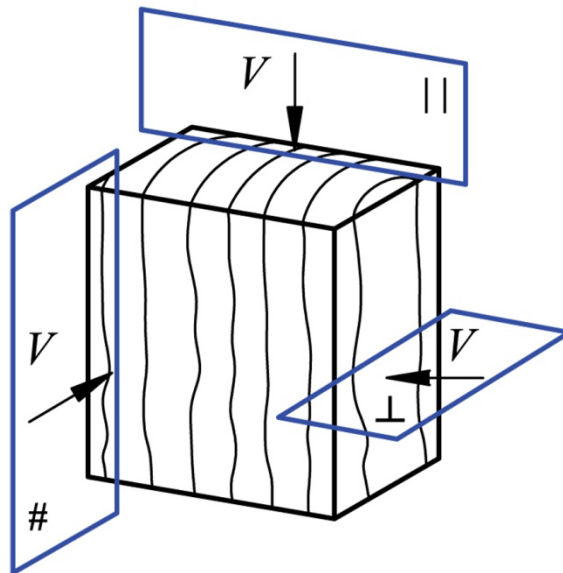
Слика 3.10: Образовање површине резања, (Goglia, 1994)

Практично, најистуренија тачка на сечиву (1) креће се путањом $x-x$, а најнижа тачка на сечиву (2) путањом $x'-x'$, тако да се дрвна влакна раздвајају у два нивоа. Материјал предмета рада изнад линије резања $x-x$ деформише се и чини струготину, док материјал испод ове линије се сабија под притиском сечива до линије $x'-x'$. Тај сабијени слој, због еластичности и пластичности дрвета, тежи да се врати у првобитни положај, односно тежи да се релаксира до линије резања,

што је немогуће због присуства трајних деформација. Последица овога је формирање новостворене површине резања са збијеним влакнима релаксационог слоја дебљине s .

3.2.1.1 Основни видови резања

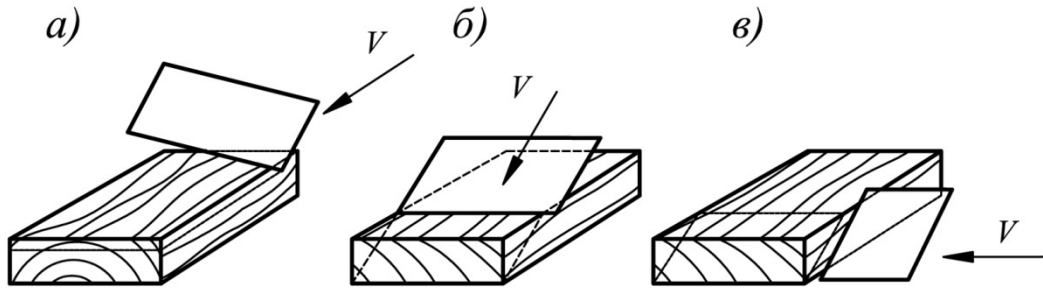
Из анизотропности дрвета проистичу различити видови резања у односу на правац пружања дрвних влакана. Разликују се три основна вида резања: лонгитудинални, радијални и тангенцијални. Они се дефинишу углом који заклапају правац сечива и правац простирања влакана и углом који заклапају правац кретања алата и правац протезања влакана. (Слика 3.11).



Слика 3.11: Основни видови резања

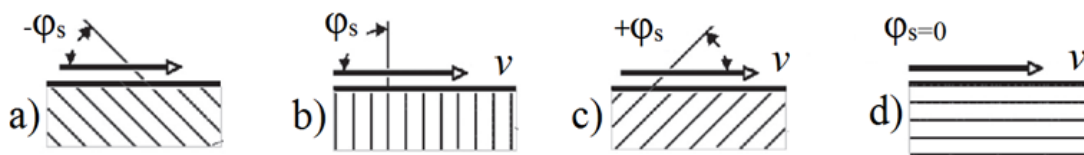
- **Лонгитудинално - подужно резање (II)**, сечиво је нормално на правац протезања влакана, а правац кретања сечива је паралелан са правцем протезања влакана.
- **Радијално - попречно резање (⊥)**, сечиво је нормално на правац протезања влакана, а правац кретања сечива је такође нормалан у односу на правац протезања влакана.
- **Тангенцијално резање (#)**, сечиво је паралелно са правцем протезања влакана, а правац кретања алата је управан на правац протезања влакана.

Слика 3.12 приказује прелазне облике резања који су више заступљени од основних видова: а) уздужно-тангенцијални (II - #), б) уздужно-попечно (II - ⊥) и в) тангенцијално-попечно (# - ⊥) и њихова комбинација која се назива попречно-радијално-тангенцијални вид резања.



Слика 3.12: Прелазни видови резања: а) уздужно-тангенцијално, б) уздужно-попечно, в) тангенцијално-попечно

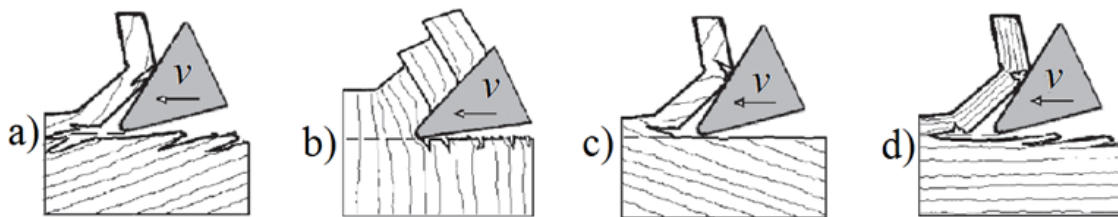
Новија истраживања (Goli et al., 2001a, 2002, 2003, 2009; Porankiewicz, Goli, 2014) испитују промене у механици резања код различитих праваца резања у односу на правац протезања (орјентацију) дрвних влакана. Орјентација дрвних влакана је веома важан параметар у обради дрвета који утиче на квалитет обрађене површине и силе резања и дефинише се преко угла који заклапа правац протезања дрвних влакана са правцем вектора брзине резања φ_s . С тим у вези постоје четири главна правца резања у односу на правац протезања дрвних влакана (Слика 3.13).



Слика 3.13: Основни правци резања: а) уз дрвна влакна, б) попречно на влакна, с) низ влакна, д) паралелно са влакнима, (Porankiewicz, Goli, 2014)

Слика 3.14 приказује начине формирање струготине за различите правце резања. Када је угао који заклапа правац протезања дрвних влакана и правац вектора брзине резања $\varphi_s = 0^\circ$, типичан резултат резања су ниске вредности сила резања и добар квалитет обрађене површине у односу на остале вредности угла φ_s (Слика 3.13d, Слика 3.14d).

Када је вредност угла φ_s између -90° и 0° , односно када је у питању резање уз дрвна влакна пукотина се може проширити испод равни резања и резултира оштећењем површине (Слика 3.13а, Слика 3.14а), што је у потпуној супротности резултатима резања низ дрвна влакна (Слика 3.12с, Слика 3.13с) када је вредност угла φ_s између 0° и 90° .



Слика 3.14: Формирање струготине за различите правце резања: а) уз дрвна влакна, б) попречно на дрвна влакна, с) низ дрвна влакна, д) паралелно са дрвним влакнима, (Porankiewicz, Goli, 2014)

Слика 3.13б и Слика 3.14б приказују резање попречно са дрвним влакнима. Највеће силе резања и најлошији квалитет обрађене површине забележен је код попречног резања, док подужно резање даје најниже вредности сила резања и најбољи квалитет обрађене површине (Costes et al., 2004; Porankiewicz, Goli, 2014).

3.2.1.2 Формирање струготине при резању

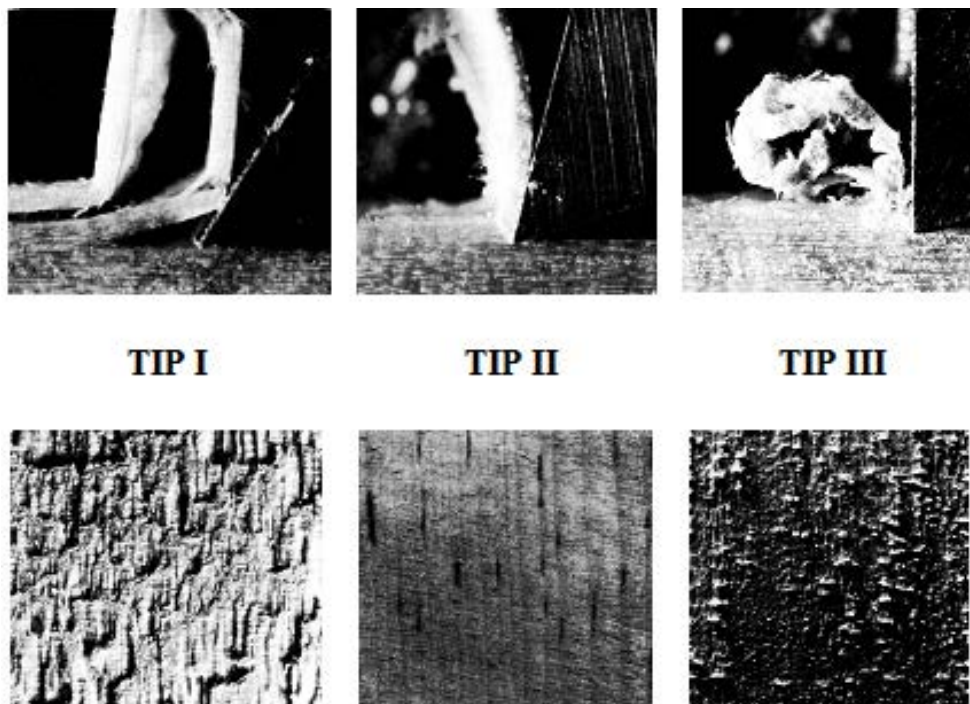
Код процеса резања, анализа облика струготине се често користи за карактеризацију самог процеса резања. Струготином се назива одстрањени слој дрвета који се формира на грудној површини сечива. Начин формирања струготине има велики значај јер деформације које настају том приликом имају битан утицај на величине отпора резања, квалитет обрађене површине и утрошке енергије. Облик струготине зависи од више параметара међу којима су: структура, влажност и својства дрвета, елементи геометрије сечива, елементи режима резања, вид резања и др.

Ранија истраживања у области теорије резања метала (Ernst, 1938; Merchant, 1944) представљају базу за анализу корелација између услова резања и деформације струготине кроз описивање пластичних деформација процеса обраде изотропних материјала. Међутим, како је дрво анизотропан материјал облик струготине се мења у зависности од правца резања, што дрво чини веома непредвидивим у току обраде. Због великих разлика чврстоће дрвета у

различитим правцима, угао сечива у односу на правац протезања влакана, као и угао који заклапају правац резања и правац протезања влакана су најзначајнији параметри који утичу на процес резања. Код елементарног резања пресудан утицај на структуру и облик струготине има вид резања.

Ранија истраживања, углавном, анализирају машинску обраду паралелно и управно са влакнима (Axelsson 1993, 1994; Franz, 1958; Koch 1964; McKenzie 1961), док се новије студије баве обрадама при различитим угловима резања у односу на правац протезања дрвних влакана (Costes et al., 2004; Goli et al., 2002, 2003, 2009).

Код ортогоналног резања истраживања у области формирања струготине у зависности од услова резања спровели су Franz (1958), Koch (1964) и McKenzie (1961). Слика 3.15 приказује три типична облика струготине код подужног резања и обрађене површине настале формирањем струготине одговарајућег типа (Franz, 1958).



Слика 3.15: Основни типови струготине и формиране површине, (Franz, 1958)

- Тип I је пожељан када се захтева брзо отклањање материјала и карактеристичан је за велике грудне углове и велике дебљине струготине.

- Тип II је карактеристичан за мале дебљине струготине и даје најбољи квалитет обрађене површине.
- Тип III настаје услед малог грудног угла и тупог алата и даје лош квалитет обрађене површине.
- У наставку биће детаљније анализиран сваки тип струготине.

Тип I се формира када су услови резања такви да се слој који се скида цепањем одваја испред грудне површине алата све док не дође до лома при савијању. Формирање струготине овог типа је циклично. Кретањем алата, сечиво долази у контакт са предметом обраде. Даљим напредовањем алата долази до напрезања дрвета испред сечива све до достизања максималне чврстоће на цепање, које изазива одвајање дрвета дуж влакана. Струготина се креће уз грудну површину и цепање се наставља све до достизања критичне чврстоће на савијање. Даљим кретањем, алат наставља да савија струготину све док сечиво поново не дође у контакт са дрветом. Та тачка представља крај једног и почетак наредног циклуса. Фактори који утичу на стварање првог типа струготине су:

- Мали отпор на цепање
- Велика крутост и чврстоћа дрвета при савијању
- Велика дебљина струготине
- Велики грудни угао
- Велико трење између струготине и грудне површине алата

Квалитет површине која се ствара приликом формирања струготине овог типа карактерише мноштво оштећених дрвних влакана познатих као “chipped grain” дефект.

Тип II настаје када се одвајање струготине од обрађеног дела дешава по линији која се протеже од резне ивице до предмета рада. У одређеном опсегу услова обраде долази до континуалног нарушавања везе између предмета обраде и струготине у равни резања, почев од сечива и простирући се испред њега.

Квалитет обрађене површине која се ствара приликом настајања струготине овог типа је одличан. Стога, стварање струготине типа II представља идеалан процес

резања са становишта квалитета обрађене површине остављајући обрађену површину униформном и без оштећења. Овај тип струготине је карактеристичан за мале дебљине струготине. Настаје код режима резања који се по својим вредностима налазе између вредности режима који одговарају струготини типа I и струготини типа III. С тим у вези, пажљивим одабиром вредности режима резања може се утицати на формирање овог типа струготине.

Тип III се јавља услед појаве напрезања на притисак и смицања испред сечива. Слично као код типа I, формирање струготине је циклично. Циклус почиње када сечиво алата дође у контакт са предметом обраде при чему настаје напрезање на притисак паралелно са влакнима. Даљим напредовањем алата у дрво долази до пуцања дрвета услед превеликих напона на смицање и притиска паралелно са влакнима. За разлику од претходних типова, у овом случају настала струготина се не повлачи уз грудну површину алата, већ остаје заробљена, што изазива даље сабијање дрвета испред грудне површине алата. Коначно, када количина сабијене струготине постане критична, долази до њеног извијања и ослобађања. Циклус се завршава када сечиво алата поново дође у контакт са предметом обраде. Следећи фактори утичу на формирање овог типа струготине:

- Туп алат
- Мали позитиван или негативан грудни угао
- Велико трење између струготине и грудне површине алата.

Квалитет површине која се ствара приликом формирања струготине овог типа карактерише велики број лабаво везаних дрвних снопића познатих као “fuzzy grain” дефект.

При подужном резању настаје најкомпактнија струготина у односу на остале видове резања и њен облик пре свега зависи од дебљине одрезаног слоја и угла резања δ . Ако је одрезани слој мале дебљине (танка струготина) и угао сечива мали, струготина се формира у облику спирале (спирална струготина). Ако је струготина веће дебљине и већи угао резања, формирана струготина је мање еластична и ломи се на мање елементе (ломљена струготина). При великом углу резања на сечиву се формирају наслаге збијене струготине у близини сечива и струготина се деформише (деформисана струготина).

При подужном глодању, у зависности од дубине глодања односно дебљине струготине, могу настати два основна типа струготине (Zubčević, 1988): први тип или спирална струготина и други тип када се ствара пред пукотина испред сечива. За дебљину струготине мању од 0,25 mm карактеристична је спирална форма. Спирална струготина може настати и код већих дебљина, ако је угао резања мали (Voskresenskij, 1955). Такође, први тип струготине може настати и при њеним већим дебљинама и при већем углу резања ако је велико трење између струготине и предње стране сечива. Код другог типа струготине карактеристично је стварање пред пукотине испред сечива при њеном продирању кроз дрво, што је последица слабе чврстоће дрвета на цепање, односно велике чврстоће на савијање. Овако створена струготина у облику конзоле која је отпорна на савијање, не ломи се и клизи по површини сечива формирајући пред пукотину испред сечива. Овакав тип струготине настаје при већој влажности дрвета, већој дебљини струготине и мањем трењу између струготине и предње стране сечива.

Између ова два основна типа струготине могу настати и различити међутипови. Ако је струготина дебља од 0,25–0,30 mm формираће се као многоугаона спирала са одресцима приближно истих дужина. Дебљина струготине од 0,70–0,80 mm било да је спирална или многоугаона, ствара обрађену површину непосредно са сечивом што резултира мање храпавом површином. Ако је струготина дебља од 1 mm, настаје у испрекиданом облику и ствара пред пукотину испред сечива. Када је путања резања паралелна са смером протезања дрвних влакана пред пукотина ће се формирати испред сечива. Међутим, овако идеалан случај је редак у пракси. Најчешће сечиво пресеца дрвна влакна под малим углом, тако да се пред пукотина ствара испод површине резања. Због неподударности смера кретања сечива и протезања дрвних влакана, површина резања биће храпавија.

При попречном резању, сечиво пресеца дрвна влакна између којих је веза веома слаба и струготина се растреса на ситне елементе. Грудна површина сечива одваја настале елементе струготине од основне масе дрвета, а испод линије резања јавља се раслојавање влакана, односно формирају се мање или веће пукотине (Zubčević, 1988). Испитујући попречно резање McKenzie (1961) је настале пукотине, односно форме струготине, груписао у две основне групе тип I

(Ia и Ib) и тип II (IIa и IIб). Карактеристике пукотина Ia је да су кратке и правилне, док су Ib дуге и појављују се између две или више пукотина. Тип II је карактеристичан по томе што се пукотине појављују у равни управној на смер протезања влакана и то на променљивој удаљености. Садржај воде, такође, има битан утицај на формирање струготине, тип I преовладава код високог садржаја влаге у дрвету, док тип II преовладава код ниског садржаја влаге. На силе резања, у овом правцу, јак утицај имају ћелијска структура дрвета, садржај влаге, дубина глодања и грудни угао сечива.

Код тангенцијалног вида резања, веза између дрвних влакана је најслабија, па се струготина лако одваја од остатка дрвета (Kršljak, 2013). Наиме, специфичан отпор резања је мањи код тангенцијалног резања него код подужног или попречног што се објашњава тиме да се код тангенцијалног резања појављују значајне еластичне и заостале деформације сабијања, а отпори таквим деформацијама су релативно мали (Zubčević, 1988). Положај дрвних влакана у односу на сечиво, у случају тангенцијалног вида резања, може бити у радијалној равни (стругање) или у тангенцијалној равни (добијање фурнира љуштењем). Ако сила делује тангенцијално на дрвна влакна отпор дрвета на истезање је најмањи, док је већи на смицање, а највећи на сабијање. Практично, у зависности од тога који напони брже изазивају гранична напрезања, тј. границу еластичности, односно чврстоће, настаје и одговарајући тип струготине.

3.2.1.3 Силе резања при праволинијском резању

При продирању сечива у обрадак (дрво) под дејством спољашње силе (акције) јавља се отпор дрвета који пружају дрвна влакна у облику унутрашње силе (реакција). Према извору (Goglia, 1994) јављају се силе међусобног дејства, са једне стране сила резања која је једнака резултанти пројекција које при резању делују на обрадак, а са друге стране јављају се отпорне силе које сеprotиве продирању сечива. Спољашње силе резања (силе резања) и унутрашње силе (отпор дрвета резању) имају исте правце, али супротне смерове. Да би се извршило резање, односно да би се савладао отпор, спољашње силе по величини морају бити једнаке или веће од унутрашњих сила.

При продирању алата у предмет обраде по површини радне зоне (површина контакта) јављају се нормални напони притиска и тангенцијална сила трења. Нормалан притисак јавља се сваки пут, када два крута тела ступају у контакт и по правилу он је нормалан на површину контакта. Ако при нормалном притиску једно тело клизи по другом јавља се сила трења и делује тангенцијално на контуру радне зоне у посматраној тачки. Сила трења изазива у равни контакта тангенцијални напон. Величина тангенцијалног напона и силе трења у некој тачки одређује величина нормалног напона (притиска) и коефицијента трења:

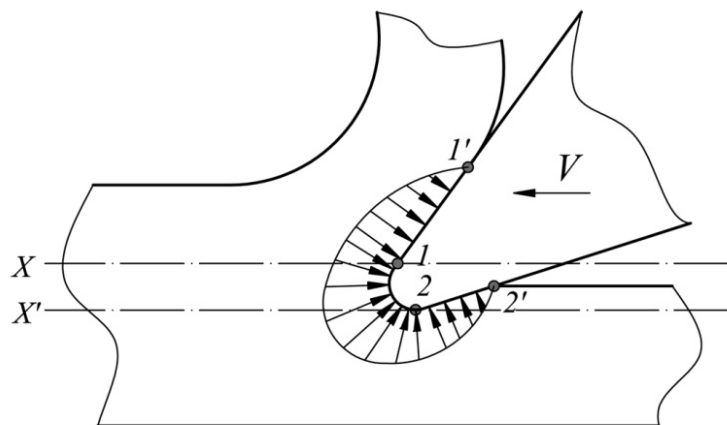
$$\tau = \sigma_p \cdot f \quad (2.1)$$

$$F_t = F_n \cdot f \quad (2.2)$$

где је: τ – тангенцијални напон, σ_p – нормални напон притиска, F_n – нормална сила притиска и f – коефицијент трења.

Једно од основних питања теорије резања је расподела нормалног напона притиска и силе трења по контури радне зоне резног елемента. Од те расподеле зависи тачност одређивања силе резања, постојаност алата и оптимални режими обраде.

Слика 3.16 приказује деловање унутрашњих сила на алат, при чему је цело подручје деловања сила подељено на три дела.



Слика 3.16: Приказ деловања отпорних сила на резни клин, (Gogliа, 1994)

Током резања, грудна површина изложена је притисцима струготине (подручје 1–1'), резна ивица изложена је притисцима сабијеног материјала испред сечива

(подручје 1–2), а на леђну површину делује притисак услед релаксације напона након проласка сечива (2–2'). Највећи отпор дрвета је на најистуренијој тачки сечива.

3.2.1.4 Силе на грудној површини

Слика 3.17 приказује силе резања на грудној површини. Резултујућа нормална сила на грудној површини је:

$$F_{ng} = \sigma_p \cdot l \cdot b$$

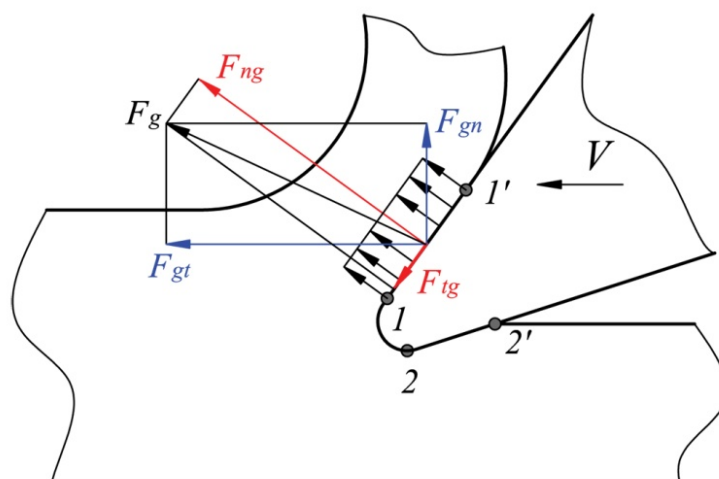
где је: l – дужина контакта грудне површине резног елемента са струготином, односно дужина подручја (1–1'), b – ширина контакта.

Сила трења на грудној површини је $F_{tg} = F_{ng} \cdot f_g$, где је f_g – коефицијент трења грудне површине резног елемента и струготине.

Резултујућа сила, којом грудна површина резног елемента делује на струготину добија се векторским збиром нормалне силе и силе трења:

$$\vec{F}_g = \vec{F}_{ng} + \vec{F}_{tg} \quad (2.3)$$

Силу F_g можемо разложити на два правца (у правцу брзине резања–тангенцијални и управно на тај правац–нормални) и добијамо тангенцијалну силу F_{gt} и нормалну силу F_{gn} .

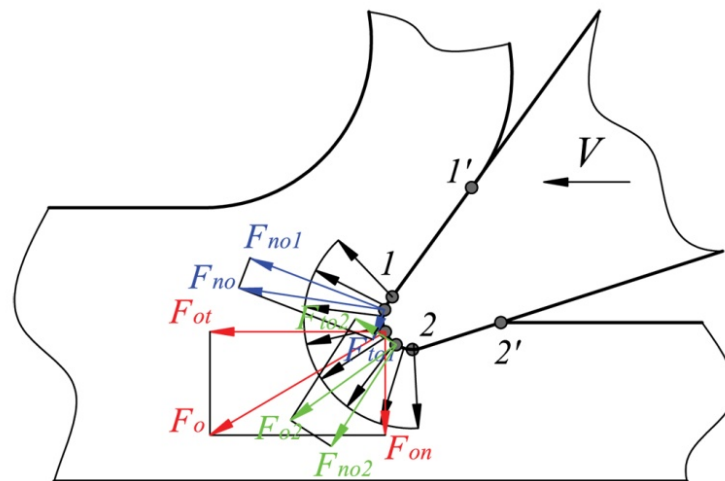


Слика 3.17: Силе на грудној површини, (Goglia, 1994)

На основу приказаног може се видети да сила на грудној површини зависи од врсте и својстава предмета обраде (σ_p), угла резања δ , коефицијента трења струготине по грудној површини резног елемента f_g , а такође и од дубине уласка резног елемента у предмет обраде посматрано од почетка резања, јер од те величине зависи дужина контакта l .

3.2.1.5 Силе на резном сечиву

Слика 3.18 приказује силе на главним резном сечиву. Контура сечива (дужина 1-0-2) може се посматрати састављена из два дела; дужина 1-0 и дужина 0-2. Ако сумирамо расподелу нормалног притиска по контури 1-0 добијамо резултујућу концентрисану силу F_{no1} . Ако такође, по контури сумирамо силу трења која се јавља услед присуства нормалног притиска на сечиво и клизања сечива по предмету обраде од тачке 1 ка тачки 0, добијамо резултујућу концентрисану силу F_{to1} . Слагањем F_{no1} и F_{to1} добијамо силу деловања дела 1-0 на дрво F_{o1} . Аналогно за део сечива 0-2 имамо резултанту нормалног притиска F_{no2} , резултујућу силу трења F_{to2} и резултујућу силу дејства дела сечива 0-2 на предмет обраде F_{o2} .



Слика 3.18: Силе на резном сечиву, (Goglia, 1994)

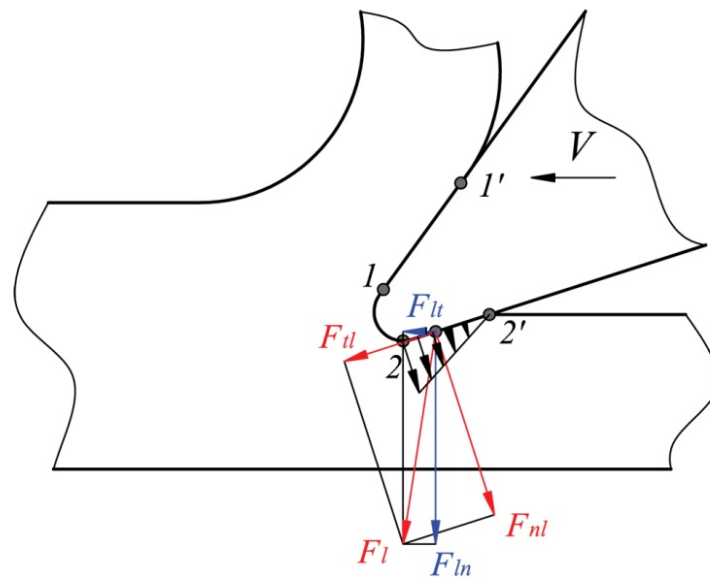
Векторским збиром ових двеју сила добијамо резултујућу силу дејства сечива на предмет обраде:

$$\vec{F}_o = \vec{F}_{o1} + \vec{F}_{o2} \quad (2.4)$$

Силу F_o можемо разложити на два управна правца, тангенцијални у правцу трајекторије резања F_{ot} и нормално на тај правац – нормални F_{on} . Фактори процеса резања који утичу на величину ових сила су: полупречник заобљења сечива ρ и углови резног клина α и δ (ове величине одређују дужину лука контакта), нормалан притисак σ_p по контури сечива и коефицијент трења сечива и материјала припремка f_o .

3.2.1.6 Силе на леђној површини

При резању резни клин притискује (гњечи) предмет обраде по контури 2-2' (Слика 3.19). Уколико је величина радијуса ρ мала, може се узети да се деформација дрвета одвија у зони еластичних деформација. Притисак у том случају је пропорционалан деформацији предмета обраде у датој тачки; највећи је у тачки 2, а најмањи једнак 0, у тачки 2', где се предмет обраде не деформише.



Слика 3.19: Силе на леђној површини, (Goglia, 1994)

Резултујућа нормална сила на леђној површини је F_{nl} а резултујућа сила трења је F_{tl} . Укупна сила на леђној површини је:

$$\vec{F}_l = \vec{F}_{nl} + \vec{F}_{tl} \quad (2.5)$$

коју можемо раставити на тангенцијалну F_{tl} и нормалну F_{nl} компоненту.

3.2.1.7 Укупна сила на резном клину алата

Да би се добила укупна сила која делује са резног елемента на предмет обраде F неопходно је сабрати векторски силе које делују на поједине делове:

$$\vec{F}_{uk} = \vec{F}_g + \vec{F}_o + \vec{F}_l \quad (2.6)$$

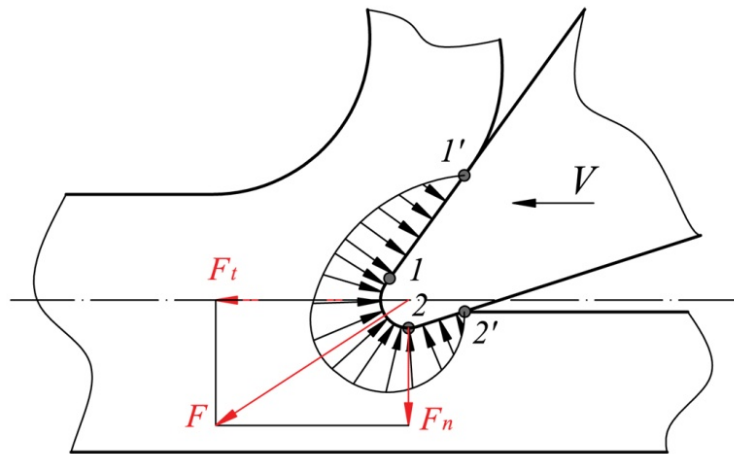
Такође, укупну силу F (Слика 3.20) можемо добити као векторски збир резултујуће тангенцијалне и резултујуће нормалне силе:

$$\vec{F}_{uk} = \vec{F}_t + \vec{F}_n \quad (2.7)$$

где се компоненте рачунају на следећи начин:

$$F_t = F_{gt} + F_{ot} + F_{lt} \quad (2.8)$$

$$F_n = F_{gn} + F_{on} + F_{ln} \quad (2.9)$$



Слика 3.20: Резултујућа сила на резном клину, (Goglia, 1994)

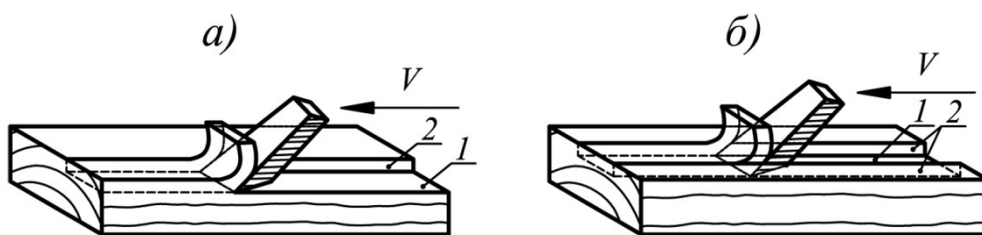
Тангенцијалну силу F_t називамо главном силом резања. Она делује у правцу трајекторије резања у смеру кретања резног елемента. Нормална сила F_n јавља се као сила гњечења (резни клин гњечи предмет обраде леђном површином у страну масива) или као сила затезања (резни клин затеже предмет обраде у страну одрезане струготине). Обично се сила гњечења јавља при одрезивању танке струготине резним елементом са већим углом резања, а сила затезања при одрезивању дебље струготине оштрим резним клином при малом углу резања.

3.2.2 Теорија сложеног резања

У обради дрвета значајно више од елементарног резање заступљено је сложено резање. Према Кршљаку (Kršljak, 2013) карактеристике сложеног резања су:

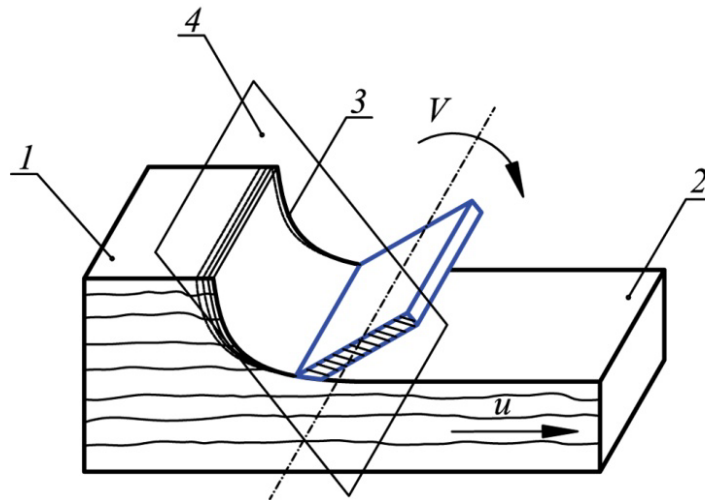
- дебљина струготине по дужини резања, односно по пролазу сечива може да буде једнака и неједнака,
- у резању поред главног сечива учествују и помоћна резна сечива
- путања резања може да буде и крива линија,
- када је путања резања криволинијска у једном пролазу сечива кроз дрво, угао између равни резања и тока дрвних влакана није сталан.

Ако у процесу резања, поред главног сечива учествује једно помоћно сечиво резање је полузатворено, а када су у процесу резања, поред главног сечива, ангажована и помоћна сечива резање је затворено (Слика 3.21). У оба наведена случаја сложеног резања при праволинијском кретању алата дужина главног сечива је краћа од ширине предмета обраде. Главно сечиво алата обрађује главну (доњу) површину резања, а помоћна сечива истовремено обрађују бочне површине резања, док резни клин врши праволинијско кретање у смеру вектора брзине v .



Слика 3.21: Сложено резање при праволинијском кретању алата; а) полузатворено резање: 1 – главна површина резања, 2 – бочна површина резања и б) затворено резање: 1 – главна површина резања, 2 – бочне површине резања

Један од честих случајева сложеног резања је глодање, код ког резни клин ротира (кружно кретање алата) и угао зуба у захвату φ се стално мења за време док је резни клин у контакту са предметом обраде (Слика 3.22).



Слика 3.22: Сложено резање при ротационом (кружном) кретању алата

Површина резања 3 је криволинијска, она представља прелаз између обрађиване површине 1 и обрађене површине 2. Раван резања 4 је тангента на површину резања и пролази кроз главно сечиво резног клина.

3.2.2.1 Параметри процеса сложеног резања – обрада глодањем

Глодање је један од веома распрострањених видова обраде у финалној преради дрвета. Глодањем се могу вршити различите технолошке операције и то равнање, профилисање, израда отвора и криволинијска обрада што зависи од типа машине и врсте алата. Спада у сложене видове резања јер се при кружном кретању алата угао између равни резања и правца простирања влакана мења док је сечиво у контакту са дрветом.

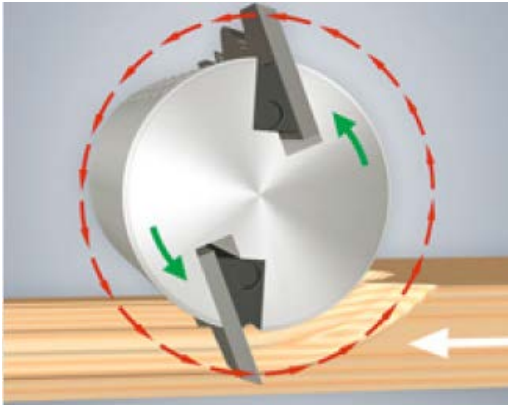
3.2.2.2 Кинематика глодања

Процес глодања настаје при равномерном кретању резног сечива (главно кретање) и равномерном кретању обратка (помоћно кретање).

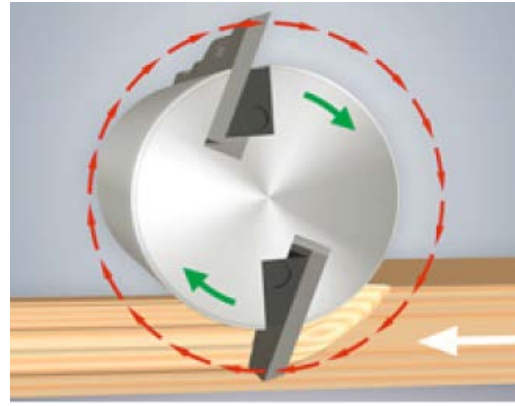
Најважнији параметри обраде су:

- брзина резања (v),
- брзина помоћног кретања (u),
- корак по зубу (s_z),
- дубина резања (a).

Смер кретања предмета обраде у односу на смер обртања алата може бити супротносмеран и истосмеран (Слика 3.23 и Слика 3.24)



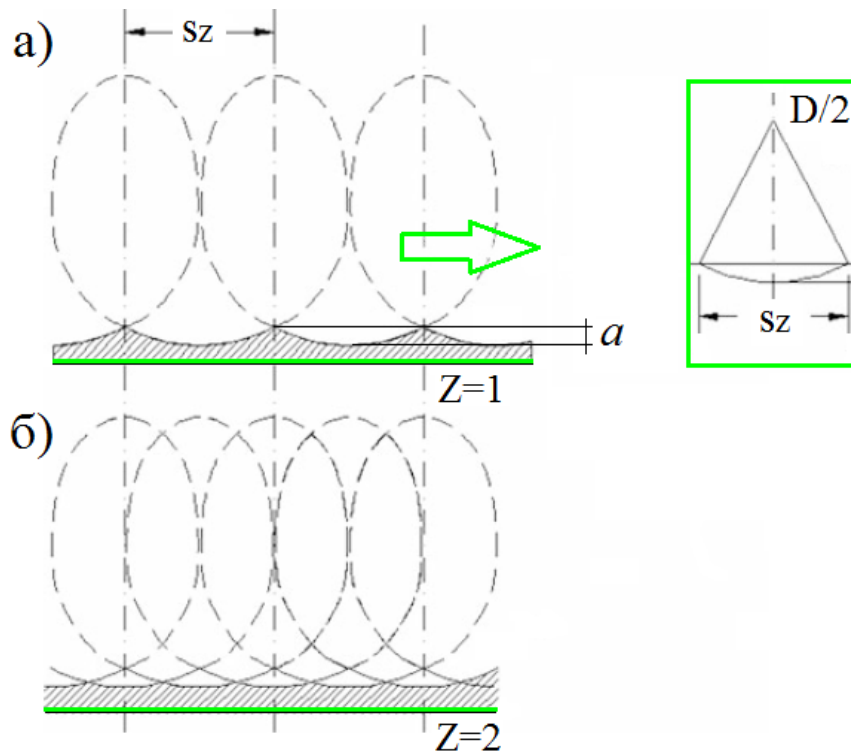
Слика 3.23: Супротносмерно глодање



Слика 3.24: Истосмерно глодање

Код супротносмерног глодања глодало врши кружно кретање са константном угаоном брзином у супротном смеру од смера кретање обратка. Код истосмерног кретања глодало врши кружно кретање са константном угаоном брзином у истом смеру са кретањем обратка.

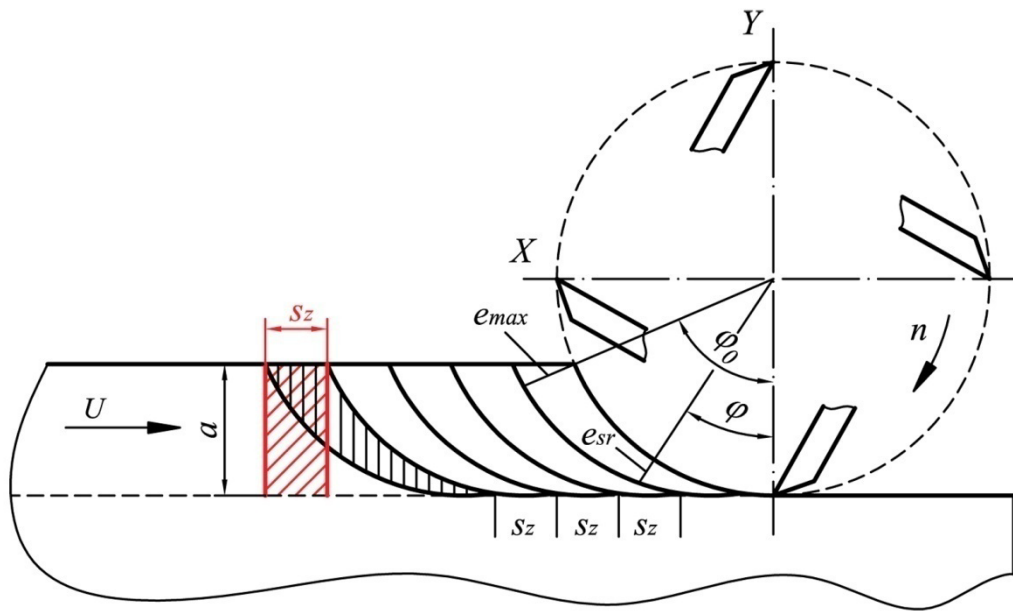
При слагању две врсте кретања (кружног и праволинијског) трајекторија кретања резног сечива у односу на покретни координатни систем везан за обрадак који се помера праволинијски изражава се кривом која се назива циклоида (Слика 3.25).



Слика 3.25: Крива резултујућег кретања глодала – циклоида, а) резултујуће кретање за глодало са једним зубом, б) резултујуће кретање за глодало са два зуба

Струготину коју при глодању формира једно сечиво, карактеришу три параметра: дужина, ширина и дебљина. Као што је напред истакнуто, ако храпавост површине зависи од вида стварања струготине зависи и од њене дебљине. Дебљина струготине код глодања има променљиву величину у току резања. Код супротносмерног глодања дебљина струготине расте од нуле и достиже своју максималну вредност у непосредној близини излазне тачке сечива из предмета рада, а код истосмерног глодања струготина на месту улаза сечива има своју максималну вредност, док на излазу има вредност нула.

При одређивању параметара обраде, користи се Фишера формула где је трајекторија кретања резне ивице такође кружница. При овом се полази од претпоставке да алат врши и главно и помоћно кретање, а да обрадак мирује (Слика 3.26).



Слика 3.26: Приказ обимног глодања

Дебљина струготине за дату тачку лука контакта при резању израчунава се према Фишеровој формули облика:

$$e = s_z \cdot \sin \varphi \quad [mm] \tag{2.10}$$

где је: e – дебљина струготине у датој тачки резног сечива на луку резања (луку контакта) за угао контакта φ_0 [mm], s_z - корак по зубу [mm], φ – тренутни угао захвата сечива глодала [rad].

Угао φ у току одвајања струготине мења своју вредност, тако да на излазу сечива достиже вредност угла φ_0 када и дебљина струготине код супротносмерног глодања достиже максималну вредност, а код истосмерног глодања вредност нула.

Када је по трајекторији кретања тренутни угао $\varphi = \frac{\varphi_0}{2}$, дебљина струготине има средњу вредност (номинална дебљина струготине), која следи из претходне формуле:

$$e_{sr} = s_z \cdot \sin\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) \tag{2.11}$$

Средња дебљина струготине се може изразити из услова једнакости бочних површина стварне и претпостављене номиналне средње дебљине струготине:

$$e_{sr} \cdot l = s_z \cdot a, \text{ односно } e_{sr} = \frac{s_z \cdot a}{l}.$$

Употребом тригонометријског израза: $\sin \frac{\varphi_o}{2} = \sqrt{\frac{1 - \cos \varphi_o}{2}}$ и заменом

$\cos \varphi = \frac{R - a}{R}$ у претходном изразу добија се $\sin \frac{\varphi_o}{2} = \sin \varphi = \sqrt{\frac{a}{D}}$. Из тога следи да

је угао $\varphi = \varphi_o = \arcsin \sqrt{\frac{a}{D}}$, па средња вредност дебљине струготине добија

облик:

$$e_{sr} = s_z \cdot \sin \frac{\varphi_o}{2} = s_z \cdot \sqrt{\frac{a}{D}} \quad (2.12)$$

Дужина струготине лука резања је $l = R \cdot \varphi_o = \frac{s_z \cdot a}{e_{sr}} = \frac{s_z \cdot a}{s_z \cdot \sin \frac{\varphi_o}{2}}$, па је $l = \sqrt{a \cdot D}$.

Из формуле $l = R \cdot \varphi_o$ произилази да је угао контакта:

$$\varphi = \frac{l}{R} = \sqrt{\frac{a \cdot D}{R}} = \sqrt{\frac{2a \cdot R}{R^2}} = \sqrt{\frac{2a}{R}} \quad (2.13)$$

Максималну дебљину струготине израчунавамо из формуле $e_{\max} = s_z \times \sin \varphi_o$.

Заменом $\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$ добија се израз $e_{\max} = s_z \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$. Такође, заменом

$\cos \varphi = 1 - \frac{a}{R}$ следи $e_{\max} = s_z \cdot \sqrt{1 - (1 - \frac{a}{R})^2} = s_z \cdot \sqrt{1 - (1 - \frac{2a}{R} + \frac{a^2}{R^2})}$. Ако се

претпостави да је $\frac{a^2}{R^2} \approx 0$ следи да је $e_{\max} = s_z \cdot \sqrt{\frac{4a}{D}}$ и коначно израз за

максималну дебљину струготине добија облик:

$$e_{\max} = 2s_z \cdot \sqrt{\frac{a}{D}} = 2e_{sr} \quad (2.14)$$

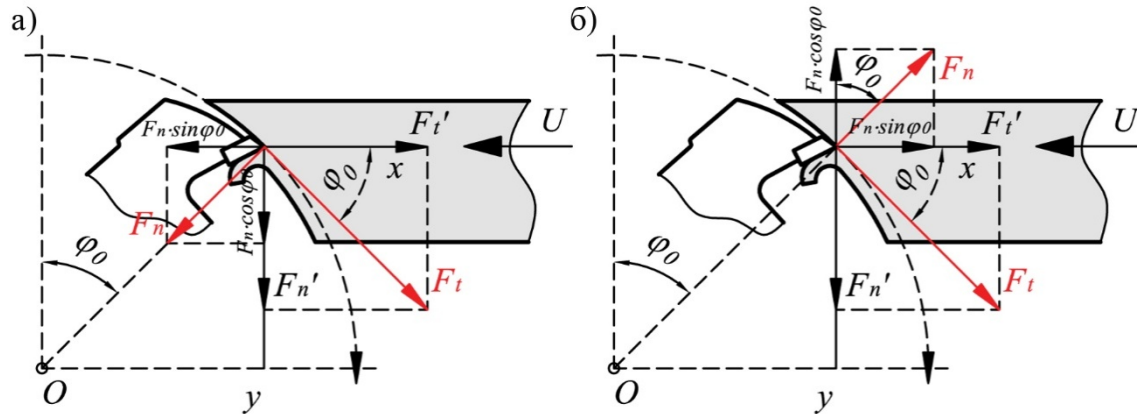
Како је $u = s_o \cdot n = s_z \cdot z \cdot n$ изложени параметри се изражавају на основу корака по зубу преко формуле $s_z = \frac{u}{n \cdot z}$ и функционално су зависни од брзине помоћног кретања.

3.2.2.3 Силе резања при обради глодањем

При глодању, услед променљивог правца кретања сечива јавља се сила резања по тангенти трајекторије резања и назива се тангенцијална сила (F_t). Силу резања добијамо алгебарским збиром тангенцијалних сила резања према релацији $F_t = F_{gt} + F_{ot} + F_{lt}$, где су F_{gt} – резултујућа тангенцијална сила на грудној површини алата, F_{ot} – резултујућа тангенцијална сила на резном сечиву и F_{lt} – резултујућа тангенцијална сила на леђној површини алата (Слика 3.17, Слика 3.18, и Слика 3.19).

Такође, јављају се збирне радијалне силе које дејствују по радијусу трајекторије резања. Оне могу бити силе истискивања или силе привлачења у зависности од услова резања. Радијална сила (F_n), при кружном резању, делује у правцу радијуса у смеру ка центру 0 (Слика 3.27а), када је $F_{on} + F_{ln} < F_{gn}$ или у смеру од центра 0 (Слика 3.27б), када је $F_{on} + F_{ln} > F_{gn}$, где су F_{on} – резултујућа радијална сила на резном сечиву, F_{ln} – резултујућа радијална сила на леђној површини алата и F_{gn} – резултујућа радијална сила на грудној површини алата (Слика 3.17, Слика 3.18, и Слика 3.19).

У току глодања силе имају променљив смер у односу на положај сечива. Слагањем тангентних и радијалних сила добијају се силе које делују у правцу помоћног кретања и силе нормално на правац помоћног кретања.



Слика 3.27: Силе резања при кружном кретању

У процесу резања, резни клин и обрадак су у међусобном узајамном дејству (интеракцији), а то значи да истовремено и на истом месту, постоје силе дејства резног клина на обрадак и противдејство силе предмета обраде на резни клин, у истом правцу али супротном смеру (отпор дрвета).

Пројекција силе F_t на правац брзине помоћног кретања даје силу отпора помоћном кретању:

$$F'_t = F_t \cos \varphi_0 - F_n \sin \varphi_0 \tag{2.15}$$

односно

$$F'_t = F_t \cos \varphi_0 + F_n \sin \varphi_0 \tag{2.16}$$

где је φ_0 – угао захвата.

Алгебарски збир вертикалних пројекција сила F_t и F_n даје резултујућу силу нормалну на правац брзине помоћног кретања:

$$F'_n = F_t \sin \varphi_0 + F_n \cos \varphi_0 \tag{2.17}$$

односно

$$F'_n = F_t \sin \varphi_0 - F_n \cos \varphi_0 \tag{2.18}$$

Ако је F'_n оријентисана наниже она притеже предмет ка радном столу, а ако је усмерена навише она тежи да одигне предмет од радног стола машине.

3.2.2.4 Фактори који утичу на силу резања при обради глодањем

Многобројни фактори, који се заједничким именом називају услови резања, директно или индиректно утичу на силу резања и квалитет обрађене површине. Важно је напоменути да су сва израчунавања у вези са овим факторима базирана на експерименталним истраживањима и потврђују општи закон резања.

Овде ће детаљније бити анализирани важнији фактори који утичу на силу резања при обради глодањем: дебљина струготине, елементи геометрије алата, похабаност алата, врста и грађа дрвета, влажност дрвета, режим резања.

Дебљина струготине

Дебљина струготине је параметар који, при различитим обрадама, може да варира од неколико стотих делова mm па све до неколико mm у зависности од брзине резања, брзине помоћног кретања и корака по зубу. При обради глодањем дебљина струготине се мења и у поређењу са пречником резања веома је мала што резултира неповољним условима резања. Код супротносмерног глодања при веома малим дебљинама струготине долази пре до гњечења дрвних влакана уместо до резања што повећава трење и затупљивање главног сечива. Све то заједно доводи до повећања сила (отпора) резања и специфичног рада резања.

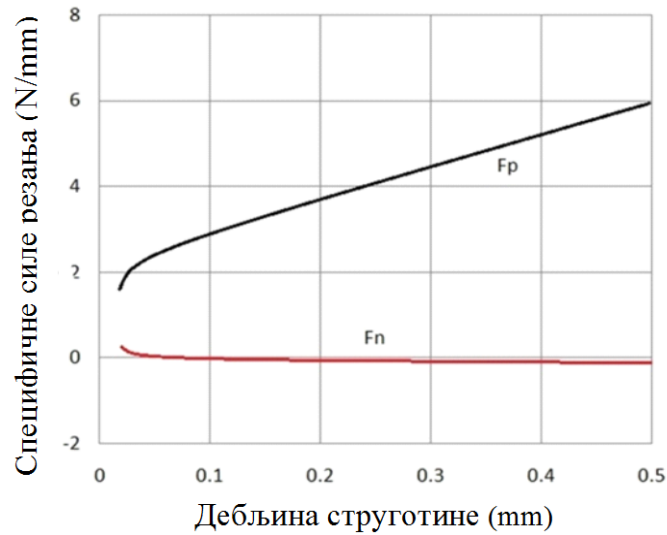
Неопходно је направити разлику између специфичног отпора резања и специфичног рада резања. Заправо, дељењем силе по милиметру ширине резања са дебљином струготине, добијамо потребну силу по mm² попречног пресека струготине. Ова величина се назива специфични отпор резања (K) и има исту вредност као и механички рад резања (K') изражен у Nm/cm³ који је потребан за претварање 1 cm³ дрвета у струготину:

$$K = K' \rightarrow \frac{F_s}{e \cdot b} \left(\frac{N}{mm^2} \right) = \frac{W}{e \cdot b \cdot l} \left(\frac{J}{cm^3} \right) \quad (2.19)$$

где су: F_s - средња сила резања, e – дебљина струготине, b – ширина струготине, l – дужина струготине и W – рад силе резања.

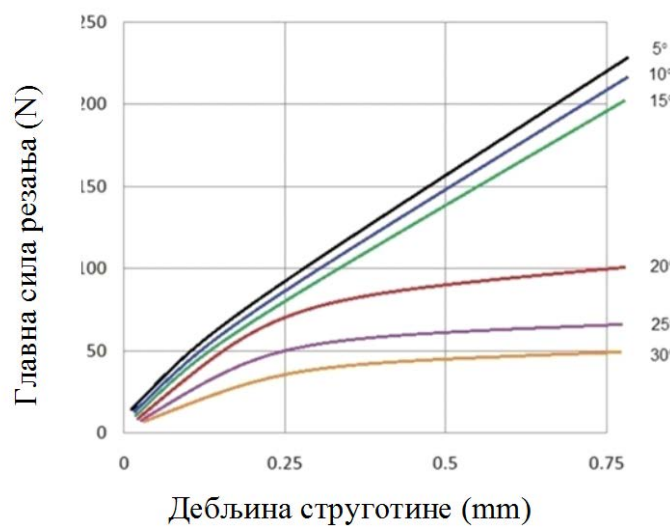
Однос између специфичног отпора резања (специфичног рада резања) и дебљине струготине има знатно већи практични значај од односа сила резања и дебљине струготине.

Слика 3.28 показује да је утицај дебљине струготине, при подужном резању, на нормалну силу резања умерен и да главна сила резања благо расте са повећањем дебљине струготине. Ово је, међутим, тачно уколико се обрада врши алатима са великим грудним углом (у овом случају испитивања су вршена за грудни угао од 35°).



Слика 3.28: Специфична главна сила резања F_p (N/mm) и специфична нормална сила резања F_n (N/mm) у функцији средње дебљине струготине e (mm), (Kivimaa, 1950)

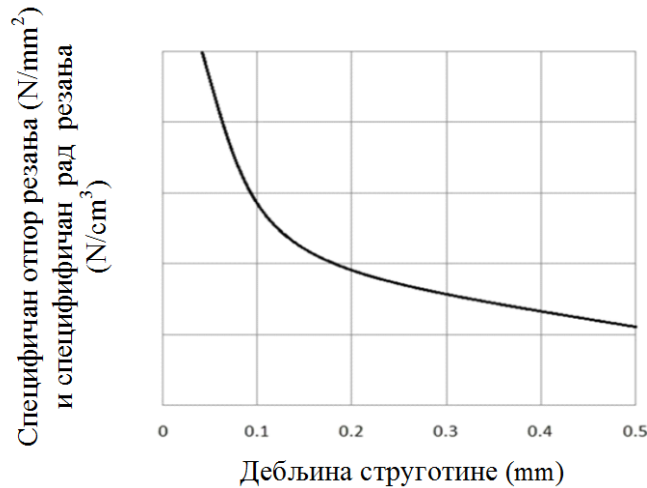
При малим грудним угловима код подужног резања, дебљина струготине има знатно већи утицај на силе резања (Слика 3.29).



Слика 3.29: Главна сила резања (N) у функцији дебљине струготине e (mm), при различитим грудним угловима, (Franz, 1958)

У сваком случају, ове две слике нису погодне за поређење, с обзиром да су се параметри приликом испитивања значајно разликовали².

Слика 3.30 приказује специфичну силу резања и специфични рад у функцији дебљине струготине при уздужном резању.



Слика 3.30: Специфичан отпор резања K (N/mm^2) и специфичан рад резања K' (Nm/cm^3) у функцији дебљине резања e (mm), (Gronlund, 2004)

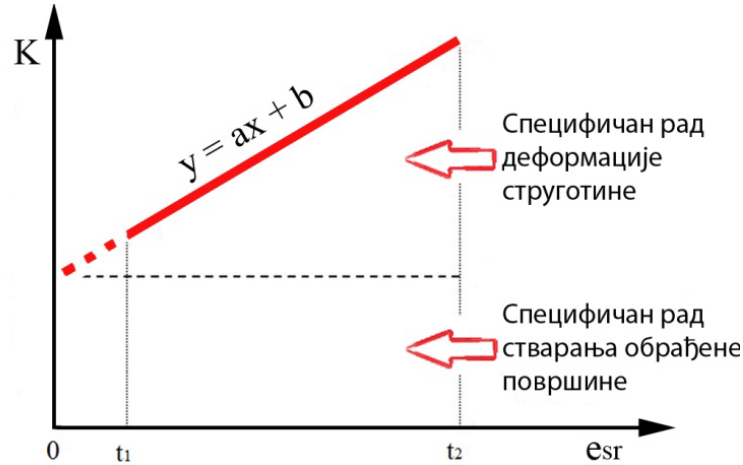
Са слике је уочљиво да смањењем дебљине струготине на ниске вредности (у овом случају испод 0,1 mm) долази до значајног повећања специфичног рада резања. То свакако утиче на повећање потрошње енергије при малим дебљинама струготине и до значајно већег хабања алата

Значајно повећање специфичног рада са смањењем дебљине струготине, може се објаснити чињеницом да је, при малој дебљини струготине, потребно изрезати знатно већи број појединачних делова струготине по јединици запремине дрвета. Такође, при овако малим вредностима дебљине струготине, испод 0,1 mm, постоји већ поменута могућност да алат “гњечи“ струготину уместо да је пререзује.

Према (Kivimaa, 1950) овакво понашање објашњено је на следећи начин: сила резања се састоји из две компоненте. Прва је одговорна за нарушавање везе између предмета обраде и струготине, и друга компонента силе настаје услед

² У првом случају анализирана је буква влажности 12%, док је у другом случају анализиран бор влажности 8%

деформисања струготине. Прва компонента зависи од разних фактора алата и предмета обраде, али је независна од дебљине струготине, док друга компонента расте са порастом дубине резања (Слика 3.31)



Слика 3.31: Утицај средње дебљине струготине e_{sr} (mm) на специфичан отпор резања K (N/mm^2)

Утицај дебљине струготине на специфични отпор резања може се израчунати и помоћу коефицијената корекције. Табела 3.1 приказује коефицијенте корекције за различите дебљине струготине при обради меког и тврдог дрвета (Kršljak, 2013).

Табела 3.1: Коефицијенти корекције C_e за различите дебљине струготине, при резању тврдог и меког дрвета, (Kršljak, 2013)

Врста дрвета	Дебљина струготине											
	1,0	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2	0,15	0,10	0,07	0,05	0,03	0,01
	Коефицијент корекције C_e											
Меко	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,7	1,9	2,2	2,6	2,9	3,3	4,2
Тврдо	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,7	2,0	2,5	3,0	3,5	4,4	7,0

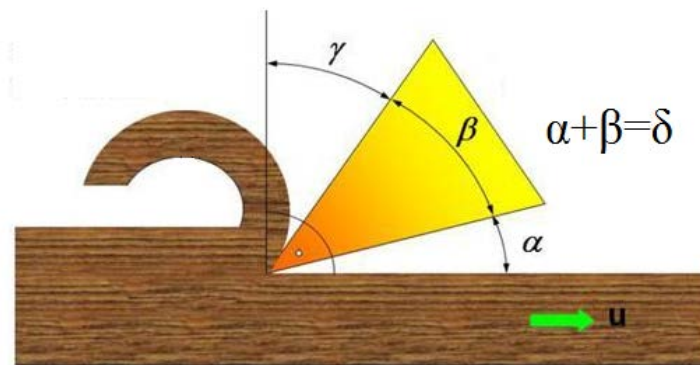
Из табеле се уочава нагли пораст коефицијената корекције C_e за дебљине струготине $e \geq 0,2 \text{ mm}$.

Елементи геометрије сечива

Значајан утицај на специфичан отпор резања имају геометријски односи између сечива и предмета рада, односно величине угла резања (δ), грудног угла (γ) и леђног угла (α) и угла оштрења (β). Између елемената геометрије резног

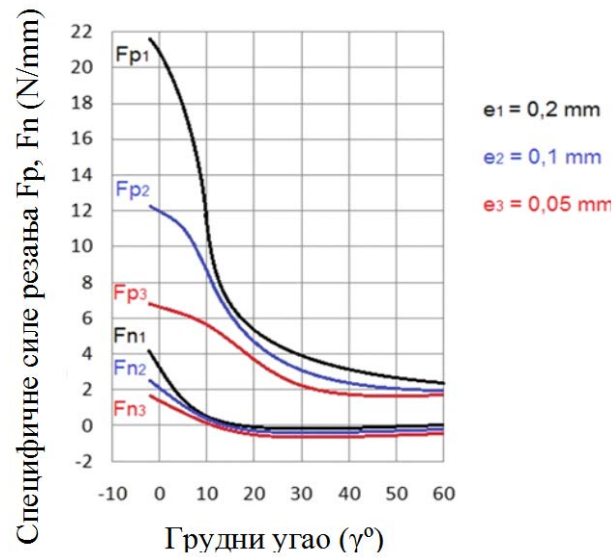
елемента мора постојати оптималан однос, јер промена једног условљава промену другог што директно утиче на промену специфичног отпора дрвета.

Угао резања δ својом величином директно (сразмерно) утиче на величину силе резања, за све видове резања. Што је овај угао мањи резни клин лакше продире у дрво, па је и сила резања мања и обрнуто (Слика 3.32). Угао резања одређен је величином угла оштрења и леђног угла. Како је леђни угао α одређен врстом дрвета, то постоји могућност да се угао резања мења на рачун угла оштрења. Угао оштрења се може смањивати ограничено, јер се његовим смањењем слаби пресек резног елемента, када може доћи до трајних деформација (оштећења) резне ивице.



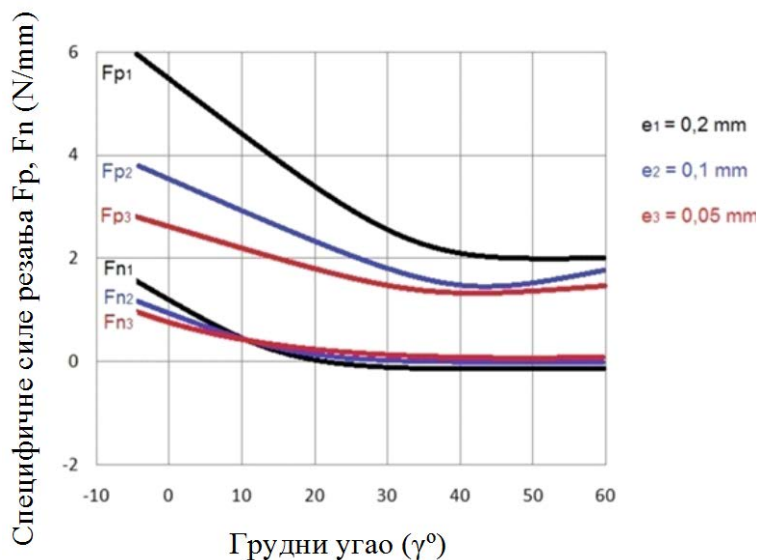
Слика 3.32: Елементи геометрије сечива, (Davim, 2011)

Повећањем грудног угла смањује се угао резања, резни клин лакше продире у дрво, тј. мањи је отпор дрвета а тиме и специфични отпор дрвета. Испитивања која је спровео Kivimaa (1950) на букви (густине 610 kg/m^3 , влажности 11%, леђни угао 10°), за различите дебљине струготине ($e_1=0,2$, $e_2=0,1$ и $e_3=0,05$) показују да главна сила резања опада са повећањем грудног угла. Слика 3.33 приказује утицај грудног угла на главну и на нормалну силу резања при уздужном резању. Јасно је да обрада алатима са малим или негативним грудним угловима изазива изузетно велике силе резања, које се смањују са повећањем грудног угла. Такође, уочљиво је да се обрадом при малим грудним угловима добијају релативно високе вредности нормалне силе. При великим грудним угловима нормална сила има негативну вредност, као последица тежње алата да привуче предмет обраде.



Слика 3.33: Специфична главна сила резања F_p (N/mm) и специфична нормална сила резања F_n (N/mm) у функцији грудног угла, при различитим дебљинама струготине, код уздужног вида резања, (Kivimaa, 1950)

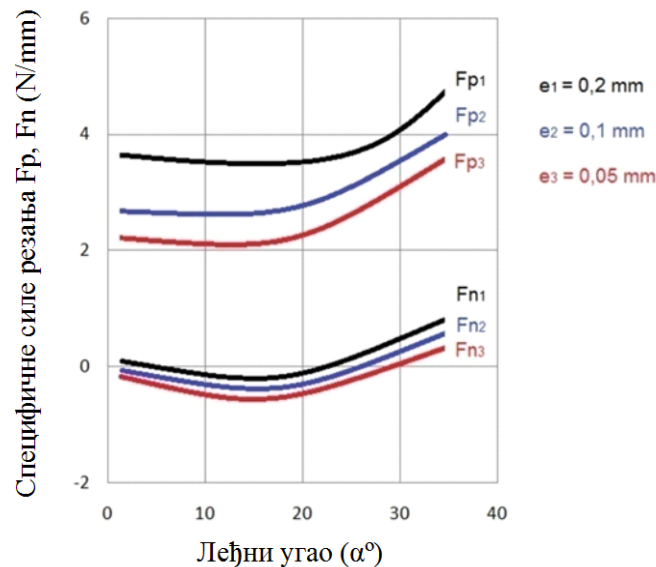
Слика 3.34 приказује утицај грудног угла на промену сила резања при тангенцијалном резању, за исте услове резања као и у претходном случају. Приметно је да силе при резању $0-90^\circ$ опадају са повећањем грудног угла све до $35-40^\circ$. Даље повећање грудног угла не утиче на смањење сила резања. Претпоставља се да је то последица смањене отпорности на абразију алата што изазива брзо хабање сечива које анулира дејство повећања грудног угла.



Слика 3.34: Специфична главна сила резања F_p (N/mm) и специфична нормална сила резања F_n (N/mm) у функцији грудног угла, при различитим дебљинама струготине, код тангенцијалног вида резања, (Kivimaa, 1950)

Иста истраживања су обухватила и утицај грудног угла на силе резања при попречном резању. У том случају главна сила резања достиже свој минимум за углове између 45° и 55° (више вредности за веће дебљине струготине). Нормална сила достиже своју екстремну вредност при грудном углу од 45° , без обзира на дебљину струготине.

Слика 3.35 приказује утицај леђног угла на главну и нормалну силу резања. Истраживања су такође извршена на букви (густине 620 kg/m^3 и влажности 11%), за грудни угао од 35° и за различите дебљине струготине ($e_1=0,2$, $e_2=0,1$ и $e_3=0,05$).



Слика 3.35: Специфична главна сила резања F_p (N/mm) и специфична нормална сила резања F_n (N/mm) у функцији леђног угла, при различитим дебљинама струготине код уздужног вида резања, (Kivimaa, 1950)

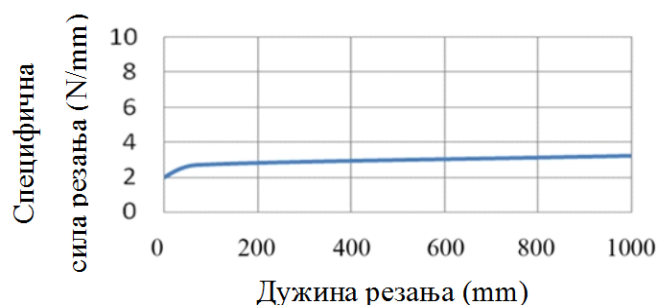
Као што се може приметити, главна сила резања опада са повећањем леђног угла од 0° до 15° . Разлог опадања главне силе резања лежи у чињеници да се повећањем леђног угла смањује додирна површина између леђне површине алата и обрађене површине. Наиме, сечиво приликом резања изазива деформацију дрвета (утискује га). Даљим напредовањем сечива дрво се, услед еластичних деформација, делимично враћа ка првобитном положају и јавља се значајно трење дрвних влакана по леђној површини алата, што је нарочито изражено код алата са кружним кретањем. Даљим повећавањем леђног угла (изнад 15°) главна сила резања значајно расте. Ово је последица знатно већег хабања сечива при

мањем углу оштрења. Дакле, проблем је у смањеном углу оштрења, а не у повећању самог леђног угла. Уопштено, може се рећи да повећање леђног угла доводи до повећања силе резања и средње снаге. Најбољи резултати при резању се постижу када леђни угао износи 10–15°, док се при глодању препоручује величина леђног угла од 10°.

Затупљеност алата

Опште је познато да се са степеном затупљености алата повећавају и рад, сила и снага резања. Величина затупљења (радијус заобљења сечива) зависи од многобројних фактора: физичка и механичка својства материјала алата, врста дрвета или материјала на бази дрвета у зависности од тврдоће, смер резања, геометрија алата и сл.

Слика 3.36 приказује специфичну главну силу резања у функцији дужине резања код уздужног резања букве (густине 640 kg/m^3 , влажности 9%), за леђни угао алата 10° и грудни угао алата 35°, при дебљини струготине од 0,01 mm. Уочљиво је да се почетна наоштреност смањује врло брзо након почетка резања. Након тога, алат се постепено тупи знатно мањом брзином све до одређене тачке када радијус затупљења почиње, услед повећаног отпора и температуре, знатно интензивније да се увећава. Како затупљење напредује долази до смањења ефективног грудног угла. То значи да се и главна сила резања повећава, након чега може доћи до формирања II типа струготине са последицама лошије обрађене површине.



Слика 3.36: Специфична главна сила резања (N/mm) у функцији дужине резања, (Kivimaa, 1950)

На брзину затупљења значајно утиче угао оштрења. Када је он испод одређене критичне тачке, алат се тупи великом брзином. У испитивањима које је спровео,

Kivimaa је закључио да је при резању брезе, влажности од 9 до 12%, критичан угао оштрења између 35° и 40°, без обзира на дубину резања и правац резања. Уколико је овај угао испод критичне границе алат је толико ослабљен да, уместо постепеног затупљења сечива, долази до откидања делића алата са сечива чак и при уобичајеним силама резања.

Специфичан отпор резања, односно сила резања могу бити одређени помоћу коефицијената корекције C_p у зависности од: времена ефективног рада алата између два оштрења (постојаност алата), количине обрађеног материјала у m дужним и величине затупљености и похабаности алата.

Уколико се узме у обзир само постојаност и количина обрађеног материјала за изражавање коефицијента корекције, без додатног разматрања услова обраде (врста дрвета, материјал сечива и стварни пут резања) добијају се недовољно тачни резултати. Најтачнији резултати се добијају ако се вредности коефицијената корекције изражавају у зависности од величине затупљености и похабаности алата. Према (Goglia, 1994) наводе се следећи коефицијенти корекције затупљења сечива (Табела 3.2).

Табела 3.2: Коефицијенти корекције C_p за различите полупречнике заобљења сечива, (Goglia, 1994)

Стање сечива	Полупречник заобљења сечива ρ (μm)	Коефицијент корекције C_p
Оштра	2–10	1,00
	14–25	1,10
Средње оштра	26–30	1,20
	35–40	1,30
Затупљена	41–45	1,40
	46–50	1,50
Тупа	51–55	1,55
	56–60	1,60

Kršljak (2013), такође наводи коефицијенте корекције затупљења сечива који су сличних вредности као и у претходном случају.

Врста дрвета

Утицај врсте дрвета на процес резања је тешко прецизно одредити. Најчешћи начин брзе процене утицаја предмета обраде на силе резања је узимање у обзир само густине и влажности дрвета.

Поставља се питање да ли су ти показатељи довољни да би се окарактерисала врста дрвета? Наиме, није редак случај да два предмета обраде израђена од исте врсте дрвета имају потпуно различиту густину. Такође је познато да се обрадом две врсте са потпуно истом густином могу добити потпуно различите силе резања, као и да се обрадом врста са различитом густином могу добити једнаке силе резања. Када све ово узмемо у обзир, јасно је да густина дрвета не може потпуно објаснити однос између врсте дрвета и сила резања.

За израчунавање специфичног отпора резања користе се таблице са коефицијентима корекције за различите врсте дрвета. Goglia (1994) и Kršljak (2013) наводе следеће корекционе коефицијенте за различите врсте дрвета (Табела 3.3).

Табела 3.3: Коефицијенти корекције C_d за различите врсте дрвета, (Goglia, 1994; Kršljak, 2013)

Врста дрвета	Коефицијент C_d	Врста дрвета	Коефицијент C_d
Липа	0,80	Бреза	1,20–1,30
Јова	0,85	Буква	1,30–1,50
Смрча	0,90–1,00	Храст	1,50–1,60
Јела	1,00–1,05	Јасен	1,50–2,00
Ариш	1,05–1,10		

Ови коефицијенти су добијени на основу експерименталних истраживања где је као условни еталон узет коефицијент корекције за бор који је једнак 1.

Влажност дрвета

Са повећањем влажности дрвета до границе хигроскопности смањују се показатељи механичке чврстоће дрвета и смањује се специфична сила резања. При резању дрвета, слободна влага на површини сечива делује као мазиво, услед чега се умањује коефицијент трења, што доприноси смањењу специфичне силе резања. Резултати истраживања указују на значајно смањење специфичне силе резања сировог дрвета, посебно у попречном правцу резање. Према спроведеном истраживању, за резање сировог дрвета потребно је 20–30% мање енергије него за резање сувог дрвета (Beljo-Lučić et al., 2004).

Брзина резања

Рад са великим брзинама резања у индустријским условима је пожељан с обзиром да повећање брзине резања директно утиче на повећање производности машине.

Следећи фактори утичу на промену сила резања при промени брзине резања:

- Силе убрзања струготине
- Промене својстава дрвета услед промене брзине резања
- Промене својстава дрвета услед локалних промена температуре
- Промена трења између струготине и грудне површине

Повећањем брзине резања повећавају се силе убрзања струготине (мали ефекат), као и чврстоћа дрвета. Ово се може објаснити тиме да се механичка својства уопште мењају са променом брзине деформације, па како је и резање механички процес, са променом брзине резања мења се и отпор резању (Zubčević, 1988). Са друге стране чврстоћа дрвета се истовремено смањује услед незнатног повећања температуре дрвета у зони резања. Дакле, ови параметри се међусобно потиру. С обзиром да је немогуће добити податке појединачног дејства ових параметара, немогуће је прецизно израчунати који ће утицај промена брзине имати на промену силе резања. Због тога се морамо ослонити на емпиријске податке добијене спровођењем разних тестова за испитивање силе резања.

Истраживања која су спровели Axelsson et al. (1993) показују да брзина резања има утицај на главну силу резања и укључују је у математичке моделе за предикцију силе резања поред осталих својстава. Добијен је и висок коефицијент детерминације слагања резултата измерених и израчунатих вредности ($R^2=0,81$) у целом домену важења модела. Porankiewicz et al. (2011) у моделе за предикцију силе резања, такође, укључују и брзину резања. Kršljak (2013) сматра да брзина резања значајно утиче на силу резања само за вредности изнад 10 m/s, а испод ове вредности она нема утицаја на силу резања (Табела 3.4).

Табела 3.4: Коефицијенти корекције C_v за различите брзине резања, (Kršljak, 2013)

Брзина резања (m/s)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
C_v	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65

Koch (1964) наводи да при обради дрвета мале густине и са малом дебљином струготине, повећањем брзине резања до 150 m/s, сила резања се повећава за 5%. При обради дрвета веће густине и са већом дебљином струготине сила резања се повећава за 20% од малих брзина до 150 m/s. Евидентно је, на основу досадашњих истраживања, да директан утицај брзине резања на силе резања још увек није довољно испитан.

3.3 Квалитет површине

Квалитет површине дефинисан преко стања геометрије обрађене површине представља се преко низа показатеља, пре свега преко видова неравнина и одступања од идеално равне површине. У том смислу геометрија површине обликује се у виду макрогеometriје и микрогеometriје. Макрогеometriја одражава стање и облик укупне непрекинуте површине, ослањајући се на идеалну површину обрађеног дела. Микрогеometriја представља стање и облик обрађене површине на њеним репрезентативним деловима ослањајући се на идеалан одсечак одговарајућег тела.

3.3.1 Основни појмови геометрије површине техничких тела

ISO стандардима се дефинишу основни појмови геометрије површине техничких тела:

- стварна површина је површина која ограничава тело и одваја га од околине. Формира се у процесу израде техничког тела и мерењем се не може одредити њено право стање.
- геометријска површина је идеална површина задатог геометријског облика, која не поседује било какве неравнине или одступања. То је замишљена површина различитог облика која се само приближно може представити цртежом. Техничка тела не могу имати такву површину.
- ефективна површина је приближна слика стварне површине и представља резултат мерења стварне површине.
- профил површине је линија добијена пресецањем површине једном посебно одабраном равни, чији је положај у односу на геометријску

површину утврђен договором. Профил површине може бити: стварни профил, геометријски профил и ефективни профил, у зависности да ли је добијен пресецањем са одабраном равни стварне, геометријске или ефективне површине.

Према стандарду DIN 4760, који предвиђа одступања у шест редова, јасно се могу уочити разлике између појединих одступања (Табела 3.5).

Табела 3.5: Видови одступања стварне површине од идеалне површине (DIN 4760)

Одступање представљено као увећани профил	Пример врсте одступања	Пример узорка стварања	
1. ред: Одступање облика 	Неравност Нецилиндричност Неконусност	Грешка у вођици машине, лоше постављање детаља, промена тврдоће, хабање	
2. ред: Валовитост 	Валови	Ексцентрично постављање или грешка облика глодала, вибрације машина и алата	
3. ред 	Храпавост	Бразде (олуци)	Облик образовања струготине, помоћно кретање или подешавање алата
4. ред 		Бразде (удубљења) Љуспе (избочења)	Слика резања (искидана струготина, траг обраде), измена форме код обраде песком, чворићи код галванизације
5. ред Не може се сликовито представити на једноставан начин		Унутрашња грађа (структура)	Кристализација, измена површине хемијским деловањем, корозија
6. ред Не може се сликовито представити на једноставан начин	Мрежаста грађа материјала	Физикалне и хемијске појаве у изградњи материје, напрезања и клизања у мрежи кристала	
		Заједнички представљена одступања 1-4 реда	

Одступање облика и валовитост се сврставају у макрогеометрију, а храпавост у микрогеометрију површина.

3.3.2 Храпавост површине

Храпавост површине, као један од показатеља квалитета површине, има вишеструки значај у површинској обради дрвета. Већина физичких, механичких, хемијских и естетских својстава дрвета зависи од храпавости површине. Зависи од многих фактора као што су: вид резања, брзина резања, брзина помоћног

кретања, грудни и леђни угао сечива, дубина резања, угао контакта, вибрације алата, влажност дрвета, смер помоћног кретања.

Постоје две врсте храпавости:

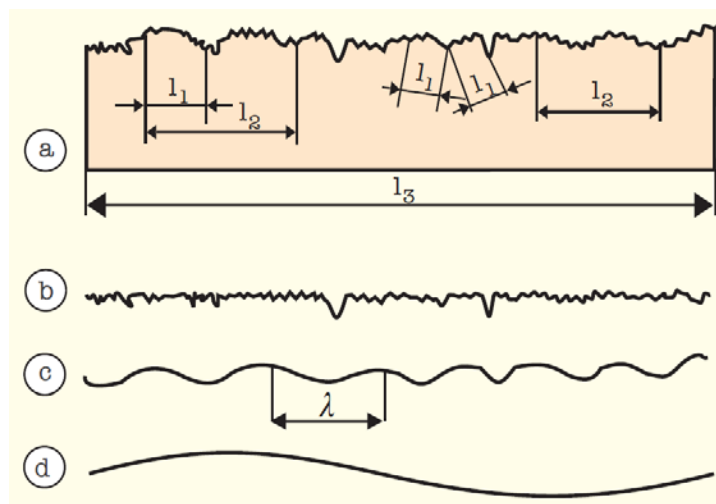
- обрадна храпавост – последица услова и режима обраде и
- структурна храпавост – последица унутрашње структуре дрвне врсте.

Процена храпавости површине дрвета је тежак задатак, јер храпавости дрвета зависи и од ћелијске структуре дрвне врсте и од обраде.

Постоје два система дефинисања храпавости:

- систем „М“ (Medium) – систем средње линије
- систем „Е“ (Envelope) – систем овојне линије

Суштинска разлика између ова два система је у методу прилаза проблему храпавости и начину одвајања од осталих видова одступања. Систем М је прихваћен од Међународне стандардне организације (ISO) и у пракси се више примењује. Суштина одвајања храпавости од одступања облика и валовитости у систему „М“ се састоји у избору дужине дела профила површине (Слика 3.37). Према овом систему профил површине дели се на дужинске делове.



Слика 3.37: Одвајање појединих видова одступања у систему „М“: а – сложени профил површине са свим видовима одступања, б – храпавост представљена састављеним и исправљеним деловима профила l_1 , с – валовитост представљена састављеним и исправљеним деловима профила l_2 , д – одступање облика за укупну дужину профила l_3 , (Јајић, Живановић-Трбојевић, 2000)

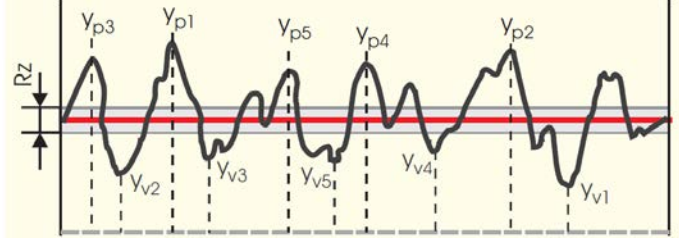
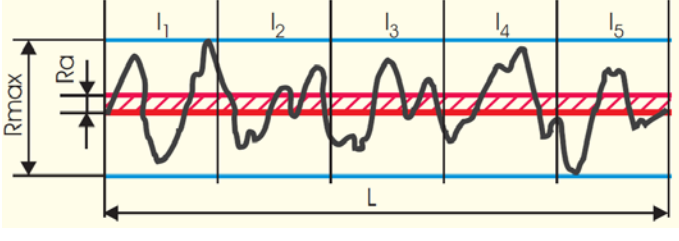
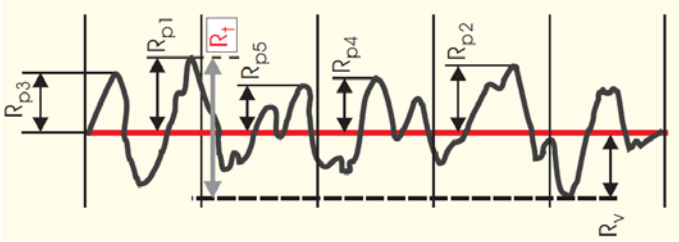

Дужина везана за храпавост назива се референтна дужина (1). Референтна дужина је договорено одабрана дужина дела профила која служи за одређивање храпавости, тако да су елиминисани други видови одступања.

Посматрана дужина је дужина профила површине неопходна за поуздано одређивање карактеристика храпавости. Она обухвата минимално једну референтну дужину, а по правилу треба да обухвата више референтних дужина. Правилним избором величине референтне дужине искључују се грешке облика и валовитости. Избор референтне дужине је препуштен искуству и експериментисању, јер иста величина референтне дужине код различитих површина неће елиминисати одступања облика и валовитости, односно иста површина код различитих величина референтне дужине даваће различите вредности храпавости.

Средња линија профила (m) је линија која има облик геометријског профила и која сече ефективни профил тако да, у границама референтне дужине, сума квадрата одстојања $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ свих тачака профила од те линије буде минимум. Средња линија служи као полазна основа код одређивања бројчаних вредности у систему „М“, средњег одступања профила, који је уједно и најчешће употребљавани критеријум храпавости.

Горња линија профила (Y_g) је линија, која у границама референтне дужине, дотиче највише тачке ефективног профила, а повучена је паралелно средњој линији профила. Доња линија профила (Y_d) је линија, која у границама референтне дужине, дотиче најниже тачке ефективног профила, а повучена је паралелно средњој линији профила. Растојање између горње (Y_g) и доње (Y_d) линије профила је максимална дубина неравнина или максимална висина неравнина $R_{\max} = Y_g - Y_d$. Табела 3.6 приказује типичне стандардизоване параметре храпавости за лишћарске и четинарске врсте.

Табела 3.6: Параметри хрпавости обрађене површине, (1*, 2*, 3*, Јајић, Живановић-Трбојевић, 2000)

R_{max} R_z	Максимална висина неравнина $R_{max} = Y_g - Y_d$ Средња висина неравнина у 10 тачака $R_z (ISO) = \frac{1}{5} \left(\sum_1^5 Y_{pi} - \sum_1^5 Y_{vi} \right)$ DIN EN ISO 4287	1* 
R_a	Средње одступање профила $R_a = \frac{\sum_1^n Y_i }{n}$ DIN EN ISO 4287	2* 
R_p R_v R_t	Допунски параметри $R_{pm} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n R_{pi}$ DIN EN ISO 4287	3* 
	Дубина таласа $h_c = \frac{1}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - s_z^2} \right)$ DIN EN ISO 4287	

На првом дијаграму представљена је **средња висина неравнина у 10 тачака** (R_z), односно, разлика између аритметичких средина пет највиших и пет најнижих тачака профила, у границама референтне дужине. Висине тих тачака су мерене од основног профила или од произвољне праве линије која је паралелна са средњом линијом профила. Други дијаграм показује **средње одступање профила** (R_a). То је средња аритметичка вредност одстојања свих тачака

ефективног профила од средње линије, где су Y_i – одстојање поједине тачке ефективног профила од средње линије у апсолутном износу, n – укупан број мерених тачака ефективног профила. Средње одступање профила је опште признат и најраспрострањенији међународни параметар за храпавост.

Допунски параметри не представљају апсолутне вредности храпавости, већ служе као допуна основних критеријума у смислу информисања о облику референтног профила. У допунске параметре спадају:

- максимална висина профила изнад средње линије у оквиру референтне дужине (R_p),
- максимална дубина профила испод средње линије у оквиру референтне дужине (R_v)
- максимална висина између највише тачке (врха) и најниже тачке (подножја) профила у оквиру референтне дужине (R_t)
- просек вредности, које се одређују за сваку жељену дужину у појединачном оцењивању (R_{pm}).

3.3.3 Критеријуми квалитета при обимном глодању

У оквиру овог истраживања коришћена су два критеријума за анализу квалитета површине после обраде глодањем, средње одступање профила и валовитост. Средње одступање профила је детаљно објашњено у претходном поглављу. Валовитост се најчешће дефинише као дужина и дубина валова од неке замишљене линије која тангира врхове валова (Zubčević, 1988).

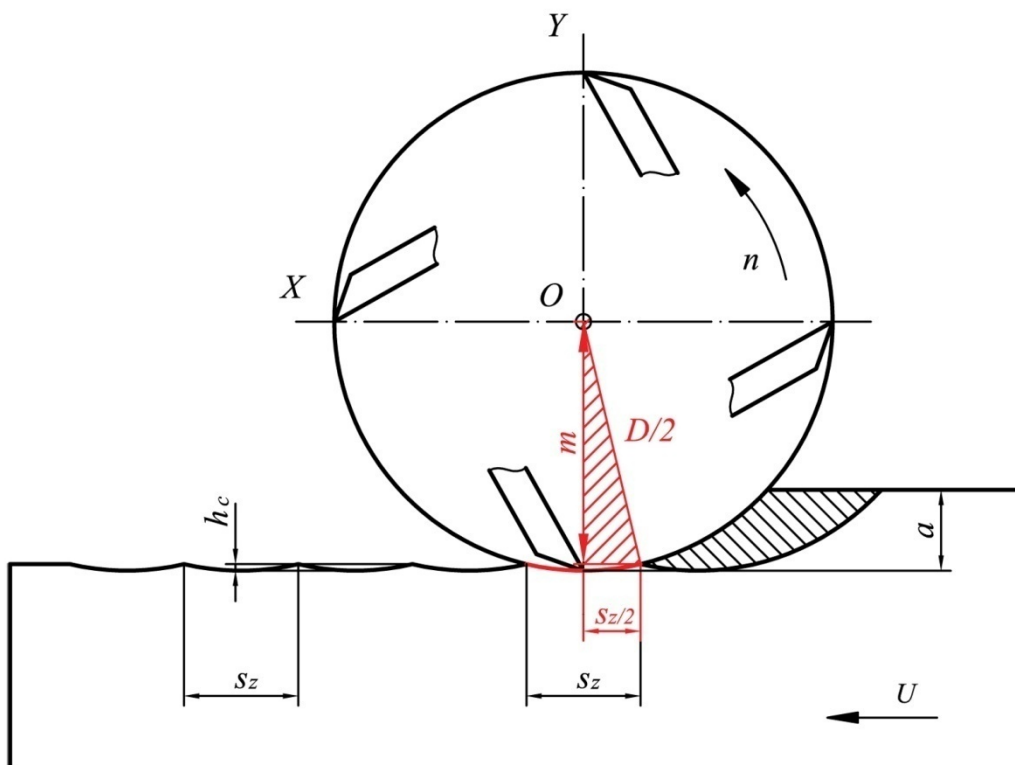
Код обраде глодањем, фактори који се морају узети у обзир су пре свега физичко механичка-својства дрвета и тачност трајекторије (кружнице) резања. На следећем месту је режим резања, који је изузетно битан за анализу квалитета обрађене површине, узимајући у обзир брзину главног и помоћног кретања, корак по зубу и број зуба. Стање сечива и машине, такође би требало узети у обзир када се прати квалитет обрађене површине са циљем да се постигне

сигуран и ефикасан процес обраде, обезбеђујући оптималан квалитет производа. Дакле може се закључити да профил валовитост зависи од:

- Брзине главног и помоћног кретања;
- Пречника алата;
- Броја зуба алата;
- Тачности трајекторије резања (резног круга);
- Континуитета корака по зубу.

Затим, може се закључити да степен завршне обраде зависи од: наоштрениости алата, геометрије сечива, брзине главног кретања и квалитета сировине (дрвета).

Висина валова на обрађеној површини (h_c) зависи од пречника алата и корака по зубу (Слика 3.38).



Слика 3.38: Приказ таласа циклоиде

Слика 3.38 приказује да се релација за рачунање висине таласа циклоиде може извести на следећи начин:

$$m^2 + \left(\frac{s_z}{2}\right)^2 = \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$m = \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{s_z^2}{4}} = \frac{1}{2}\sqrt{D^2 - s_z^2}$$

$$h_c = \frac{D}{2} - m = \frac{1}{2}\left(D - \sqrt{D^2 - s_z^2}\right) \quad (2.20)$$

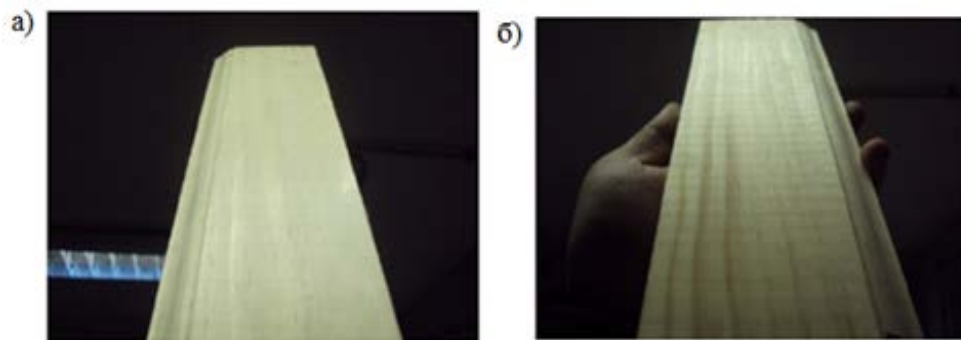
Са становишта квалитета обрађене површине тежи се равнијим таласима (мала дубина таласа). Ово се постиже повећањем пречник резања, што је већи пречник алата таласи су равнији, односно бољи је квалитет обрађене површине.

Јасно је да је дужина кинематских валова $l_v = s_z$ зависи од величине брзине помоћног кретања, броја зуба и броја обртаја алата:

$$l_v = \frac{u \cdot 1000}{n \cdot z} \quad [mm] \quad (2.21)$$

где је: u – брзина помоћног кретања, m/min , n – број обртаја, min^{-1} , z – број зуба на алату. Да би се обезбедио добар квалитет обрађене површине потребна је што већа брзина главног кретања и што мања брзина помоћног кретања.

Да би квалитет обрађене површине био бољи битно је да дужина валова буде што мања, односно да по јединици дужине обраде постоји што већи број валова (Слика 3.39).

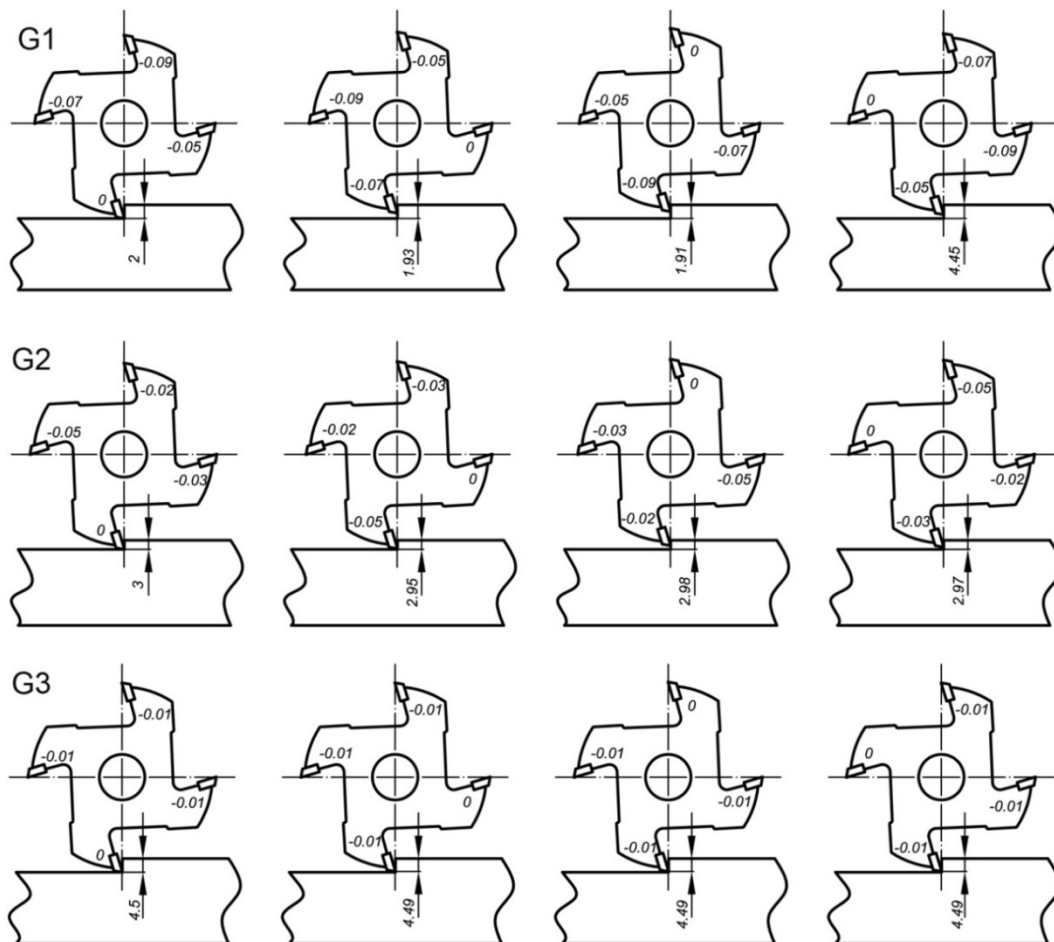


Слика 3.39: Упоредни приказ валовитости површине, а) бољи квалитет са већим бројем валова по јединици дужине, б) лошији квалитет са мањим бројем валова по јединици дужине, (Davim, 2011)

При већем броју зуба, важно је да врхови зуба буду на истом пречнику резног круга. Када то није случај, онда се обрађена површина формира сечивом која има

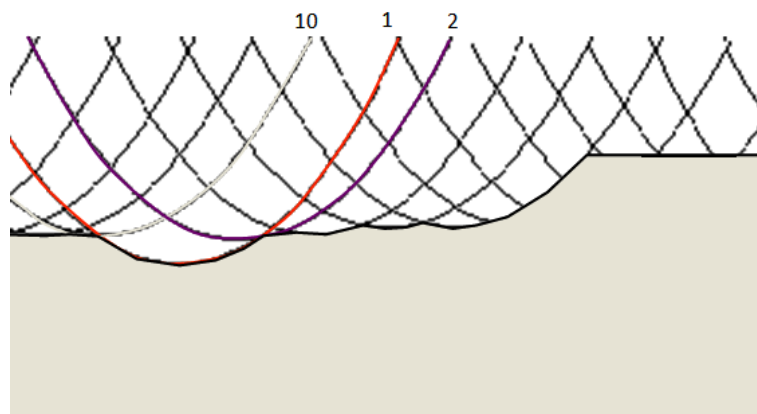
највећи резни круг и практично само један зуб обавља највећи део посла, онај који има највеће радијално бацање. У том случају дужина кинематских валова је једнака је померу по том највећем резном кругу $l_v = s_o$. Због тога је изузетно важно да сва сечива на алату описују исти резни круг да би се остварила мања валовитост обрађене површине.

Слика 3.40 приказује радијална бацања зуба за сва три глодала, која су коришћена у експерименту.



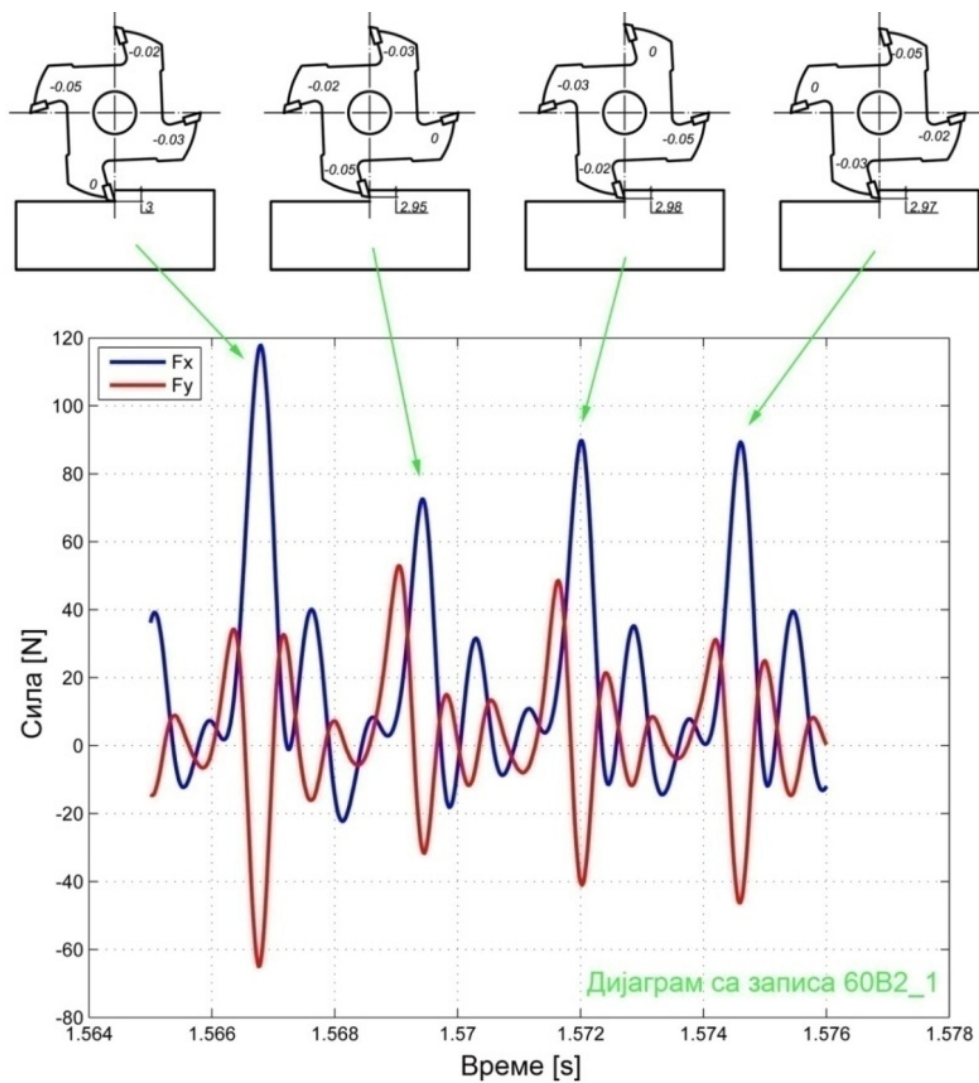
Слика 3.40: Приказ радијалних бацања зуба код сва три глодала

Остали зуби, са мањим радијалним бацањима ће учествовати у одвајању струготине што резултира мањим трошењем алата, али само један зуб ће оставити видљив траг на обрађеној површини. (Слика 3.41).



Слика 3.41: Траг зуба са највећим радијалним бацањем, (Davim, 2011)

Радијално бацање зуба утиче и на величину силе резања (Слика 3.42).



Слика 3.42: Утицај радијалног бацања зуба на величину компоненти силе резања за један обрт алата

Са слике се види да зуб који има највеће радијално бацање има и највећу силу резања. Евидентно је да постоји директна пропорционалност између силе резања и одступања од номиналне димензије пречника резања.

3.4 Досадашња истраживања

Природа процеса резања може се лакше разумети уколико се проблем разложи на елементарне факторе и анализирају се њихове међусобне везе (Franz, 1958). Истраживања везана за оптимизацију режима обрада дрвета (Euma et al., 2004a, Meausoone, 2001; Naylor and Hackney, 2013) наводе да генерално постоје три групе фактора које имају великог утицаја на механику резања дрвета:

- Фактори који се приписују самом процесу обраде;
- Фактори који зависе од врсте дрвета;
- Садржај влаге у дрвету.

У радовима различитих истраживача (Franz, 1958; Kivimaa, 1950; McKenzie, 1961; Axelsson, 1993; Koch, 1964; McKenzie, 1961; Woodson, Koch 1970; Costes et al., 2004; Goli et al., 2004) разматран је утицај наведених фактора на остварене снаге и силе резања, постојаност алата, тачност обраде и квалитет обрађене површине. Основни циљ наведених истраживања био је боље разумевање интеракције алата и предмета обраде, а у циљу ефикаснијег управљања процесима резања, односно предвиђања понашања дрвета приликом обраде за задате услове резања и на основу познавања његових својстава. Уштеда енергије, односно уштеда алата су такође важни, али су у овом случају у другом плану.

3.4.1 Модели за предикцију сила резања

Силе (отпори) резања имају велики значај у технологији обраде дрвета. Оне представљају основне категорије механике процеса резања помоћу којих се исказују основне карактеристике стања и понашања процеса резања.

За предвиђање сила резања од велике помоћи могу бити различити „статистички“ модели којима би се, на основу података о својствима дрвета/материјала на бази дрвета који се обрађују и предвиђеног режима обраде, могло предвидети понашање материјала у процесу обраде, као и исход обраде, а

пре свега квалитет обрађене површине. Комбинацијом података добијених на основу модела и праћењем и анализом потрошње енергије при резању олакшала би се контрола процеса обраде и омогућило смањење броја обрађених комада са недозвољеним одступањима у димензијама, облику и/или квалитету површине. Такође, на основу познате функције сила резања може се прорачунати снага која се троши у датом захвату и изабрати одговарајући мотор машине, могу се изабрати типови алата и одговарајући режим обраде.

У литератури, која се бави механичком обрадом дрвета, могу се наћи различите методе (моделу) за процену сила резања за све важније врсте дрвета и главне врсте обрада резањем. Најчешће, то су такозване методе коефицијената (Afanasev, 1961; Amalitskij, Lyubchenko, 1977; Bershadskij, 1967; Deshevoy, 1939; Orlicz, 1982; Zubčević, 1988; Goglia, 1994). Слични модели се могу наћи и у литератури на српском језику (Zubčević, 1988; Goglia, 1994; Kršljak, 2013). Наведени аутори полазе од такозваног референтног јединичног отпора резања измереног у тачно дефинисаним и контролисаним (стандардним) условима (Goglia, 1994). Свака промена неког од утицајних параметара учиниће да се и вредност јединичног отпора резања промени. Вредности корекцијских коефицијената добијају се из односа јединичног отпора резања измерених у стварним (промењеним) условима и референтних вредности (c_i). Специфични отпор за конкретне услове резања добија се множењем референтних јединичних отпора резања (k_{ref}) са корекционим коефицијентима (c_i) који су унапред израчунати и могу се наћи у одговарајућим таблицама (Kršljak, 2013; Goglia, 1994; Zubčević, 1988):

$$k = k_{ref} \cdot c_d \cdot c_v \cdot c_e \cdot c_p \cdot c_\gamma \dots c_x \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

где је: k – специфична отпор за конкретне услове резања [N/mm^2]; k_{ref} – референтни јединични отпор резања измерен у дефинисаним и контролисаним условима [N/mm^2]; c_d – коефицијент корекције за врсту дрвета; c_v – коефицијент корекције за брзину резања; c_e – коефицијент корекције за дебљину струготине; c_p – коефицијент корекције за затупљеност сечива; c_γ – коефицијент корекције за

промену грудног угла; c_x – коефицијент корекције за промену неког утицајног параметра.

Главна сила резања се добија множењем израчунатог коефицијента k са површином попречног пресека одвојене честице/струготине (A_s) за одговарајућу врсту обраде: $F = k \cdot A_s [N]$. Модел је једноставан за употребу с обзиром да су за израчунавање силе резања потребне само одговарајуће таблице и минималан број релативно лако доступних података о материјалу, алату и условима резања. Ови модели имају и одређене слабости. Приликом поређења измерених и на овај начин израчунатих вредности сила резања, у неким случајевима, појављују се значајне разлике, које могу бити и до 40%. Могућих разлога за неслагање измерених и израчунатих вредности има доста. Основни је што физичка и механичка својства дрвета нису на одговарајући начин укључени у наведене моделе, односно што су обично представљена само коефицијентом корекције за врсту дрвета c_{vt} што не мора увек бити довољно. Два комада дрвета направљена од исте врсте (са истим c_{vt}) могу имати различита физичка и механичка својства и према томе различито понашање приликом обраде. Други разлог је коефицијенти корекције, који се користе, нису резултат мултифакторног експеримента тако да у модел нису укључене међузависности између појединих фактора. Постоји још и низ других могућих разлога, а закључак би био да је за контролу процеса резања, уколико се жели остварити довољно добра процена нивоа и карактера сила резања, потребно у модел контроле укључити и утицаје анатомских, физичких и механичких својстава дрвета и то бар оних основних, као што су: вид резања (уздужно, попречно, тангенцијално или комбиновано), густина и влажност дрвета (Еума, 2004а, 2004б).

Један од модела који је, код израчунавања главне силе резања, укључио и својства дрвета, је модел Акселсона (Axelsson, 1993). Емпиријска једначина обухвата следеће утицаје материјала, алата и режима обраде: густину дрвета, влажност дрвета, температуру дрвета, угао између вектора брзине резања и правца протезања влакана, брзину резања и средње дебљине струготине. Једначина је постављена на основу мултифакторног експеримента расецања дрвета кружном тестером и има следећи облик:

$$F_p = \left[\frac{-7,37 + \delta_m \times (0,38 \cdot \rho_s - 224,5 \cdot \gamma) + 15,61 \cdot \varphi_s - 2,6 \cdot \varphi_s^3 + 1,31 \cdot r + 0,2 \cdot v + v_a \cdot (0,3 \cdot \varphi_s - 0,01 \cdot T)}{4,25} \right]$$

где је: F_p – специфична главна сила резања [N/mm], e_{sr} – средња дебљина струготине [mm]; ρ_s – густина дрвета при влажности од 8% [kg/m³]; γ – грудни угао [rad]; φ_s – угао између правца резања и правца пружања дрвених влакана [rad]; r – радијус заобљења сечива [μ m]; v_a – садржај воде [%]; v – брзина резања [m/s]; T – температура [°C].

Коефицијент детерминације слагања резултата мерења и израчунатих вредности је $R^2=0,81$ у целом домену важења модела (Axelsson, 1993).

Следећи модел за предикцију сила резања је тзв. Најлоров модел. При формирању овог модела аутори (Naylor et al., 2012) су, осим густине и влажности дрвета, у променљиве укључили механичка својства дрвета и то: савојну и смицајну чврстоћу дрвета, модуле еластичности и смицања, дубину глодања и жилавост дрвета. Испитивано је осам различитих врста дрвета на четири различите влажности. Узорци су обрађивани дуж и попреко на дрвна влакна. За обраду је коришћен једноставан алат монтиран на CNC глодалицу. Брзина главног (и помоћног кретања) праволинијског кретања била је 0,1 m/s. Постављена су две одвојене једначине за силу резања и то за глодање дуж и попреко на влакна:

- регресиона једначина дуж влакана:

$$F_r = -15,3 + 0,0243 \cdot G + 2,54 \cdot \tau_{sm} + 0,0246 \cdot \rho + 65,4 \cdot \delta - 0,301 \cdot v_a + 0,00492 \cdot \sigma_{usm}$$

- регресиона једначина попреко на влакна:

$$F_r = -72,7 - 0,000093 \cdot E_{ms} + 0,235 \cdot \sigma_{sav} + 0,0594 \cdot \rho + 108 \cdot \delta - 0,129 \cdot v_a + 0,00526 \cdot \sigma_{usav}$$

где је: F_r – израчуната сила резања [N]; G – модул смицања дрвета [MPa]; τ_s – чврстоћа дрвета на смицање [MPa]; r – радијус заобљења/затупљења сечива [μ m]; δ – дебљина слоја који се скида [mm]; v_a – влажност дрвета [%]; σ_{usm} – жилавост дрвета при смицању [J/m²]; E_{ms} – модул еластичности дрвета при савијању [MPa]; σ_{sav} – чврстоћа дрвета при савијању [MPa]; σ_{usav} – жилавост дрвета при савијању [J/m²].

Основна мана наведеног модела је што се практично ради о елементарном резању. Алат је током експеримента био круто монтиран на троосну CNC глодалицу и главно кретање било праволинијско веома малом брзином (0,1 m/s) што је веома различито од стварних услова резања.

Наредни је модел Поранкијевича (Porankiewicz et al., 2011). Модел је направљен и верификован на основу резултата истраживања на посебно израђеној лабораторијској машини (Porankiewicz et al., 2011). Главно кретање врши обрадак и оно је кружно, а помоћно кретање врши алат и оно је транслаторно. Модел укључује: физичка и механичка својства узорака, карактеристике алата и карактеристике режима обраде. Постављене једначине за обимну и нормалну силу резања дате су у функцији (φ_s) угла између правца резања и правца протезања влакана, (r) радијуса заобљења – затупљења сечива [μm], (γ) величине грудног угла сечива, (e_{sr}) средње дебљине струготине, (v_r) брзине резања, (ρ_8) густине дрвета при 8% влажности, (u_{dr}) влажност дрвета и (T) температуре дрвета. Формула за израчунавање обимне силе гласи:

$$F_c = \left[a_1 + a_2 \cdot |\cos(\varphi_s + a_3)|^{+a_4} \right] \cdot P_{A1} + \left[+a_5 + a_6 \cdot |\sin(\varphi_s + a_7)|^{+a_8} \right] \cdot P_{A2} + a_{27} [N]$$

где су:

$$P_{A1} = e_{sr}^{a_9} \cdot \gamma^{a_{10}} \cdot r^{a_{11}} \cdot v_c^{a_{12}} \cdot \rho_8^{a_{13}} \cdot \left(a_{14} - e^{v_a \cdot a_{15}} \right)^{-1} \cdot \left(a_{16} - e^{T \cdot a_{17}} \right)^{-1}$$

$$P_{A2} = e_{sr}^{a_{18}} \cdot \gamma^{a_{19}} \cdot r^{a_{20}} \cdot v_c^{a_{21}} \cdot \rho_8^{a_{22}} \cdot \left(a_{23} - e^{v_a \cdot a_{24}} \right)^{-1} \cdot \left(a_{25} - e^{T \cdot a_{26}} \right)^{-1}$$

Формула за израчунавање нормалне силе гласи:

$$F_n = \left[b_1 + b_2 \cdot |\cos(\varphi_s) + b_3|^{+b_4} \right] \cdot P_{B1} + \left[+b_5 + b_6 \cdot |\sin(\varphi_s) + b_7|^{+a_8} \right] \cdot P_{B2} \cdot b_{27} [N]$$

где су:

$$P_{B1} = e_{sr}^{b_9} \cdot \gamma^{b_{10}} \cdot r^{b_{11}} \cdot v^{b_{12}} \cdot \rho_8^{b_{13}} \cdot \left(b_{14} - e^{v_a \cdot b_{15}} \right)^{-1} \cdot \left(b_{16} - e^{T \cdot b_{17}} \right)^{-1}$$

$$P_{B2} = e_{sr}^{b_{18}} \cdot \gamma^{b_{19}} \cdot r^{b_{20}} \cdot v^{b_{21}} \cdot \rho_8^{b_{22}} \cdot \left(a_{23} - e^{v_a \cdot b_{24}} \right)^{-1} \cdot \left(b_{25} - e^{T \cdot b_{26}} \right)^{-1}$$

Променљиве су изражене у следећим јединицама: φ_s [rad]; γ [rad]; T [K]; e_{sr} средње дебљине струготине [mm]; v [m/s]; ρ_8 [kg/m³]; и v_a [%]; a_i и b_i су коефицијенти добијени на основу обимних експеримената које су аутори рада спровели и који се могу наћи у (Porankiewicz et al., 2011).

За избор математичког модела не постоји опште важеће правило. У већини случајева модели немају универзални карактер, што отежава њихову примену у пракси (Tanović, Petrakov, 2007). Заправо, за сваки истраживани процес или систем треба изабрати одговарајући модел и извршити проверу његове тачности и адекватности у односу на реалан процес.

Није необично да се у теорији резања дрвета користе математички модели за предикцију силе резања у зависности од одређене групе утицајних фактора, који се иначе користи у теорији резања метала (Stanić et al., 1983; Tanović, Petrakov, 2007; Skakić et al., 1994; Kršljak, 2009; Džinčić, Skakić, 2012; Mandić et al., 2014).

Ови статистички модели базирани су на вишефакторним ортогоналним експерименталним плановима првог реда (Box, Wilson, 1951; Nalimov, 1965; Stanić et al., 1983). Циљ оваквих математичких модела је предвиђање вредности сила резања у зависности од величина режима обраде и осталих утицајних фактора на силе резања, као што су обрадљивост дрвета, елементи геометрије сечива, динамичке карактеристике машине и др.

Skakić et al. (1994) су анализирали зависност средње обимне силе F_{om} од дубине глодања a и брзине помоћног кретања u . За план експеримента усвојен је двофакторни ортогонални план првог реда. Добијени математички модел:

$$F_{om} = 24,33 \cdot a^{0,4045} \cdot u^{0,8126}$$

показује да средња обимна сила расте при повећању било којег анализираних утицајног фактора и да по интензитету значајно већи утицај показује брзина помоћног кретања у односу на дубину глодања.

На основу познавања функција сила резања, у производним условима обезбеђује се рационална конструкција и економична експлоатација производних средстава. Такође, обезбеђује се оптимизација процеса обраде, на основу прорачуна

оптималних вредности елемената режима обраде у чијим једначинама фигуришу силе резања.

3.4.2 Истраживања обрадљивости дрвета

Међу факторе са највећим утицајем на функције обрадљивости дрвета, спадају:

- Својстава дрвета:

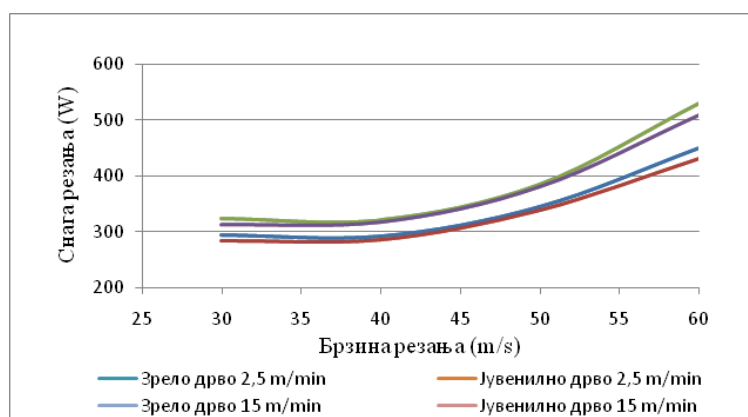
структурна својства, хемијски састав и техничка својства.

- Технолошки фактори:

алат (материјал и геометрија сечива), машина (крутост и тачност, динамичке карактеристике, зазори у вођицама и другим кинематичким склоповима), струготина (димензије, облик, способност ломљења, одвођење струготине из зоне резања), методи обраде (пиљење, глодање, стругање, бушење и брушење) и режим обраде (брзина резања, брзина помоћног кретања, дубина резања). Значајан број истраживања бавио се утицајем ових фактора на обрадљивост дрвета при машинској обради (Franz, 1958; McKenzie, 1961; Davis, 1962; Afanasev, 1961). Резултати њихових истраживања указују да код обраде дрвета постоји директна корелација између наведених фактора и снаге, односно сила резања.

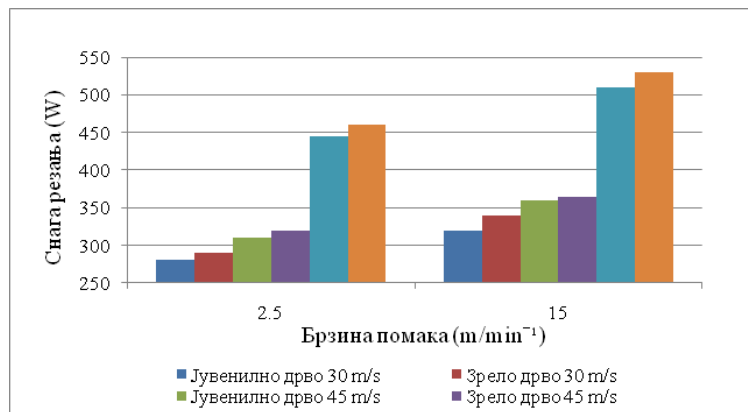
Вредност снаге потребне за резање снижава се са снижењем вредности брзине резања и брзине помоћног кретања (Barcik et al., 2008).

Слика 3.43 приказује зависност снаге резања од брзине резања при рендисању.



Слика 3.43: Зависност снаге резања од брзине резања при рендисању дрвета канадске тополе, (Barcik et al., 2008)

Слика 3.44 приказује зависност снаге резања од брзине помоћног кретања при рендисању. Експеримент је потврдио и утицај различите анатомске и хемијске грађе јувенилнога дрвета у односу на зрело дрво на физичка и механичка својства таквога дрвета, а тиме и на снагу резања при механичкој обради јувенилног дрвета.



Слика 3.44: Зависност снаге резања од брзине помоћног кретања при рендисању дрвета канадске тополе, (Barcik et al., 2008)

Аутор је утврдио сличне корелације испитујући дрво букве, при обради глодањем (Barcik et al., 2010). Вредност снаге потребне за резање повећава се са повећањем вредности брзине резања, при чему је раст најинтензивнији изнад 30 m/s. Брзина помоћног кретања, такође утиче управно пропорционално, с тим што је већи раст снаге потребне за резање забележен при повећању брзине помоћног кретања од 4–8 m/min, у односу на повећање од 8–11 m/min.

Грудни угао се понаша насупрот томе, односно смањење грудног угла утиче на повећање снаге потребне за резање, при чему се угао од 25° показао као оптималан. Најбоље би било изабрати режим са што је могуће већим грудним углом и мањом брзином помоћног кретања, али узимајући у обзир да ће смањење снаге потребне за резање утицати и на смањење капацитета производње.

Мандић и сарадници (2010) су испитивали утицај термичке модификације на снагу резања потребну за глодање дрвета (Mandić et al., 2010b). Експеримент је изведен за различите температуре третмана (170°C, 190°C и 210°C) и различите технолошке параметре обраде (брзина помоћног кретања и дубина глодања). Снаге резања током глодања мерене су на четири групе узорка буковог дрвета, посебно за срчевину и бељику. За обрађене узорке тестирана су механичка и

физичка својства дрвета. Показано је да са повишењем температуре термичког третмана густина значајно опада и код белјике и код срчевине. Такође, резултати указују на постојање разлика у снагама потребним за обраду термички обрађеног дрвета у односу на нетретирано дрво. Односно, утврђено је да постоји јака линеарна корелациона зависност између снаге резања и својстава термички модификованог дрвета, с обзиром да промена механичких својстава утиче и на промену технолошких својстава дрвета. На основу добијених резултата забележено је и да са повећањем брзине помоћног кретања и дубине глодања, при истом температурном третману, снага расте, док при истој брзини помоћног кретања са повећањем температуре снага резања опада.

3.4.3 Истраживања храпавости обрађене површине

У дрвној индустрији, естетска својства намештаја и других производа од дрвета су јако битна. Овде се пре свега мисли на квалитет површине, односно храпавост производа коју је јако тешко одредити због хетерогене структуре дрвета, кинематике процеса обраде и услова резања. Новонастале површине при резању дрвета нису никада идеално глатке било да су равне или закривљене. Неравнине новостворене површине при обради дрвета резањем су узроковане с једне стране од структурних неравнина које су последица анатомске грађе дрвета, посебно елементи као што су влакна, поре, трахеиде и сл. Ове неравнине се уопште не могу избећи, што значи да прате резање дрвета. Такође, ту су и неравнине узроковане резањем које спадају у тзв. микронеравнине ако се односе на храпавост новонастале површине резања. С тим у вези могу се издвојити значајнији фактори који утичу на квалитет обраде као што су смер резања, геометрија сечива и стање наоштрениости, дебљина струготине, нетачност оштрења алата, технолошки параметри (брзина резања, брзина помоћног кретања и др.). Зато је важно изабрати одговарајућу методу која ће на ефикасан начин одредити храпавост. За одређивање квалитета обрађене површине користе се различите методе и уређаји као што су: визуелни, оптички, пнеуматски, ултразвучни, електрични и контактни профилометри.

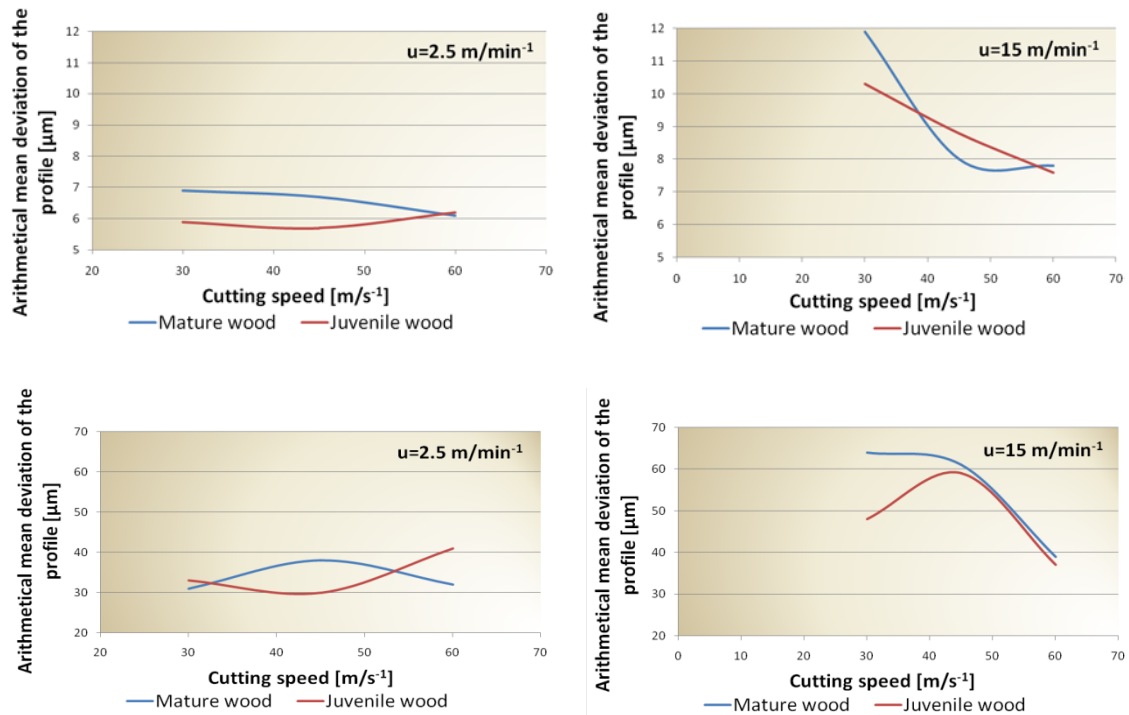
У неким истраживањима (Goli et al., 2001a, 2001b; Goli, Uzielli, 2004) проблематика храпавости обрађене површине решена је помоћу оптичког 3D

мерача и помоћу контактнoг профилометра. Резултати су показали да уздужно резање обезбеђује бољи квалитет површине у односу на попречно резање. Такође, садржај влаге, грудни угао и дубина глодања утицали су на исти начин на храпавост површине као што је описано у претходним фундаменталним истраживањима (Franz, 1958; Koch, 1964; McKenzie, 1961)

Malkocoglu (2007) анализира утицај брзине помоћног кретања и грудног угла на храпавост обрађене површине (Malkocoglu, 2007). Испитујући неколико врста дрвета, које расту у црноморском региону Турске, показао је да се са смањењем брзине помоћног кретања и грудног угла (при константној дубини глодања) повећава квалитет обрађене површине, с тим што је већи утицај грудног угла у односу на брзину помоћног кретања. Такође, показао је да при истим параметрима обраде четинари имају лошији квалитет обрађене површине у односу на лишћаре, што указује на очигледан утицај густине на резултат мерења храпавости.

Varcik et al. (2009) су истраживали утицај брзине резања и брзине помоћног кретања на квалитет обрађене површине дрвета тополе.

Слика 3.45 приказује резултате тог истраживања. Уочљиво је да се бољи квалитет површине постиже обрадом јувенилног дрвета у односу на зрело дрво.



Слика 3.45: Средње аритметичко одступање профила R_a и максимална висина профила R_z при брзинама помоћног кретања 2,5 m/min и 15 m/min , (Barcik et al., 2009)

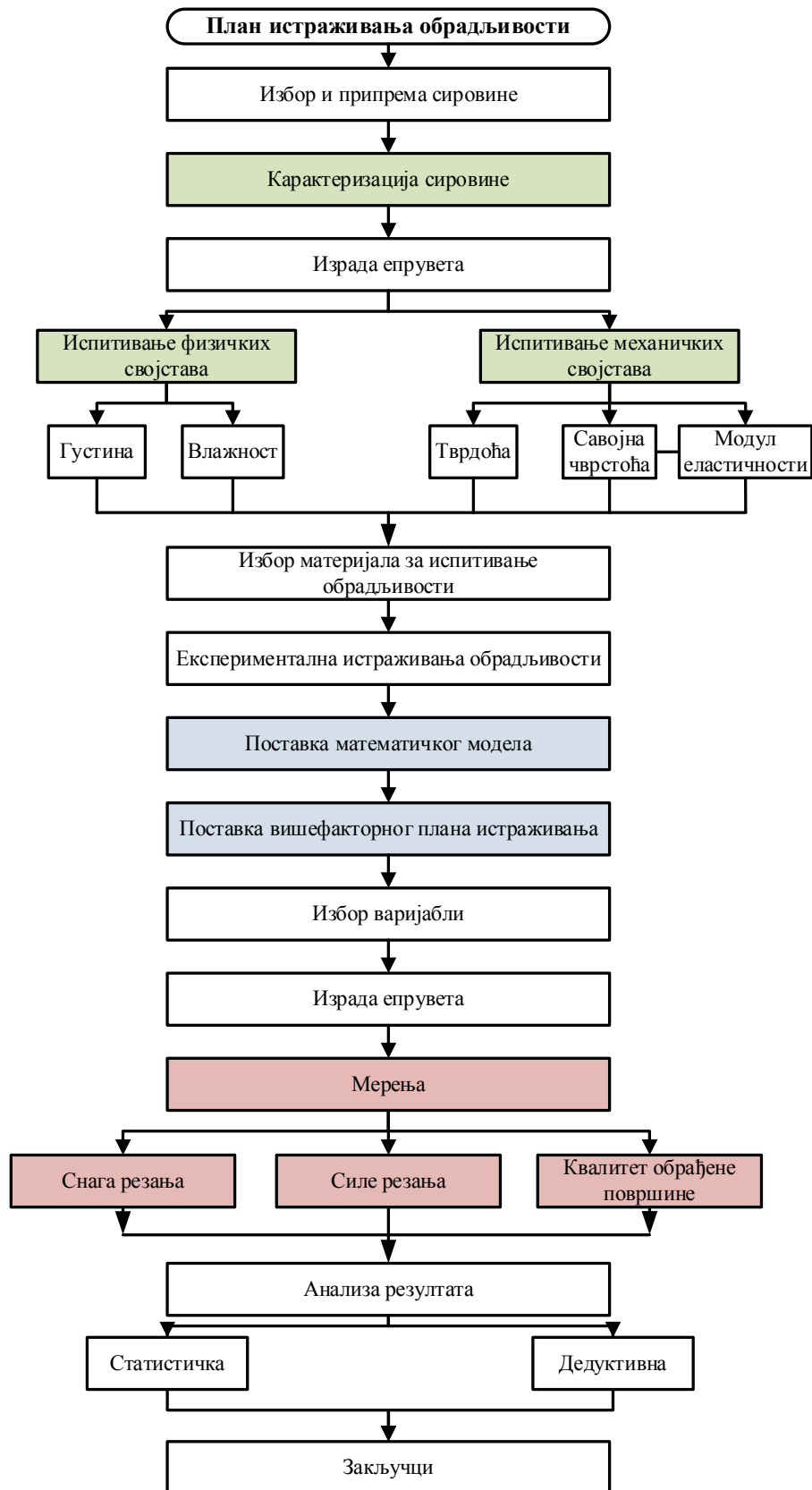
Škaljić et al. (2009) су истраживали квалитет обрађене површине при рендисању букових, храстових и јелових узорака на четвоространој рендисаљци. Букови узорци су израђени од парене буковине и термички модификоване буковине (212°C). Истраживања су спроведена на узорцима блистача, који су рендисани у радијалном смеру при брзинама помоћног кретања од: 6, 12, 18 и 24 m/min , при константној дубини рендисања (2 mm), броју обртаја радне осовине од 6 000 min^{-1} и грудном углу од 15° . Храпавост површине мерена је по дужини обраде, у складу са нормом ДИН 4768 (1990) употребом електромеханичког профилометра Mitutoyo SJ-201. Резултати су показали да се са повећањем брзине помоћног кретања повећава и храпавост површине. Квалитет обрађене површине за различите врсте дрвета је показао разлике у једнаким условима обраде. Најмању храпавост имали су узорци храста, а највећу узорци јеле, док између квалитета површине узорака од парене буковине и термички модификоване буковине није забележена значајна разлика успркос много лошијим механичким својствима термички модификованог дрвета у односу на парену буковину.

4 МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА

План истраживања обрадљивости дрвета састоји се из следећих фаза: избор сировине, припрема сировине, израда епрувета за испитивање физичких и механичких својстава, испитивање и анализа физичких и механичких својстава, избор дасака (храстових елемената) за израду епрувета за испитивање обрадљивости, испитивања обрадљивости, анализа резултата и закључци (Слика 4.1).

За испитивање обрадљивости одабран је храст лужњак (*Quercus robur*), као једна од најцењенијих домаћих врста, која по својим естетским, физичким, механичким, технолошким и употребним својствима представља еталон квалитетног дрвета. Племенити фурнир, резана грађа и елементи представљају само прелазни облик, док намештај и други вредни производи потребни човеку, представљају примарни циљ. Следећи корак у истраживању био је избор одговарајућих храстових дасака, потребних за истраживање, на неком од стоваришта у Србији. Одабране даске за истраживање требало је да буду радијалне и без видљивих грешака у грађи дрвета. После припреме и карактеризације дасака у лабораторији било је потребно урадити статистичку анализу њихових физичких и механичких својстава. На основу постављених критеријума одабране су даске, уједначене влажности и густине, из којих су изрезане епрувете за испитивање обрадљивости.

Претпостављен је модел, одабрани показатељи обрадљивости и независно променљиве и на основу тога постављен трофакторни план експеримента. Лабораторијска испитивања обрадљивости обухватала су мерење снага и сила резања, као и храпавости добијене површине при обимном глодању и то за различите услове резања и различите углове резања. Постављени модел и одабране независно променљиве су анализирани статистички, односно извршена је провера адекватности модела и сигнификантност параметара модела и на основу тога донесени одређени закључци.



Слика 4.1: План истраживања обрадљивости

У наставку поглавља детаљно су приказане све фазе плана истраживања.

4.1 Основне карактеристике дрвета

У Србији расте десет аутохтоних врста храстова, од којих су најзаступљеније: китњак (*Quercus petraea*), лужњак (*Quercus robur*), сладун (*Quercus frainetto*) и цер (*Quercus cerris*).

Стабло просечног храста је високо 20 - 30 m, пречника на прсној висини од 0,4 до 1,8 m и старости до 400 година. Има широку крошњу са дебелим гранама и светло сиву кору са дубоким уздужним пукотинама. Лужњак гради чисте и мешовите састојине са пољским јасеном у приобалним деловима река који су често плавлени.

Храст лужњак (*Quercus robur* L.) је једричава врста, бељика је жућкасто беле боје, ширине 1 до 3 cm, а срчевина је жућкасто смеђа. Дрво је фино, сјајно, некада неправилне текстуре, са појавом искричавости и уморности влакана. Прстенови прираста су маркантни, трахеје прстенасто порозно распоређене, а траке лигнума врло крупне, изузетно маркантне на радијалном пресеку, због чега су сортименти са овом текстуром посебно цењени. Размак између најширих трака износи 1 cm, што се може узети као карактеристика ове врсте (Вилотић, 2000).

Храстово дрво, са хемијског аспекта, изграђено је из 38,06 % до 43,79 % целулозе, 22,98 до 26,56% лигнина и 28,16 до 29,75% пентозана. Након сагоревања дрвета садржај пепела износи 0,32 до 0,89 %. (Stevanović Janežić et al., 1995).

Порозност храстовог дрвета износи 57% и спада у средње тешко дрво. Такође, спада у средње тврдо дрво и средње чврсто дрво када је у питању притисак на затезање, савијање и на смицање. Веома је еластичан.

Храстовина се добро машински обрађује и добро суши, али због појаве пукотина захтева блаже режиме сушења.

Табела 4.1 приказује физичка и механичка својстава храста лужњака (Šoškić, 2006).

Табела 4.1: Преглед својстава храста лужњака

Густина у апсолутно сувом стању	390-650-930 kg/m ³
Густина у просушеном стању влажности	430-690-960 kg/m ³
Густина у сировом стању влажности	650-1000-1160 kg/m ³
Напон на притисак II	55-65 N/mm ²
Напон на затезање II	90 N/mm ²
Напон на смицање II	11 N/mm ²
Напон на савијање	99-110 N/mm ²
Модул еластичности	13000 N/mm ²
Утезање дрвета:	
аксијално	0,4 %
радијално	4-4,6 %
тангенцијално	7,8-10 %
запреминско	12,6-15,6 %
Коефицијенти утезања:	
радијални	0,18
тангенцијални	0,34
Фактор анизотропије	1,9
Топлотна проводљивост управно на влакна	0,128-0,198 W /m °K
pH вредност	око 3,9

Дрво храста се добро површински обрађује и углавном се добро лепи, мада постоји могућност појаве флека на лепљеним површинама.

4.2 Избор и припрема узорака

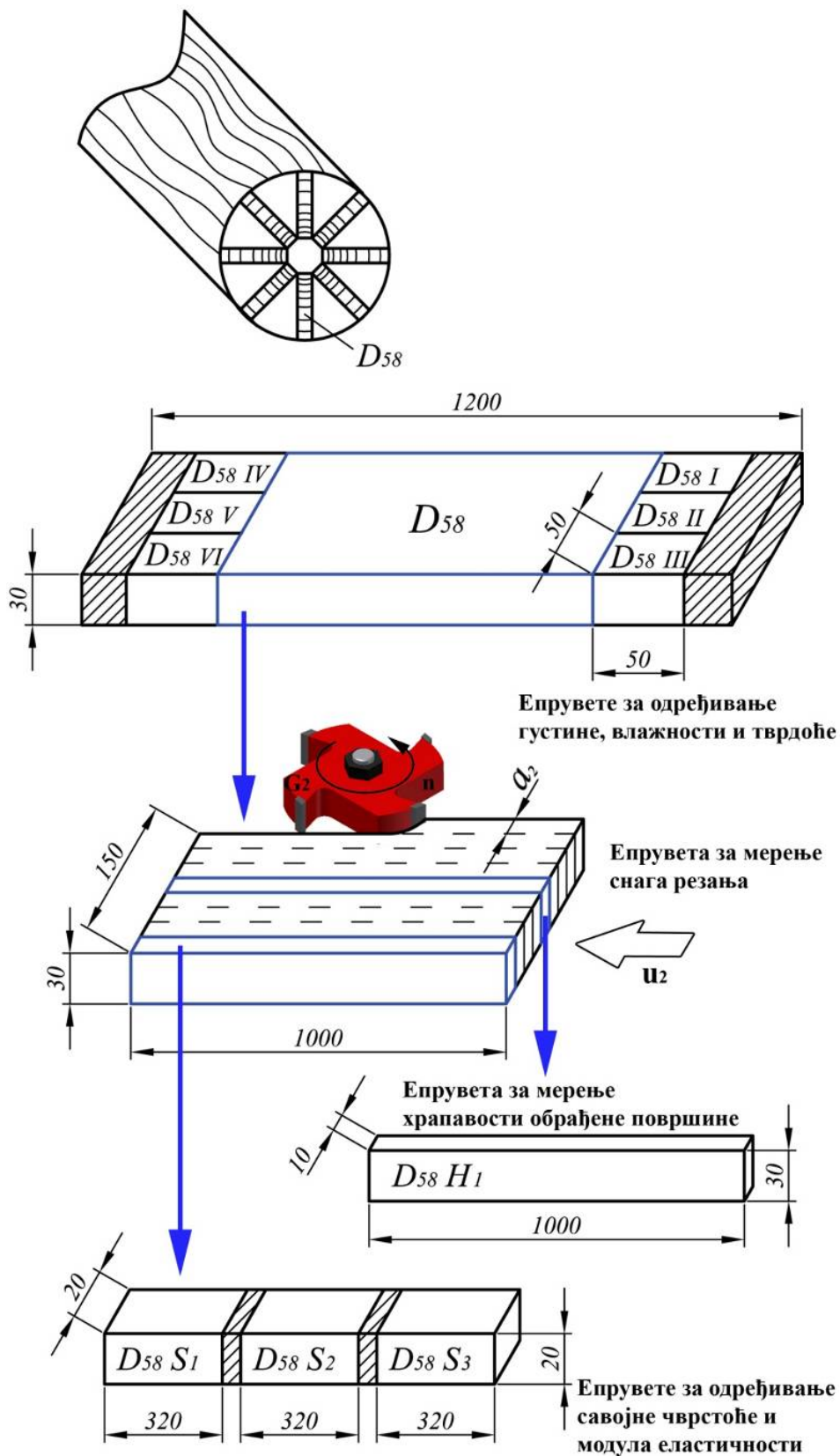
Даске потребне за испитивање су набављене у компанији ГИР из Краљева, која се бави производњом намештаја од пуног дрвета храста. Одабрано је укупно 75 дасака, различитих ширина (50–200 mm), дебљине приближно 35 mm и дужине око 1200 mm.

Даске су у лабораторији прво обрађене рендисањем (на равналици и дебљачи) на 30 mm дебљине, а затим су из њих изрезане епрувете за испитивање својстава, скраћене су на дужину од 1 m и обележене. На свим даскама је извршена карактеризација основних физичких и механичких својстава у Лабораторији за испитивање својстава дрвета Универзитета у Београду Шумарског факултета и то: густина, влажност и тврдоћа. Након тога је извршен поновни преглед свих дасака. На основу визуелног прегледа одбачене су даске са накнадно уоченим грешкама у грађи дрвета (неправилна структура, чворови, усуканост влакана и сл.).

За потребе истраживања обрадљивости одабрано је укупно 38 дасака правилне радијалне текстуре, без видљивих грешака у грађи са уједначеном влагом и густином у апсолутно сувом стању. На одабраним даскама су додатно измерене и савојна чврстоћа и модул еластичности.

Слика 4.2 приказује редослед и начин израде храстових епрувета потребних за испитивање физичких и механичких својстава, као и епрувета потребних за анализу обрадљивости при обимном глодању. Као што се са слике може видети, после изрезивања епрувете за одређивање густине, влажности и тврдоће димензија $50 \times 30 \times 50$ mm добијене су епрувете за мерење снага резања при обимном глодању ширине до 150 mm, дебљине 30 mm и дужине 1000 mm. Снага резања је мерена при сваком пролазу алата, а после сваког петог пролаза изрезана је епрувета за мерење храпавости обрађене површине димензија $30 \times 10 \times 1000$ mm. Остатак епрувете за мерење снаге резања је искоришћен за израду епрувета потребних за одређивање савојне чврстоће и модула еластичности димензија $20 \times 20 \times 320$ mm.

Пре почетка обраде епрувете су кондициониране на температури $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и релативној влажности $65 \pm 5\%$.



Слика 4.2: Изглед епрувета потребних за истраживање

4.3 Карактеризација материјала за истраживање

Према плану истраживања од физичких својстава испитивани су густина и влажност храстових узорака. Од механичких својстава испитивани су тврдоћа дрвета на бочној страни епрувете за испитивање обрадљивости, савојна чврстоћа и модул еластичности.

4.3.1 Одређивање физичких својстава узорака

Густина дрвета је одређена у складу са стандардом ISO 3131 – 1975 (E), који предвиђа утврђивање запреминских маса дрвета. Маса апсолутно сувог дрвета (којем је вештачким сушењем испарена сва влага) израчунава се према следећем обрасцу:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

где су:

m_0 – измерена маса епрувете у апсолутно сувом стању влажности [g], V_0 – израчуната запремина епрувете у апсолутно сувом стању влажности [cm³].

Влажност дрвета је одређена гравиметријским методом у складу са стандардом ISO 3130 – 1975 (E), на основу података о масама дрвета у влажном и апсолутно сувом стању. Апсолутна влажност се израчунава према следећем обрасцу:

$$v_a = \frac{m_v - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

где су:

v_a – апсолутна влажност [%], m_v – маса влажне епрувете [g], m_0 – маса епрувете у апсолутно сувом стању влажности [g].

4.3.2 Одређивање механичких својстава узорака

Испитивање тврдоће дрвета извршено је у складу са стандардом EN 1534 – Brinell's hardness. Овај метод се користи за одређивање тврдоће метала, али нешто модификован може се користи и за одређивање тврдоће дрвета. Тврдоће дрвета се израчунава према следећем обрасцу:

$$H = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad [MPa]$$

где су:

F – сила утискивања [N], D – пречник куглице [mm], d – пречник отиска куглице узет као просек два унакрсна пречника [mm].

Поступак испитивања савојне чврстоће и модула еластичности при дејству концентрисане силе управно на влакна прописан је стандардом: SRPS D.A1.046. Савојна чврстоћа се израчунава према следећој формули:

$$\sigma_s = \frac{M_x}{W_x} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad [Pa]$$

где су:

$M_x = \frac{F \cdot l}{4}$ – момент савијања [Nm], $W_x = \frac{b \cdot h^2}{6}$ – отпорни момент [m^3], F – сила савијања [N], l – размак ослонаца [m], b – ширина епрувете [m], h – висина епрувете [m].

Модул еластичности, при дејству концентрисане силе на епрувету, на средини растојања ослонаца, израчунава се према следећем обрасцу

$$E_s = \frac{F \cdot l^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot f} \quad [Pa]$$

где су:

f – измерени угиб (епрувете) [m] при сили F [N], b – ширина епрувете [m], h – висина епрувете [m] и l – растојање ослонаца [m].

4.4 Експериментална истраживања обрадљивости

Према плану истраживања, пре експерименталних мерења, поставља се математички модел и одређује се број фактора који ће фигурирати у

вишефакторном експерименту, а на основу тога бирају се одговарајуће варијабле, односно утицајни фактори за испитивање функције обрадљивости.

У оквиру експерименталних мерења, мерене су вредности снага резања, сила резања и квалитет обрађене површине. Поставља се питање због чега су управо ова три критеријума изабрана за оцену обрадљивости? Као што је већ наведено, силе и моменти резања, постојаност алата и квалитет обрађене површине могу се сврстати у основне функције обрадљивости. У наведене основне функције, нису директно сврстане тзв. допунске функције везане за температуру и снагу резања. Међутим, због специфичности дрвета (као конструктивног материјала), као и машина за обраду дрвета, показало се да је од посебног интереса и функција снаге резања. Наиме, постојаност алата у преради дрвета од тврдог метала је велика и експеримент заснован на постојаности алата трајао би предуго, због тога уместо овог критеријума мерена је снага резања коју индиректно одређују функција постојаности алата и функција сила резања.

4.4.1 Вишефакторни ортогонални планови

Полазну основу експерименталних истраживања, представља метод планирања експеримента, односно избор типа и његове структуре.

Историјски гледано у оквиру методе експерименталних истраживања постоје два битна, међусобно различита, концепта планирања експеримента. То су класична и савремена теорија планирања и извођења експеримената и анализе експерименталних резултата. Класична теорија експерименталних испитивања се темељи на експерименталним плановима једнофакторне анализе. Концепт ове теорије при испитивању неке појаве своди се на мерење само једног фактора, док се вредности осталих фактора задржавају на одређеном константном нивоу. Ова експериментална процедура се понавља на свим обухваћеним факторима. Битна мана оваквог начина извођења експеримената је велики број скувих и дуготрајних експеримената и немогућност да се утврди степен интеракције датих фактора. Основу савремене теорије експерименталних испитивања чине планови статистичке вишефакторне анализе. Суштинска разлика у односу на концепцију једнофакторног експеримента огледа се у могућности варирања утицајних фактора на различитим нивоима симултано. Квалитативни скок у развоју теорије

планирања вишефакторног експеримента настао је почетком друге половине прошлог века. Тада су Вох и Wilson (1951) први применили статистички вишефакторни метод планирања експеримента при проучавању оптимизације процеса хемијске технологије, а значајан допринос је дао и Nalimov (1965). У области производног машинства метода планирања експеримента први пут се применила 1964. године приликом испитивања постојаности алата.

Помоћу ових вишефакторних планова може се извршити:

- математичко моделирање појава, процеса и система у простору и времену,
- проучавање природе унутрашњих механизма појава и процеса и
- оптимизација и оптимално управљање процесима у техничким системима.

Вишефакторне експерименталне планове, у односу на планове једнофакторне анализе, карактеришу следећа обележја:

- минимални број експерименталних тачака распоређених у експерименталном хиперпростору, што има за последицу вишеструко ниже трошкове и краће време трајања експерименталних испитивања,
- максимум информација о ефектима математичког модела процеса,
- сукцесивно извођење експеримента у етапама (корак по корак),
- једноставна статистичка (регресиона и дисперзиона) анализа експерименталних резултата,
- могућност квалитативне и квантитативне оцене дејства сваког утицајног фактора и њихових интеракција на функцију циља.

Постоји више критеријума за поделу вишефакторних планова. Најважнији су: број фактора у плану, ред плана и циљ плана. Тако да се експериментални планови деле:

Према броју фактора:

- једнофакторне планове,
- двофакторне планове,
- трофакторне планове,

- вишефакторне планове.

Према реду (степену модела) на:

- планове првог реда,
- планове другог реда,
- планове трећег реда.

Према циљу који се постиже планом на:

- планове за анализу сигнификантности скупа улазних фактора,
- планови за откривање и проучавање законитости датих појава и процеса,
- планови за оптимизацију и управљање датим појавама, процесима и системима (оптимизациони планови).

Ред вишефакторног плана директно је повезан са редом математичког модела. Планови првог реда најчешће се везују за линеарне и квазилинеарне математичке моделе, као и за степене, експоненцијалне и друге функције које се логаритмовањем могу свести на линеарне. У инжењерској пракси највећу примену су нашли *вишефакторни ортогонални планови првог реда* (Box-Wilsonови планови), који су и примењени у овој дисертацији. Планови другог реда су развијени за квадратне (нелинеарне) математичке моделе. Од планова другог реда најширу примену су нашли Боксови симетрични композициони планови. Ови планови су добили назив јер се компонују на основу планова првог реда који чине “језгро” плана, симетричним додавањем одређеног броја експерименталних тачака (“звездане” тачке) око центра плана. Композиционе планове треба применити тек када се анализом утврди да су (квази) линеарни модели неадекватни.

Идеја вишефакторних ортогоналних планова представљају нов квалитет у теорији вишефакторне статистичке анализе, а полази од посебно уређених распореда скупа експерименталних тачака у хиперпростору. Оваква композиција експерименталних тачака у хиперпростору изражава се кроз одговарајућу план матрицу специфичне структуре, облика и обима. Факторни ортогонални планови

подразумевају да се експерименталне тачке распореде у хиперпростору тако да у кореспондентној план матрици задовољавају услове:

- симетричности: $\sum_{u=i}^N x_{iu} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, k$
- ортогоналности: $\sum_{u=i}^N x_{iu}, x_{ju} = 0 \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, k$
- нормативности: $\sum_{u=i}^N x_{iu}^2 = N \quad i = 0, 1, 2, \dots, k$

У односу на друге планове, за ортогоналне планове је карактеристично:

- распоред експерименталних тачака у експерименталном простору је оптималан,
- број експерименталних тачака је минималан, што има за последицу ниже трошкове и краће време испитивања дифузног система,
- обим добијених информација је максималан: сви фактори се мењају истовремено, па се сваки ефекат фактора одређује на основу свих N експерименталних резултата, па је отуда дисперзија било ког регресионог коефицијента b_i мања за N пута од грешке експеримента,
- сви ефекти b_i фактора израчунавају се независно један од другог и независно од вредности фактора у обухваћеном вишефакторном експерименталном простору,
- математичка обрада експерименталних резултата је врло једноставна и краткотрајна.

За анализу резултата експеримента неопходно је познавање врсте понављања опита. Тако се разликују три система понављања:

1. систем понављања – у тачкама нултог нивоа (централна тачка плана) врши се понављање n_0 пута.
2. систем понављања – у свакој тачки плана (хиперкуба) врши се понављање,

- у свим тачкама плана исти број понављања (n) пута,
 - у свакој тачки плана различит број понављања $n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_N$),
 - опити се понављају само у једној тачки плана (n_1) пута,
 - опити се понављају само у једној тачки изван плана (p) пута.
3. систем понављања – понављање опита се не врши.

У дисертацији је примењен први систем понављања. С обзиром да су у питању планови првог реда број опита у центру плана се усваја (од 2 до 5), $n_0 = 4$.

Укупан број опита при понављању у централној тачки плана је $N = 2^k + n_0$, где је k број утицајних фактора. У дисертацији је анализиран трофакторни план тако да је $k = 3$, на основу тога произилази да је број опита при понављању у централној тачки: $N = 2^k + n_0 = 2^3 + 4 = 12$.

После изведених експеримената при унапред предвиђеном ортогоналном планирању врши се анализа резултата методом “корак по корак”.

1 корак – прорачун параметара модела

Први корак подразумева одређивање линеарних коефицијената вишеструке регресије из израза:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u \quad i = 1, 2, \dots, k$$

где су: x_{iu} – вредност фактора x_i у u -том експерименту, y_u – вредност функције циља у u -том експерименту, N – број експеримената.

Слободни члан b_0 одређује се из израза:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N y_u$$

а коефицијенти регресије који дефинишу узајамно дејство фактора одређују се из израза:

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{u=i}^N x_{iu} x_{ju} y_u \quad i = 1, 2, \dots, k; \quad i < j$$

Треба истаћи да се параметри модела b_0 одређују на основу резултата из свих $N = 2^k + n_0$ тачака плана, а остали параметри $b_1, b_2, b_3, \dots, b_k$ само коришћењем резултата из $N = 2^k$ тачака распоређених на теменима хиперкуба.

II корак – анализа резултата

После израчунавања коефицијената регресије приступа се анализи резултата, односно:

- оцени сигнификантности коефицијената регресије, и
- оцени адекватности математичког модела.

Оцена сигнификантности (значајности) било код параметра модела првог реда изводи се независно од осталих. Несигнификантни параметри модела могу се искључити из модела, не коригујући при том вредности осталих сигнификантних параметара који остају у моделу.

За оцену сигнификантности се може користити било који од два позната критеријума: t (Студентов) или F -критеријум, пошто између њих постоји зависност облика $F(1, f) = t^2(f)$. Табела 4.2 приказује оцену сигнификантности према F -критеријуму, из табеле се може закључити да рачунска вредност дисперзионог односа F_{ri} износи:

$$F_{ri} = \frac{N b_i^2}{s^2(y)} = \frac{N b_i^2}{s_E^2} \quad i = 0, 1, 2, \dots, k$$

Према t -критеријуму, међутим, биће:

$$t_{ri} = \frac{|b_i|}{s(b_i)} = \frac{|b_i| \sqrt{N}}{s(y)} = \frac{|b_i| \sqrt{N}}{s_E}$$

Када се израчунава S_{b_0} , односно F_{r_0} , узима се, сагласно напмени при израчунавању b_0 , за $N = 2^k + n_0$. Међутим, прорачун осталих величина $S_{b_1}, S_{b_2}, \dots, F_{r_1}, F_{r_2}, \dots$ изводи се за $N = 2^k$.

Покаже ли се да је $F_r > F_t$, односно $t_r > t_t$ за одређени ниво значајности (α) тада је параметар модела b_i сигнификантан. У обрнутом случају параметар је несигнификантан и може се искључити из модела.

Табела 4.2: Једначине дисперзионе анализе

Извор варијације	Степен слободе f	Сума квадрата S	Дисперзија s^2	Дисперзиони односи F_r
b_0	$f_0 = 1$	$S_{b_0} = Nb_0^2$	$s_0^2 = S_0 / f_0$	$F_{r_0} = s_0^2 / s_E^2$
b_1	$f_1 = 1$	$S_{b_1} = Nb_1^2$	$s_1^2 = S_1 / f_1$	$F_{r_1} = s_1^2 / s_E^2$
b_2	$f_2 = 1$	$S_{b_2} = Nb_2^2$	$s_2^2 = S_2 / f_2$	$F_{r_2} = s_2^2 / s_E^2$
...
b_k	$f_k = 1$	$S_{b_k} = Nb_k^2$	$s_k^2 = S_k / f_k$	$F_{r_k} = s_k^2 / s_E^2$
Резидуална сума	$f_R = N - k - 1$	$S_R = \sum_{u=1}^N (y_u - \hat{y}_u)^2 =$ $\sum_{u=1}^N y_u^2 - N \sum_{i=1}^k b_i^2$	—	—
Укупна сума	$f_u = N$	$S_u = \sum_{u=1}^N y_u^2$	—	—
Грешке експеримента	$f_E = n_0 - 1$	$S_E = \sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2 =$ $\sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}^2 - \frac{1}{n_0} \left(\sum_{i=1}^{n_0} y_{0u} \right)^2$	$s_E^2 = \frac{S_E}{f_E}$	—
Адекватност модела	$f_{LF} = f_R - f_E$	$S_{LF} = S_R - S_E$	$s_{LF}^2 = \frac{S_{LF}}{f_{LF}}$	$F_{rLF} = \frac{s_{LF}^2}{s_E^2}$

Проверавање адекватности модела састоји се, у општем случају, у упоређивању дисперзије експерименталних резултата у односу на линију регресије (s_R^2) и дисперзије експерименталних резултата у тачкама вишефакторног простора (s_E^2) преко Фишевог критеријума. Међутим, пошто је централна тачка придружена плану (резултати из ње се користе при одређивању b_0) и пошто се у овој тачки понављају експерименти n_0 пута, треба у Фишевом критеријуму, уместо s_R^2 заменити s_{LF}^2 , која представља дисперзију средњих вредности експерименталних резултата у односу на линију регресије. Отуда Фишеов критеријум за оцену адекватности модела гласи:

$$F_{rLF} = \frac{S_{LF}^2}{S_E^2}$$

Рачунска вредност у случају адекватног математичког модела треба да је мања од табличне, односно: $F_r < F_t$. У случају неадекватног математичког модела потребно је побољшати модел, што се постиже узимањем у обзир међусобног утицаја фактора (интеракције), чиме се повећава број израчунавања коефицијената регресије или у неким случајевима прећи са полинома првог реда на полином вишег реда, чиме се повећава број опита.

III корак – прорачун поузданости параметара модела

Границе поузданости параметара модела одређују се на основу општег израза:

$$b_i \pm \Delta b_i = b_i \pm t s(b_i)$$

где је: $t = t_t$ – таблична вредност t -критеријума за број степени слободе s којим се одређује $s^2(y)$ за изабрани ниво значајности (α).

Код ортогоналних планова границе поузданости (претходна формула) прелазе у облик $b_i \pm t \frac{s(y)}{\sqrt{N}}$. Одакле се добија величина интервала поузданости параметар

модела $b_i = \pm t \frac{s(y)}{\sqrt{N}}$. Ако је апсолутна вредност параметара модела већа од

коресподентне величине интервала поузданости, тада је параметар сигнификантан. После позитивне оцене адекватности модела одређују се границе његове поузданости, односно тачности у целини, из једначине:

$\eta = \sum_{i=0}^k b_i x_i \pm t_{f\alpha} \sqrt{\sigma^2(y)}$ где је дисперзија излаза \hat{y} (исказаног једначином

вишеструке регресије) $\sigma^2(\hat{y}) = \frac{\sigma^2(y)}{N} (1 + \rho^2)$. Из претходне једначине следи да

је дисперзија величине \hat{y} константна у свим тачкама хиперсфере полупречника

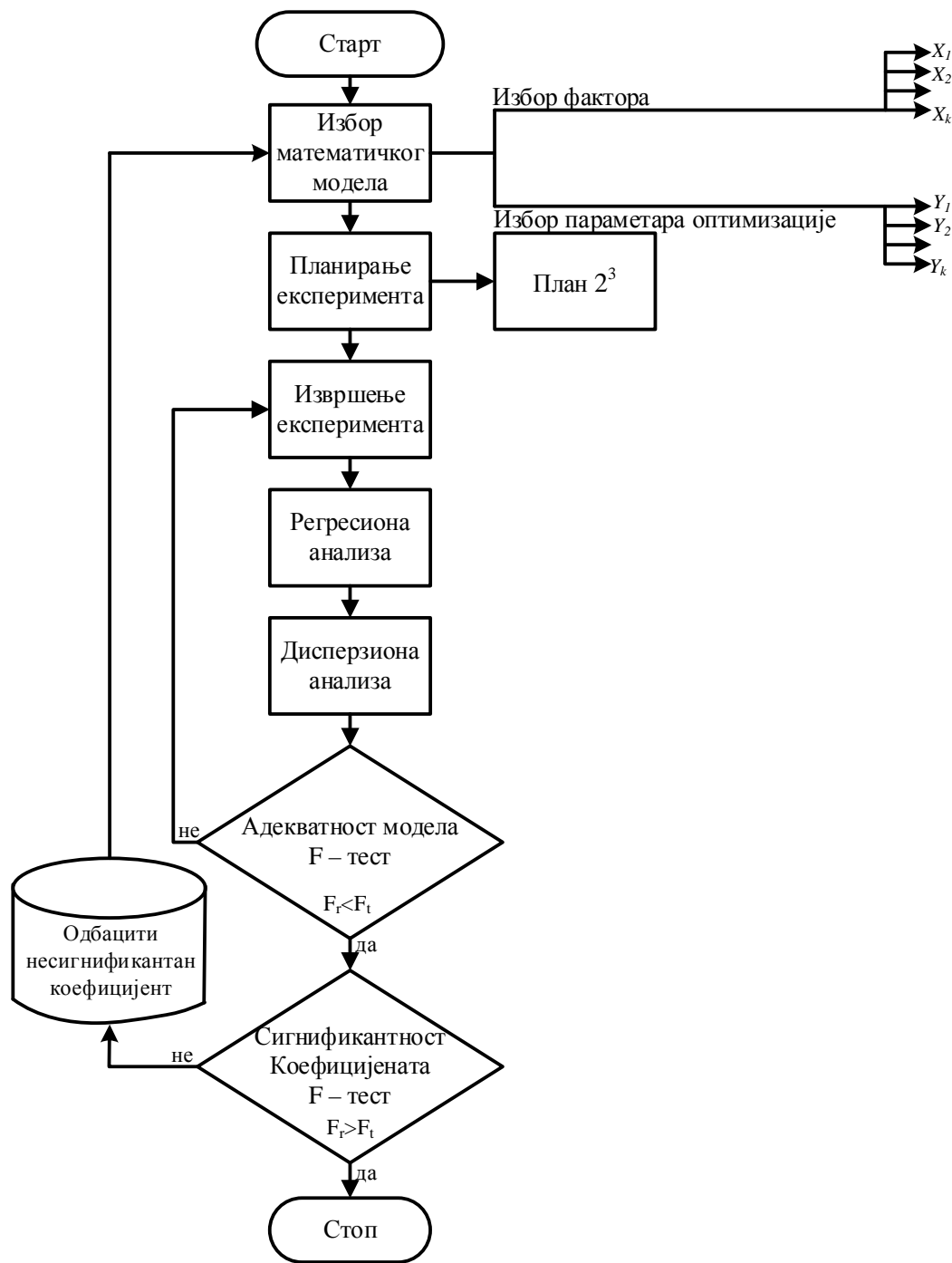
$$P = \sqrt{\sum x^2}.$$

Интерпретација резултата испитивања

Параметри модела и модел, који у целини исказују одређену законитост, садрже одређене информације о природи истраживаног процеса.

1. Нумеричка вредност параметара (коэффицијената) модела представља меру утицаја тог фактора (независно промењиве уз параметар) на функцију реаговања. Уколико је већа вредност параметара, утолико је већи утицај фактора. Занемарљиво мале (несигнификантне) вредности параметара модела могу се објаснити разлозима:
 - Не постоји функционална зависност између односног фактора (x) и функције реаговања (\hat{y});
 - Изабран је релативно мали интервал варијације (w) фактора;
 - Основни ниво фактора налази се у непосредној близини парцијалног екстрема функције за тај фактор;
 - Појавила се велика вредност грешке експеримента услед дејства система неконтролисаних и случајних фактора који нису обухваћени моделом.
2. Информација о карактеру утицаја фактора (x_i) на излаз (\hat{y}) садржана је у знаку параметра b_i , тј. ако је знак позитиван, тада са порастом вредности фактора расте и излаз, и обрнуто. Параметар (његова вредност и знак) одражава утицај фактора на излаз само у обухваћеној области вишефакторног простора.

Слика 4.3 приказује блок шему методологије експеримента.



Слика 4.3: Блок шема методологије експеримента

4.4.2 Поставка математичког модела

У теорији обраде резањем већина основних карактеристика обрадљивости, могу се изразити степеном функцијом облика:

$$R = C \prod_{i=1}^k f_i^{p_i},$$

где су:

C , p_i – параметри обрадљивости, f_i – вредности фактора и k – број фактора.

Према томе, претходна једначина представља математички модел функције обрадљивости којим се, на довољно поуздан начин, описује њено понашање унутар обухваћеног експерименталног простора. На пример за трофакторни план експеримента једначина има општи облик:

$$R = C \cdot f_1^{p_1} \cdot f_2^{p_2} \cdot f_3^{p_2} \quad (4.1)$$

За одређивање вредности параметара обрадљивости у једначини (4.1) потребно је укупно $N = 2^k + n_0 = 8 + 4 = 12$ експеримената, тј. потребно је да се за 12 комбинација вредности фактора f_1 , f_2 и f_3 измере одговарајуће вредности R . При томе су четири комбинације вредности фактора f_1 , f_2 и f_3 међусобно идентичне, тј. експеримент се при вредности фактора f_{1sr} , f_{2sr} и f_{3sr} четири пута понавља у централној тачки хиперпростора. Осталих осам комбинација вредности фактора налазе се на границама интервала варијације ових фактора.

Пре почетка мерења величине R неопходно је изабрати границе интервала варијације фактора f_1 , f_2 и f_3 . Међутим, при усвајању вредности границе интервала варијације фактора f_1 , f_2 и f_3 мора бити задовољен услов да је:

$$f_{i\,sr}^2 = f_{i\,min} \times f_{i\,max} \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.2)$$

Математичка обрада експерименталних резултата (регресиона анализа) обухвата одређивање нумеричких вредности величина C , p_1 , p_2 и p_3 у математичком моделу.

Регресиона и дисперзиона анализа добијених експерименталних резултата полази од план-матрице која се развија према својствима вишефакторног плана $N = 2^k + n_0$.

При томе је неопходно да се функција дефинисана једначином трансформише логаритмовањем у линеарни облик:

$$\ln R = \ln C + p_1 \ln f_1 + p_2 \ln f_2 + p_3 \ln f_3 \quad (4.3)$$

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (4.4)$$

где су:

$$y = \ln R, \quad x_1 = \ln f_1, \quad x_2 = \ln f_2, \quad x_3 = \ln f_3,$$

$$b_0 = p_0 = \ln C, \quad p_1 = b_1, \quad p_2 = b_2, \quad p_3 = b_3.$$

Прорачун коефицијената b_0, b_1, b_2 и b_3 поједностављује се увођењем нових независно промењивих величина x_1, x_2 и x_3 на три нивоа: +1, 0, и -1 преко једначина трансформације:

$$x_i = 1 + 2 \frac{\ln f_i - \ln f_{i \max}}{\ln f_{i \max} - \ln f_{i \min}}, \quad i = 1, 2, 3.$$

На основу једначина трансформације, с обзиром на услов (4.2), имамо следеће односе између природних и кодираних вредности фактора:

$$f_i = f_{i \max}, \quad x_i = +1,$$

$$f_i = f_{i \text{ sr}}, \quad x_i = 0,$$

$$f_i = f_{i \min}, \quad x_i = -1.$$

За кодиране вредности формира се план - матрица $N = 2^k + n_0 = 8 + 4 = 12$ (Табела 4.3).

Редослед експеримената заснован је на табlici случајних бројева, а матрица се тако комбинује да задовољава услов ортогоналности:

$$\sum_{u=i}^{12} x_{iu} x_{ju} = 0, \quad i, j = 0, 1, 2, 3, \quad i \neq j.$$

Табела 4.3: План матрица са кодираним факторима

Редни број експеримента	Код фактора				Резултат мерења $y = \ln R$
	x_i	x_i	x_i	x_i	
1	+1	+1	+1	+1	y_1
2	+1	+1	-1	+1	y_2
3	+1	-1	+1	+1	y_3
4	+1	-1	-1	-1	y_4
5	+1	0	0	0	y_5
6	+1	-1	+1	-1	y_6
7	+1	0	0	0	y_7
8	+1	+1	+1	-1	y_8
9	+1	-1	-1	+1	y_9
10	+1	0	0	0	y_{10}
11	+1	0	0	0	y_{11}
12	+1	+1	-1	-1	y_{12}

Својство ортогоналности омогућује да се за систем коефицијента b_i ($i = 0, 1, 2, 3$) у моделу (4.4) поставе једначине из којих се израчунавају вредности ових коефицијената. Тако се добија систем општих једначина:

$$b_i = \frac{1}{12} \sum_{u=i}^{12} x_{iu} y_u \quad i = 1, 2, 3,$$

које, с обзиром на план-матрицу у претходној табlici, прелазе у облик:

$$b_0 = \frac{1}{12}(y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_{12}) \tag{4.5}$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_6 + y_8 - y_9 + y_{12})$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(y_1 - y_2 + y_3 - y_4 + y_6 + y_8 - y_9 - y_{12})$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(y_1 + y_2 + y_3 - y_4 - y_6 - y_8 + y_9 - y_{12})$$

Након идентификовања модела (4.5) за дате услове обраде исти се преводи преко једначина трансформације у првобитни облик (4.1). Константа C и експоненти p_i ($i = 1, 2, 3$) овог модела одређују се изразом:

$$p_i = \frac{2b_i}{\ln \frac{f_{imax}}{f_{imin}}}, \quad i = 1, 2, 3$$

$$p_0 = \left| \sum_{i=1}^3 b_i \right|_{i=0,1,2,3} - \left| \sum_{i=1}^3 p_i \ln f_{imax} \right|_{i=0,1,2,3}$$

$$\ln C = b_0 + b_1 + b_2 + b_3 - 2 \left(b_1 \times \frac{\ln f_{1max}}{\ln \frac{f_{1max}}{f_{1min}}} + b_2 \times \frac{\ln f_{2max}}{\ln \frac{f_{2max}}{f_{2min}}} + b_3 \times \frac{\ln f_{3max}}{\ln \frac{f_{3max}}{f_{3min}}} \right)$$

$$C = e^{p_0}$$

4.4.3 Избор варијабли - фактора обраде

За експериментални план усвојен је трофакторни ортогонални план првог реда са укупним бројем експеримента $N = 2^k + n_0 = 8 + 4 = 12$

Одабрано је три фактора експеримента и то:

- брзина помоћног кретања припремка, ($f_1 = u$),
- дебљина слоја који се скида – дубина резања, ($f_2 = a$),
- геометрија алата – грудни угао, ($f_3 = \gamma$).

Експеримент је обављен при константној брзини резања односно броју обртаја алата. Границе интервала варијације фактора f_1 , f_2 и f_3 су изабране тако да буде задовољен услов:

$$f_{i\ sr}^2 = f_{i\ min} \times f_{i\ max} \quad i = 1, 2, 3$$

односно:

$$u_{i\ sr}^2 = u_{i\ min} \times u_{i\ max} \quad i = 1, 2, 3$$

$$a_{i, sr}^2 = a_{i, \min} \times a_{i, \max} \quad i = 1, 2, 3$$

$$\gamma_{i, sr}^2 = \gamma_{i, \min} \times \gamma_{i, \max} \quad i = 1, 2, 3.$$

Табела 4.4 приказује нумеричке вредности фактора експеримента.

Табела 4.4: Вредности коришћених параметара обраде

Брзина помера (m/min)		Дубина резања (mm)		Грудни угао (°)	
u_1	4	a_1	2	γ_1	16
u_2	8	a_2	3	γ_2	20
u_3	16	a_3	4,5	γ_3	25

Табела 4.5 приказује комбинаторику трофакторног ортогоналног плана првог реда за изабране утицајне факторе.

Табела 4.5: План матрица експеримента са стварним вредностима

Редни број експеримента	Фактори		
	u_i [m/min]	a_i [mm]	γ_i [°]
1	16	4,5	25
2	16	2	25
3	4	4,5	25
4	4	2	16
5	8	3	20
6	4	4,5	16
7	8	3	20
8	16	4,5	16
9	4	2	25
10	8	3	20
11	8	3	20
12	16	2	16

За одређивање вредности параметара обрадљивости потребно је 12 комбинација вредности фактора u , a и γ . При томе су четири комбинације вредности фактора међусобно идентичне, тј. експеримент се при средњим вредностима фактора

четири пута понавља. Осталих осам комбинација вредности фактора налазе се на границама интервала варијације ових фактора.

4.4.4 Обрадни систем

За експериментална истраживања коришћена је стона глодалица на комбинованој машини Minimax CU410K у Центру за машине и алате Универзитета у Београду Шумарског факултета. Помоћно кретање је обезбеђено помоћу уређаја за остваривање помоћног кретања Maggi Engineering, Vario Feed. Уређај омогућује помоћно праволинијско кретање, тако што покреће обрадак заједно са покретним радним столом за који је обрадак причвршћен, истовремено му осигуравајући стални контакт са алатом. Слика 4.4 приказује стону глодалицу заједно са уређајем за помоћно кретање.



Слика 4.4: Комбинована машина Minimax CU410K

Основне димензије стоне глодалице су 3280 x 2850 mm, док су димензије покретног стола 292 x 2250 mm, са висином од 860 mm. Машина има избор четири броја обртаја радног вретена: 1400, 3500, 6000 и 8000 min⁻¹ и снагу

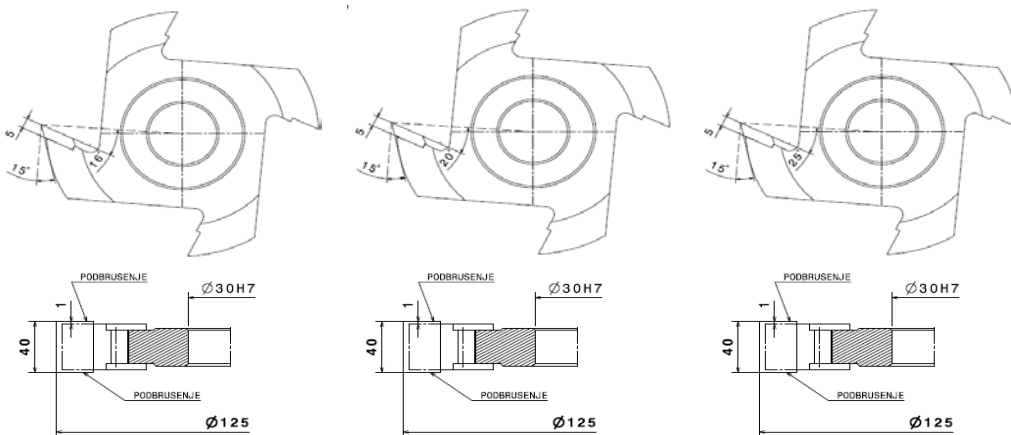
мотора од 3 kW. Маса машине је 540 kg. Брзина помоћног кретања уређаја за помер (Maggi Engineering, Vario Feed) може се мењати континуално у опсегу од 3 до 24 m/min.

За експериментално истраживање су употребљена три равна глодала са по четири ножа (сечива) од тврдог метала различитих грудних углова (Слика 4.5).



Слика 4.5: Радни алати

Техничке карактеристике алата: насадно, једноделно глодало, пречника $D = 125$ mm, ширине сечива: $b = 40$ mm, са леђним углом $\alpha = 15^\circ$, и величинама грудних углова: $\gamma_1 = 16^\circ$, $\gamma_2 = 20^\circ$ и $\gamma_3 = 25^\circ$, односно угловима резања $\delta_1 = 74^\circ$, $\delta_2 = 70^\circ$ и $\delta_3 = 65^\circ$ (Слика 4.6).



Слика 4.6: Конструктивни приказ алата

Пре почетка експеримента глодала су наоштрена у складу са спецификацијом произвођача.

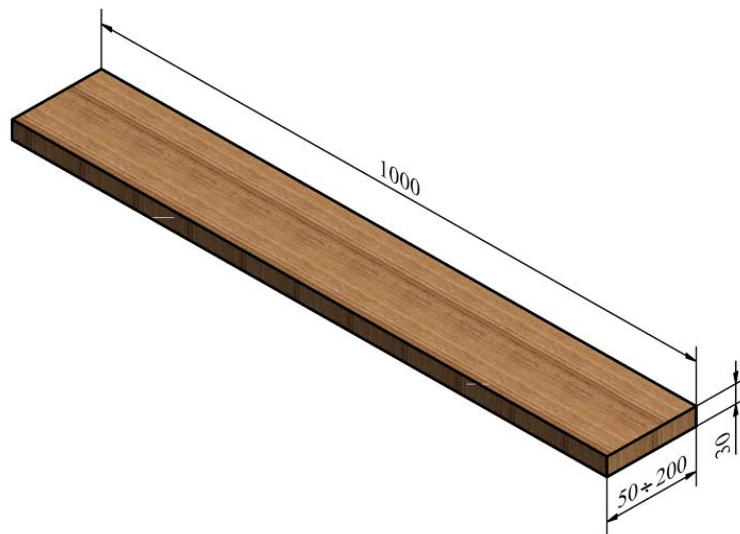
4.4.5 Експериментална мерења

У оквиру експерименталних испитивања обрадљивости за различите услове обраде у складу са одабраним планом експеримента обављена су следећа мерења:

- Мерења снаге резања
- Мерења сила резања
- Мерења храпавости обрађене површине

4.4.5.1 Мерење снага резања

Снаге резања су мерене посредно, преко ангазоване снаге погонског електромотора при сваком пролазу алата при обимном глодању храстових епрувета (Слика 4.7).



Слика 4.7: Изглед епрувете за мерење снага резања

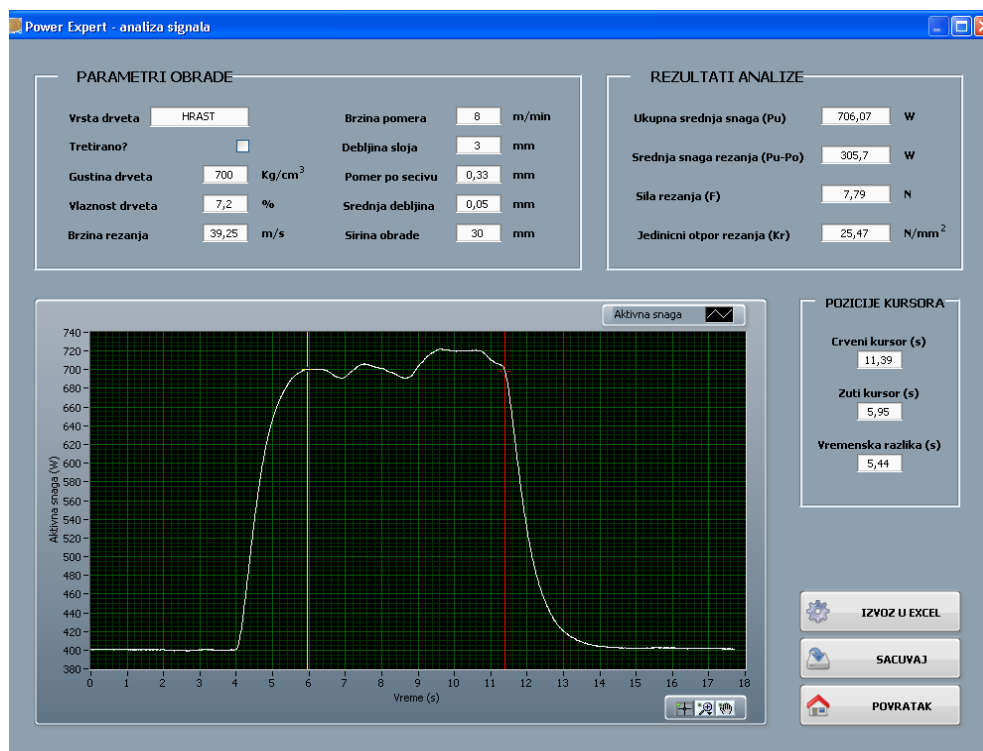
За мерење је коришћен мерно-аквизициони уређај СРД1 (Mandić, Danon, 2010a). Уређај врши аквизицију, анализу и обраду добијених података. Омогућује чување података и има могућност њиховог каснијег приказа. Инсталација садржи ватметар CW-TAN произвођача Circutor за небалансиране трофазне системе следећих карактеристика: 300 V, 5 A, напајање 230 VAC, 50 Hz, тачности 0.5%, са аналогним излазом 0-10 V. Излазни сигнал се директно води у

аквизициону картицу (Слика 4.8), чији се опсег може подешавати (1, 2, 5 и 10 kW) у зависности од снаге погонског мотора машине.



Слика 4.8: Аквизициона картица

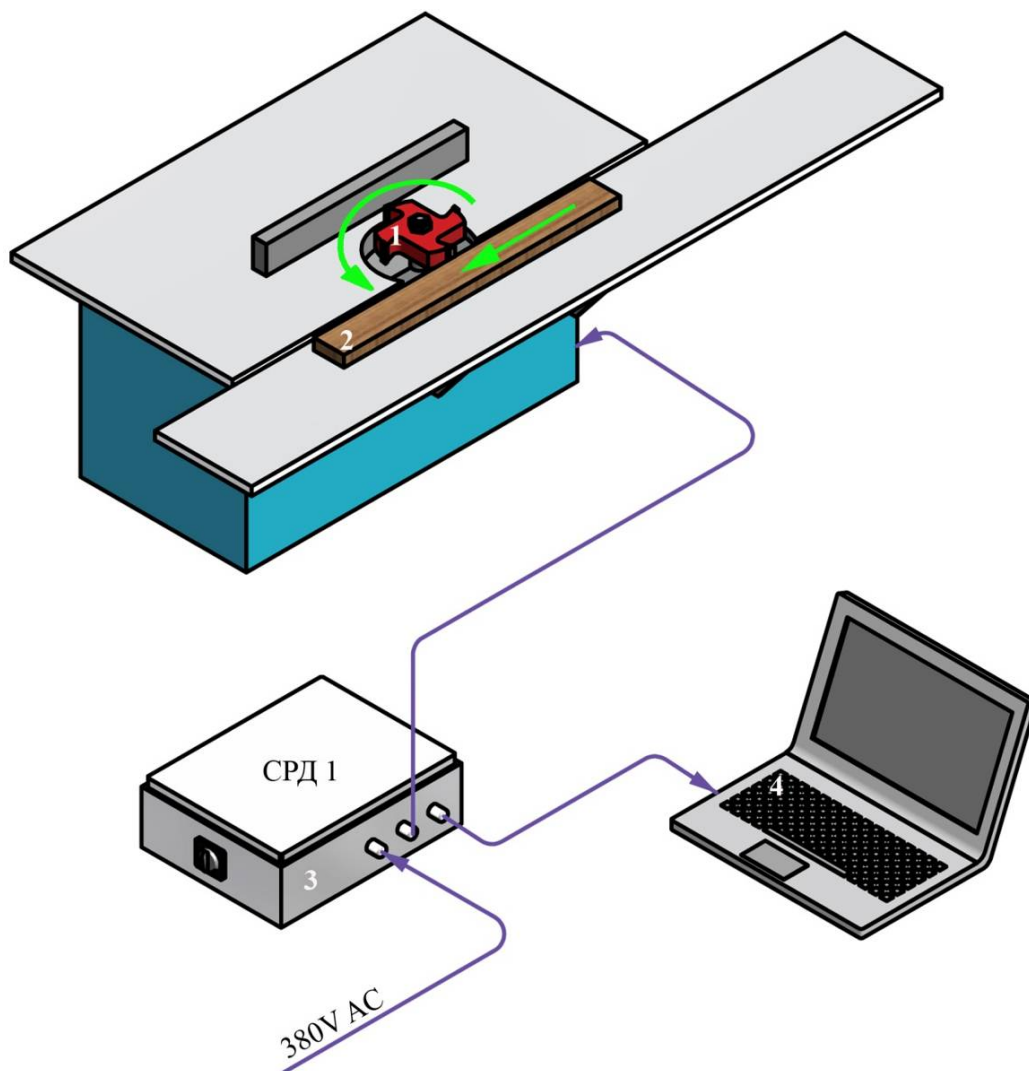
Слика 4.9 приказује графички интерфејс снимљених података.



Слика 4.9: Екрански приказ снимљених података

Уређај користи програмски пакет *Power Expert*, развијен у сарадњи Центра за машине и алате за обраду дрвета и фирме Унолукс из Београда. Сви сигнали се софтверски скалирају и конвертују у реалне вредности са одговарајућим јединицама мере. Мерни уређај је преносив и може се прикључити на различите машине уз ограничење максималне дозвољене снаге (до 10 KW).

Слика 4.10 приказује инсталацију за формирање записа снага резања где су означени 1 – алат, 2 – хрстова епрувета за мерење снага глодања, 3 – мерно-аквизициони уређај СРД1 и 4 – рачунар конфигуриран за рад са системом за аквизицију података.



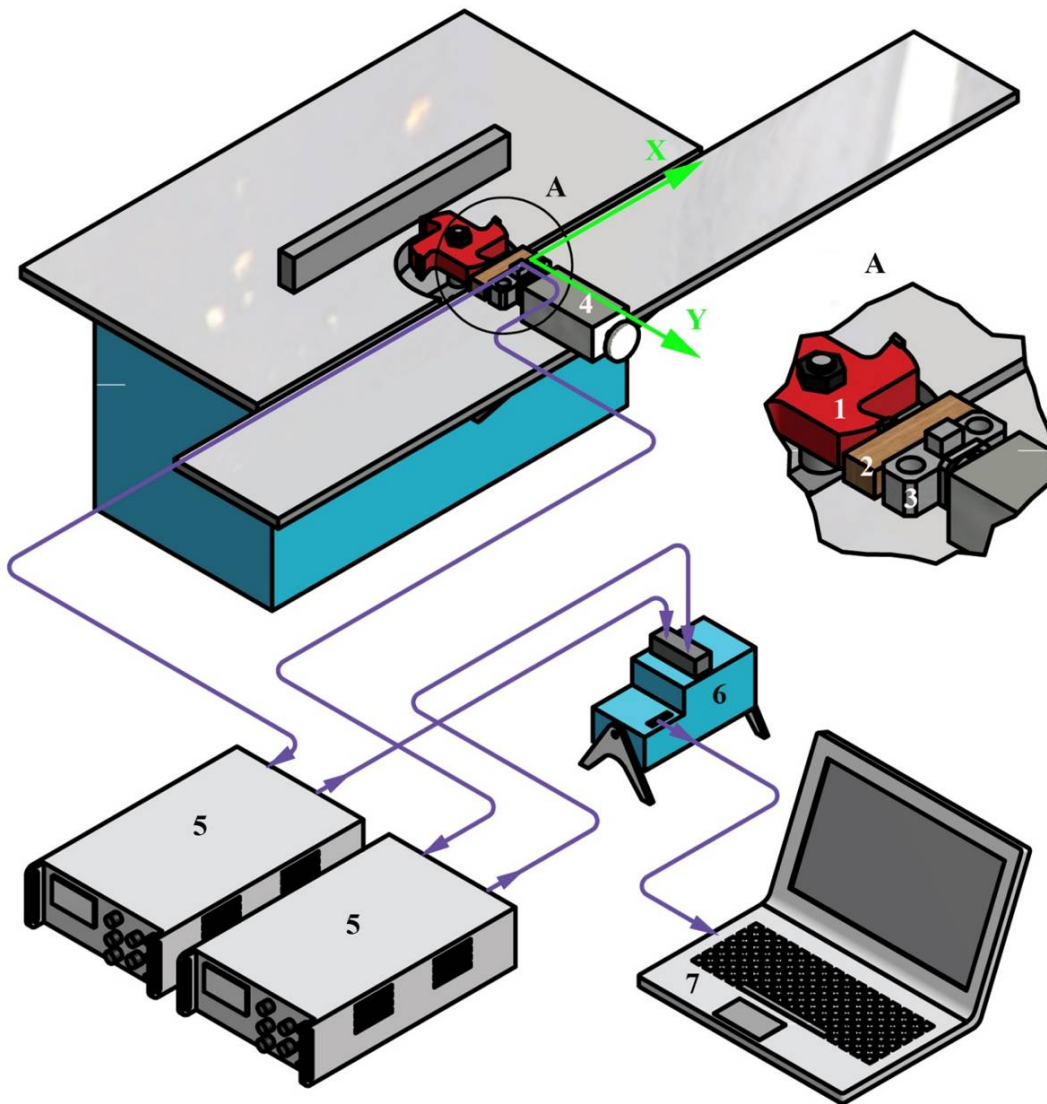
Слика 4.10: Инсталација за формирање записа снага резања

За сваки одабрани режим обраде урађено је по 15 пролаза и регистроване су промене снаге резања. После сваког петог пролаза, из епрувете за мерења снаге

резања, одвојена је епрувета за мерење храпавости обрађене површине. Што значи да је за сваки режим обраде добијено по три епрувете за одређивање храпавости обрађене површине (поглавље 4.4.5.3).

4.4.5.2 Мерење сила резања

Мерење је извршено помоћу система за мерење и аквизицију компоненти силе глодања (Слика 4.11).

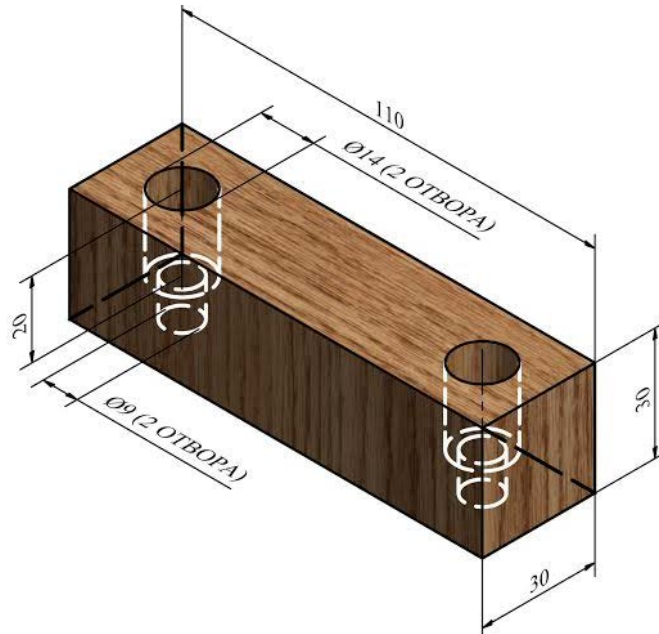


Слика 4.11: Инсталација за формирање записа компонента сила глодања

На слици су приказани: 1 – алат, 2 – хрстова епрувета за мерење силе глодања, 3 – двокомпонентни динамометар са мерним тракама, 4 – носач епрувете, 5 – два

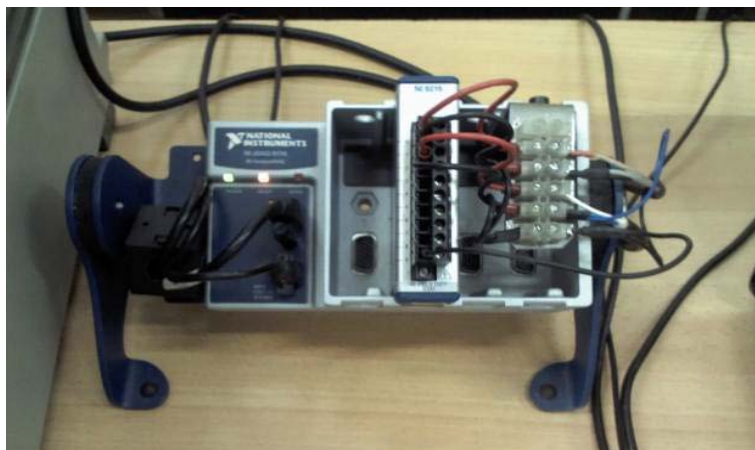
појачивача (модел KWS3082A, произвођача НВМ), 6 – аквизициона картица (модел 9215 произвођача National Instruments) и 7 – рачунар.

Слика 4.12 приказује изглед и димензије епрувете за мерење сила резања.



Слика 4.12: Изглед епрувете за мерење силе резања

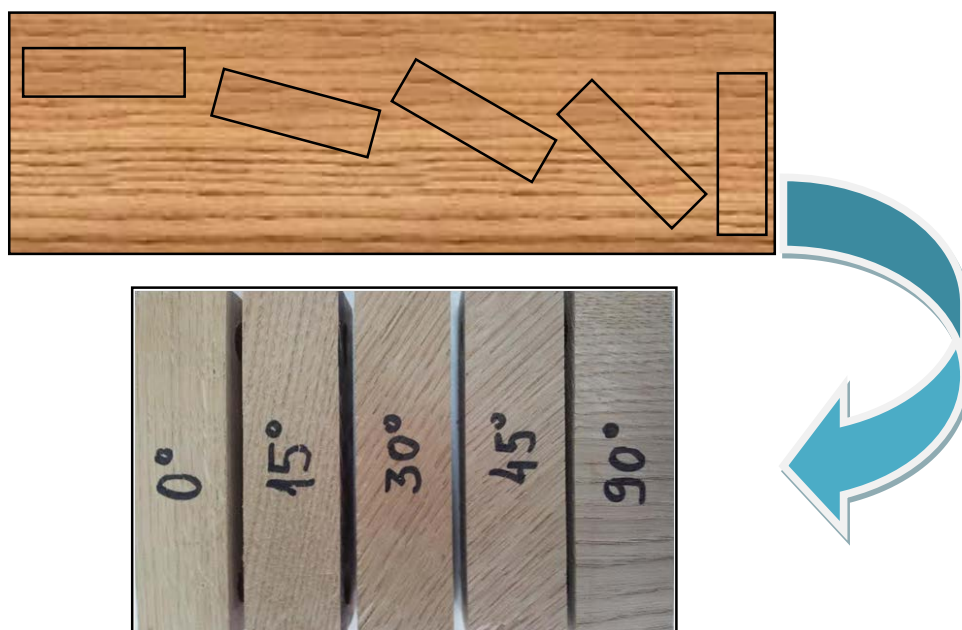
Епрувета (2) се везује преко двокомпонентног динамометра (3) за носач (4). Динамометар служи за мерење сила захваљујући отпорничким мерним тракама које имају улогу детектовања величине деформације носача епрувете у X и Y правцу (Слика 4.11). Мерне траке се истежу или сабијају у уздужном и попречном правцу пропорционално сили резања, што доводи до промене електричног отпора мерних трака, односно напона струје која пролази кроз мерне траке. Динамометар је повезан са паром појачивача (једноканалних мерних мостова са носећом фреквенцијом 5 kHz и аналогним показивачем), чија је улога да повећају измерени напон за унапред подешену вредност. Аквизициона картица (Слика 4.13) служи за аквизицију података, односно узорковање аналогних сигнала из појачивача и претварање аналогних сигнала у дигиталне нумеричке вредности, које се шаљу преко USB порта у рачунар.



Слика 4.13: Изглед аквизиционе картице NI 9215

За конверзију дигиталних нумеричких вредности у мерне силе F_x и F_y , анализу и обраду добијених података, њихово чување и приказ, рачунар (7) користи програм LabVIEW 2012.

Епрувете за испитивање утицаја угла између вектора брзине резања и правца протезања дрвних влакана (ϕ_s) су истих димензија и облика као и епрувете за претходна испитивања и изрезане су из радијалних дасака по одговарајућој шеми (Слика 4.14).

Слика 4.14: Шема изрезивања епрувете за испитивање утицаја угла ϕ_s

Укупно је изрезано пет група проба за пет различитих углова: паралелно са правцем протезања дрвних влакана ($\varphi_{s1}=0^\circ$), низ дрвна влакна за ($\varphi_{s2}=15^\circ$, $\varphi_{s3}=30^\circ$, и $\varphi_{s4}=45^\circ$) и за правац резања попречно на дрвна влакна ($\varphi_{s5}=90^\circ$). За сваки правац резања измерене су обимне силе резања при обимном глодању храстовине.

4.4.5.3 Мерење храпавости површине

Мерење храпавости површине извршено је у М систему уз помоћ контактнo-механичког мерача храпавости типа Mitutoyo SJ 301 (Слика 4.15), а као излазна величина добијена је вредност средњег аритметичког одступање профила R_a .



Слика 4.15: Изглед мерача храпавости типа Mitutoyo SJ 301

Инструмент се састоји од пластичног кућишта призматичног облика и носача који носи иглу. Врх игле пречника $2 \mu\text{m}$ је израђен од дијаманта. Табела 4.6 приказује карактеристике игле уређаја Mitutoyo SJ 301. Вертикално кретање игле се појачава и претвара у електричне импулсе који се филтрирају.

Табела 4.6: Карактеристике игле уређаја Mitutoyo SJ 301

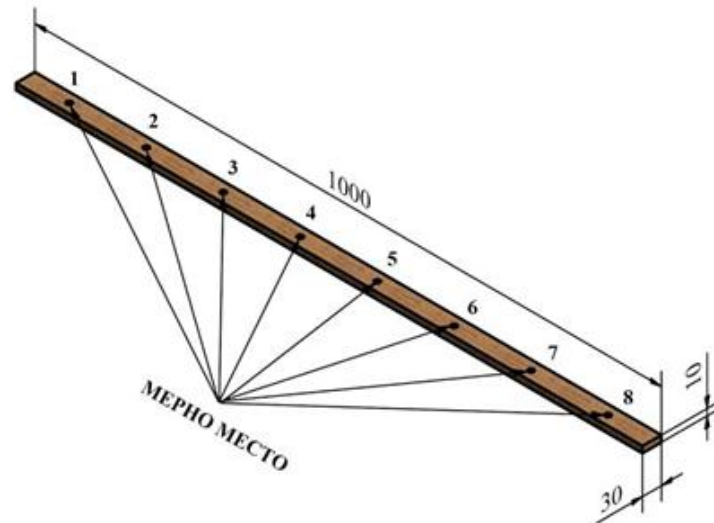
Брзина превлачења игле	0.5 mm/s
Радијус заобљења врха игле	$2 \mu\text{m}$
Угао између игле и пипка	90°

Дужина путање кретања игле је одређена у складу са стандардом ISO 4288: 1996, који предвиђа избор референтне дужине и укупне дужине посматрања на основу вредности основних параметара храпавости (Табела 4.7).

Табела 4.7: Избор референтних дужина на основу вредности параметра R_a (ISO 4288: 1996)

R_a [μm]	Референтна дужина [mm]	Укупна дужина посматрања [mm]
$0,006 < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

У складу са очекиваним вредностима параметра R_a (средње аритметичко одступање профила) и подацима из табеле, изабрана је референтна дужина од 2,5 mm за одређивање храпавости обрађене површине на хрстовим епруветама (Слика 4.16).

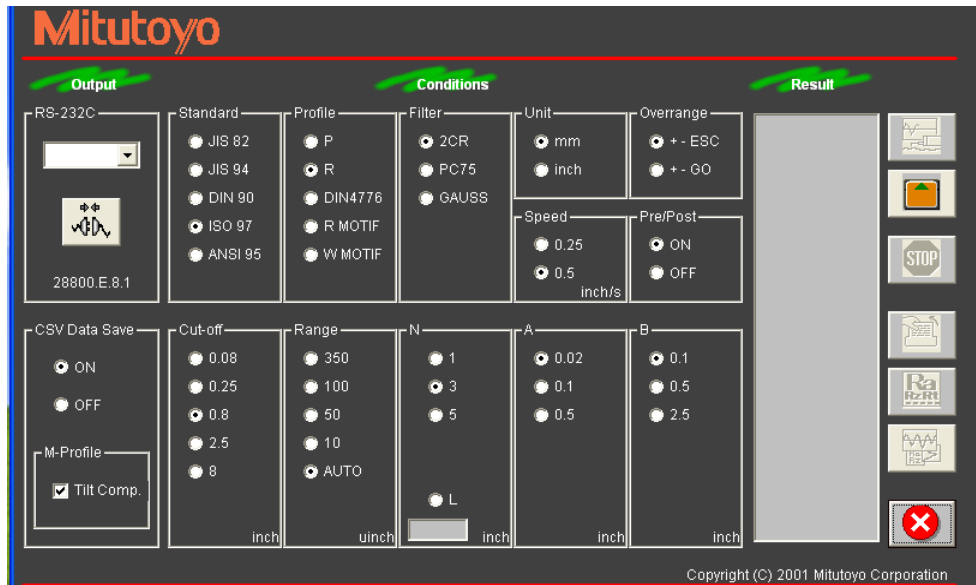


Слика 4.16: Изглед епрувете за мерење храпавости површине

Мерења су извршена на 8 мерних места по дужини епрувете.

Слика 4.17 приказује графички интерфејс за подешавања уређаја пре почетка мерења. Инструмент, такође, има могућност графичког приказа путање кретања

игле у XY равни и могућност приказивања храпавости преко параметара храпавости у систему средње линије (систем M).



Слика 4.17: Графички приказ подешавања уређаја Mitutoyo SJ 301

Као што је наведено, као излазна величина мерења изабрана је вредност средњег одступања профила R_a .

4.4.5.4 Мерење валовитости површине

Квалитет обрађене површине испитан је, поред мерења храпавости, и мерењем валовитости после обраде обимним глодањем помоћу посебно прилагођеног ласерског уређаја у Центру за Механске обрађивачке технологије Универзитета у Љубљани Биотехничког факултета. Један део испитивања валовитости је урађен на храстовим епруветама, а други део посебних мерења валовитости урађен је на полиетиленским епруветама ради потребе анализе квалитета обрађене површине.

Слика 4.18 приказује уређај за мерење валовитости обрађене површине. На слици су приказани: 1 – подлога за постављање епрувете, 2 – храстова епрувета за мерење валовитости површине, 3 – носач игле, 4 – носач ласера за мерење профила површине. Игла се креће брзином од 0,1 mm/s и њено вертикално кретање, које одговара профили површине региструје интерференциони ласерски давач помераја.



Слика 4.18: Уређај за мерење валовитости површине

Сигнал се са сензора прослеђује до рачунара који врши обраду података. Програмски пакет LabVIEW 2012 преко FFT-а (Fast Fourier Transformation) на излазу даје континуално излазну функцију која одговара мереном профилу обрађене површине храстове епрувете.

4.5 Статистичка анализа параметара модела

После формирања и прорачуна параметара математичких модела обрадљивости: анализира се сигнификантност параметара и адекватност ових модела.

4.5.1 Оцена сигнификантности параметара модела

Оцена сигнификантности параметара модела b_i ($i = 0, 1, 2, 3$) изводи се према F -критеријуму, упоређујући дисперзије параметара са дисперзијом резултата у нултој тачки:

$$F_{r_i} = \frac{s_i^2}{s_E^2} > F_t$$

Дисперзија параметара модела рачуна се по обрасцу: $s_i^2 = \frac{S_{b_i}}{f_i}$, где је сума

квадрата $S_{b_i} = b_i \cdot \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot y_u = N_i \cdot b_i^2$, $i = 1, 2, 3$, за $i = 0$, $N_0 = 12$, док за $i = 1, 2, 3$, $N_i = 8$, а степен слободе $f_i = 1$.

Дисперзија резултата у нултој тачки износи: $s_E^2 = \frac{S_E}{f_E}$, где је сума квадрата

$$S_E = \sum_{u=1}^4 (y_{0u} - \hat{y}_0)^2 = \sum_{u=1}^4 y_{0u}^2 - \frac{1}{n_0} \left(\sum_{u=1}^4 y_{0u} \right)^2, \text{ а степен слободе } f_E = n_0 - 1 = 4 - 1 = 3.$$

У овом случају таблична вредност F -критеријума за $(F_i(f_{LF}, f_E))$ за степене слободе $f_{LF} = 1$ и $f_E = 3$ износи $F_i(1, 3) = 10,13$, што значи да за усвојени ниво поузданости (95%) мора бити задовољен услов: $F_i = \frac{s_i^2}{s_E^2} > 10,13$, како би параметри модела били сигнификантни.

Поступак се понавља за све постављене моделе (за снагу резања, силе резања и храповост обрађене површине).

4.5.2 Провера адекватности математичких модела

Провера адекватности линеарног математичког модела изводи се, такође, према F -критеријуму. Код адекватног модела мора бити испуњен услов $F_r = < F_t$, при чему се таблична вредност F -критеријума одређује према нивоу значајности $\alpha = 0,05$, односно при 95% поузданости. Како је централна тачка придружена плану у којој се експерименти понављају n_0 пута, тада рачунска вредност F -критеријума за оцену адекватности гласи:

$$F_{rLF} = \frac{s_M^2}{s_E^2}$$

Дисперзија разлика експерименталних и рачунских вредности рачуна се из израза:

$$s^2_M = \frac{S_{LF}}{f_{LF}} = \frac{S_R - S_E}{f_R - f_E} = \frac{1}{f_R - f_E} \cdot \left\{ \sum_{u=1}^{12} (y_u - \hat{y}_u)^2 - \left[\sum_{u=1}^4 y_{0u}^2 - \frac{1}{n_0} \left(\sum_{u=1}^4 y_{0u} \right)^2 \right] \right\},$$

а дисперзија резултата за експерименте средњег нивоа из израза:

$$s^2_E = \frac{1}{f_E} \cdot \left[\sum_{u=1}^4 y_{0u}^2 - \frac{1}{n_0} \left(\sum_{u=1}^4 y_{0u} \right)^2 \right]$$

Таблична вредност F -критеријума за степен слободе:

$$f_{LF} = f_R - f_E = N - k - 1 - (n_0 - 1) = 12 - 3 - 1 - (4 - 1) = 5 \text{ и } f_E = n_0 - 1 = 4 - 1 = 3$$

износи $F_t = 9,01$, што значи да за усвојени ниво поузданости (95%) мора бити задовољен услов: $F_{LF} < 9,01$, како би линеарни математички модел био адекватан. Поступак се понавља за све постављене моделе (за снагу резања, силе резања и храпавост обрађене површине).

5 РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

За испитивање обрадљивости храстовине било је потребно пре свега извршити карактеризацију и избор сировине, односно испитивање физичких и механичких својстава. Испитивање је обављено у Лабораторији за испитивање својстава дрвета Универзитета у Београду Шумарског факултета. На основу анализе добијених резултата физичких и механичких својстава одабран је материјал за испитивање обрадљивости храстовине. Истраживање обрадљивости је обављено на два система за аквизицију снага, односно сила резања. Извршено је по 12 група експерименталних мерења са 8–15 појединачних понављања, у складу са захтевима трофакторних ортогоналних експерименталних планова првог реда. Лабораторијска испитивања обрадљивости обухватала су мерење снага и сила резања, као и храпавости и валовитости добијене површине при обимном глодању за различите услове резања.

Снаге резања при обради глодањем су мерене посредно преко ангазоване снаге погонског електро-мотора при сваком пролазу алата при обимном глодању на мерно-аквизиционом уређају СРД1. Мерење снаге је обављено на храстовим епруветама дужине 1000 mm, дебљине 30 mm и ширине 50–200 mm у Центру за машине и алате Универзитета у Београду Шумарског факултета.

Мерење компоненти сила глодања је извршено помоћу система за мерење и аквизицију сила резања Универзитета у Београду Машинског факултета. Мерење компоненти сила резања је обављено на храстовим епруветама димензија 30 x 30 x 110 mm у Центру за машине и алате Универзитета у Београду Шумарског факултета.

Квалитет обрађене површине испитан је мерењем храпавости и валовитости површине после обраде обимним глодањем. Храпавост површине је мерена помоћу контактно-механичког мерача храпавости типа Mitutoyo SJ301 на храстовим епруветама димензија 30 x 10 x 1000 mm у Центру за машине и алате

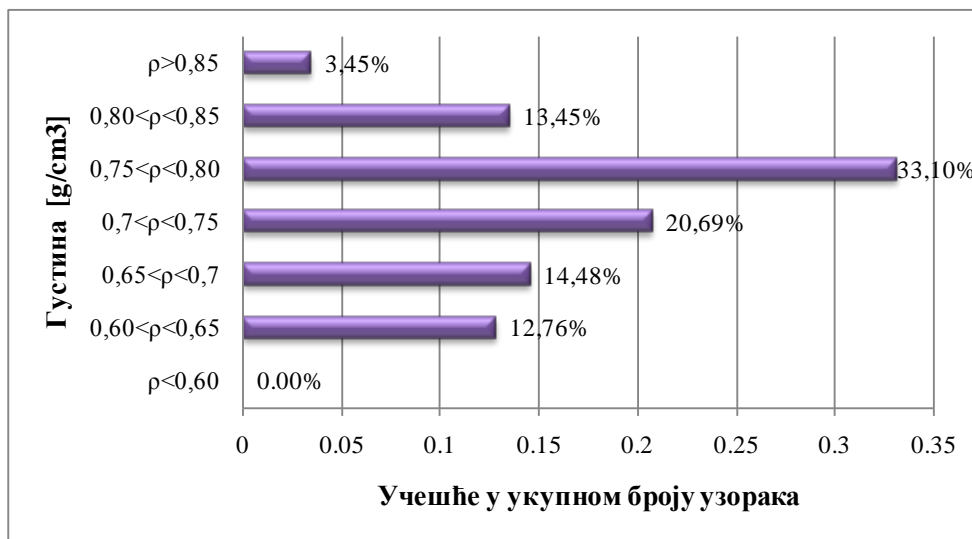
Универзитета у Нишу Машинског факултета. Валовитост обрађене површине, после обраде обимним глодањем, мерена је помоћу посебно прилагођеног ласерског уређаја у Центру за Механске обрађивачке технологије Универзитета у Љубљани Биотехничког факултета. Један део испитивања валовитости је урађен на храстовим епруветама, а други део посебних мерења валовитости урађен је на полиетиленским епруветама ради потребе анализе квалитета обрађене површине.

5.1 Својства дрвета

Особитост процеса резања је пре свега последица разлика у физичко-механичким својствима дрвета као материјала. Од физичких својстава дрвета испитивана су густина и влажност, а од механичких својстава дрвета испитивана су тврдоћа, савојна чврстоћа и модул еластичности.

5.1.1 Физичка и механичка својства комплетног узорка

Истраживање својстава дрвета је обављено на 75 дасака из којих је, након кондиционирања у сушари, изрезано укупно 290 епрувета (по правилу по 4 из сваке даске), димензија 50 mm x 50 mm x 30 mm за одређивање густине и влажности дрвета. Табела 8.1 и Табела 8.2 приказују све измерене вредности физичких и механичких својстава за сваку епрувету посебно. Слика 5.1 приказује расподелу добијених резултата мерења густине испитиваних узорка храста.

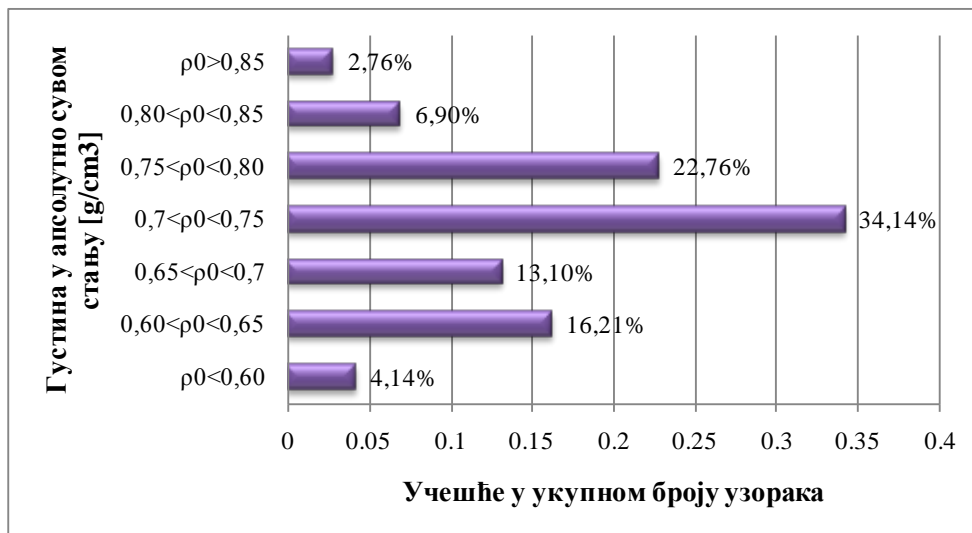


Слика 5.1: Измерене густине узорка храста

Измерене густине влажних узорака кретале су се у границама од 600 kg/m^3 до 900 kg/m^3 . Код већине испитиваних узорака (67,24%) густина је била у границама између 700 kg/m^3 и 850 kg/m^3 .

Према статистичким подацима (Табела 5.1) може се закључити да је измерена густина узорака нешто виша од просечних, али да не излази из распона вредности који се може наћи у литератури (Шошкић, 2006). Такође, стандардно одступање од средње вредности густина у влажном стању је релативно велико и износи $\sigma = \pm 0,069 \text{ g/cm}^3$, односно $\pm 9,363\%$ од израчунате средње вредности.

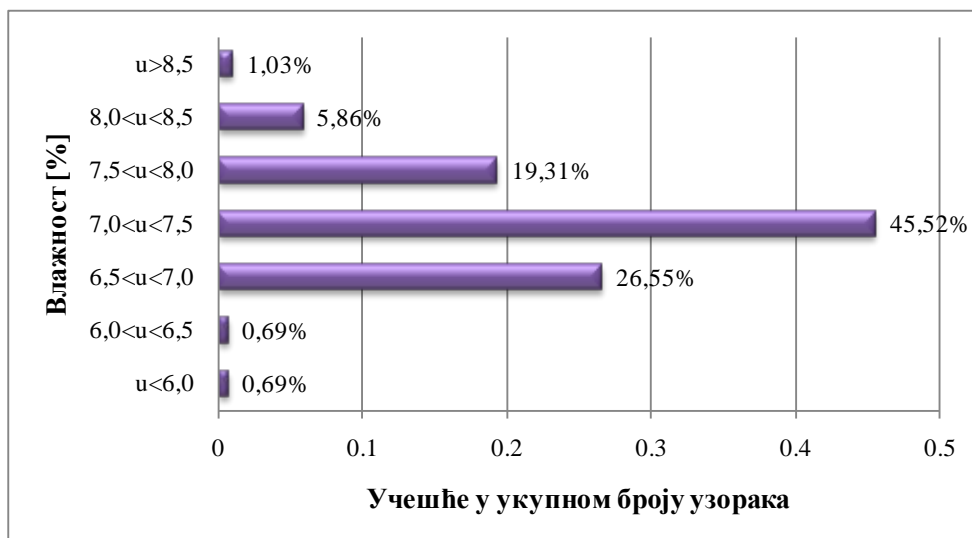
Слика 5.2 приказује расподелу добијених резултати мерења густина испитиваних узорака храста у апсолутно сувом стању.



Слика 5.2: Измерене густине узорака храста у апсолутно сувом стању

Расипање резултата је слично као и код мерења густина влажних узорака. Код већине испитиваних узорака (70 %) густина је била од 650 kg/m^3 до 800 kg/m^3 . Стандардно одступање од средње вредности износи $\sigma = \pm 0,067 \text{ g/cm}^3$, односно $\pm 9,292\%$ од средње вредности густина узорака у апсолутно сувом стању (Табела 5.1).

Слика 5.3 приказује расподелу добијених резултати мерења влажности испитиваних узорака.



Слика 5.3: Измерене влажности узорака храста

Измерене влажности узорака су уједначене и нешто ниже од оне на коју су узорци били кондиционирани (8%). Стандардно одступање од средње вредности износи $\sigma = \pm 0,437\%$, од средње измерене влажности узорака која је износила 7,275% (Табела 5.1).

Табела 5.1: Основна статистичка анализа физичких својстава узорака храстовине одабране за испитивање

	N	Аритметичка средина	Минимум	Максимум	Стандардна девијација	Коефицијент варијације
Густина у влажном стању (g/cm ³)	290	0,744	0,604	0,994	0,069	9,363
Густина у апсолутном сувом стању (g/cm ³)	290	0,720	0,582	0,870	0,067	9,292
Влажност (%)	290	7,275	5,790	8,550	0,437	6,004

На истим епруветама је мерена и тврдоћа узорака, док су за испитивање савојне чврстоће и модула еластичности израђене 122 епрувете димензија 20 mm x 320 mm x 20 mm.

На основу статистичке обраде добијених резултата (Табела 5.2) може се закључити да је код механичких својстава присутан већи варијабилитет у односу на физичка својства узорка.

Табела 5.2: Основна статистичка анализа механичких својстава узорака храстовине одабране за испитивање

	N	Аритметичка средина	Минимум	Максимум	Стандардна девијација	Коефицијент варијације
Тврдоћа (N/mm ²)	292	42,630	30,119	56,830	7,065	16,572
Савојна чврстоћа (N/mm ²)	122	119,360	100,100	139,960	12,166	10,192
Модул еластичности (N/mm ²)	122	11138,520	9007,980	13711,550	1202,545	10,796

Од тога, највећи коефицијент варијације забележен је код тврдоће узорака $\pm 16,572\%$ од израчунате средње вредности тврдоће узорака, док савојна чврстоћа и модул еластичности показују приближно исти варијабилитет од око $\pm 10\%$.

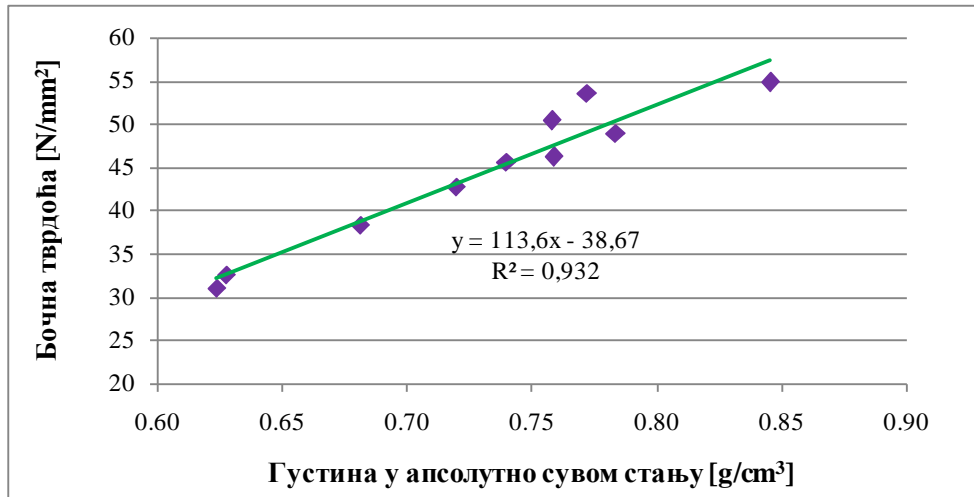
5.1.2 Анализа физичких и механичких својстава

Све расположиве даске распоређене су у десет група према просечној густини дрвета у апсолутно сувом стању у распону од 0,62 до 0,85 g/cm³ (Табела 5.3). За сваку групу израчунате су просечне вредности механичких својстава и анализирана је њихова зависност од густине у апсолутно сувом стању.

Табела 5.3: Просечне вредности физичких и механичких својстава за груписане узорке

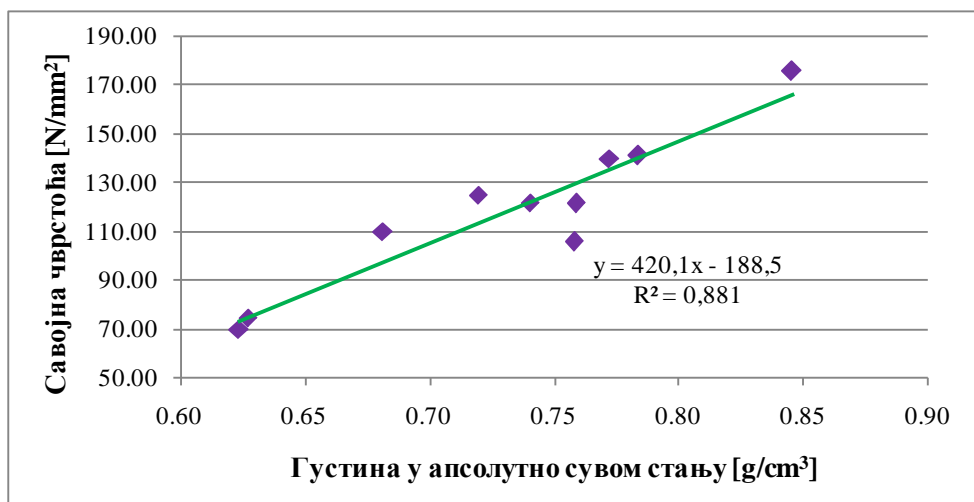
Р.бр.	ρ_v (g/cm ³)	ρ_0 (g/cm ³)	Влажност (%)	Тврдоћа (N/mm ²)	Савојна чврстоћа (N/mm ²)	Модул еластичности (N/mm ²)
1	0,65	0,62	7,67	31,06	69,95	6908,85
2	0,65	0,63	7,22	32,58	74,83	7007,98
3	0,70	0,68	7,24	38,26	109,96	10396,97
4	0,74	0,72	7,18	42,76	124,83	11414,67
5	0,77	0,74	7,28	45,61	121,95	11147,09
6	0,79	0,76	7,96	50,31	105,75	9886,51
7	0,78	0,76	7,35	46,17	121,60	11803,59
8	0,80	0,77	7,37	53,58	139,80	14089,34
9	0,81	0,78	7,96	48,87	141,08	13513,50
10	0,87	0,85	7,07	54,76	175,85	14531,87

Дијаграми зависности тврдоће, савојне чврстоће и модула еластичности од густине дрвета у апсолутно сувом стању приказани су у наставку (Слика 5.4, Слика 5.5, Слика 5.6).



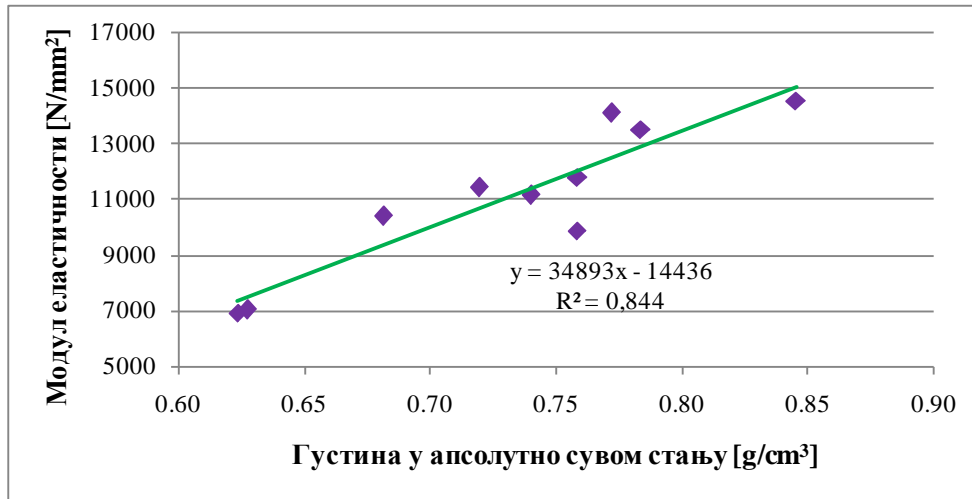
Слика 5.4: Зависност бочне тврдоће од густине у апсолутно сувом стању

Слика 5.4 приказује зависност бочне тврдоће од густине дрвета у апсолутно сувом стању. Евидентна је веома јака зависност коју показује линеарна функција ($R^2=0,932$).



Слика 5.5: Зависност савојне чврстоће од густине у апсолутно сувом стању

Слика 5.5 приказује зависност савојне чврстоће од густине дрвета у апсолутно сувом стању. Уочљива је јака управно сразмерна линеарна зависност ова два својства што јасно показује и коефицијент детерминације ($R^2=0,881$).



Слика 5.6: Зависност модула еластичности од густине у апсолутно сувом стању

Слика 5.6 приказује зависност модула еластичности од густине дрвета у апсолутно сувом стању. Такође, и овде као у претходна два случаја, евидентна је јака зависност коју показује линеарна функција ($R^2=0,844$).

Приказани резултати показују да постоји чврста веза између густине дрвета и механичких својстава, због чега је потребно изабрати узорке са што мањим разликама у својствима за испитивање обрадљивости дрвета.

5.1.3 Избор узорка за испитивање обрадљивости

С обзиром на значајан утицај густине на механичка својства дрвета, за даља истраживања су изабрани узорци са уједначеним физичким и механичким својствима, како би се смањила варијација у својствима на резултате истраживања обрадљивости.

За истраживање обрадљивости искоришћено је укупно 38 одабраних дасака радијалног анатомског правца и без видљивих грешака у структури дрвета.

Табела 5.4 приказује својства узорака изабраних за анализу обрадљивости дрвета.

Табела 5.4: Својства дасака изабраних за анализу обрадљивости хрстовине

Р.бр.	Ознака даске	ρ_v (g/cm ³)	ρ_0 (g/cm ³)	Влажност (%)	Тврдоћа (N/mm ²)	Савојна чврстоћа (N/mm ²)	Модул еластичности (N/mm ²)
1	D03	0,76	0,74	6,60	46,51	114,74	11186,86
2	D09	0,78	0,76	7,25	47,78	123,44	12408,65
3	D10	0,77	0,75	7,06	47,67	105,27	10924,48
4	D11	0,77	0,75	7,16	44,53	126,06	12694,24
5	D12	0,76	0,74	7,36	46,38	133,06	12021,52
6	D14	0,73	0,71	6,79	45,79	134,23	11575,01
7	D16	0,71	0,69	7,21	41,01	109,82	11473,3
8	D18	0,81	0,78	7,70	48,62	130,45	12216,15
9	D19	0,72	0,69	7,31	42,18	112,32	10806,37
10	D20	0,74	0,72	7,41	41,99	120,36	11386,25
11	D22	0,77	0,75	6,86	46,81	122,97	13455,73
12	D24	0,76	0,74	7,51	42,77	119,34	11391,60
13	D25	0,73	0,70	7,22	43,50	118,47	10153,66
14	D29	0,75	0,73	7,51	37,83	126,44	11267,36
15	D31	0,69	0,68	7,61	36,64	107,23	10332,27
16	D35	0,76	0,73	7,06	44,62	135,15	11256,48
17	D40	0,75	0,73	6,97	41,96	111,79	10199,58
18	D41	0,71	0,69	6,67	37,57	114,26	10326,45
19	D42	0,73	0,70	7,14	37,11	110,25	11486,40
20	D44	0,74	0,73	7,31	45,21	126,81	10773,06
21	D46	0,69	0,67	7,70	38,24	108,75	9455,03
22	D51	0,74	0,72	7,83	40,20	116,84	12118,24
23	D52	0,76	0,74	7,47	41,07	119,09	11062,42
24	D53	0,73	0,71	6,86	38,90	139,10	12234,84
25	D55	0,77	0,74	7,39	50,90	118,53	10486,86
26	D56	0,77	0,74	7,39	44,44	124,28	11304,22
27	D57	0,79	0,77	7,32	45,32	111,27	10453,90
28	D58	0,77	0,74	6,94	46,42	116,11	11062,85
29	D60	0,79	0,76	7,96	45,18	125,14	11274,4
30	D61	0,78	0,75	7,48	43,42	128,20	11001,15
31	D62	0,75	0,72	6,79	47,22	117,13	11356,42
32	D65	0,72	0,69	7,24	38,25	110,92	10863,25
33	D67	0,75	0,73	7,05	48,40	124,66	11581,00
34	D69	0,76	0,73	6,95	41,54	117,80	11220,91
35	D70	0,75	0,72	7,46	44,30	136,64	12828,28
36	D71	0,73	0,71	7,31	42,79	136,74	11782,58
37	D73	0,68	0,66	6,91	33,91	106,44	9522,123
38	D74	0,77	0,74	7,55	46,39	130,43	10660,37

Статистички подаци физичких и механичких својстава одабраних дасака приказани су у табели (Табела 5.5)

Табела 5.5: Основна статистичка анализа дасака храстовине изабраних за анализу обрадљивости

	N	Аритметичка средина	Минимум	Максимум	Стандардна девијација	Коефицијент варијације
Густина у влажном стању (g/cm^3)	38	0,75	0,684	0,810	0,029	3,853
Густина у апсолутном сувом стању (g/cm^3)	38	0,73	0,662	0,780	0,028	3,852
Влажност (%)	38	7,25	6,599	7,960	0,322	4,446
Тврдоћа (N/mm^2)	38	43,25	33,915	50,900	3,936	9,102
Савојна чврстоћа (N/mm^2)	38	120,80	105,270	139,100	9,409	7,789
Модул еластичности (N/mm^2)	38	11252,74	9455,030	13455,730	858,718	7,631

Статистичка анализа показује значајно мањи варијабилитет вредности свих испитиваних својстава у односу на комплетан узорак (Табела 5.1 и Табела 5.2). Као и у ранијем случају, навећи коефицијент варијације забележен је код тврдоће $\pm 9,102\%$. Густина у апсолутном сувом стању има коефицијент варијације $\pm 3,853\%$, а влажност $\pm 4,446\%$. Савојна чврстоћа и модул еластичности имају приближно сличне коефицијенте варијације од $\pm 7,789\%$, односно $\pm 7,631\%$ од средње измерених вредности узорака.

5.2 Мерење снаге резања при обимном глодању

5.2.1 Резултати мерења снаге резања

Мерење снага резања је извршено помоћу уређаја који је детаљно објашњен у тачки 4.4.5.1. Укупно је извршено 196 мерења, у прилогу су представљене све измерене вредности снаге резања за сваки режим обраде, односно за све испитиване вредности брзине помоћног кретања (Табела 8.3, Табела 8.4 и Табела 8.5).

Табела 5.6 приказује средње вредности снаге резања за дате услове обраде.

Табела 5.6: Средње вредности измерених снага резања (P)

Р. бр.	Брзина помоћног кретања u (m/min)	Дубина глодања a (mm)	Грудни угао γ (°)	Средња вредност P (W)
1	16	4,5	25	830,60
2	16	2	25	413,59
3	4	4,5	25	392,45
4	4	2	16	275,10
5	8	3	20	456,75
6	4	4,5	16	426,59
7	8	3	20	480,01
8	16	4,5	16	1057,19
9	4	2	25	236,46
10	8	3	20	478,55
11	8	3	20	454,45
12	16	2	16	544,59

На основу добијених резултата у план-матрицу (Табела 4.3) су унесене измерене вредности снага резања.

5.2.2 Анализа резултата мерења снаге резања и формирање модела обрадљивости

Методологија математичке обраде резултата мерења детаљно је представљена у поглављима 4.4 и 4.5. Да би се одредиле нумеричке вредности константе C и експонената p_1 , p_2 , и p_3 у постављеном моделу (поглавље 4.4.2)

$$P = C \cdot u^{p_1} \cdot a^{p_2} \cdot \gamma^{p_3} \quad (5.1)$$

потребно је модел логаритмовањем превести у линеарни облик

$$\ln R = \ln C + p_1 \ln f_1 + p_2 \ln f_2 + p_3 \ln f_3 \quad (5.2)$$

или

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (5.3)$$

где су: $y = \ln P$, $x_1 = \ln u$, $x_2 = \ln a$, $x_3 = \ln \gamma$ и $b_0 = p_0 = \ln C$, $p_1 = b_1$,

$$p_2 = b_2, \quad p_3 = b_3.$$

Прорачун коефицијената b_0, b_1, b_2 и b_3 у једначини (5.3) поједностављује се увођењем нових независно промењивих величина x_1, x_2 и x_3 на три нивоа: +1, 0, и -1 преко једначина трансформације:

$$x_i = 1 + 2 \frac{\ln f_i - \ln f_{i \max}}{\ln f_{i \max} - \ln f_{i \min}}, \quad i = 1, 2, 3.$$

За кодиране вредности формира се план матрица (Табела 5.7).

Табела 5.7: План матрица мерења снаге резања

Редни број	План матрица				Резултати мерења		Моделски резултати		Грешка	
	x_0	x_1	x_2	x_3	P (W)	$y = \ln P$	P (W)	$y = \ln P$	$(y_u - \hat{y}_u)^2$	$(y_{0u} - \bar{y}_0)^2$
1	+1	+1	+1	+1	830,60	6,7221	811,76	6,6992	0,000526	
2	+1	+1	-1	+1	413,59	6,0249	456,10	6,1227	0,009574	
3	+1	-1	+1	+1	392,45	5,9724	393,23	5,9744	0,000004	
4	+1	-1	-1	-1	275,10	5,6171	266,58	5,5857	0,000989	
5	+1	0	0	0	456,75	6,1241	465,19	6,1424	0,000335	0,000335
6	+1	-1	+1	-1	426,59	6,0558	474,46	6,1622	0,011310	
7	+1	0	0	0	480,01	6,1738	465,19	6,1424	0,000983	0,000983
8	+1	+1	+1	-1	1057,1	6,9634	979,45	6,8870	0,005834	
9	+1	-1	-1	+1	236,46	5,4658	220,94	5,3979	0,004607	
10	+1	0	0	0	478,55	6,1708	465,19	6,1424	0,000802	0,000802
11	+1	0	0	0	454,45	6,1191	465,19	6,1424	0,000546	0,000546
12	+1	+1	-1	-1	544,59	6,3000	550,33	6,3105	0,000110	
								Σ	0,035620	0,002666

Параметри модела (5.3) одређују се из система општих једначина

$$b_i = \frac{1}{12} \sum_{u=i}^{12} x_{iu} y_u \quad i = 1, 2, 3, \tag{5.4}$$

Које с обзиром на план матрицу (Табела 5.7) прелазе у облик:

$$b_0 = \frac{1}{12} (y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_{12}) = 6,1424 \tag{5.5}$$

$$b_1 = \frac{1}{8} (y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_6 + y_8 - y_9 + y_{12}) = 0,3624$$

$$b_2 = \frac{1}{8} (y_1 - y_2 + y_3 - y_4 + y_6 + y_8 - y_9 - y_{12}) = 0,2882$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(y_1 + y_2 + y_3 - y_4 - y_6 - y_8 + y_9 - y_{12}) = -0,0939$$

Константа C и експоненти p_i ($i = 1, 2, 3$) овог модела одређују се изразом:

$$p_i = \frac{2b_i}{\ln \frac{f_{imax}}{f_{imin}}}, \quad i = 1, 2, 3$$

$$p_0 = \left| \sum_{i=1}^3 b_i \right|_{i=0,1,2,3} - \left| \sum_{i=1}^3 p_i \ln f_{imax} \right|_{i=0,1,2,3}$$

$$\ln C = b_0 + b_1 + b_2 + b_3 - 2 \left(b_1 \times \frac{\ln f_{1max}}{\ln \frac{f_{1max}}{f_{1min}}} + b_2 \times \frac{\ln f_{2max}}{\ln \frac{f_{2max}}{f_{2min}}} + b_3 \times \frac{\ln f_{3max}}{\ln \frac{f_{3max}}{f_{3min}}} \right)$$

$$C = e^{p_0}$$

На основу израчунатих параметара модела b_i и података из план-матрице (Табела 5.7) добијају се следеће вредности за експоненте и константу:

$$p_1 = \frac{2b_1}{\ln \frac{u_{max}}{u_{min}}} = 0,5228, \quad p_2 = \frac{2b_2}{\ln \frac{a_{max}}{a_{min}}} = 0,7109, \quad p_3 = \frac{2b_3}{\ln \frac{\gamma_{max}}{\gamma_{min}}} = -0,4208,$$

$$p_0 = b_0 + b_1 + b_2 + b_3 - (p_1 \ln u_{max} + p_2 \ln a_{max} + p_3 \ln \gamma_{max}) = 5,5348$$

$$C = e^{5,5348} = 253,3469 \tag{5.6}$$

Заменом добијене вредности константе и експонената у модел (5.1) добија се регресиона зависност снаге резања при обимном глодању од брзине помоћног кретања, дубине глодања и грудног угла алата:

$$P = 253,3469 \cdot u^{0,5228} \cdot a^{0,7109} \cdot \gamma^{-0,4208} \tag{5.7}$$

Ако се у изразу (5.7) замене вредности за u, a, γ према план-матрици добијају се моделске вредности за снагу резања при обимном глодању, чије су вредности унете у план матрицу (Табела 5.7).

Оцена сигнификантности параметара модела b_i ($i = 0, 1, 2, 3$) изводи се према F - критеријуму, упоређивањем дисперзије параметара са дисперзијом резултата у нултој тачки:

$$F_{r_i} = \frac{s_i^2}{s_E^2} > F_t \quad (5.8)$$

Дисперзија параметара модела износи: $s_i^2 = \frac{S_{b_i}}{f_i}$, где је сума квадрата

$$S_{b_i} = N_i b_i^2, \quad i = 0, 1, 2, 3, \quad (5.9)$$

за $i = 0$, $N_0 = 12$, док за $i = 1, 2, 3$, $N_i = 8$, а степен слободе $f_i = 1$.

Заменом вредности за параметре b_i у једначину (5.9) добијају се следеће вредности:

$$s_0^2 = N_0 b_0^2 = 12 \cdot 6,1424^2 = 452,7560$$

$$s_1^2 = N_1 b_1^2 = 8 \cdot 0,3624^2 = 1,0507$$

$$s_2^2 = N_2 b_2^2 = 8 \cdot 0,2882^2 = 0,6646$$

$$s_3^2 = N_3 b_3^2 = 8 \cdot -0,0939^2 = 0,0705$$

Дисперзија резултата у нултој тачки износи:

$$s_E^2 = \frac{S_E}{f_E},$$

где је сума квадрата

$$S_E = \sum_{u=1}^4 (y_{0u} - \hat{y}_0)^2 = \sum_{u=1}^4 y_{0u}^2 - \frac{1}{n_0} \left(\sum_{u=1}^4 y_{0u} \right)^2,$$

а степен слободе $f_E = n_0 - 1 = 4 - 1 = 3$.

Заменом вредности из план матрице (Табела 5.7) добија се:

$$s_E^2 = \frac{1}{3} \cdot (0,000335 + 0,000983 + 0,000802 + 0,000546) = 0,000889$$

Формирањем односа дисперзија параметара према дисперзији резултата у нултој тачки биће:

$$F_{r0} = \frac{s_0^2}{s_E^2} = 509469 > F_t = 10,13$$

$$F_{r1} = \frac{s_1^2}{s_E^2} = 1182,3 > F_t = 10,13$$

$$F_{r2} = \frac{s_2^2}{s_E^2} = 747,92 > F_t = 10,13$$

$$F_{r3} = \frac{s_3^2}{s_E^2} = 79,36 > F_t = 10,13$$

На основу претходног прорачуна може се закључити да је услов (5.8) задовољен, што значи да су сви параметри модела обрадљивости (брзина помоћног кретања, дубина глодања и грудни угао алата) сигнификантни.

Провера адекватности линеарног математичког модела изводи се, такође, према F -критеријуму. Код адекватног модела мора бити испуњен услов да је:

$$F_r < F_t \tag{5.10}$$

при чему се таблична вредност F -критеријума одређује за ниво значајности $\alpha = 0,05$, односно при 95% поузданости. Таблична вредност F -критеријума за степене слободе:

$$f_{LF} = f_R - f_E = N - k - 1 - (n_0 - 1) = 12 - 3 - 1 - (4 - 1) = 5 \text{ и } f_E = n_0 - 1 = 4 - 1 = 3$$

износи $F_t = 9,01$, што значи да за усвојени ниво поузданости мора бити задовољен услов: $F_{LF} < 9,01$, како би линеарни математички модел био адекватан. Рачунска вредност F -критеријума за оцену адекватности гласи:

$$F_{rLF} = \frac{s_M^2}{s_E^2} \tag{5.11}$$

Где је s_M^2 дисперзија разлика експерименталних и рачунских вредности y_i :

$$s_M^2 = \frac{S_{LF}}{f_{LF}} = \frac{S_R - S_E}{f_R - f_E} = \frac{1}{f_R - f_E} \left\{ \sum_{u=1}^{12} (y_u - \hat{y}_u)^2 - \left[\sum_{u=1}^4 y_{0u}^2 - \frac{1}{n_0} \left(\sum_{u=1}^4 y_{0u} \right)^2 \right] \right\},$$

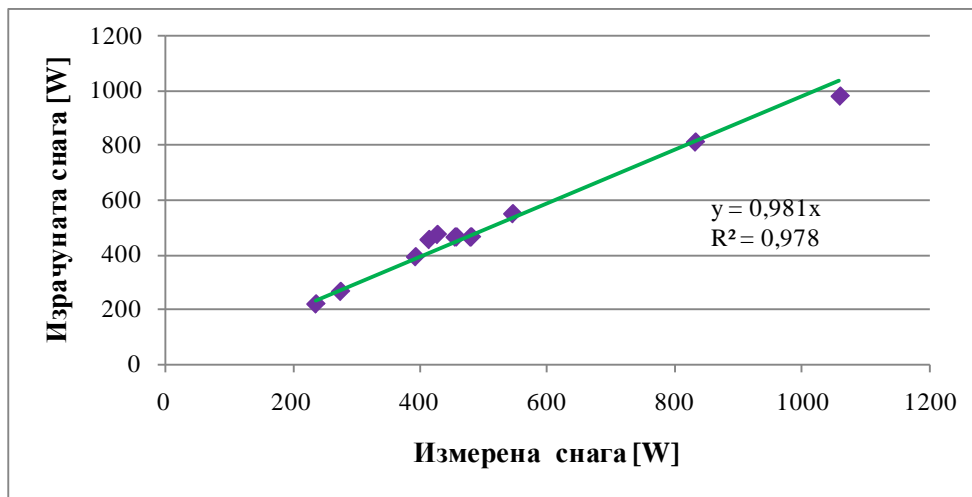
$$s_M^2 = \frac{1}{5} (0,035620 - 0,002666) = 0,006591$$

тада је:

$$F_r = \frac{s_M^2}{s_E^2} = \frac{0,006591}{0,000889} = 7,4163 < F_t = 9,01$$

На основу добијених резултата констатује се да је услов адекватности задовољен, што значи да са довољном тачношћу математички модел (5.7) описује зависност снаге резања од наведених утицајних фактора при усвојеним условима испитивања.

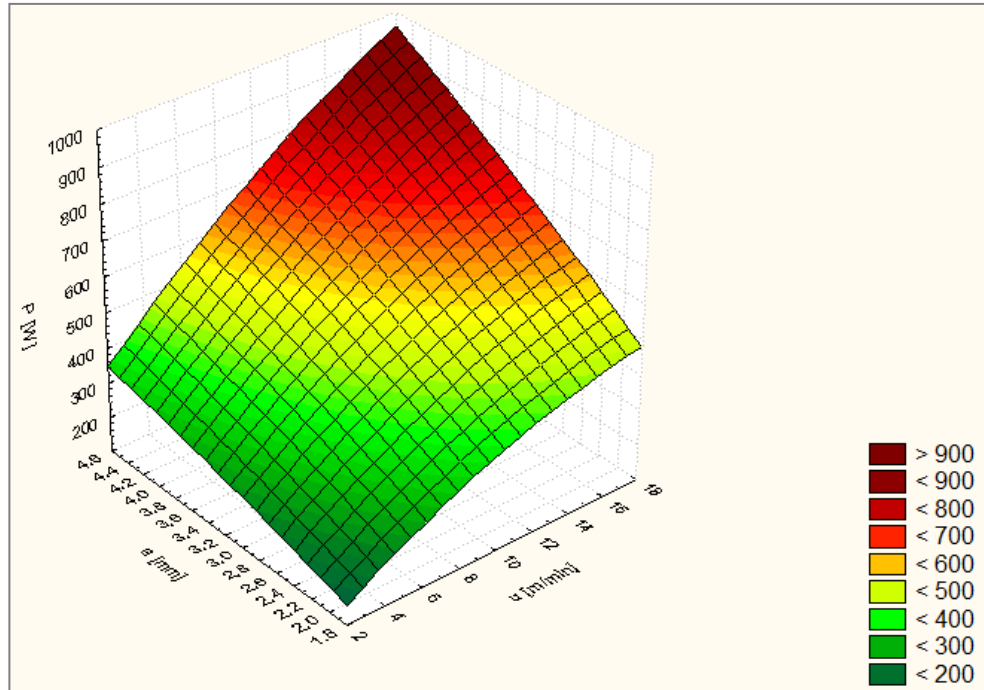
Адекватност модела потврђује и добро слагање између израчунатих и измерених вредности снаге резања. Слика 5.7 приказује промену снаге резања између измерених и израчунатих вредности снаге резања.



Слика 5.7: Зависност израчунате снаге резања од измерене снаге резања

Са слике је уочљива јака линеарна зависност између измерених и израчунатих вредности снаге резања што јасно показује и висок коефицијент детерминације ($R^2=0,978$).

Дијаграми зависности снаге резања од брзине помоћног кретања, дубине глодања и грудног угла алата приказани су у наставку (Слика 5.8, Слика 5.9 и Слика 5.10).

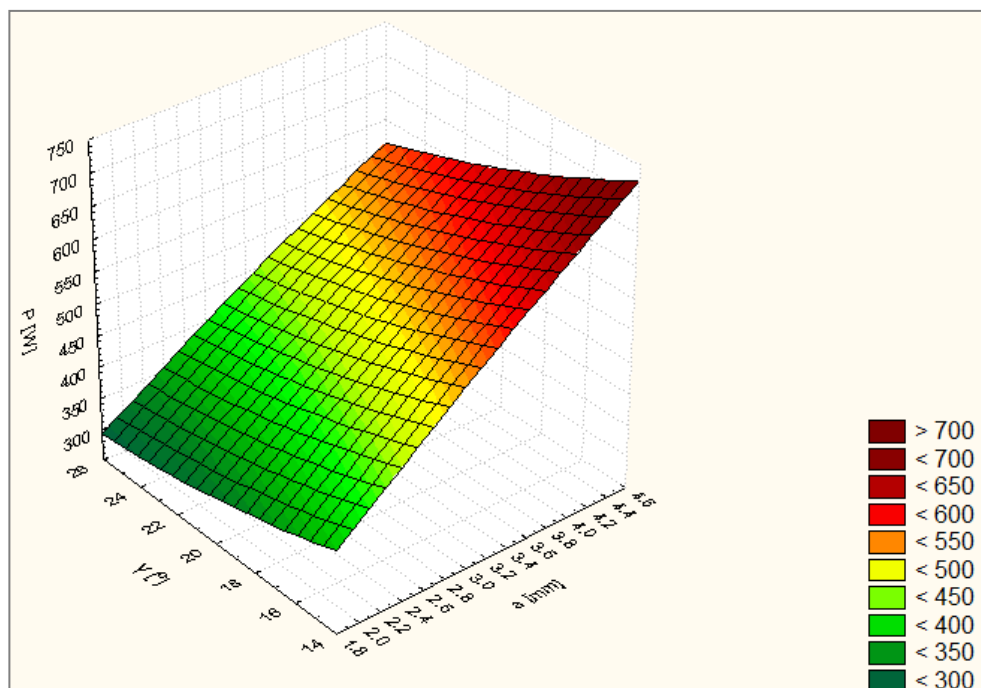


Слика 5.8: Зависност снаге резања од дубине глодања и брзине помоћног кретања за грудни угао алата $\gamma = 20^\circ$

Зависност снаге резања од брзине помоћног кретања и дубине глодања за грудни угао $\gamma = 20^\circ$ показује да са порастом оба наведена фактора расте и снага потребна за резање при обимном глодању храстовине.

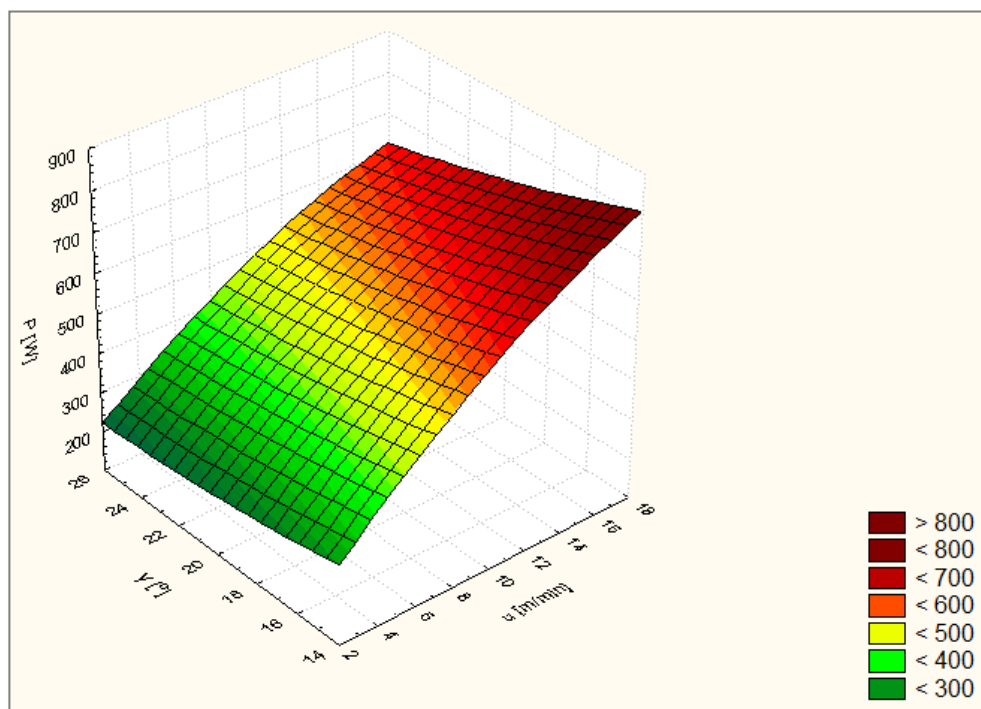
Зависност снаге резања од грудног угла алата и дубине глодања за брзину помоћног кретања од 8 m/min показује да са порастом дубине глодања расте и снага потребна за резање при обимном глодању (Слика 5.9).

При повећању грудног угла алата снага резања опада, при чему је евидентан слабији утицај грудног угла алата, у односу на дубину глодања и брзину помоћног кретања. Ово потврђује и претходна оцена сигнификантности параметара модела, која је показала да грудни угао алата има најмању вредност експонента ($p_3 = -0,4208$).



Слика 5.9: Зависност снаге резања од грудног угла алата и дубине глодања за брзину помоћног кретања 8 m/min

Слика 5.10 приказује зависности снаге резања од грудног угла алата и брзине помоћног кретања за дубине глодања од 3 mm.



Слика 5.10: Зависност снаге резања од грудног угла алата и брзине помоћног кретања за дубину глодања $a=3\text{ mm}$

Анализа дијаграма зависности снаге резања од грудног угла алата и брзине помоћног кретања за дубине глодања од 3 mm показује да са порастом брзине помоћног кретања расте и снага потребна за резање при обимном глодању (Слика 5.10). При повећању грудног угла алата снага резања опада, при чему је очигледан слаб утицај грудног угла алата на снагу резања, што је у складу са добијеним вредностима експонената у претходној анализи.

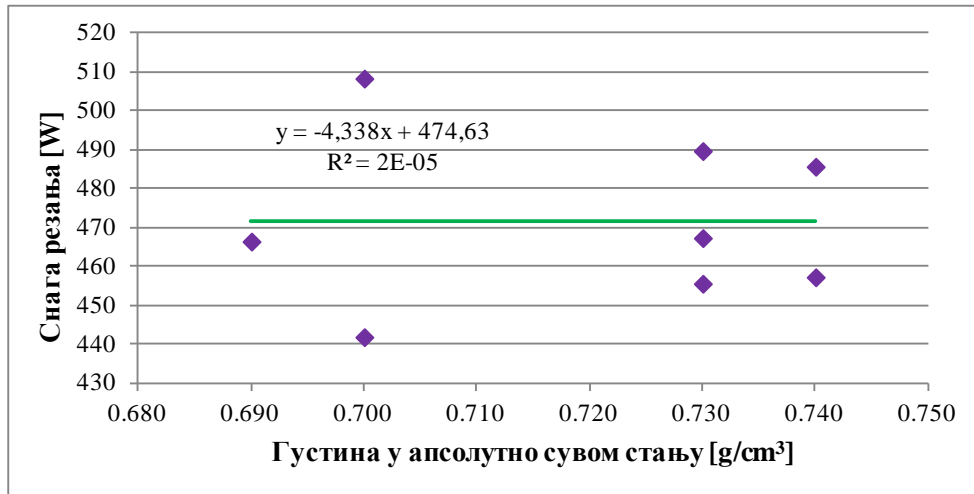
На основу положаја кривих на датим дијаграмима (Слика 5.8, Слика 5.9 и Слика 5.10) и на основу вредности експонената у моделу (5.7) могу се извести следећи закључци:

- Снага резања расте при повећању брзине помоћног кретања и дубине глодања, док при повећању грудног угла алата снага резања опада.
- По интензитету највећи утицај има дубина глодања, затим брзина помоћног кретања и на крају грудни угао сечива алата.

На основу претходно закљученог, могу се потврдити хипотезе да различита геометрија алата и различити технолошки параметри обраде узрокују различиту снагу резања.

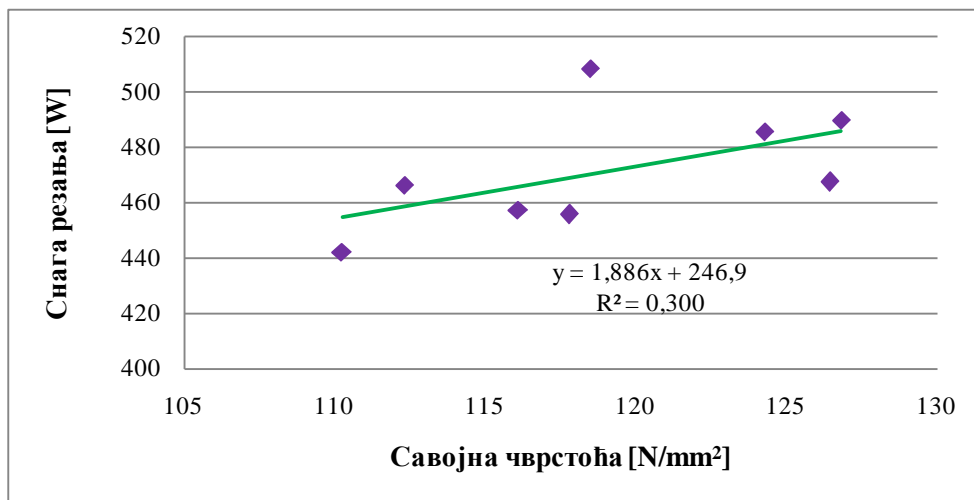
Слика 5.11, Слика 5.12, Слика 5.13, и Слика 5.14 приказују зависност снаге резања од физичких и механичких својстава дрвета. Анализа се односи само на вредности својстава дасака које су изабране за мерење обрадљивости храстовог дрвета при нултом режиму обраде. С обзиром да су даске биране према уједначеним физичким и механичким својствима, како би се смањио њихов утицај на резултате истраживања обрадљивости, тако су и добијене веома слабе линеарне зависности.

Слика 5.11 приказује утицај густине дрвета у апсолутно сувом стању на измерене снаге резања. Са слике је евидентно да скоро уопште не постоји линеарна зависност између густине дрвета и измерених снага резања.



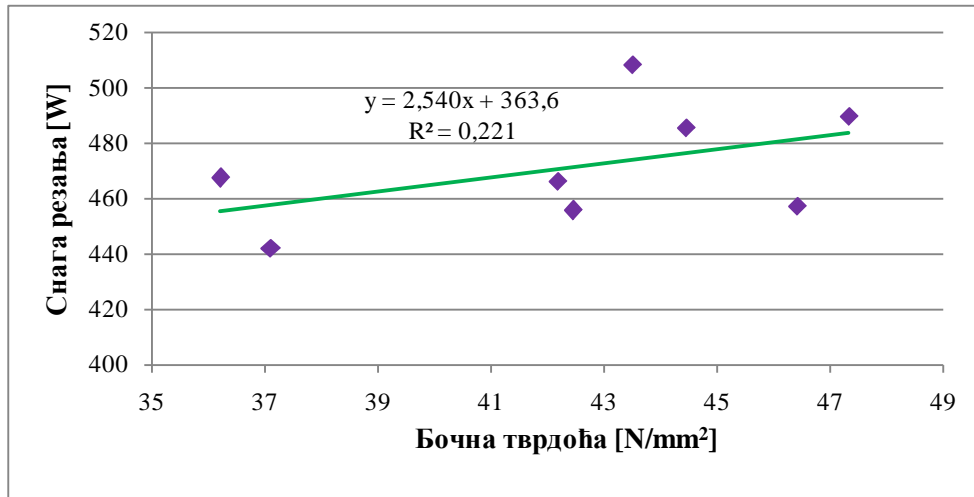
Слика 5.11: Утицај густине у апсолутно сувом стању на измерене снаге резања

Слика 5.12 приказује утицај савојне чврстоће на измерене снаге резања. Са слике је евидентна слаба линеарна зависност, што потврђује и коефицијент детерминације ($R^2 = 0,300$).



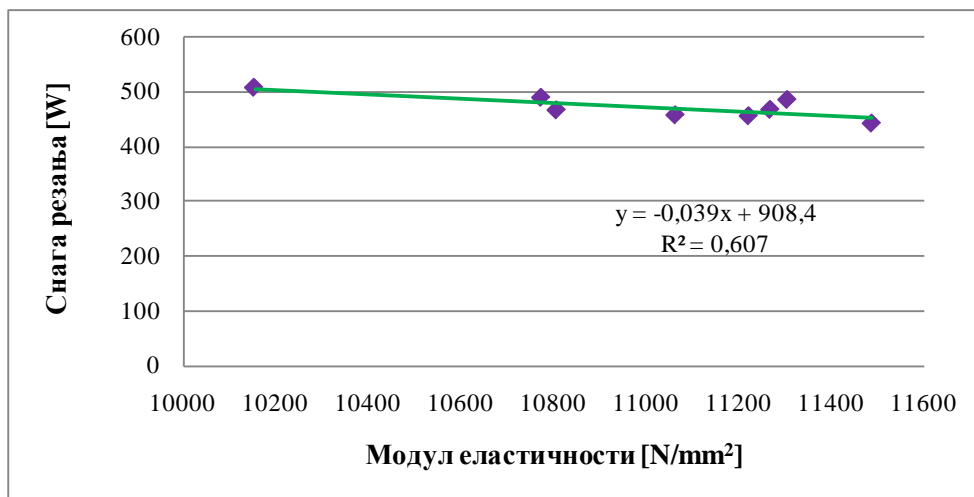
Слика 5.12: Утицај савојне чврстоће на измерене снаге резања

Слика 5.13 приказује слабу линеарну зависност снаге резања од бочне тврдоће што потврђује и коефицијент детерминације ($R^2 = 0,221$).



Слика 5.13: Утицај бојне тврдоће на измерене снаге резања

Слика 5.14 приказује утицај модула еластичности на измерене снаге резања. Као и у претходним случајевима, евидентна је недовољно јака линеарна зависност.



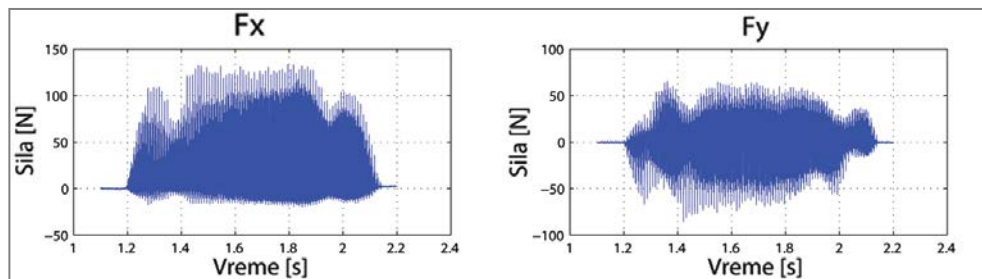
Слика 5.14: Утицај модула еластичности при савијању на измерене снаге резања

Јасно је да постоји слаба веза између снаге резања дрвета и испитиваних механичких својстава изабраних дасака, тако да постављена хипотеза да различита физичка и механичка својстава узрокују и различите снаге резања у овом случају није потврђена. Може се закључити да је у значајној мери, за изабране узорке, избегнут утицај физичких и механичких својстава на резултате испитивање обрадљивости дрвета.

5.3 Мерење сила резања при обимном глодању

Мерење сила у два правца је извршена помоћу уређаја чији је принцип рада објашњен у тачки 4.4.5.2. Измерене су две компоненте силе резања F_x и F_y . Фреквенција аквизиције резултата мерења била је 50.000 Hz, односно рачунар је записивао 50.000 података о силама у секунди. Укупно је извршено 285 мерења сила резања на 57 епрувета. У прилогу су представљене све измерене вредности сила резања за сваки режим обраде, односно за све испитиване вредности брзине помоћног кретања (Табела 8.6, Табела 8.7 и Табела 8.8).

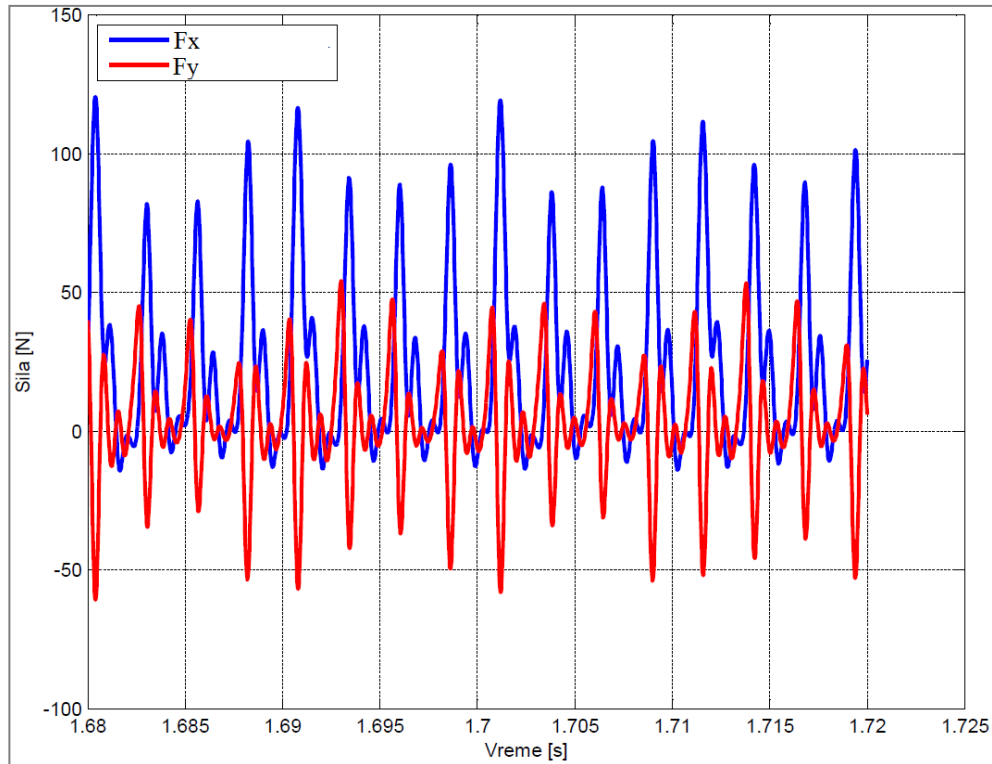
Слика 5.15 приказује део једног целог записа мерења сила у два правца.



Слика 5.15: Записи компонената сила глодања

Из записа за једно мерење, односно за један пролаз алата издвојен је средњи део. То је урађено да би се елиминисао утицај смањеног попречног пресека предмета рада на местима где постоје отвори за причвршћивање епрувете за мерни уређај (Слика 4.12).

Слика 5.16 приказује део издвојеног записа, односно четири обртаја алата, где су упоредно приказане компоненте силе глодања F_x и F_y .



Слика 5.16: Упоредни приказ компоненти сила глодања

Плавом бојом обележен је запис силе F_x (подужне силе), а црвеном бојом запис силе F_y (нормалне силе). Сигнал, који је делимично приказан на слици претворен је, уз помоћ програма за аквизицију, у запис у табличном облику у EXCEL-у. На основу ових вредности било је могуће израчунати укупну силу резања, као и њене компоненте обимну и радијалну силу резања.

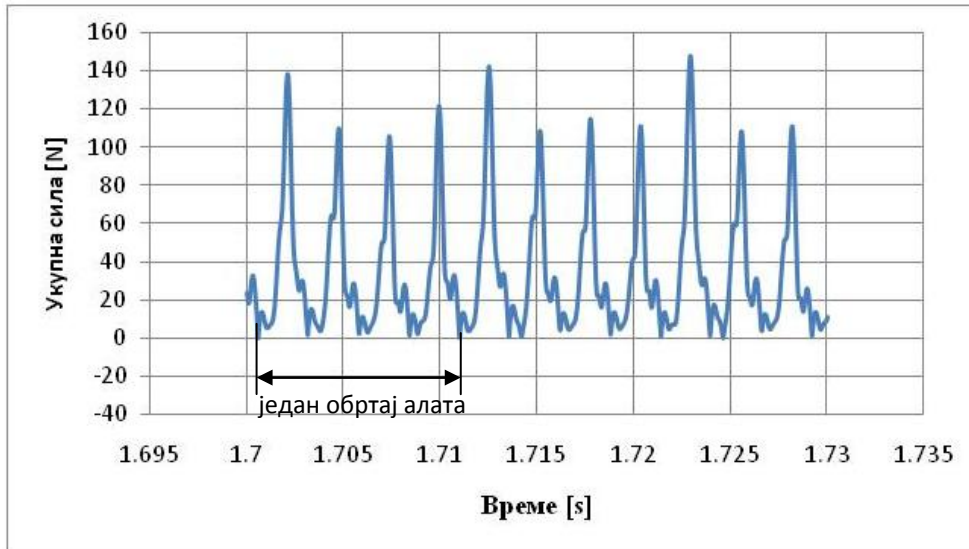
5.3.1 Резултати мерења сила резања

Укупна сила резања се може добити сабирањем хоризонталне и вертикалне компоненте силе резања према формули:

$$F_{uk} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (5.12)$$

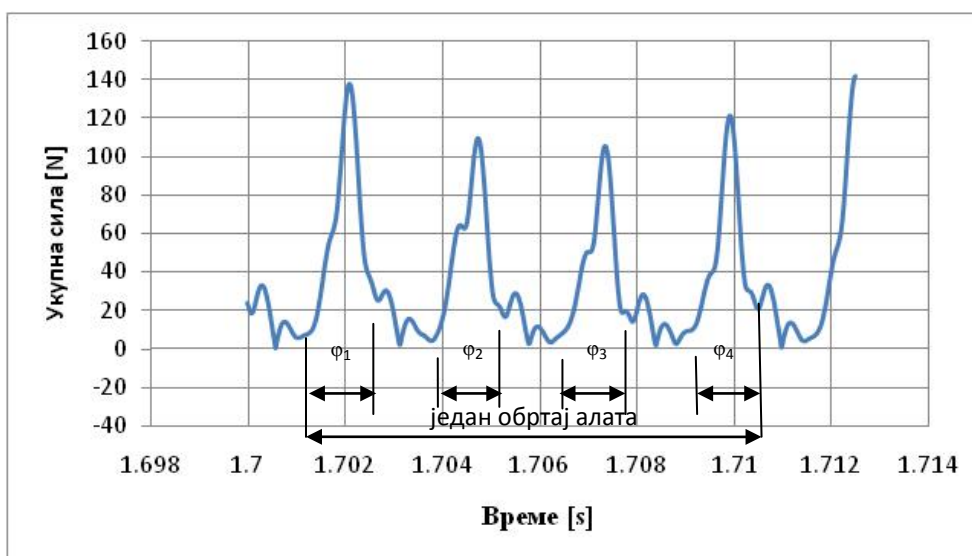
С обзиром, да су за анализу биле потребне средња сила резања за једно сечиво и средња сила резања за један обртај алата спроведена су одређена додатна прорачунавања.

Слика 5.17 приказује резултат сабирања компоненти силе резања.



Слика 5.17: Дијаграм укупне силе резања

За добијање средње силе резања за једно сечиво потребно је наћи просечне силе за свако од сечива и наћи њихову средњу вредност за сва четири сечива које алат има. За то је било потребно одредити време које је сечиво у једном пролазу провело у контакту са материјалом, односно наћи угао захвата сечива и алата и извршити нумеричку интеграцију силе за тај период времена (угла) и након тога наћи средњу вредност средње силе за једно сечиво (Слика 5.18). То је било потребно поновити за свако сечиво посебно и за одабрану дужину обраде водећи рачуна да епрувета има при крајевима отворе за стезање за носач мерног уређаја (Слика 4.12).



Слика 5.18: Приказ укупне силе резања за један обртај алата

Након тога требало је сабрати просечне вредности сила за један обртај алата и наћи средњу вредност, односно поделити са четири с обзиром да је број зуба глодала 4. Цео овај поступак је, с обзиром на величину записа, урађен уз помоћ посебно направљеног програма у Matlab-у (који је дат у прилогу дисертације).

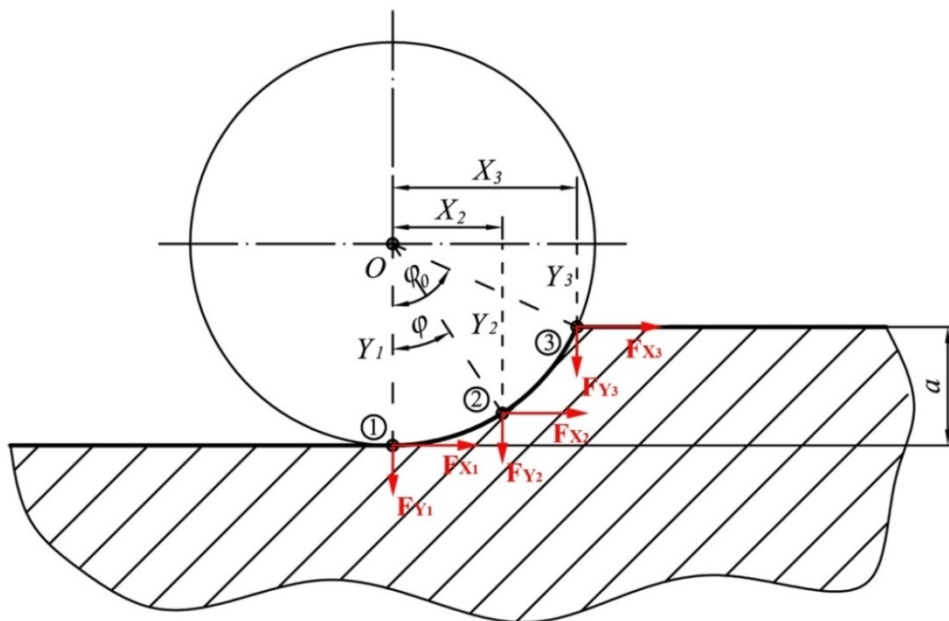
За израчунавање средње обимне силе по једном обртају алата поновљен је претходни поступак за израчунавање просечних сила по једном сечиву, а просечна укупна сила за један обртај алата израчуната је на основу обрасца:

$$F_{sr1} = \frac{F_{sr} \cdot O_{gl}}{N \cdot l_{r1}} = \frac{F_{sr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R}{4 \cdot \varphi_0 \cdot R} [N] \quad (5.13)$$

где су: F_{sr1} - средња сила резања по сечиву [N]; F_{sr} – средња сила главног отпора резања [N], O_{gl} – обим глодала [m], l_{r1} – дужина захвата сечива и предмета рада [m], N – број сечива глодала, R – полупречник глодала [m], и φ_0 угао захвата сечива и предмета рада [rad].

Цео овај поступак је, такође, с обзиром на величину записа, урађен помоћу посебно направљеног програма у Matlab-у (који је дат у прилогу дисертације).

За израчунавање тренутне обимне и радијалне силе примењен је нешто другачији поступак (Слика 5.19).



Слика 5.19: Компоненте силе резања код супротносмерног обимног глодања

Постављена је моментна једначина за тачку О, односно за осу обртања сечива и претпостављено је да је обимна брзина константна:

$$M_{om} = M_x + M_y = F_{ob} \cdot R \quad (5.14)$$

из тога следи да је:

$$F_{om} = \frac{M_x + M_y}{R} \quad (5.15)$$

где су:

$$M_x = F_x \cdot y = F_x \cdot R \cos \varphi \quad (5.16)$$

$$M_y = F_y \cdot x = F_y \cdot R \sin \varphi \quad (5.17)$$

Коначно се добија:

$$F_{om} = \frac{F_x \cdot R \cos \varphi + F_y \cdot R \sin \varphi}{R} \quad (5.18)$$

где су: F_{om} – обимна сила [N]; F_x – хоризонтална сила [N]; F_y – вертикална сила; R - полупречник глодала [mm]; φ - тренутни угао захвата.

Просечна обимна сила за један обртај глодала рачуна се на сличан начин као и просечна укупна сила за један обртај. Цео овај поступак је такође, с обзиром на величину записа, урађен уз помоћ посебно направљеног програма у Matlab-у (који је дат у прилогу дисертације).

Табела 5.8 приказује средње вредности измерених обимних и укупних сила резања при обимном глодању храстовине.

Табела 5.8: Средње вредности измерених обимних сила резања (F_{om}) и укупних сила резања (F_{uk})

Р. бр.	Брзина помоћног кретања u (m/min)	Дубина глодања a (mm)	Грудни угао γ (°)	Средња вредност F_{om} (N)	Средња вредност F_{uk} (N)
1	16	4,5	25	21,92	31,63
2	16	2	25	13,57	16,41
3	4	4,5	25	16,66	21,08
4	4	2	16	8,21	13,49
5	8	3	20	17,78	24,53
6	4	4,5	16	14,71	20,70
7	8	3	20	16,44	22,94
8	16	4,5	16	25,64	35,47
9	4	2	25	11,30	15,87
10	8	3	20	17,06	23,52
11	8	3	20	16,19	21,17
12	16	2	16	17,05	20,53

На основу добијених резултата формирање су план-матрице измерених обимних и укупних сила резања, њихових моделских резултата и грешака мерења добијених поступком регресионе анализе.

5.3.2 Анализа резултата мерења сила резања и формирање модела обрадљивости

Према методологији математичке обраде (детаљно представљена у поглављима 4.4 и 4.5), математички модел зависности средње обимне силе резања при обимном глодању од брзине помоћног кретања, дубине глодања и грудног угла сечива, представљен општим обликом:

$$F_{om} = C \cdot u^{p_1} \cdot a^{p_2} \cdot \gamma^{p_3} \quad (5.19)$$

логаритмовањем се преводи у линеарни облик :

$\ln R = \ln C + p_1 \ln f_1 + p_2 \ln f_2 + p_3 \ln f_3$ односно $y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3$, како би се одредиле нумеричке вредности константе C и експонената p_1 , p_2 , и p_3 у моделу.

Табела 5.9: План матрица експерименталног мерења обимних сила резања

Редни број	План матрица				Резултати мерења		Моделски резултати		Грешка	
	x_0	x_1	x_2	x_3	F_{om} (N)	$y = \ln F_{om}$	F_{om} (N)	$y = \ln F_{om}$	$(y_u - \hat{y}_u)^2$	$(y_{0u} - \bar{y}_0)^2$
1	+1	+1	+1	+1	21,92	3,0872	24,94	3,2165	0,016723	
2	+1	+1	-1	+1	13,57	2,6082	15,67	2,7519	0,020655	
3	+1	-1	+1	+1	16,66	2,8130	16,13	2,7806	0,001053	
4	+1	-1	-1	-1	8,21	2,1051	9,98	2,3010	0,038362	
5	+1	0	0	0	17,78	2,8780	15,78	2,7588	0,014211	0,014211
6	+1	-1	+1	-1	14,71	2,6885	15,89	2,7656	0,005955	
7	+1	0	0	0	16,44	2,7998	15,78	2,7588	0,001686	0,001686
8	+1	+1	+1	-1	25,64	3,2440	24,57	3,2016	0,001795	
9	+1	-1	-1	+1	11,30	2,4248	10,13	2,3159	0,011861	
10	+1	0	0	0	17,06	2,8364	15,78	2,7588	0,006036	0,006036
11	+1	0	0	0	16,19	2,7841	15,78	2,7588	0,000644	0,000644
12	+1	+1	-1	-1	17,05	2,8360	15,44	2,7370	0,009802	
							Σ		0,128782	0,022576

Параметри модела (5.19) одређују се из система општих једначина, које с обзиром на план матрицу (Табела 5.9) прелазе у облик:

$$b_0 = \frac{1}{12}(y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_{12}) = 2,7588$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_6 + y_8 - y_9 + y_{12}) = 0,2180$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(y_1 - y_2 + y_3 - y_4 + y_6 + y_8 - y_9 - y_{12}) = 0,2323$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(y_1 + y_2 + y_3 - y_4 - y_6 - y_8 + y_9 - y_{12}) = 0,0075$$

На основу израчунатих параметара модела b_i и података из план-матрице (Табела 5.9) добијају се следеће вредности:

$$p_1 = \frac{2b_1}{\ln \frac{u_{max}}{u_{min}}} = 0,3145, \quad p_2 = \frac{2b_2}{\ln \frac{a_{max}}{a_{min}}} = 0,5730, \quad p_3 = \frac{2b_3}{\ln \frac{\gamma_{max}}{\gamma_{min}}} = 0,0334,$$

$$p_0 = b_0 + b_1 + b_2 + b_3 - (p_1 \ln u_{max} + p_2 \ln a_{max} + p_3 \ln \gamma_{max}) = 1,3751,$$

$$C = e^{1,3863} = 3,9555 \quad (5.20)$$

Заменом добијених вредности константе и експонената у модел (5.19) добија се регресиона зависност средње обимне силе резања при обимном глодању од брзине помоћног кретања, дубине глодања и грудног угла алата:

$$F_{om} = 3,9555 \cdot u^{0,3145} \cdot a^{0,5730} \cdot \gamma^{0,0334} \quad (5.21)$$

Оцена сигнификантности параметара модела b_i ($i = 0, 1, 2, 3$) изводи се према F -критеријуму на већ објашњен начин. Формирањем односа дисперзија параметара према дисперзији резултата у нултој тачки биће:

$$F_{r0} = \frac{s_0^2}{s_E^2} = 12135 > F_t = 10,13$$

$$F_{r1} = \frac{s_1^2}{s_E^2} = 50,516 > F_t = 10,13$$

$$F_{r2} = \frac{s_2^2}{s_E^2} = 57,381 > F_t = 10,13$$

$$F_{r3} = \frac{s_3^2}{s_E^2} = 0,0590 < F_t = 10,13$$

За утицајне параметре брзина помоћног кретања u и дубина глодања a услов (5.8) је задовољен, што значи да су ти параметри сигнификантни, док за грудни угао алата γ услов није испуњен, односно грудни угао алата γ не утиче сигнификантно на средњу обимни силу глодања.

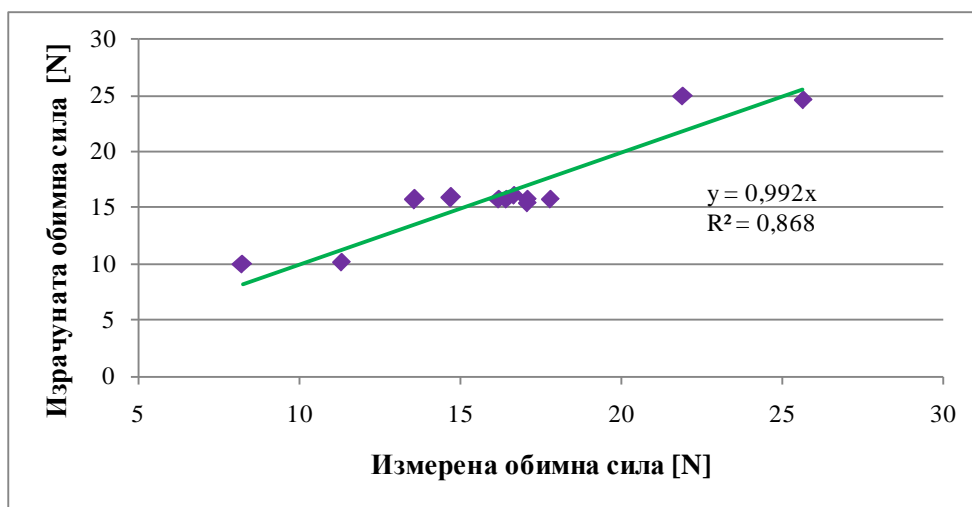
Провера адекватности линеарног математичког модела:

$$F_r = \frac{s_M^2}{s_E^2} = \frac{0,021241}{0,007525} = 2,8226 < F_t = 9,01$$

показује да је услов (5.10) испуњен, што значи са довољном тачношћу математички модел (5.21) описује зависност средње обимне силе резања од наведених утицајних фактора при усвојеним условима испитивања.

Адекватност модела потврђује и добро слагање између израчунатих и измерених вредности обимне силе резања. Слика 5.20 приказује промену обимне силе

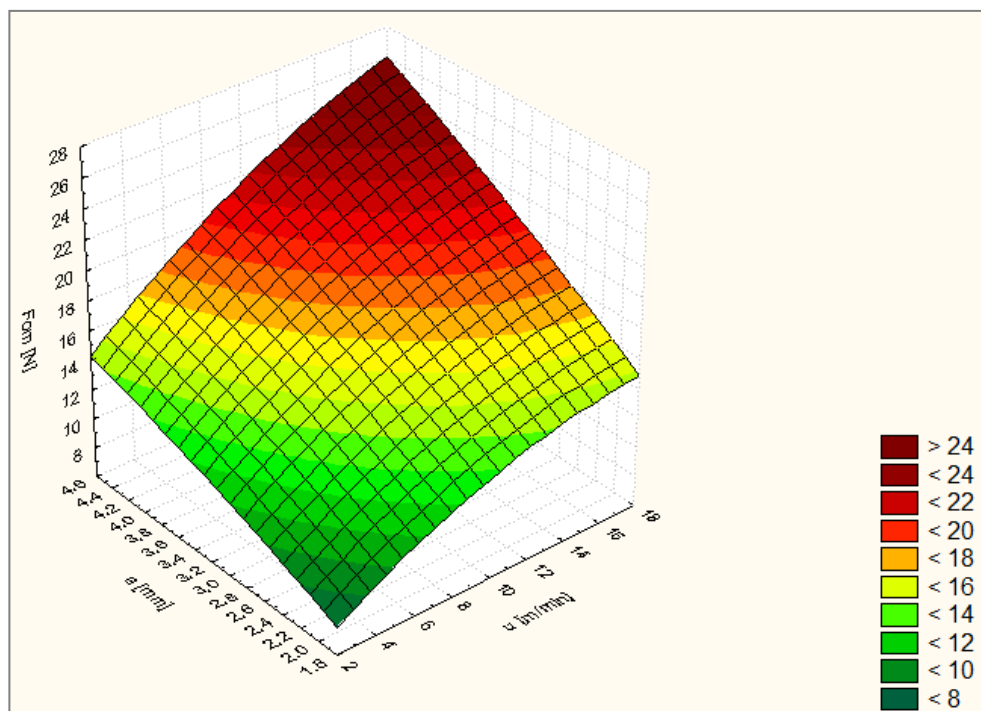
резања према експериментално добијеним подацима и рачунски добијеним вредностима.



Слика 5.20: Зависност израчунате обимне силе од измерене обимне силе

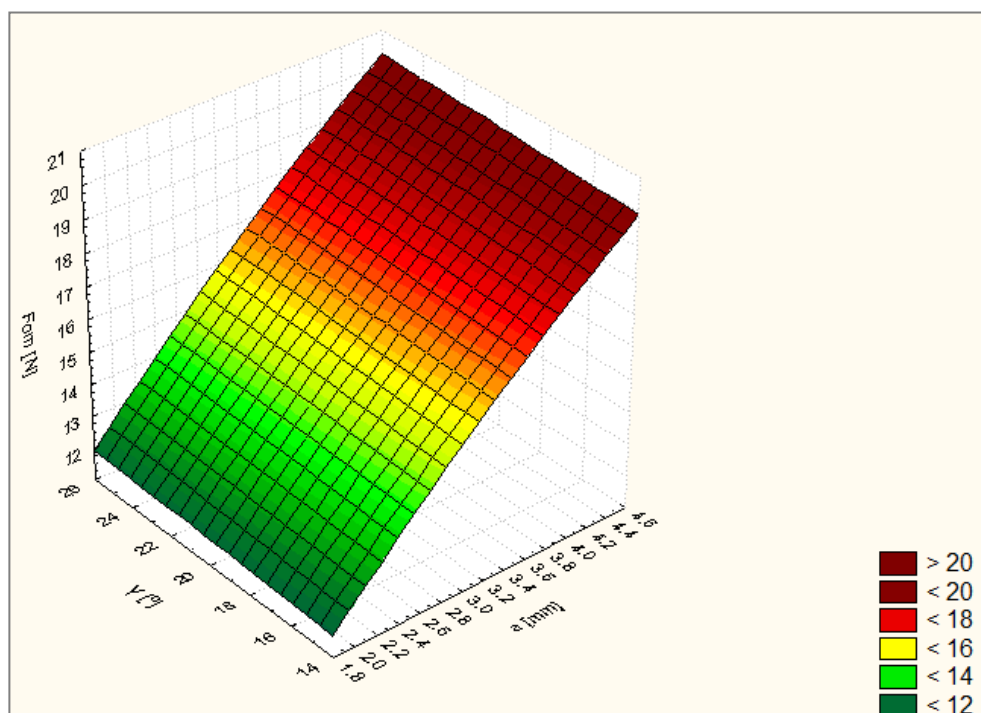
Са слике је уочљива јака линеарна зависност између експериментално добијених података и рачунских вредности обимне силе резања што јасно показује и коефицијент детерминације ($R^2 = 0,868$).

Слика 5.21 приказује дијаграм зависности средње обимне силе резања од брзине помоћног кретања и дубине глодања. Са слике је уочљиво да са порастом брзине помоћног кретања и дубине глодања расте и средња обимна сила.



Слика 5.21: Зависност средње обимне силе од брзине помоћног кретања и дубине глодања за грудни угао $\gamma=20^\circ$

Слика 5.22 приказује зависност средње обимне силе од грудног угла алата и дубине глодања за брзину помоћног кретања $u=8$ m/min.



Слика 5.22: Зависност средње обимне силе од грудног угла алата и дубине глодања за брзину помоћног кретања $u=8$ m/min

Евидентно је да са порастом дубине глодања расте и средња обимна сила резања. Са слике је очигледно да је утицај грудног угла веома слаб, што је у складу са претходном оценом сигнификантности параметара модела, која је показала да грудни угао алата нема сигнификантан утицај на обимну силу резања.

На основу положаја кривих на датим дијаграмима (Слика 5.21 и Слика 5.22) и на основу вредности експонената у моделу (5.21) могу се извести следећи закључци:

- Средња обимна сила резања расте при повећању брзине помоћног кретања и дубине глодања, док грудни угао сечива није показао сигнификантан утицај.
- По интензитету већи утицај на средњу обимну силу резања има дубина глодања у односу на брзину помоћног кретања.

Иста анализа урађена је и за укупну силу резања и добијени су слични резултати (Табела 5.10).

Табела 5.10: План матрица експерименталног мерења укупних сила резања

Редни број	План матрица				Резултати мерења		Моделски резултати		Грешка	
	x_0	x_1	x_2	x_3	F_{uk} (N)	$y = \ln F_{uk}$	F_{uk} (N)	$y = \ln F_{uk}$	$(y_u - \hat{y}_u)^2$	$(y_{0u} - \bar{y}_0)^2$
1	+1	+1	+1	+1	31,63	3,4540	31,93	3,4636	0,000091	
2	+1	+1	-1	+1	16,41	2,7979	19,78	2,9848	0,034939	
3	+1	-1	+1	+1	21,08	3,0482	22,51	3,1141	0,004341	
4	+1	-1	-1	-1	13,49	2,6017	14,51	2,6747	0,005324	
5	+1	0	0	0	24,53	3,1997	21,52	3,0691	0,017058	0,017058
6	+1	-1	+1	-1	20,70	3,0299	23,42	3,1534	0,015247	
7	+1	0	0	0	22,94	3,1328	21,52	3,0691	0,004049	0,004049
8	+1	+1	+1	-1	35,47	3,5687	33,21	3,5029	0,004326	
9	+1	-1	-1	+1	15,87	2,7646	13,95	2,6353	0,016696	
10	+1	0	0	0	23,52	3,1577	21,52	3,0691	0,007853	0,007853
11	+1	0	0	0	21,17	3,0525	21,52	3,0691	0,000276	0,000276
12	+1	+1	-1	-1	20,53	3,0217	20,58	3,0242	0,000006	
							Σ		0,110207	0,029237

Регресиона зависност укупне силе резања при обимном глодању од брзине помоћног кретања, дубине глодања и грудног угла сечива приказана је моделом (5.22):

$$F_{uk} = 8,6744 \cdot u^{0,2521} \cdot a^{0,5903} \cdot \gamma^{-0,0881} \quad (5.22)$$

Оцена сигнификантности параметара модела показала је, такође, да за утицајне параметре брзина помоћног кретања u и дубина глодања a услов (5.8) је задовољен, што значи да су ти параметри сигнификантни, док за грудни угао сечива γ услов није испуњен, односно грудни угао сечива γ не утиче сигнификантно на средњу обимни силу глодања:

$$F_{r0} = \frac{s_0^2}{s_E^2} = 11598 > F_t = 10,13$$

$$F_{r1} = \frac{s_1^2}{s_E^2} = 25,065 > F_t = 10,13$$

$$F_{r2} = \frac{s_2^2}{s_E^2} = 47,033 > F_t = 10,13$$

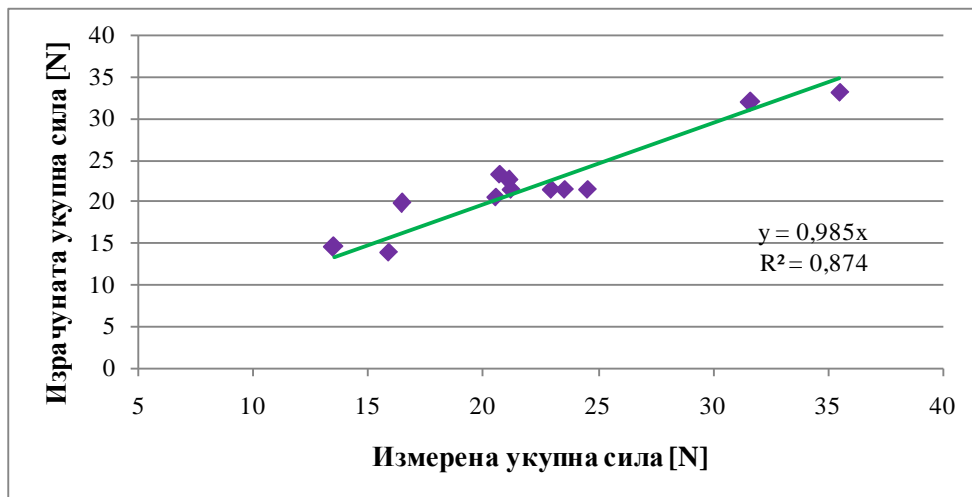
$$F_{r3} = \frac{s_3^2}{s_E^2} = 0,3175 < F_t = 10,13$$

Провера адекватности линеарног математичког модела:

$$F_r = \frac{s^2_M}{s^2_E} = \frac{0.016194}{0.009746} = 1.6617 < F_t = 9,01 \text{ показује да је услов (5.10) испуњен, што}$$

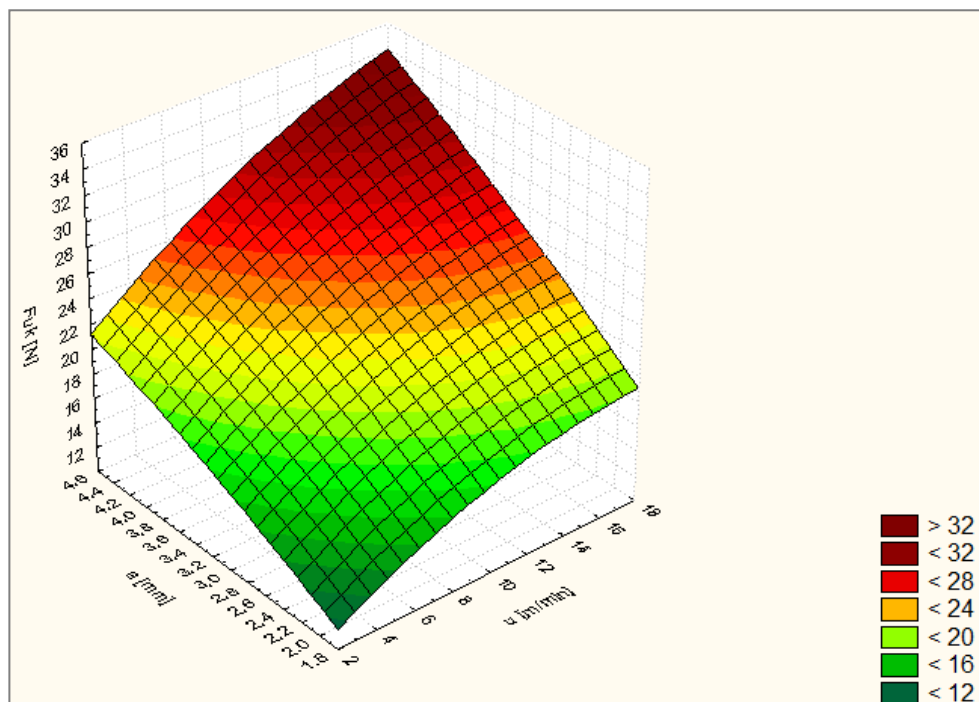
значи са довољном тачношћу математички модел (5.22) описује зависност средње укупне силе резања од наведених утицајних фактора при усвојеним условима испитивања.

Адекватност модела потврђује и добро слагање између израчунатих и измерених вредности укупне силе резања. Слика 5.23 приказује промену укупне силе резања према експериментално добијеним подацима и рачунски добијеним вредностима. Евидентна је јака линеарна зависност између израчунатих и измерених вредности укупне силе резања што јасно показује и коефицијент детерминације ($R^2 = 0,874$).



Слика 5.23: Зависност израчунате укупне силе од измерене укупне силе

Слика 5.24 приказује дијаграм зависности укупне силе резања од брзине помоћног кретања и дубине глодања за грудни угао $\gamma=20^\circ$.



Слика 5.24: Зависност укупне силе резања од брзине помоћног кретања и дубине глодања за грудни угао $\gamma=20^\circ$

С обзиром да грудни угао није показао сигнификантан утицај на храпавост обрађене површине, на дијаграму су приказане вредности за грудни угао $\gamma = 20^\circ$.

На основу положаја кривих на датом дијаграму и вредности експонената у моделу (5.22) могу се извести следећи закључци:

- Укупна сила резања расте при повећању брзине помоћног кретања и дубине глодања, док грудни угао сечива није показао сигнификантан утицај.
- По интензитету већи утицај на укупну силу резања има дубина глодања у односу на брзину помоћног кретања.

На основу претходно закљученог, може се потврдити хипотеза да различити технолошки параметри обраде узрокују различиту силу резања. Хипотеза да различита геометрија алата (грудни угао алата) узрокује различиту силу резања у овом случају, односно, за постављене услове обраде није потврђена.

5.4 Мерење храпавости обрађене површине

Новонастале површине при резању дрвета, као што је већ објашњено, никада нису идеално глатке већ се састоји од неравнина које се могу груписати на:

- Структурне неравнине које су последица анатомске структуре дрвета. Њихове величине и распоред зависе од врсте дрвета и не могу се избећи, већ прате резање дрвета.
- Неравнине узроковане обрадом резањем у које спадају тзв. микронеравнине ако се односе на храпавост обрађене површине. Узорци настајања неравнина су следећи: трагови обраде алатом, неравнине од заосталих деформација у дрвету, трагови настали од вибрације машине, алата или предмета рада, режим резања, наоштреност алата, вид резања, и физичко-механичка својства дрвета (посебно густина и стварање прстенова прираста).
- Неравнине које су последица обраде резањем могу се дефинисати као: храпавост, валовитост, валовитост са храпавошћу и деструктивне неравнине (Zubčević, 1988).

5.4.1 Резултати мерења храпавости обрађене површине

У прилогу су представљене све измерене вредности параметра храпавости површине R_a управно на правац протезања дрвних влакана (Табела 8.9, Табела

8.10 и Табела 8.11) и паралелно са правцем протезања дрвних влакана (Табела 8.12, Табела 8.13 и

Табела 8.14), за сваки режим обраде, односно за све испитиване вредности брзине помоћног кретања. Укупно је извршено 604 мерења, 270 мерења за испитивање храпавости управно на правац протезања дрвних влакана, односно 334 мерења за испитивање храпавости паралелно са правцем протезања дрвних влакана.

Табела 5.11 приказује средње вредности параметра храпавости обрађене површине R_a мерене управно и паралелно са правцем протезања дрвних влакана.

Табела 5.11: Средње вредности храпавости обрађене површине измерених управно са правцем протезања дрвних влакана ($R_{a\perp}$) и паралелно са правцем протезања дрвних влакана ($R_{a\parallel}$)

Р. бр.	Брзина помоћног кретања u (m/min)	Дубина глодања a (mm)	Грудни угао γ (°)	Средња вредност $R_{a\perp}$ (μm)	Средња вредност $R_{a\parallel}$ (μm)
1	16	4,5	25	8,96	2,78
2	16	2	25	5,94	2,01
3	4	4,5	25	7,13	2,33
4	4	2	16	3,90	1,69
5	8	3	20	6,24	1,80
6	4	4,5	16	4,93	1,67
7	8	3	20	6,81	1,84
8	16	4,5	16	7,38	1,91
9	4	2	25	3,49	1,39
10	8	3	20	6,01	2,25
11	8	3	20	6,60	1,61
12	16	2	16	6,93	2,53

Евидентно је да су вредности средњег аритметичког одступања профила R_a мерено управно на правац протезања влакана значајно веће од вредности R_a мерено паралелно са правцем протезања дрвних влакана, што је у складу са претходним истраживањима (Moura, Hernandez, 2006).

На основу добијених резултата формиране су план-матрице средњих вредности R_a мерене управно и паралелно са правцем протезања дрвних влакана, њихових моделских резултата и грешака мерења добијених применом регресионе анализе.

5.4.2 Анализа резултата мерења храпавости обрађене површине и формирање модела обрадљивости

После поставке математичког модела за храпавост обрађене површине:

$$R_a = C \cdot u^{p_1} \cdot a^{p_2} \cdot \gamma^{p_3} \tag{5.23}$$

и након превођења у линеарни облик добијају се нумеричке вредности константе С и експонената p_1 , p_2 , и p_3 у моделу, према одговарајућим подацима (Табела 5.12):

$$p_1 = \frac{2b_1}{\ln \frac{u_{max}}{u_{min}}} = 0,3135, \quad p_2 = \frac{2b_2}{\ln \frac{a_{max}}{a_{min}}} = 0,4386, \quad p_3 = \frac{2b_3}{\ln \frac{\gamma_{max}}{\gamma_{min}}} = 0,1668$$

$$p_0 = b_0 + b_1 + b_2 + b_3 - (p_1 \ln u_{max} + p_2 \ln a_{max} + p_3 \ln \gamma_{max}) = 0,1589$$

$$C = e^{0,1589} = 1,1723 \tag{5.24}$$

Табела 5.12: План матрица експерименталног мерења храпавости површине управно на правац протезања дрвних влакана

Редни број	План матрица				Резултати мерења		Моделски резултати		Грешка	
	x_0	x_1	x_2	x_3	$R_{a\perp}$ (μm)	$y = \ln R_a$	$R_{a\perp}$ (μm)	$y = \ln R_a$	$(y_u - \hat{y}_u)^2$	$(y_{0u} - \bar{y}_0)^2$
1	+1	+1	+1	+1	8,96	2,1928	9,25	2,2248	0,001029	
2	+1	+1	-1	+1	5,94	1,7817	6,48	1,8692	0,007647	
3	+1	-1	+1	+1	7,13	1,9643	5,99	1,7902	0,030316	
4	+1	-1	-1	-1	3,90	1,3610	3,90	1,3601	0,000001	
5	+1	0	0	0	6,24	1,8310	6,00	1,7925	0,001484	0,001484
6	+1	-1	+1	-1	4,93	1,5953	5,56	1,7158	0,014502	
7	+1	0	0	0	6,81	1,9184	6,00	1,7925	0,015859	0,015859
8	+1	+1	+1	-1	7,38	1,9988	8,59	2,1504	0,022993	
9	+1	-1	-1	+1	3,49	1,2499	4,20	1,4345	0,034080	
10	+1	0	0	0	6,01	1,7934	6,00	1,7925	0,000001	0,000001
11	+1	0	0	0	6,60	1,8871	6,00	1,7925	0,008951	0,008951
12	+1	+1	-1	-1	6,93	1,9359	6,02	1,7947	0,019920	
							Σ		0,156782	0,026295

Замењујући добијене вредности у константе и експонената у модел (5.23) добија се регресиона зависност R_a при обимном глодању од брзине помоћног кретања, дубине глодања и грудног угла алата:

$$R_{a\perp} = 1.1723 \cdot u^{0.3135} a^{0.4386} \gamma^{0.1668} \quad (5.25)$$

Према оцени сигнификантности параметара модела:

$$F_{r0} = \frac{s_0^2}{s_E^2} = 4398,712 > F_t = 10,13$$

$$F_{r1} = \frac{s_1^2}{s_E^2} = 43,1069 > F_t = 10,13$$

$$F_{r2} = \frac{s_2^2}{s_E^2} = 28,8676 > F_t = 10,13$$

$$F_{r3} = \frac{s_3^2}{s_E^2} = 1,2643 < F_t = 10,13$$

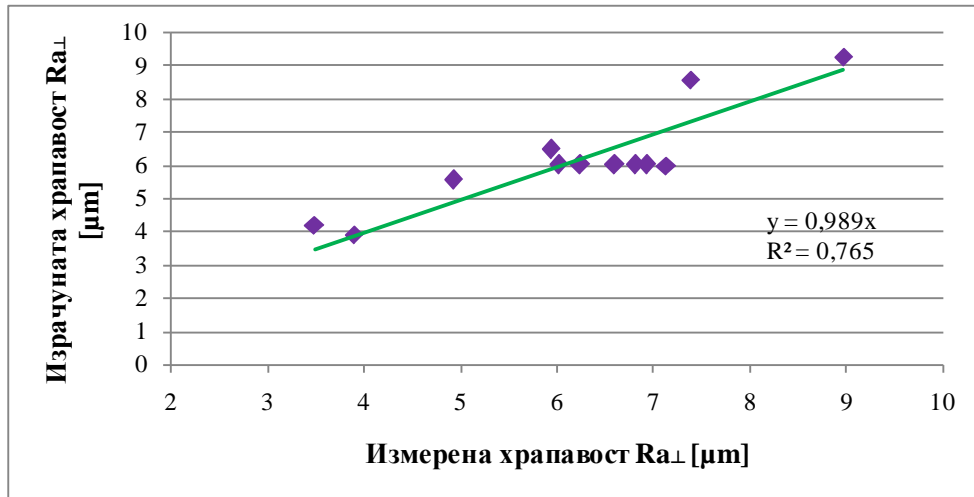
може се закључити да је за утицајне параметре брзина помоћног кретања u и дубина глодања a услов (5.8) задовољен, што значи да су ти параметри сигнификантни, док за грудни угао сечива γ услов није испуњен, односно грудни угао алата γ не утиче сигнификантно на храпавост обрађене површине управно на правац протезања дрвних влакана.

Провера адекватности линеарног математичког модела:

$$F_r = \frac{s_M^2}{s_E^2} = \frac{0,026097}{0,008765} = 2,9774 < F_t = 9,01$$

показује да је услов (5.10) испуњен, што значи са довољном тачношћу математички модел (5.25) описује зависност храпавости обрађене површине управно на правац протезања дрвних влакана од наведених утицајних фактора при усвојеним условима испитивања.

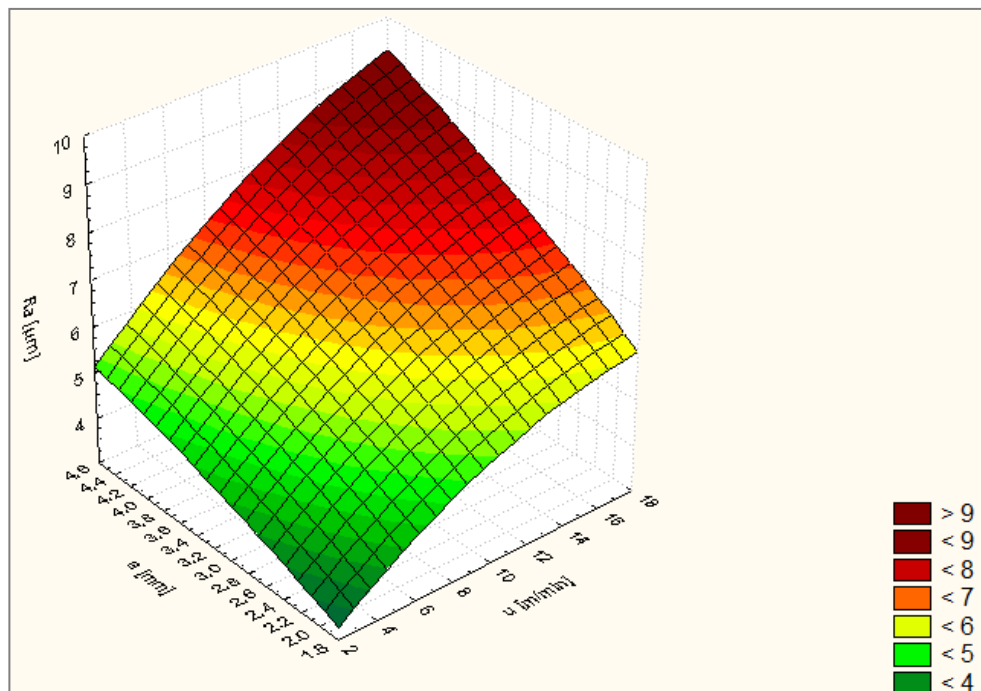
Слика 5.25 приказује дијаграм промене храпавости мерене управно на правац протезања дрвних влакана према експериментално добијеним подацима и рачунски добијеним вредностима.



Слика 5.25: Зависност израчунате храпавости од измерене храпавости управно на дрвна влакна

Евидентна је јака линеарна зависност између експериментално добијених података и рачунских вредности храпавости што јасно показује и коефицијент детерминације ($R^2 = 0,765$).

Слика 5.26 приказује дијаграм зависности храпавости обрађене површине управно на правац протезања дрвних влакана од брзине помоћног кретања и дубине глодања.



Слика 5.26: Зависност храпавости обрађене површине од дубине глодања и брзине помоћног кретања за грудни угао $\gamma = 20^\circ$

На основу положаја кривих на датим дијаграмима и вредности експонената у моделу (5.25) могу се извести следећи закључци:

- Храпавост обрађене површине управно на правац протезања дрвних влакана расте при повећању брзине помоћног кретања и дубине глодања, док грудни угао алата није показао сигнификантан утицај.
- По интензитету већи утицај на храпавост обрађене површине управно на правац протезања дрвних влакана има дубина глодања у односу на брзину помоћног кретања.

На основу претходно закљученог, може се потврдити хипотеза да различити технолошки параметри обраде узрокују различит квалитет обрађене површине. Хипотеза да различита геометрија алата (грудни угао алата) узрокује различит квалитет обрађене површине у овом случају, односно, за постављене услове обраде није потврђена. Такође, у оквиру испитивања квалитета обрађене површине експериментално је измерена и храпавост обрађене површине паралелно са правцем протезања влакана (Табела 5.13)

Табела 5.13: План матрица експерименталног мерења храпавости површине паралелно са правцем протезања дрвних влакана

Редни број	План матрица				Резултати мерења		Моделски резултати		Грешка	
	x_0	x_1	x_2	x_3	R_{all} (μm) <i>um</i>	$y = \ln R_a$	R_{all} (μm)	$y = \ln R_a$	$(y_u - \hat{y}_u)^2$	$(y_{0u} - \bar{y}_0)^2$
1	+1	+1	+1	+1	2,78	1,0213	2,47	0,9039	0,013767	
2	+1	+1	-1	+1	2,01	0,6968	2,15	0,7660	0,004788	
3	+1	-1	+1	+1	2,33	0,8439	1,88	0,6327	0,044617	
4	+1	-1	-1	-1	1,69	0,5266	1,53	0,4270	0,009915	
5	+1	0	0	0	1,80	0,5893	1,95	0,6655	0,005805	0,005805
6	+1	-1	+1	-1	1,67	0,5134	1,76	0,5649	0,002646	
7	+1	0	0	0	1,84	0,6074	1,95	0,6655	0,003367	0,003367
8	+1	+1	+1	-1	1,91	0,6492	2,31	0,8361	0,034927	
9	+1	-1	-1	+1	1,39	0,3257	1,64	0,4948	0,028604	
10	+1	0	0	0	2,25	0,8100	1,95	0,6655	0,020887	0,020887
11	+1	0	0	0	1,61	0,4747	1,95	0,6655	0,036395	0,036395
12	+1	+1	-1	-1	2,53	0,9272	2,01	0,6982	0,052435	
								Σ	0,258153	0,066453

Замењујући добијене вредности у константе и експонената у модел (5.23) добија се регресиона зависност храпавости обрађене површине при обимном глодању од брзине помоћног кретања, дубине глодања и грудног угла сечива:

$$R_{all} = 0.6815 \cdot u^{0.1956} a^{0.1700} \gamma^{0.1520} \quad (5.26)$$

Међутим, после поставке математичког модела и прорачуна параметара модела показало се да ниједан утицајни параметар нема сигнификантан утицај на храпавост обрађене површине паралелно са правцем протезања влакана:

$$F_{r0} = \frac{s_0^2}{s_E^2} = 239,8975 > F_t = 10,13$$

$$F_{r1} = \frac{s_1^2}{s_E^2} = 6,6417 < F_t = 10,13$$

$$F_{r2} = \frac{s_2^2}{s_E^2} = 1,7163 < F_t = 10,13$$

$$F_{r3} = \frac{s_3^2}{s_E^2} = 0,4155 < F_t = 10,13$$

Ова констатација је у складу са стандардом (ISO 4288:1996) где је назначено да се при испитивању квалитета површине мери храпавост која је очекивано већа. У овом случају је то једнозначно храпавост управно са правцем протезања влакана, јер је она највероватније последица режима обраде, док је храпавост обрађене површине паралелно са правцем протезања влакана највероватније последица структуре самог дрвета.

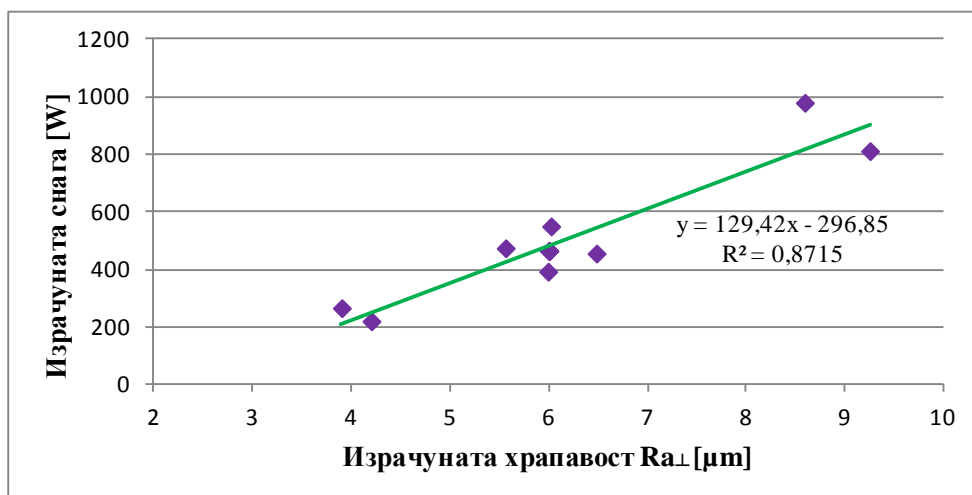
Резултати бројних истраживања (Burdurlu et al., 2005; Budakci et al., 2007; Fernando de Moura, Hernandez, 2006; Malkocoglu, Ozdemir, 2006; Ors, Baykan, 1999; Usta et al., 2007; Varcik et al., 2009) потврђују да највећи утицај на квалитет површине има брзине помоћног кретања. Приликом повећања брзине помоћног кретања по сечиву повећава се и дебљина струготине, тако да се дубљи слојеви дрвета не пререзују већ чупају (Keturakis, Juodeikiene, 2007). Генерално, бољи резултати за обрадне перформансе добијају се уз смањену брзину помоћног кретања. Регресиони модел развијен у оквиру истраживања према (Науајнећ et

al., 2007) укључује утицај брзине помоћног кретања, броја обртаја вретена алата и дубину резања и прогнозира вредност храпавости површине са тачношћу од 12%. Према овим ауторима брзина помоћног кретања, такође, има највећи утицај на квалитет обрађене површине.

Истраживања према (Malkocoglu, 2007) спроведена на пет врста показала су да се са смањењем брзине помоћног кретања и грудног угла (при константној дубини глодања) повећава квалитет обрађене површине. У овом случају већи утицај на квалитет површине има грудни угао алата, а брзина помоћног кретања је на другом месту.

Према бројним ауторима квалитет обрађене површине је сигнификантно одраз грудног угла (Malkocoglu, Ozdemir, 2006; Malkocoglu, 2007; Beljo-Lučić et al., 2007). Међутим, у дисертацији грудни угао није показао значајан утицај на храпавост обрађене површине што је највероватније последица изабраног уског опсега вредности грудног угла од 16° до 25° , а који је у пракси препоручен за обраду храстовог дрвета.

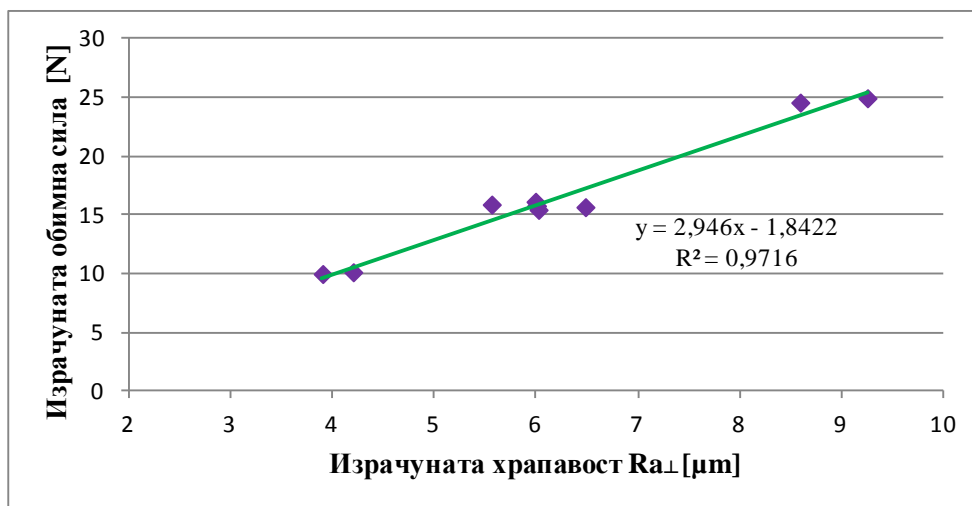
Слика 5.27 приказује зависност храпавости обрађене површине мерене управно на правац протезања дрвних влакана од снаге резања. У обзир су узете моделске вредности из план матрица (Табела 5.7 и Табела 5.12.).



Слика 5.27: Зависност храпавости обрађене површине од снаге резања

На слици је евидентна веома јака зависност између моделских вредности снаге резања и моделских вредности храпавости обрађене површине коју показује линеарна функција ($R^2 = 0,872$). Може се закључити да са порастом снаге резања расте и храпавост површине мерено управно на правац протезања дрвних влакана, односно да са порастом снаге резања опада квалитет обрађене површине.

Слика 5.28 приказује зависност храпавости обрађене површине мерене управно на правац протезања дрвних влакана од обимне силе резања. У обзир су узете моделске вредности из план матрица (Табела 5.9 и Табела 5.12.). Са слике се може уочити слична ситуација као и у претходном случају.



Слика 5.28: Зависност храпавости обрађене површине од обимне силе резања

Евидентна је веома јака зависност између моделских вредности обимне силе резања и моделских вредности храпавости обрађене површине коју показује линеарна функција ($R^2 = 0,972$).

Може се закључити да са порастом обимне силе резања расте и храпавост површине мерено управно на правац протезања дрвних влакана, односно да са порастом обимне силе резања опада квалитет обрађене површине.

5.5 Мерење валовитости обрађене површине

Профил који остаје на обрађеној површини, после обраде глодањем, дефинише се као дужина и дубина валова. Ово приказивање валовитости је једноставније

при кинематичким неравнинама и математички се може израчунати из односа брзине резања, броја зуба и брзине помоћног кретања (детаљно објашњено у поглављу 3.3.3).

Геометријско приказивање профила валовитости, које је последица вибрација је доста сложеније, а нарочито када је удружено са кинематичким валовима.

5.5.1 Резултати мерења валовитости обрађене површине

Табела 5.14 приказује вредности дужина и дубина таласа, добијене математичким путем (детаљно објашњено у поглављу 3.3.3) за приказане режиме резања према следећим формулама:

$$l_v = \frac{u \cdot 1000}{n \cdot z} \quad [mm] \quad (5.27)$$

$$h_c = \frac{D}{2} - m = \frac{1}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - s_z^2} \right) \quad [mm] \quad (5.28)$$

где је: u – брзина помоћног кретања, m/min, n – број обртаја, min⁻¹, z – број зуба на алату, s_z – корак по зубу и D – пречник глодала.

Табела 5.14: Математички израчунате дужине и дубине валова за карактеристичне режиме обраде

Р. бр.	Брзина помоћног кретања u (m/min)	Дубина глодања a (mm)	Грудни угао γ (°)	Дужина валова l_v (mm)	Дубина валова h_c (mm)
1	4	2	16	0,17065	0,000058
2	4	4,5	16	0,17065	0,000058
3	4	2	25	0,17065	0,000058
4	4	4,5	25	0,17065	0,000058
5	8	3	20	0,34130	0,000233
6	16	2	16	0,68259	0,000932
7	16	4,5	16	0,68259	0,000932
8	16	2	25	0,68259	0,000932
9	16	4,5	25	0,68259	0,000932

Мерење валовитости профила је извршено на истим узорцима на којима је мерена и храпавост обрађене површине (детаљно објашњено у поглављу 4.4.5.4).

При добијању валовитог профила извршено је филтрирање података како би се елиминисала хрпаовост. Слика 5.29 приказује измерени профил валовитости после филтрирања података на хрстовим епруветама.



Слика 5.29: Профил валовитости на хрстовим епруветама

Табела 5.15 приказује измерене вредности валовитости обрађене површине.

Табела 5.15: Измерене дужине и дубине валова за карактеристичне режиме обраде

Р. бр.	Брзина помоћног кретања u (m/min)	Дубина глодања a (mm)	Грудни угао γ (°)	Дужина валова l_v (mm)	Дубина валова h_c (mm)
1	4	2	16	0,44880	0,00227
2	4	4,5	16	0,44960	0,00281
3	4	2	25	0,50407	0,00281
4	4	4,5	25	0,50983	0,00273
5	8	3	20	0,46700	0,00299
6	16	2	16	0,54439	0,00631
7	16	4,5	16	0,53884	0,00400
8	16	2	25	0,56709	0,00312
9	16	4,5	25	0,57347	0,00571

Ако упоредимо претходне податке (Табела 5.14 и Табела 5.15) види се да су просечне измерене дужина валова за брзину помоћног кретања од 4 m/min (подаци под редним бројевима 1, 2, 3 и 4 у табели 5.15) вишеструко веће од рачунски добијене вредности (0,17065 mm, табела 5.14), исто важи и за дубине валова.

За брзину помоћног кретања од 8 m/min добијене вредности (подаци под редним бројем 5 у табели 5.15) су нешто веће од рачунских (0,34130 mm, табела 5.14). За

брзину помоћног кретања од 16 m/min добијене вредности (подаци под редним бројем 6, 7, 8 и 9 у табели 5.15) су мање од рачунски добијене вредности (0,68259 mm).

5.5.2 Анализа резултата мерења валовитости обрађене површине

Теоријске вредности валовитости се не поклапају са стварним вредностима у реалним процесима обраде, пре свега јер врхови зуба глодала нису на истом пречнику резног круга (радијално бацање зуба) и једним делом због анатомске грађе храста.

У циљу разрешења овог феномена, урађена су мерења валовитости површине обрађене глодалом са највећим радијалним бацањем зуба на полиетиленским епруветама како би се елиминисао утицај анатомске грађе дрвета (Слика 5.30).



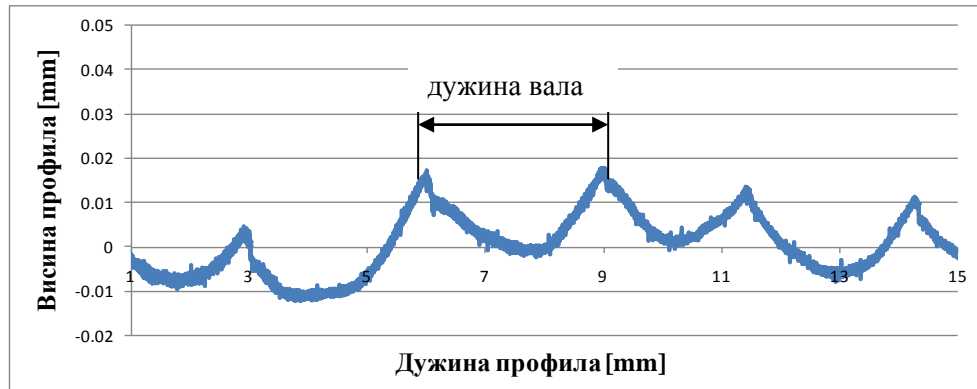
Слика 5.30: Изглед полиетиленских епрувете

Испитивања су спроведена на три карактеристична режима обраде. Табела 5.16 приказује измерене вредности дужине и дубине валова на полиетиленским епруветама код глодала са највећим радијалним бацањем зуба ($\gamma=25^\circ$).

Табела 5.16: Измерене дужине и дубине валова на полиетиленским епруветама

Р. бр.	Брзина помоћног кретања u (m/min)	Дубина глодања a (mm)	Грудни угао γ (°)	Дужина валова l_v (mm)	Дубина валова h_c (mm)
1	4	2	25	0,69777	0,00785
2	8	3	25	1,35114	0,00770
3	16	4,5	25	2,83367	0,00768

Добијени резултати мерења валовитости на полиетиленским епруветама се значајно разликују у односу на измерене вредности на дрвету храста. Анализирајући трећи режим (Табела 5.16) и на основу слике (Слика 5.31) може се закључити да је само један зуб глодала оставио валовити траг на пластици.



Слика 5.31: Профил валовитости на полиетиленским епруветама

Средња измерене дужина валова на полиетиленским епруветама износила је 2.83367 mm, а рачунска величина дужине валова за глодало са једним сечиво износи 2.73038, односно добијају се скоро исте вредности. Сличан закључак може се донети и упоређивањем друга два режима обраде на полиетиленским епруветама у односу на обраду храстовине глодалом са једним зубом.

Ако упоредимо просечне дубина валова на полиетиленским епруветама у односу на измерене просечне дубине валова на храстовини може се закључити да су дубине на полиетиленским епруветама значајно веће, што је највероватније последица постојања релаксационог слоја код дрвета (Слика 3.10). Такође, може се закључити да режим обраде нема сигнификантног утицаја на дубину валова ни код полиетиленских епрувета, ни код дрвета храста.

5.6 Упоредна анализа резултата мерења снаге и сила резања

Обимна сила резања може се добити и посредно, преко измерене снаге резања према формули:

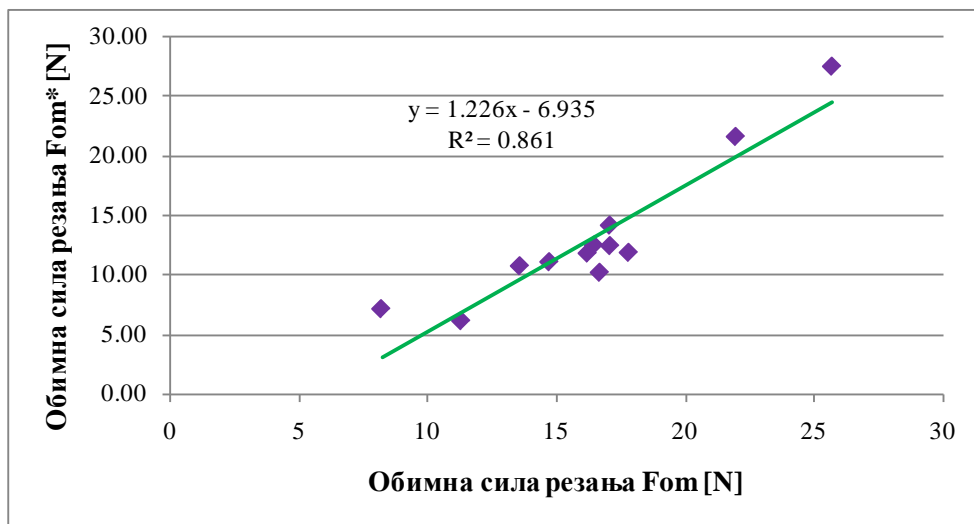
$$F_{om}^* = \frac{P}{v} \quad [N] \quad (5.29)$$

Табела 5.17 приказује средње вредности посредно измерених обимних сила резања (F_{om}^*) и директно измерених обимних сила резања (F_{om}).

Табела 5.17: Средње вредности посредно измерених обимних сила резања (F_{om}^*) и директно измерених обимних сила резања (F_{om})

Р. бр.	Брзина помоћног кретања u (m/min)	Дубина глодања a (mm)	Грудни угао γ (°)	Средња вредност P (W)	Средња вредност F_{om}^* (N)	Средња вредност F_{om} (N)
1	4	2	16	275,10	7,18	8,21
2	4	4,5	16	426,59	11,13	14,71
3	4	2	25	236,46	6,17	11,30
4	4	4,5	25	392,45	10,24	16,66
5	8	3	20	456,75	11,92	17,78
6	8	3	20	480,01	12,52	16,44
7	8	3	20	478,55	12,48	17,06
8	8	3	20	454,45	11,86	16,19
9	16	2	16	544,59	14,21	17,05
10	16	4,5	16	1057,19	27,58	25,64
11	16	2	25	413,59	10,79	13,57
12	16	4,5	25	830,60	21,67	21,92

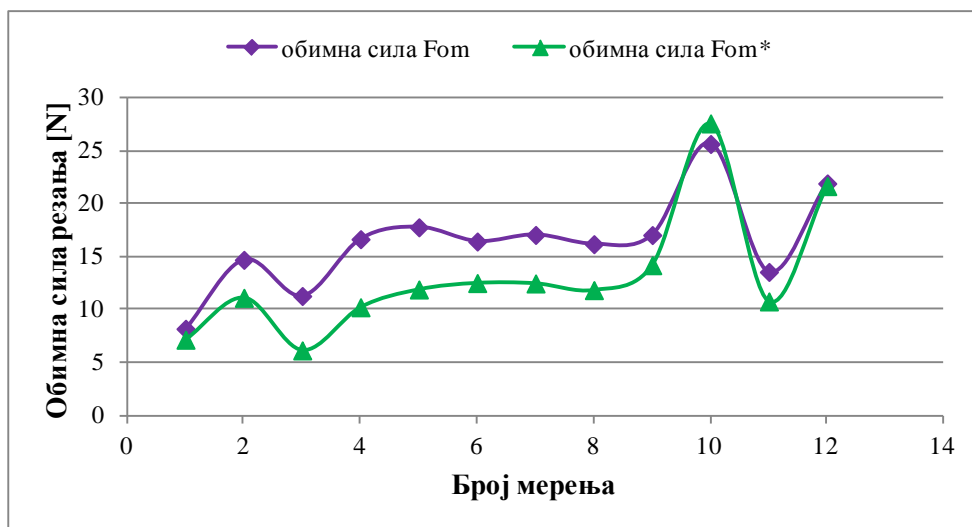
Слика 5.32 приказује дијаграм зависности вредности посредно измерених обимних сила резања (F_{om}^*) и директно измерених обимних сила резања (F_{om}).



Слика 5.32: Зависност директно мерене обимне силе резања (F_{om}) и посредно мерене силе резања (F_{om}^*)

На слици је евидентна веома јака зависност између посредно измерених обимних сила резања (F_{om}^*) и директно измерених обимних сила резања (F_{om}) коју показује линеарна функција ($R^2=0,861$).

Слика 5.33 упоредно приказује обе величине обимних сила резања при обимном глодању храстовине. Очигледно је да постоји скоро исти тренд понашања за обе обимне силе, с тим што директно измерене обимне силе резања (F_{om}) показују, у просеку, 23% већу вредност у односу на посредно измерене обимне силе резања (F_{om}^*).



Слика 5.33: Упоредни приказ директно мерене обимне силе резања (F_{om}) и посредно мерене силе резања (F_{om}^*)

Може се закључити да и метода посредног мерења обимне силе резања даје довољно добре резултате када је њихова сврха упоређивање режима резања при испитивању обрадљивости. За научна истраживања, свакако би било боље да се силе резања мере директним методом.

5.7 Анализа утицаја густине дрвета на измерену снагу резања

За анализу утицаја густине храстовог дрвета на снагу резања искоришћени су резултати мерења снаге резања добијени обрадом обимним глодањем при нултом режиму (дубина глодања $a=3$ mm, брзина помоћног кретања $u=8$ m/min и грудни угао алата $\gamma=20^\circ$). Овим резултатима, који су коришћене за анализу

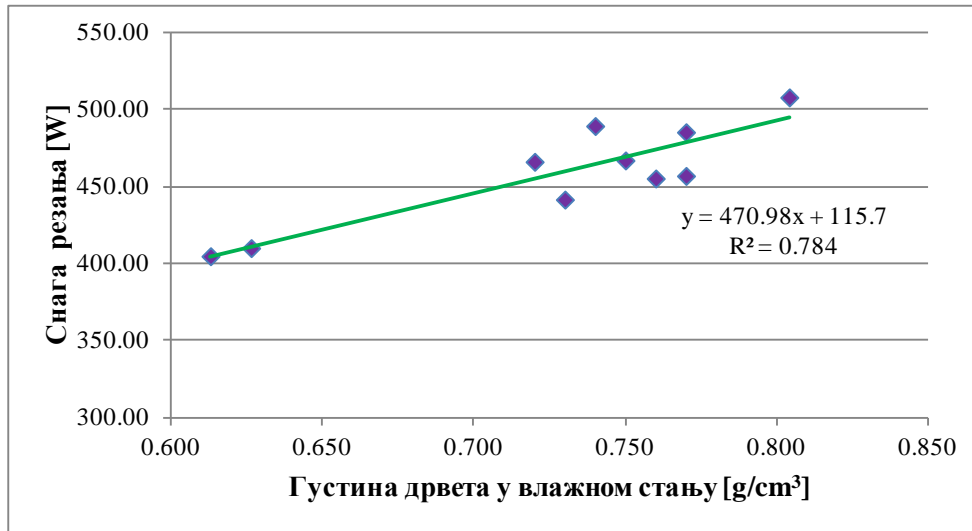
обрадљивости и имају уједначена својства (D19, D42, D44, D29, D69, D56 и D58), додати су и резултати измерене снаге резања при обимном глодању епрувета са нижом и вишом густином од просечне (D32, D34 и D13). Табела 8.15. у прилозима садржи синтетизоване све потребне податке коришћене у анализи.

Табела 5.18 приказује средње вредности измерене снаге резања за нулти режим обраде обимним глодањем, средње вредности густина у влажном и апсолутно сувом стању, као и средње вредности влажности испитиваних епрувета.

Табела 5.18: Средње вредности снага резања измерених при нултом режиму обраде обимним глодањем

Р.бр.	Ознака даске	Брзина помоћног кретања u (m/min)	Дубина глодања a (mm)	Грудни угао γ (°)	ρ_v (g/cm ³)	Влажност (%)	ρ_0 (g/cm ³)	Средња вредност P (W)
1	D32	8	3	20	0,613	6,82	0,593	405,05
2	D34	8	3	20	0,626	6,80	0,607	410,33
3	D19	8	3	20	0,720	7,31	0,694	466,42
4	D42	8	3	20	0,730	7,14	0,702	441,86
5	D44	8	3	20	0,740	7,31	0,728	489,67
6	D29	8	3	20	0,750	7,51	0,726	467,31
7	D69	8	3	20	0,760	6,95	0,732	455,58
8	D56	8	3	20	0,770	7,39	0,744	485,65
9	D58	8	3	20	0,770	6,94	0,737	457,25
10	D13	8	3	20	0,804	6,78	0,787	508,29

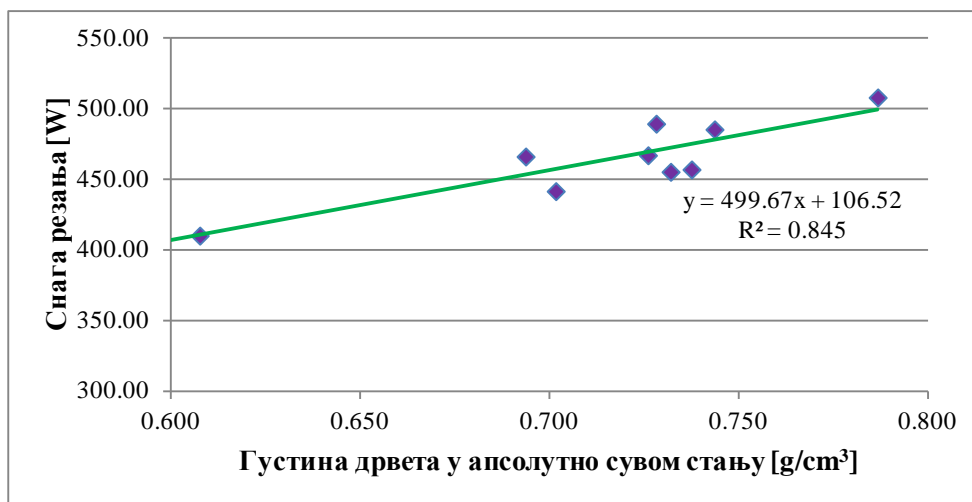
Слика 5.34 приказује зависност снаге резања од густине храстовог дрвета у влажном стању (влажност у тренутку испитивања). Просечна влажност узорка у тренутку испитивања је износила 7,095% са стандардним одступањем од средње вредности $\sigma = \pm 0,27\%$, односно са коефицијентом варијације $\pm 3,82\%$ од израчунате средње вредности влажности узорка.



Слика 5.34: Зависност снаге резања од густине дрвета у влажном стању

Са слике се види да, за постављене услове обраде, постоји јака линеарна зависност са коефицијентом детерминације $R^2 = 0,784$.

Слика 5.35 приказује зависност снаге резања од густине у апсолутно сувом стању.



Слика 5.35: Зависност снаге резања од густине дрвета у апсолутно сувом стању

Са слике се види да, за постављене услове обраде, постоји јака линеарна зависност са коефицијентом детерминације $R^2 = 0,845$.

Евидентно је да густина дрвета има великог утицаја на измерену снагу резања, односно да постоји јасна корелација између снаге резања и густине, што је,

свакако, у складу са литературом (Chuchała et al., 2014; Axelsson, 1993; Naylor et al., 2012; Porankiewicz et al., 201; Marchal et al., 2009, Orłowski, Palubicki, 2009)

С тим у вези, јака корелација је била разлог да се за испитивање обрадљивости дрвета изабере узорци уједначених својстава како би се изоловао само утицај испитиваних фактора на критеријуме обрадљивости, а не и утицај густине дрвета.

На основу претходно закљученог, може се потврдити хипотеза да различита физичка својства материјала утичу на силе, односно на снагу резања.

5.8 Анализа утицаја угла између вектора брзине резања и правца протезања влакана на измерене силе резања

До сада разматрана истраживања обрадљивости за уздужну обраду обимним глодањем извршена су уз услов да је угао који заклапа правац брзине резања и правац протезања дрвних влакана приближно једнак нули.

У намери да се квантификује утицај угла између правца вектора брзине резања и правца протезања дрвних влакана извршена су посебна истраживања. За ту намену искоришћени су узорци уједначених физичких и механичких својстава (D5, D21, D43, D68 и D73).

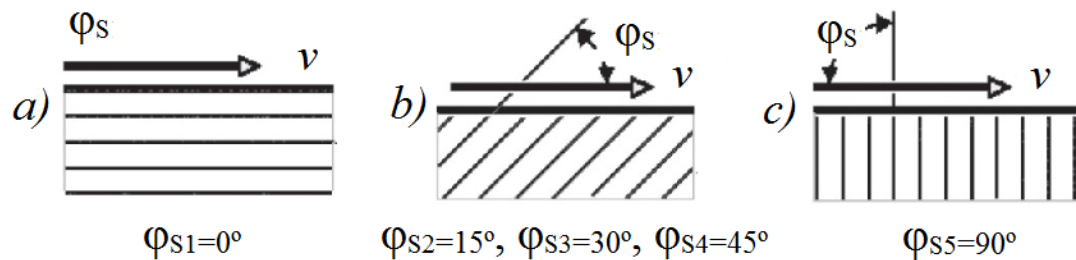
Табела 5.19 приказује просечне вредности својстава узорака коришћених за испитивање утицаја угла између правца вектора брзине резања и правца протезања дрвних влакана (φ_s) на силе и снагу резања при обимном глодању храстовине.

Табела 5.19: Просечне вредности густине у влажном и у апсолутно сувом стању, влажности и тврдоће узорака коришћених у испитивању

Р.бр.	Ознака даске	φ_s (°)	ρ_v (g/cm ³)	Влажност (%)	ρ_0 (g/cm ³)	Тврдоћа (N/mm ²)
1	D5	90	0,66	7,48	0,64	33,37
2	D73	45	0,68	6,91	0,66	33,91
3	D21	30	0,64	7,26	0,62	35,13
4	D43	15	0,65	7,67	0,62	32,31
5	D68	0	0,69	6,97	0,66	39,34

Може се закључити да су изабрани узорци уједначених густина, влажности и тврдоће како би се изоловао само утицај угла између правца вектора брзине резања и правца протезања дрвних влакана на силе и снагу резања. Просечна густина у влажном стању износила је $0,664 \text{ g/cm}^3$ са стандардним одступањем од средње вредности $\sigma = \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$. Просечна густина у апсолутно сувом стању износила је $0,64 \text{ g/cm}^3$ са истим стандардним одступањем од средње вредности $\sigma = \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$. Влажност у тренутку обраде је износила $7,258\%$ са стандардним одступањем од средње вредности $\sigma = \pm 0,325\%$. Просечна тврдоћа је износила $34,81 \text{ N/mm}^2$ са нешто већим стандардним одступањем од средње вредности $\sigma = \pm 2,73 \text{ N/mm}^2$.

Испитивања обрадљивости су поновљена за укупно пет вредности угла φ_s : паралелно са правцем протезања дрвних влакана ($\varphi_{s1}=0^\circ$), низ дрвна влакна за ($\varphi_{s2}=15^\circ$, $\varphi_{s3}=30^\circ$, и $\varphi_{s4}=45^\circ$) и за правац резања попречно на дрвна влакна ($\varphi_{s5}=90^\circ$). Слика 5.36 приказује испитиване правце резања.



Слика 5.36: Испитивани правци резања: а) паралелно са дрвним влакнима, б) низ дрвна влакна и с) управно на дрвна влакна

За сваки правац резања измерене су обимне силе резања при обимном глодању храстовине.

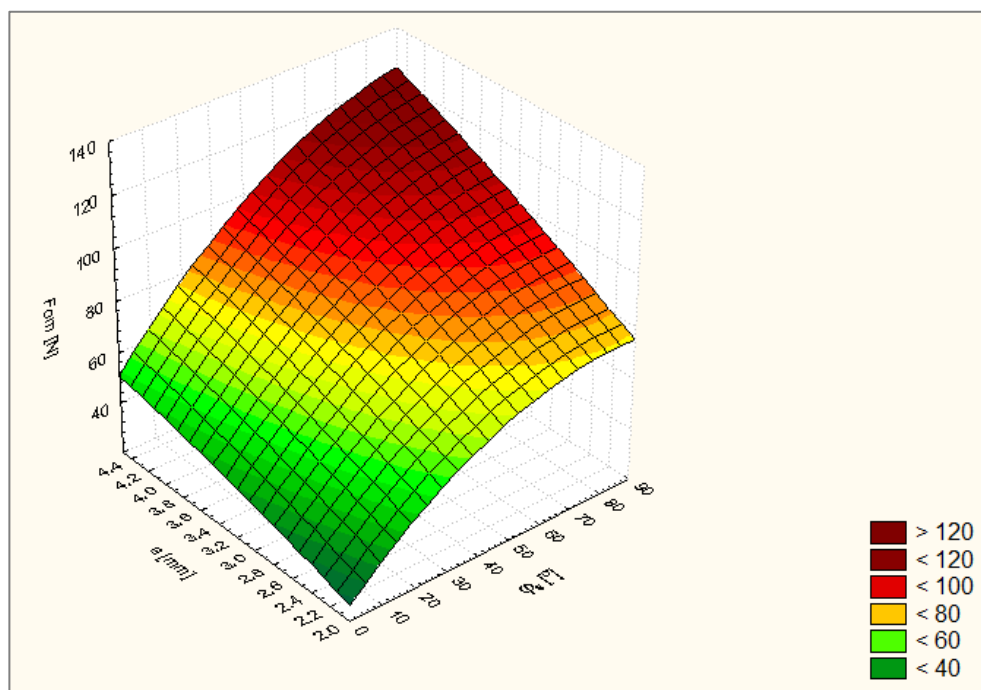
Табела 5.20 приказује средње вредности обимних сила резања за различите правце протезања дрвних влакана и при различитим режимима обраде. Поступак рачунања обимне силе резања детаљно је приказан у поглављу (5.3).

Табела 5.20: Средње вредности обимних сила резања (F_{om}) за различите правце протезања дрвних влакана

Режим резања	Средња вредност обимне силе резања F_{om} (N)									
	16 °			20°			25 °			
Грудни угао γ (°)										
Дубина резања a (mm)	2	3	4,5	2	3	4,5	2	3	4,5	
ϕ_s (°)	0	28,77	35,22	45,57	30,95	33,14	51,48	29,42	37,75	53,30
	15	31,85	44,01	58,36	51,92	67,74	69,19	40,62	62,97	83,04
	30	46,61	65,52	90,48	56,77	65,80	88,06	50,14	72,88	94,59
	45	61,88	67,82	97,88	75,61	82,73	107,86	68,13	85,23	104,62
	90	63,65	89,36	109,48	83,34	113,72	128,38	72,41	99,28	129,37

На основу добијених вредности, из табеле се може закључити да са порастом угла између правца протезања дрвних влакана и правца брзине резања очекивано расте и обимна сила резања.

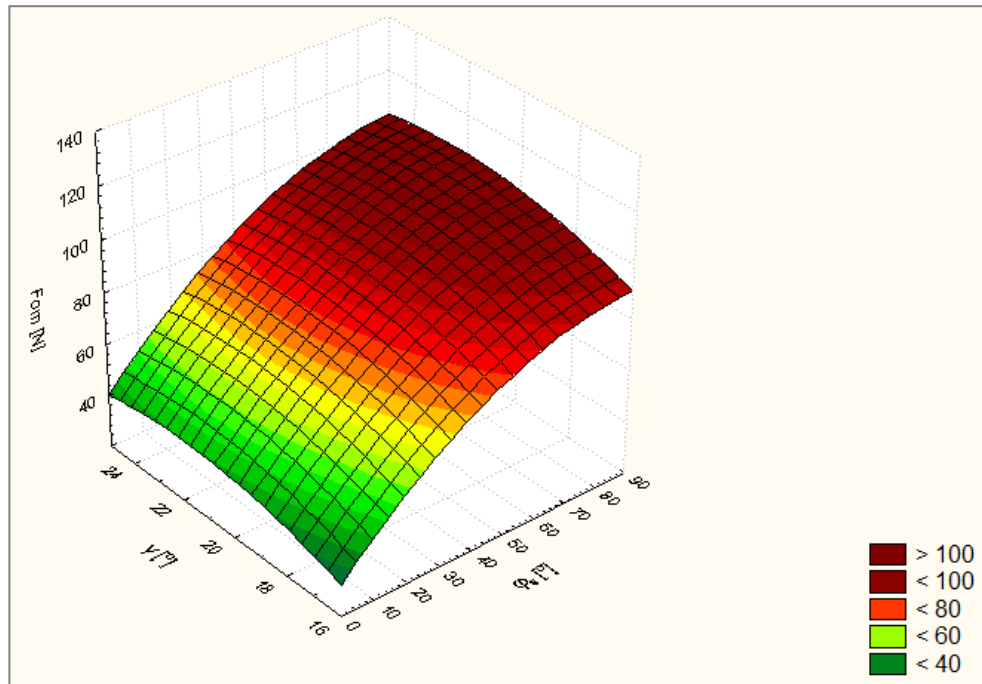
Сличан тренд показује и дубина глодања. Са порастом дубине глодања, расте и обимна сила резања (Слика 5.37).



Слика 5.37: Зависност средње обимне силе резања од дубине глодања и угла између правца брзине резања и правца протезања дрвних влакана

Слика 5.37 потврђује тренд промене средње обимне силе резања у зависности од дубине глодања и угла између правца брзине резања и правца протезања дрвних влакана.

Табела 5.20 не показује јасно тренд промене средње обимне силе резања у зависности од грудног угла алата. С тим у вези Слика 5.38 даје нешто јаснији приказ.

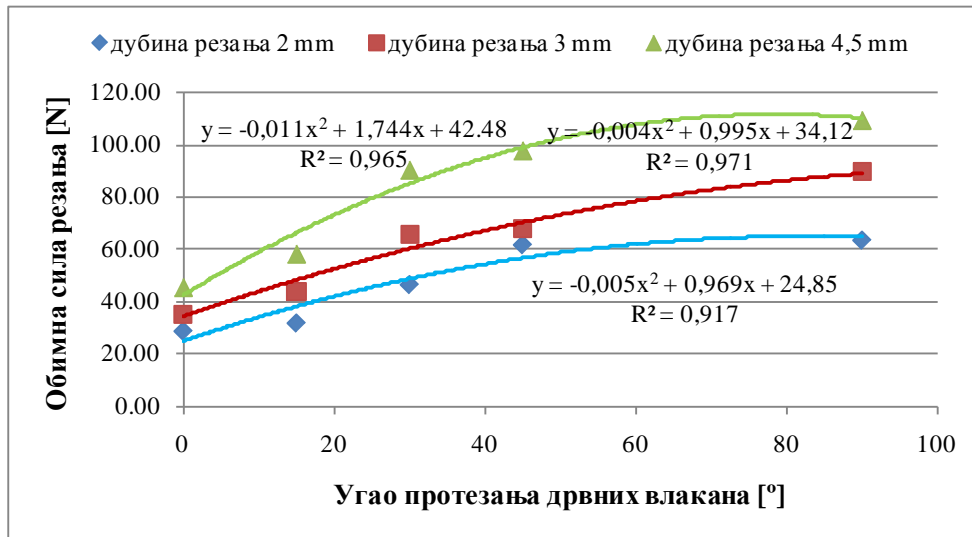


Слика 5.38: Зависност средње обимне силе резања од грудног угла алата и угла између правца брзине резања и правца протезања дрвних влакана

Са слике се види да, за постављене услове обраде, средња обимна сила показује највећу вредност за грудни угао од 20° , а најнижу вредност за грудни угао од 16° . Односно са порастом грудног угла алата од 16° до 20° средња обимна сила расте, док се са даљим повећањем вредности грудног угла не мења значајно.

Слика 5.39 приказује зависност обимне силе резања од угла протезања дрвних влакана (угао између правца протезања влакана и правца брзине резања) за глодало са грудним углом $\gamma = 16^\circ$ и за различите дубине резања. За све три дубине резања (2 mm, 3 mm и 4,5 mm) присутна је јака квадратна зависност са коефицијентом детерминације $R^2 > 0,91$. Највећи коефицијент детерминације карактеристичан је за дубину резања од 3 mm ($R^2 > 0,971$). Са порастом угла

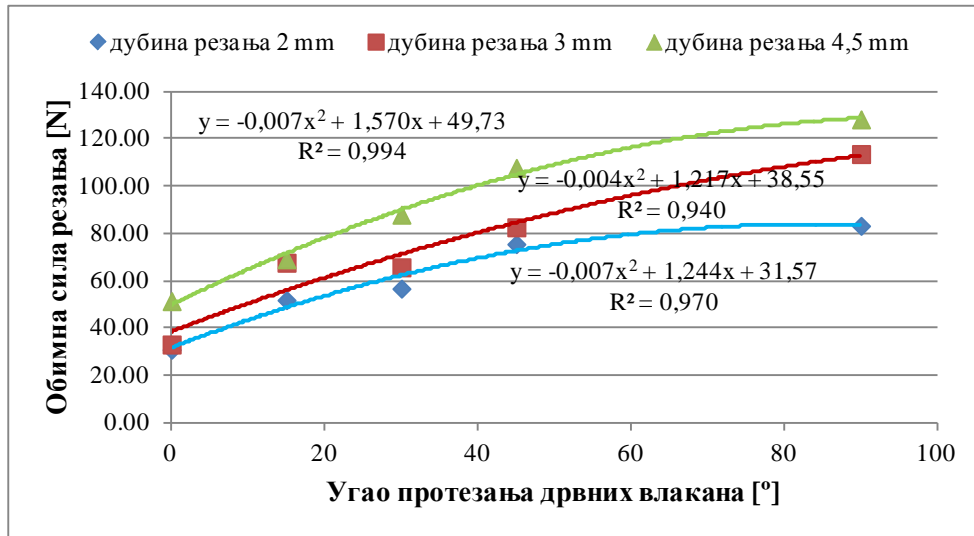
између правца протезања влакана и правца брзине резања φ_s расте и утицај дубине глодања на средњу обимну силу резања. Односно, за угао $\varphi_s = 0^\circ$ вредност средње обимне силе је у просеку порасла за око 38% при повећању дубине глодања.



Слика 5.39: Зависност обимне силе од угла протезања дрвних влакана за грудни угао од 16°

За угао $\varphi_s = 15^\circ$ вредност средње обимне силе је у просеку порасла за око 32%. За угао $\varphi_s = 30^\circ$, вредност средње обимне силе је у просеку забележила пораст за око 40% при повећању дубине глодања, тј. забележено је повећање обимне силе за 8% у односу на угао од 15° . Са даљим повећањем вредности угла φ_s (од 45° до 90°) смањује се утицај дубине глодања на средњу обимну силу.

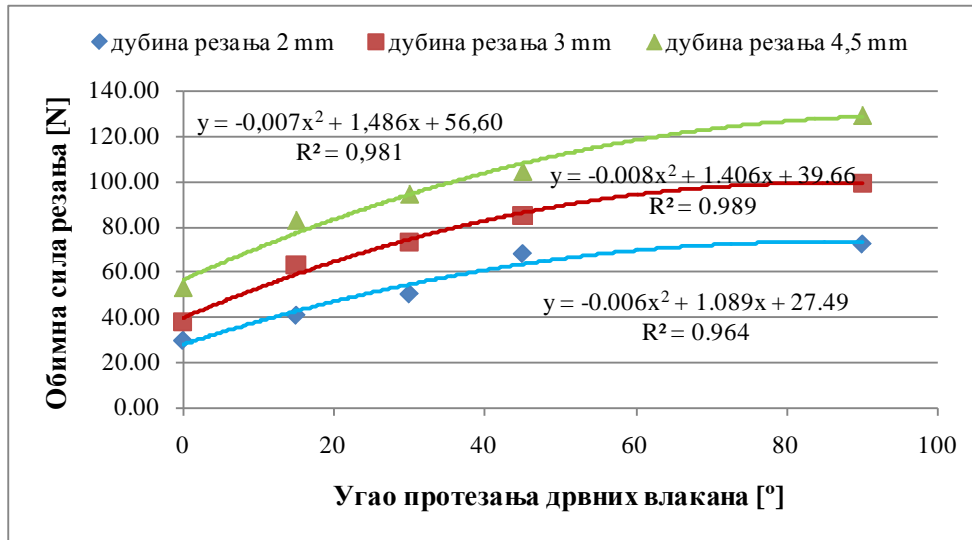
Слика 5.40 приказује зависност обимне силе резања од угла протезања дрвних влакана за глодало са грудним углом $\gamma = 20^\circ$ и за различите дубине резања.



Слика 5.40: Зависност обимне силе од угла протезања дрвних влакана за грудни угао од 20°

Слика приказује да је за све три дубине резања (2 mm, 3 mm и 4,5 mm) присутна јака квадратна зависност коју потврђује и коефицијент детерминације $R^2 > 0,94$. Највећи коефицијент детерминације карактеристичан је за дубину резања од 4,5 mm ($R^2 > 0,994$). При грудном углу алата од 20° за угао $\varphi_s = 0^\circ$ вредност средње обимне силе је у просеку порасла за око 33% при повећању дубине глодања, док за угао $\varphi_s = 15^\circ$ вредност средње обимне силе је у просеку порасла за 24% са порастом дубине глодања. Даљим повећањем угла, за $\varphi_s = 30^\circ$ обимна сила резања бележи укупно повећање од 34% са порастом дубине глодања. Сличан тренд промене обимне силе резања са порастом дубине глодања забележен је и код даљег повећања угла φ_s до 90° .

Слика 5.41 приказује зависност обимне силе резања од угла протезања дрвних влакана за глодало са грудним углом $\gamma = 25^\circ$ и за различите дубине резања.



Слика 5.41: Зависност обимне силе од угла протезања дрвних влакана за грудни угао од 25°

Слично као и у претходна два случаја, за све три дубине резања (2 mm, 3 mm и 4,5 mm) евидентна је јака квадратна зависност са коефицијентом детерминације $R^2 > 0,96$. И у овом случају, највећи коефицијент детерминације карактеристичан је за дубину резања од 3 mm ($R^2 > 0,989$). При грудном углу алата од 25° за угао $\varphi_s = 0^\circ$ вредност средње обимне силе је у просеку порасла за око 37% при повећању дубине глодања, док за угао $\varphi_s = 15^\circ$ вредност средње обимне силе је у просеку порасла за 41% са порастом дубине глодања. Даљим повећањем угла, за $\varphi_s = 30^\circ$ обимна сила резања бележи укупно повећање од 31% са порастом дубине глодања. Сличан тренд промене обимне силе резања са порастом дубине глодања забележен је и код даљег повећања угла φ_s до 90° , обимна сила је, у овом случају, у просеку порасла 37% са порастом дубине глодања.

Може се закључити да је највећа вредност силе резања обрађене површине забележена код попречног резања ($\varphi_s = 90^\circ$), док подужно резање даје најниже вредности снаге, тј. сила резања ($\varphi_s = 0^\circ$), што је у складу са литературним изворима (Costes et al., 2004; Porankiewicz, Goli, 2014).

Ово се може објаснити и великом разликом између чврстоће на цепање и чврстоће на смицање код дрвета. Заправо, чврстоћа на смицање код храста лужњака има вредност око $10,2 \text{ N/mm}^2$, док чврстоћа на цепање у просеку око $0,53 \text{ N/mm}^2$ (Šoškić, Popović, 2002). Са порастом вредности угла φ_s расте и удео

пресечених дрвних влакана (чврстоћа на смицање), у односу на влакна која се цепају (чврстоћа на цепање).

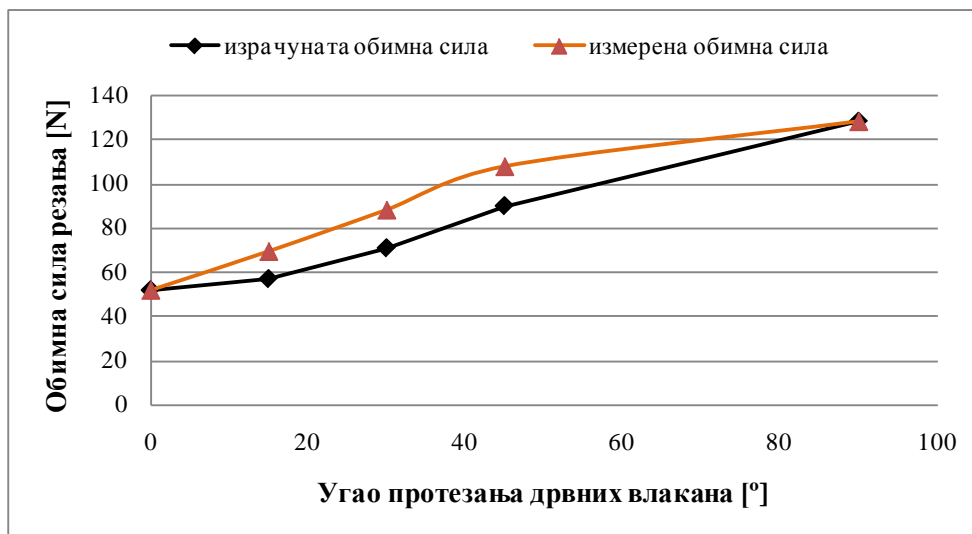
Према (Kršljak, 2013), али и другим ауторима вредност обимне силе (F_{ob}) за различите углове између вектора брзине резања и правца протезања влакана, може се изразити преко формуле:

$$F_{ob} = F_{ob_u} \cdot \cos^2 \varphi_s + F_{ob_p} \cdot \sin^2 \varphi_s [N] \quad (5.30)$$

где је F_{ob_u} вредност обимне силе за резање паралелно са влакнима, а F_{ob_p} вредност обимне силе за резање попречно на дрвна влакна.

Из формуле се такође, може закључити да са порастом угла између правца брзине резања и правца протезања дрвних влакана расте и обимна сила резања.

Слика 5.42 даје упоредни приказ измерених обимних сила резања и обимних сила резања израчунатих преко формуле (5.30).



Слика 5.42: Упоредни приказ измерене обимне силе резања и израчунате силе резања при дубини глодања $a=4,5$ mm и за грудни угао од 20°

Са дијаграма приказаног на горњој слици, очигледно је да постоји скоро исти тренд понашања за обе обимне силе резања при обимном глодању.

На основу претходно закљученог, може се потврдити хипотеза да различити углови између правца резања и правца протезања дрвних влакана утичу на величину сила, односно снаге резања.

6 ЗАКЉУЧЦИ

На основу проучене литературе, спроведених истраживања и анализе добијених резултата донети су следећи закључци:

1. Испуњен је основни циљ овог истраживања и успостављена методологија за одређивање обрадљивости дрвета је успешно потврђена на примеру обимног глодања храстовог дрвета.
2. Постављени математички модел зависности снаге резања и три независно утицајна фактора задовољио је услов адекватности, што значи да са довољном тачношћу описује зависност снаге резања од брзине помоћног кретања, дубине глодања и грудног угла сечива. Према оцени сигнификантности утицајних фактора све три одабране независно променљиве имају сигнификантан утицај на промену снаге резања. При чему по интензитету највећи утицај има дубина глодања, затим брзина помоћног кретања и на крају грудни угао сечива. На основу добијене једначине регресионе зависности облика $P = 253,3469 \cdot u^{0,5228} \cdot a^{0,7109} \cdot \gamma^{-0,4208}$ установљено је да снага резања расте при повећању брзине помоћног кретања и дубине глодања, док при повећању грудног угла сечива снага резања опада.
3. Постављени математички модел зависности средње обимне силе резања при обимном глодању од брзине помоћног кретања, дубине глодања и грудног угла сечива адекватно описује анализирану зависност. Према оцени сигнификантности утврђено је да брзина помоћног кретања и дубина глодања значајно утичу на обимну силу резања, док грудни угао није показао сигнификантан утицај. По интензитету већи утицај на средњу обимну силу резања има дубина глодања у односу на брзину помоћног кретања. На основу добијеног математичког модела облика $F_{om} = 3,9555 \cdot u^{0,3145} \cdot a^{0,5730} \cdot \gamma^{0,0334}$ установљено је да средња обимна сила резања расте при повећању брзине помоћног кретања и дубине глодања.

4. Постављени моделски облик регресионе зависности укупне силе резања при обимном глодању од брзине помоћног кретања, дубине глодања и грудног угла сечива је испунио услов адекватности. Оцена сигнификантности параметара модела показала је, такође, да су утицајни параметри брзина помоћног кретања и дубина глодања сигнификантни, док за грудни угао сечива услов сигнификантности није испуњен, односно грудни угао сечива γ не утиче значајно на средњу обимну силу глодања. По интензитету већи утицај на средњу обимну силу резања има дубина глодања у односу на брзину помоћног кретања, као и у претходном случају. Добијени математички модел облика $F_{uk} = 8,6744 \cdot u^{0,2521} \cdot a^{0,5903} \cdot \gamma^{-0,0881}$, показује директну пропорционалност између укупне силе резања и брзине помоћног кретања, као и између укупне силе резања и дубине глодања.
5. Метода посредног мерења обимне силе резања даје довољно добре резултате за избор оптималног режима резања при испитивању обрадљивости, са становишта квалитета обрађене површине. Упоредном анализом измерених снага и сила резања утврђена је веома јака линеарна зависност између обимних сила резања F_{om}^* израчунатих на основу измерених снага резања и директно измерених обимних сила резања (F_{om}) коју потврђује висок коефицијент детерминације $R^2=0,861$. За научна истраживања, препоручује се мерење силе резања директним методом.
6. Вредности храпавости обрађене површине мерене управно на правац протезања влакана значајно су веће од вредности храпавости обрађене површине мерене паралелно са правцем протезања дрвних влакана. Оба постављена математичка модела са довољном тачношћу описују зависност храпавости обрађене површине од параметара режима резања.
7. Оцена сигнификантности параметара модела показала је да значајан утицај на храпавост мерену управно са правцем протезања влакана имају дубина глодања и брзина помоћног кретања, док грудни угао није показао сигнификантност. Зависност храпавости обрађене површине, мерене управно са правцем протезања дрвних влакана, од брзине помоћног кретања, дубине глодања и грудног угла алата представљене је математичким моделом облика

$R_{aI} = 1.1723 \cdot u^{0.3135} a^{0.4386} \gamma^{0.1668}$. По интензитету већи утицај на храпавост обрађене површине управно на правац протезања дрвних влакана има дубина глодања у односу на брзину помоћног кретања. Храпавост обрађене површине управно на правац протезања дрвних влакана расте при повећању брзине помоћног кретања и дубине глодања.

8. Повећање храпавости обрађене површине при повећању брзине помоћног кретања и дубине глодања може се објаснити чињеницом да се при уздужном резању испред сечива јавља пукотина која претходи продирању сечива у дрвну масу. На њено стварање утиче повећање брзине помоћног кретања и дубине глодања, јер се тада повећава и дебљина струготине. Тако да одвајање струготине не врши само сечиво већ и пред пукотина чији правац прати смер протезања дрвних влакана што доводи до стварања храпавости не само од сечива већ и од пред пукотине.
9. Грудни угао сечива ни у једном моделу за храпавост површине није показао сигнификантан утицај. Разлог овоме може се наћи у чињеници да је узет мали опсег варирања грудног угла, у складу са препорукама произвођача алата, а све са циљем да се експериментални услови што више приближе реалним производним условима.
10. У случају мерења храпавости обрађене површине паралелно са правцем протезања дрвних влакана представљене математичким моделом облика $R_{aII} = 0.6815 \cdot u^{0.1956} a^{0.1700} \gamma^{0.1520}$ показало се да ниједан утицајни параметар нема сигнификантан утицај, јер је у том случају храпавост највероватније била последица структуре, односно анатомске грађе дрвета.
11. Анализа валовитости профила обрађене површине је показала да на профил валовитости обрађене површине утичу величина помоћног кретања и одступање сечива глодала од номиналног круга резања. Обрасци који се уобичајено користе за израчунавање дужине и дубине таласа су постављени уз услов да се сечива глодала налазе на истом резном кругу и да је релаксација обрађеног материјала занемарљива, што свакако није у складу са праксом механичке обраде дрвета. Утицај релаксационог слоја је феномен који захтева посебна допунска истраживања.

12. Анализа утицаја угла између правца вектора брзине резања и правца протезања дрвних влакана је показала значајну промену обимне силе са променом угла. Највећа вредност силе резања обрађене површине забележена је код попречног резања ($\varphi_s = 90^\circ$) и износи 128,38 N, док подужно резање даје најнижу вредност обимне силе резања ($\varphi_s = 0^\circ$) и износи 51,48 N за дубину глодања од 4,5 mm и грудни угао алата 20° , што се може објаснити великом разликом између чврстоће на цепање и чврстоће на смицање код дрвета.
13. Извршеном провером експериментално добијених резултата са аналитичким методама потврђена је поузданост примењене експерименталне методе, што подразумева да се са истом или сличном методологијом могу вршити даља истраживања ове врсте. Односно, могу се утврдити практичне законитости процеса резања дрвета, затим компоненте сила резања и оптималне угловне величине алата.

Са обзиром на то да су услови експеримента били веома блиски са реалним производним условима, ова истраживања би могла имати практичног значаја за одређивање оптималних режима резања, са становишта квалитета обрађене површине и енергетских уштеда.

7 ЛИТЕРАТУРА

- Afanasev, P., S. (1961): Derevoobrabatyvaûšie stanki (Woodworking machinery), Lesnaa Promyslennost, Moskva, Russia.
- Amalitskij, V. V., Lûbçenko, V. I. (1977): Stanki i instrumenty derevoobrabatyvaûših predpriâtij (Machinery and tools of woodworking factories), Lesnaâ Promyšlennost, Moskva, Russia.
- Axelsson, B. (1994): Lateral cutting force during machining of wood due to momentary disturbances in the wood structure and degree of wear of the cutting tool, *European Journal of Wood and Wood Products* 52(3), Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 198–204.
- Axelsson, B., Lundberg, A., and Gronlund, J. (1993): Studies of the main cutting force at and near a cutting edge, *European Journal of Wood and Wood Products* 51 (2), Springer Berlin Heidelberg, Berlin, (43–48)
- Barcik, Š., Pivuloskova, E., Kminiak, R. (2008): Effect of technological parameters and wood properties on cutting power in plane milling of juvenile poplar wood, *Drvna industrija* 59 (3), 107–112.
- Barcik, Š., Kminiak, R., Rehak, T., Kvietkova, M. (2010): The influence of selected factors on energy requirements, *Journal of Forest Science* 56 (5), 243–250.
- Barcik, Š., Pivuloskova, E., Kminiak, R. (2009): The influence of cutting speed and feed speed on surface quality at plane milling of poplar wood, *Wood Research* 54 (1), Bratislava, 109–116.
- Beljo-Lučić, R., Čavlović, A., Ištvančić, J., Đukić, I., Mihulja, G. (2007): Power requirements during wood planing and surface quality of planed elements, 2nd International Scientific Conference – Woodworking Techniques, Zalesina, Croatia.
- Beljo-Lučić, R., Goglia, V., Pervan, S., Đukić, I., Risović, S. (2004): The influence of wood moisture content on the process of circular rip-sawing, Part I: Power requirements and specific cutting forces, *Wood research, Bratislava*, 49 (1), 41–49.
- Bershadskij, A. L. (1967): Razçet režimov rezaniâ devesiny (Resolution of modes of wood machining), Lesnaâ Promyšlennost, Moskva, Russia.
- Box G.E.P., Wilson K.B. (1951): On the experimental Attainment of Optimum Conditions, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B* 8 (1).
- Budakci, M., Gurleyen, L., Cinar, H., Korkut, S. (2007): Effect of Wood Finishing and Planing on Surface Smoothness of Finished Wood, *Journal of Applied Science*, 7 (16), 2300-2306.
- Burdurlu, E., Usta, I., Ulupinar, M., Aksu, B., Erarslan, T. C. (2004): The Effect of the Number of Blades and the Grain Size of Abrasives in Planing and Sanding on the Surface Roughness of European Black Pine and Lombardy Poplar, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 29, 315–321.
- Chuchała, D., Orłowski, K., A., Sandak, A., Sandak, J., Pauliny, D., Barańsk, J. (2014): The Effect of Wood Provenance and Density on Cutting Forces While Sawing Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.), *BioResources* 9(3), 5349–5361.

- Costes, J.-P., Ko, P.L., Ji, T., Decès-Petit, C., and Altintas, Y. (2004): Orthogonal cutting mechanics of maple: Modeling a solid wood-cutting process, *J. Wood Sci.* 50 (1), 28–34.
- Csanády, E., Magoss, E. (2013): *Mechanics of Wood Machining*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin.
- Davim, P. J. (2011): *Wood machining*, ISTE Ltd, London, Great Britain, 194–202.
- Davis, E. M. (1962): *Machining and related characteristics of United States hardwoods*, Technical bulletin 1267, U.S. department of agriculture – forest service, Washington.
- Deshevoy, M. A. (1939): *Mehanicheskaia tehnologiya dereva (Mechanical technology of wood)*, LTA.
- DIN 4760: Form deviations; Concepts; Classification system.
- DIN EN ISO 4287: Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters (ISO 4287:1997); German version EN ISO 4287:1998
- Džinčić, I., Skakić, D. (2012): Determining the parameters of wood machinability as a function of tangential cutting force during the process of machining wood by routing, *Wood Research* 57, 161–172.
- EN 1534:2000, Wood – Determination of resistance to indentation (Brinell) – Test method
- Ernst, H. (1938). *Physics of metal cutting*, National Metal Congress - American Society for Metals, Detroit.
- Eyma, F., Méausoone, P, Martin, P. (2004a): Study of the properties of thirteen tropical wood species to improve the prediction of cutting forces in mode B. *Annals of Forest Science*, Ann. 61, 55–64.
- Eyma, F., Meausoone, P.-J., and Martin, P. (2004b): Strains and cutting forces involved in the solid wood rotating cutting process, *Journal of Materials Processing Technology* 148 (2), Elsevier, 220–225.
- Fang, Z., Zhu, H., Yuan, Y., Ha, D., Zhu, S., Preston, C., Chen, Q., Li, Y., Han, X., Lee, S., Chen, G., Li, T., Munday, J., Huang, J., Hu, L. (2014): Novel Nanostructured Paper with Ultrahigh Transparency and Ultrahigh Haze for Solar Cells, *Nano Lett.*, 14 (2), American Chemical Society, 765–773.
- Fernando de Moura, L., Hernandez, E. R. (2006): Characteristics of Sugar Maple Wood Surfaces Produced by Helical Planing, *Wood and Fiber Science*, 38 (1), 166–178.
- Franz, N. (1958): *An analysis of the Wood - Cutting Process*, University of Michigan Press.
- Gajić, M. (1987): *Šumska botanika sa anatomijom drveta*, Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet, Beograd.
- Goglia, V. (1994): *Strojevi i alati za obradu drva I*, Sveučilište u Zagrebu – Šumarski fakultet, Zagreb, 40–78.
- Goli, G., and Uzielli, L. (2004): Mechanisms of wood surface formation and resulting final condition after planing, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Wood Machining - Properties of Wood and Wood Composites related to Machining*. Vienna, Austria.
- Goli, G., Bleron, L., Marchal, R., Uzielli, L., and Negri, M. (2002): Formation and quality of wood surfaces processed at various grain angles: Douglas-fir and oak, *Wood Structure and Properties*, Arbora Publisher, Zvolen, Slovakia, 91–98.

- Goli, G., Fioravanti, M., Marchal, R., Uzielli, L., and Busoni, S. (2009): Up-milling and down-milling wood with different grain orientations – The cutting forces behaviour, *European Journal of Wood and Wood Products* 68 (4), Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 385–395.
- Goli, G., Marchal, R., and Negri, M. (2001a): Industrial machining of Douglas fir with various tools and materials, *Proceedings of the 15th International Wood Machining Seminar*, Los Angeles, California.
- Goli, G., Marchal, R., Negri, M., and Costes, J.-P. (2001b): Surface quality: Comparison among visual grading and 3D roughness measurements, *Proceedings of the 15th International Wood Machining Seminar*, Los Angeles, California.
- Goli, G., Marchal, R., Uzielli, L., and Negri, M. (2003): Measuring cutting forces in routing wood at various grain angles - Study and comparison between up and down-milling techniques, processing Douglas fir and oak, *16th International Wood Machining Seminar*, Matsue, Japan.
- Grönlund, A. (2004): Träbearbetning, Träteknik - Institutet För Träteknisk Forskning
- Hayajneh, M. T., Tahat, M. C., Bluhm, J. (2007): A Study of the Effects of Machining Parameters on the Surface Roughness in the End-Milling Process, *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 1 (1), 1–5.
- ISO 3130:1975, Wood – Determination of moisture content for physical and mechanical test.
- ISO 3131:1975, Wood – Determination of density for physical and mechanical tests.
- ISO 4288:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture.
- Kalajdžić, M. (2002): Tehnologija mašinogradnje, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, Beograd.
- Keturakis, G., Juodeikien, I. (2007): Investigation of Milled Wood Surface Roughness, *Materials Science* 13 (1), 47–51.
- Kivimaa, E. (1950): Cutting force in woodworking, Vol. 18, *Valtion Teknillinen Tutkimuslaitoksen Julkaisuja*, Helsinki, Finland .
- Koch, P. (1964): *Wood Machining Process*, Ronald Press Co, New York.
- Kopač, J., Šali, S. (2003): Wood: an important material in manufacturing technology, *Journal of materials processing technology* 133, 134–142.
- Kršljak B. (2009): Obradljivost drveta pri brušenju ravnih površina brusnim trakama, *Prerada drveta* 26/27, Beograd, 56–61.
- Kršljak, B. (2013): Mašine i alati za obradu drveta I, Univerzitet u Beogradu Šumarski fakultet, Beograd, 5–36.
- Malkocoglu, A. (2007): Machining properties and surface roughness of various wood species planed in different conditions, *Building and Environment* 42 (7), Elsevier, 2562–2567.
- Malkocoglu, A., Ozdemir, T. (2006): The machining properties of some hardwoods and softwoods naturally grown in Eastern Black Sea Region of Turkey, *Journal of materials Processing Technology*, 173 (3), 315–320.
- Mandić, M., Danon, G. (2010a): Merjenje snage rezanja pri obradi drveta glodanjem, *Prerada drveta* 29, Beograd, 34–41.
- Mandić, M., Mladenović, G., Tanović, Lj., Danon, G. (2014): Model za predikciju sile rezanja pri obimnom glodanju hrastovine, *Medjunarodna konferencija Održavanje i proizvodni inženjering (KODIP)*, Budva 18-21.06.2014, Zbornik radova, 231–239.

- Mandić, M., Todorović, N., Popadić, R., Danon G. (2010b): Impact of thermal modification and technological parameters of processing on cutting powers in milling wood processing, First Serbian Forestry Congress – Future with forest, Srbija, Beograd, 11–13. 11. 2010. Congress Proceedings, 1438–1453.
- Marchal, R., Mothe, F., Denaud, L. - E., Thibaut, B., and Bleron, L. (2009): Cutting forces in wood machining – basics and applications in industrial processes, A review COST Action E35 2004 – 2008: wood machining – micromechanics and fracture, *Holzforschung* 63 (2) , 157 – 167.
- McKenzie, W. M. (1961): *Fundamental Analysis of the Wood Cutting Process*, Department of Wood Technology, University of Michigan, Ann Arbor, USA.
- Méausoone, P. J. (2001): Choice of optimal cutting conditions in wood machining using the coupled tool–material method, *Proceedings of the 15th International Wood Machining Seminar*, 37–47.
- Merchant, E. (1944): Basic mechanics of the metal-cutting process, *J. Appl Mech.* 66, 168–175
- Moura, L.F., Hernandez, R.E. (2005): Evaluation of varnish coating performance for two surfacing methods on sugar maple wood, *Wood Fiber Sci* 37, 355–366.
- Nalimov, V.V., Cernova, N.A. (1965): *Statisticheskie metodi planirovanija ekstremalnih eksperimentov*, Nauka, Moskva.
- Naylor, A., Hackney, P.(2013): A Review of Wood Machining Literature with a Special Focus on Sawing, *BioResources* 8 (2), 3122–3135.
- Naylor, A., Hackney, P., Perera, N., Clahr, E. (2012): Mechanical cutting force model, A predictive model for the cutting force in wood machining developed using mechanical properties, *BioResources* 7 (3), 2833–2894.
- Orlicz, T. (1982): *Obróbka drewna narzędziami tnącymi (Machining of wood with use of cutting tools)*, Study book SGGW-AR, Warsaw
- Orlowski, K. A., and Pałubicki, B. (2009): Recent progress in research on the cutting process of wood, A review COST Action E35 2004 - 2008: Wood machining - Micromechanics and fracture, *Holzforschung* 63 (2) , 181 – 185.
- Ors Y., Baykan I., (1999): The effect of planing and sanding on surface roughness of massive wood, *Turkish Journal of Agriculture & Forestry*, 23, 577–582.
- Porankiewicz, B., Axelsson, B., Grönlund, A., Marklund, B (2011): Main and Normal Cutting Forces by Machining Wood of *Pinus Sylvestris*, *BioResources* 6(4), 3687–3713.
- Porankiewicz, B., Goli, G. (2014): Cutting forces by oak and douglas fir machining, *Maderas, Ciencia y tecnología* 16(2), 199–216
- Skakić, D., Lubardić, S., Krdžović, A. (1994): Sile rezanja kao osnovni kriterijum obradljivosti bukova drveća, *Šumarstvo*, XLVII (5-6), Beograd, 69–78.
- SRPS D.A1.046:1979, Wood – Determination of ultimate strength in static bending
- Stanić, J. (1989): *Teorija obrade metala*, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd 218–259.
- Stanić, J., Kalajdžić, M., Kovačević, R. (1983): *Merna tehnika u tehnologiji obrade metala rezanjem*, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd
- Stevanović Janežić, T., Vilotić, D., Bujanović, B.(1995): Hemijske i anatomske karakteristike ksilema i kore vrsta drveća značajnih za preradu drveća u Srbiji, *Unapređenje tehnologija*

- drveta u korelaciji sa svojstvima hemijskih konstituenata drveta, Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet, Beograd, 5–40.
- Škaljić, N., Beljo Lučić, R., Čavlović, A., Obućina, M. (2009): Effect of Feed Speed and Wood Species on Roughness of Machined Surface, *Drvna industrija* 60 (4), Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 229–234.
- Šoškić, B. (2006): Svojstva i upotreba hrastovog drveta Srbije, *Šumrastvo* 3, Univerzitet u Beogradu - Šumarski fakultet, 109–124.
- Šoškić, B., Popović, Z. (2002): Svojstva drveta, Univerzitet u Beogradu Šumarski fakultet, Beograd.
- Šoškić, B., Popović, Z. (2002): Svojstva drveta, Univerzitet u Beogradu - Šumarski fakultet, Beograd, 289–290.
- Tanović, Lj., Petrakov, J. (2007): Teorija i simulacija procesa obrade, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd.
- Usta, I.; Demirci, S.; Kilic, Y. (2007): Comparison of surface roughness of Locust acacia (*Robinia pseudoacacia* L.) and European oak (*Quercus petraea* (Mattu.) Lieble.) in terms of the preparative process by planning, *Building and Environment*, 42, 2988–2992.
- Vilotić, D. (2000): Uporedna anatomija drveta, Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet, Beograd, 112–126.
- Voskresenskij, S.A. (1955): Rezanje drevesiny, Goslesbumizdat, Moskva – Leningrad.
- Woodson, G. E. , Koch, P.(1970): Tool Forces and Chip Formation In Orthogonal Cutting Of Loblolly Pine, Southern Forest Experiment Station, Forest Service, Dept. of Agriculture New Orleans, ch. 1, LA, 14–20.
- Zubčević, R. (1988): Mašine za obradu drveta I dio, teorija rezanja, Univerzitet u Sarajevu – Mašinski fakultet, Sarajevo, 4–71.

8 ПРИЛОЗИ

8.1 Резултати мерења физичких и механичких својстава хростовине

Табела 8.1: Физичка својства хростовог дрвета

Резултати мерења физичких својстава хростовине												
D	E	m_v (g)	r_v (mm)	t_v (mm)	l_v (mm)	ρ_v (g/cm ³)	m_0 (g)	r_0 (mm)	t_0 (mm)	l_0 (mm)	ρ_0 (g/cm ³)	v_a (%)
1	I	62,62	49,45	29,79	50,39	0,84	58,47	48,74	28,85	50,26	0,83	7,10
	II	66,69	49,77	29,76	50,38	0,89	62,11	48,89	29,22	50,28	0,86	7,37
	III	64,65	50,03	29,78	50,44	0,86	61	49,21	28,99	50,37	0,85	5,98
	IV	64,84	49,93	29,81	50,49	0,86	60,14	49,12	29,04	50,17	0,84	7,82
2	I	62,64	49,64	29,80	50,23	0,84	58,38	48,73	29,20	50,13	0,82	7,30
	II	66,51	50,28	29,79	50,32	0,88	62,05	49,64	29,09	50,20	0,86	7,19
	III	65,96	50,66	29,96	50,31	0,86	61,38	49,25	29,11	50,19	0,85	7,46
3	I	56,61	50,10	29,84	50,31	0,75	53,13	49,45	29,24	50,19	0,73	6,55
	II	57,54	50,02	29,92	50,32	0,76	53,95	49,33	29,29	50,23	0,74	6,65
	III	58,00	50,20	29,74	50,21	0,77	54,23	49,42	29,09	50,10	0,75	6,95
	IV	57,37	49,69	29,93	50,44	0,76	54,00	49,06	29,24	50,35	0,75	6,24
4	I	60,08	49,33	29,73	50,16	0,82	56,27	48,50	29,14	50,05	0,80	6,77
	II	60,90	49,65	29,84	50,36	0,82	56,92	48,63	29,16	50,26	0,80	6,99
	III	63,91	50,88	29,77	50,33	0,84	59,45	49,81	29,20	50,16	0,81	7,50
	IV	65,74	50,21	29,90	50,30	0,87	60,90	49,43	29,01	50,18	0,85	7,95
5	I	49,89	49,75	29,72	50,22	0,67	46,22	49,15	29,15	50,21	0,64	7,94
	II	49,49	50,00	29,84	50,35	0,66	46,06	49,46	29,26	50,19	0,63	7,45
	III	49,57	49,99	29,83	50,52	0,66	46,30	49,36	29,13	50,25	0,64	7,06
6	I	68,30	50,26	29,71	50,83	0,90	63,30	49,28	29,13	50,66	0,87	7,90
	II	67,18	49,82	30,02	50,80	0,88	62,25	48,75	29,08	50,70	0,87	7,92
	III	66,53	49,63	29,96	50,20	0,89	61,83	48,93	29,14	50,05	0,87	7,60
	IV	66,50	50,02	29,47	50,58	0,89	61,83	49,06	29,11	50,51	0,86	7,55

Резултати мерења физичких својстава храстовине												
D	E	m _v (g)	r _v (mm)	t _v (mm)	l _v (mm)	ρ _v (g/cm ³)	m ₀ (g)	r ₀ (mm)	t ₀ (mm)	l ₀ (mm)	ρ ₀ (g/cm ³)	V _a (%)
	V	60,18	49,37	29,71	50,77	0,81	56,06	48,44	29,14	50,69	0,78	7,35
7	I	57,17	49,63	29,71	50,31	0,77	53,48	48,80	29,11	50,22	0,75	6,90
	II	57,72	49,66	29,93	50,29	0,77	53,84	48,91	29,02	50,16	0,76	7,21
	III	59,05	50,07	29,74	50,39	0,79	55,43	49,31	29,19	50,27	0,77	6,53
8	I	60,84	50,49	29,74	50,35	0,80	56,72	49,21	29,20	50,23	0,79	7,26
	II	64,99	50,93	26,69	50,58	0,95	60,76	49,78	29,14	50,43	0,83	6,96
	III	63,62	50,18	29,74	50,32	0,85	59,35	49,23	29,12	50,27	0,82	7,19
9	I	59,43	49,76	29,64	50,58	0,80	55,48	49,01	28,92	50,54	0,77	7,12
	II	57,01	49,51	29,86	50,57	0,76	53,25	48,60	28,98	50,42	0,75	7,06
	III	58,61	49,81	29,66	50,33	0,79	54,57	48,77	28,87	50,12	0,77	7,40
	IV	56,29	49,86	29,78	50,35	0,75	52,41	48,85	28,93	50,15	0,74	7,40
10	I	57,01	49,99	29,96	50,47	0,75	53,21	49,38	29,12	50,25	0,74	7,14
	II	58,80	50,48	29,75	50,48	0,78	55,08	49,55	29,16	50,33	0,76	6,75
	III	58,42	50,26	30,08	50,31	0,77	54,46	49,54	29,11	50,21	0,75	7,27
11	I	57,96	50,45	29,89	50,06	0,77	53,95	49,47	29,11	49,94	0,75	7,43
	II	58,51	50,03	29,63	50,35	0,78	54,70	49,39	29,01	50,29	0,76	6,97
	III	58,22	50,12	29,94	50,30	0,77	54,29	49,34	29,17	50,04	0,75	7,24
	V	59,46	50,39	30,16	50,37	0,78	55,57	49,80	29,19	50,25	0,76	7,00
	VI	57,81	50,42	29,86	50,35	0,76	53,94	49,66	29,08	50,29	0,74	7,17
12	I	57,17	49,61	29,79	50,73	0,76	53,26	48,81	29,22	50,39	0,74	7,34
	II	57,61	49,81	29,71	50,48	0,77	53,68	49,08	29,08	50,33	0,75	7,32
	III	57,20	50,01	29,81	50,22	0,76	53,10	49,13	29,15	50,05	0,74	7,72
	IV	56,55	49,32	29,69	50,38	0,77	52,59	48,59	28,98	50,31	0,74	7,53
	V	57,44	50,33	29,73	50,25	0,76	53,55	49,59	29,16	50,15	0,74	7,26
	VI	56,51	49,69	30,04	50,41	0,75	52,81	48,66	29,13	50,15	0,74	7,01
13	I	61,20	49,82	30,01	50,40	0,81	57,38	49,30	29,24	50,29	0,79	6,66
	II	59,26	48,46	29,77	50,35	0,82	55,52	47,20	29,22	50,10	0,80	6,74
	III	59,12	50,10	29,88	50,35	0,78	55,28	49,18	29,22	50,29	0,76	6,95
14	I	53,95	49,69	29,83	50,31	0,72	50,61	48,86	29,21	50,25	0,71	6,60
	II	54,17	50,08	29,84	50,16	0,72	50,55	49,29	29,32	50,12	0,70	7,16
	III	56,54	50,04	29,84	50,18	0,75	53,03	49,35	29,15	50,05	0,74	6,62
15	I	61,98	50,19	29,80	50,51	0,82	57,94	49,35	29,22	50,29	0,80	6,97
	II	61,26	49,38	29,74	50,20	0,83	57,27	48,66	29,01	50,03	0,81	6,97

Резултати мерења физичких својстава хрстовине												
D	E	m _v (g)	r _v (mm)	t _v (mm)	l _v (mm)	ρ _v (g/cm ³)	m ₀ (g)	r ₀ (mm)	t ₀ (mm)	l ₀ (mm)	ρ ₀ (g/cm ³)	V _a (%)
	III	61,40	50,35	29,95	50,16	0,81	57,17	49,37	29,10	50,01	0,80	7,40
16	I	49,66	50,24	29,74	50,33	0,66	46,52	49,19	29,22	50,20	0,64	6,75
	II	48,91	49,65	30,09	50,24	0,65	45,73	49,01	29,17	50,08	0,64	6,95
	III	54,40	50,03	29,88	50,39	0,72	50,98	49,10	29,16	50,23	0,71	6,71
	III	54,18	49,79	29,88	50,63	0,72	50,43	49,21	29,21	50,08	0,70	7,44
	IV	55,66	49,89	29,83	50,16	0,75	51,90	49,00	29,03	50,11	0,73	7,24
	V	53,12	49,47	29,76	50,17	0,72	49,32	49,00	29,14	50,09	0,69	7,70
18	VI	56,48	49,85	29,91	50,42	0,75	52,45	48,92	29,07	50,19	0,73	7,68
	I	62,20	49,92	29,88	50,34	0,83	57,54	49,32	29,90	50,15	0,78	8,10
	II	63,57	50,12	29,74	50,19	0,85	59,13	49,27	29,08	50,12	0,82	7,51
	III	61,55	49,51	29,79	50,34	0,83	57,13	48,85	29,13	50,19	0,80	7,74
	IV	63,15	50,50	29,77	50,34	0,83	58,84	49,31	28,98	50,21	0,82	7,32
	V	58,07	49,69	29,91	50,37	0,78	53,84	48,80	29,11	50,07	0,76	7,86
19	VI	55,87	49,68	29,73	50,06	0,76	51,90	48,93	29,17	49,83	0,73	7,65
	I	54,79	49,31	29,90	50,17	0,74	51,08	48,76	29,15	50,17	0,72	7,26
	II	50,51	49,44	29,66	50,17	0,69	47,21	48,78	29,07	49,98	0,67	6,99
	III	55,31	50,11	29,81	49,99	0,74	51,44	49,16	29,05	49,86	0,72	7,52
20	IV	51,49	49,86	29,70	50,08	0,69	47,92	49,28	29,12	49,87	0,67	7,45
	I	57,10	49,97	29,97	50,22	0,76	52,86	49,23	29,15	50,16	0,73	8,02
	II	56,54	50,27	29,85	50,22	0,75	52,64	49,25	29,20	50,10	0,73	7,41
	III	54,78	50,00	29,75	50,58	0,73	51,15	49,19	29,16	50,34	0,71	7,10
21	IV	55,62	50,07	29,67	50,52	0,74	51,92	49,32	29,15	50,38	0,72	7,13
	I	48,29	50,99	29,70	50,40	0,63	45,15	49,74	29,17	50,25	0,62	6,95
	II	45,51	49,88	30,00	50,30	0,60	42,42	49,38	29,35	50,27	0,58	7,28
	III	48,23	50,36	29,68	50,46	0,64	44,94	50,02	29,11	50,38	0,61	7,32
	IV	46,75	50,32	30,00	50,28	0,62	43,44	49,43	29,33	50,16	0,60	7,62
	V	49,46	50,52	29,67	50,34	0,66	46,17	49,47	29,05	50,28	0,64	7,13
22	VI	51,47	50,08	29,80	50,44	0,68	47,98	49,61	29,21	50,29	0,66	7,27
	I	57,94	50,11	29,63	50,43	0,77	54,39	49,67	28,85	50,29	0,75	6,53
	II	58,78	49,88	29,72	50,34	0,79	54,99	48,97	29,02	50,13	0,77	6,89
	III	57,04	49,50	29,55	50,53	0,77	53,25	49,02	28,93	50,44	0,74	7,12
	IV	58,53	49,24	29,78	50,53	0,79	54,70	48,49	29,19	50,48	0,77	7,00
V	56,88	50,80	29,56	50,36	0,75	53,22	50,12	28,90	50,36	0,73	6,88	

Резултати мерења физичких својстава хрстовине												
D	E	m_v (g)	r_v (mm)	t_v (mm)	l_v (mm)	ρ_v (g/cm ³)	m_0 (g)	r_0 (mm)	t_0 (mm)	l_0 (mm)	ρ_0 (g/cm ³)	V_a (%)
	VI	56,24	49,33	29,74	50,40	0,76	52,68	48,68	29,25	50,27	0,74	6,76
23	I	47,64	50,37	29,77	50,35	0,63	44,28	49,58	29,24	50,33	0,61	7,59
	II	48,43	50,51	29,63	50,57	0,64	45,29	49,90	29,20	50,38	0,62	6,93
24	I	53,13	50,04	29,83	50,52	0,70	49,40	48,98	29,27	50,24	0,69	7,55
	II	61,66	49,79	29,83	50,38	0,82	57,37	48,90	29,27	50,24	0,80	7,48
25	I	51,51	50,10	29,83	50,54	0,68	48,20	49,34	29,22	50,25	0,67	6,87
	II	57,15	49,95	29,78	50,39	0,76	53,27	49,27	29,24	50,40	0,73	7,28
	III	51,85	49,59	29,88	50,31	0,70	48,46	49,13	29,36	50,23	0,67	7,00
	IV	56,72	49,80	29,76	50,23	0,76	52,65	49,05	29,20	50,07	0,73	7,73
26	I	56,51	50,08	29,96	50,39	0,75	52,96	49,39	29,29	50,35	0,73	6,70
	II	57,12	51,36	29,92	50,46	0,74	53,34	49,57	29,15	50,28	0,73	7,09
	III	61,90	50,13	29,81	50,39	0,82	57,69	49,09	29,11	50,27	0,80	7,30
	IV	59,78	50,09	29,45	50,47	0,80	55,96	49,52	29,01	50,31	0,77	6,83
	V	61,53	50,63	29,39	50,44	0,82	57,53	49,59	28,82	50,25	0,80	6,95
27	I	62,12	50,17	29,94	50,10	0,83	57,75	49,36	29,19	49,92	0,80	7,57
	II	62,31	49,49	30,01	50,00	0,84	57,97	48,73	29,13	49,89	0,82	7,49
	III	61,57	50,31	29,89	50,32	0,81	57,52	49,35	29,27	50,14	0,79	7,04
	IV	63,13	49,96	29,86	50,31	0,84	59,05	49,20	29,19	50,27	0,82	6,91
	V	62,33	50,41	29,75	50,36	0,83	58,16	49,70	29,19	50,31	0,80	7,17
28	I	50,40	50,08	29,74	50,69	0,67	47,23	49,44	29,17	50,53	0,65	6,71
	II	55,14	50,01	30,41	50,56	0,72	51,62	49,05	29,25	50,36	0,71	6,82
	III	50,53	49,86	29,98	50,59	0,67	46,76	49,31	29,07	50,44	0,65	8,06
	IV	51,09	49,92	29,88	50,91	0,67	47,86	49,47	29,31	50,48	0,65	6,75
	V	50,01	50,51	30,08	50,45	0,65	46,88	49,76	29,21	50,35	0,64	6,68
29	I	53,10	50,04	29,80	50,47	0,71	49,45	49,35	29,19	50,41	0,68	7,38
	II	55,60	49,75	29,82	50,69	0,74	51,65	48,78	29,01	50,32	0,73	7,65
	III	60,88	50,38	29,84	50,55	0,80	56,63	49,69	29,35	50,33	0,77	7,50
30	I	60,99	50,33	29,79	50,32	0,81	56,46	49,73	29,22	50,19	0,77	8,02
	II	62,62	50,60	29,62	50,31	0,83	57,88	49,83	29,04	50,23	0,80	8,19
	III	60,92	50,11	29,73	50,19	0,81	56,21	49,49	29,16	50,05	0,78	8,38
	IV	62,20	50,44	29,54	50,55	0,83	57,52	49,79	28,85	50,13	0,80	8,14
	V	59,86	50,65	29,66	50,38	0,79	55,73	49,75	28,92	50,25	0,77	7,41
	VI	60,97	50,50	29,91	50,38	0,80	56,64	49,43	29,08	50,29	0,78	7,64

Резултати мерења физичких својстава храстовине												
D	E	m_v (g)	r_v (mm)	t_v (mm)	l_v (mm)	ρ_v (g/cm ³)	m_0 (g)	r_0 (mm)	t_0 (mm)	l_0 (mm)	ρ_0 (g/cm ³)	V_a (%)
31	I	51,49	49,99	29,67	50,37	0,69	47,83	49,30	28,99	50,21	0,67	7,65
	II	50,35	49,79	29,61	50,64	0,67	46,73	48,88	28,98	50,36	0,66	7,75
	III	51,70	50,88	29,75	50,93	0,67	48,00	49,72	29,19	50,29	0,66	7,71
	IV	55,98	50,19	29,79	50,74	0,74	52,15	49,31	29,10	50,28	0,72	7,34
32	I	45,49	49,70	29,80	50,48	0,61	42,55	49,15	29,15	50,29	0,59	6,91
	II	45,72	49,71	29,79	50,40	0,61	42,84	48,96	29,35	50,26	0,59	6,72
	III	46,91	50,38	29,73	50,44	0,62	43,88	49,74	29,12	50,39	0,60	6,91
	IV	45,07	49,17	29,83	50,39	0,61	42,22	48,76	29,35	50,32	0,59	6,75
33	I	60,83	49,35	29,80	50,27	0,82	56,04	48,65	29,02	50,14	0,79	8,55
	II	60,43	49,17	29,77	50,26	0,82	56,08	48,49	29,03	50,20	0,79	7,76
	III	66,21	50,27	29,84	49,63	0,89	61,64	48,95	29,12	50,10	0,86	7,41
34	I	46,91	50,37	29,49	50,49	0,63	43,94	49,94	29,05	50,33	0,60	6,76
	II	49,55	50,32	30,02	50,51	0,65	46,24	49,70	29,31	50,41	0,63	7,16
	III	45,71	50,07	29,81	50,64	0,60	42,88	49,58	29,14	50,26	0,59	6,60
	IV	46,98	49,94	29,82	50,41	0,63	44,03	49,26	29,25	50,26	0,61	6,70
35	I	56,02	49,95	29,75	50,45	0,75	52,38	49,30	29,14	50,47	0,72	6,95
	II	57,55	49,95	29,69	50,35	0,77	53,76	49,34	29,15	50,17	0,75	7,05
	III	56,91	49,92	29,79	50,39	0,76	53,10	49,23	29,12	50,26	0,74	7,18
36	I	48,00	49,75	29,53	50,42	0,65	45,01	49,01	29,15	50,30	0,63	6,64
37	I	45,90	50,19	30,03	50,44	0,60	42,75	49,18	29,29	50,32	0,59	7,37
	II	48,92	49,99	29,91	50,61	0,65	45,67	49,36	29,23	50,39	0,63	7,12
	III	48,98	49,88	29,87	50,47	0,65	45,86	49,07	29,03	50,27	0,64	6,80
	IV	53,43	50,25	29,52	50,41	0,71	49,86	49,43	29,04	50,28	0,69	7,16
38	I	49,73	50,88	29,75	50,97	0,64	46,40	49,72	28,86	50,41	0,64	7,18
	II	49,61	50,51	30,00	50,65	0,65	46,31	49,88	29,09	50,37	0,63	7,13
	III	50,05	49,51	29,98	50,43	0,67	46,61	48,92	29,18	50,33	0,65	7,38
	IV	52,88	50,02	29,81	50,37	0,70	49,29	49,36	28,94	50,23	0,69	7,28
39	I	60,55	49,68	29,73	50,38	0,81	56,20	48,91	28,93	50,24	0,79	7,74
	II	60,51	50,18	29,40	50,44	0,81	56,54	49,38	28,97	50,26	0,79	7,02
	III	57,82	49,43	29,65	50,43	0,78	53,89	48,77	28,90	50,35	0,76	7,29
	IV	56,98	49,47	29,55	50,31	0,77	52,83	48,43	28,95	50,19	0,75	7,86
40	I	52,04	49,76	29,71	50,24	0,70	48,75	48,85	29,27	50,12	0,68	6,75
	II	58,86	49,87	30,00	50,78	0,77	55,13	49,03	29,30	50,33	0,76	6,77

Резултати мерења физичких својстава храстовине												
D	E	m _v (g)	r _v (mm)	t _v (mm)	l _v (mm)	ρ _v (g/cm ³)	m ₀ (g)	r ₀ (mm)	t ₀ (mm)	l ₀ (mm)	ρ ₀ (g/cm ³)	V _a (%)
	III	57,41	49,58	29,92	50,42	0,77	53,45	48,65	29,35	50,33	0,74	7,41
41	I	52,52	49,26	29,65	50,43	0,71	49,19	48,73	29,27	50,41	0,68	6,77
	II	51,37	49,67	29,75	50,55	0,69	48,10	49,14	29,37	50,43	0,66	6,80
	III	50,84	49,15	29,63	50,20	0,70	47,70	48,58	29,12	50,08	0,67	6,58
	IV	55,42	49,59	29,80	50,27	0,75	52,03	49,13	29,25	50,13	0,72	6,52
42	I	56,56	50,39	29,81	50,49	0,75	52,81	49,35	29,18	50,56	0,73	7,10
	II	54,21	50,12	29,83	50,34	0,72	50,47	49,46	29,26	50,33	0,69	7,41
	III	54,22	50,24	29,92	50,45	0,71	50,71	49,73	29,49	50,37	0,69	6,92
43	I	46,63	49,65	29,48	50,55	0,63	43,31	49,03	29,02	50,34	0,60	7,67
	II	48,58	50,35	29,96	50,50	0,64	45,27	49,50	29,19	50,40	0,62	7,31
	III	47,43	50,33	29,69	50,56	0,63	43,78	49,88	29,29	50,35	0,60	8,34
	IV	50,30	50,18	29,78	50,58	0,67	46,73	49,29	29,28	50,42	0,64	7,64
	V	50,02	49,39	29,59	50,39	0,68	46,58	48,77	29,08	50,08	0,66	7,39
44	I	55,75	49,46	29,73	50,44	0,75	51,94	48,91	29,21	50,34	0,72	7,34
	II	54,62	49,68	29,70	50,48	0,73	51,10	48,85	29,19	50,29	0,71	6,89
	III	56,73	50,41	29,90	50,46	0,75	52,96	49,77	29,36	50,36	0,72	7,12
	IV	57,21	50,01	29,78	50,47	0,76	53,20	49,36	29,24	50,40	0,73	7,54
	V	54,66	50,05	29,69	50,45	0,73	50,77	49,31	27,14	50,27	0,75	7,66
45	I	50,25	50,23	29,62	50,44	0,67	46,90	49,59	29,18	50,35	0,64	7,14
	II	50,90	49,45	29,91	50,44	0,68	47,49	48,76	29,14	50,35	0,66	7,18
	III	52,74	49,98	29,53	50,43	0,71	49,36	49,32	28,85	50,25	0,69	6,85
	IV	50,52	50,32	29,70	50,44	0,67	47,02	49,68	29,10	50,26	0,65	7,44
46	I	56,40	50,12	29,87	50,68	0,74	52,34	49,48	29,11	50,54	0,72	7,76
	II	51,70	49,70	29,58	50,44	0,70	47,74	49,21	29,07	50,26	0,66	8,29
	III	54,69	49,31	29,76	50,40	0,74	50,54	48,79	29,10	50,23	0,71	8,21
	IV	48,54	50,10	29,60	50,69	0,65	45,27	49,64	29,02	50,49	0,62	7,22
	V	48,12	49,90	29,69	50,55	0,64	44,96	49,36	29,15	50,41	0,62	7,03
47	I	50,12	49,16	29,63	50,44	0,68	46,80	48,54	29,21	50,35	0,66	7,09
	II	48,17	49,73	29,61	50,37	0,65	45,10	49,20	29,20	50,30	0,62	6,81
	III	48,68	49,26	29,76	50,51	0,66	45,39	48,70	29,39	50,39	0,63	7,25
48	I	49,24	50,36	29,60	50,51	0,65	45,87	49,86	28,97	50,35	0,63	7,35
	II	48,74	50,00	30,12	50,56	0,64	45,32	49,21	29,16	50,36	0,63	7,55
49	I	58,86	49,87	29,91	50,48	0,78	55,01	49,28	29,13	50,34	0,76	7,00

Резултати мерења физичких својстава храстовине												
D	E	m_v (g)	r_v (mm)	t_v (mm)	l_v (mm)	ρ_v (g/cm ³)	m_0 (g)	r_0 (mm)	t_0 (mm)	l_0 (mm)	ρ_0 (g/cm ³)	V_a (%)
	II	58,74	49,69	29,69	50,55	0,79	54,57	49,01	29,21	50,42	0,76	7,64
	III	62,75	50,25	29,83	50,47	0,83	58,41	49,79	29,18	50,35	0,80	7,43
50	I	56,46	49,24	29,24	50,69	0,77	52,61	48,61	29,13	50,67	0,73	7,32
	II	56,49	50,03	29,71	50,73	0,75	52,61	49,15	29,09	50,63	0,73	7,38
	III	58,19	50,43	29,91	50,61	0,76	49,11	49,63	29,31	50,51	0,67	7,32
	IV	57,66	49,75	29,80	50,64	0,77	53,57	48,79	29,14	50,51	0,75	7,63
51	I	57,38	49,83	29,80	50,76	0,76	53,23	49,16	29,16	50,44	0,74	7,80
	II	57,63	50,51	29,74	50,47	0,76	53,33	49,65	29,06	50,33	0,73	8,06
	III	54,03	49,04	29,77	50,72	0,73	50,04	48,30	29,20	50,56	0,70	7,97
	IV	54,21	49,84	29,73	50,49	0,72	50,43	48,98	29,16	50,42	0,70	7,50
52	I	56,97	49,89	29,66	50,67	0,76	53,14	49,20	29,09	50,48	0,74	7,21
	II	56,34	50,25	29,79	50,60	0,74	52,41	49,64	29,13	50,54	0,72	7,50
	III	57,11	50,05	29,74	50,22	0,76	53,21	49,32	28,98	50,17	0,74	7,33
	IV	57,77	49,40	29,78	50,32	0,78	53,56	48,70	29,01	50,23	0,75	7,86
53	I	54,31	49,92	29,20	50,58	0,74	50,91	49,35	28,67	50,43	0,71	6,68
	II	54,68	49,88	29,44	50,51	0,74	51,02	49,18	28,73	50,42	0,72	7,17
	III	54,20	49,96	29,95	50,63	0,72	50,79	49,24	29,02	50,55	0,70	6,71
54	I	47,79	50,05	30,17	50,56	0,63	44,53	49,29	29,10	50,46	0,62	7,32
	II	49,58	49,75	29,33	50,51	0,67	45,80	48,93	28,70	50,39	0,65	8,25
	III	58,96	49,62	29,75	50,61	0,79	54,32	49,00	29,05	50,46	0,76	8,54
55	I	57,16	50,33	29,56	50,56	0,76	53,30	49,67	29,07	50,52	0,73	7,24
	II	57,22	50,13	29,62	50,59	0,76	53,09	49,42	28,92	50,48	0,74	7,78
	III	59,76	50,72	29,74	50,63	0,78	55,77	49,78	29,14	50,44	0,76	7,15
56	I	56,49	49,97	29,50	50,62	0,76	52,78	49,39	29,05	50,54	0,73	7,03
	II	59,90	49,97	29,70	50,79	0,79	55,75	49,26	29,21	50,59	0,77	7,44
	III	57,16	49,87	29,74	50,72	0,76	53,06	49,19	29,14	50,67	0,73	7,73
	IV	59,90	49,58	29,81	50,74	0,80	55,59	49,14	29,25	50,67	0,76	7,75
	V	56,53	50,35	29,68	50,58	0,75	52,76	49,74	28,98	50,51	0,72	7,15
	VI	58,67	50,20	29,82	50,61	0,77	54,70	49,58	29,18	50,48	0,75	7,26
57	I	57,83	50,42	29,58	50,62	0,77	54,10	49,63	29,04	50,38	0,75	6,89
	II	58,42	50,02	29,74	50,51	0,78	54,55	49,36	29,10	50,30	0,76	7,09
	III	58,55	50,15	29,52	50,61	0,78	54,59	49,62	29,07	50,47	0,75	7,25
	IV	59,26	49,70	29,69	50,61	0,79	55,05	48,96	29,13	50,48	0,76	7,65

Резултати мерења физичких својстава храстовине												
D	E	m _v (g)	r _v (mm)	t _v (mm)	l _v (mm)	ρ _v (g/cm ³)	m ₀ (g)	r ₀ (mm)	t ₀ (mm)	l ₀ (mm)	ρ ₀ (g/cm ³)	V _a (%)
	V	63,38	50,08	29,58	50,58	0,85	58,83	49,50	28,93	50,50	0,81	7,73
58	I	56,29	49,92	29,76	50,35	0,75	52,66	49,42	29,41	50,15	0,72	6,89
	II	59,31	49,83	29,79	50,50	0,79	55,47	49,09	29,36	50,44	0,76	6,92
	III	56,02	50,01	29,88	50,51	0,74	52,41	49,47	29,37	50,43	0,72	6,89
	IV	58,56	49,81	29,80	50,73	0,78	54,70	49,11	29,34	50,68	0,75	7,06
59	I	58,60	49,20	29,27	50,60	0,80	54,63	48,61	28,74	50,47	0,77	7,27
	II	65,15	49,83	29,64	50,52	0,87	60,60	49,28	29,13	50,38	0,84	7,51
	III	58,51	50,23	29,46	50,71	0,78	54,11	49,56	28,82	50,54	0,75	8,13
	IV	65,08	50,14	29,72	50,65	0,86	60,26	49,38	28,98	50,54	0,83	8,00
	V	59,68	50,72	29,59	50,68	0,78	55,80	50,20	29,01	50,61	0,76	6,95
60	I	59,33	49,60	29,58	50,76	0,80	55,33	49,15	29,00	50,41	0,77	7,23
	II	57,67	49,83	29,74	50,35	0,77	53,28	49,30	29,09	50,31	0,74	8,24
	III	60,12	50,15	29,88	50,28	0,80	55,46	49,42	29,19	50,20	0,77	8,40
61	I	59,49	49,79	29,60	50,74	0,80	55,29	49,13	29,05	50,64	0,76	7,60
	II	59,01	49,46	29,57	50,63	0,80	54,90	48,90	29,23	50,57	0,76	7,49
	III	54,22	50,16	29,77	48,43	0,75	50,51	49,53	29,27	48,24	0,72	7,35
62	I	56,90	49,35	29,71	50,72	0,77	53,33	48,67	29,21	50,55	0,74	6,69
	II	54,44	49,78	29,73	50,74	0,72	50,93	49,05	29,30	50,57	0,70	6,89
63	I	57,30	49,80	29,70	50,71	0,76	53,33	49,11	29,14	50,57	0,74	7,44
	II	58,16	49,59	29,75	50,89	0,77	54,23	48,79	29,15	50,61	0,75	7,25
	III	56,60	49,40	29,77	50,51	0,76	54,50	49,60	28,86	50,16	0,76	7,33
	IV	62,86	49,86	29,55	50,23	0,85	58,52	49,00	28,85	50,11	0,83	7,42
64	I	47,76	49,87	29,72	50,63	0,64	44,59	49,37	29,18	50,52	0,61	7,11
	II	49,55	50,26	29,77	50,65	0,65	46,24	49,76	29,21	50,61	0,63	7,16
	III	48,85	50,35	29,80	50,52	0,64	45,50	49,82	29,24	50,49	0,62	7,36
	IV	50,96	50,07	29,70	50,61	0,68	47,51	49,57	29,26	50,44	0,65	7,26
65	I	51,92	49,52	29,58	50,98	0,70	48,57	48,92	28,94	50,77	0,68	6,90
	II	54,04	49,98	29,60	51,21	0,71	50,46	49,33	29,21	51,13	0,68	7,09
	III	53,88	49,89	29,61	50,63	0,72	50,15	49,41	29,03	50,62	0,69	7,44
	IV	54,99	49,73	29,76	50,68	0,73	51,14	48,95	29,18	50,57	0,71	7,53
66	I	47,35	49,89	29,64	50,68	0,63	44,24	49,23	29,15	50,59	0,61	7,03
	II	47,35	50,08	29,72	50,70	0,63	44,07	49,31	29,19	50,53	0,61	7,44
	III	47,70	49,81	29,48	50,75	0,64	43,81	49,39	29,12	50,67	0,60	7,08

Резултати мерења физичких својстава храстовине												
D	E	m_v (g)	r_v (mm)	t_v (mm)	l_v (mm)	ρ_v (g/cm ³)	m_0 (g)	r_0 (mm)	t_0 (mm)	l_0 (mm)	ρ_0 (g/cm ³)	V_a (%)
67	I	56,93	50,09	29,69	50,78	0,75	53,18	49,50	29,10	50,57	0,73	7,05
	II	58,78	49,99	29,73	50,71	0,78	54,89	49,28	29,14	50,72	0,75	7,09
	III	57,63	51,08	29,73	50,55	0,75	53,75	50,53	29,15	50,48	0,72	7,22
	IV	55,00	50,16	29,75	50,43	0,73	51,48	49,36	29,22	50,33	0,71	6,84
68	I	49,77	49,85	29,52	50,74	0,67	46,68	49,26	28,95	50,66	0,65	6,62
	II	51,02	50,27	29,58	50,66	0,68	47,65	49,71	29,05	50,63	0,65	7,07
	III	53,28	49,87	29,43	50,68	0,72	49,69	49,40	28,90	50,63	0,69	7,22
69	I	55,96	50,33	29,51	51,12	0,74	52,21	49,82	28,96	51,05	0,71	7,18
	II	57,42	49,66	29,64	51,01	0,76	53,64	49,14	29,09	50,95	0,74	7,05
	III	56,46	49,46	29,51	50,75	0,76	53,37	48,79	28,89	50,59	0,75	5,79
	IV	57,72	50,11	29,76	50,65	0,76	53,71	49,36	28,97	50,57	0,74	7,47
	V	56,10	49,81	29,83	50,43	0,75	52,29	49,40	29,16	50,20	0,72	7,29
70	I	54,47	50,22	29,74	50,77	0,72	50,80	49,49	29,25	50,65	0,69	7,22
	II	57,06	49,84	29,65	50,75	0,76	53,13	48,81	29,05	50,63	0,74	7,40
	III	55,01	49,64	29,75	50,72	0,73	51,14	48,91	29,13	50,56	0,71	7,57
	IV	58,28	50,43	29,60	50,80	0,77	54,14	49,47	28,98	50,66	0,75	7,65
	V	53,70	48,87	29,77	50,33	0,73	49,97	48,24	29,17	50,22	0,71	7,46
	VI	57,88	50,75	29,60	50,40	0,76	53,86	50,02	28,94	50,29	0,74	7,46
71	I	54,13	50,02	29,80	50,68	0,72	50,36	49,20	29,30	50,55	0,69	7,49
	II	55,11	49,85	29,66	50,71	0,74	51,36	49,06	29,18	50,48	0,71	7,30
	III	55,74	49,68	29,68	50,94	0,74	52,01	49,15	29,27	50,78	0,71	7,17
	IV	55,37	49,56	29,85	50,81	0,74	51,61	49,09	29,15	50,73	0,71	7,29
72	I	47,28	50,19	29,85	50,73	0,62	44,40	49,82	29,32	50,67	0,60	6,49
	II	46,93	49,80	29,73	50,74	0,62	43,94	49,33	29,25	50,61	0,60	6,80
73	I	53,20	50,16	29,59	50,80	0,71	49,89	49,65	29,05	50,74	0,68	6,63
	II	54,97	50,00	29,70	50,82	0,73	51,48	49,34	29,13	50,74	0,71	6,78
	III	52,54	50,55	29,86	50,77	0,69	49,07	49,77	29,34	50,67	0,66	7,07
	IV	53,02	50,38	29,68	50,77	0,70	49,48	49,47	29,05	50,67	0,68	7,15
	V	45,67	50,05	29,80	50,72	0,60	42,71	49,73	29,14	50,64	0,58	6,93
74	I	54,55	50,31	29,55	51,07	0,72	50,89	49,74	29,07	50,83	0,69	7,19
	II	55,34	49,94	29,74	50,26	0,74	51,33	49,27	29,23	50,19	0,71	7,81
	III	60,38	50,19	29,83	50,66	0,80	56,24	49,68	29,31	50,60	0,76	7,36
	IV	61,77	50,09	29,76	50,72	0,82	57,28	49,46	29,08	50,62	0,79	7,84

Резултати мерења физичких својстава храстовине												
D	E	m_v (g)	r_v (mm)	t_v (mm)	l_v (mm)	ρ_v (g/cm ³)	m_0 (g)	r_0 (mm)	t_0 (mm)	l_0 (mm)	ρ_0 (g/cm ³)	V_a (%)
75	I	50,20	49,41	29,71	50,72	0,67	46,51	48,90	29,19	50,59	0,64	7,93
	II	46,87	50,00	29,80	50,76	0,62	43,36	49,60	29,26	50,72	0,59	8,10
	III	50,76	49,67	29,89	50,72	0,67	46,80	49,14	29,10	50,65	0,65	8,46
	IV	46,72	49,78	29,67	50,86	0,62	43,56	49,22	29,16	50,69	0,60	7,25

Табела 8.2: Механичка својства храстовог дрвета

Резултати мерења механичких својстава храстовине							
Даска	Епрувета	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{sr} (mm)	Тврдоћа (N/mm ²)	Савојна чврстоћа (N/mm ²)	Модул еластичности (N/mm ²)
1	I	4,80	5,00	4,90	49,65		
	II	4,70	5,20	4,95	48,58		
	III	5,00	4,60	4,80	51,90		
	IV	5,10	4,60	4,85	50,76		
2	I	4,90	4,60	4,75	53,07		
	II	5,40	5,00	5,20	43,68		
	III	5,00	4,90	4,95	48,58		
3	I	4,40	5,30	4,85	50,76	119,85	12902,15
	II	5,00	5,90	5,45	39,42	111,06	10165,26
	III	4,40	5,10	4,75	53,07	113,30	10493,18
	IV	5,00	5,50	5,25	42,78		
4	I	5,10	5,20	5,15	44,60		
	II	5,00	4,90	4,95	48,58		
	III	5,30	5,00	5,15	44,60		
	IV	4,70	4,50	4,60	56,83		
5	I	6,40	5,60	6,00	31,85		
	II	5,60	5,70	5,65	36,42		
	III	6,10	5,90	6,00	31,85		
6	I	4,80	5,40	5,10	45,55		
	II	5,20	4,90	5,05	46,53		
	III	5,00	5,50	5,25	42,78		
	IV	5,10	4,80	4,95	48,58		
	V	5,50	6,50	6,00	31,85		
7	I	5,00	4,80	4,90	49,65		
	II	4,80	5,20	5,00	47,54		

Резултати мерења механичких својстава храстовине							
Даска	Епрувета	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d _{sr} (mm)	Тврдоћа (N/mm ²)	Савојна чврстоћа (N/mm ²)	Модул еластичности (N/mm ²)
	III	5,10	4,70	4,90	49,65		
8	I	5,30	5,00	5,15	44,60		
	II	5,40	4,90	5,15	44,60		
	III	5,10	4,90	5,00	47,54		
9	I	4,90	5,10	5,00	47,54	124,53	13374,62
	II	4,90	5,20	5,05	46,53	138,03	12298,91
	III	5,00	5,50	5,25	42,78	107,75	11552,41
	IV	4,30	5,10	4,70	54,28		
10	I	5,20	5,20	5,20	43,68	100,10	10599,28
	II	4,70	5,00	4,85	50,76	105,95	10967,01
	III	4,90	5,00	4,95	48,58	109,77	11207,14
11	I	5,40	4,80	5,10	45,55	123,03	12995,76
	II	5,10	5,50	5,30	41,90	126,81	12809,27
	III	5,20	5,30	5,25	42,78	128,36	12277,69
	V	4,60	5,20	4,90	49,65		
	VI	5,00	5,50	5,25	42,78		
12	I	5,60	5,00	5,30	41,90	137,51	13174,20
	II	4,20	5,00	4,60	56,83	128,61	10868,84
	III	5,20	4,90	5,05	46,53		
	IV	4,80	5,50	5,15	44,60		
	V	4,80	5,30	5,05	46,53		
	VI	5,10	5,50	5,30	41,90		
13	I	4,50	5,40	4,95	48,58		
	II	5,00	5,20	5,10	45,55		
	III	5,10	4,90	5,00	47,54		
14	I	4,90	5,00	4,95	48,58	129,93	10662,33
	II	5,80	5,60	5,70	35,71	134,55	11150,96
	III	4,80	4,70	4,75	53,07	138,21	12911,75
15	I	4,90	5,00	4,95	48,58		
	II	4,90	4,60	4,75	53,07		
	III	4,60	5,00	4,80	51,90		
16	I	4,40	5,60	5,00	47,54	119,18	12153,40
	II	5,40	5,60	5,50	38,64	107,20	10056,13
	III	4,90	5,60	5,25	42,78	103,09	12210,38
	III	5,40	5,50	5,45	39,42		

Резултати мерења механичких својстава храстовине							
Даска	Епрувета	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d _{sr} (mm)	Тврдоћа (N/mm ²)	Савојна чврстоћа (N/mm ²)	Модул еластичности (N/mm ²)
	IV	5,50	5,90	5,70	35,71		
	V	6,10	5,50	5,80	34,36		
	VI	5,20	4,70	4,95	48,58		
18	I	5,80	4,20	5,00	47,54	119,87	12159,97
	II	5,10	4,80	4,95	48,58	139,1	12781,34
	III	4,90	5,10	5,00	47,54	132,38	11707,15
	IV	4,40	5,20	4,80	51,90		
	V	5,20	4,90	5,05	46,53		
	VI	5,20	4,60	4,90	49,65		
19	I	4,50	4,90	4,70	54,28	127,33	12118,79
	II	5,50	5,60	5,55	37,88	105,99	10290,58
	III	5,60	5,60	5,60	37,14	103,64	10009,73
	IV	5,50	5,40	5,45	39,42		
20	I	4,80	5,00	4,90	49,65	104,73	10399,57
	II	5,40	5,60	5,50	38,64	124,87	12905,35
	III	5,20	5,60	5,40	40,23	131,48	10853,83
	IV	5,90	5,00	5,45	39,42		
21	I	6,30	5,90	6,10	30,68		
	II	6,10	6,10	6,10	30,68		
	III	4,90	4,70	4,80	51,90		
	IV	6,10	6,00	6,05	31,26		
	V	6,10	6,00	6,05	31,26		
	VI	5,60	5,90	5,75	35,03		
22	I	4,90	5,00	4,95	48,58	121,01	13711,55
	II	4,90	4,50	4,70	54,28	120,63	13469,57
	III	5,10	5,30	5,20	43,68	127,27	13186,06
	IV	4,90	5,20	5,05	46,53		
	V	5,10	4,90	5,00	47,54		
	VI	5,80	5,00	5,40	40,23		
23	I	5,90	5,50	5,70	35,71		
	II	5,50	6,20	5,85	33,71		
24	I	6,00	6,10	6,05	31,26	118,31	12362,21
	II	4,90	4,50	4,70	54,28	125,17	11155,43
25	I	5,50	5,60	5,55	37,88	119,30	9911,64
	II	4,90	5,00	4,95	48,58	117,9	9308,90

Резултати мерења механичких својстава храстовине							
Даска	Епрувета	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d _{sr} (mm)	Тврдоћа (N/mm ²)	Савојна чврстоћа (N/mm ²)	Модул еластичности (N/mm ²)
	III	5,50	5,60	5,55	37,88	118,20	11240,44
	IV	4,20	5,60	4,90	49,65		
26	I	5,30	5,10	5,20	43,68		
	II	5,30	4,50	4,90	49,65		
	III	5,10	5,00	5,05	46,53		
	IV	4,50	5,50	5,00	47,54		
	V	4,50	5,20	4,85	50,76		
27	I	5,20	4,90	5,05	46,53		
	II	4,90	5,20	5,05	46,53		
	III	4,90	5,40	5,15	44,60		
	IV	5,10	4,50	4,80	51,90		
	V	4,90	5,20	5,05	46,53		
28	I	5,80	6,00	5,90	33,07	133,28	11155,58
	II	5,60	5,50	5,55	37,88	120,06	12693,47
	III	6,00	4,80	5,40	40,23	100,61	10447,33
	IV	6,10	6,20	6,15	30,12		
	V	6,00	5,40	5,70	35,71		
29	I	6,10	5,90	6,00	31,85	132,33	11488,16
	II	5,60	6,20	5,90	33,07	126,29	11371,87
	III	5,00	4,90	4,95	48,58	120,70	10942,05
30	I	5,00	4,60	4,80	51,90		
	II	4,60	5,40	5,00	47,54		
	III	5,50	4,90	5,20	43,68		
	IV	4,60	5,00	4,80	51,90		
	V	5,20	4,70	4,95	48,58		
	VI	4,60	5,20	4,90	49,65		
31	I	5,80	5,60	5,70	35,71	103,84	10291,53
	II	5,90	6,10	6,00	31,85	111,08	10068,37
	III	6,00	5,90	5,95	32,45	106,76	10636,90
	IV	5,20	4,90	5,05	46,53		
32	I	5,80	6,20	6,00	31,85	107,88	9624,91
	II	6,30	5,90	6,10	30,68	104,39	9102,00
	III	5,20	5,70	5,45	39,42		
	IV	5,60	5,90	5,75	35,03		
33	I	4,50	5,20	4,85	50,76		

Резултати мерења механичких својстава храстовине							
Даска	Епрувета	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d _{sr} (mm)	Тврдоћа (N/mm ²)	Савојна чврстоћа (N/mm ²)	Модул еластичности (N/mm ²)
	II	5,00	4,90	4,95	48,58		
	III	5,00	4,90	4,95	48,58		
34	I	6,40	5,60	6,00	31,85	113,18	9007,98
	II	5,20	4,90	5,05	46,53	103,73	9459,64
	III	4,60	5,30	4,95	48,58	104,71	9759,16
	IV	5,60	5,70	5,65	36,42		
35	I	5,60	5,40	5,50	38,64	137,60	11597,50
	II	4,80	5,40	5,10	45,55	136,61	10510,18
	III	4,80	5,00	4,90	49,65	131,25	11661,75
36	I	6,50	5,80	6,15	30,12		
37	I	6,40	5,80	6,10	30,68		
	II	4,40	5,80	5,10	45,55		
	III	5,80	6,50	6,15	30,12		
	IV	5,80	5,90	5,85	33,71		
38	I	5,90	5,60	5,75	35,03	102,68	10530,70
	II	4,50	6,10	5,30	41,90	102,51	10143,15
	III	5,00	6,20	5,60	37,14		
	IV	5,80	6,00	5,90	33,07		
39	I	5,50	4,80	5,15	44,60		
	II	5,30	5,20	5,25	42,78		
	III	5,50	5,60	5,55	37,88		
	IV	4,90	5,00	4,95	48,58		
40	I	5,60	5,30	5,45	39,42	101,69	9097,25
	II	5,30	5,80	5,55	37,88	127,82	10612,16
	III	5,00	4,90	4,95	48,58	105,86	10889,34
41	I	5,90	6,10	6,00	31,85	105,21	10288,77
	II	5,70	6,00	5,85	33,71	130,40	10539,20
	III	5,20	5,50	5,35	41,05	107,17	10151,37
	IV	5,50	4,90	5,20	43,68		
42	I	5,90	5,10	5,50	38,64	120,28	12176,40
	II	5,60	6,30	5,95	32,45	107,35	10066,81
	III	5,50	5,30	5,40	40,23	103,11	12215,98
43	I	6,10	6,20	6,15	30,12		
	II	5,60	5,90	5,75	35,03		
	III	6,20	6,10	6,15	30,12		

Резултати мерења механичких својстава храстовине							
Даска	Епрувета	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d _{sr} (mm)	Тврдоћа (N/mm ²)	Савојна чврстоћа (N/mm ²)	Модул еластичности (N/mm ²)
	IV	5,60	5,90	5,75	35,03		
	V	5,90	6,20	6,05	31,26		
44	I	4,80	5,20	5,00	47,54	135,67	10676,37
	II	4,90	5,50	5,20	43,68	117,94	10869,74
	III	5,00	5,30	5,15	44,60		
	IV	4,80	5,60	5,20	43,68		
	V	4,70	5,40	5,05	46,53		
45	I	5,80	5,10	5,45	39,42		
	II	5,30	5,50	5,40	40,23		
	III	5,00	5,40	5,20	43,68		
	IV	6,20	5,60	5,90	33,07		
46	I	5,30	4,90	5,10	45,55	109,33	9255,10
	II	6,20	5,40	5,80	34,36	107,26	9707,42
	III	5,00	5,60	5,30	41,90	109,67	9402,57
	IV	5,60	5,90	5,75	35,03		
	V	6,10	5,50	5,80	34,36		
47	I	4,60	5,00	4,80	51,90		
	II	5,80	6,10	5,95	32,45		
	III	5,50	6,00	5,75	35,03		
48	I	5,10	5,20	5,15	44,60	104,84	10391,93
	II	5,00	6,20	5,60	37,14	113,08	10168,28
	III	-	-	-	-	106,76	9636,93
49	I	5,10	5,20	5,15	44,60		
	II	4,90	5,50	5,20	43,68		
	III	4,80	5,40	5,10	45,55		
50	I	5,30	5,20	5,25	42,78		
	II	4,40	5,30	4,85	50,76		
	III	5,60	4,90	5,25	42,78		
	IV	5,40	4,60	5,00	47,54		
51	I	4,90	5,40	5,15	44,60	125,63	11728,89
	II	5,00	5,60	5,30	41,90	101,40	12912,35
	III	5,50	5,60	5,55	37,88	123,48	11713,47
	IV	5,40	5,90	5,65	36,42		
52	I	5,70	5,80	5,75	35,03	129,87	12350,70
	II	5,60	6,20	5,90	33,07	115,21	10096,34

Резултати мерења механичких својстава храстовине							
Даска	Епрувета	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d _{sr} (mm)	Тврдоћа (N/mm ²)	Савојна чврстоћа (N/mm ²)	Модул еластичности (N/mm ²)
	III	5,70	4,90	5,30	41,90	112,20	10740,22
	IV	4,40	5,00	4,70	54,28		
53	I	5,40	5,60	5,50	38,64	139,96	13235,28
	II	5,20	5,80	5,50	38,64	138,81	12374,56
	III	5,60	5,30	5,45	39,42	138,52	11094,67
54	I	6,00	6,20	6,10	30,68		
	II	5,10	5,40	5,25	42,78		
	III	5,50	6,60	6,05	31,26		
55	I	4,80	4,60	4,70	54,28	119,30	10911,34
	II	4,90	4,70	4,80	51,90	117,10	9306,90
	III	5,20	4,90	5,05	46,53	119,20	11242,34
56	I	5,60	5,40	5,50	38,64	131,09	10477,30
	II	4,50	4,90	4,70	54,28	137,06	12691,34
	III	4,90	5,40	5,15	44,60	104,69	10744,03
	IV	4,80	5,10	4,95	48,58		
	V	5,00	5,60	5,30	41,90		
	VI	5,40	5,60	5,50	38,64		
57	I	5,10	5,40	5,25	42,78	109,85	12702,95
	II	4,90	5,20	5,05	46,53	110,07	9165,26
	III	5,70	4,50	5,10	45,55	113,90	9493,48
	IV	5,60	5,40	5,50	38,64		
	V	4,60	4,90	4,75	53,07		
58	I	4,90	4,90	4,90	49,65	130,87	13350,70
	II	5,60	5,60	5,60	37,14	105,26	9096,64
	III	5,20	5,10	5,15	44,60	112,20	10741,22
	IV	4,90	4,50	4,70	54,28		
59	I	4,60	5,10	4,85	50,76		
	II	4,90	4,30	4,60	56,83		
	III	4,70	5,40	5,05	46,53		
	IV	5,00	5,10	5,05	46,53		
	V	5,30	4,30	4,80	51,90		
60	I	5,10	4,80	4,95	48,58	130,33	11402,12
	II	4,90	6,00	5,45	39,42	125,39	11471,77
	III	4,60	5,40	5,00	47,54	119,70	10949,32
61	I	5,20	5,50	5,35	41,05	128,84	10597,82

Резултати мерења механичких својстава храстовине							
Даска	Епрувета	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d _{sr} (mm)	Тврдоћа (N/mm ²)	Савојна чврстоћа (N/mm ²)	Модул еластичности (N/mm ²)
	II	4,40	5,90	5,15	44,60	127,56	11404,48
	III	5,00	5,30	5,15	44,60		
62	I	4,80	4,90	4,85	50,76	105,02	11801,17
	II	4,70	5,70	5,20	43,68	128,03	10332,97
	III	-	-	-	-	118,33	11935,12
63	I	4,40	5,30	4,85	50,76		
	II	4,90	5,10	5,00	47,54		
	III	4,90	4,90	4,90	49,65		
	IV	4,50	5,00	4,75	53,07		
64	I	5,40	6,20	5,80	34,36		
	II	5,90	6,10	6,00	31,85		
	III	5,90	6,20	6,05	31,26		
	IV	5,50	5,50	5,50	38,64		
65	I	5,10	5,90	5,50	38,64	120,23	12119,79
	II	4,90	6,20	5,55	37,88	104,99	10390,18
	III	5,50	6,20	5,85	33,71	107,54	10079,77
	IV	5,10	5,40	5,25	42,78		
66	I	5,40	6,60	6,00	31,85		
	II	5,90	6,10	6,00	31,85		
	III	6,40	5,80	6,10	30,68		
67	I	4,20	5,30	4,75	53,07	122,92	10644,17
	II	4,40	4,90	4,65	55,54	126,39	12517,83
	III	4,60	5,30	4,95	48,58		
	IV	5,30	6,00	5,65	36,42		
68	I	4,90	5,60	5,25	42,78		
	II	5,40	6,50	5,95	32,45		
	III	5,10	5,40	5,25	42,78		
69	I	5,50	6,10	5,80	34,36	138,16	11932,35
	II	5,60	4,90	5,25	42,78	114,92	11737,60
	III	5,10	6,00	5,55	37,88	100,32	9992,78
	IV	5,70	5,50	5,60	37,14		
	V	4,90	4,40	4,65	55,54		
70	I	5,80	5,20	5,50	38,64	133,53	13105,86
	II	4,80	4,60	4,70	54,28	137,91	13109,37
	III	5,50	5,60	5,55	37,88	138,47	12269,60

Резултати мерења механичких својстава храстовине							
Даска	Епрувета	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{sr} (mm)	Тврдоћа (N/mm ²)	Савојна чврстоћа (N/mm ²)	Модул еластичности (N/mm ²)
	IV	4,40	5,20	4,80	51,90		
	V	5,10	5,80	5,45	39,42		
	VI	4,80	5,60	5,20	43,68		
71	I	6,00	5,20	5,60	37,14	138,27	11887,14
	II	4,80	4,90	4,85	50,76	139,24	11976,40
	III	4,90	5,10	5,00	47,54	132,72	11484,21
	IV	5,60	5,80	5,70	35,71		
72	I	5,40	5,90	5,65	36,42		
	II	5,80	6,50	6,15	30,12		
73	I	6,10	6,20	6,15	30,12	112,18	9107,88
	II	5,60	5,50	5,55	37,88	103,13	9499,33
	III	6,00	5,10	5,55	37,88	104,01	9959,16
	IV	6,40	5,60	6,00	31,85		
	V	6,10	5,90	6,00	31,85		
74	I	4,60	5,30	4,95	48,58	128,70	10983,52
	II	5,20	5,40	5,30	41,90	136,48	10640,14
	III	4,90	5,10	5,00	47,54	126,11	10357,45
	IV	5,40	4,60	5,00	47,54		
75	I	4,80	5,10	4,95	48,58		
	II	6,30	5,90	6,10	30,68		
	III	5,90	4,80	5,35	41,05		
	IV	5,50	5,20	5,35	41,05		

8.2 Резултати мерења снаге резања

Табела 8.3: Измерене вредности снага резања при брзини помоћног кретања $u = 4$ m/min

Резултати мерења снага резања при обимном глодању							
Даска	$u_1 a_1 \gamma_1$	Даска	$u_1 a_3 \gamma_1$	Даска	$u_1 a_1 \gamma_3$	Даска	$u_1 a_3 \gamma_3$
D22 – 1	222,66	D14 – 1	421,07	D22 -9	227,61	D9 – 1	395,47
D22 – 2	228,56	D14 – 2	417,11	D22 -10	219,06	D9 – 2	389,77
D22 – 3	230,29	D14 – 3	417,07	D22 -11	220,57	D9 – 3	387,84
D22 – 4	227,75	D14 – 4	416,81	D22 -12	213,94	D9 – 4	401,63
D22 – 5	236,45	D14 – 5	426,58	D22 -13	230,4	D9 – 5	396,82
D67 – 1	288,56	D14 – 6	440,93	D22 -14	219,52	D9 – 6	383,74

Резултати мерења снага резања при обимном глодању							
Даска	$u_1 a_1 \gamma_1$	Даска	$u_1 a_3 \gamma_1$	Даска	$u_1 a_1 \gamma_3$	Даска	$u_1 a_3 \gamma_3$
D67 - 2	282,29	D14 - 7	434,65	D67 - 8	246,94	D9 - 7	396,55
D67 - 3	289,08	D14 - 8	426,87	D67 - 9	247,08	D9 - 8	395,28
D67 - 4	282,89	D14 - 9	429,2	D67 - 10	243,03	D61 - 1	402,61
D67 - 5	299,87	D51 - 8	412,51	D67 - 11	230,87	D61 - 2	397,71
D67 - 6	293,28	D51 - 9	407,13	D67 - 12	238,37	D61 - 3	415,01
D67 - 7	297,26	D74 - 1	436,51	D67 - 13	244,6	D61 - 4	390,7
D67 - 23	303,8	D74 - 2	434,66	D67 - 14	245,4	D61 - 5	389,97
D67 - 24	305,45	D74 - 3	445,2	D67 - 15	246,51	D61 - 6	385,23
D67 - 25	306,74	D74 - 4	434,52	D67 - 16	246,44	D61 - 7	389,03
D67 - 27	306,74	D74 - 5	427,79	D67 - 17	244,74	D61 - 8	380,7
		D74 - 6	423,31	D67 - 18	247,09	D61 - 9	383,29
		D74 - 7	426,61	D67 - 19	244,05	D61 - 10	382,8

Табела 8.4: Измерене вредности снага резања при брзини помоћног кретања $u = 8 \text{ m/min}$

Резултати мерења снага резања при обимном глодању							
Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$
D42 - 1	415,48	D69 - 1	466,09	D56 - 13	504,31	D19 - 4	458,31
D42 - 2	422,96	D69 - 2	465,71	D56 - 14	504,54	D19 - 5	436,19
D42 - 3	423,3	D69 - 3	478,06	D29 - 1	470,15	D19 - 6	442,92
D42 - 4	418,56	D56 - 1	499,42	D29 - 2	479,69	D19 - 7	456,79
D42 - 5	444,72	D56 - 2	474,46	D29 - 3	477,3	D19 - 8	445,76
D42 - 6	457,71	D56 - 3	474,61	D29 - 4	473,33	D19 - 9	461,47
D42 - 7	473,35	D56 - 4	484,13	D29 - 5	462,8	D58 - 1	438,38
D42 - 8	478,81	D56 - 5	466,96	D29 - 6	453,66	D58 - 2	450,41
D44 - 1	491,92	D56 - 6	460,96	D29 - 7	474,52	D58 - 3	445,78
D44 - 2	498,25	D56 - 7	461,52	D29 - 8	467,2	D58 - 4	453,08
D44 - 3	498,73	D56 - 8	494,73	D29 - 9	453,52	D58 - 5	447,7
D44 - 4	496,13	D56 - 9	490,86	D29 - 10	460,92	D58 - 6	464,92
D44 - 5	463,34	D56 - 10	492,84	D19 - 1	492,27	D58 - 7	471,36
D69 - 1	424,26	D56 - 11	490,66	D19 - 2	499,62	D58 - 8	471,83
D69 - 2	443,8	D56 - 12	499,1	D19 - 3	504,45	D58 - 9	471,78

Табела 8.5: Измерене вредности снага резања при брзини помоћног кретања $u = 16$ m/min

Резултати мерења снага резања при обимном глодању							
Даска	$u_3 a_1 \gamma_1$	Даска	$u_3 a_3 \gamma_1$	Даска	$u_3 a_1 \gamma_3$	Даска	$u_3 a_3 \gamma_3$
D10 - 1	598,4	D53 - 1	993,21	D20 - 2	415,95	D41 - 1	838,51
D10 - 2	589,5	D53 - 2	1011,52	D20 - 3	404,88	D41 - 2	831,56
D10 - 3	616,44	D53 - 3	1036,58	D20 - 4	399,69	D41 - 3	821,72
D10 - 4	636,42	D53 - 4	1041,47	D20 - 5	398,39	D41 - 4	811,79
D10 - 5	646,22	D53 - 5	1057,33	D20 - 6	406,64	D41 - 5	808,58
D10 - 6	624,07	D53 - 6	1076,37	D20 - 7	401,83	D71 - 1	832
D10 - 7	607,93	D53 - 7	1075,16	D20 - 8	406,56	D71 - 2	851,14
D10 - 8	603,91	D53 - 8	1074,05	D70 - 1	429,41	D71 - 3	847,02
D10 - 9	608,06	D53 - 9	1075,54	D70 - 2	415,09	D71 - 4	844,47
D46 - 1	482,52	D53 - 10	1082,85	D70 - 3	404,23	D71 - 5	836,23
D46 - 2	478,35	D53 - 11	1086,55	D70 - 4	405,12	D71 - 6	825,76
D46 - 3	449,81	D53 - 12	1070,44	D70 - 5	414,57	D71 - 7	843,5
D46 - 4	466,93	D53 - 13	1054,79	D70 - 6	417,11	D71 - 8	841,97
D46 - 5	457,3	D53 - 14	1073,43	D70 - 7	421,52	D71 - 9	797,42
D46 - 6	465,86	D53 - 15	1048,6	D70 - 8	406,33	D71 - 10	827,28
D46 - 7	466,29			D70 - 9	423,33		
D46 - 8	460,02			D70 - 10	423,97		
				D70 - 11	435,67		
				D70 - 12	428,01		

8.3 Резултати мерења сила резања

Табела 8.6: Измерене вредности сила резања при брзини помоћног кретања $u = 4$ m/min

Резултати мерења сила резања при обимном глодању					
Режим	$u_1 a_1 \gamma_1$				
Епрувета	F_x [N]	F_y [N]	F_{ob} [N]	F_{rad} [N]	F_{uk} [N]
60B6-2	8,427	-0,651	7,545	2,254	12,049
60B6-3	9,842	-0,647	8,911	2,659	14,501
60B6-5	9,551	-0,325	8,781	2,725	12,722
60B7-1	8,013	0,755	7,518	3,563	11,624
60B7-3	9,138	0,315	8,304	3,647	16,538

Резултати мерења сила резања при обимном глодању					
Режим	$u_1 a_3 \gamma_1$				
Епрувета	F_x [N]	F_y [N]	F_{ob} [N]	F_{rad} [N]	F_{uk} [N]
60B8-1	16,631	-1,643	14,86	3,841	21,341
60B8-2	18,094	-3,209	15,631	2,816	21,82
60C1-1	15,821	-1,553	13,616	4,178	19,335
60C1-2	17,267	-2,212	15,04	3,681	21,537
60C2-1	15,317	-2,829	14,398	0,802	19,446
Режим	$u_1 a_1 \gamma_3$				
Епрувета	F_x [N]	F_y [N]	F_{ob} [N]	F_{rad} [N]	F_{uk} [N]
60C3-1	12,165	4,851	11,752	8,31	17,856
60C3-3	13,734	2,816	12,527	7,37	18,319
60C3-6	11,543	4,42	11,285	8,391	15,256
60C4-2	10,623	2,436	10,042	5,767	13,612
60C4-3	11,496	2,575	10,901	6,258	14,317
Режим	$u_1 a_3 \gamma_3$				
Епрувета	F_x [N]	F_y [N]	F_{ob} [N]	F_{rad} [N]	F_{uk} [N]
60C5-1	17,191	-1,643	15,904	2,904	19,857
60C5-2	18,257	-2,4	16,896	1,857	21,4
60C6-2	19,706	-1,969	17,646	3,53	22,771
60C7-1	16,084	-2,658	14,861	1,009	18,054
60C7-2	20,204	-0,982	17,993	5,164	23,304

Табела 8.7: Измерене вредности сила резања при брзини помоћног кретања $u = 8 \text{ m/min}$

Резултати мерења сила резања при обимном глодању					
Режим	$u_2 a_2 \gamma_2$				
Епрувета	F_x [N]	F_y [N]	F_{ob} [N]	F_{rad} [N]	F_{uk} [N]
60B2-1	16.106	1.598	14.973	3.675	20.941
60B2-2	20.907	1.114	19.141	7.784	26.038
60B2-3	20.446	1.497	18.195	8.868	25.748
60B2-4	20.777	2.085	18.803	9.287	25.376
Режим	$u_2 a_2 \gamma_2$				
Епрувета	F_x [N]	F_y [N]	F_{ob} [N]	F_{rad} [N]	F_{uk} [N]

Резултати мерења сила резања при обимном глодању					
60B3-1	15.824	-0.198	14.605	4.606	19.367
60B3-2	20.517	-1.008	17.981	6.532	24.516
60B3-3	17.26	1.155	16.017	6.59	24.325
60B3-4	19.661	-0.6	17.163	6.379	23.54
Режим	$u_2 a_2 \gamma_2$				
Епрувета	F_x [N]	F_y [N]	F_{ob} [N]	F_{rad} [N]	F_{uk} [N]
60B4-1	16.974	0.213	15.566	5.286	20.724
60B4-2	19.967	0.976	17.831	8.393	24.925
60B4-3	18.963	1.072	16.618	8.669	24.054
60B4-4	20.175	0.962	18.224	7.864	24.366
Режим	$u_2 a_2 \gamma_2$				
Епрувета	F_x [N]	F_y [N]	F_{ob} [N]	F_{rad} [N]	F_{uk} [N]
60B5-1	16.568	-0.052	14.938	5.558	19.894
60B5-2	18.264	-1.012	16.599	4.719	21.295
60B5-3	18.788	-0.529	16.817	5.916	22.228
60B5-4	18.257	0.223	16.389	6.41	21.255

Табела 8.8: Измерене вредности сила резања при брзини помоћног кретања $u = 16$ m/min

Резултати мерења сила резања при обимном глодању					
Режим	$u_3 a_1 \gamma_1$				
Епрувета	F_x [N]	F_y [N]	F_{ob} [N]	F_{rad} [N]	F_{uk} [N]
60A5-1	15.637	-1.234	14.632	3.253	19.394
60A5-2	16.388	-2.715	15.547	0.975	18.192
60A5-3	19.003	-3.416	17.919	0.942	20.651
60A5-4	21.324	-1.902	19.229	5.124	23.717
60A5-5	18.91	-2.572	17.438	2.643	20.577
60A5-6	18.798	-2.624	17.515	2.38	20.628
Режим	$u_3 a_3 \gamma_1$				
Епрувета	F_x [N]	F_y [N]	F_{ob} [N]	F_{rad} [N]	F_{uk} [N]
60A6-1	31.749	-8.125	27.711	2.682	40.559
60A6-2	29.302	-7.599	25.937	1.524	34.201
60A7-1	32.393	-8.248	27.698	3.136	40.061
60A7-2	24.648	-8.529	22.541	3.347	30.83

Резултати мерења сила резања при обимном глодању					
60A8-1	27.508	-7.355	24.29	0.349	31.695
Режим	$u_3 a_1 \gamma_3$				
Епрувета	F_x [N]	F_y [N]	F_{ob} [N]	F_{rad} [N]	F_{uk} [N]
60A3-1	13.912	-0.59	13.052	2.923	15.768
60A3-2	15.052	-0.6	13.748	3.867	17.172
60A3-3	14.557	-0.463	13.592	3.278	16.331
60A3-4	15.071	-0.909	14.246	2.891	17.214
60A3-5	14.15	-1.16	13.213	2.37	15.566
Режим	$u_3 a_3 \gamma_3$				
Епрувета	F_x [N]	F_y [N]	F_{ob} [N]	F_{rad} [N]	F_{uk} [N]
60A1-2	26.516	-6.014	22.202	3.212	31.026
60A2-1	25.222	-5.26	21.974	1.677	30.691
60A2-2	28.209	-3.095	23.485	8.162	33.218
60C8-1	20.403	-5.389	17.888	0.487	27.909
60C8-2	29.097	-6.622	24.051	4.531	35.294

8.4 Резултати мерења параметара храпавости површине

Табела 8.9: Измерене вредности храпавости површине за брзину помоћног кретања $u = 4$ m/min

Резултати мерења Ra управно на правац протезања дрвних влакана							
Даска	$u_1 a_1 \gamma_1$	Даска	$u_1 a_3 \gamma_1$	Даска	$u_1 a_1 \gamma_3$	Даска	$u_1 a_3 \gamma_3$
D22	6,77	D51	1,89	D22	6,52	D9	6,6
D22	2,43	D51	4,72	D22	4,44	D9	7,65
D22	4,32	D51	8,85	D22	3,74	D9	7,45
D22	5,01	D51	6,13	D22	6,87	D9	7,28
D22	1,89	D51	4,98	D22	3,12	D9	9,15
D22	1,74	D51	5,57	D22	2,36	D61	6,88
D22	1,8	D51	3,43	D22	1,77	D61	6,57
D22	1,63	D14	4,8	D22	1,8	D61	6,49
D67	2,28	D14	2,72	D22	1,69	D61	6,86
D67	3,45	D14	2,58	D22	1,44	D61	7,46
D67	2,14	D14	8,21	D22	1,78	D61	7,72
D67	2,55	D14	5,19	D67	8,45	D61	7,11

Резултати мерења Ra управно на правац протезања дрвних влакана							
Даска	$u_1 a_1 \gamma_1$	Даска	$u_1 a_3 \gamma_1$	Даска	$u_1 a_1 \gamma_3$	Даска	$u_1 a_3 \gamma_3$
D67	2,8	D14	5,63	D67	2,56	D61	6,06
D67	5,75	D14	5,08	D67	2,21	D61	4,97
D67	4,04	D14	4,53	D67	2,09	D61	5,51
D67	7,77	D74	5,6	D67	1,87	D61	8,53
D67	4,66	D74	6,7	D67	2,44	D61	8,09
D67	1,89	D74	5,78	D67	1,77	D61	8,12
D67	2,16	D74	2,58	D67	5,14	D61	7,03
D67	6,07	D74		D67	5,3		
D67	7,86	D74	3,72		5,97		
D67	6,85						

Табела 8.10: Измерене вредности храпавости површине за брзину помоћног кретања $u = 8 \text{ m/min}$

Резултати мерења Ra управно на правац протезања дрвних влакана							
Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$
D19	2,5	D58	6,59	D69	7,66	D56	5,71
D19	3,02	D58	5,92	D69	4,11	D56	5,34
D19	3,27	D58	5,11	D69	8,47	D56	3,66
D19	3,43	D58	6,72	D69	14,51	D56	6,73
D19	6,29	D58	6,37	D69	8,47	D56	8,36
D19	4,24	D58	5,11	D69	5,05	D56	8,54
D19	5,63	D58	7,51	D69	4,09	D56	6,42
D19	5,76	D58	6,15	D69	5,17	D56	9,84
D42	10,96	D58	6,43	D44	5,37	D56	7,34
D42	2,35	D58	7,34	D44	4,44	D56	8
D42	8,25	D58	6,68	D44	4,32	D56	6,32
D42	10,65	D58	6,72	D44	5,07	D56	8,7
D42	11,6	D58	6,78	D44	6,59	D56	7,95
D42	8,29	D58	5,6	D44	6,08	D56	8,13
D42	7,97	D58	7,13	D44	7,3	D56	6,44
D42	5,92	D58	6,03	D44	4,01	D56	4,1
D42	3,21	D58	5,41	D44	4,85	D56	7,33
D42	10,8	D29	6,51	D44	3,77	D56	

Резултати мерења Ra управно на правац протезања дрвних влакана							
Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$
D42	5,23	D29	9,32	D44	6,52	D56	5,28
D42	4,03	D29	7,88	D44	4,35	D56	7,91
D42	7,8	D29	8,41				
D42	5,92	D29	9,53				
D42	7,44	D29	7,75				
D42	5,24	D29	5,41				
		D29	10,72				
		D29	2,91				
		D29	3,99				
		D29	6,95				
		D29	10,63				

Табела 8.11: Измерене вредности храпавости површине за брзину помоћног кретања $u = 16 \text{ m/min}$

Резултати мерења Ra управно на правац протезања дрвних влакана							
Даска	$u_3 a_1 \gamma_1$	Даска	$u_3 a_3 \gamma_1$	Даска	$u_3 a_1 \gamma_3$	Даска	$u_3 a_3 \gamma_3$
D10	11,36	D53	4,71	D20	9,36	D71	9,18
D10	4,63	D53	6,49	D20	2,85	D71	8,1
D10	2,06	D53	7,36	D20	12,82	D71	11
D10	2,59	D53	7,63	D20	9,69	D71	11,62
D10	2,05	D53	7,39	D20	8,03	D71	9,26
D10	3,07	D53	14,54	D20	3,58	D71	9,7
D10	5,24	D53	9,03	D20	3,48	D71	11,05
D10	4,26	D53	6,07	D20	7,6	D71	8,97
D10	8,16	D53	8,05	D70	6,34	D71	10,28
D10	7,14	D53	5,45	D70	3,87	D71	7,25
D10	5,08	D53	4	D70	6,51	D71	10,48
D10	5,62	D53	7,71	D70	6,31	D71	7,29
D10	5,06	D53	7,02	D70	3,3	D71	9,59
D10	5,81	D53	4,01	D70	3,15	D71	9,28
D10	10,46	D53	5,71	D70	3,4	D71	6,73
D46	11,64	D53	9,94	D70	6,19	D71	8,59
D46	15,49	D53	4,36	D70	10,75	D71	7,64

D46	12,14	D53	6,09	D70	3,42	D71	8,64
D46	14,58	D53	8,11	D70	2,7	D71	10,36
D46	14	D53	10,19	D70	4,1	D41	6,06
D46	2,42	D53	10,26	D70	3,16	D41	5
D46	3,18	D53	6,86	D70	10,5	D41	11,07
D46	9,51	D53	7,94	D70	7,81		
D46	3,24	D53	8,12	D70	3,72		
D46	4,46						

Табела 8.12: Измерене вредности храпавости површине за брзину помоћног кретања $u = 4 \text{ m/min}$

Резултати мерења Ra паралелно са правцем протезања дрвних влакана							
Даска	$u_1 a_1 \gamma_1$	Даска	$u_1 a_3 \gamma_1$	Даска	$u_1 a_1 \gamma_3$	Даска	$u_1 a_3 \gamma_3$
D22	1,22	D51	1,68	D22	1,33	D9	0,98
D22	3,04	D51	0,74	D22	0,81	D9	6,54
D22	2,2	D51	0,65	D22	1,09	D9	1,63
D22	0,95	D51	0,88	D22	0,9	D9	2,06
D22	0,67	D51	3,08	D22	0,69	D9	6,92
D22	1,49	D51	0,59	D22	0,94	D9	4,2
D22	1,42	D51	1,58	D22	1,15	D9	1,49
D22	1,05	D51	2,16	D22	0,94	D9	2,73
D22	0,73	D51	1,82	D22	3,82	D9	1,74
D22	0,93	D51	2,04	D22	1,46	D9	1,37
D67	0,99	D14	1,12	D67	1,69	D61	1,82
D67	1,3	D14	0,53	D67	2,13	D61	2,06
D67	3,45	D14	0,99	D67	1,17	D61	1,14
D67	1,73	D14	0,92	D67	1,49	D61	0,94
D67	0,87	D14	3,23	D67	0,9	D61	4,19
D67	0,83	D14	3,36	D67	0,88	D61	1,98
D67	1,03	D14	1,89	D67	1,37	D61	3,43
D67	2,22	D14	2,73	D67	1,26	D61	1,88
D67	1,6	D14	3,9	D67	1,96	D61	1,88
D67	1,39	D14	1,45	D67	1,72	D61	1,16
D67	2	D74	1,21			D61	1,07
D67	2,4	D74	1,48			D61	2,21

Резултати мерења Ra паралелно са правцем протезања дрвних влакана							
Даска	$u_1 a_1 \gamma_1$	Даска	$u_1 a_3 \gamma_1$	Даска	$u_1 a_1 \gamma_3$	Даска	$u_1 a_3 \gamma_3$
D67	3,51	D74	1,05			D61	1,96
D67	2,03	D74	1,92			D61	2,02
D67	3,43	D74	1,01			D61	3,78
D67	2,46	D74	1,58			D61	2,09
D67	1,37	D74	0,92			D61	1,8
D67	1,52	D74	1,71			D61	1,61
D67	1,27	D74	1,68			D61	1,69
		D74	2,23			D61	1,61
						D61	2,11

Табела 8.13: Измерене вредности хрпавости површине за брзину помоћног кретања $u = 8 \text{ m/min}$

Резултати мерења Ra паралелно са правцем протезања дрвних влакана							
Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$
D19	5,56	D58	2,38	D69	1,92	D56	1,2
D19	1,83	D58	3,65	D69	1,14	D56	1,81
D19	1,54	D58	2,65	D69	5,35	D56	1,69
D19	1,14	D58	1,3	D69	2,49	D56	1,82
D19	1,82	D58	2,35	D69	4,16	D56	1,65
D19	1,59	D58	1,46	D69	1,84	D56	1,18
D19	1,05	D58	1,29	D69	1,72	D56	2,35
D19	1,22	D58	1,64	D69	1,21	D56	1,58
D19	2,91	D58	2,15	D69	1,95	D56	2,35
D19	1	D58	3,14	D69	6,1	D56	1,08
D19	1,13	D58	1,29	D69	1,98	D56	1,07
D42	0,9	D58	2,31	D44	3,05	D56	1,51
D42	0,87	D58	1,41	D44	1,12		
D42	2,66	D58	2,02	D44	2,8		
D42	2,65	D58	1,5	D44	1,54		
D42	0,76	D58	2,57	D44	1		
D42	1,63	D58	1,36	D44	1,07		
D42	2,33	D58	2,06	D44	2,12		
D42	0,98	D29	2,01	D44	3,36		

Резултати мерења Ra паралелно са правцем протезања дрвних влакана							
Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$
D42	1,57	D29	2,66	D44	0,88		
D42	1,57	D29	1,88	D44	1,91		
D42	4,31	D29	1,34	D44	2,62		
D42	1,21	D29	1,08	D44	1,79		
D42	1,42	D29	1,5	D44	1,44		
D42	1,2	D29	1,72	D44	2,06		
D42	1,72	D29	1,78	D44	2,43		
D42	1,94	D29	1,45	D44	1,49		
D42	2,8	D29	1,02	D44	2,4		
D42	1,49	D29	1,98				
D42	1,28	D29	2,24				
		D29	1,64				
		D29	1,18				
		D29	1,26				
		D29	1,05				
		D29	1,93				

Табела 8.14: Измерене вредности храпавости површине за брзину помоћног кретања $u = 16 \text{ m/min}$

Резултати мерења Ra паралелно са правцем протезања дрвних влакана							
Даска	$u_3 a_1 \gamma_1$	Даска	$u_3 a_3 \gamma_1$	Даска	$u_3 a_1 \gamma_3$	Даска	$u_3 a_3 \gamma_3$
D10	2,43	D53	3,27	D20	1,88	D71	1,59
D10	1,65	D53	1,98	D20	2,06	D71	2,02
D10	3,42	D53	2,04	D20	2,88	D71	2,2
D10	2,22	D53	1,46	D20	1,87	D71	2,23
D10	1,78	D53	1,4	D20	2,11	D71	1,73
D10	1,35	D53	1,16	D20	4,41	D71	2,2
D10	2,08	D53	2,51	D20	1,46	D71	1,7
D10	2,05	D53	1,73	D20	2,59	D71	2,1
D10	3,75	D53	1,67	D20	2,12	D71	2,85
D10	2,64	D53	1,62	D20	2,8	D71	2,79
D10	1,83	D53	1,59	D70	2,26	D71	4,03
D10	2,15	D53	2,07	D70	1,87	D71	2,08

Резултати мерења R_a паралелно са правцем протезања дрвних влакана							
Даска	$u_3 a_1 \gamma_1$	Даска	$u_3 a_3 \gamma_1$	Даска	$u_3 a_1 \gamma_3$	Даска	$u_3 a_3 \gamma_3$
D10	1,69	D53	2	D70	1,29	D71	2,54
D10	2,17	D53	2,22	D70	1,94	D71	5,02
D10	1,81	D53	1,81	D70	1,23	D71	1,77
D10	1,88	D53	2,37	D70	1,92	D71	2,34
D10	2,04	D53	2,08	D70	1,23	D71	2,15
D10	2,17	D53	1,65	D70	0,77	D71	1,95
D10	1,74	D53	1,83	D70	1,5	D41	3,21
D10	2,08	D53	1,99	D70	2,19	D41	3,37
D46	4,78	D53	2,16	D70	2,54	D41	3,36
D46	3,01	D53	1,52	D70	2,12	D41	5,21
D46	3,94	D53	1,57	D70	1,91	D41	1,94
D46	4,55	D53	1,63	D70	1,45	D41	2,51
D46	3,74	D53	1,82	D70	2,23	D41	2,56
D46	2,82	D53	2,61	D70	1,8	D41	4,5
D46	3,1	D53	2,48	D70	1,89	D41	5,02
D46	1,78	D53	1,9	D70	1,8		
D46	2,6	D53	1,97	D70	1,53		
D46	2,22	D53	1,31	D70	1,48		
D46	2,88			D70	3,1		

8.5 Резултати испитивања утицаја густине на снагу резања

Табела 8.15: Измерене вредности снага резања за испитивање утицаја густине на снагу резања

Резултати мерења снаге резања за нулти режим обраде							
Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$
D42 - 1	415,48	D56 - 1	499,42	D29 - 1	470,15	D13-1	473.28
D42 - 2	422,96	D56 - 2	474,46	D29 - 2	479,69	D13-2	469.45
D42 - 3	423,3	D56 - 3	474,61	D29 - 3	477,3	D13-3	471.19
D42 - 4	418,56	D56 - 4	484,13	D29 - 4	473,33	D13-4	464.04
D42 - 5	444,72	D56 - 5	466,96	D29 - 5	462,8	D13-5	471.56
D42 - 6	457,71	D56 - 6	460,96	D29 - 6	453,66	D13-6	433.25
D42 - 7	473,35	D56 - 7	461,52	D29 - 7	474,52	D13-7	494.13
D42 - 8	478,81	D56 - 8	494,73	D29 - 8	467,2	D13-8	508.42

Резултати мерења снаге резања за нулти режим обраде							
Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$	Даска	$u_2 a_2 \gamma_2$
D44 - 1	491,92	D56 - 9	490,86	D29 - 9	453,52	D13-9	539.89
D44 - 2	498,25	D56 - 10	492,84	D29 - 10	460,92	D13-10	554.95
D44 - 3	498,73	D56 - 11	490,66	D58 - 1	438,38	D13-11	582.99
D44 - 4	496,13	D56 - 12	499,1	D58 - 2	450,41	D13-12	567.17
D44 - 5	463,34	D56 - 13	504,31	D58 - 3	445,78	D13-13	577.56
D69 - 1	424,26	D56 - 14	504,54	D58 - 4	453,08	D34 - 1	403.97
D69 - 2	443,8	D32 - 1	398.07	D58 - 5	447,7	D34 - 1	391.69
D69 - 3	466,09	D32 - 2	404.79	D58 - 6	464,92	D34 - 1	408.99
D69 - 4	465,71	D32 - 3	395.54	D58 - 7	471,36	D34 - 1	405.88
D69 - 5	478,06	D32 - 4	398.67	D58 - 8	471,83	D34 - 1	415.1
D19 - 1	492,27	D32 - 5	405.65	D58 - 9	471,78	D34 - 1	384.02
D19 - 2	499,62	D32 - 6	416.63			D34 - 1	400.39
D19 - 3	504,45	D32 - 7	408.8			D34 - 1	407.05
D19 - 4	458,31	D32 - 18	412.23			D34 - 1	419.28
D19 - 5	436,19					D34 - 1	419.889
D19 - 6	442,92					D34 - 1	416.8
D19 - 7	456,79					D34 - 1	430.13
D19 - 8	445,76					D34 - 1	431.1
D19 - 9	461,47					D34 - 1	

8.6 Резултати испитивања утицаја оријентације влакана на силе резања

Табела 8.16: Измерене вредности сила резања за различиту оријентацију дрвних влакана

	Резултати мерења сила резања за угао $\phi_s = 0^\circ$							
	$a_1 \gamma_1$	$a_2 \gamma_1$	$a_3 \gamma_1$	$a_1 \gamma_2$	$a_2 \gamma_2$	$a_3 \gamma_2$	$a_1 \gamma_3$	$a_2 \gamma_3$
F_{om}	28.72	35.36	41.39	32.13	33.16	51.14	30.71	36.19
[N]	28.81	35.07	49.74	29.76	33.12	51.82	28.12	39.3
F_{uk}	33.02	41.77	50.15	36.37	37.77	56.87	36.67	41.54
[N]	31.35	40.01	57.72	33.85	38.06	60.71	33.82	45.28
P	149.12	210.24	271.8	193.78	254.62	329.1	162.78	216.82
[W]	149.72	211.66	300.85	187.47	252.97	352.04	173.57	226.11
	Резултати мерења сила резања за угао $\phi_s = 15^\circ$							
F_{om}	32.27	47.69	61.03	54.55	66.87	65.35	41.91	61.02

[N]	31.43	40.33	55.68	49.28	68.61	73.02	39.33	64.91
F _{uk}	39.35	55.43	70.8	67.58	78.9	79.71	50.24	74.21
[N]	38.04	49.73	64.5	62.02	80.69	84.11	45.63	77.96
P	200.23	274.92	357.2	264.72	406.94	434.02	231.23	314.14
[W]	214.9	292.11	370.21	297.66	407.43	420.82	249.03	319.81
Резултати мерења сила резања за угао $\phi_s = 30^\circ$								
F _{om}	47.04	62.94	93.68	52.52	64.32	88.06	52.73	73.62
[N]	46.17	68.1	87.28	61.02	67.27	/	47.55	72.14
F _{uk}	56.96	72.63	108.16	69.44	80.62	107.2	68.71	90.06
[N]	55.22	73.75	101.07	77.16	82.21	/	63.5	89.13
P	265.29	388.55	547.34	327.58	440.42	601.07	347.17	437.26
[W]	294.41	422.94	545.19	344.64	437.7	605.78	334.17	450.52
Резултати мерења сила резања за угао $\phi_s = 45^\circ$								
F _{om}	60.23	64.91	99.11	74.99	79.05	106.03	65.84	83.36
[N]	63.53	70.73	96.65	76.22	86.4	109.69	70.42	87.1
F _{uk}	71.02	73.54	108.7	91.09	95.18	121.29	87.62	98.07
[N]	75.06	78.83	110.89	89.11	100.46	123.41	83.6	102.35
P	302.03	450.01	633.51	379.83	465.36	645.11	379.3	458.94
[W]	298.89	457.96	649.4	394.88	483.64	667.44	335.94	473.87
Резултати мерења сила резања за угао $\phi_s = 90^\circ$								
F _{om}	65.95	87.5	117.53	83.86	112.96	132.24	68.16	100.98
[N]	61.35	91.21	101.42	82.81	114.47	124.51	76.65	97.57
F _{uk}	75.3	96.65	126.65	94.9	122.08	145.87	76.82	110.72
[N]	84.6	99.58	111.62	94.34	126.52	140.36	87.81	110.95
P	395.77	582.92	819.93	478.44	649.86	926.07	440.13	601.23
[W]	415.15	598.84	808.99	485.07	664.17	932.55	454.57	619.31

8.7 Програм за obradu rezultata izmerenih sila rezaња

```

clc
clear all
close all

datoteka = 'D68g2a2_merenje_02.txt';
ph = importdata(strcat('C:\Users\Marija\Desktop\radni_folder\nula stepeni\'',
datoteka), '\t', 23);
vreme=ph.data(:,1);
F2=ph.data(:,2);
F1=ph.data(:,3);

figure (1);
subplot(2,1,1);
plot(vreme,F1);
title('Tangencijalna sila')
xlabel('Vreme [s]')
ylabel('Sila [N]')
hold on;
grid on;
subplot(2,1,2);
plot(vreme,F2);
title('Normalna sila')
xlabel('Vreme [s]')
ylabel('Sila [N]')
hold on;
grid on;

% stampanje rezultata suma
ParFit=0.99;
sum_F1 = csaps(vreme,F1,ParFit,vreme);
sum_F2 = csaps(vreme,F2,ParFit,vreme);
% osrednjavanje suma za interval prve 0.5 sekunde
osr_sum_F1=mean(sum_F1(1:25000,1))
osr_sum_F2=mean(sum_F2(1:25000,1))

    for i=1:149999
        F1(i)=F1(i)-osr_sum_F1;
        F2(i)=F2(i)-osr_sum_F2;
    end

figure (2);
subplot(2,1,1);
plot(vreme,F1);
title('Tangencijalna sila')
xlabel('Vreme [s]')
ylabel('Sila [N]')
hold on;
grid on;
subplot(2,1,2);
plot(vreme,F2);
title('Normalna sila')
xlabel('Vreme [s]')
ylabel('Sila [N]')
hold on;
grid on;

Q=input('Unesi vrednost intervala u kom zelis stampanje rezultata [OD DO] ');
q1=Q(1)*50000;
q2=Q(2)*50000;

vremen=vreme(q1:q2);

```

```

F1n=F1(q1:q2);
F2n=F2(q1:q2);

figure (3);
subplot(2,1,1);
plot(vremen,F1n);
title('Tangencijalna sila uvecano')
xlabel('Vreme [s]')
ylabel('Sila [N]')
hold on;
grid on;
subplot(2,1,2);
plot(vremen,F2n);
title('Normalna sila uvecano')
xlabel('Vreme [s]')
ylabel('Sila [N]')
hold on;
grid on;

Q=input('Unesi vrednost intervala u kom zelis stampanje rezultata [OD DO] ');
q1=Q(1)*50000;
q2=Q(2)*50000;

vremen=vreme(q1:q2);
F1n=F1(q1:q2);
F2n=F2(q1:q2);

q11=q1/50000;
q22=q2/50000;
figure(5);
plot(vremen,F1n, vremen,F2n, 'r', 'LineWidth',2);
title('Uporedni prikaz obe sile uvecano')
xlabel('Vreme [s]')
ylabel('Sila [N]')
legend('Tangencijalna sila','Normalna sila','Location','northwest')
hold on;
grid on;
grid minor

matrix=[vremen F1n F2n];

%xlswrite('60B2_4.xls',matrix);

%dodatak integraljenje
dubina_rezanja=2;
poluprecnik_glodala=62.5;
ugao_0=acos((poluprecnik_glodala-dubina_rezanja)/poluprecnik_glodala)

%prvi zub glodala
brojac1=1;
while (brojac1)==1

poc_vreme=input('Unesi pocetno vreme prvog segmenta');
kraj_vreme=input('Unesi krajnje vreme prvog segmenta');

poc_vreme_umn1=poc_vreme*50000;
kraj_vreme_umn1=kraj_vreme*50000;
omega=602.69;

clear 'vreme_int1'
clear 'F1_int1'
clear 'F2_int1'

vreme_int1=vreme(poc_vreme_umn1:kraj_vreme_umn1);
F1_int1=F1(poc_vreme_umn1:kraj_vreme_umn1);

```

```

F2_int1=F2(poc_vreme_umn1:kraj_vreme_umn1);

duzina_intervala1=round(kraj_vreme_umn1-poc_vreme_umn1);

clear 'x1'
clear 'y1'
clear 'ugao_fil'
clear 'F_obim1'
clear 'F_ukupnol'
clear 'F_radijalno_prvog'

for i =1:duzina_intervala1+1;
    ugao_fil(i)=omega*(vreme_int1(i)-vreme_int1(1));
    x1(i)=sin(ugao_fil(i))*poluprecnik_glodala;
    y1(i)=cos(ugao_fil(i))*poluprecnik_glodala;

    F_obim1(i)=(F1_int1(i)*y1(i)+F2_int1(i)*x1(i))/poluprecnik_glodala;
    F_ukupnol(i)=sqrt(F1_int1(i)*F1_int1(i)+F2_int1(i)*F2_int1(i));

F_radijalno_prvog(i)=F2_int1(i)*cos(ugao_fil(i))+F1_int1(i)*sin(ugao_fil(i));
end

srednja_obimna1= trapz(ugao_fil, F_obim1);
srednja_ukupna1=trapz(ugao_fil,F_ukupnol);
srednja_ukupnaF1_prvog=trapz(ugao_fil, F1_int1);
srednja_ukupnaF2_prvog=trapz(ugao_fil, F2_int1);
srednja_radijalna_prvog=trapz(ugao_fil, F_radijalno_prvog);

srednja_obimna_podeljena1=srednja_obimna1/ugao_fil(duzina_intervala1+1);
srednja_ukupna_podeljena1=srednja_ukupna1/ugao_fil(duzina_intervala1+1);

close all
figure(6);
plot(ugao_fil,F_ukupnol, 'r', 'LineWidth',2);
title('Sila u prvom zubu')
xlabel('Ugao [rad]')
ylabel('Rezultujuca sila [N]')
%legend('Ukupna sila','Normalna sila','Location','northwest')
hold on;
grid on;

brojac1=input('1 - ODBIJAM\n 2 - PRIHVATAM\n');
end

%drugi zub glodala
brojac2=1;
while (brojac2)==1

poc_vreme=input('Unesi pocetno vreme drugog segmenta');
kraj_vreme=input('Unesi krajnje vreme drugog segmenta');

poc_vreme_umn2=poc_vreme*50000;
kraj_vreme_umn2=kraj_vreme*50000;

clear 'vreme_int2'
clear 'F1_int2'
clear 'F2_int2'

vreme_int2=vreme(poc_vreme_umn2:kraj_vreme_umn2);
F1_int2=F1(poc_vreme_umn2:kraj_vreme_umn2);
F2_int2=F2(poc_vreme_umn2:kraj_vreme_umn2);

duzina_intervala2=round(kraj_vreme_umn2-poc_vreme_umn2);

clear 'x2'

```

```

clear 'y2'
clear 'ugao_fi2'
clear 'F_obim2'
clear 'F_ukupno2'
clear 'F_radijalno_drugog'

for i =1:duzina_intervala2+1;
    ugao_fi2(i)=omega*(vreme_int2(i)-vreme_int2(1));
    x2(i)=sin(ugao_fi2(i))*poluprecnik_glodala;
    y2(i)=cos(ugao_fi2(i))*poluprecnik_glodala;

    F_obim2(i)=(F1_int2(i)*y2(i)+F2_int2(i)*x2(i))/poluprecnik_glodala;
    F_ukupno2(i)=sqrt(F1_int2(i)*F1_int2(i)+F2_int2(i)*F2_int2(i));

F_radijalno_drugog(i)=F2_int2(i)*cos(ugao_fi2(i))+F1_int2(i)*sin(ugao_fi2(i))
;

end

srednja_obimna2= trapz(ugao_fi2, F_obim2);
srednja_ukupna2=trapz(ugao_fi2,F_ukupno2);
srednja_ukupnaF1_drugog=trapz(ugao_fi2, F1_int2);
srednja_ukupnaF2_drugog=trapz(ugao_fi2, F2_int2);
srednja_radijalna_drugog=trapz(ugao_fi2, F_radijalno_drugog);

srednja_obimna_podeljena2=srednja_obimna2/ugao_fi2(duzina_intervala2+1);
srednja_ukupna_podeljena2=srednja_ukupna2/ugao_fi2(duzina_intervala2+1);

close all
figure(7);
plot(ugao_fi2,F_ukupno2, 'r', 'LineWidth',2);
title('Sila u drugom zubu')
xlabel('Ugao [rad]')
ylabel('Rezultujuca sila [N]')
hold on;
grid on;

brojac2=input('1 - ODBIJAM\n 2 - PRIHVATAM\n');

end

%treći zub glodala
brojac3=1;
while (brojac3)==1

poc_vreme=input('Unesi početno vreme trećeg segmenta');
kraj_vreme=input('Unesi krajnje vreme trećeg segmenta');

poc_vreme_umn3=poc_vreme*50000;
kraj_vreme_umn3=kraj_vreme*50000;

clear 'vreme_int3'
clear 'F1_int3'
clear 'F2_int3'

vreme_int3=vreme(poc_vreme_umn3:kraj_vreme_umn3);
F1_int3=F1(poc_vreme_umn3:kraj_vreme_umn3);
F2_int3=F2(poc_vreme_umn3:kraj_vreme_umn3);

duzina_intervala3=round(kraj_vreme_umn3-poc_vreme_umn3);

clear 'x3'
clear 'y3'
clear 'ugao_fi3'
clear 'F_obim3'

```

```

clear 'F_ukupno3'
clear 'F_radijalno_treceg'

for i =1:duzina_intervala3+1;
    ugao_fi3(i)=omega*(vreme_int3(i)-vreme_int3(1));
    x3(i)=sin(ugao_fi3(i))*poluprecnik_glodala;
    y3(i)=cos(ugao_fi3(i))*poluprecnik_glodala;

    F_obim3(i)=(F1_int3(i)*y3(i)+F2_int3(i)*x3(i))/poluprecnik_glodala;
    F_ukupno3(i)=sqrt(F1_int3(i)*F1_int3(i)+F2_int3(i)*F2_int3(i));

F_radijalno_treceg(i)=F2_int3(i)*cos(ugao_fi3(i))+F1_int3(i)*sin(ugao_fi3(i))
;

end

srednja_obimna3= trapz(ugao_fi3, F_obim3);
srednja_ukupna3=trapz(ugao_fi3,F_ukupno3);
srednja_ukupnaF1_treceg=trapz(ugao_fi3, F1_int3);
srednja_ukupnaF2_treceg=trapz(ugao_fi3, F2_int3);
srednja_radijalna_treceg=trapz(ugao_fi3, F_radijalno_treceg);

srednja_obimna_podeljena3=srednja_obimna3/ugao_fi3(duzina_intervala3+1);
srednja_ukupna_podeljena3=srednja_ukupna3/ugao_fi3(duzina_intervala3+1);

close all

figure(8);
plot(ugao_fi3,F_ukupno3, 'r', 'LineWidth',2);
title('Sila u trecem zubu')
xlabel('Ugao [rad]')
ylabel('Rezultujuca sila [N]')
hold on;
grid on;

brojac3=input('1 - ODBIJAM\n 2 - PRIHVATAM\n');
end

%cetvrti zub glodala
brojac4=1;
while (brojac4)==1

poc_vreme=input('Unesi pocetno vreme cetvrtog segmenta');
kraj_vreme=input('Unesi krajnje vreme cetvrtog segmenta');

poc_vreme_umn4=poc_vreme*50000;
kraj_vreme_umn4=kraj_vreme*50000;

clear 'vreme_int4'
clear 'F1_int4'
clear 'F2_int4'

vreme_int4=vreme(poc_vreme_umn4:kraj_vreme_umn4);
F1_int4=F1(poc_vreme_umn4:kraj_vreme_umn4);
F2_int4=F2(poc_vreme_umn4:kraj_vreme_umn4);

duzina_intervala4=round(kraj_vreme_umn4-poc_vreme_umn4);

clear 'x4'
clear 'y4'
clear 'ugao_fi4'
clear 'F_obim4'
clear 'F_ukupno4'
clear 'F_radijalno_cetvrtog'

```



```

for i =1:duzina_intervala4+1;
    ugao_fi4(i)=omega*(vreme_int4(i)-vreme_int4(1));
    x4(i)=sin(ugao_fi4(i))*poluprecnik_glodala;
    y4(i)=cos(ugao_fi4(i))*poluprecnik_glodala;

    F_obim4(i)=(F1_int4(i)*y4(i)+F2_int4(i)*x4(i))/poluprecnik_glodala;
    F_ukupno4(i)=sqrt(F1_int4(i)*F1_int4(i)+F2_int4(i)*F2_int4(i));

F_radijalno_cetvrtog(i)=F2_int4(i)*cos(ugao_fi4(i))+F1_int4(i)*sin(ugao_fi4(i));
end

srednja_obimna4= trapz(ugao_fi4, F_obim4);
srednja_ukupna4=trapz(ugao_fi4,F_ukupno4);
srednja_ukupnaF1_cetvrtog=trapz(ugao_fi4, F1_int4);
srednja_ukupnaF2_cetvrtog=trapz(ugao_fi4, F2_int4);
srednja_radijalna_cetvrtog=trapz(ugao_fi4, F_radijalno_cetvrtog);

srednja_obimna_podeljena4=srednja_obimna4/ugao_fi4(duzina_intervala4+1);
srednja_ukupna_podeljena4=srednja_ukupna4/ugao_fi4(duzina_intervala4+1);

close all

figure(9);
plot(ugao_fi4,F_ukupno4, 'r', 'LineWidth',2);
title('Sila u cetvrtom zubu')
xlabel('Ugao [rad]')
ylabel('Rezultujuca sila [N]')
hold on;
grid on;

brojac4=input('1 - ODBIJAM\n 2 - PRIHVATAM\n');

end

konacna_obimna=(srednja_obimna1+srednja_obimna2+srednja_obimna3+srednja_obimna4)/(2*pi);
konacna_ukupna=(srednja_ukupna1+srednja_ukupna2+srednja_ukupna3+srednja_ukupna4)/(2*pi);

srednja_ukupna_fin_Fx=(srednja_ukupnaF1_prvog+srednja_ukupnaF1_drugog+srednja_ukupnaF1_treceg+srednja_ukupnaF1_cetvrtog)/(2*pi);
srednja_ukupna_fin_Fy=(srednja_ukupnaF2_prvog+srednja_ukupnaF2_drugog+srednja_ukupnaF2_treceg+srednja_ukupnaF2_cetvrtog)/(2*pi);
srednja_ukupna_radijalna=(srednja_radijalna_prvog+srednja_radijalna_drugog+srednja_radijalna_treceg+srednja_radijalna_cetvrtog)/(2*pi);

% srednja_snaga=konacna_obimna*omega*poluprecnik_glodala/1000
ispis_obimna_sila=num2str(floor(konacna_obimna*1000)/1000);
ispis_snaga=num2str(floor(konacna_ukupna*1000)/1000);
ispis_Fx=num2str(floor(srednja_ukupna_fin_Fx*1000)/1000);
ispis_Fy=num2str(floor(srednja_ukupna_fin_Fy*1000)/1000);
ispis_Fr=num2str(floor(srednja_ukupna_radijalna*1000)/1000);

clc
disp(' +-----Rezultatati-----+')
disp(strcat('STAMPANJE REZULTATA EKSPERIMENTA ZA ZAPIS.....',datoteka))
disp('-----');
disp(strcat('Srednja sila Fx [N].....',ispis_Fx));
disp(strcat('Srednja sila Fy [N].....',ispis_Fy));
disp(strcat('Srednja obimna sila [N].....',ispis_obimna_sila));
disp(strcat('Srednja radijalna sila [N].....',ispis_Fr));
disp(strcat('Srednja ukupna sila [N].....',ispis_snaga));

```

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Марија Мандић је рођена 13.03.1982. године у Шапцу. Основну школу је завршила у Владимирцима као ђак генерације, а затим гимназију природно-математичког смера у Шапцу, са одличним успехом.

На Универзитет у Београду - Шумарски факултет, уписала се 2001. године на одсек Прерада дрвета. Основне студије завршила је 2008. године одбраном дипломског рада под насловом: „Одређивање апсорпције γ -зрачења у дрвету термо-јасена“, са оценом 10. Током основних студија остварила је просечну оцену 9,03.

Након дипломирања радила је годину дана у породичном предузећу „Дрвопрерада-Мандић“ у Скупљену. Исте године, 2008. уписује докторске студије на Универзитету у Београду - Шумарском факултету, на модулу Машине и уређаји у преради дрвета.

Радни однос је засновала 15.06.2009., на Универзитету у Београду - Шумарском факултету на катедри Машине и уређаји у преради дрвета, где је изабрана у звање асистента. Од заснивања радног односа изводи вежбе из предмета Машине и алати за обраду дрвета.

Осим тога, Марија Мандић је учествовала у два научна пројекта и била је члан у преко 30 комисија за одбрану дипломских радова из предмета: Машине и алати за обраду дрвета, Унутрашњи транспорт и Енергетика у преради дрвета. Објавила је два научна рада, шест радова на међународним научним скуповима и конференцијама и један стручни рад у периоду до 2015. године.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписана Марија Д. Мандић

број уписа: 2008/23

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

„Анализа обрадљивости хростовине при обимном глодању“

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

Потпис докторанда

У Београду, 10. новембра 2014. године

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме: аутора: Марија Д. Мандић

Број уписа: 2008/23

Студијски програм: Докторске студије – Машине и уређаји у преради дрвета

Наслов рада: „Анализа обрадљивости храстовине при обимном глодању“

Ментор: проф. Др Градимир Данон

Потписана Марија Д. Мандић

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

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

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

Потпис докторанда

У Београду, 10. новембра 2014. године

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

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

„Анализа обрадљивости хростовине при обимном глодању“

која је моје ауторско дело.

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

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

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

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

Потпис докторанда

У Београду, 10. новембра 2014. године

1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.