



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Naglis Ausmanas**

**MAŽOS GALIOS LAZERINIO DIODO PANAUDOJIMO,  
PJAUSTANT NEMETALINES MEDŽIAGAS, TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Jolanta Baskutienė

**KAUNAS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**MAŽOS GALIOS LAZERINIO DIODO PANAUDOJIMO,  
PJAUSTANT NEMETALINES MEDŽIAGAS, TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Mechanikos inžinerija (kodas 621H30001)

**Vadovas**

(parašas) Doc. dr. Jolanta Baskutienė  
(data)

**Recenzentas**

(parašas) Dr. Valdas Grigaliūnas  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Naglis Ausmanas  
(data)

**KAUNAS, 2017**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

**Naglis Ausmanas**

(Studento vardas, pavardė)

**Mechanikos inžinerija 621H30001**

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Baigiamojo projekto pavadinimas“

**AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA**

20 \_\_\_\_ m. \_\_\_\_\_ d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Naglio Ausmano**, baigiamasis projektas tema „MAŽOS GALIOS LAZERINIO DIODO PANAUDOJIMO, PJAUSTANT NEMETALINES MEDŽIAGAS, TYRIMAS“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Ausmanas Naglis. MAŽOS GALIOS LAZERINIO DIODO PANAUDOJIMO, PJAUSTANT NEMETALINES MEDŽIAGAS, TYRIMAS. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Jolanta Baskutienė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų sritis ir kryptis: Technologijos mokslai, Mechanikos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *lazeris, lazerinis diodas, lazerinis pjovimas, lazerio galia, spindulio bangos ilgis, pjūvio gylis, galvutės pastūmos greitis, pjovimo matematinis modelis.*

Kaunas, 2017. 48 p.

## SANTRAUKA

Magistro darbe atlikti teoriniai ir praktiniai nemetalinių medžiagų pjaustymo mažos galios lazeriniais diodais tyrimai. Lazerinis pjovimas, tai technologija, nukreipiant lazerio spindulį, dažniausiai per optinius lęšius, į pjaunamos medžiagos paviršių, kuris lazerio spindulio veikiamas išsilydo, sudega arba išgaruoja.

Šiuo metu nemetalinėms medžiagoms pjauti dažniausiai naudojami CO<sub>2</sub> lazeriai, kurių galia nuo 40 iki 100 vatų. Darbe išnagrinėti tokių lazerių trūkumai lyginant juos su mažos galios lazeriniais diodais. Taip pat atlikta nemetalinių medžiagų lazerinio pjovimo literatūros apžvalga parodo, kad nemetalinių medžiagų pjovimo mažos galios lazeriniais diodais tyrimai nėra išsamūs tiek pjaunamų medžiagų įvairovė, tiek pjovimo laiko optimalumo požiūriu. Darbe tiriamas 3 vatų ir 450 nanometrų mažos galios lazerinis diodas. Tai vienas iš galingiausių rinkoje esančių lazerinių diodų, Jo spindulio bangos ilgis yra vienas trumpiausių tarp kitų rinkoje esančių diodų, todėl spindulio absorbcija yra geresnė ir daugiau spindulio galios tenka medžiagos pjovimui.

Darbe išnagrinėta ir pritaikyta atviro kodo programinė įranga, skirta lazerinio diodo ir dviejų ašių rėmo valdymui naudojant G kodą.

Darbe modifikuotas literatūroje žinomas medžiagų pjovimo matematinis modelis, įvertinant, kad lazerio spindulys nebūtinai yra skritulio formos. Šis modelis buvo panaudotas matematiškai apdorojant eksperimento rezultatus. Atlikti PMMA plastiko, medžio, presuoto plaušo plokštės, medvilninių ir vilninių audinių, sintetinio veltinio ir odos pjovimo eksperimentai parodė, kad nagrinėjamas lazeris gali būti naudojamas šioms medžiagoms pjauti.

Remiantis darbe atliktais tyrimais, drauge su magistrinio darbo vadove buvo paruoštas straipsnis tarptautinei mechanikų konferencijai: „Naglis Ausmanas, Jolanta Baskutienė. The analysis of the nonmetallic materials cutting by a low power diode laser. Proceedings of 22nd International Conference „MECHANIKA 2017“

Ausmanas Naglis. *ANALYSIS OF NONMETALIC MATERIALS CUTTING BY LOW POWER DIODE LASER*: Master's thesis in Mechanical Engineering / supervisor assoc. prof. Jolanta Baskutienė. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study area and field: Technological Sciences, Mechanical Engineering

Key words: *laser, laser diode, laser cutting, laser power, depth of cut, laser feed rate, depth of cut mathematical model.*

Kaunas, 2017. 48 p.

## SUMMARY

In this master thesis theoretical and practical research were done in cutting nonmetal materials with a low power laser diode. Laser cutting is a technology where laser beam is focused on a cutting material surface which either melts, evaporates or burns away.

For cutting nonmetal materials CO<sub>2</sub> laser is usually used which has a power range from 40 to 100 watts. In this research, it is shown the advantages of a laser diode against a CO<sub>2</sub> laser. Literature analysis were done and it was found that there are not many articles where laser diode were used to cut nonmetal materials. In this research was used 3-watt power and 450 nanometers wavelength laser diode. This diode were chosen because it is one of the most powerful single laser diodes on the market and it has one of the shortest wavelength. Because of a shorter wavelength the absorption is better and more power could be used for cutting material.

Open source software were adapted to control a laser and a 2-axis frame with a computer using G code.

Mathematical model for calculating depth of cut were adapted to use it for calculating depth of cut for a rectangle beam shape, which is typical for laser diodes. This model were used to mathematically determine a depth of cut and to compare with a experimental value. PMMA plastic, wood, cotton, and wool fabric and leather were cut with a low power laser diode.

Using a data form this research the article were written and resented in a international conference: „Naglis Ausmanas, Jolanta Baskutienė. The analysis of the nonmetallic materials cutting by a low power diode laser. Proceedings of 22nd International Conference „MECHANIKA 2017“

## TURINYS

ĮVADAS.....	7
1. LITERATŪROS APŽVALGA.....	8
1.1. Lazerinis pjovimas.....	8
1.2. Lazerinio diodo privalumai ir trūkumai lyginant su CO2 lazeriu .....	9
1.3. Nemetalinių medžiagų pjovimas lazerio spinduliu .....	10
1.4. Lazerinių diodų panaudojimas pjaunant nemetalines medžiagas .....	11
1.5. Literatūros apžvalgos apibendrinimas .....	12
2. EKSPERMENTO ATLIKIMO METODIKA .....	13
2.1. Lazerio spindulio energijos ir pjūvio gylio apskaičiavimas .....	13
2.2. Formulės modifikacija, kai lazerio spindulys nėra skritulio formos .....	16
2.3. Parametrų $B$ ir $\omega$ apskaičiavimas mažiausių kvadratų metodu .....	16
3. TYRIMO ĮRANGA .....	18
3.1. Staklių valdiklis - Arduino .....	19
4. PROGRAMINĖ ĮRANGA SKIRTA PJOVIMUI NAUDOJANT LAZERINĮ DIODĄ .....	20
4.1. Programa <i>dxf2gcode</i> .....	20
4.2. Programa <i>UniversalGcodeSender</i> .....	25
4.3. Programa <i>grbl</i> .....	27
4.4. Pjovimo lazeriu informacijos paruošimo etapai .....	28
5. EKSPERMENTO REZULTATAI.....	29
5.1. Medžiagos pjovimo laiko apskaičiavimas.....	31
5.2. PMMA plastiko pjovimo tyrimas.....	31
5.3. Pušinės faneros pjovimo tyrimas.....	35
5.4. Presuotos plaušo plokštės pjovimo tyrimas .....	38
5.5. Medvilninio ir vilnonio audinio bei veltinio pjovimo tyrimas .....	40
5.6. Odos pjovimo tyrimas .....	43
IŠVADOS.....	45
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	46
PRIEDAI.....	48

## IVADAS

**Temos aktualumas:** Šiuo metu mažos galios lazerių asortimentas yra gana platus ir jų kaina santykinai yra maža, todėl jie yra plačiai naudojami pjaunant nemetalines medžiagas. Be to, dėl mažos lazerinių diodų kainos tokių lazerių vartotųjų ratas labai plečiasi. Šiuo metu yra mažai literatūros, kurioje būtų aprašomas mažos galios lazerinių diodų taikymo galimybės pjaunant nemetalines medžiagas. Vadinasi, tokių lazerių taikymo tiek teorinis, tiek praktinis tyrimas yra labai aktualus.

**Pritaikomumas:** Mažos galios lazeriniai diodai gali būti naudojami pjaunant įvairias nemetalines medžiagas. Darbo tyrimo rezultatai bus naudingi mažos galios lazerių vartotojams, kaip praktinė rekomendacija lazeriniams diodams pasirinkti. Tyrimo metodika gali būti naudojama atliekant kitų tipų mažos galios lazerių tyrimams, pjaunant nemetalines medžiagas.

**Darbo tikslas:** Ištirti 450 nanometrų ir 3 vatų galingumo lazerinio diodo galimybes pjauti nemetalines medžiagas.

### **Darbo uždaviniai:**

1. Išanalizuoti literatūrą, kurioje nagrinėjamas nemetalinių medžiagų pjovimas lazeriu.
2. Sukurti tyrimo metodiką.
3. Išsiaiškinti ir pritaikyti esančią atviro kodo programinę įrangą, skirtą lazerinio diodo valdymui, pjaunant nemetalines medžiagas.
4. Atlikti eksperimentinius tyrimus ir eksperimento rezultatus apdoroti matematiškai.
5. Remiantis eksperimentu, suformuoti rekomendacijas sąlyginai optimaliems pjovimo režimams.

# 1. LITERATŪROS APŽVALGA

## 1.1. Lazerinis pjovimas

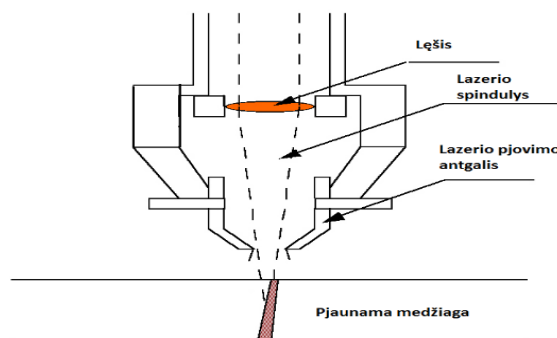
Lazerinis pjovimas, tai technologija, kuri naudoją lazerį medžiagoms pjauti. Lazeriai dažniausiai naudojami pramoninėje gamyboje, bet tai pat pradeda populiarėti smulkiajame versle ir mėgėjų tarpe. Medžiagos yra pjaunamos nukreipiant lazerio spindulį, dažniausiai per optinius lęšius, į pjaunamos medžiagos paviršių, kuri lazerio spindulio veikiami išsilydo, sudega arba išgaruoja [1, 2, 14]. Pjovimui dažniausiai naudojamas kompiuterinio valdymo įrenginys (CNC), kuris valdo lazerio judėjimą ir spindulio galią. Dauguma lazerinio pjovimo įrenginių naudoja g kodą, kuriame yra informacija apie pjaunamo kontūro geometriją, judėjimo greičius ir lazerio galią.

Lazerinis pjovimas turi eilę pranašumų lyginant jį su mechaniniu pjovimu, kai medžiaga pjauna įrankis:

1. lengvesnis ruošinio pozicionavimas;
2. mažesnė užteršimo tikimybė, nes nėra pjaunančiosios briaunos;
3. apdirbimo tikslumui neturi įtakos įrankio dilimas, kaip mechaniniam pjovimo būdui, todėl pjovimo lazeriu tikslumas praktiškai nepriklauso nuo pjovimų skaičiaus;
4. labai maža karščio paveiklos zona;
5. pjovimo procesas yra pigesnis, nes pjaunant skirtingas detales nereikės pirkti specialių pjovimo įrankių, kurie yra reikalingi pjaunant mechaniniu būdu.

Metalų lazerinis pjovimas taip pat turi eilę pranašumų lyginant jį su plazminiu pjovimu: didesnis pjovimo tikslumas ir, pjaunant metalo lakštus, naudojama mažiau energijos. Tačiau plazminis pjovimas įgalina pjauti storesnius metalo lakštus, ko negali lazerinis pjovimas.

1.1 paveikslėlyje pavaizduota lazerio pjovimo schema. Iš lazerinio diodo išėjęs lygiagretus spindulių pluoštas eina pro glaudžiamąjį lęšį, kuris sufokusuoja lazerio spindulį. Stengiamasi, kad spindulys būtų kuo labiau sufokusuotas tuo momentu, kai pasiekia medžiagos paviršių



1.1 pav. Lazerinio pjovimo schema



## 1.2. Lazerinio diodo privalumai ir trūkumai lyginant su CO2 lazeriu

Mažos galios kompaktiški ir pigūs lazeriniai diodai rinkoje paplito pastaraisiais metais, kai Kinija pradėjo masiškai gaminti tokio tipo lazerius. Šiuo metu nemetalinėm medžiagom pjauti dažniausiai naudojami CO2 lazeriai, kurių galia nuo 40 iki 100 vatų, turi nemažai trūkumų:

1. Nekompaktiška ir labai lengvai pažeidžiama lazerio tūba, nes ji yra stiklinė. 1.2 paveiksle pavaizduota CO2 tūba, kurios trumpiausias ilgis yra 70 centimetrų [18], tuo tarpu 1.3 paveiksle lazerinio diodo dydis yra palygintas su vieno USA cento moneta [19].
2. Nedidelis CO2 lazerio gyvavimo laikas – 2000 darbo valandų. Tuo tarpu mažo galingumo lazerinio diodo gyvavimo laikas yra nuo 20000 iki 50000 darbo valandų.
3. CO2 lazeriams reikalingas tūbos aušinimas. Aušinimas atliekamas vandeniu, todėl reikalinga papildoma įranga (vandens rezervuaras, pompa ir pan.), kurie papildomai kainuoja ir užima nemažai vietos. Tuo tarpu lazeriniam diodui aušinti užtenka paprasto ventiliatoriaus;
4. CO2 lazerio sistema yra labai brangi ir nekompaktiška dėl sudėtingesnio valdymo ir aušinimo įrangos.

Tačiau CO2 sistema yra galingesnė nei didžiausio galingumo mažos galios lazeriniai diodai.



1.2 pav. CO2 Lazerio tūba



1.3 pav. lazerinis diodas

Nemetalinių medžiagų pjovimas mažos galios lazeriniais diodais yra mažai tirtas, todėl mūsų darbo tikslas yra ištirti tokių lazerinių diodų galimybes pjaunant nemetalingas medžiagas.

Mes tirsime vieną galingiausių 3 vatų ir 450 nanometrų rinkoje esantį lazerinį diodą. Tokį diodą pasirinkome todėl, kad jo spindulio bangos ilgis yra vienas iš trumpiausių lyginant su kitais rinkoje esančiais diodais. Trumpesnio bangos ilgio spindulys daugumos medžiagų paviršių yra žymiai geriau absorbuojamas, todėl daugiau spindulio galios tenka medžiagos pjovimui.

### **1.3. Nemetalinių medžiagų pjovimas lazerio spinduliu**

Mokslinės literatūros, kurioje būtų nagrinėjamas nemetalinių medžiagų pjovimas mažos galios lazeriniu diodu, pavyko rasti tik vieną šaltinį [17]. Tame straipsnyje tiriamos labai mažo galingumo (1 W galios ir 808 nm bangos ilgio) lazerinio diodo galimybės pjauti juodos ir žalios spalvos neskaidrų plastiką. Straipsnyje tiriama pjūvio gylio priklausomybė nuo pastūmos greičio ir įtampos. Taip pat yra keli straipsniai, skirti mažos galios ne diodo tipo lazerių tyrimui, pjaunant nemetalingas medžiagas [2 – 6, 14, 15]. Tuose straipsniuose mokslininkai vadovaujasi ta pačia nemetalinių medžiagų pjovimo mažos galios lazeriais metodika. Pirmiausia teoriškai nustatoma pjūvio gylio priklausomybė nuo lazerio galios ir pastūmos greičio. Paskui atliekamas pjovimo eksperimentas ir teoriniai rezultatai lyginami su praktiniais. Jei reikia, teorinėje formulėje skirtingoms medžiagoms naudojami korekcijos koeficientai, kompensuojant teorinėje formulėje atmestus pjovimo fizinius parametrus, ir kurie apskaičiuojami iš eksperimento rezultatų.

Literatūroje [2, 3] yra kalbama apie nemetalinių medžiagų pjovimą su mažos galios CO<sub>2</sub> lazeriu. Kaip buvo minėta anksčiau, yra išvedama teorinė formulė, kuria remiantis galima apskaičiuoti lazerio pjūvio gylį, priklausomai nuo lazerio galios ir pastūmos greičio. Gauti teoriniai rezultatai yra lyginami su eksperimento rezultatais, ir teorinė formulė papildoma korekcijos koeficientais, apskaičiuotais pagal eksperimentinį tyrimą. Ši tyrimo metodika tirti mažos galios

spindulio galimybes pjauti nemetalines medžiagas taip pat naudojama ir [4] literatūroje. Šiame straipsnyje kalbama apie nemetalinių medžiagų pjovimą naudojant mažos galios Nd:YAG lazerio spindulį. Autoriai remiasi straipsnyje [3] išvesta pjūvio gylio priklausomybės nuo lazerio galios ir pastūmos greičio skaičiavimo formule, ir skaičiuoja maksimalų lazerio pjūvio gylį priklausomai nuo pastūmos greičio. Abiejuose straipsniuose, išvedant pjūvio gylio formulę, daroma prielaida, kad lazerio spindulys yra skritulio formos, be to, laikoma, kad didžiausias lazerio spindulio intensyvumas yra spindulio centre, o lazerio energija pasiskirsčiusi pagal Gauso dėsnį. Turint medžiagos charakteristikas, apskaičiuojamas teorinis pjūvio gylis.

Literatūroje [5] kalbama apie lazerinius diodus. Detaliai aprašomas jų veikimo principas. Taip pat yra įvardinta daug sričių, kuriose naudojami lazeriniai diodai: skysčių mechanikos tyrimai, gynybos pramonė, cheminių elementų analizė ir dujų nuotėkio paieška, medicina, telekomunikacija, holografija, atominiai laikrodžiai ir medžiagų apdirbimas. Rašoma, kad dažniausiai naudojami didelės galios diodų paketai.

Literatūroje [6] nagrinėjimas CO<sub>2</sub> lazerio ir lazerinio diodo panaudojimas pjauti popierinėms medžiagoms. Tyrimui naudojami nedidelės galios lazeriai. Minima, kad, pjaunant popierių su 810 nanometrų bangos ilgio lazeriniu diodu, popierių reikia pažymėti rašalu, nes tik tokiu atveju medžiaga absorbuoja spindulį.

Literatūra [7] nagrinėja didelės galios lazerinių diodų blokus, skirtus pjauti metalams, ir jų palyginimą su CO<sub>2</sub> ir Fiber lazerinėmis technologijomis. Nustatyta, kad didelės galios diodų blokas lyginant su CO<sub>2</sub> lazeriu turi daug geresnį energijos panaudojimo koeficientą ir su mažesne lazerio galia galima gauti panašius rezultatus, kaip ir su didesnės galios CO<sub>2</sub> lazeriu.

#### **1.4. Lazerinių diodų panaudojimas pjaunant nemetalines medžiagas**

Yra mažai literatūros, skirtos nemetalinių medžiagų pjovimo lazeriniais diodais tyrimams. Aprašymus apie panašaus tipo tyrimus galima rasti interneto portaluose, kuriuose vartotojai dalinasi savo patirtimi apie lazerinių diodų naudojimą. Tokie diodai, kaip matyti iš vartotojų patirties, kaip taisyklė, yra naudojami medžiagų graviravimui, o žinių apie diodų panaudojimą nemetalinių medžiagų pjovimui praktiškai nėra.

Literatūroj [8] yra lyginamos CO<sub>2</sub> lazerio ir diodo galimybės pjaunant nemetalines medžiagas. Lyginant lazerinį diodą su CO<sub>2</sub> lazeriu, skirtu nemetalinėms medžiagoms apdirbti, rašoma, kad lazeriniai diodai turi didesnę spindulio divergenciją ir mažesnę galią, todėl norint išgauti diodo pjovimo rezultatus, panašius į CO<sub>2</sub> lazero rezultatus, lazerinį diodą reikia montuoti kuo arčiau

pjaunamos medžiagos. Taip pat minimos CO<sub>2</sub> lazerio problemos: dydis, reikalinga aukšta įtampa, reikalinga uždara vandens aušinimo sistema ir lazerio trapumas.

Literatūroje [9] yra labai trumpai aprašyta, kokias medžiagas yra bandyta pjauti su mažos galios lazeriniais mėlynos ir raudonos šviesos diodais. Tirtų medžiagų kiekis yra nedidelis ir nėra tikslios informacijos apie pjovimo režimus ir medžiagas, Pastebėta, kad mėlynos spalvos spindulio (bangos ilgis 450 nanometrų) absorbcija yra žymiai didesnė nei raudonos spalvos spindulio absorbcija. Kitaip tariant, mėlynos spalvos diodas yra pranašesnis nei raudonos spalvos diodas, nes didesnė mėlynos spalvos spindulio energijos dalis tenka medžiagos pjovimui.

### **1.5. Literatūros apžvalgos apibendrinimas**

Iš pateiktos literatūros apžvalgos galima padaryti tokias išvadas.

1. Mažos galios lazeriniai diodai gali būti naudojami ne tik medžiagų žymėjimui, bet ir nemetalinių medžiagų pjovimui.
2. Nėra atlikta mokslinių tyrimų apie nemetalinių medžiagų pjovimo mažos galios lazeriniais diodais galimybes.
3. Straipsniuose [2 – 6] pateikta lazerio pjovimo gylio formulė ir juose pateikta tyrimo metodika gali būti taikoma ir mažos galios lazeriniams diodams tirti, pjaunant nemetalines medžiagas.
4. Literatūroje [3] pateikta formulė gali būti lengvai modifikuota, įvertinant, kad lazerio spindulys nebūtinai yra skritulio formos, kas būdinga lazeriniams diodams.

## 2. EKSPERMENTO ATLIKIMO METODIKA

Tirdami lazerinių diodų galimybes pjauti nemetalines medžiagas, pirmiausia, teoriškai apskaičiuosime tiriamų medžiagų pjūvio gylius ir greičius pagal formules, modifikuotas lazerinio diodo spinduliui, kadangi lazerinio diodo spindulys nėra skritulio formos. Tuomet, pirmajame etape bandysime, ar medžiaga praktiškai yra pjaunama. Gali būti, kad kai kurioms medžiagoms, priklausomai nuo jų spalvos, absorbcijos koeficientas bus labai mažas ir medžiagos pjauti tiesiog nebus įmanoma. Nustatę, kad lazeriniu diodu medžiagą pjauti galima, tirsime sąlyginai optimalius pjovimo režimus ir matematiškai apdorosime gautus rezultatus.

*Pirmojo etapo* paskirtis yra pjovimo zondavimas. Šiame etape bus bandoma lazeriu pjauti/graviruoti pasirinktą apibrėžtų parametrų konkrečią medžiagą.

Jei bandymas bus sėkmingas (ne daugiau kaip per 3 praėjimus tiriamoji medžiaga buvo perpjauta), tai pereisime į antrąjį tyrimo etapą. Priešingu atveju, jei lazeris pasirinktos medžiagos perpjauti nesugebėjo, bet įpjovė 0.5 mm gylio griovelį, sakome, kad lazeris tinkamas šiai medžiagai graviruoti, priešingu atveju konstatuosime, kad lazeris netinkamas tiriamai medžiagai apdirbti.

*Antrojo etapo* metu medžiaga bus pjaunama pagal sudėtingesnę formą ir bus tiriama prapjovimo galimybė ir pjovimo proceso parametrai: praėjimų skaičius, pjovimo greitis/laikas, pjovimo pastūma, pjovimo kompensavimo dydis ir pan.

Tam, kad sumažintume eksperimentų skaičių, tiriamų medžiagų parametrus keisime naudodami didesnę kitimo žingsnį. Gautus eksperimento rezultatus apdorosime matematiškai: tirsime aproksimuojamų kreivių tipą ir jų parametrus. Parametrus apskaičiuosime mažiausių kvadratų metodu.

### 2.1. Lazerio spindulio energijos ir pjūvio gylio apskaičiavimas [3]

Lazerio energijos intensyvumo (matematiškai tankio) funkcija, kai energija pasiskirsčiusi pagal Gauso dėsnį, aprašoma formule

$$I(x, y) = I_0 e^{-(x^2+y^2)/R^2}, \quad (1)$$

čia  $I_0$  – intensyvumo funkcijos maksimali vertė, t. y. intensyvumo vertė spindulio centre,  $R$  – lazerio spindulio radiusas, kuris apibrėžiamas kaip atstumas nuo centro iki taško, kuriame spindulio intensyvumas sumažėja iki  $I_0/e^2$  vertės.

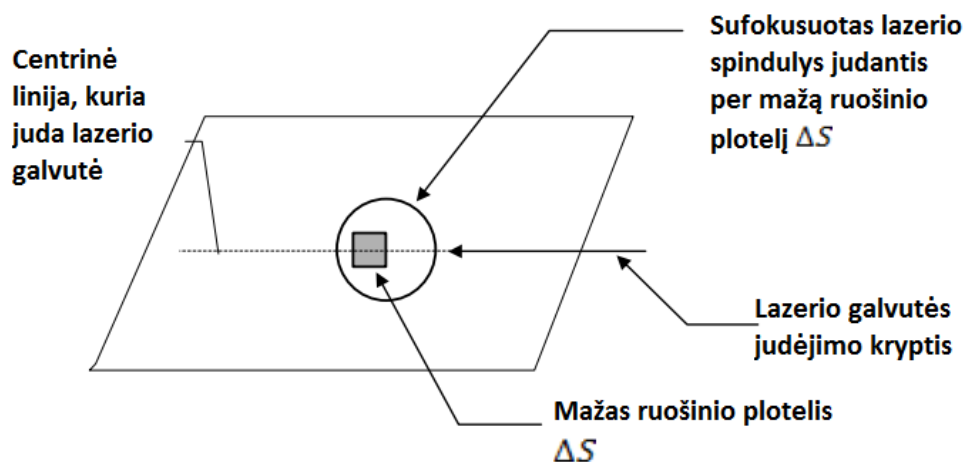
Lazerio spindulio energija, sufokusuota darbo lauke, kai lazerio galia  $P$ , medžiagos absorbcijos koeficientas yra  $a$  ir intensyvumo funkcijos maksimali vertė spindulio centre  $I_0$ , yra surišti lygybe:

$$I_0 = \frac{aP}{\pi R^2} . \quad (2)$$

Nagrinėdami lazerio pjovimo procesą domėsimės tik spindulio intensyvumu pagal centrinę liniją, t. y. linija, kuria juda lazerio spindulio centras. Ši linija nusakoma lygtimi  $y = 0$ . Vadinasi, (1) formulė taps

$$I(x) = I_0 e^{-\left(\frac{x}{R}\right)^2} . \quad (3)$$

Nagrinėsime centrinės linijos mažą plotelį  $\Delta S$ , kurio matmenys yra  $\Delta x$  ir  $\Delta y$  (žr. 2.1 pav.).



2.1 pav. Schema, kuria remiantis sudaromas skaičiavimo modelis

Tada:

$$\Delta S = \Delta x \Delta y . \quad (4)$$

Lazerio spindulio energija, tenkanti ploteliui  $\Delta S$ , yra lygi

$$\Delta P = \Delta S I_0 e^{-\left(\frac{x}{R}\right)^2} . \quad (5)$$

Lazerinio pjovimo metu pjūvio plotis yra pastovus ir lygus spindulio skersmeniui. Jei lazerio spindulys juda pastoviu greičiu  $v$  ( $mm/s$ ), tai laikas  $\Delta t$ , per kurį lazerio spindulys praeina per plotelį  $\Delta S$ , yra lygus

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v} . \quad (6)$$

Įvertinę (6), (4) ir (5) formules, gausime, kad bendra energija, kurią sugeria plotelis  $\Delta S$ , yra lygi

$$E = \sum_{i=-n}^n \Delta P \Delta t = \sum_{i=-n}^n I_0 \frac{\Delta S}{v} \Delta x_i e^{-\left(\frac{x}{R}\right)^2} . \quad (7)$$

Konkrečiai medžiagai šios energijos išgarintos medžiagos kiekis  $W$  yra

$$W = \frac{E}{Q} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=-n}^n I_0 e^{-\left(\frac{x}{R}\right)^2} \frac{\Delta S}{vQ} \Delta x_i . \quad (8)$$

čia  $-Q$  (J/g) yra medžiagos specifinė energija, t. y. energija, kuri sunaudojama išgarinant 1 g medžiagos ir ši energija apskaičiuojama pagal formulę

$$Q = c(T_m - T_e) + L_v, \quad (9)$$

čia  $-c$  yra medžiagos specifinė temperatūra,  $T_m$  – medžiagos lydymosi temperatūra,  $T_e$  – aplinkos temperatūra.

**Pastaba.** Šiluminis specifinis laidumas šioje formulėje nevertinamas.

Aišku, kad lazerio pjūvio gylis yra apskaičiuojamas pagal formulę

$$D = \frac{W}{\Delta S \rho}, \quad (10)$$

čia  $\rho$  – medžiagos tankis.

Įstatę  $W$  ir  $\Delta S$  išraiškas į (10) išraišką, gausime lazerio pjūvio gylio  $D$  (mm) formulę

$$D = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=-n}^n I_0 e^{-\left(\frac{x}{R}\right)^2} \frac{\Delta S}{v Q \Delta S \rho} \Delta x_i = \frac{1}{Q \rho} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=-n}^n I_0 e^{-\left(\frac{x}{R}\right)^2} \frac{\Delta x_i}{v}.$$

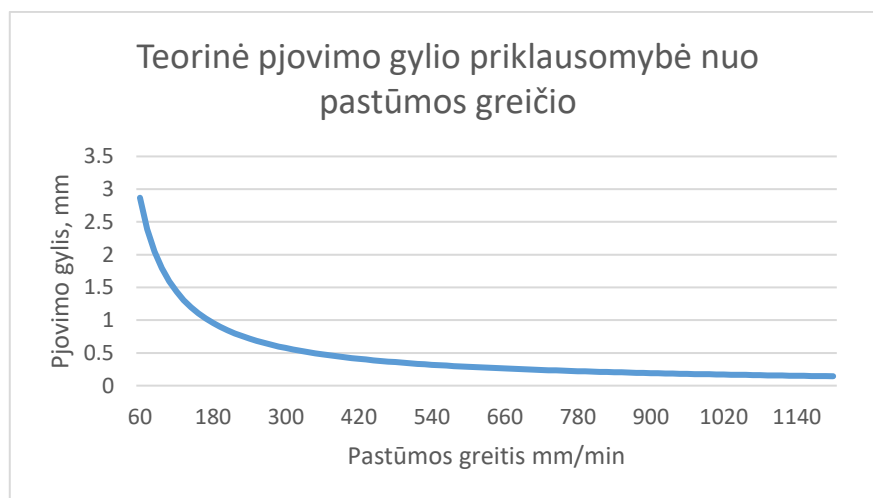
Kai  $n \rightarrow \infty$ , tai  $\Delta S \rightarrow 0$  ir  $\Delta x_i \rightarrow 0$ , vadinasi, sumavimo operaciją keisime integravimu.

$$D = \frac{1}{Q \rho} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{v} e^{-\left(\frac{x}{R}\right)^2} dx = \frac{2I_0 R}{v Q \rho} \int_0^{\infty} e^{-\left(\frac{x}{R}\right)^2} d\left(\frac{x}{R}\right)$$

Suintegravę ir įrašę  $I_0$  išraišką, gausime:

$$D = \frac{a P R \sqrt{\pi}}{\pi R^2 v Q \rho} = \frac{a}{Q R \rho \sqrt{\pi}} \left(\frac{P}{v}\right). \quad (11)$$

2.2 paveiksle pavaizduota teorinė pjūvio gylio priklausomybė plastikui PMMA (organinis stiklas) nuo pastūmos greičio, kai lazerinio diodo galia 3W. PMMA plastiko parametrai yra: tankis –  $\rho = 1,18 \text{ g/cm}^3$ , specifinė garavimo šiluma  $Q = 2 \text{ kJ/g}$ , absorbcijos koeficientas  $a$  juodam plastikui pasirenkamas 1, spindulio forma yra kvadratas, kurio kraštinės ilgis – 0,5mm.



2.2 pav. Teorinė pjūvio gylio priklausomybė nuo pastūmos greičio

## 2.2. Formulės modifikacija, kai lazerio spindulys nėra skritulio formos

Tarkime, kad lazerio spindulys yra stačiakampis, kurio matmenys yra  $c \times d$ . Tada  $R$  reikšmę prilyginsime spinduliui tokio skritulio, kurio plotas yra lygus stačiakampio plotui.

Vadinasi,  $\pi R^2 = cd$ . Iš šios lygybės gausime  $R^2 = \frac{cd}{\pi}$ . Įstatę  $R^2$  išraišką į (11) formulę, gausime

$$D = \frac{aPR\sqrt{\pi}}{\pi R^2 v Q \rho} = \frac{a}{QR\rho\sqrt{\pi}} \left(\frac{P}{v}\right) = \frac{a}{Q\rho\sqrt{cd}} \left(\frac{P}{v}\right). \quad (12)$$

Tarkime, kad spindulio forma yra kvadratas, t. y.  $c = d = k$ .

Tada:

$$D = \frac{a}{Q\rho k} \left(\frac{P}{v}\right). \quad (13)$$

Tarkime, kad spindulio forma yra elipsė, kurios pusašės yra  $c$  ir  $d$ . Tada:  $\pi R^2 = \pi cd$ .

Taigi,  $R^2 = cd$ . Vadinasi,  $R = \sqrt{cd}$ .

Tuo būdu,

$$D = \frac{aPR\sqrt{\pi}}{\pi R^2 v Q \rho} = \frac{a}{QR\rho\sqrt{\pi}} \left(\frac{P}{v}\right) = \frac{a}{Q\rho\sqrt{\pi cd}} \left(\frac{P}{v}\right). \quad (14)$$

Kaip parodyta literatūroje [3], eksperimento rezultatai gerai sutampa su teoriniais rezultatais, esant didesniems pastūmos greičiams (žr. 2.2 pav.). Didesnis skirtumas tarp eksperimento ir teorinių rezultatų yra esant mažiems pastūmos greičiams. Šie skirtumai paaiškinami tuo, kad, apskaičiuojant teorinius rezultatus, nebuvo įvertintas medžiagos šiluminis laidumas, taip pat nėra žinomas tikslus medžiagos absorbcijos koeficientas. Tarp šių veiksnių svarbiausias veiksnys yra absorbcijos koeficiento vertė. Be to, gylio formulėje yra pervertinta lazerio galia. Norėdami teisingiau prognozuoti lazerinio pjūvio gylį, modifikuosime pjūvio gylio formulę, įvesdami į ją dvi konstantas  $B$  ir  $\omega$  [3]. Modifikuota pjūvio gylio formulė yra:

$$D = B \frac{a}{QR\rho\sqrt{\pi}} \left(\frac{P}{v}\right)^\omega. \quad (15)$$

Literatūroje [3] nėra pateiktos parametrų apskaičiavimo metodikos. Mes parametrus  $B$  ir  $\omega$  apskaičiuosime iš eksperimento rezultatų naudodami mažiausių kvadratų metodą. Nagrinėjamas lazerinis diodas yra mažos galios, todėl, pjaunant nemetalines medžiagas, naudosime jo didžiausią galią. Vadinasi, apskaičiuojant parametrų  $B$  ir  $\omega$  vertes, laikysime, kad galia  $P$  yra pastovi.

## 2.3. Parametrų $B$ ir $\omega$ apskaičiavimas mažiausių kvadratų metodu

Tam, kad parametrų apskaičiavimas būtų paprastesnis, gylio  $D$  formulę transformuosime įvesdami logaritminį mastelį. Tam tikslui (15) formulę logaritmuosime:



$$\ln D = \ln B + \ln C + \omega \ln \left( \frac{P}{v} \right), \quad (16)$$

čia koeficientas  $C = \frac{a}{QR\rho\sqrt{\pi}}$ .

Įveskime pažymėjimus:

$$y = \ln D, \quad b = \ln B, \quad c = \ln C, \quad x = \ln(P/v). \quad (17)$$

Vadinasi, (16) lygtis bus užrašoma taip:

$$y = b + c + \omega x. \quad (18)$$

Tarkime, kad  $(x_i, Y_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  yra eksperimento rezultatai, perskaičiuoti įvertinant (17) pakeitimus. Tada parametrus  $b$  ir  $\omega$  apskaičiuosime taip, kad tikslo funkciją

$$z = \sum_{i=1}^m (b + c + \omega x_i - Y_i)^2 \quad (19)$$

įgautų mažiausią reikšmę.

Vadinasi,

$$\frac{\partial z}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^m (b + c + \omega x_i - Y_i) = 0,$$

$$\frac{\partial z}{\partial \omega} = 2 \sum_{i=1}^m (b + c + \omega x_i - Y_i) x_i = 0.$$

Sutvarkę šias lygtis, gausime tiesinių lygčių sistemą:

$$\begin{aligned} mb + \omega \sum_{i=1}^m x_i &= \sum_{i=1}^m Y_i - mc, \\ b \sum_{i=1}^m x_i + \omega \sum_{i=1}^m x_i^2 &= \sum_{i=1}^m x_i Y_i - c \sum_{i=1}^m x_i. \end{aligned} \quad (20)$$

Iš (20) lygčių sistemos apskaičiuosime  $b$  ir  $\omega$  reikšmes, o iš formulės  $b = \ln B$  apskaičiuosime parametą  $B$ :

$$B = e^b. \quad (21)$$

### 3. TYRIMO ĮRANGA

Tyrimo įrangą sudaro tokie mazgai.

1. Kompiuteris su programine įranga, skirta sugeneruoti  $g$  kodą ir perduoti jį staklių valdikliui. Programinė įranga aprašyta kitame skyriuje.

2. Lazerinio diodo galvutė (žr. 3.1 pav.) [20].

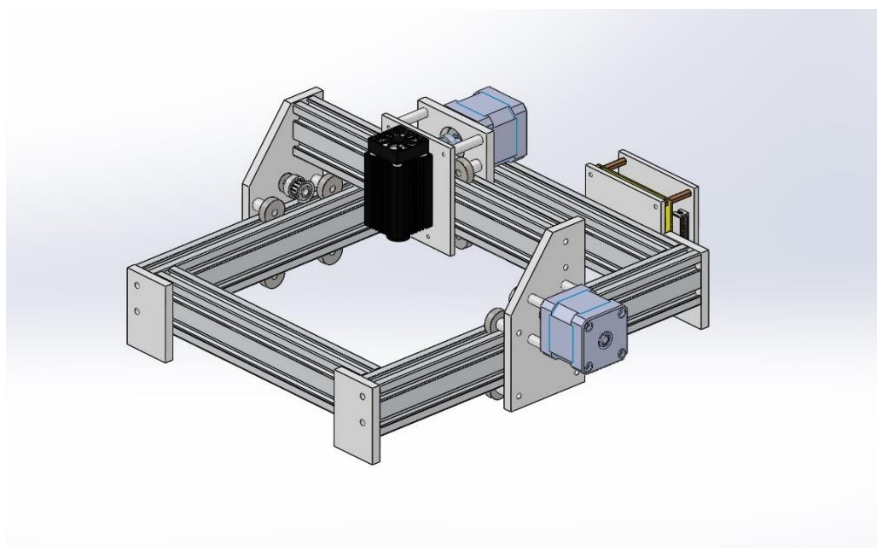
Lazerinio diodo galvutę sudaro aliuminis korpusas, kuriame patalpintas lazerinis diodas, lęšis, fokusuojantis lazerio spindulį, ir ventiliatorius.



3.1 pav. Lazerinio diodo galvutė.

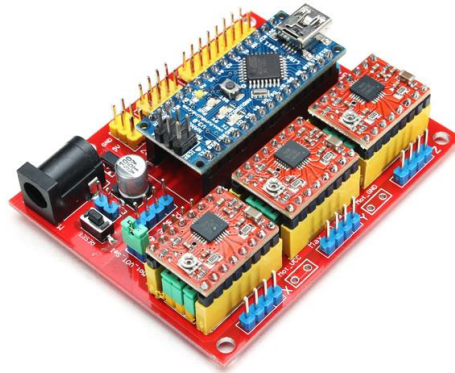
3. Rėmas, suteikiantis judesį lazerio galvutei.

Rėmas pavaizduotas 3.2 paveiksle. Rėmo dėka lazerio galvutė, valdoma kompiuterio, gali judėti  $X$  ir  $Y$  ašių kryptimis, o darbo laukas (medžiagos bandinys) nejuda.



3.2 pav. Rėmas, suteikiantis judesį lazerio galvutei

4. Staklių valdiklis (Arduino), kuris skirtas valdyti lazerinės galvutės judesius ir jos galią (žr. 3.3 pav.) [21].



3.3 pav. Lazerinio diodo staklių valdiklis

Pirmiausia į staklių valdiklį yra užkraunamas kompiuterio sugeneruotas *g* kodas (*g* kodo generavimas paaiškintas žemiau), skirtas detalei pajauti. Lazerinio diodo staklių valdiklis išduoda signalą, valdantį kiekvienos ašies žingsninius variklius ir valdo lazerio galią. Visa ši informacija užkoduota *g* kode ir valdiklis, nuosekliai skaitydamas šią informaciją, valdo aprašytą darbo procesą.

### 3.1. Staklių valdiklis - Arduino

Staklių valdikliui naudojamas Arduino [10] nanoplokštė. Į ją įrašyta *grbl* modifikuota staklių valdymo programa, skirta lazerio įjungimui ir išjungimui bei galios valdymui.

Arduino yra populiari platforma kuriant produktus, kuriuose reikia fizinius objektus valdyti pagal sukurtą algoritmą. Tai yra atviro kodo valdiklis ir programinė įranga skirta šio valdiklio programavimui. Pirmasis aparatūros prototipas buvo pristatytas 2005 metais. Šis produktas padėjo dizaineriams, kurie neturėjo mikrovaldiklių programavimo žinių, sujungti fizinį ir skaitmeninį pasaulį. Nuo pat pradžių daug žmonių prisidėjo tobulinant Arduino programinį kodą rašydami pavyzdžius. Visame pasaulyje šimtai tūkstančių dizainerių, inžinierių, studentų, programuotojų, ir kūrėjų naudojami Arduino platforma kuriant muzikos, žaidimų, žaislų, išmaniųjų namų, ūkininkavimo, autonominių transporto priemonių, ir t.t. produktus. Dabartinis mėgėjiškų projektų kiekis nebūtų buvęs įmanomas be šios technologijos ir tarpusavio pagalbos.

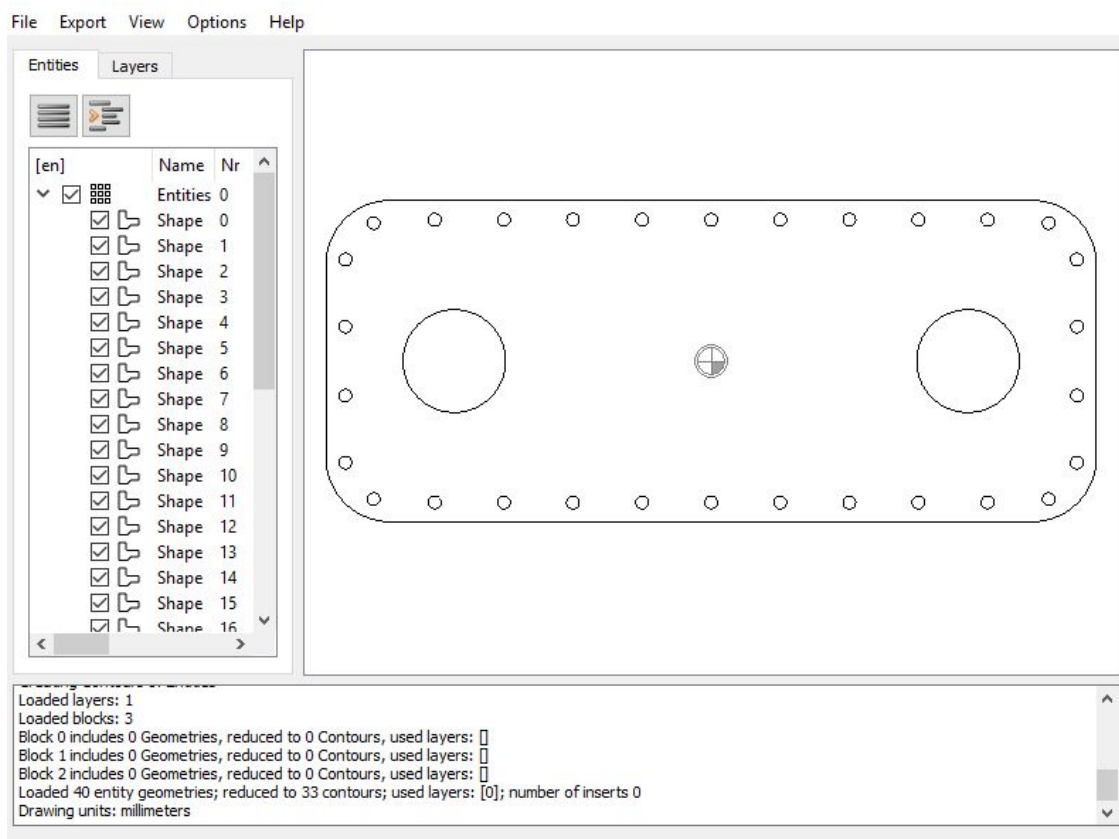
## 4. PROGRAMINĖ ĮRANGA SKIRTA PJOVIMUI NAUDOJANT LAZERINĮ DIODĄ

### 4.1. Programa *dx2gcode*

Programa *dx2gcode* [11] yra skirta iš \*.*dx2* brėžinio failo sugeneruoti programinių staklių valdymo kodą (*g* kodą). Šią programą naudosime valdyti tiriamą lazerinio pjovimo įrankį. Tam tikslui, pirmiausia, turime modifikuoti šios programos *postpro\_config.cfg* tekstą. Modifikacijos esmė yra ta, kad, generuojant valdymo kodą, nebūtų generuojamas judėjimas Z ašies kryptimi, t.y. Z ašis būtų neaktyvi, nes lazerio galvutė gali judėti tik X ir Y ašių kryptimis. Norint atlikti minėtą modifikaciją, *postpro\_config.cfg* tekste reikia užkomentuoti du operatorius, kurie žemiau pridėdame *postpro\_config.cfg* tekste (žr. 1 priedas) nuspalvinti raudonai.

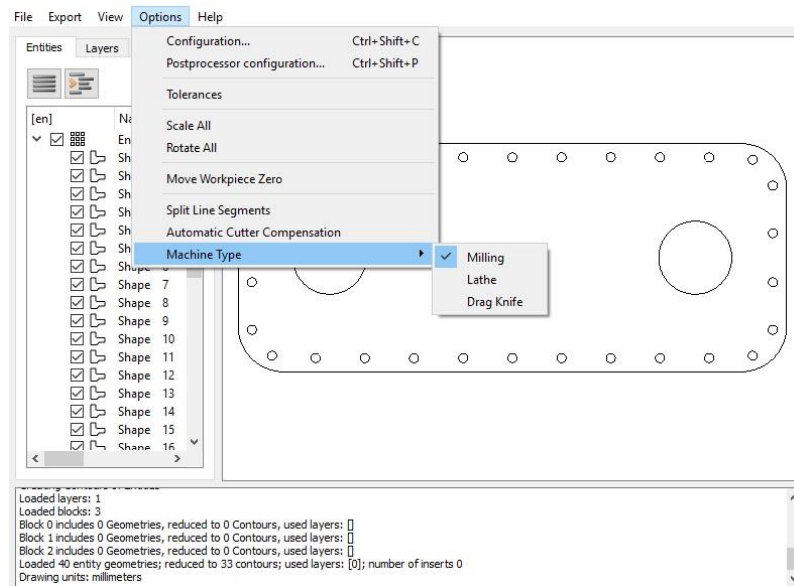
Tam, kad ši programa sugeneruotų lazerio valdymo kodą, reikia atlikti tokius veiksmus.

1. Į programą įkeliamas detalės brėžinys *dx2* formatu. Detalės brėžinio failą galima sugeneruoti naudojant įvairius CAD (computer - aided design) įrankius, pavyzdžiui, Solidworks, Autocad, Inventor ir pan. 4.1 pav. pateiktas vaizdas detalės, įkeltos į programą *dx2gcode*.



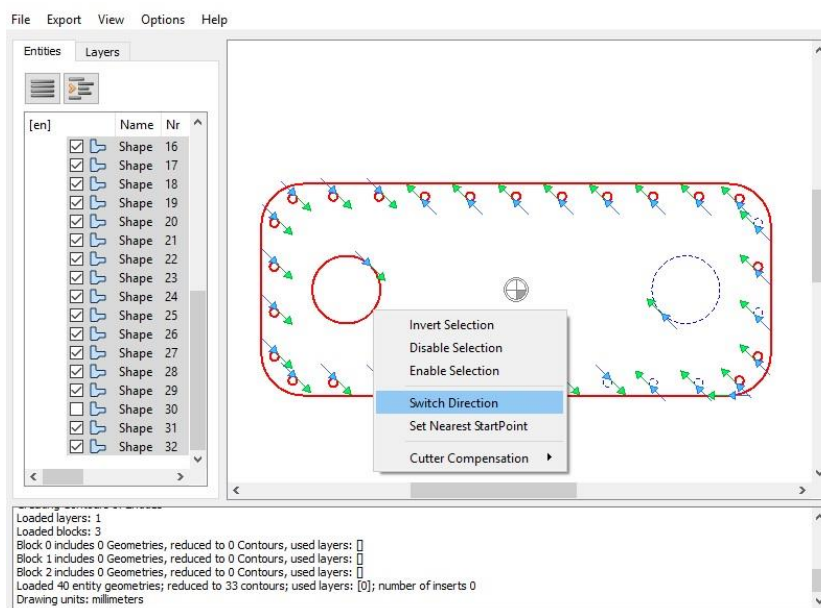
4.1 pav. Vaizdas detalės, įkeltos į programą *dx2gcode*

2. Parenkamas staklių, kurioms bus generuojamas valdymo kodas, tipas iš pateikto programoje sąrašo: *frezavimo (milling)*, *tekinimo (lathe)* ir *pjovimo (drag knife)* (žr. 4.2 pav.).



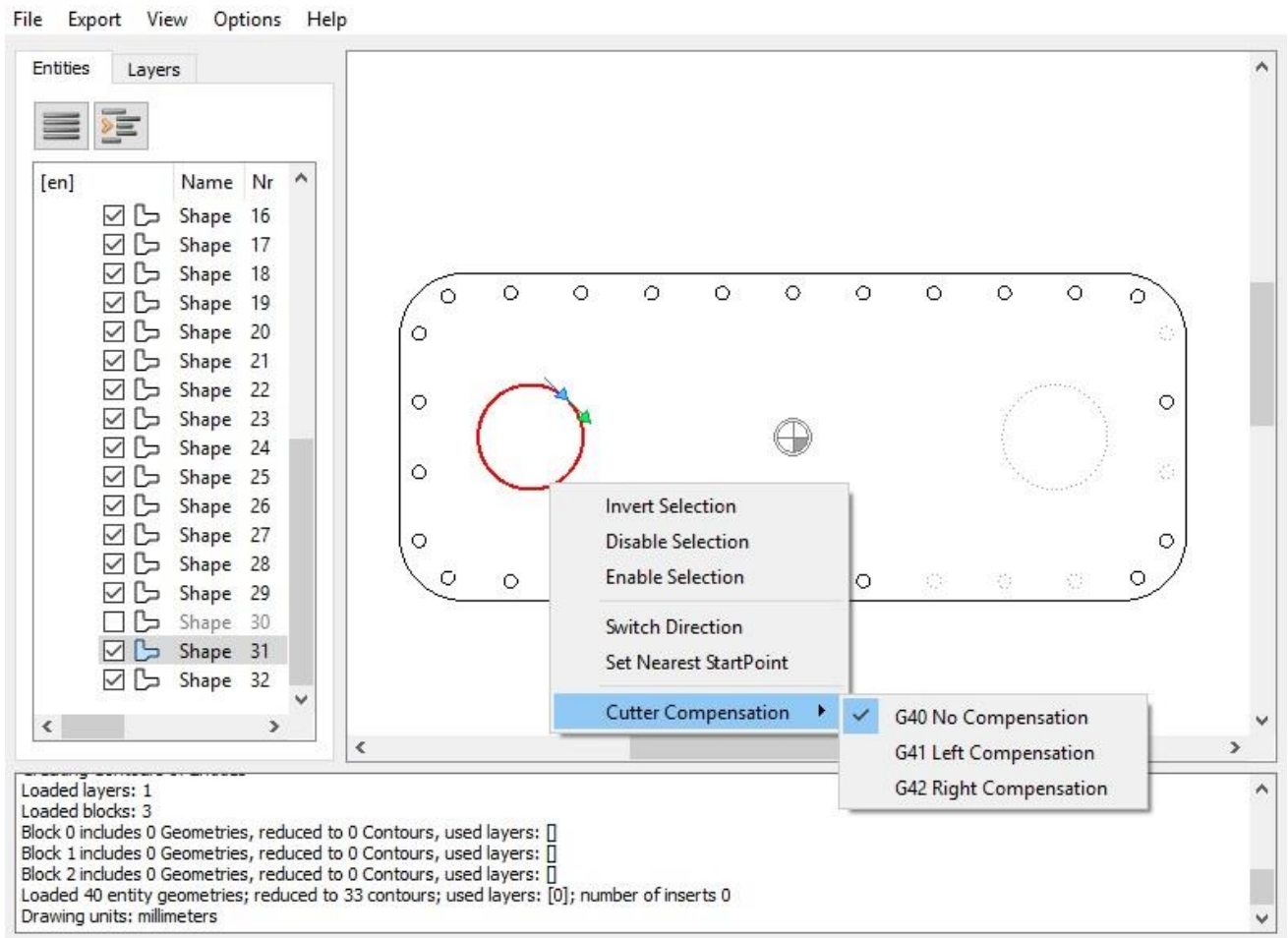
4.2 pav. Staklių, kurioms bus generuojamas valdymo kodas, tipo parinkimas

3. Nurodomi pjaunami kontūrai ir jų apėjimo kryptys. Pagal nutylėjimą yra pažymėti visi detalės kontūrai ir jų apėjimo kryptys. Kokių kontūrus pjauti nurodome pažymėdami juos “varnele” programos pateiktame kontūrų sąraše (nepažymėti - nepjaunami kontūrai pavaizduoti punktyrine linija), o jų apėjimo kryptis galima pakeisti *switch direction* parametro pagalba (žr. 4.3 pav.).



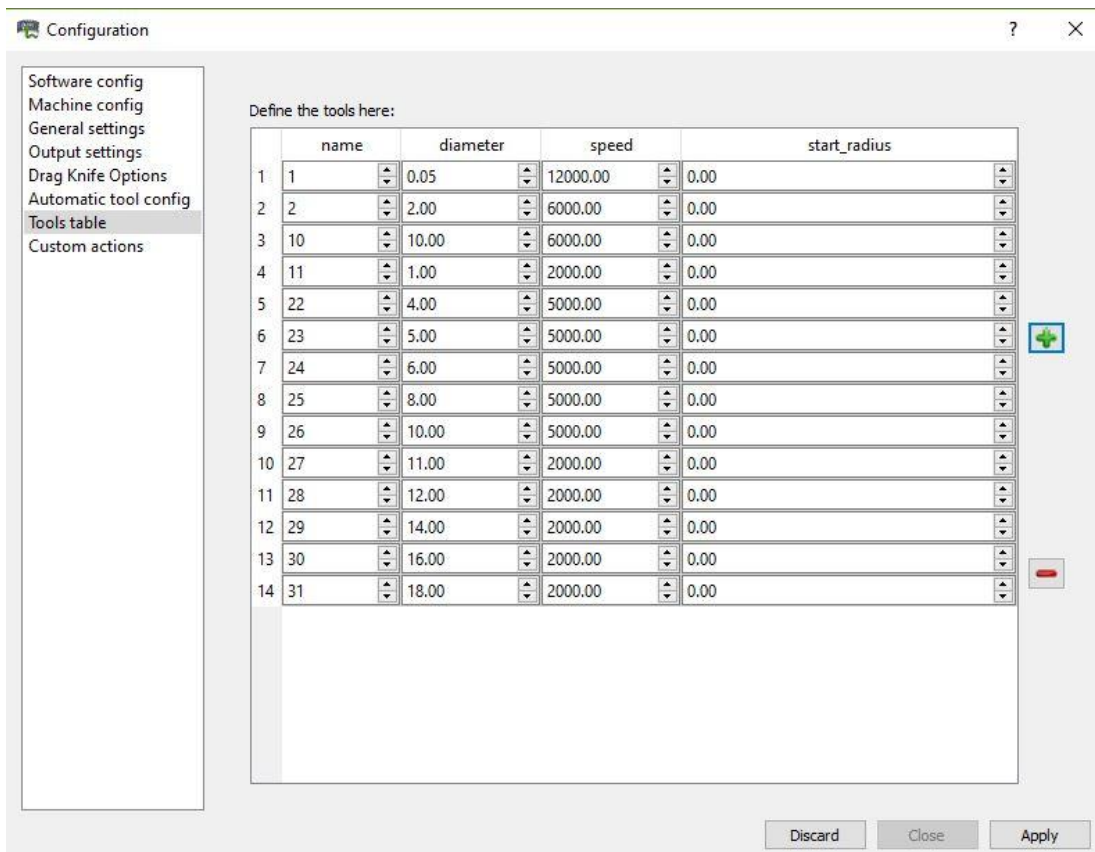
4.3 pav. Pjaunamos detalės kontūrai ir jų apėjimo kryptys

4. Esant poreikiui, galima pasirinkti įrankio kompensaciją iš kairės arba iš dešinės, priklausomai nuo kontūro apėjimo krypties. Kompensacija atliekama *Cutter compensation* parametro pagalba. Šis parametras turi trys vertes: *G40 No compensation*, *G41 Left compensation*, ir *G42 right compensation*. Kompensacijos poreikis atsiranda todėl, kad lazeris pjauna apibrėžto pločio liniją. Be kompensacijos lazerio išpjauta detalė bus truputį mažesnė: kiekviena pjūvio linija pasislinks į detalės vidų pusės lazerio spindulio pločio verte. Tuo tarpu kiaurymė bus didesnė tuo pačiu dydžiu. 4.4 paveiksle parodyta, kaip parenkama kontūro kompensacija.

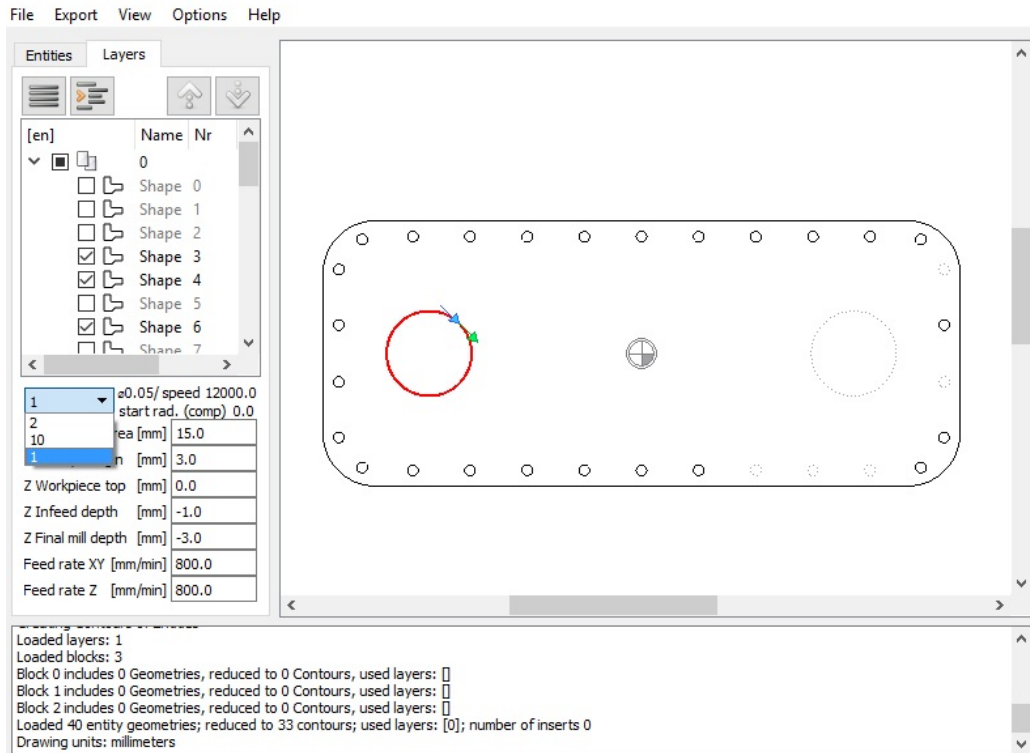


4.4 pav. Detalės kontūro kompensacijos parinkimas

5. Sukuriamas įrankių sąrašas, nurodant įrankio vardą (vardą apibrėžia natūralusis skaičius) ir jo parametrus: *įrankio skersmenį* ir *apsisukimų skaičių*. Iš sukurto įrankių sąrašo, pasirenkamas reikiamų parametrų įrankis. 4.5 paveiksle pavaizduota įrankių kūrimo lentelė, o 4.6 paveiksle parodytas norimų parametrų įrankio pasirinkimas.

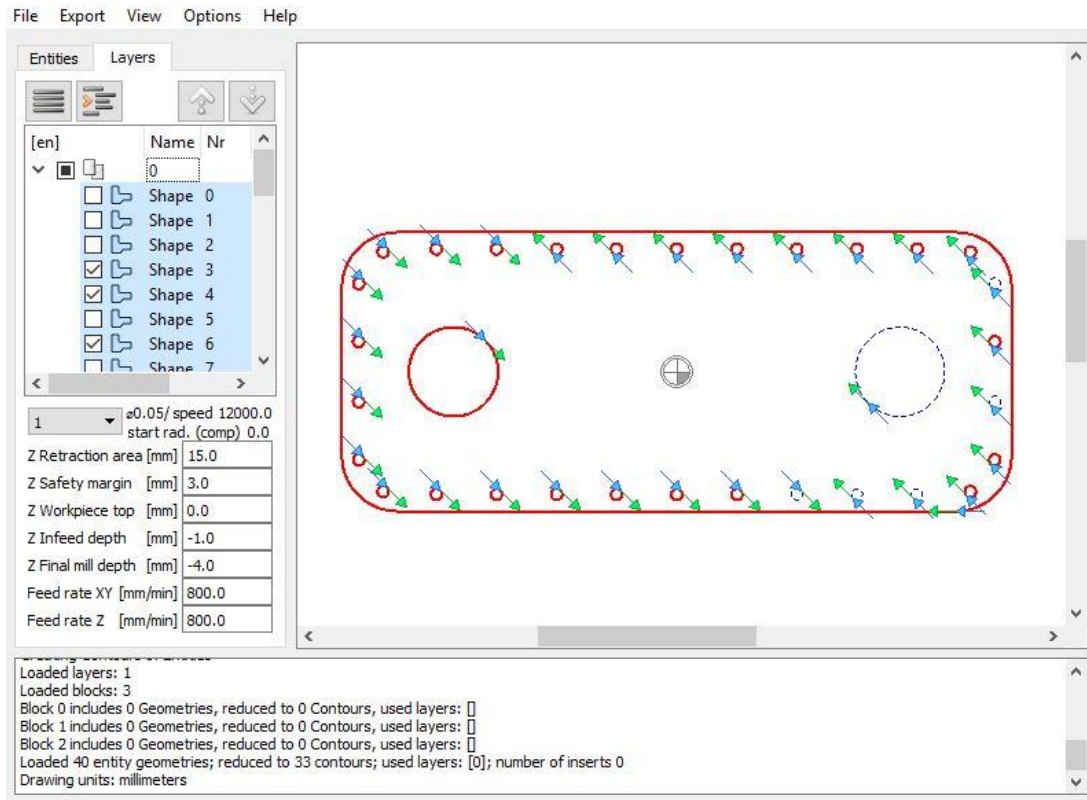


4.5 pav. Įrankių kūrimo lentelė



4.6 pav. Norimų parametų įrankio pasirinkimas

6. Apibrėžiami pjovimo parametrai: pjovimo gylio žingsnis ir galutinis pjūvio gylis. Šių dviejų parametų vertės apibrėžia lazerio spindulio praėjimų skaičių. Spindulio praėjimų skaičių nusako galutinio gylio ir gylio žingsnio santykis. Pjovimo gylio žingsnis nusakomas parametru *Z infeed depth* ir jo vertė yra -1. Galutinis pjūvio gylis apibrėžiamas parametru *Z final mill depth*. Jo vertė yra lygi lazerio spindulio praėjimų skaičiui, paimtam su minuso ženklu. Pavyzdžiui, jei šio parametro vertė yra -4, tai reiškia, kad pjovimo metu lazerio spindulio praėjimų skaičius bus 4 (žr. 4.7 pav.).

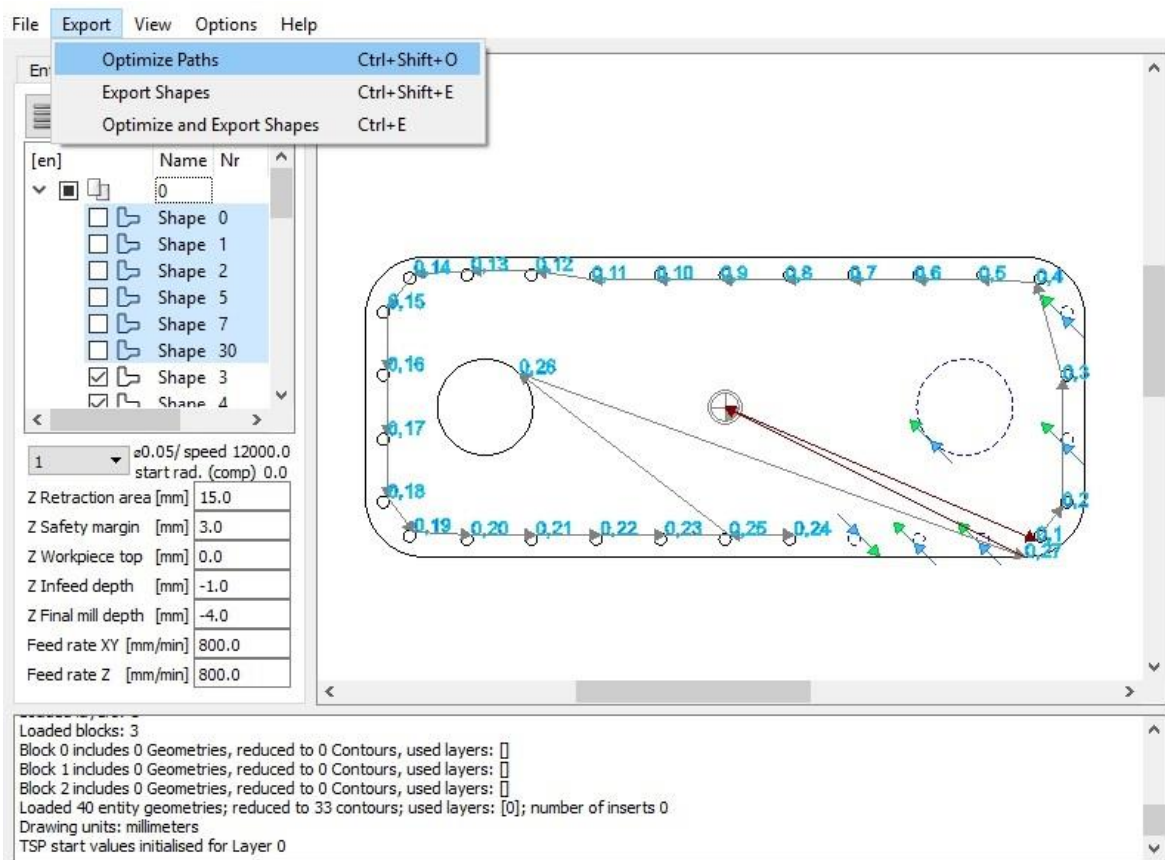


4.7 pav. Pjovimų režimų nustatymas

7. Prieš eksportuojant *g* kodą, yra galimybė optimizuoti įrankio judėjimo kelią *Export* parametru pagalba. Šis parametras turi tokias reikšmes: *Optimize paths*, *Export shapes* ir *Optimize and export shapes*. Įrankio judėjimo kelias bus optimizuojamas pasirinkus pirmąją arba trečiąją parametru *Export* vertę. Pasirinkus parametru *Optimize paths*, bus optimizuojamas įrankio judėjimo kelias, tačiau *g* kodas nebus eksportuojamas. Pasirinkus parametru *Optimize and export shapes*, bus optimizuotas įrankio judėjimo kelias ir eksportuotas *g* kodas. Įrankio judėjimo kelias yra optimizuojamas naudojant genetinį algoritmą, kuris apibrėžiamas populiacijos dydžiu.



Populiacijos dydžio vertė nurodoma *postpro\_config.cfg* tekste. 4.8 pav. paveiksle pavaizduota *Export* parametro verčių lentelė ir optimizuotas įrankio judėjimo kelias.



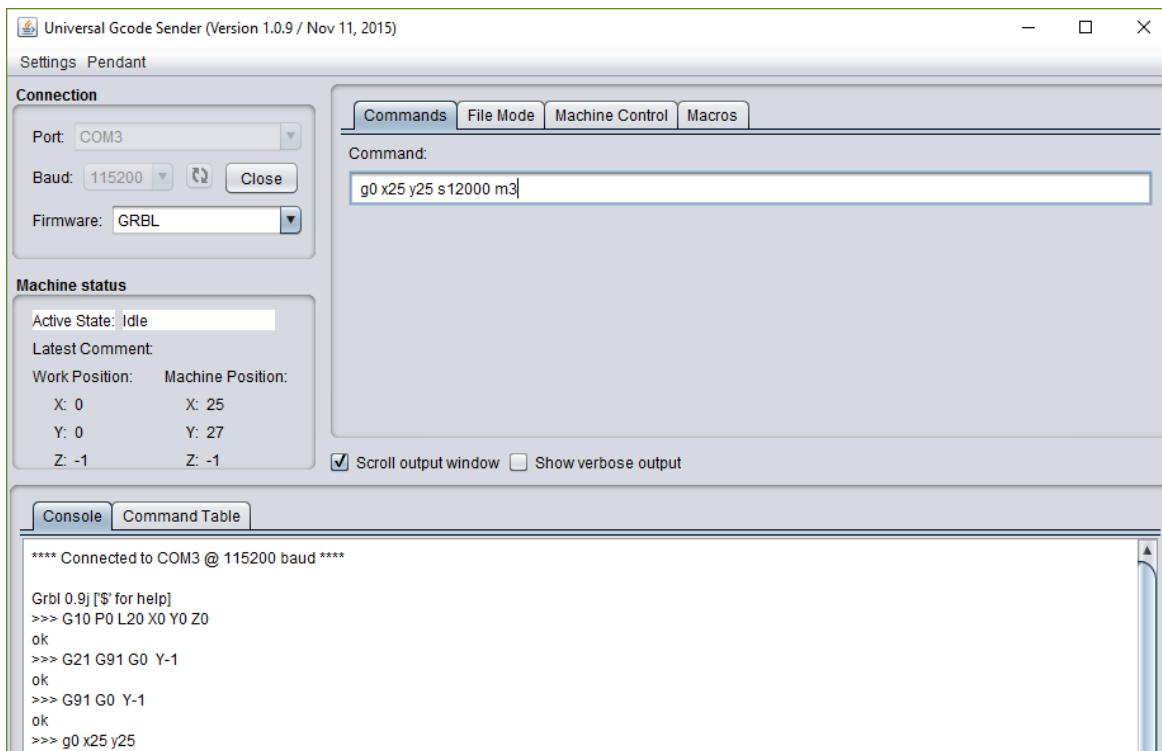
4.8 pav. *Export* parametro verčių lentelė ir optimizuotas įrankio judėjimo kelias

## 4.2. Programa *UniversalGcodeSender*

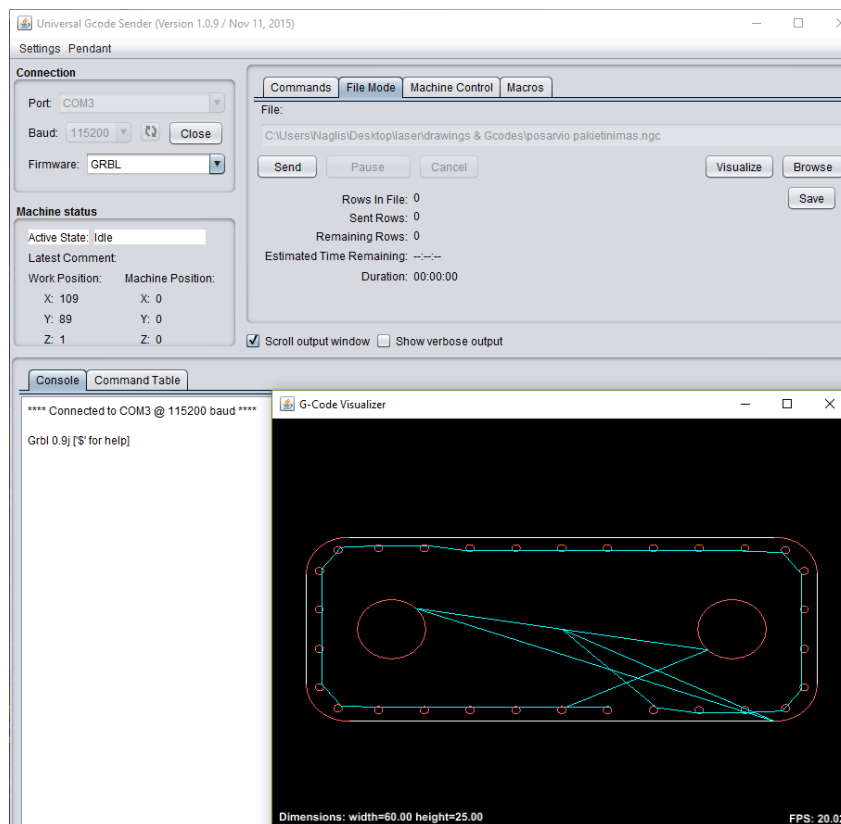
Programa *UniversalGcodeSender* [12] yra skirta persiųsti *g* kodą į lazerio valdiklį. Programa taip pat turi grafinę sąsają, leidžiančią valdyti įrenginį naudojantis klaviatūros klavišais.

Paveiksle 4.9 pavaizduotas *g* kodo įvedimo langas. Į komandų eilutę galima vesti *g* kodą rankiniu būdu. Tokiu būdu galima, siunčiant į valdiklį, komanda po komandos valdyti arba derinti įrenginį.

Paveiksle 4.10 pavaizduotas failo skaitymo ir komandų persiuntimo į staklių valdiklį langas. Mygtuku *Visualize* galima patikrinti pjaunamo kontūro geometriją ir mastelį. Įsitikinus, jog informacija atitinka gaminamą detalę, galima spausti *send* mygtuką ir pjovimo programa bus persiųsta į staklių valdiklį.

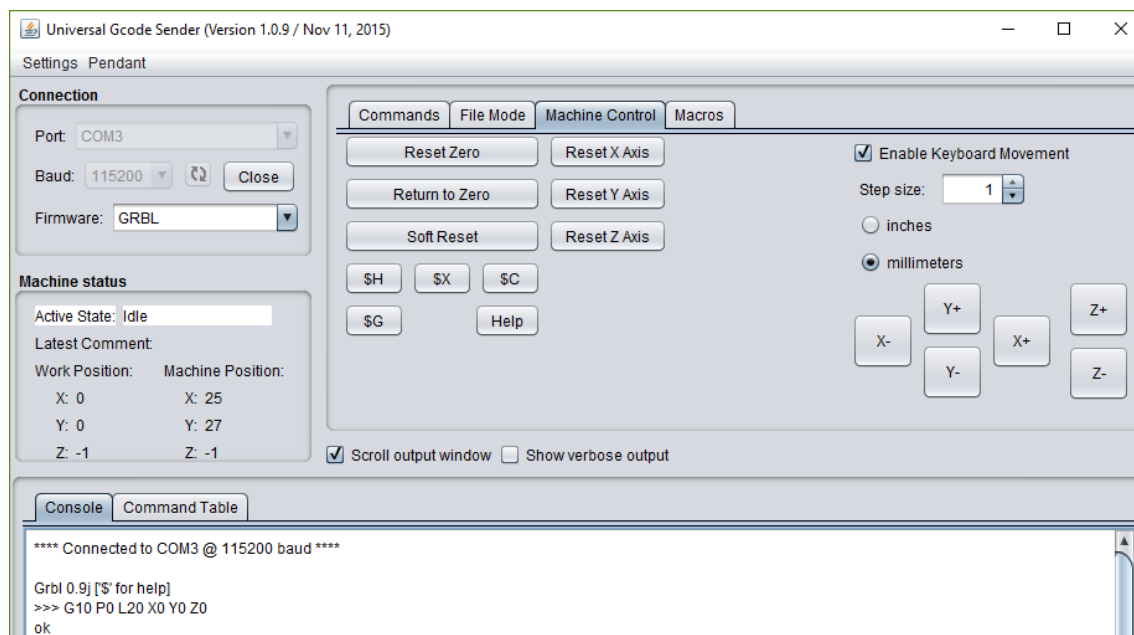


4.9 pav. Komandų įvedimo langas



4.10 pav. Failo skaitymo ir komandų persiuntimo į staklių valdiklį langas

4.11 paveiksle pavaizduotas įrenginio ašių valdymo langas. Naudojantis šia sąsaja galima valdyti stakles naudojant klaviatūrą arba su kompiuterio pelyte.



4.11 pav. Įrenginio ašių valdymo langas

### 4.3. Programa *grbl*

Programa *grbl* [13] yra nemokama, atviro kodo, didelio našumo programinė įranga, skirta valdyti įrenginio judesius iš kompiuterio, ir ji veikia naudojant paprasčiausią *Arduino* plokštę su *Atmega328p* lustu. Programa *grbl* yra parašyta naudojant *C* kalbą panaudojant visas gerąsias *Arduino* savybes. Programa *grbl* gali išlaikyti daugiau nei 30kHz žingsnio greitį, o tai lemia tolygų netrūkčiojančią mašinos veikimą. Ši programa yra plačiai naudojama gaminant mėgėjiškus kompiuteriu valdomus įrenginius.

Programinė įranga *grbl* buvo kurta valdyti **3D** spausdintuvus ir frezavimo stakles, bet ji, taip pat yra lengvai pritaikoma valdyti įvairius įrenginius, įskaitant lazerinius pjautuvus, braižytuvus, automatinio suvirinimo aparatus ir pan.. Dėl savo paprastumo ir nesudėtingos aparatūrinės įrangos reikalavimų, programa *grbl* yra plačiai naudojama įvairių specialybių žmonių, kurie dalinasi savo patirtimi, sukurtų įrenginių brėžiniais, ir schemomis, taip pat nuolat tobulina šią sistemą.

Ši programa naudoja standartinį *g* kodą ir buvo sėkmingai išbandyta su keliomis **CAM** programomis. Lankai, apskritimai ir spiralinės linijos yra visiškai palaikomi, taip pat visos kitos pirminės *g* kodo komandos. Makro funkcijos ir apdirbimo ciklai kol kas nėra palaikomi.

Programinė įranga *grbl* gali būti pritaikyta gamybai mažomis serijomis. Ji naudojama įrenginio valdymui iš kompiuterio naudojant grafinę sąsają arba siunčiant *g* kodą.

Lazerio valdiklyje įrašyta programa padaro, kad *M3* ir *M5* (sūklis įjungimo ir išjungimo kodai) valdytų lazerio būseną (įjungta, išjungta), o sūklis apsisukimų dydis *s* valdytų lazerio intensyvumą.

#### **4.4. Pjovimo lazeriu informacijos paruošimo etapai**

Norint lazeriu išpjauti pageidaujamą detalę, kai naudojama tokia programinė įranga:

*dx2gcode* ir *UniversalGcodeSender*, *grbl*, reikia atlikti šiuos informacijos paruošimo etapus.

1. Pjaunamos detalės brėžinio sukūrimas.
2. Pjaunamo kontūro išsaugojimas \*.*dxf* formatu.
3. Naudojant programą *dx2gcode* sugeneruoti lazerio valdymo kodą.
4. Sugeneruotas valdymo kodas įkeliamas į programą *UniversalGcodeSender*, t.y šis valdymo kodas yra minėtos programos įėjimo informacija.
5. *UniversalGcodeSender* programa siunčia valdymo signalus lazerio valdikliui, kuriame yra įrašyta *grbl* programinė įranga, valdanti žingsninius variklius, kurie naudodami krumplinį diržą verčia judėti lazerio galvutę.

## 5. EKSPERMENTO REZULTATAI

Kaip buvo minėta pirmajame skyriuje, tirsime vieną galingiausių 3 vatų ir 450 nanometrų rinkoje esantį lazerinį diodą. Tokį diodą pasirinkome todėl, kad jo spindulio bangos ilgis yra vienas trumpiausių, lyginant su kitais rinkoje esančiais diodais. Trumpesnio bangos ilgio spindulys daugumos medžiagų paviršių yra žymiai geriau absorbuojamas, todėl daugiau spindulio galios tenka medžiagos pjovimui. Šio lazerio galimybes, pjaunant nemetalingas medžiagas, tirsime pjaudami tokias medžiagas: 1) PMMA plastiką, 2) medį, 3) odą, 4) presuoto plaušo plokštę, 5) medvilninį audinį, 6) vilnonį audinį, 7) veltinį. Kai kurių medžiagų charakteristikos: tankis ir specifinė energija pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. Medžiagų charakteristikos

Medžiaga	Tankis $\rho$ ( $\frac{g}{cm^3}$ )	Specifinė energija $Q$ (kJ/g)
PMMA plastikas	1,18	2,0
Pušies medis	0,524	0,9
Guma	1,3	2,1
Presuoto plaušo plokštė	0,67	1,1

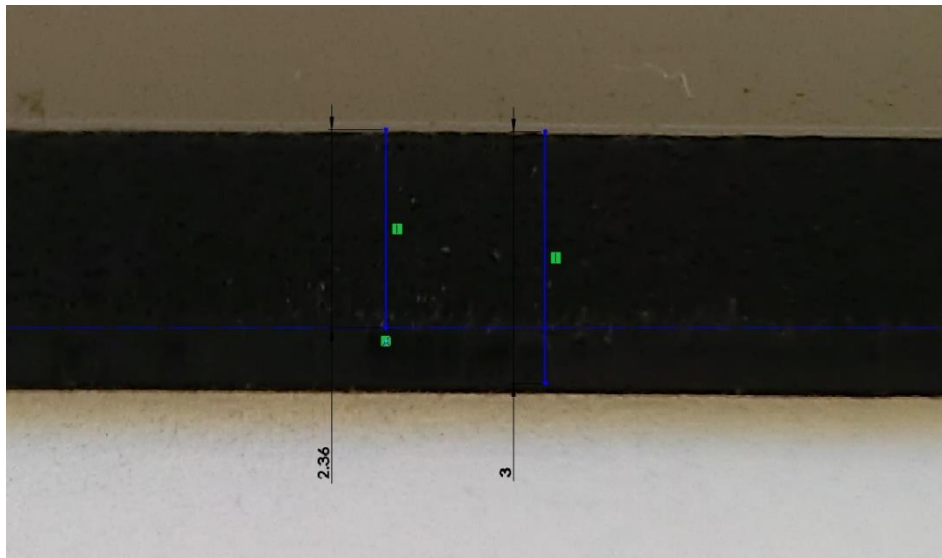
### ***Eksperimento sąlygos.***

Nagrinėjamo 3vatų ir 450 nanometrų bangos ilgio lazerinio diodo galvutė, skirtingai nuo  $CO_2$  lazerių, valdoma kompiuterio, gali judėti  $X$  ir  $Y$  ašių kryptimis, o darbo laukas (medžiagos bandinys) nejuda. Ketvirtajame skyriuje aprašyta programinė įranga, skirta šio lazerinio diodo valdymui. Lazerio spindulio forma yra kvadratas, kurio kraštinės ilgis  $k = 0.5$  mm.

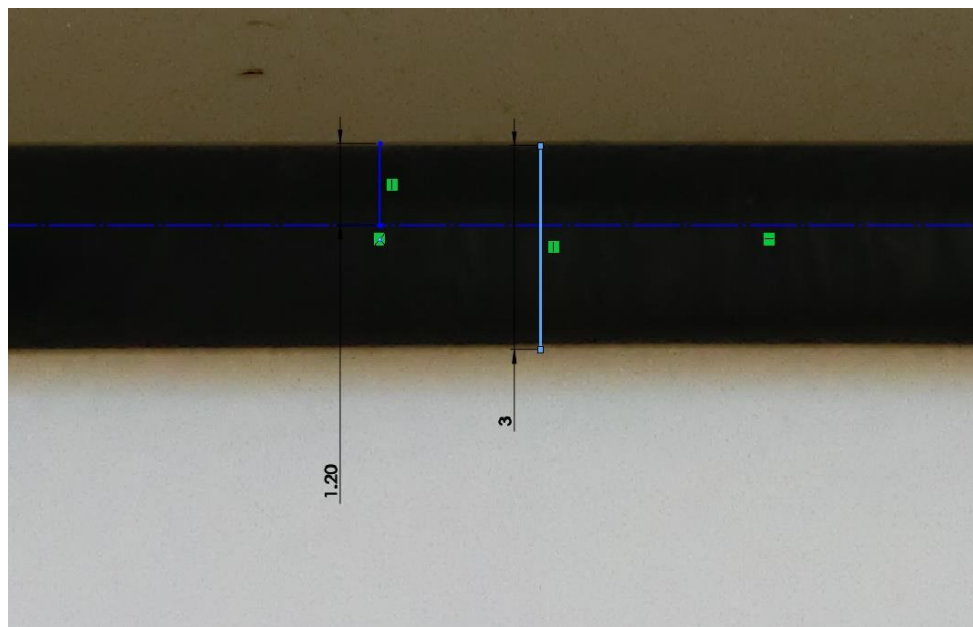
Eksperimento metu galvutės pastūmos greitis buvo keičiamas diapazone 0.5 – 10 mm/s, t. y. nuo 30 mm/min iki 600 mm/min ir matuojamas pjūvio gylis. Pjūvio kontūras buvo stačiakampis su užapvalintais kampais, kurio ilgis 6 cm, o plotis 2 cm.

Lazerio galvutė nurodytu pastūmos greičiu bandinio kontūrą apeina vieną kartą. Tada bandinys laužiamas (kerpamas) pagal kontūrą ir padaroma didelės raiškos pjūvio nuotrauka, kuri įkeliama į kompiuterinio modeliavimo programą „SOLIDWORKS“. Nuotrauką sumažinama iki bandinio storio, nustatoma lūžio linija ir išmatuojamas pjūvio gylis iki lūžio linijos. Aprašytas pjūvio gylio matavimo metodas pavaizduotas 5.1 ir 5.2 paveiksluose. Paveiksle 5.1 vaizduojamas PMMA plastiko pjūvio gylio matavimas. PMMA plastiko storis – 3 mm ir pjūvis atliktas, kai lazerio

galvutės pastūmos greitis  $30 \text{ mm/min}$ . 5.2 paveiksle vaizduojamas PMMA plastiko pjūvio gylio matavimas, kai plastiko storis –  $3 \text{ mm}$ , o pastūmos greitis –  $90 \text{ mm/min}$ . Pjūvio gylio rezultatai kiekvienai medžiagai yra patalpinti žemiau pateiktose lentelėse.



5.1 pav. Pjūvio gylio matavimas  $3 \text{ mm}$  PMMA plastikui, kai pastūmos greitis  $30 \text{ mm/min}$



5.2 pav. Pjūvio gylio matavimas  $3 \text{ mm}$  PMMA plastikui, kai pastūmos greitis  $90 \text{ mm/min}$

Remiantis eksperimento rezultatais, trims medžiagoms: juodos spalvos PMMA plastikui (organiniam stiklui), pušinei fanerai ir presuoto pluošto plokštei yra apskaičiuojami teorinės pjūvio gylio formulės korekcijos koeficientai  $B$  ir  $\omega$ . Taip pat, iš eksperimento rezultatų kiekvienai

medžiagai yra apskaičiuojamas sąlyginai optimalus pjovimo režimas, t. y. koks turėtų būti galvutės pastūmos greitis, kad medžiaga pagal nurodytą kontūrą, kurio perimetro ilgis yra  $l$ , būtų perpjauta per galimai trumpiausią laiką  $t$ .

### 5.1. Medžiagos pjovimo laiko apskaičiavimas.

Tarkime, kad

- pjaunamos medžiagos storis yra  $s$  mm,
- pjūvio kontūro perimetras  $l$  mm,
- pjūvio gylis  $D$  mm,
- lazerio galvutės pastūmos greitis  $v$  mm/min.

Pirmiausia apskaičiuosime vieno lazerio galvutės praėjimo kontūru laiką  $t_1 = \frac{l}{v}$ . Po to, apskaičiuosime galvutės praėjimų skaičių  $sk = \left\lceil \frac{s}{D} \right\rceil$ , čia simbolis  $\left\lceil \frac{s}{D} \right\rceil$  reiškia sveikoji skaičiaus dalis į didesnę pusę, t. y. pats mažiausias sveikasis skaičius didesnis už  $\frac{s}{D}$ . Tada medžiagos pjovimo laikas bus apskaičiuojamas pagal formulę.

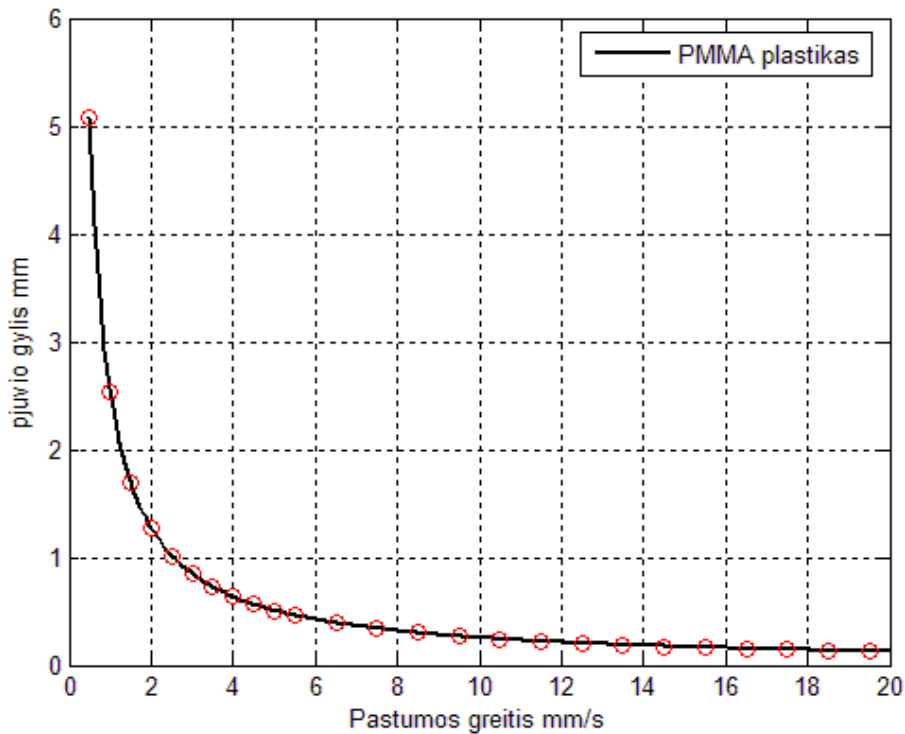
$$t = \frac{l}{v} \cdot \left\lceil \frac{s}{D} \right\rceil. \quad (22)$$

### 5.2. PMMA plastiko pjovimo tyrimas.

Buvo atlikti pjovimo bandymai su juodos spalvos PMMA plastiko (organinio stiklo), o taip pat su geltonos ir pilkos skaidriais to paties plastiko bandiniais.

Kaip buvo minėta, juodo PMMA plastiko charakteristikos yra: tankis –  $\rho = 1,18 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$ , specifinė energija –  $Q = 2$  (kJ/g). Įvertindami, kad tiriamas plastikas yra juodos spalvos, laikysime, kad absorbcijos koeficientas  $a$  yra lygus vienetui. Sufokusuoto lazerio spindulio forma yra kvadratas, kurio kraštinės ilgis –  $k = 0,5$  mm, o lazerio galia –  $3$  W.

Paveiksle 5.3 pavaizduota teorinė juodo PMMA plastiko pjūvio gylio priklausomybė nuo lazerio galvutės pastūmos greičio, kai lazerio galia –  $3$  W. Ši priklausomybė buvo apskaičiuota pagal (13) formulę, t. y.  $D = \frac{a}{Q\rho k} \left(\frac{P}{v}\right)$ , čia  $a$  – absorbcijos koeficientas,  $Q$  – medžiagos specifinė energija,  $\rho$  – medžiagos tankis,  $k$  – kvadrato kraštinės ilgis,  $P$  – lazerio galia,  $v$  – lazerio galvutės pastūmos greitis.



5.3. pav. Teorinė juodo PMMA plastiko pjūvio gylis priklausomybė nuo lazerio galvutės pastūmos greičio, kai lazerio galia 3 W.

PMMA plastiko teoriniai ir eksperimento pjūvio gylis priklausomybės nuo lazerio galvutės postūmio greičio rezultatai patalpinti 2 lentelėje. Šioje lentelėje  $v$  (mm/s) – galvutės pastūmos greitis,  $D_t$ (mm) – teorinis pjūvio gylis,  $D_e$ (mm) – eksperimentinis pjūvio gylis,  $diff$  (mm) – absoliutus skirtumas tarp teorinių ir eksperimento rezultatų.

2 lentelė. Teorinių (žr. (13) formulę) ir eksperimento rezultatų palyginimas PMMA plastikui

$v$ (mm/s)	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	10.0
$D_t$ (mm)	5.09	3.39	2.54	1.69	1.27	0.85	0.64	0.51	0.42	0.36	0.25
$D_e$ (mm)	2.36	1.90	1.60	1.20	0.90	0.56	0.50	0.40	0.36	0.28	0.22
$diff$ (mm)	2.73	1.49	0.94	0.49	0.37	0.29	0.14	0.11	0.06	0.08	0.03

Kaip matyti iš 2-oje lentelėje pateiktų rezultatų, teoriniai ir eksperimento rezultatai žymiai skiriasi, esant mažiems pastūmos greičiams, ir nežymiai, esant didesniems pastūmos greičiams. Kaip buvo minėta anksčiau, šie skirtumai paaiškinami tuo, kad, apskaičiuojant teorinius rezultatus, nebuvo įvertintas medžiagos šiluminis laidumas, taip pat nėra žinomas tikslus



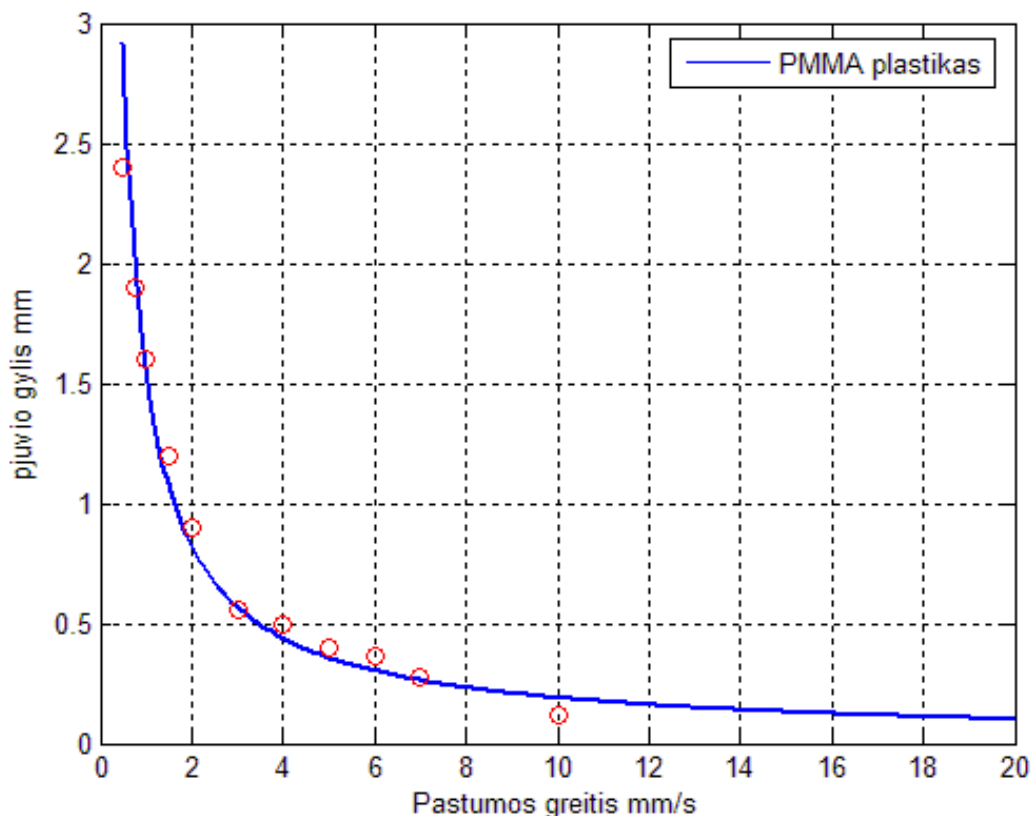
medžiagos absorbcijos koeficientas. Tarp šių veiksnių, svarbiausias veiksnys yra absorbcijos koeficiento vertė. Be to, gylio formulėje yra pervertina lazerio galia. Kaip buvo minėta anksčiau, norėdami teisingiau prognozuoti lazerinio pjūvio gylį, modifikuosime pjūvio gylio formulę, įvesdami į ją dvi konstantas  $B$  ir  $\omega$  [3] (žr. 15 formulę), t. y. ši modifikuota pjūvio gylio formulė, kai sufokusuoto lazerio spindulys yra kvadrato su kraštine  $k$ , formos yra

$$D = B \frac{a}{Q\rho k} \left(\frac{P}{v}\right)^\omega. \quad (23)$$

Korekcijos koeficientų  $B$  ir  $\omega$  vertės yra paskaičiuotos iš eksperimento rezultatų mažiausių kvadratų metodu (žr. 2.2 paragrafą) ir jų vertės yra:  $B = 0.6709$  ir  $\omega = 0.9122$ . Šių koeficientų vertės yra tos pačios eilės, kaip ir tų pačių koeficientų verčių eilės literatūroje [3]. Mūsų apskaičiuotų koeficientų  $B$  ir  $\omega$  verčių ir literatūroje [3] pateiktų tų pačių koeficientų verčių skirtumas paaiškinamas tuo, kad lazerių galios yra skirtingos. Apskaičiuotos koeficientų  $B$  ir  $\omega$  vertės yra trupmeninės. Tai reiškia, kad dėl koeficiento  $B$  teoriniai (žr. (23) formulę) rezultatai mažinami visame pastūmos greičio diapazone. Dėl koeficiento  $\omega$  – teoriniai rezultatai bus mažinami, jei jų vertės didesnės už vienetą, ir – didinami, jei jų vertės yra mažesnės už vienetą. Dėl šios priežasties teoriniai ((23) formulė) ir eksperimento rezultatai labai gerai sutampa. Teoriniai pjūvio gylio priklausomybės nuo lazerio galvutės pastūmos greičio ( $v$ ) rezultatai, paskaičiuoti pagal (23) formulę ir eksperimento rezultatai ( $D_t$  – teoriniai,  $D_e$  – eksperimento) patalpinti 3 lentelėje ir pavaizduoti 5.4 paveiksle. *diff* (mm) – absoliutus skirtumas tarp teorinių ir eksperimento rezultatų.

3 lentelė. Teorinių (žr. (23) formulę) ir eksperimento rezultatų palyginimas PMMA plastikui

$v$ (mm/s)	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	10.0
$D_t$ (mm)	2.91	2.01	1,55	1.07	0.82	0.57	0.44	0.36	0.30	0.26	0.19
$D_e$ (mm)	2.36	1.90	1.60	1.20	0.90	0.56	0.50	0.40	0.36	0.28	0.12
<i>diff</i> (mm)	0.55	0.11	0.05	0.13	0.08	0.01	0.06	0.04	0.06	0.02	0.07



5.4 pav. Teorinė juodo PMMA plastikas ( (23) formulė ) ir eksperimento (skrituliukai) pjūvio gylis priklausomybė nuo lazerio galvutės pastūmos greičio, kai lazerio galia 3 W.

Su nagrinėjamu lazeriniu diodu buvo bandoma pjauti geltonos ir pilkos spalvos skaidrią PMMA medžiagą, tačiau lazerio galingumas buvo per mažas, kad būtų galima pjauti tokios spalvos medžiagą net ir su maža pastūma. Pagrindinė priežastis – mažas lazerinio diodo galingumas ir per mažas absorbcijos koeficientas.

**Sąlyginai optimalaus pastūmos greičio nustatymas.** Kaip buvo minėta iš eksperimento rezultatų galima apskaičiuoti optimalų pjovimo režimą, t. y. koks turėtų būti galvutės pastūmos greitis, kad medžiaga pagal nurodytą kontūrą, kurio perimetro ilgis yra  $l$ , būtų perpjauta per galimai trumpiausią laiką  $t$ . Sąlyginai optimalus režimas yra apskaičiuojamas pagal (22) formulę.

Kaip matyti iš (22) formulės, pasirinktai medžiagai pjovimo laikas tiesiogiai priklauso nuo pjūvio perimetro ilgio bei medžiagos storio ir atvirkščiai proporcingas pastūmos greičiui. Dėl šios priežasties optimalaus pastūmos greičio nustatymas nepriklauso nuo pjūvio perimetro ilgio ir bandinio storio. 4-oje lentelėje pateiktas PMMA plastiko pjovimo laikas, kai bandinio storis  $s = 6 \text{ mm}$  ir  $s = 12 \text{ mm}$ , o pjūvio perimetro ilgis  $l = 100 \text{ mm}$ .

4 lentelė. PMMA plastiko pjovimo laikas  $t_1$  ir  $t_2$ , kai pjūvio perimetro ilgis  $l = 100$  mm ir bandinio storis  $s_1 = 6$  mm ir  $s_2 = 12$  mm

$v$ (mm/min)	30	45	60	90	120	180	240	300	360	420	600
$D_e$ (mm)	2.36	1.90	1.60	1.20	0.90	0.56	0.50	0.40	0.36	0.28	0.12
$t_1$ (min)	10	8.89	6.67	5.56	5.83	6.11	5	5	4.72	5.24	8,33
$t_2$ (min)	16	15.56	13.33	11.11	11.67	12.22	10	10	9,44	10.23	16.67

Iš 4-os lentelės matyti, kad laikas  $t_2$  visur yra dvigubai ilgesnis, nei laikas  $t_1$ . Neatitikimas pirmame ir antrame stulpeliuose paaiškinamas dėl sveikosios dalies  $\left[\frac{s}{D}\right]$  poveikio, t. y. padvigubinus storį  $s$  daugiklis  $\left[\frac{s}{D}\right]$  nebūtinai padvigubės. Iš tikro  $\left[\frac{6}{2.4}\right] = 3$ ,  $\left[\frac{12}{2.4}\right] = 5$ .

Iš 4 lentelės galima daryti išvadą, kad PMMA plastikui sąlyginai optimalus pastūmos greitis priklauso pastūmos greičio intervalui:  $[240 - 360]$  (mm/min). Reikia pastebėti, kad pateiktuose skaičiavimuose nėra įvertintas pjūvio užterštumo efektas, t. y. pjūvis užteršiamas medžiagos lydymosi ir garavimo liekanomis, todėl pjūvio gylis didėjant spindulio praėjimų skaičiui linkęs mažėti.

### 5.3. Pušinės faneros pjovimo tyrimas

Buvo atlikti pjovimo bandymai su šviesios spalvos pušine 5 mm storio fanera. Jos parametrai yra [3]: tankis –  $\rho = 0,524$  ( $\frac{g}{cm^3}$ ), specifinė energija –  $Q = 0.9$  (kJ/g). Laikysime, kad absorbcijos koeficientas  $a$  yra lygus vienetui. Sufokusuoto lazerio spindulio forma yra kvadratas, kurio kraštinės ilgis –  $k = 0.5$  mm, o lazerio galia –  $3$  W. Pastūmos greičio kitimo intervalas:  $[30$  mm/min –  $360$  mm/min] arba kitaip  $[0,5$  mm/s –  $6,0$  mm/s]. 5-oje lentelėje pateikti faneros pjovimo gylio matavimo rezultatai, priklausomai nuo pastūmos greičio.

5 lentelė. Faneros pjovimo gylio priklausomybė nuo pastūmos greičio

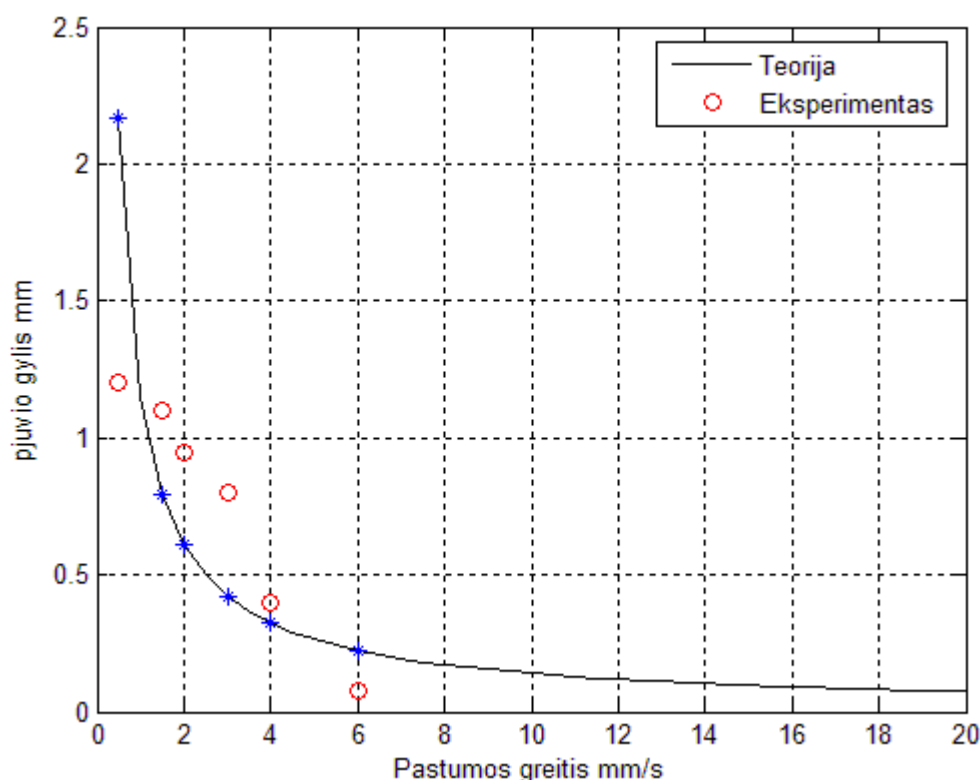
$v$ (mm/s)	0,5	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0
$D_e$ (mm)	1,2	1,1	0,95	0,8	0,4	0,08

Remiantis matavimo rezultatais, mažiausių kvadratų metodu (žr.2.2 paragrafą) buvo paskaičiuotos korekcijos koeficientų  $B$  ir  $\omega$  vertės:  $B = 0.0994$  ir  $\omega = 0.9134$ .

Teoriniai pjūvio gylio priklausomybės nuo lazerio galvutės pastūmos greičio ( $v$ ) rezultatai, paskaičiuoti pagal (23) formulę, ir eksperimento rezultatai patalpinti 6 lentelėje ir pavaizduoti 5.5 paveiksle. Parametras *diff* rodo skirtumą tarp teorinių ( $D_t$ ) ir eksperimento ( $D_e$ ) rezultatų.

6 lentelė. Teorinių (žr. (23) formulę) ir eksperimento rezultatų palyginimas fanerai

$v$ (mm/s)	0,5	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0
$D_t$ (mm)	2,1657	0,7940	0,6105	0,4215	0,3241	0,2238
$D_e$ (mm)	1,2	1,1	0,95	0,8	0,4	0,08
<i>diff</i> (mm)	0,9657	0,3060	0,3395	0,3785	0,0759	0,1438



5.5 pav. Teorinė šviesios pušinės faneros ( (23) formulė ) ir eksperimento (skrituliukai) pjūvio gylio priklausomybė nuo lazerio galvutės pastūmos greičio, kai lazerio galia 3 W.

**Sąlyginai optimalus pastūmos greičio apskaičiavimas.** Iš eksperimento rezultatų nustatysime sąlyginai optimalų lazerio galvutės pastūmos greitį, t. y. tokį greitį, kad, juo pjaunant, fanera būtų perpjauinama per trumpiausią laiką. 7-oje lentelėje pateikta pjovimo laiko priklausomybė (žr. (22) formulę) nuo pastūmos greičio, kai faneros storis – 5 mm, o pjūvio perimetro ilgis – 100 mm.

7 lentelė. Faneros pjovimo laikas  $t$ , kai pjūvio perimetro ilgis  $l = 100$  mm ir bandinio storis  $s = 5$  mm

$v$ (mm/s)	0,5	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0
$D_e$ (mm)	1,2	1,1	0,95	0,8	0,4	0,08
$t$ (min)	16,67	5,56	4,17	3,88	5,42	17,5

Kaip buvo minėta anksčiau, optimalus pastūmos greitis nepriklauso nuo perimetro ilgio ir bandinio storio. Todėl iš 7 lentelės rezultatų galime spręsti, kad sąlyginai optimalus lazerio galvutės pastūmos greitis fanerai yra  $3$  mm/s ( $180$  mm/min). Be to, reikia pastebėti, kad esant mažam pastūmos greičiui, ypač, kai pastūmos greitis yra  $0,5$  mm/s ( $30$  mm/min), apdeginami pjūvio kraštai.

Kaip matyti iš faneros pjovimo tyrimo rezultatų, nagrinėjamas lazerinis diodas nėra tinkamas įrankis pjauti storesnei, nei  $1$  mm fanerai. Lazerio galvutės pastūmos greitis  $30$  mm/min pagal pjovimo gylį galėtų būti tinkamas fanerai pjauti, tačiau, kaip buvo pastebėta, esant tokiam pastūmos greičiui plačiai apdeginami pjūvio linijos kraštai. Todėl nagrinėjamas lazerinis diodas pilnai tinkamas fanerai graviruoti. Tačiau reikia pastebėti, jei faneros arba medžio plokštės storis neviršija  $1$  mm, nagrinėjamas lazerinis diodas vieno spindulio praėjimu ją perpjauna, esant  $120$  mm/min pastūmos greičiui.

5.6 paveisle parodyti prie 6 lentelėje nurodytų pastūmos greičių faneros pjovimo rezultatai.



5.6. Faneros pjovimo rezultatai

#### 5.4. Presuotos plaušo plokštės pjovimo tyrimas

Buvo atlikti pjovimo bandymai su pilkos spalvos 5 mm storio presuota plaušo plokšte. Jos parametrai yra [3]: tankis –  $\rho = 0,67 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$ , specifinė energija –  $Q = 1,1 (kJ/g)$ . Laikysime, kad absorbcijos koeficientas  $a$  yra lygus vienetui. Sufokusuoto lazerio spindulio forma yra kvadratas, kurio kraštinės ilgis  $k = 0,5 mm$ , o lazerio galia – 3 W. Pastūmos greičio kitimo intervalas: [30 mm/min – 180 mm/min] arba kitaip [0,5 mm/s – 3,0 mm/s].

8-je lentelėje pateikta presuotos plaušo plokštės pjovimo gylio priklausomybė nuo lazerio galvutės pastūmos greičio.

8 lentelė. Presuotos plaušo plokštės pjovimo gylio ( $D_e$ ) priklausomybė nuo pastūmos greičio ( $v$ )

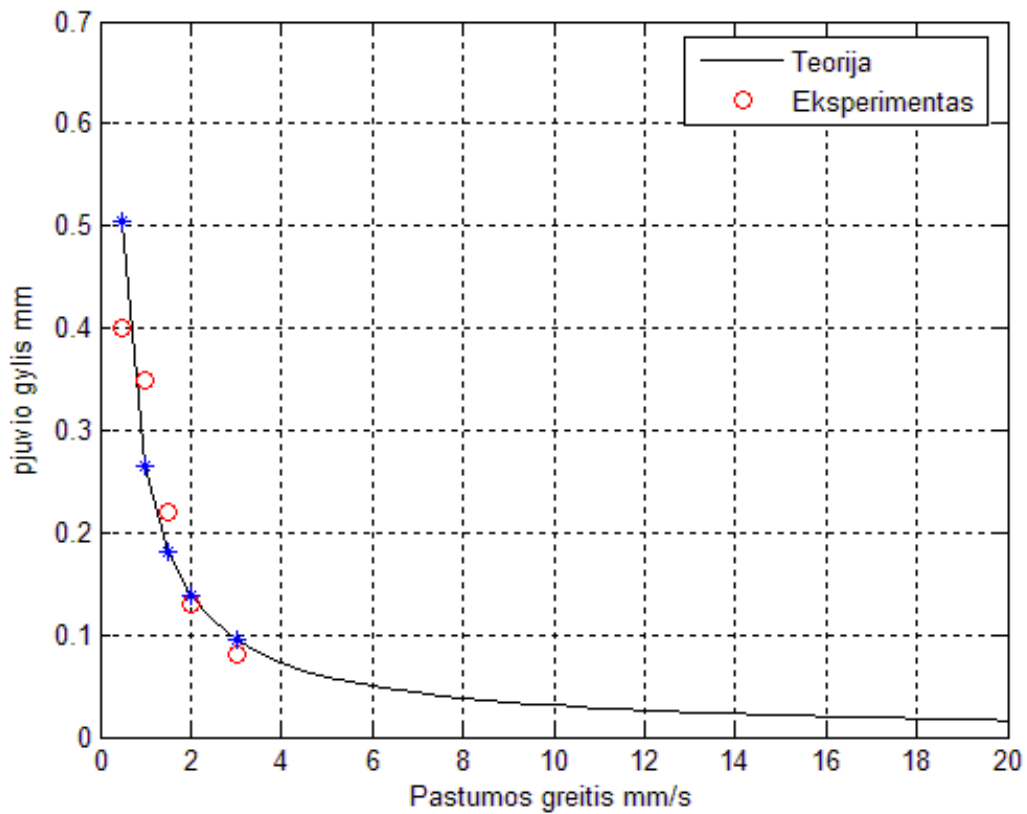
$v (mm/s)$	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
$D_e(mm)$	0,4	0,35	0,22	0,13	0,08

Remiantis 8-os lentelės rezultatais, mažiausių kvadratų metodu (žr.2.2 paragrafą) apskaičiuojame korekcijos koeficientų  $B$  ir  $\omega$  vertės:  $B = 0.0351$  ir  $\omega = 0.9295$ .

Teoriniai pjūvio gylio ( $D_t$ ) priklausomybės nuo lazerio galvutės pastūmos greičio ( $v$ ) rezultatai, paskaičiuoti pagal (23) formulę, ir eksperimento ( $D_e$ ) rezultatai patalpinti 9-oje lentelėje ir pavaizduoti 5.7 paveiksle. Parametras *diff* rodo skirtumą tarp teorinių ( $D_t$ ) ir eksperimento ( $D_e$ ) rezultatų.

9 lentelė. Teorinių (žr. (23) formulę) ir eksperimento rezultatų palyginimas plokštei

$v (mm/s)$	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
$D_t(mm)$	0,5037	0,2645	0,1814	0,1389	0,0953
$D_e(mm)$	0,4	0,35	0,22	0,13	0,08
<i>diff</i> (mm)	0,1037	0,0855	0,0386	0,0089	0,0153



5.7 pav. Teorinė plokštės ( (23) formulė ) ir eksperimento (skrituliukai) pjūvio gylio priklausomybė nuo lazerio galvutės pastūmos greičio, kai lazerio galia 3 W.

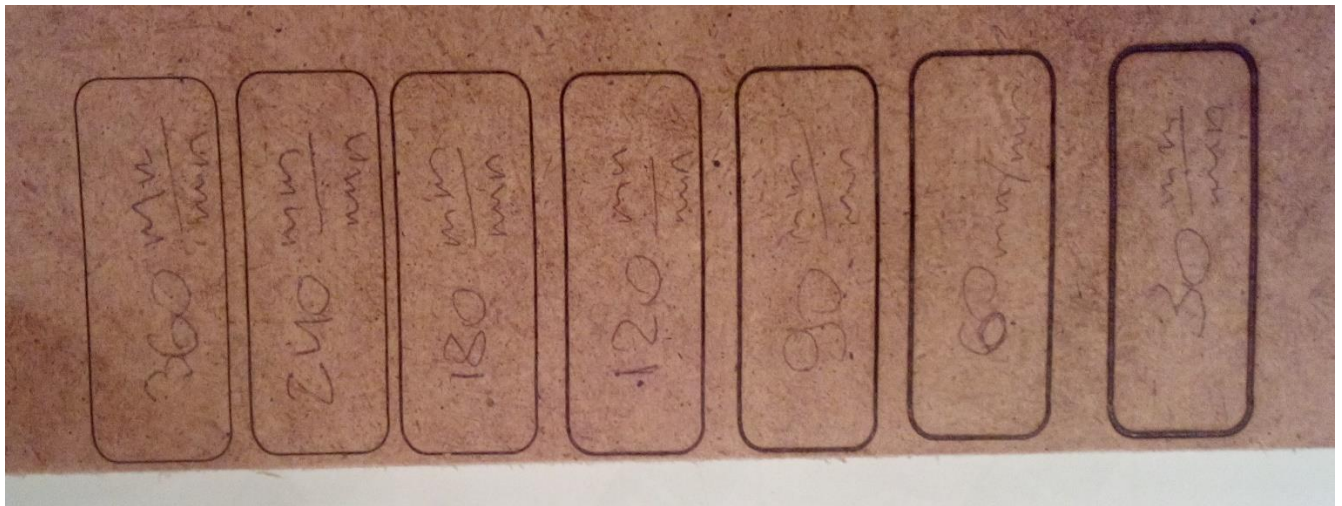
**Sąlyginai optimalus pastūmos greičio apskaičiavimas.** Kaip ir ankstesniais atvejais, iš eksperimento rezultatų pagal (22) formulę nustatysime sąlyginai optimalų lazerio galvutės pastūmos greitį presuoto plaušo plokštei. 10-oje lentelėje pateikta pjovimo laiko priklausomybė nuo pastūmos greičio, kai plokštės storis – 5 mm, o pjūvio perimetro ilgis – 100 mm.

10 lentelė. Plokštės pjovimo laikas  $t$ , kai pjūvio perimetro ilgis  $l = 100$  mm ir bandinio storis  $s = 5$  mm

$v$ (mm/s)	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
$D_e$ (mm)	0,4	0,35	0,22	0,13	0,08
$t$ (min)	43,3	25	25,6	32,5	35

Kaip matyti iš 10-os lentelės rezultatų, presuoto plaušo plokštei pjauti sąlyginai optimalus lazerio galvutės pastūmos greitis yra apie  $1 \text{ mm/s}$ , t. y.  $60 \text{ mm/min}$ . Tačiau, kaip ir faneros atveju, nagrinėjamas diodas labiau tinka plokštės graviuravimui nei jos pjovimui.

5.8 paveiksle parodyti prie 9 lentelėje nurodytų pastūmos greičių presuotos plaušo plokštės pjovimo rezultatai.



5.8 pav, Plokštės pjovimo rezultatai

### 5.5. Medvilninio ir vilnonio audinio bei veltinio pjovimo tyrimas

Su anksčiau aprašytu lazeriniu diodu atlikome medvilninio ir vilnonio audinio pjovimo tyrimą. Tokių audinių pjovimo lazeriu galimybės ypač aktualios dizaineriams ir siuvėjams. Dėl audinių specifikos, kuri labai skiriasi nuo anksčiau aprašytų tiriamų medžiagų specifikos, keitėme audinių pjovimo tyrimo metodiką. Pasirinktas audinys buvo pjaunamas lazeriu, keičiant jo galvutės pastūmos greičius, ir stebint ar vienu lazerio spindulio praėjimu audinys pilnai perpjaunamas. Tuo būdu nustatome ar lazeris tinkamas audiniui pjauti, o taip pat nustatome sąlyginai optimalų lazerio galvutės pastūmos greitį. Aišku, kad sąlyginai optimalus pastūmos greitis yra didžiausias greitis, kuriam esant audinys pilnai perpjaunamas.

Buvo tiriamas medvilninis (džinsinis) audinys, o taip pat  $1,5 \text{ mm}$  storio žalios, rudos ir raudonos spalvos vilnonis audinys. Vilnos tankis  $330 \text{ g/m}^2$ . Tyrimo rezultatai patalpinti 11-je lentelėje.



11 lentelė. Medvilninių ir vilninių medžiagų bei veltinio pjovimo tyrimo rezultatai

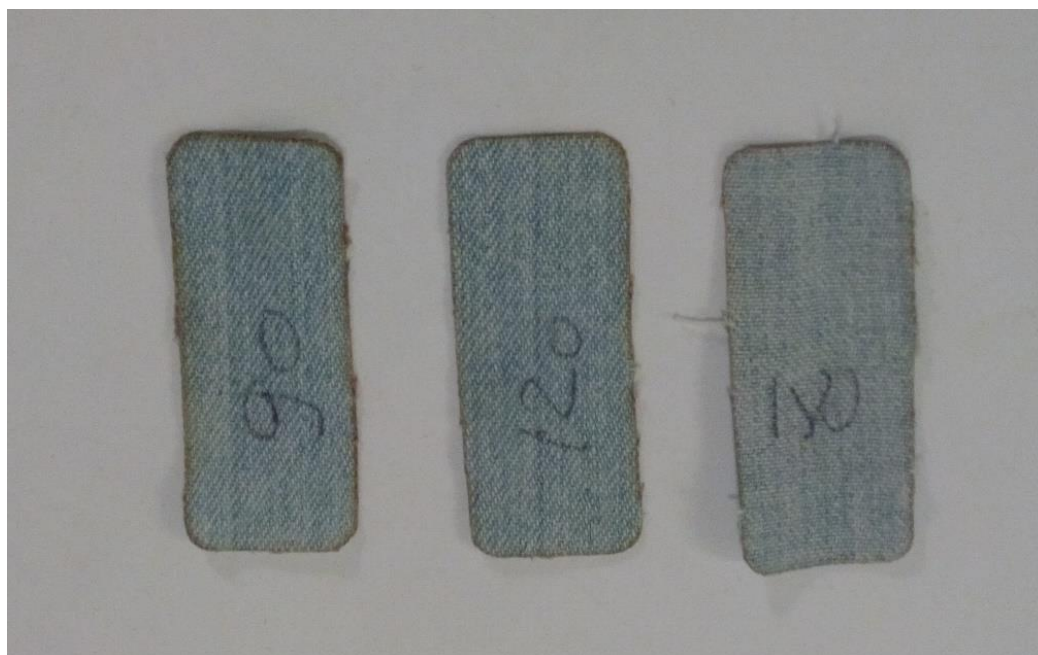
<i>v (mm/min)</i>	60	90	120	180	200	300
<b>Medvilninis audinys</b>		+	+	±	-	-
<b>Vilninis audinys</b>						
<i>Žalia</i>		+	+	+	+	±
<i>Ruda</i>		+	+	+	+	±
<i>Raudona</i>		+	+	+	+	±
<b>Sintetinis veltinis</b>						
	+	±				

11-os lentelės simboliai: „+“ reiškia, kad audinys (veltinis) spindulio vieno praėjimo metu buvo pilnai perpjautas,

„±“ reiškia, kad audinys (veltinis) spindulio vieno praėjimo metu buvo beveik perpjautas, t. y. keletas siūlų buvo neperpjauti (keiaetoje vietų veltinis audinys nebuvo pilnai perpjautas),

„-“ reiškia, kad audinys spindulio vieno praėjimo metu nebuvo perpjautas.

5.9 paveiksle parodytos iš medvilninio audinio, o 5.10 iš vilninio audinio išpjautos detalės.



5.9 pav. Iš medvilninio audinio išpjautos detalės



5.10 pav. Iš vilnonio audinio išpjautos detalės

Iš 11-os lentelės matyti, kad nagrinėjamas lazerinis diodas tinka pjauti medvilniniams ir vilniniams audiniams. Be to, sąlyginai optimalus lazerio galvutės pastūmos greitis medvilniniams audiniams yra  $120 \text{ mm/min}$ , o vilniniams audiniams –  $200 \text{ mm/min}$ .

Be minėtų audinių taip pat tyrėme  $6 \text{ mm}$  storio sintetinio veltinio pjovimo galimybes. Tyrimo rezultatai taip pat patalpinti 11-je lentelėje, o išpjautos detalės parodytos 5.11 paveiksle.

Sąlyginai optimalus lazerio galvutės pastūmos greitis veltiniui pjauti yra  $60 \text{ mm/min}$ .



5.11 pav. Iš sintetinio veltinio išpjautos detalės

## 5.6. Odos pjovimo tyrimas

Be anksčiau tirtų medžiagų buvo bandoma pjauti kaulės ir jaučio odą. Kiaulės odos storis – 1,2 mm, jaučio odos storis – 3 mm. Kiaulės odos spalva - rusva, jaučio odos spalva – ruda. Bandymo metu, naudojant mažą lazerio galvutės pastūmos greitį, buvo nustatoma per kiek lazerio spindulio praėjimų medžiaga yra perpjaunama. Tyrimo rezultatai pavaizduoti 12 lentelėje.

12 lentelė. Odos pjovimo tyrimo rezultatai.

$v$ (mm/min)	45	60
Kiaulės oda	+	±
Spindulio praėjimų skaičius	3	2
Jaučio oda	+	±
Spindulio praėjimų skaičius	3	4

12-os lentelės simboliai: „+” reiškia, kad oda buvo pilnai perpjauta,

„±“ reiškia, kad oda buvo beveik perpjauta, t. y. keletose vietose oda nebuvo pilnai perpjauta,

skaičiai „2“, „3“ ir „4“ rodo mažiausią lazerio spindulio praėjimų skaičių, kuriam esant oda buvo perpjauta.

Iš pateiktos lentelės matyti, kad nagrinėjamas lazerinis diodas tinka ir odai pjauti. Tačiau sąlyginai optimalus odos pjovimo greitis, t. y. pastūmos greitis yra mažas: kiaulės odai – 45 – 60 mm/min, jaučio odai – 30 – 45 mm/min. Odos prapjovimo kokybė labai priklauso nuo odos tankumo. Atliekant pjovimo bandymus buvo pastebėta, kad tame pačiame odos gabale, vienoje vietoje oda buvo prapjauta kiaurai per vieną praėjimą esant 120 mm/min pastūmos greičiui, o kitoje vietoje prireikdavo dviejų praėjimų 45 mm/min pastūmos greičiu. Dėl to darome išvadą, kad lazerinis diodas yra tinkamas odai pjauti, bet rekomenduojame pasirinkti konservatyvesnius pjovimo režimus, norint užtikrinti pilną kontūro prapjovimą. Taip pat buvo pastebėta, kad net ir esant mažiems pastūmos greičiams (30 mm/min) odos kraštai neapdegdavo, kaip faneros ar presuoto plaušo plokštės.

5.12 paveiksle parodytos iš odos išpjautos detalės.



5.12 pav. Iš odos išpjautos detalės

Kaip matyti iš 12 lentelės, sąlyginai optimalus lazerio galvutės pastūmos greitis kiaulės odai yra 45- 60 *mm/s*, naudojant 2 ar daugiau praėjimus, o jaučio odai – 30-45 *mm/s* naudojant tris ar daugiau praėjimus.

Iš gautų rezultatų galime daryti išvada, kad nagrinėjamas lazeris gerai tinka 1,2 *mm* kiaulės odai pjauti, tačiau nėra geriausias įrankis 2 *mm* jaučio odai pjauti.

## IŠVADOS

1. Atlikta nemetalinių medžiagų pjovimo lazeriu literatūros apžvalga leidžia daryti išvadą, kad mažos galios lazeriniai diodai gali būti naudojami ne tik graviravimui, bet ir nemetalinių medžiagų pjovimui. Reikia pažymėti, kad nemetalinių medžiagų pjovimo mažos galios lazeriniais diodais tyrimai nėra išsamūs tiek pjaunamų medžiagų įvairovė, tiek pjovimo laiko, t. y. lazerio galvutės pastūmos greičio optimalumo požiūriu. Todėl darbe atliktas vieno galingiausių 3 vatų ir 450 nanometrų rinkoje esančių lazerinių diodų galimybės pjauti nemetalines medžiagas praplečia minėtus tyrimus.

2. Darbe išnagrinėta atviro kodo programinė įranga, skirta lazerinio diodo valdymui, pjaunant nemetalines medžiagas, leido sukurti šių medžiagų pjovimo tyrimo metodiką ir atlikti įvairių medžiagų pjovimo eksperimentus.

3. Darbe modifikuotas literatūroje žinomas medžiagų pjovimo matematinis modelis, įvertinant, kad lazerio spindulys nebūtinai yra skritulio formos, kas būdinga lazeriniams diodams, leido matematiškai apdoroti eksperimento rezultatus. Šis modelis, panaudotas matematiškai apdorojant PMMA plastiko (organinis stiklas), medžio (faneros) ir presuoto plaušo plokštės pjovimo rezultatus, parodė, kad modifikuotas matematinis modelis gerai sutampa su eksperimento rezultatais.

4. Medvilninių ir vilninių audinių, sintetinio veltinio, taip pat odos pjovimo eksperimentai parodė, kad nagrinėjamas lazeris gali būti naudojamas šių medžiagų pjovimui. Todėl minėtas lazerinis diodas gali būti taikomas dizainerių darbuose, taip pat vienetinėje ir siuvimo mažomis serijomis pramonėje.

5. Remiantis eksperimento rezultatais buvo apskaičiuotas (PMMA plastikui, fanerai ir plokštei) ar eksperimentiškai nustatytas (audiniams ir odai) sąlyginai optimalus lazerio galvutės postūmio greitis, t. y. toks greitis, kad bandinys būtų perpjaunamas per trumpiausią laiką.

6. Remiantis darbe atliktais tyrimais, drauge su magistrinio darbo vadove buvo paruoštas straipsnis tarptautinei mechanikų konferencijai: „*Naglis Ausmanas, Jolanta Baskutienė. The analysis of the nonmetallic materials cutting by a low power diode laser. Proceedings of 22nd International Conference „MECHANIKA 2017“*“

## LITERATŪROS SARAŠAS

1. **Hilton, P.A.** The early days of laser cutting. 2007. 11th Nordic Conference in Laser Processing of Materials, Lappeenranta, Finland, August 20–22.  
<http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/the-early-days-of-laser-cutting-august-2007>
2. **Dahotre, N.B., Harimkar, S.** 2014. Laser Fabrication and Machining of Materials. Springer-Verlag New York Inc. 573 p.
3. **Zhou, B.H., Mahdavian, S.M.** 2004. Experimental and theoretical analyses of cutting nonmetallic materials by low power CO<sub>2</sub>-laser. Journal of Materials Processing Technology. 146(2): 188-192.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360301001X>
4. **Bashir Ahmed Tahir, Rashid Ahmed, Ashiq, M.G.B., Afaq Ahmed, and Saeed, M.A.** 2012. Cutting of nonmetallic materials using Nd:YAG laser beam. Chin. Phys. B 21(4): 044201 1- 4.  
<http://dx.doi.org/10.1088/1674-1056/21/4/044201>
5. **Nasim, H., Jamil, Y.** 2014. Diode lasers: From laboratory to industry. Optics & Laser Technology. 56: 211-222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.08.012>
6. **Stepanov, A., Saukkonenb, E., Piilias, H.** 2015. Possibilities of laser processing of paper materials. Physics Procedia. 78: 138-146.
7. **Costa Rodrigues, G., Cuypers, M., Kellens, K., Duflou, J.R.** 2013. Laser cutting with direct diode laser. Physics Procedia, 41: 558-565.
8. Prieiga per internetą: <https://hackaday.io/project/6189-55w-diode-laser-for-cnc>
9. Prieiga per internetą: <http://odcforce.com/Background-and-Projects/Page/-/Category>
10. Prieiga per internetą: <http://www.arduino.org/about-us>
11. Prieiga per internetą: <https://sourceforge.net/projects/dxf2gcode/>
12. Prieiga per internetą: [http://winder.github.io/ugs\\_website/](http://winder.github.io/ugs_website/)
13. Prieiga per internetą: <https://github.com/grbl/grbl>
14. **Vicanek, M., Simon, G., Urbassek, H.M., Decker, I.** 1987. Hydrodynamical instability of melt flow in laser cutting. J. of Physics D: Applied Physics 20: 140–145.
15. **Cai, L., Sheng, P.** 1996. Analysis of Laser Evaporative and Fusion Cutting. J. Manuf. Sci. Eng 118(2): 225-234. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2831015>
16. **Pietro, D. P. and Yao, Y.L.** 1994. A new technique to characterize and predict laser cut striations. Int. J. of Machine Tools and Manufacture. 35: 993–1002.

17. **A. Sunar Baskoro, Herwandi, KGS Ismail, A. Siswanta, G. Kiswanto** . 2011. Analysis of Cutting Process of Materials Using Low Power Laser Diode and  $CO_2$  . International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering  
IJMME-IJENS Vol: 11 No: 6. [http://www.ijens.org/vol\\_11\\_i\\_06/118006-3535-ijmme-ijens.pdf](http://www.ijens.org/vol_11_i_06/118006-3535-ijmme-ijens.pdf)
18. Prieiga per internetą: <https://bosslaser.com/blog/2016/02/12/which-co2-laser-tube-is-best-dc-or-rf/#.WSq3uWjyIU>
19. Prieiga per internetą: [https://en.wikipedia.org/wiki/Laser\\_diode](https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_diode)
20. Prieiga per internetą: <http://itbgelectronicgadget.bovo.site/2016/01/18/recensionip983766/>
21. Prieiga per internetą: <https://github.com/grbl/grbl/wiki/Connecting-Grbl>

## PRIEDAI

### *postpro\_config.cfg*, programos dalies tekstas

```
[Program]
# This will be done after each layer, if different tools are
used.
tool_change = T%tool_nr M6%nlS%speed%nl
# This will be done after each change between cutting in
plane or cutting in depth.
feed_change = F%feed%nl
# This will be done between each shape to cut.
rap_pos_plane = G0 X%X E Y%Y E%nl
# This will be done between each shape to cut.
rap_pos_depth = #G0 Z%Z E %nl
# This will be used for shape cutting.
lin_mov_plane = G1 X%X E Y%Y E%nl
# This will be used for shape cutting.
lin_mov_depth = #G1 Z%Z E%nl
# This will be used for shape cutting.
arc_int_cw = G2 X%X E Y%Y E I%I J%J%nl
# This will be used for shape cutting.
arc_int_ccw = G3 X%X E Y%Y E I%I J%J%nl
# Generally set to G40%nl
cutter_comp_off = G40%nl
# Generally set to G41%nl
cutter_comp_left = G41%nl
# Generally set to G42%nl
cutter_comp_right = G42%nl
# This will be done before starting to cut a shape or a
contour.
pre_shape_cut = G1 M3 M8%nl
# This will be done after cutting a shape or a contour.
post_shape_cut = M9 M5%nl
# Defines comments' format. Comments are written at some
places during the export in order to make the g-code better
readable.
comment = %nl(%comment)%nl
```