

ŠOLSKI CENTER VELENJE,
ELEKTRO IN RAČUNALNIŠKA ŠOLA VELENJE
Trg mladosti 3, 3320 Velenje
MLADI RAZISKOVALCI ZA RAZVOJ ŠALEŠKE DOLINE

RAZISKOVALNA NALOGA

PRENESIMO ENERGIJO VETRA

Tematsko področje: elektrotehnika, elektronika in robotika

Avtorja:

FILIP PAČNIK, 3. LETNIK

NIK ŽLEBNIK JANČIČ, 3. LETNIK

Mentor:

PETER VRČKOVNIK, DIPL. INŽ. ELEKTROTEHNIKE

Velenje, marec 2022

Raziskovalna naloga je bila opravljena na Šolskem centru Velenje, Elektro in računalniški šoli Velenje

Mentor:

Peter Vrčkovnik, dipl. inž. elektrotehnike

Datum predstavitve: marec 2022

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

<i>ŠD</i>	ŠC Velenje, Elektro in računalniška šola, šolsko leto 2021/2022
<i>KG</i>	elektrotehnika / avtomatika / energetika / elektrarne / veter / mobilnost
<i>AV</i>	PAČNIK Filip / Žlebnik JANČIČ Nik
<i>SA</i>	VRČKOVNIK Peter
<i>KZ</i>	3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3
<i>ZA</i>	Šolski center Velenje, Elektro in računalniška šola
<i>LI</i>	2022
<i>IN</i>	PRENESIMO ENERGIJO VETRA
<i>TD</i>	raziskovalna naloga
<i>OP</i>	
<i>LJ</i>	<i>SL</i>
<i>JI</i>	<i>sl/en</i>

AI Težnja k energetske neodvisnosti, dosegljivosti in prenosljivosti se aktivno stopnjuje. Nazori dolgoročnosti odsevajo le konstanto večavo električne potrošnje in dvigovanje cen energije. Akti gospodarskih organizacij izpostavljajo iniciativo razvoja in vpeljavajo postopkov eksploatacij čistih virov energije. V številnih razvitih državah funkcionirajo javni skladi, zavezani finančni podpora projektiranju in gradnji elektrarn na obnovljive vire energije tako gospodinjstvom kot gospodarskim subjektom. Številni odjemalci prenosnih ali distribucijskih omrežij skušajo obnoviti pogodbene odnose s ponudnikom električne energije s postavitvijo lastniških elektrarn. Prepričljiva rešitev, toda povračilna doba kompletnih elektrarn, navezujoča na komplekse manjše potrošnje (začasna bivališča, premični objekti, izgradljiva prenočišča, bivalniki, avtodomi, pikniške lože, ločeni kletni prostori) je neredko krepko daljša od idealne. Izdelava cenovno dostopne individualne elektrarne bi drastično zmanjšala komunalne stroške.

KEY WORDS DOCUMENTATION

<i>ND</i>	ŠC Velenje, Elektro in računalniška šola, school year 2021/2022
<i>CX</i>	electronics / automatics / energetics / power plants / wind / mobility
<i>AU</i>	PAČNIK Filip, ŽLEBNIK JANČIČ Nik
<i>AA</i>	VRČKOVNIK Peter
<i>PP</i>	3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3
<i>PB</i>	Šolski center Velenje, elektro in računalniška šola
<i>PY</i>	2022
<i>TI</i>	LET'S TRANSFER WIND ENERGY
<i>DT</i>	Research work
<i>NO</i>	
<i>LA</i>	SL
<i>AL</i>	sl / en
<i>AB</i>	Tendency towards energetic independence, attainability and transmission actively rises. Long-term prospects reflect only a ceaseless increment in electricity consumption as well as in uprising energy prices. Acts of economic organs highlight the initiative of development and prelude procedures for exploitation of clean energy sources. In many developed countries, there are public funds pledged to financial support for the innovation and construction of renewable energy power plants for both, households and enterprises. Many customers of transmission or distribution networks are trying for contract renewals in order to built their own power plants. Compelling solution, except the retaliatory period of proprietary power source, bidding to facilities of low exertion facilities (temporary housing, mobile complexes, detachable accommodations, motorhomes, picnic lodges, separate basement premises) is often much longer than ideal. Nevertheless, manufacture of affordable individual power plant would drastically reduce utility costs.

SEZNAM OKRAJŠAV IN KRATIC

<i>3D</i>	3-dimenzionalno
<i>AC</i>	izmenična napetost / tok (angl. alternating current)
<i>angl.</i>	polno pomenski prevod iz angleškega jezika
<i>BEM</i>	teorija momenta elementa rezila (angl. blade element momentum theory)
<i>CAD</i>	računalniško podprto oblikovanje (angl. computer aided design)
<i>DC</i>	enosmerna napetost / tok (angl. direct current)
<i>ETSAP</i>	<i>IEA glasilo</i> (angl. Energy Technology Systems Analysis Program)
<i>FCStd</i>	nativni format računalniške programske opreme FreeCAD
<i>G – code</i>	programski jezik numeričnega krmiljenja
<i>HAWT</i>	horizaintalno aksialna vetrna turbina (angl. horizontal axis wind turbine)
<i>IEA</i>	Mednarodna agencija za energijo (angl. International Energy Agency)
<i>IDE</i>	integrirano razvojno okolje (angl. integrated development environment)
<i>IRENA</i>	Mednarodna agencija za obnovljivo energijo (angl. International Renewable Energy Agency)
<i>LED</i>	svetleča dioda (anlg. light emitting diode)
<i>NEK</i>	nuklearna elektrarna Krško
<i>npr.</i>	na primer
<i>oz.</i>	oziroma
<i>pribl.</i>	približno
<i>rpm</i>	število obratov v minuti (angl. rotations per minute)
<i>STL</i>	(angl. stereolithography, morda boste slišali, da se imenuje tudi angl. Standard Triangle Language ali angl. Standard Tessellation Language)

TEŠ Termo elektrarna Šoštanj

VAWT vertikalno aksialna vetrna turbina (angl. vertical axis wind turbine)

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
1.1 UVODNA BESEDA.....	1
1.2 GLOBALNI ELEKTROENERGETSKI SEKTOR	1
1.2.1 SLOVENSKI ENERGETSKI SEKTOR	2
1.3 IDEJA IN NAMEN RAZISKAVE.....	4
1.4 HIPOTEZE.....	5
1.4.1 VALIDACIJA TEZ	5
2 PREGLED STANJA TEHNIKE	6
2.1 ENERGIJA.....	6
2.1.1 ENERGIJA VETRA	6
2.2 EVOLUCIJA VETRNE MOČI.....	6
2.3 OBSTOJEČE TEHNOLOGIJE.....	8
2.3.1 LOČNICA	8
2.3.2 FLUKTUACIJE VETRA	9
2.5 REGIJSKA KLASIFIKACIJA	11
2.6 PROFILI TURBIN	12
2.6.1 ORIENTACIJA GREDI IN OSI	12
2.6.1.1 VAWT	13
2.6.1.2 HAWT	13
2.6.3 VETROVNA REZILA	13
2.6.3.1 OBLIKA.....	13
2.6.3.2 PREČNI PREREZ.....	15
3 METODOLOGIJA RAZISKAVE	16
3.1 RAČUNALNIŠKA PROGRAMSKA OPREMA.....	16
3.1.3 TISKALNIKI.....	16
3.1.4 ARDUINO	16
3.2 PROCES SEZNANITVE	18
3.2.1 RAZISKAVA	18
3.2.2 PRIZANESLJIVOST	19
3.3 POSTOPEK IZVEDBE	20
3.3.1 DISKUSIJA	20
3.3.2 3D OBLIKOVANJE	22
3.3.3 NAČRTOVANJE 3D TISKA.....	23
3.3.5 IZMENJAVA.....	24

3.3.6 ZGRADBA	25
3.4 IZVAJANJE MERITEV	25
3.4.1 USTVARJANJE MERSKIH POGOJEV	25
3.4.2 HITROST VETRA.....	27
3.4.3 VRTLJAJI OSI	27
3.4.4 NAPETOST SPONK GENERATORJA.....	28
3.4.5 ROTACIJA NOSILNEGA STOLPA	29
4 REZULTATI	30
4.1 RAZVOJ VETRNIC	30
4.1.1 PRIMER 1	30
4.1.2 PRIMER 2	32
4.1.3 PRIMER 3	34
4.1.4 PRIMER 4	35
4.2 PRILAGAJANJE VETRU	37
4.2.1 PROTOTIP 1	38
5 DISKUSIJA.....	40
5.1 VETROVNA REZILA	40
5.1.1 VALIDACIJA HIPOTEZ I.....	41
5.2 PRILAGAJANJE TURBINE	42
5.2.1 VALIDACIJA HIPOTEZ II	43
6 ZAKLJUČEK	43
7 POVZETEK.....	44
8 ZAHVALA	46
9 PRILOGE	47
9.1 NEHOMOGENO SONČNO OGREVANJE	47
9.2 CORIOLISOVA SILA	47
9.3 STRIŽENJE VETRA	48
9.4 IDEALEN ATMOSFERSKI PRETOK	48
9.5 MORJE ALI KOPNO	49
9.6 KVOTA	50
9.7 BETZOV LIMIT	50
9.8 FREECAD	51
9.9 SLICER	52
9.a10 ANYCUBIC MEGA X	53
9.a11 ARDUINO IDE	54
9.a12 NAČRTOVANJE 3D TISKA.....	55
9.a13 3D TISK.....	56
9.a14 VAAVUD	58

9.a15 ROTACIJA NOSILNEGA STOLPA.....	58
9.a16 PROGRAMSKA KODA	60
10 VIRI IN LITERATURA	62
10.1 VIRI LITERATURE.....	62
10.2 VIRI SLIKOVNEGA MATERIALA	62
10.3 VIRI GRAFOV	63
10.4 VIRI TABEL	63
10.5 VIRI ENAČB.....	63

KAZALO LITERATURE

- 10.1.1, Adnan Z. Amin, Global Energy Transformation, A Roadmap to 2050, International Renewable Energy Agency, 2018
- 10.1.2, Klaus J., Olindo I., Arno H. M. S., Renè A. C. M. M. van S., Miro Z., Solar Energy, Delft University of Technology, 2014
- 10.1.3, Wei Tong, Fundamentals of wind energy, Kollmorgen Corporation, 2010
- 10.1.4, Carlin P. W., Laxson A. S., Muljadi E. B., The History and State of the Art of Variable-Speed Wind turbine Technology, National Renewable Energy Laboratory, 2001
- 10.1.5, Probst O., Martínez J., Elizondo J., Monroy O., Small Wind Turbine Technology, Tecnológico de Monterrey, 2014
- 10.1.6, Giorgio Simbolotti, Giancarlo Tosato, Wind Power, IEA-ETSAP & IRENA Technology Brief E07, 2016
- 10.1.7, Peter J. Schubel, Richard J. Crossley, Wind Turbine Blade Design, University of Nottingham, 2012
- 10.1.8, Renken C., The Blade Design of Wind Energy Turbines, Engineering Communications
- 10.1.9, Rebecca Matulka, Matty Greene, How 3D Printers Work, Energy.gov, 2014
- 10.1.10, Arduino skupnost, What is Arduino?

- 10.1.11, Dan Ancona, Jim Mc Veigh, Wind Turbine - Materials and Manufacturing Fact Sheet, Princeton Energy Resources International, LLC, 2001
- 10.1.12, Ranjbar M. H., Nasrazadani S. A., Kia H. Z., Gharali K., Reaching the betz limit experimentally and numerically, University of Tehran, 2019
- 10.1.13, FreeCAD skupnost, About FreeCAD
- 10.1.14, Ultimaker javni uslužbenci, Ultimaker Cura
- 10.1.15, Anycubic javni uslužbenci, About Anycubic Who are we?

KAZALO SLIKOVNEGA MATERIALA

- 10.2.1, Odstotkovna proizvodnja električne energije po viru, International Energy Agency, 1990 – 2018
- 10.2.2, Odstotkovna proizvodnja električne energije po viru v Sloveniji, International Energy Agency, 1990 – 2020
- 10.2.3, International Renewable Energy Agency
- 10.2.4, Ancient Persian windmills, Mohammad Hossein Taghi
- 10.2.5, Namestitev prvih vetrnih elektrarn, U.S. Department of Energy
- 10.2.6, Rast zmogljivosti in premera rotorja vetrnih turbin, IEA & IRENA, 1985 – 2016
- 10.2.7 Regijska klasifikacija vetrne turbine, Filip Pačnik
- 10.2.8, Alternativni konfiguraciji orientacije gredi in rotorja, Multidisciplinary Digital Publishing Institute
- 10.2.9, Vzorčen načrt rezila in njegove regije, Wind Turbine Blade Design
- 10.2.10, Dvižna in vlečna sila v aeroprofilu, Filip Pačnik
- 10.2.11, Arduino plošča, Mega 2560 rev3, Arduino cc
- 10.2.12, Fotografija avtorjev, profesor in mentor dipl. inž. elektrotehnike Peter Vrčkovnik
- 10.2.13, Izgled programa FreeCAD, verzija 0.19, Filip Pačnik
- 10.2.14, Izgled programa Ultimaker Cura, verzija 4.12.0, Filip Pačnik
- 10.2.15, Vrtalnik za ustvarjanje merskih pogojev, Parkside PBH 800 A1, Nik Žlebnik Jančič

- 10.2.16, Merilec hitrosti vetra, Vaavud smartphone wind meter, Nik Žlebnič Jančič
- 10.2.17, Merilec vrtljajev, Digital laser tachometer *DT – 2234C+*, Nik Žlebnič Jančič
- 10.2.18, Merilca napetosti in toka, *UNI – T UT39C, EM391*, Nik Žlebnič Jančič
- 10.2.19, Primerek 1, Nik Žlebnič Jančič
- 10.2.20, Primerek 1 modificiran, Nik Žlebnič Jančič
- 10.2.21, Primerek 2, Nik Žlebnič Jančič
- 10.2.24, Prestavno razmerje primerka 4, Nik Žlebnič Jančič
- 10.2.25, Rotacijski mehanizem, Servo motor in arduino, Filip Pačnik
- 10.2.26 Coriolisova sila, National Oceanic and Atmospheric Administration
- 10.2.27, Idealizirana atmosferska cirkulacija, Kollmorgen Corporation
- 10.2.28, Primeri temeljev vetrnih turbin na morju, Carbon Trust
- 10.2.29, Efektivnost vetrnih turbin, The Effect of the Number of Blades on the Efficiency of A Wind Turbine
- 10.2.30, FreeCAD logotip, FreeCAD
- 10.2.31, Ultimaker Cura logotip, Ultimaker Cura 4.12.0\Cura.ico
- 10.2.32, Anycubic logotip, Anycubic
- 10.2.33, Ponesrečen primer tiska, Nik Žlebnič Jančič
- 10.2.34, Izgled 3D tiskalnika, Anycubic Mega X, Anycubic
- 10.2. *x*, Merilec hitrosti in smeri vetra, Vaavud Sleipnir smartphone wind meter, Nik Žlebnič Jančič
- 10.2.22, Primerek 3 iz modelarja FreeCAD, Filip Pačnik
- 10.2.23, Rezila primerka 4, Nik Žlebnič Jančič

KAZALO GRAFOV

- 4.3.1, Rezultati meritev primerka 2, Vrtljaji na minuto, Nik Žlebnič Jančič
- 4.3.2, Rezultati meritev primerka 2, Napetost na sponkah generatorja, Nik Žlebnič Jančič

KAZALO TABEL

- 10.4.1, Odvisnost komponente vetrne turbine od enote teže in cene, Wind Turbine - Materials and Manufacturing Fact Sheet
- 10.4.2, Rezultati meritve primerka 1, Nik Žlebnič Jančič
- 10.4.3, Rezultati meritev modificiranega primerka 1, Nik Žlebnič Jančič
- 10.4.4, Rezultati meritev primerka 4, Nik Žlebnič Jančič

KAZALO ENAČB

- 10.5.1, Blade element momentum, BEM theor

1 UVOD

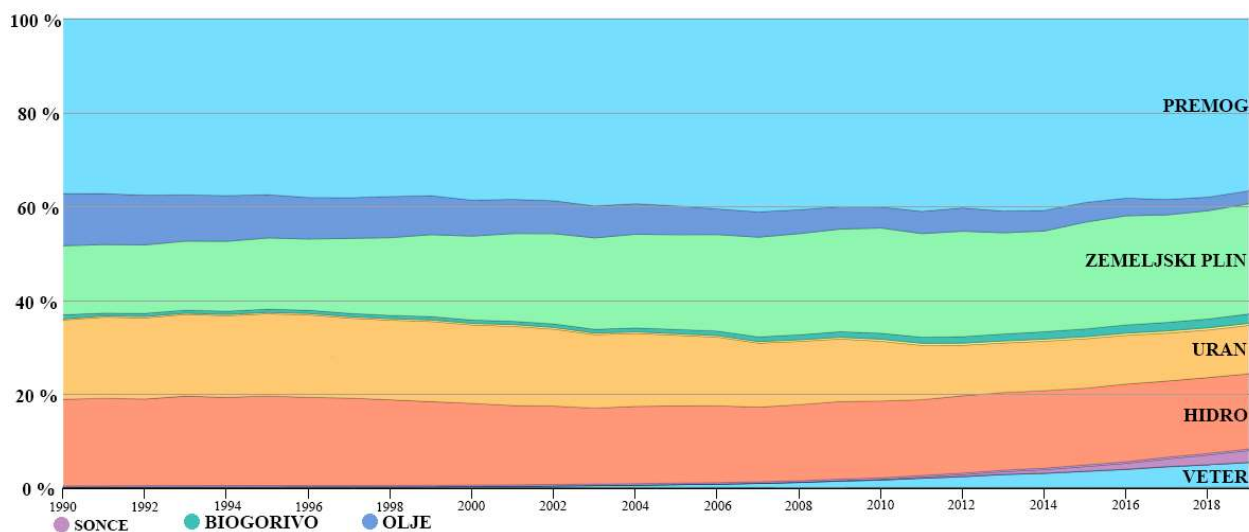
1.1 UVODNA BESEDA

V dobi pospešenih sprememb, imperativ omejevanja klimatskih sprememb je krepitev zagona globalnega energetskega preoblikovanja. Ekspeditiven padec stroškov alternativnih virov energije, izpopolnitev energetske učinkovitosti, globalne elektrifikacije, rastoče in napredujoče pametne tehnologije in neprenehni tehnološki razmah vsi vodijo v prihodnost trajnostne energije.¹

1.2 GLOBALNI ELEKTROENERGETSKI SEKTOR

Delež obnovljive energije v energetskega sektorju na globalnem tržišču se bo do leta 2050 postopno dvignil na 85 %, načeloma preko rasti fotonapetostnih, vetrnih in hidro elektrarn. Poleg neugodnih zneskov gradnje, imajo primarni viri energije, potrebni za poslovanje navedenih proizvodnih obratov, temeljne pomanjkljivosti. In sicer nezmožnost transportacije, akumulacije vira ali ekonomičnega izkoriščanja. Le redke lokacije na svetu so primerne za postavitev elektrarn zelene energije. Porabniki elektrike bodo postali močno odvisni od klimatskih razmer, geografske lege, alokacije rečnih mrež, letnega časa in tovrstnih vplivnih dejavnikov. Občutno bo zmanjšanje stabilnosti električnega omrežja, dostopnost elektrike, predvsem pa bodo izratizo narasle cene. Že sedaj je razširjen koncept postavitve osebne elektrarne. Te so v velikem številu sončne, zaradi svoje obširne zasnove in geoprostorske implementacije. Vendarle obstajajo lege, kjer izgradnja le teh ne bi bila smiselna. Fotonapetostni moduli so močno občutljivi na senčenje, prah in pesek, vpadni kot svetlobe, oblačnost in zračno onesnaženje. Takšne lokacije so primernejše za veterne ali vodne elektrarne, saj jih ti dejavniki ne motijo. Čeprav privatne elektrarne niso zmožne nadomestiti gospodinjne porabe, lahko pripomorejo pri dnevni konici porabe in celovitosti električnega omrežja. Drugače: potrošniki energije bodo sedaj v času lastne prekomerne proizvodnje tudi izvozniki.

¹ 10.1.1, Adnan Z. Amin, Global Energy Transformation, A Roadmap to 2050, International Renewable Energy Agency, 2018



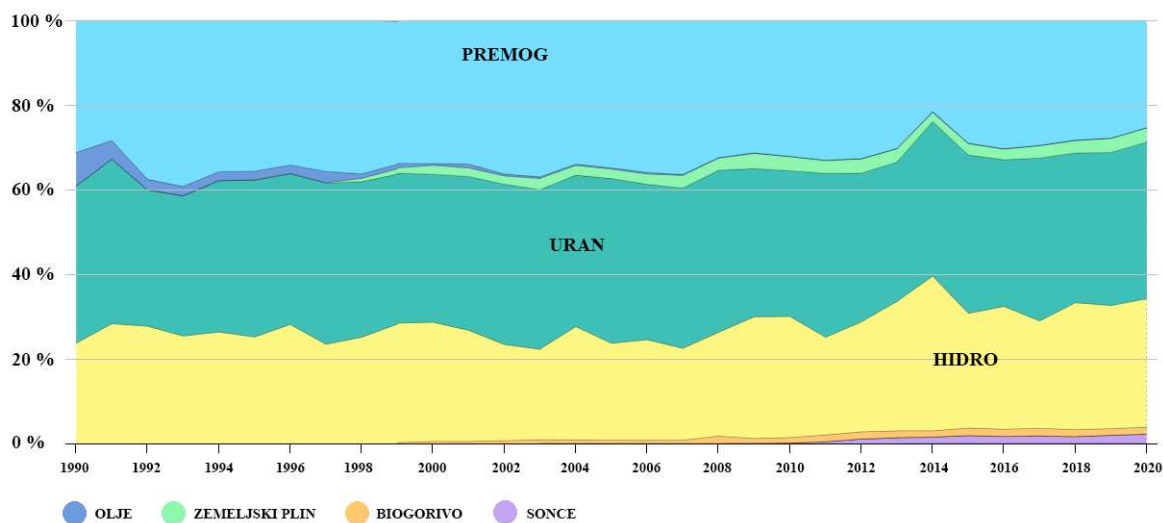
10.2.1, Odstotkovna proizvodnja električne energije po viru, International Energy Agency, 1990 – 2018

(VIR: <https://www.iea.org>)

Z le 20 % globalne energetske proizvodnje, čisti viri krepko zaostajajo za ostalimi konkurenti. Precejšnji delež predstavljajo hidro elektrarne, ki izrabljajo energijo vode, manjkajoči del pa si sorazmerno delijo elektrarne sonca in vetra. Da bi uresničili podnebni sporazum iz leta 2015, moramo omejiti dvig povprečne globalne temperature pod 2°. Skupna inštalirana moč obnovljivih virov bo takrat povečana za šestkrat, izpuste in obratovanje elektrarn na fosilna goriva pa bi močno omejili.

1.2.1 SLOVENSKI ENERGETSKI SEKTOR

Izmed številnih izjav vrstnikov kot tudi učiteljev sva opazila, da sončne elektrarne tudi pri domači gradnji žanjejo veliko slave. Sonca je v Sloveniji dosti, izbire je veliko in ponudbe so ugodne. A vendarle sva želela »posvetiti luč« na prevečkrat prezrte vetrne elektrarne. Te v Sloveniji niso deležne obsežne oglaševalne kampanje, v pretežni meri zaradi neobstoječega vetrnega potenciala in primanjkljaja tehnološkega razvoja in industrijske produkcije.



10.2.2, Odstotkovna proizvodnja električne energije po viru v Sloveniji, International Energy Agency, 1990 – 2020

(VIR: <https://www.iea.org>)

Nosilci slovenske proizvodnje so nespremenjeno že minulih 40 let *TEŠ* (termoelektrarna Šoštanj), *NEK* (nuklearna elektrarna Krško) in številne Dravske, Savske ter Soške elektrarne.

Opazen majhen proizvod izvira izključno iz domače postavitve fotonapetostnih modulov: izgradnja lastniško-državne sončne elektrarne v Sloveniji ni slišan koncept. Še skromnejši delež imajo vetrne elektrarne, katerih nikakor ni možno izslediti na grafu.

Ključno je, da si bodo breme proizvodnje izmenjevale tako vetrne kot fotonapetostne in hidro elektrarne. Saj se dopolnjujejo dopolnjujejo in pripomorejo k enotnosti ne samo slovenskega, temveč globalnega omrežja.

1.3 IDEJA IN NAMEN RAZISKAVE

Iniciativa, ustvarjalnost, vestnost in razgledanost so atributi mladega raziskovalca. Namen raziskovalne naloge je zamisel izpeljati in prepričati poslušalce, bralca.

Ali verjamete, da lahko zelena energija napaja svet? To vprašanje je zanimalo tudi naju. A ker sva v srednji šoli, je smotrno pričeti skromneje. Začnimo samo z eno hišo; vikendom, gorski koči, postojanki, piknik prostoru, kampu. Ali lahko priročna prenosna vetrna elektrarna dovaja napajalno elektriko sorodnim nepremičninam?



10.2.3, International Renewable Energy Agency

(VIR: <https://www.irena.org>)

1.4 HIPOTEZE

Zastavila sva si sledeče hipoteze:

- Vetrna turbina bo imela zmogljivost razčlenitve, prenosa in sestavitve.
- Prenosna vetrna elektrarna bo zmožna časovno daljšega napajanja LED (angl. light emitting diode) svetilke.
- Vetrnica bo s podaljšanjem krakov proizvedla več moči.
- Prenosna vetrna elektrarna bo zmožna orientacije glede gibajočih zračnih mas na osnovi meritve smeri in hitrosti vetra.

1.4.1 VALIDACIJA TEZ

- Uvodno hipotezo (*Vetrna turbina bo imela zmogljivost razčlenitve, prenosa in sestavitve*) bomo preverili tako, da bomo turbino demontirali in jo vnovič postavili v času manj kot ene ure.
- Hipoteza 2 (*Prenosna vetrna elektrarna bo zmožna časovno daljšega napajanja LED svetilke*), bo temeljila na meritvi izhodne moči in opazovanja žarnice skozi delovanje turbine.
- Hipotezo 3 (*Vetrnica bo s podaljšanjem krakom proizvedla več moči*) bova ovrednotila s primerjanjem izhodne moči dolžinsko različnih turbin.
- Zaključno hipotezo (*Prenosna vetrna elektrarna bo zmožna orientacije glede gibajočih zračnih mas na osnovi meritve smeri in hitrosti vetra*) bova potrdila ali ovrgla s primerjanjem položaja merilca smeri vetra in gredi turbine.

2 PREGLED STANJA TEHNIKE

2.1 ENERGIJA

Zasnova skoraj vseh virov energije izvira iz solarne. Sonce, osrednjo zvezdo našega osončja, tvori pretežno vodik (H) in helij (He). V središču sonca so tlačno temperaturni pogoji ustrezni za samoiniciativo jedrske reakcije. Proces fuzije ustvari nepredstavljljive količine toplotne, sevalne in elektromagnetne energije. Ocenjeno je, da je skupna sončna moč, ki jo prejme Zemlja, približno $1.8 \times 10^{11} MW$. Od tega le 2 % (tj. $3.6 \times 10^9 MW$) segreva ozračje in ustvarja vetrni potencial.²

2.1.1 ENERGIJA VETRA

Veter je posledica gibajočih zračnih mas zaradi gradientov atmosferskega tlaka. Veter prehaja iz območij višjega tlaka v sončno intenzivneje ogrevana področja nižjega tlaka. Izrazitejša je anomalija tlaka, večja je kinetična energija vetra in končna moč, ki jo vetrnica zajame. Nastanek in kroženje vetra je težko predvidljiv pojav, njegovi povzročitelji pa so raznovrstni. Dejavniki, kot nehomogeno sončno ogrevanje, Coriolisova sila in striženje vetra, so le ena izmed mnogih (*več informacij v prilog 9.1-9.4*)³

2.2 EVOLUCIJA VETRNE MOČI

Vetrne turbine imajo dokumentirano implementacijo več kot 1000 let. Najzgodnejše zasnove so bile nadvse preproste in posredovale so le mehanično energijo. Prakticirali so jih za prečrpavanje vode, mletje žita in seko lesa. Tovrstne vetrnice so imele fiksno prestavno razmerje in so jih nameščali le na mestih z glavno smerjo vetra, saj niso bile sposobne nikakršne rotacije po vetru.

² 10.1.2, Klaus J., Olindo I., Arno H. M. S., Renè A. C. M. M. van S., Miro Z., Solar Energy, Delft University of Technology, 2014

³ 10.1.3, Wei Tong, Fundamentals of wind energy, Kollmorgen Corporation, 2010



10.2.4, Ancient Persian windmills, Mohammad Hossein Taghi

(VIR: <https://www.atlasobscura.com>)

20. stoletje se bahato odlikuje kot pričetek globalne elektrifikacije. Uveljavitev motorja, generatorja in transformatorja spričuje električno utopijo.

Prvi obširni izbruh vetrne energije je nastal v Združenih Državah Amerike (angl. United States of America). Izolirane kmetije, do katerih ni bilo moč pripeljati električni vod, so priključili na vetrne turbine. Nameščenih je bilo več deset-tisoč vetrnic v razponu od 20 – 350 kW. Na drugi strani Atlantika, je Evropa vztrajno krepila skupno inštalirano moč vetrne energije.



10.2.5, Namestitev prvih vetrnih elektrarn, U.S. Department of Energy

(VIR: <https://www.energy.gov>)

V 80. in 90. letih so se pojavile ideje o pridružitvi vetrnih elektrarn na izmenično *AC* (angl. alternating current) omrežje. Potrebne so bile številne nadgradnje, zlasti pri posredovanju zanesljive napetosti in stalne frekvence. In tako smo že v 21. stoletju, kjer veter pod popolnimi podnebnimi pogoji in sočasnim obratovanjem vseh razpoložljivih vetrnih elektrarn dovaja električno moč kar 591 *miljonov* domov⁴

2.3 OBSTOJEČE TEHNOLOGIJE

Majhne vetrne turbine so vabljiva alternativa za elektrifikacijo izven omrežja, kot tudi avtonomne aplikacije ali v kombinaciji s fotovoltaike in malimi hidro generatorji. Cena naložbe je sicer sorazmerna s proizvedeno električno energijo. Sama redukcija marže pogosto ni edino merilo kakovosti; pomembni so tudi sistemska zmogljivost, primernost za podan režim vetra, zanesljivost in celotna življenjska doba, so primerljivo problematični. Kadar obstaja ločnica med omrežno povezavo in porabnikom, učinkovita strežba energije, zmeraj zasenči strošek proizvodnje.⁵

2.3.1 LOČNICA

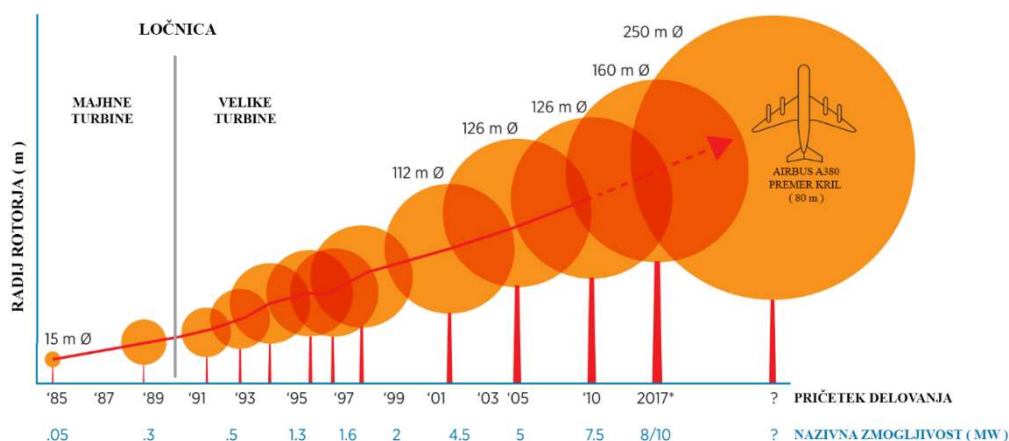
Četudi v literaturi ni rigorozne definicije vrste turbine z nazivno močjo 50 *kW* ali manj, splošno uvrščamo med majhne. Zaradi nedavnega pojava ugodnejših strojev višjega razreda, z večjo strežbo moči, nazivna moč ni več zgledno opredeljen parameter. Temu raje premer ali enakopravni pomet rotorja služi kot delilnik tipa turbine, kjer lahko 200 *m*² vzamemo kot ločilno črto.

Naslednje sredstvo ločitve je višina stolpa. Za omejevanje negativnih učinkov turbulenc, ki jih povzročajo okoliške ovire, je višji stolp boljši. Meja razhoda med dvema je 30 *m*, dodatna velikost prinaša vrsto tehnoloških zapletov.

⁴ 10.1.4, Carlin P. W., Laxson A. S., Muljadi E. B., The History and State of the Art of Variable-Speed Wind turbine Technology, National Renewable Energy Laboratory, 2001

⁵ 10.1.5, Probst O., Martínez J., Elizondo J., Monroy O., Small Wind Turbine Technology, Tecnológico de Monterrey, 2014

Tudi navzočnost repne lopatice ločuje dva. Majhne vetrne turbine prepoznajo tehnološko udobnost repa vetrnice, z vidika večjih turbin pa ta ponazarja le dodatni materialni znesek in infrastrukturno problematičnost.⁶



10.2.6, Rast zmogljivosti in premera rotorja vetrnih turbin, IEA & IRENA, 1985 – 2016

(VIR: <https://irena.org>)

2.3.2 FLUKTUACIJE VETRA

Čeprav so vse vetrne turbine, tako velike kot majhne, podvržene naravni fluktuaciji vetra, obstaja več razlogov, zakaj je težje jamčiti obratovanje majhne vetrne turbine.

- Vežanost na pasivne mehanizme rotacije in vse skupna manjša vztrajnost rotorja & generatorja vodi do neizogibnih prehodnih stanj. Nelinearna sprememba toka vetra tako privede do optimalno nepopolne poravnave.
- Tehnologija pasivne zaščite pred prekoračitvijo hitrosti turbine in pregrevanjem generatorja je še zmeraj preobsežna in cenovno absurdna za namestitev na posamične majhne vetrne turbine.

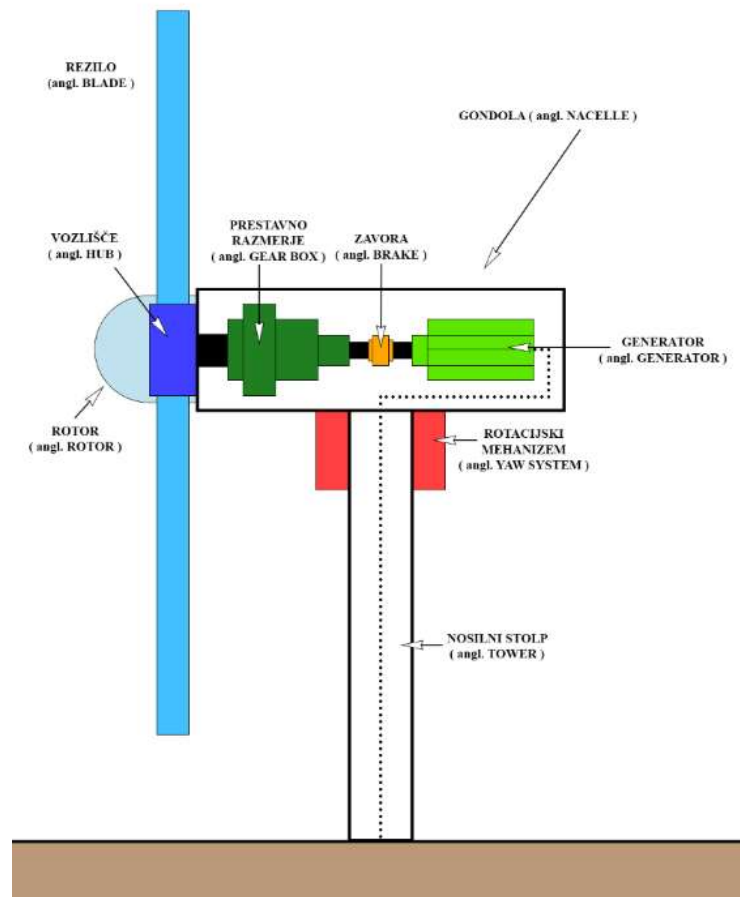
⁶ 10.1.6, Giorgio Simbolotti, Giancarlo Tosato, Wind Power, IEA-ETSAP & IRENA Technology Brief E07, 2016

- Rutinski remonts in nenehni nadzori z digitalnim sistemom SCADA (angl. supervisory control and data acquisition) so segmenti pogodbe o tekočem servisu v času življenjske dobe večje elektrarne. Medtem ko se od manjših generatorjev pričakuje nekontrolirano delovanje in le občasno vzdrževanje.
- Obratovanje elektrarne je dopustno le z ustreznim certifikatom. Mednarodni standardi in poslovalne licence so se za majhne elektrarne šele nedavno uveljavili. Poleg tega je strokovno certificiranje veliko finančno breme zlasti za mala podjetja s skromno proizvodnjo.⁷

⁷ 10.1.5, Probst O., Martínez J., Elizondo J., Monroy O., Small Wind Turbine Technology, Tecnológico de Monterrey, 2014

2.5 REGIJSKA KLASIFIKACIJA

Sledeča poglavja se bodo izrazoslovno navezovala na posamezne predele vetrnice; da se izogneva repetativnosti, bova preko slikovnih materialov orisala izgled sodobne vetrne turbine.



10.2.7, Regijska klasifikacija vetrne turbine, Filip Pačnik

(VIR: lasten)

2.6 PROFILI TURBIN

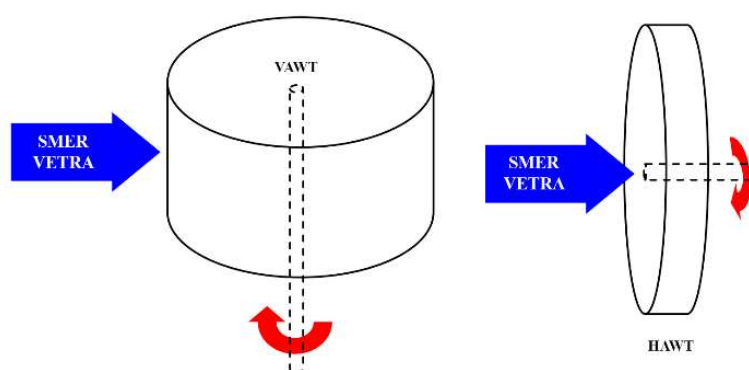
Pretekle tehnologije niso omogočale sprejemljivo stopnjo izkoriščanja zelenih virov. Njihov razvoj se je zanemarjal v prid fosilnim gorivom. Pri izgradnji elektrarn so bile norme o ekološkem odtisu dosti nižje.

V sodobnem času se je javno mnenje spremenilo, močno proti premogovnim, jedrskim in na sploh elektrarnam na fosilna goriva. Primer je država Nemčija; tam so potrdili zaprtje večine objektov na fosilna goriva in energijo skoraj polovično pridobivajo iz vetra. Da bi lahko priskrbeli elektriko 80 milijonov ljudem, se poskušajo z učinkovitostjo turbin približati teoretičnemu limitu; a o tem nekoliko kasneje.

Ekspeditiven razvoj z začetkom v 21. stoletju, je privedel do najrazličnejših vrst vetrnih turbin.

2.6.1 ORIENTACIJA GREDI IN OSI

Orientacija gredi in rotacijske osi opredeli glavno kategorizacijo delitve. Turbina z gredo, nameščeno vodoravno s tlemi, je prepoznana kot horizontalno aksialna vetrna turbina ali *HAWT* (angl. horizontal axis wind turbine). Vertikalno aksialna vetrna turbina ali *VAWT* (angl. vertical axis wind turbine) ima gred nameščeno prečno s tlemi. Obe konfiguraciji imata opazno ločljive zasnove in vsaka svoje ugodne značilnosti.



2.6.1.1 VAWT

Zakasnel razvoj *VAWT* lahko pririšemo nižji hitrosti lokov in oteženemu nadzoru rotacije generatorjev. Njihovo širjenje ovira tudi težavnost pri vklopu; do predkratkim se je verjelo, da niso zmožne samozagona. Vendar pa *VAWT* ne potrebuje dodatne opreme za soočanje z vetrom, poleg tega so masivni generatorji nameščeni na tleh, s čimer se zmanjša obremenitev stolpa.

2.6.1.2 HAWT

Priljubljenost *HAWT* pripisujejo izboljššanemu nadzoru rotorja in generatorja, spontani spremembi naklona in smeri rezil kot tudi boljši učinkovitosti izkoriščanja vetra. Vsi večji proizvajalci energije z vetrnimi elektrarnami navajajo, da so aksialno horizontalne vetrne turbine, torej *HAWT*, najustreznejše za stabilne vetrne razmere in so tudi estetsko najboljši pretvornik. Zatorej se bo tudi to raziskovalno delo nanašalo na slednje.

Vetrnice poleg naštetih množično delimo na lokacijo montaže (*več informacij v prilogi 9.5*)

2.6.3 VETROVNA REZILA

Pri drugi stopnji delitve, po zasnovi gredi, se vetrne turbine razvrščajo glede števila in oblike rezil.

2.6.3.1 OBLIKA

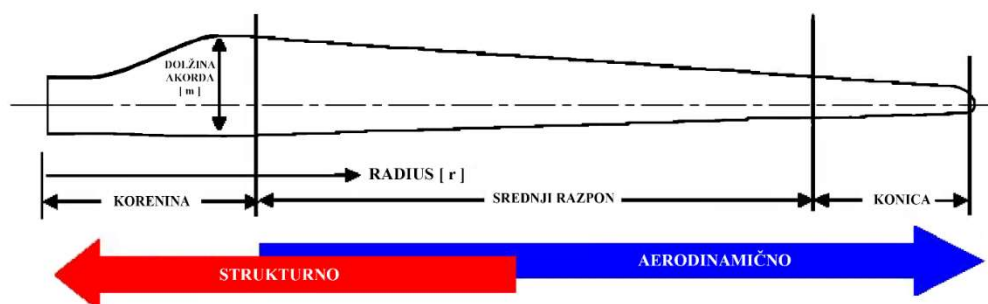
HAWT vetrnice so močno občutljive na spremembo v profilu in dizajnu rezila. Idealna oblika lopatice je definirana z računsko metodo; obstajajo številne teorije izračunave, z najlažjo imenovano *BEM* (angl. blade element momentum) metodo. Ta vzame številne parametre, kot so betzov limit, lokalne hitrosti zraka in vzdvižno silo aerokrila. Formula poda osnovno obliko

lopaticе sodobne vetrne turbine, toda matematični model hitro razpade pri kompleksnih pogojih; v praksi se pogosteje uporabljajo naprednejše metode optimizacije⁸

$$C_{opt} = \frac{2\pi r}{n} \times \frac{8}{9C_L} \times \frac{U_{wd}}{\lambda V_r}^9$$

v kateri so:

C_{opt}	optimalna dolžina akorda	[m]
π	število PI	
r	radius vetrnice	[m]
n	število rezil	
C_L	dvižni koeficient	
U_{wd}	projektantna hitrost vetra	[$\frac{m}{s}$]
λ	razmerje hitrosti konice	
V_r	lokalna hitrost vetra	[$\frac{m}{s}$]



10.2.9, Vzorčen načrt rezila in njegove regije, Wind Turbine Blade Design

(VIR: <https://www.mdpi.com/journal/energies>)

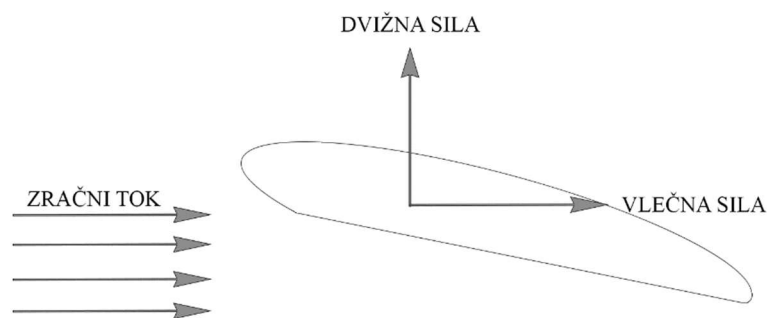
⁸ 10.1.7, Peter J. Schubel, Richard J. Crossley, Wind Turbine Blade Design, University of Nottingham, 2012

⁹ 10.5.1, Blade element momentum, BEM theory

2.6.3.2 PREČNI PREREZ

V vseh zasnovah rezil se uporablja aeroprofil, za doseganje največje aerodinamične zmogljivosti. Oblika krila porazdeli tok zraka po svoji površini, s tem povzroča razliko v pritisku in ohranja rotacijo. Dvižna sila pa posledično ni edina sila, ki se ustvari ob pretoku zraka; zaradi trenja med vetrom in ploskvijo rezila se ustvari vlečna sila, ki deluje prečno na smer rotacije.

Idealno HAWT rezilo se osredotoča na visoke koeficiente dviga in dokaj nizek upor.¹⁰



10.2.10, Dvižna in vlečna sila v aeroprofilu, Filip Pačnik

(VIR: lasten)

Možne so nadaljnje delitve s kvoto rezil (*več informacij v prilogi 9.6*)

Morda so si vetrnice različne, a skupno jim je eno. Njihov izkoristek ne bo nikoli presegel Betzovega limita, torej 59.3 % (*več informacij v prilogi 9.7*).

¹⁰ 10.1.8, Renken C., The Blade Design of Wind Energy Turbines, Engineering Communications

3 METODOLOGIJA RAZISKAVE

3.1 RAČUNALNIŠKA PROGRAMSKA OPREMA

Enostavno je v mislih ustvariti delujoč model, toda sledeči koraki izdelave so neprimerljivo lažji z uporabo računalnika. Da skozi naveden potek dela, ne bo potrebe zmeraj ponovno opisovati ogrode in objasnjevati pojme računalniških programov, jih bova predstavila pod skupno točko.

Za pripravo na tisk bova koristila multimedijsko opremo FreeCAD (*več informacij v prilogi 9.8*) in Ultimaker Cura (*več informacij v prilogi 9.9*)

3.1.3 TISKALNIKI

3D tiskanje ali drugače imenovana aditivna proizvodnja je postopek izdelave tridimenzionalnih predmetov iz digitalne datoteke. Izdelavo elementa se doseže z zaporednim polaganjem materiala, enega drobnega sloja naenkrat. Vsako od teh plasti lahko vidimo kot prečni prerez predmeta na določeni višini. Pri postopkih tiska se za končni del porabi tudi do 98 % surovine; preostala 2 % pa sta v večini podpora. V primerjavi z tehnologijo izreza oz. odštevalno proizvodnjo (npr. CNC naprave) je to zavidanja vredna številka.¹¹

Ker imava doma tiskalnik podjetja Anycubic, ga bova izkoristila. (*več informacij v prilogi 9.10*)

3.1.4 ARDUINO

Arduino je elektronska platforma, ki temelji na enostavni strojni in programski opremi. Unikatne ploščice lahko berejo vhode (svetloba na senzorju, prst na gumbu, sporočilo s socialnega omrežja) in jih pretvori v izhod (aktivacija motorja, vklop LED svetilke, objava na spletu). Z Arduino ploščo lahko preko nizov navodil obrazložite, kaj storiti.

¹¹ 10.1.9, Rebecca Matulka, Matty Greene, How 3D Printers Work, Energy.gov, 2014

Ukazi so krajša psevdo oblika angleškega jezika (npr. int, for, while, true, ...) z natanko opredeljeno operacijo. Arduinov specializiran programski jezik vsebuje 152 fraz, katere zlagamo kot lego kocke, da ustvarimo svojevrsten program.

Skozi leta so bili Arduino, možgani na tisoče projektov; Od avtomatizacije vsakdanjih pripomočkov do kompleksnih znanstvenih instrumentov. Okoli te platforme so se zbrale svetovne skupnosti kreativcev, njihovi prispevki pa so dodali neverjetno količino dostopnega znanja tako začetnikom kot strokovnjakom.¹²



10.2.11, Arduino plošča, Mega 2560 rev3, Arduino cc

(VIR: <https://store.arduino.cc/>)

(več informacij v prilogah 9.11)

¹² 10.1.10, Arduino skupnost, What is Arduino?

3.2 PROCES SEZNANITVE

Da bi se lahko resneje lotila tehnološko zapletene izvedbe, sva potrebovala dosti fizikalnega, teoretskega in konceptualnega znanja; prav pa je prišlo tudi poznavanje računalniške programske opreme in spretnih prstov.

V pomoč nama je bil mentor Peter Vrčkovnik; ki je usmerjal cilje raziskave in velikokrat svetoval pri načinu izvedbe.

3.2.1 RAZISKAVA

V slovenski literaturi je nesmiselno iskati papirje na temo vetrnih turbin; s soavtorjem sva se tako vedno morala vračati na splet in prebirati najrazličnejše akademske raziskave. Pri tem sva se zmeraj trudila, da poiščeva verodostojne vire, bodisi neposredno od internacionalnih organizacij & inštitucij (npr.: International Energy Agency, International Renewable Energy Agency, National Oceanic and Atmospheric Administration, Global Wind Energy Council, WindEurope) ali od prestižnih univerz iz raziskovalnih nalog zavzetih študentov.

Tudi vrsta medija je pomembna distinkcija. Prebiralasva mnogotere članke, forume in portale, poslušala komentarje in »podcaste«, gledala videe in fotografije. Ti so zmeraj ponudili vpogled z drugega zornega kota, toda takšni in podobni viri so objavljeni z namenom pritegniti širše občinstvo. Navedenemu zato občasno krojijo resnico, omenjajo le dobre plati in celo zavajajo. Našteta sredstva raziskave sva vzela kot subjektivna mnenja in iz njih nisva črpala nobenega konkretnega znanja.

Najraje sva odkrivala strokovne članke; ti so zagotovili poglobljeno razlago, vključevali visokokakovosten slikovni material, zanesljive grafe & tabele, formule ter navajali nadaljnje poglobljajoče znanstvene raziskave s potrjenimi preizkusi.

Poleg tega sva skušala, da so izjave, predpostavke in izsledki temeljili na več kot enem viru. S tem sva želela povečati verodostojnost. Vsekakor pa 100 % popolnosti ni. V slogu pragmatične razlage sva banalna in večplastna spoznanja zanemarila. Številna dejstva so bila poenostavljena

in zapletenejši modeli so bili prezrti. Dogodilo se je, da sva se srečala s projektno dokumentacijo, ki je nisva razumela; da bi jo poskušala vključiti in & razložiti v najinem članku, bi naredila velik pregrešek.

3.2.2. PRIZANESLJIVOST

Zaradi osebne neinformiranosti s področja vetrne energije je korak spoznavanja terjal cel mesec november, december in večino januarja. Resnega eksperimentalnega dela sva se lahko lotila šele nevarno blizu roka oddaje.

Na srečo sva imela pri izdelavi prototipne vetrne turbine mnoge prizanesljivosti.

- Ker bova osnovala le 1 končni izdelek, ni potrebe po ekonomični olajšavi. Svetovni proizvajalci pri dizajnu iščejo zlato sredino med učinkovitostjo in ceno vetrnice. Izbirajo cenovno ugodni material in iz njega s spremembo oblike poskušajo unovčiti vsak vat moči.
- Majhna velikost ne bo terjala uporabe specializiranih visoko trpežnih & fleksibilnih materialov, potrebnih za nošnjo masivnega telesa.

ODVISNOST KOMPONENTE VETERNE TURBINE OD ENOTNE TEŽE IN CENE		
vrsta komponente	procentualna teža [%]	procentualna cena [%]
rotor	15	25
gondola s proizvodno opremo	50	55
nosilni steber	35	20

10.4.1, Odvisnost komponente vetrne turbine od enote teže in cene, Wind Turbine - Materials and Manufacturing Fact Sheet

VIR (<https://www.perihq.com>)

Največjo težo in hkrati ceno predstavlja gondola, ki zajema vrtilno gred, mehansko prestavno razmerje, zavoro, generator, kontrolno enoto, hidravliko in mnogo drugega. Tesno za njo sledi nosilni stolp; z njim ne smemo varčevati, saj prenaša veliko težo in

številne sile. Najlažja morajo seveda biti rezila, tako ustvarjajo manjše povratne sile, ki neugodno delujejo na preostali del vetrnice.

Potrebo po lahkotnosti in togosti zadovolji jeklo, ki je odstotkovno večinsko prisotno v vseh posamičnih delih vetrne turbine; temu je primešan aluminij zaradi peresno lahke teže, nizke cene in silne prožnosti. Izjema so rezila, ki so v celoti zgrajena iz plastike, ojačane s steklom in ogljikovimi filamentami.¹³

- Ozek razpon kril omeji neštete sile, ki delujejo na rezila ob rotaciji, do takšne mere, da jih lahko popolnoma prezremo. To močno poenostavi strukturo kril; minimalna vlečna sila in spodobna dvizna sila bosta ohranjali rotacijo. Zapleten aeroprofil bova lahko nadomestila s preprostim ploščatim prerezom.
- Obratovanje prenosne vetrne elektrarne bo le začasno in ne bo deležno specializiranega samonadzornega sistema. Interni mehanizmi (npr. menjalnik, zavora, hidravlična enota) so izločeni iz projekta, saj teh je dolgotrajno obratovanje
- Izdelek ne bo dosegel prodajalnega trga, zato je estetski videz ni ključnega pomena. To razpolovi čas oblikovanja modela in nudi večjo svobodo izgleda.

3.3 POSTOPEK IZVEDBE

Omenila sva, kakšne pristope glede zbiranja informacij nameravamo kombinirati in le kateri računalniški programi nama bodo pri tem pomagali.

Sledi abstrakten oris poteka dela; od začetka do konca.

3.3.1 DISKUSIJA

Raziskava je delo dveh avtorjev, čemur postane papir skupinski projekt, v katerem je ključna komunikacija. Vsak odmor in malico sva izkoristila za razvlečene pogovore, kako rešiti to ali

¹³ 10.1.11, Dan Ancona, Jim Mc Veigh, Wind Turbine - Materials and Manufacturing Fact Sheet, Princeton Energy Resources International, LLC, 2001

ono zadevo, razglabljanje delujočih modelov in iskala rešitve. V pogovore sva mnogokratni vpletla tudi učitelje iz različnih področji elektro inženirstva; zmeraj so pomagali in razširili obzorje potencialnih solucij.

Razgovori so se vedno znova pletli okoli sledečih stvari:

- dimenzije in oblike rezil,
- način pritrditve kril na vozlišče & gondole na nosilni stolp,
- vsemogoče preglavice z generatorjem.

Naposled sva prispela do ohlapne ideje, kako in kaj; razdelila sva si delo in se lotila projekta doma.



10.2.12, Fotografija avtorjev, profesor in mentor Peter Vrčkovnik

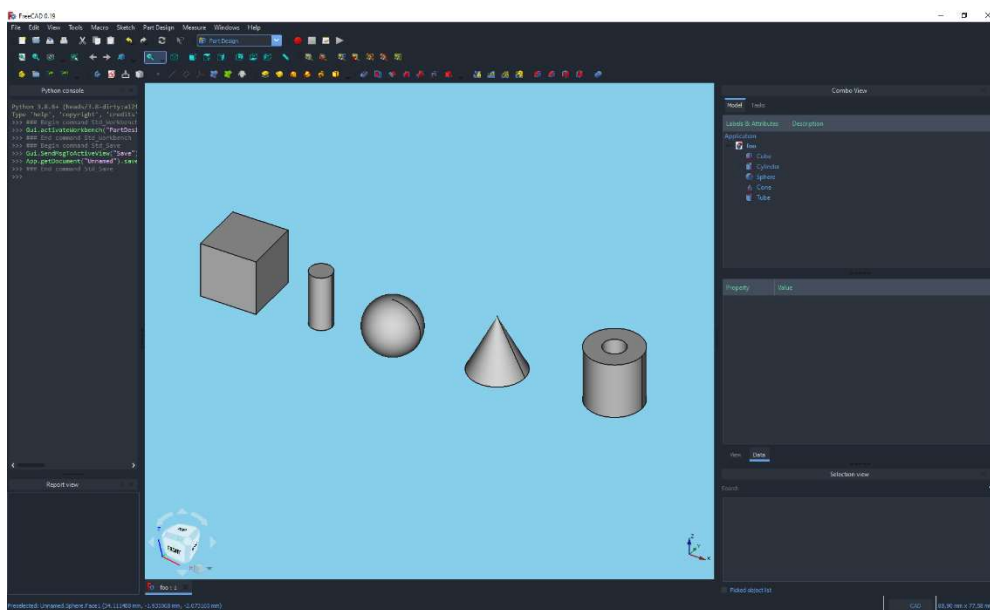
(VIR: lasten)

3.3.2 3D OBLIKOVANJE

Vse se je pričelo v modelarju FreeCAD. Ker so to bili najini prvi resni začetki s 3D sistemi, je bila krivulja učenja dokaj strma. V neznansko pomoč je prišla uradna FreeCAD spletna stran freecadweb; v njej so zapisani koncepti tako za rekreativce kot sezonske veterane. Zbirka programskih knjižnic, ki jo aplikacija koristi, je ogromna in se pridno iz dneva v dan dopolnjujejo. Temu primerno sva za spoznavanje porabila veliko časa

V tem koraku je kritična natančnost, od nje je odvisno prileganje končnega izdelka. Zgodili so se številni klici in porajala vprašanja, »ali bodo takšne mere ustrezale?«. V zapletenih izvedenkah lahko kalibracija ene same mere privede do kaosa. Stene, tla in strop iznenada postanejo pretanki ali preširoki, prihaja do konfliktnih kotov med objekti, nastajajo neželeni zamiki med prostori, so le nekateri stranski učinki. Na srečo se je temu dalo izogniti; namesto vnašanja fiksnih parametrov, so ti postali spremenljivke, odvisni od mnogoterih mer, enačb in razmerij. Vzpostavile so se pestre korelacije med posamičnimi predmeti in celotnimi objekti.

Ob nastanku zadovoljivega končnega artikla je bilo potrebno datoteko izvoziti v primeren format, ki ga lahko programska oprema za 3D tiskanje bere in obdeluje. Najbolj razširjeno uporabljen takšen format datoteke je *STL* (angl. stereolithography, morda boste slišali, da se imenuje tudi angl. Standard Triangle Language ali angl. Standard Tessellation Language). Vsaka datoteka je sestavljena iz niza povezanih trikotnikov, ki opisujejo površinsko geometrijo. Zakaj trikotniki? Vsak predmet je mogoče razdeliti na trikotnike, vendar trikotnika ni mogoče razdeliti na nič drugega kot trikotnike.



10.2.13, Izgled programa FreeCAD, verzija 0.19, Filip Pačnik

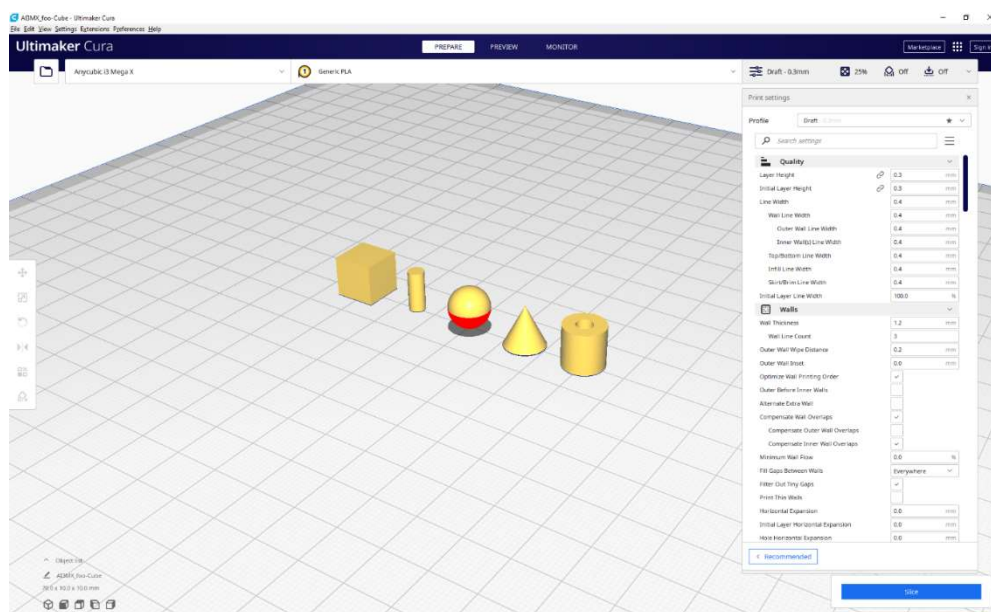
(VIR: lasten)

3.3.3 NAČRTOVANJE 3D TISKA

STL preoblikovano datoteko smo v naslednjem koraku odprli in urejali v programu Cura. Njena temeljna naloga, seciranje modela, pa še zdaleč ni edina stvar, ki jo je zmožna.

Vsebuje bazo podatkov vseh konvencionalnih 3D tiskalnikov, pomembna je izbira pravega, namreč vsak je po učinkovitem volumnu drugačen. Nato izberemo željeni material izdelka, saj je način tiska pri vsakem različen

Z več kot 400 sofisticiranimi nastavitvami ni meja izvedbe. Vsaka sooblikuje strategijo tiska v dovršeno arhitekturno enovitost. Sleherno surovo uvrstimo v sledeče skupine: »Quality«, »Walls«, Top/Bottom«, »Infill«, Support«, »Pattern« (več informacij v prilogi 9.12)



10.2.14, Izgled programa Ultimaker Cura, verzija 4.12.0, Filip Pačnik

(VIR: lasten)

Nikoli ne vemo v naprej, kje in koliko lahko gredo stvari narobe, tudi 3D tisk ni izjema (*več informacij v prilogi 9.13*)

3.3.5 IZMENJAVA

Ljudje smo različni in gotovo imava s soavtorjem svoje nabore spretnosti. Da bi se ti, čimbolj dokazali v pri raziskovanju, sva si na podlagi večšin razdelila delo. Najnovejša dogovorjena izboljšava se je razdelila na multimedijski, projektantski, kompozicijski, arhitekturni in elektroenergetski predel. Prepletena dela je seveda po določenem času bilo smiselno spojiti. Izbrala sva si 7 dni oz. 1 teden. Nato pa izmenjala modele, informacije, ugotovitve, meritve in dognanja marsičesa drugega v ponedeljek ob pričetku novega tedna šolskega pouka.

3.3.6 ZGRADBA

Ta naloga se osredotoča na prenosljivost vetrnice, potemtakem mora biti njena sestava samoumevna vsem potencialnim kupcem, ne samo izumiteljem; poleg tega se mora postaviti le z najosnovnejšim orodjem in kompaktnim priročnikom. S to mislijo sva oblikovala vse pretekle in bodoče makete.

A kljub vsem ambicijam po enostavni izvedbi ni bilo vedno tako preprosto. Potrebno je bilo prevrtati luknjo, izdolbsti vboklino, spojit z lepilom, pobrusiti z brusnim trakom, odrezati z žago, utrditi s kartonom, spojit z vijakom in še bi lahko našteval. Nepopolnosti so se lahko ugotovile šele v zadnjem koraku, ob držanju modela v roki. Ob napakah sva se lahko le učila in jih poskušala z drugačnimi pristopi obiti.

Tako rekoč smo po kronološkem zaporedju obšli cikel modeliranja. Pri tem smo se dotaknili apliciranih pojmov, računalniških programov, teorij, konceptov, aparaturne in fizikalnih dejstev.

3.4 IZVAJANJE MERITEV

Po veliko naporu smo dospeli do koraka, ko model že lahko opravlja svojo ciljno funkcijo; proizvaja elektriko ali natančneje »pretvarja« kinetično energijo v električno. Kako proaktivno to opravlja, pa nam razkrijejo natančne meritve.

Rezultati so osrednji del vsakršne raziskovalne naloge, so razlog, zakaj smo se le te lotili. Ti morajo seveda biti kredibilni, kar zagotovimo tako, da podrobno opišemo vsak korak pri preizkusih in opozorimo na morebitne spremenljivke.

3.4.1 USTVARJANJE MERSKIH POGOJEV

Večkrat sva zasledila dejstvo, da Sloveniji ironično primanjkuje vetra; ključna stvar za izvajanje meritev. Četudi smo imeli nekaj vetrovnih dni, so bili pogoji iz dneva v dan različni, zaradi česar ne bi mogla opravičevati rezultatov. Rabila sva neprekinjen & stabilen pretok zraka; ker narava tega ni dopuščala, sva se poslužila sintetično pridobljenega vetra.

Izbrala sva vrtalnik Parkside *PBH 800 A1*. Četudi je njegova priporočljiva uporaba udarno & običajno vrtanje ter vrezovanje v opeko, beton, kamen, omet, les in kovino, sva ga preoblikovala v vetrni stroj. Potrebno je bilo precej iznajdljivosti, toda uspela sva pritrditi 3 rezila kartona na izhodno os vrtalnika.

S širino kril $12,5\text{ cm}$ in dolžino presenetljivih $57,5\text{ cm}$ lahko ustvari precejšen veter, a problem leži v vrtinčenju tega. Največjo moč ustvari vetrni stroj na konicah rezil, točki največje hitrosti, v osrčju rotorja prihaja le do šibkih vrtinčnih vetrov. To je predstavljalo velik problem, predvsem za modele večje jakosti. Ob preizkušanju teh sva lahko le upala na naravni veter.



10.2.15, Vrtalnik za ustvarjanje merskih pogojev, Parkside *PBH 800 A1*, Nik Žlebnik Jančič

(VIR: lasten)

3.4.2 HITROST VETRA

Preden ustvarjamo kakršnekoli predpostavke o rezultatih, se moramo vprašati, pri kakšnih vetrovnih pogojih so bili le ti izvedeni. Temeljna spremenljivka ozračja, ki bega nadzornika vetrnih elektrarn, je njegova hitrost. Preostali dejavniki kot vlažnost, temperatura in padavine turbin ne motijo in nanje ne vplivajo premočno. Da se lahko prepričamo o točnosti anomalij ozračja, sva si tokrat sposodila merilec hitrosti vetra od mentorja Petra Vrčkovnika.



10.2.16, Merilec hitrosti vetra, Vaavud smartphone wind meter, Nik Žlebnik Jančič

(VIR: lasten)

Samo delovanje inštrumenta pa nas je pustilo nekoliko zbegane (*več informacij v prilogi 9.14*)

3.4.3 VRTLJAJI OSI

Sledeča stvar, ki vzbudi naše zanimanje, je število vrtljajev, ki ga opredeljena hitrost vetra ohranja. Velika hitrost rotacije ob majhnem vetru nakazuje, da ima vetrnica odlično zasnovo in optimalne karakteristike. Čeprav inženirji to številko radi opazujejo, je varnostni prag frekvence vrtenja v obsegu $75-80 \frac{m}{s}$ na konicah rezila. Nekoliko višji obrati pomenijo prekomerne sile na rotor turbine. Ob hudi burji lahko vetrno turbino dobesedno raznese. Da ne bi prišlo do finančne izgube, opremijo vetrnice z zavoro na gredi.

Sama meritev vrtljajev je precej direkten proces. Ponovno bova s specializiranim inštrumentov odčitavala le te kar na osi rotorja.



10.2.17, Merilec vrtljajev, Digital laser tachometer *DT – 2234C⁺*, Nik Žlebnik Jančič

(VIR: lasten)

3.4.4 NAPETOST SPONK GENERATORJA

Hipoteza številka 3 zatrjuje, da bodo rezila dosegla zadostno hitrost, pri kateri se bo generator dovolj močno vrtel in bo ustvaril dovolj veliko napetost za prižig LED svetilke. To teorijo z lahkoto preizkusiva; vse potrebno je le priključitev sijalke na izhod generatorja. Če ta zasveti, potem potrdiva teorijo, drugače ovrževa. Toda svetilka ne pove, kakšna je izhodna napetost, ob preveliki svetilka pregori. Rajši bova uporabila specializiran inštrument.

Multimeter je elementarni pripomoček vsakega električarja. Sestavljeno ime inštrumenta namigne, da njegov namen ni le enoplasten. Merilec združuje funkcije določanja večih električnih lastnosti od napetosti, toka, upornosti, kapacitivnosti, frekvence, merjenje diode in preizkusa kratkega stika. Osredotočala se bova le na napetost, saj je ta odgovorna za žarenje LED. S paralelno priključitvijo sond multimetra na sponke generatorja, bova določila potencialno razliko naboja in preračunala posamezne padce napetosti v vezju.

Kakor obstajajo različice elektronskih elementov na trgu, je tudi svetlečih diod več vrst. Te lahko gorijo močnejše ali šibkeje, z različno barvo ali prenesejo večji tok; v zameno pa zahtevajo

večjo napetost. Ne glede na to imajo vse našteje mejo prižiga pod 4 V, torej bo vsakršna kontinuirna napetost nad to točko potrdila hipotezo.



10.2.18, Merilca napetosti in toka, UNI – T UT39C, EM391, Nik Žlebnik Jančič

(VIR: lasten)

3.4.5 ROTACIJA NOSILNEGA STOLPA

Predpostavka 3 navaja, da je ciljna maketa zmožna slediti vetru z meritvijo smeri. Če želimo izvedeti, kam usmeriti gondolo, potemtakem potrebujemo prvotno smer, iz katere najmočnejše piha. (več informacij v prilogi 9.15)

4 REZULTATI

4.1 RAZVOJ VETRNIC

Kot vse odmevne tehnologije, ki vstopijo na trg, se je tudi ta začel kot prototip in ne samo eden. Skozi celotno metaanalizo sva izdelala kar 5 maket. Čeprav ustvarjen s tem namenom, vsak novejši model ni bil boljši od predhodnega. Sleherni je podedoval svoje posebnosti in anomalije. Še tako skrbno načrtovan model bi lahko bil deležen izboljšave. Lahko smo se le učili iz napak in upali na boljše.

4.1.1 PRIMER 1

Sprva sva samo usvajala proces dela; od načrtovanja, modeliranja, tiska, sestavljanja in preizkušanja. Model ni imel sofisticiranih konceptov kot podaljšavo kril. Rotor in krila so se natisnila neločljivo, kar v enem kosu. Nisva si želela ustvarjati preglavic z načini priklopa, mehansko trpežnost itd.; zanimalo naju je predvsem, ali se bo stvar sploh vrtela.



10.2.19, Primerek 1, Nik Žlebnik Jančič

(VIR: lasten)

Narejen model se je pritrdil na generator in pričele so se meritve, toda rezultati so nas razočarali.

REZULTATI MERITEV PRIMERKA 1			
	hitrost vetra [m/s]	število obratov [rpm]	napetost na sponkah generatorja [V]
maketa 1	5	0	/

10.4.2, Rezultati meritve primerka 1, Nik Žlebnik Jančič

(VIR: lasten)

Verjamem, da so rezultati sami dovolj zgovorni. Uporabljen generator električne energije se je izkazal za permisivnega. Kasneje sva preizkusila maketo 1, brez priklopa na generator, pri čemer se je uspešno zavrtilo. To dokaže, da je ležeči problem resnično v masi generatorja.

Ker nisva želela dati celotnega modela v nič, sva s kartonom in lepilom povečala presek in podaljšala krila. Sedaj lahko zajamejo več zraka in proizvedejo več navora za pretvornik energije.



10.2.20, Primerek 1 modificiran, Nik Žlebnik Jančič

(VIR: lasten)

Nadgradnja se je izkazala za dobrodošlo; tokrat so rezultati boljši

REZULTATI MERITEV MODIFICIRANEGA PRIMERKA 1			
	hitrost vetra [m/s]	vrtljaji na minuto [rpm]	napetost na sponkah generatorja [V]
maketa 1 modificirana	5	190	0,6

10.4.3, Rezultati meritev modificiranega primerka 1, Nik Žlebnik Jančič

(VIR: lasten)

4.1.2 PRIMER 2

Replika 2 je prevzela površinske parametre svoje predhodnice, katere mere in oblika se je izkazala za priročno. Sledi pa iskanje naklona kril. V ta namen sva zasnovala model, ki bo kos nalogi.

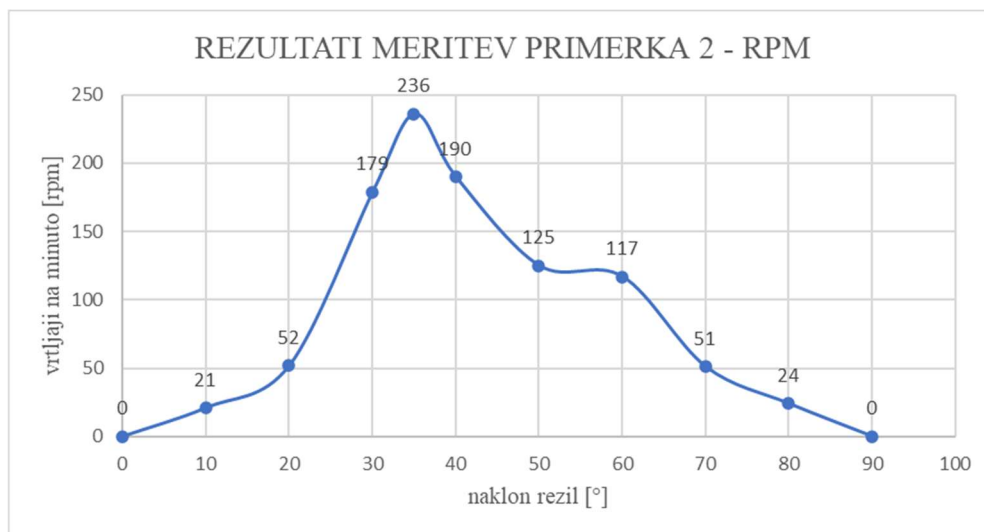
Prototip se tokrat ne bo tiskal v enem kosu, temveč bo sestavljen iz več manjših. Naredili smo ločen natis rotorja in 3 rezil. Vse imajo priključne kontakte v obliki krožnice zaradi potrebe po konfiguraciji naklona po poljubni vrednosti. Skupaj jih pretežno drži trenje med priključki, zaradi gotovosti, pa je dodan lepilni trak.



10.2.21, Primerek 2, Nik Žlebnik Jančič

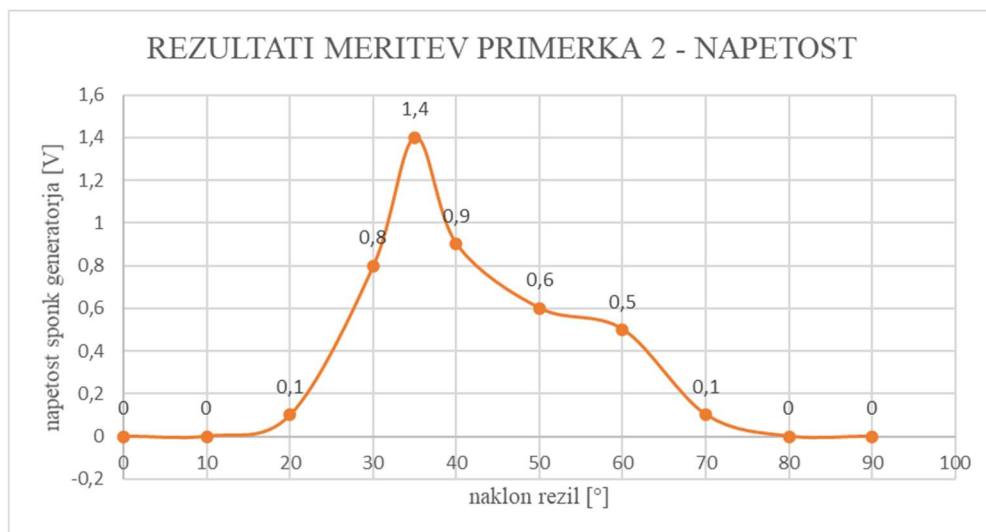
(VIR: lasten)

Sedaj pa so na vrsti še meritve. Od 0° in pa vse tja do 90° sva s koraki po 10° spreminjala naklon lopatic. Grafa, ki sta ob tem nastala, prikazujeta odnos naklona rezil do vrtljajev gredi in napetosti sponk generatorja.



4.3.1 Rezultati meritev primerka 2, Vrtljaji na minuto, Nik Žlebnik Jančič

(VIR: lasten)



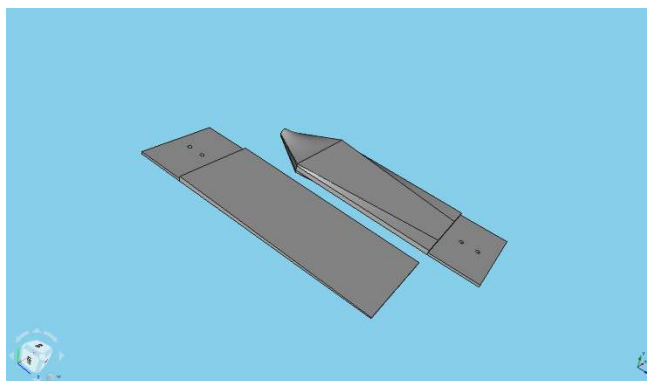
4.3.2, Rezultati meritev primerka 2, Napetost na sponkah generatorja, Nik Žlebnik Jančič

(VIR: lasten)

Nova dognanja so se beležila in prusmerila k izboljševanju sledečega modela.

4.1.3 PRIMER 3

Prototip 3 je bil izveden kot testni polizdelek zadnjega artikla. Želela sva preizkusiti, ali bi vsi predhodni izsledki delovali skupaj kot celota. V upunju, da odpraviva težave z navorom, sva sledila lastnostim modificiranega modela 1. Njegova podolgovata in ozka krila sva pustvarila s 3D tiskalnikom. Krhka zasnova je privedla do zloma med sestavo. Tako na primerku 3 nisva mogla izvesti meritev.



10.2.22, Primerek 3 iz modelarja FreeCAD, Filip Pačnik

(VIR: lasten)

4.1.4 PRIMER 4

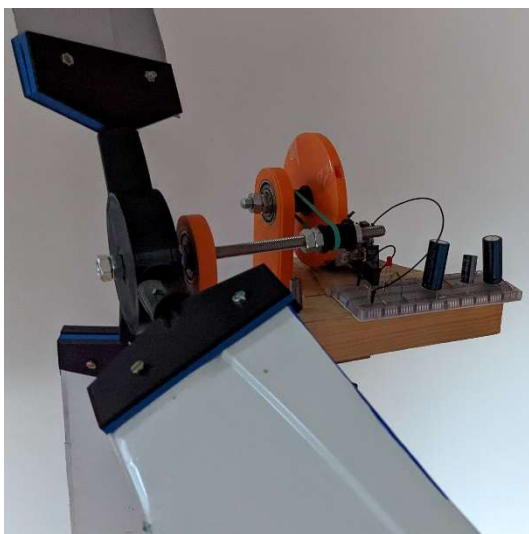
V predhodnem modelu nisva uspela izvesti zadanega cilja. Sva pa izvedela pomemben podatek o primerni infrastrukturni trdnosti. Iz tega razloga sva plastična krila zamenjala s takšnimi iz pločevine. Okrepljene mehanske lastnosti novega materiala so omogočile še nadaljnje daljšanje rezil. Te se pritrdijo z dvema navojema, kar omogoči menjavo kril po poljubni dolžini. Med samim razvojem sva upoštevala načela, ugotovljena med vsemi preteklimi maket



10.2.23, Rezila primerka 4, Nik Žlebnik Jančič

(VIR: lasten)

Rezilo meri v dolžino 1 m, kar naredi celotno vetrnico razmeroma počasno. Iz preteklih prototipov je razvidno, kako nizko napetost ustvarijo majhni obrati. Da bi bolje izkoristila dodelana krila, smo izdelali tudi jermensko prestavno razmerje. Izvedba je precej osnovna, a se še predobro obnese.



10.2.24, Prestavno razmerje primerka 4, Nik Žlebnik Jančič

(VIR: lasten)

REZULTATI MERITEV PRIMERKA 4				
	hitrost vetra [m/s]	vrtljaji na minuto [rpm]	napetost na sponkah generatorja [V]	čas razčlenitve & sestavitve [min]
maketa 4	5,6	290	2,4	±5

10.4.4, Rezultati meritev primerka 4, Nik Žlebnik Jančič

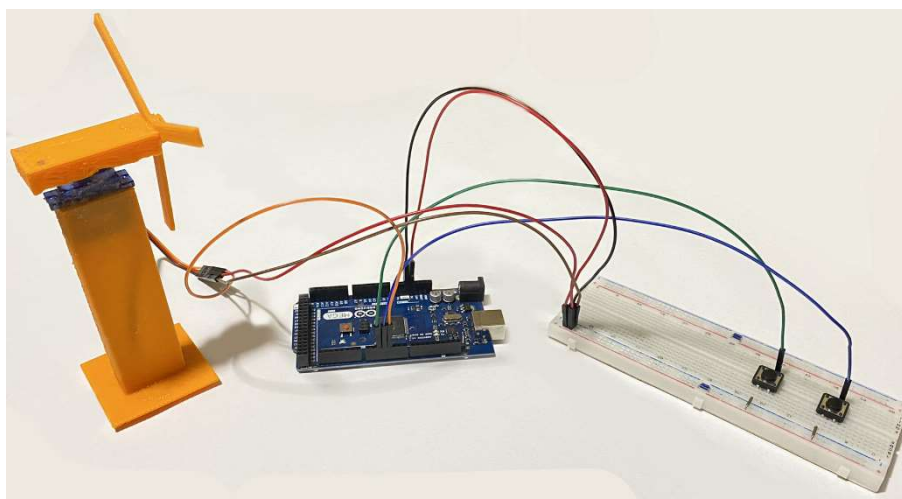
(VIR: lasten)

4.2 PRILAGAJANJE VETRU

Z izkoristkom se želimo čim bolj približati Betzovemu limitu. Močno specializirana krila, ki lahko to dosežajo, nam nič ne koristijo, če delujejo le na trenutke prave smeri vetra. Vetrnice se s svojim rotacijskim mehanizmom nenehno trudijo ohraniti skladno smer s tisto od toka zraka.

4.2.1 PROTOTIP 1

Med razmišljanjem, kako izvesti delujoč mehanizem, se mi je preblisnila ideja, da bi se lahko pri pouku začeli učiti programiranja. Preko šole smo naročili Arduino paket. Poleg same ploščice je zajemal številne elektronske avtomatizacijske elemente, med drugimi servo motorček, kar se je izkazalo za še kako potrebno igračko. V primerjavi z drugimi motorčki ima ta vgrajeno povratno zanko. V vsakem trenutku preverja lokacijo zobnika in ali se je ta zavrtel za željeno mero. A dodatni nadzor ima kritično slabost; obseg rotacije je le pičlih 180°. Vetrnica s takšnim pogonom bi lahko sprejemala in posledično izkoriščala veter z le polovične oble.



10.2.25, Rotacijski mehanizem, Servo motor in arduino, Filip Pačnik

(VIR: lasten)

Prototip 1 se bo koordiniral ročno. Dve tipki na matrični plošči nadomeščata senzor smeri. Ob pritisku ene ali druge simulirata analogni signal, ki bi nastal ob naklonsko večjem ali manjšem vetru. Na vhodih se spremeni v digitalnega s primerjalnikom napetosti in nadaljnje procesira v čipu Arduina. Ta na podlagi napisane programske kode po želji oddaja signal servo motorju, ki je srce rotacijskega mehanizma. *(več informacij v prilogi 9.16)*

Zapisana koda, ki žene motorček, izkorišča določeno število knjižnic. Beseda knjižnica v programerskem žargonu izraža izrabo predhodno napisane datoteke; ta je lahko lastna ali od druge osebe. Trem od teh je avtor raziskovalec Filip Pačnik, preostala pa je od Arduino skupnosti. Možgani za projektom Arduino niso le razvili same ploščice in gonilnikov za programiranje, temveč številne skripte za elektronske komponente. Knjižnica »*Servo.h*« je ena takih in hkrati tista, ki jo napisana koda izkorišča. S tem se izognemo uram dodatnega kodiranja in prebiranja dokumentacijskih sredstev proizvajalcev servo motorjev.

Vstopiti v svet novega znanja in v njem razvijati model je dolgoročen, težaven proces. Termin 141 dni, ki jih ponujajo Mladi raziskovalci z dodanim pritiskom ne pomaga. Ta številka se morda zdi dovolj velika, a še prede se zaveš, je datum oddaje pred vrati. Časovna stiska, naju je prisilila le do delne raziskave področja prilagajanja turbine.

5 DISKUSIJA

5.1 VETROVNA REZILA

Vetrovna rezila so srce vsake vetrnice. Njihov razvoj, sestava in preizkusi potekajo več sezon in celo let. Podjetja namenijo milijonske zneske za razvoj, izboljšave in tehnološke inovacije.

Vloga kril je zajeti ves potujoči zrak, njegovo kinetično energijo pretvoriti v mehansko rotacijo, jo predati generatorju in proizvesti elektriko. Zatika se v postopku primarne konverzije, vsled slabih pretvornih lastnosti vseh hlapov. Njihova prostorska stisljivost preprečuje izkoriščanje večje od 59,3 %. Tako nizke številke ožigosajo rezila kot porazen pretvornik na pram celotne turbine. Matematično specializirani formati kril, izpiljene koncentracije posameznih vrst materialov in zanesljiva odzivnost na vremenske razmere; vsi strmijo k zblizanju dejanskega izkoristka s teoretičnim limitom. Vse z namenom številčnejše uporabe vetrnih elektrarn po svetu.

Zapleten cikel vizij, načrta, izvedbe in korekcije, skozi skozi katerega gre razvoj v podjetju, sva predstavila skozi 5 maket. S tem sva lažje uvidela, kako sprememba posameznega faktorja vpliva na končni izid. Učni proces delovanja programske opreme, 3D tiskalnikov in ostalih elektronskih komponent, se je pričel s prototipom 1. Takratne mere so temeljile na predvidevanjih o preprostih fizikalnih pojmih. Od modela imela nizka pričakovanja, a dejstvo, da se pri preizkusu ni niti vrtel, dokaže najin popoln strel v temo. Problem sva hitro izločila na uporabljen električni generator. Izkazal se je za permisivnega, katerega pogon bi potreboval dosti več navora in precej vetra. Namen makete je bil pokazatelj, ali se pomikava v pravo smer. Iz nje sva se naučila ustrežnejših dimenzijskih mer in prečnih prerezov. Ti še zmeraj niso optimalni, saj zadeva proizvede premajhno napetost. Nalogo nadaljnje optimizacije bova predala sledečim modelom.

Za repliko 2 sedaj veva grobe površinske parametre, tudi po sami obliki sva sledila *BEM* metodi, kar pa nisva upoštevala, pa je naklon kril, pod katerim te režejo okoliški zrak. Maketa 2 se je izključno osredotočala na iskanje idealne vrednosti kota med rotorjem in lopaticami.. Iskala sva točko največjih vrtljajev in ugotovila, da nastopi pri okoli 35 °, pred in po tem pa hitro naraste oz. upade. Prispela pa sva še do izdatnega dognanja. V kontrastu s prvotnim prepričanjem, da napetost sponk generatorja ni v korelaciji z dimenzijami lopatic. Daljša in

večja krila zajamejo več vetra, ustvarijo večji navor, a se zaradi fizikalnih pogojev vrtijo pri nižjih obratih. Dodani vztrajnostni moment se seveda izkoristi z izpeljavo gredi generatorja skozi prestavno razmerje. Povečani vrtljaji nato proizvedejo večjo napetost.

Predhodna maketa je kljub optimalnemu naklonu še zmeraj s težavo obračala gred generatorja. Podatki meritev so lahko zavajajoči, še posebej pri naklonih bolj oddaljenih od optimalnih 35 °. Kjer bi se primernejša krila zavrtela in proizvedla izbrano napetost, namesto da bi samo stala na mestu. Želela sva se prepričati o resničnosti trditve optimalnega kota, zato sva že tretjič pripravila nov model, ki bi v teoriji proizvedel večji navor. Besedilo »v teoriji« izgovorim, saj se je maketa izjalovila. Iz časovnih kot cenovnih in navsezadnje tudi konstrukcijskih razlogov so bili natisnjeni deli precej ozki in podolgovati. Med sestavo so se enostavno zlomili in preprečili nadaljnje preizkušanje.

Nastopil je trenutek, ko je bilo potrebno preteklo znanje in delo združiti, preplesti in osnovati dokončni produkt. Nabrano znanje je vključevalo ustrezne dolžine in širine kril, njihove naklone in primerno infrastrukturno trdnost. Za ta izdelek sva predhodna plastična krila zamenjala za pločevino. Mehanske lastnosti novih kril zdaleč prekašajo tiskalniški filament; čas izdelave je neprimerljivo krajši in stroški so manjši. Preostali komponenti, kot rotor in vozlišče, so pa bili še zmeraj natisnjeni. Gred je sedaj preko prestavnega razmerja dosegla rekordnih 290 rpm. Novodobna hitrost lahko s pomočjo generatorja proizvede dodatnih 2,4 V. Četudi največja napetost, dosežena v nalogi, je premajhna za oskrbovanje osnovnih elektronskih modulov.

5.1.1 VALIDACIJA HIPOTEZ I

Z osvojenim znanjem je končno čas, da pregledamo stanje hipotez.

Uvodno hipotezo (*Vetrna turbina bo imela zmogljivost razčlenitve, prenosa in sestavitve*) lahko potrdiva. Naloga, ki naj bi tolmačeno zavzela 60 min, se je napravila v $\frac{1}{12}$ prvotnega zastavljenega časa. Pripomore dejstvo, da je nalogo opravil njen izumitelj, ki se je večkrat spoprijel z njenim krojem. S strani kupca sva dorekla *trikratkrat* daljši čas, torej okoli 15 min.

Sledečo hipotezo (*Prenosna vetrna elektrarna bo zmožna časovno daljšega napajanja LED svetilke*), morava žal ovreči. Čeprav bi pri napetosti 2,4 V diode nižjih razredov že svetile, sva v trditvah uvrstila LED-ice vseh napetostnih stopenj in zastavila mejno napetost pri 4 V.

Hipotezo 3 (*Vetrnica bo s podaljšanjem krakov proizvedla več moči*) lahko na osebno presenečenje ovrževa. V kontrastu s prvotnim prepričanjem podaljšana rezila ne bodo proizvedla več izhodne moči, temveč le navora. Vsekakor se dodani navor imenitno izkoristi in posredno proizvede, pripelje do večjih napetosti na sponkah generatorja. Toda tega najina domneva ni zatrjevala, zato jo morava v duhu znanstvene metodologije zanikati.

5.2 PRILAGAJANJE TURBINE

V primeru, da bi proizvajalci še danes izdelovali nepremične turbine, takšne kot izpred 1000 leti, bi hitro ugotovili, da producirajo le ogromno gospodarsko izgubo. Z gradnjo fiksne vetrnice, v smislu da ta ni zmožna prilagajanja na vremenske pogoje, bi proizvajali elektriko le v določenih trenutkih, ko bi veter pihal prečno na njeno postavitev. Tehnika je napredovala, da lahko po želji prirejamo ne le smer izbrane vetrne elektrarne, ampak tudi naklon posameznih rezil. Konstantno merjenje vseh meteoroloških podatkov in na izsledkih presojanje primerne konfiguracije celotne vetrne elektrarne, bi bilo prezahtevno delo za posameznika. Nalogo raje prepustimo specializiranim elektronskim inštrumentom, ki isto nalogo izvedejo v tisočinki sekunde in mnogo precizneje. Raziskava ne nudi niti dovolj časa niti znanja niti opreme. Lotevanje avtomatizacije kril bi bil prevelik napor. Osredotočila sva se raje le na eno izmed dveh in to izvedla toliko bolje.

Vetrnico sva zmogla regulirati ročno, a do popolne samostojne naravnave, bi bilo potrebno precej dela. Za začetek, bi usposobila merilec smeri vetra, njegovo dosedanje delovanje je bilo precej nezanesljivo in vprašljivo. Nato bi se lotila prenosa podatkov iz sensorja v Arduino in nadaljnjega posredovanja rotacijskemu mehanizmu. V zadnjem koraku bi izmenjala servo motor s omenjenim dosegom 180 ° za koračni motor. Ta se lahko vrti v nedogled, a potrebuje ločen nadzorni sistem kar zopet privede do ponovnih zapletov.

5.2.1 VALIDACIJA HIPOTEZ II

Prišel je trenutek, ko ocenimo še zadnjo hipotezo. Da osvežim spomin, ta navaja (*Prenosna vetrna elektrarna bo zmožna orientacije glede gibajočih zračnih mas na osnovi meritve smeri in hitrosti vetra*). Lahko jo potrdiva le delno; namreč ugotovila sva, da četudi je proces avtomatizacije težaven, je mogoč. A s to hipotezo sva želela seči mnogo globlje. Vse majhne vetrnice, ki so na trgu, uporabljajo repno lopatico za usmerjanje. Ali bi menjava vodila za rotacijski sistem pripomogla k ceni ali učinkovitosti? Odgovor se je izkazal kot ne v obeh primerih. Cenovno je le dražja; učinkovitost pa zanemarljivo boljša, zlasti pri tako malih močeh.

6 ZAKLJUČEK

Z ugledom na kocki svet naglo brzi dalje. Letni podatki o izpustih plina CO_2 , porastu temperature in klimatskih spremembah slikajo medlo, negotovo prihodnost. Neobhodna je bila preobrazba globalnega energetskega sektorja. Pod vodstvom mednarodnih fundacij se države zavzemajo k zagonu & vpeljavi trajnostne energije. Poleg vpliva na globalna tržišča se temeljita reformacija vpeljuje tudi v gospodinjstva. Preko rasti lastniških elektrarn želijo potrošniki zadušiti dvigovanje cen energije. Izmed številnih izjav vrstnikov kot tudi učiteljev sva opazila, da fotonapetostni moduli pri domači postavitvi žanjejo veliko slave. Toda, zakaj le sončne? So v primerjavi z vodnimi turbinami ali vetrnicami res toliko boljše, cenovno ugodnejše, kvalitetnejše in bolj učinkovite? Iz tega vprašanja izhaja glavna ideja za raziskovalno nalogo. Izmed dveh sva izbrala vetrno in raziskala, zakaj se pri lastniški postavitvi ne gradijo in kako bi jo izboljšala dovolj dobro za slovenski trg.

- Dimenzije in struktura rezil so poglavitna sredstva ekonomičnega izkoriščanja vetrnega potenciala.
- Napetost sponk generatorja ni v korelaciji z razsežnostjo kril. Podaljšanje teh izzove večji navor, ne pa tudi izhodno moč.
- Sledenje vetru preko digitalnih sistemov SCADA ponazarja le dodatni znesek in infrastrukturno problematičnost. Tehnološka udobnost repne lopatice prekosi vsakršna mikrokrmilniška sredstva.

7 POVZETEK

V dobi silovitega napredka se pričenjajo odražati posledice na okolje. Zajetni izpusti plina CO_2 v okolje, nevarno znižuje temperaturo našega planeta. V boju proti tem se financirajo organizacije zelene energije. S kampanjami proti energetskega izkoriščanju naftnih surovin poskušajo omiliti učinek tople in omejiti dvig povprečne globalne temperature pod $2\text{ }^\circ\text{C}$. Načrtno nova hrbtenica elektroenergetskega sektorja pa bodo postala sončna, hidro in vetrne elektrarne. Kot civilisti pozabljamo, da smo mi socialni razred, ki bo najbolj oškodovan. Občutno bo zmanjšanje stabilnosti električnega omrežja, dostopnost elektrike, predvsem izrazito pa bodo narasle cene energije. Po svetu in tudi pri nas je v porastu fenomen gradnje lastniške elektrarne. Posamezniki si subvencionirajo sončno, hidro ali vetrno elektrarno kar doma pred hišo. Kot sva opazila iz izjav vrstnikov in učiteljev so te v večini fotonapetostni moduli. Toda zakaj le sončne? So pri primerjavi z vodnimi turbinami ali vetrnicami res toliko boljše? Izmed dveh sva si izbrala vetrno in raziskala, zakaj se pri lastniški postavitvi ne gradijo in kako bi jo izboljšala dovolj dobro za slovenski trg. Na področju Zemeljske klime in njenega izkoriščanja sva bila precej neveda, zato je bilo na prvem mestu izobraževanje o tem. S soraziskovalcem sva se redno obračala na splet in prebirala najrazličnejše akademske raziskave, članke, forume, spletne portale, poslušala komentarje in podcaste ter gledala videe in fotografije. Januarja je bilo potrebno začeti z ustvarjalnim delom. Da bi zamišljen izdelek lahko prišel od ideje v materialni svet, so bili potrebni določeni vmesni postopki. Korak 1 je pretvorba iz izrisanega plana v digitalno obliko s pomočjo računalniškega modelarskega programa FreeCAD. Ustvarjen 3D model primerno urejamo, obdelujemo in ga naposled predamo drugi programski opremi. Ultimaker Cura je računalniški slicer, ki datoteko digitalno nareže na ravne plasti in natančno določi traso potovanja konice tiskalnika. Poleg samega modela dopiše tudi lastnosti kot debelino sten, stropa in tal, procentualno zapolnjenost notranjosti, vzorce polaganja materiala, smer tiska in številne druge. Preostane le še prenos datoteke k 3D tiskalniku preko spominske kartice in čakanje na dokončani tisk. Pred seboj imamo natisnjene vse potrebne polizdelke, ki vabijo na sestavitev. A kljub vsem ambicijam po enostavni zasnovi, se stvari niso nikoli čisto prilegale. Potrebno je bilo spretnih prstov, lepila, kartona in vrtalnika, da so se malenkosti uredile. Na vprašanje, kako dobro zadeva deluje, pa sva odgovorila s sledečimi preizkusi. Kot ime namiguje, izdelujeva prenosno vetrno elektrarno, njena razčlenitev in sestavitev mora biti hitra in enostavna, zato je sva si zadala cilj, da to storiva v času manj kot

ene ure. Smiselno je, da vetrnica proizvaja dovolj elektrike za napajanje osnovnih hišnih pripomočkov. Zaradi osnovnega dizajna, majhne velikosti in nizkocenovne opreme najine turbine se bova zadovoljila z napajanjem LED svetilke. Različne vremenske razmere zahtevajo različne konfiguracije. Mehanski premiki kot naklon kril, prestavno razmerje, smer gondole, priskrbijo ustrezno izrabo toka vetra. Ciljna maketa uporablja fiksno prestavno razmerje, prilagajanje vetrovom nisva uspela implementirati kot tudi naklona rezil ne. Toda lahko jo opremiva s poljubno dolžino kril. Preverili bomo ali sprememba velikosti lopatic na zadovoljujoči način vpliva na izhodno moč sponk generatorja. Sedaj vemo vse, kar želimo z vetrnico doseči; zatorej prično izdelovati primerke in preverimo, ali dosegajo in presegajo zadane norme. Učni proces oblikovanja rezila se je pričel z maketo 1. Čeprav so nas rezultati razočarali, so bili pričakovani. Majhna krila enostavno niso zmogla vrteti masivnega generatorja. Model je bil pokazatelj ali se gibljeva v pravo smer. Iz nje sva se naučila ustrežnejših mer in prečnih prereзов, nalogo nadaljnje optimizacije pa bova predala sledečim modelom. Maketa 2 se je izključno osredotočala na naklon kril, eden ključnih faktorjev za učinkovito izkoriščanje vetra. Točko optimalnega kota sva izsledila pri 35 °, takrat so bili vrtljaji kot tudi napetost generatorja najvišji. Kljub optimalnemu kotu so krila še zmeraj s težavo rotirala generator. Potrebovala sva več navora na osi. V upanju, da bo maketa 3 odpravila to težavo, sva ji natisnila podolgovata in ozka krila. A še pred preizkusom so se zlomila zaradi svoje krhke zasnove. Izdelave dokončnega produkta sva se lotila z vsemi potrebnimi znanji, dognanimi iz predhodnih maket. Krila so sedaj bila odrezana iz pločevine. Dodane mehanske lastnosti so omogočile višja krila, katerih naklon je bil nastavljen pod ustreznimi 35 °. Tako dolga krila naredijo celotno vetrnico razmeroma počasno. Da bi bolje izkoristila ustvarjen navor, sva izdelala tudi jermensko prestavno razmerje. Ustvarjen veter je sedaj gred zavrtel pod rekordnimi 290 rpm, ti pa so se preko generatorja pretvorili v napetost 2,4 V.

8 ZAHVALA

- Prve besede zahvale nedvomno pripadajo mentorju Petru Vrčkovniku. Vedoželje, ki ga je vpisalo na srednjo elektro šolo, nadaljeval je študij na visokošolski univerzi FERI Maribor; potem pa se vrnil na Elektro in Računalniški šoli Velenje kot učitelj. V 2. letniku smo se pričeli srečevati pri predmetu avtomatika, kjer nam je poskušal pokazati svet elektronike in robotike. Pri poučevanju rad deli svojo strast do predmeta. Njegov učni načrt ne zaobsega le kurikuluma, temveč nam posreduje znanje, modrost in izkustvo pridobljeno skoti leta. V ure vključuje vsa področja, ki njemu in morebiti tudi učencem, vzbudijo zanimanje. V 3. letniku je ponudil mentorstvo pri projektu Mladi raziskovalci za razvoj Šaleške doline. Njegovo dolgoletno sodelovanje v programu in ustrezno poučevalno področje naju je prepričalo. Izkazovati kot mentor se je začel že na samem začetku z oblikovanjem prave ideje. V času raziskovanja je redno posojal merilno opremo in konceptne modele. Ob ovirah, ko sva se obrnila nanj, je zmeraj poiskal rešitev ali predlagal alternativno pot. Ob vsakem manjšem napredku so ga bila »sama ušesa«, kako sva stvar uredila, kaj novega ugotovila ali spremenila.
- Pod to točko izrekava zahvalo g. Klemnu Hlebu. Predmet, ki ga poučuje, se osredotoča na programiranje in upravljanje z Arduinom. Ker tudi ta naloga vključuje aspekte njegovega programa, sva ga vprašala za pomoč. Tudi ko so se vrstila dileme okoli delovanja elektronskih inštrumentov ali primernosti generatorja za projekt, je znal svetovati.
- Tukaj pripada zahvala dvema osebama. Profesorica Bojana Vrbnjak, je z nami kot učiteljica že od 1. letnika srednje šole. Njene ure so nekoliko bolj sproščeni deli dneva, kjer čeprav delamo veliko to izvedema na lahkoten način. Zahvala torej Bojani Vrbnjak, ki je skrbno prebirala pisni dokument in ga v celoti lektorirala. Zahvala pripada tudi profesorici Simoni Diklič. Ure angleščine, ki jih to učiteljica ponuja, so nadvse razgibane. Njen učni načrt je vsestransko opremljen s digitalno tehniko. Redno se dogaja, da celotno ure presedimo pred projekcijo, a to ne pomeni, da od ure odnesemo manj. Marsikdaj je to učinkovitejša metoda učenja, po kateri bi se lahko preostali zgledovali. Profesorici Diklič se zahvaljujemo za lektoracijo vseh angleških besedil v papirju.

9 PRILOGE

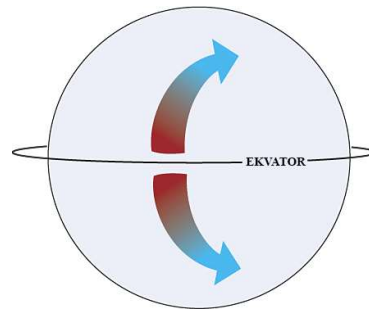
9.1 NEHOMOGENO SONČNO OGREVANJE

Neenakomerno sevanje sončne svetlobe lahko pripišemo štirim vzrokom.

- Zemlja je elipsoid, ki kroži okoli sonca. Žarki, tako od ničelne zemljepisne širine vpadajo skoraj vertikalno na skrajnih polih pa takorekoč paralelno. Kot posledica prostorsko neenakovrednega segrevanja, tlak upada z oddaljenostjo od polov, čemur veter sledi.
- Fiktivna os Zemlje ima nagib 23.5° ozirajoč na ekliptično ravnino. Konstantni naklon skozi čas rotacije planeta okoli Sonca ciklično spreminja klimo ozemlja. Odraž tega je minimalni učinek na ekvatorju in ekstrem na območju polov; tam sonce polovico leta ne zaide, drugo polovico ne vzhaja
- Zgradba geosfere je opazno raznolika. Vsaka vrsta kamnine, prsti in proda drugače reagira na sončno sevanje. Med seboj se razhajajo v povratnem odsevu in hitrosti absorpcije sončne energije.
- Površina sveta je pestro topografsko posejana. Senčilni odseki (gore, doline, hribi, kotanje, planjave, griči, pečine), vzpostavljajo sončne in osenčene strani, ki skozi dan prejmejo različno zalogo sončne radiacije.

9.2 CORIOLISOVA SILA

Zemlja se vrti okoli sonca vzdolž ekvatorja preko svoje osi. Coriolisova sila, ki nastane zaradi samorotacije Zemlje, odkloni smer atmosferskih gibanj. Le te odraž povzroča pomik vetrovnih tokov na severni hemisferi v desno in v levo na južni.



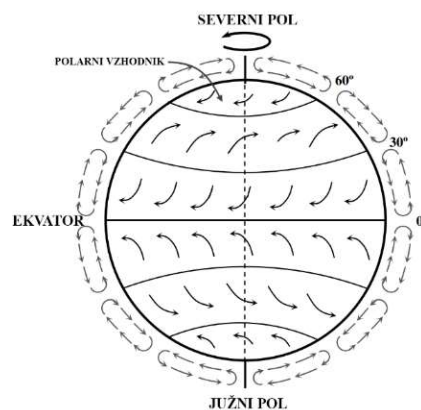
10.2.26, Coriolisova sila, National Oceanic and Atmospheric Administration

(VIR: <https://oceanservice.noaa.gov>)

9.3 STRIŽENJE VETRA

Hrapavost zemeljske površine tvori prepreke in raznovrstne trase smeri. Pojav, poznan kot striženje vetra, zavira, spreminja ali celo krepi gibanje zračnih mas.

9.4 IDEALEN ATMOSFERSKI PRETOK



10.2.27, Idealizirana atmosferska cirkulacija, Kollmorgen Corporation

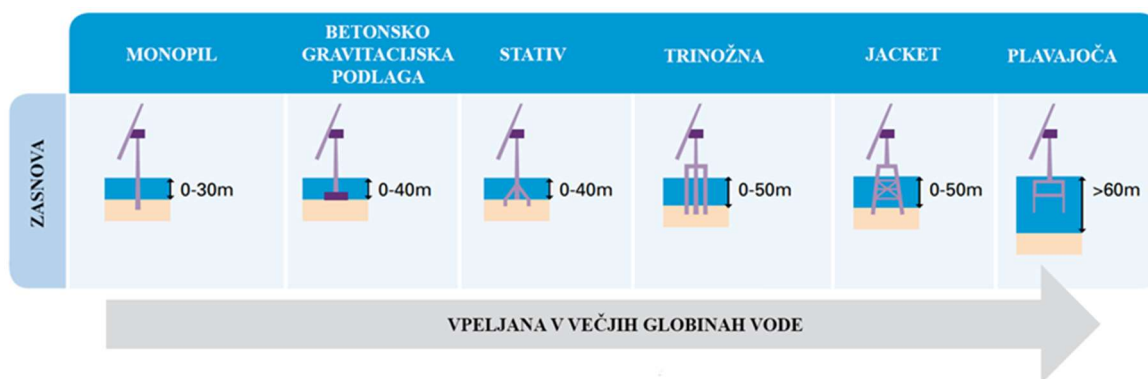
(VIR: <https://www.witpress.com/>)

Shema prikazuje idealno atmosfersko cirkulacijo; nanjo bi minimalno vplivali faktorji nehomogenega sončnega ogrevanja in površinske prepreke. Rotacija Zemlje bi povzročila stalen, enosmeren pretok vetrov v vsakem toplotnem pasu. Neokrnjeno površinsko nevtravno segrevanje ploskve pa bi privedlo do konstantnega kroženja Troposferskega ozračja. Sprejemljive motnje bi omogočale obratovanje vetrnih elektrarn s polno paro.¹⁴

9.5 MORJE ALI KOPNO

Objekti za proizvodnjo energije, ki vsebujejo številne vetrne turbine, poimenujemo vetrne elektrarne. Pred kratkim, zlasti v Evropi, so elektrarne na morju pridobile podporo političnih strank, katere navdihuje ideja o hitrejšem in stabilnejšem vetru na Atlantiku in Sredozemlju. Vendar so zneski vzdrževanja kot tudi kapitala nekajkrat višji od kopenskih elektrarn.

Pravzaprav je edina projektantska razlika med dvema v temeljih. Kopenske vetrne turbine stojijo na betonski podlagi, medtem ko turbine na morju imajo temelje nameščene na morskem dnu. Odvisno od globine se spreminja struktura stebrov.



10.2.28, Primeri temeljev vetrnih turbin na morju, Carbon Trust

(VIR: <https://www.carbontrust.com/>)

¹⁴ 10.1.3, Wei Tong, Fundamentals of wind energy, Kollmorgen Corporation, 2010

9.6 KVOTA

- Vertikalne turbine potrebujejo zgolj eno krilo za zajem energije vetra, a da bi dosegle izplen sorodnih dvo- ali trorezilnih replik, morajo krožiti z neobvladljivo hitrostjo. Njihovo poslovanje bi v primeru silovitega vetra ogrozilo človeška življenja in mnoge živalske vrste. Zato se implementirajo le kot konceptualni model za teoretske raziskave.
- Že naznanjen obstoj dvorezilnih turbin se je v večji meri ustalil zaradi nadgradnje statične stabilnosti, ozirajoč na turbine s samo enim krilom; obenem pa zaradi pomanjkanja tretjega znižajo stroške, omejijo maso rotorja in znižajo prestavno razmerje med generatorjem in rotorjem.
- Vendar pa stroškovna učinkovitost ni edino merilo, ki ga je potrebno predpostaviti. Zagotovljena okrepljena dinamična stabilnost, intenzivnejši prenos energije pri nižji hitrosti, sofisticirana produktivnost; vsi okronajo trorezilno turbino kot vodilno izvoznico zelene energije vetra.¹⁵

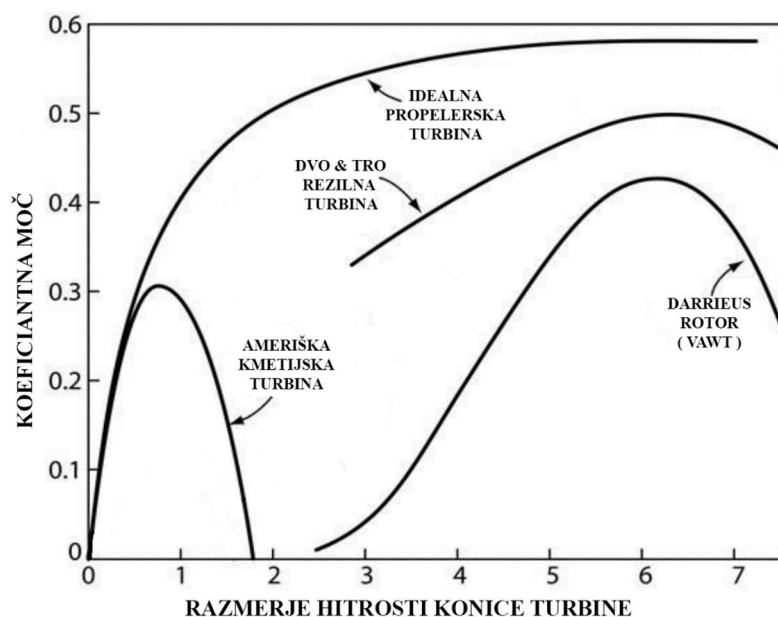
9.7 BETZOV LIMIT

Opazna rast moči motivira akademike k dodatni povečavi učinkovitosti turbine; a neglede na številne inovacije, vetrne turbine ne bodo nikoli izkoristile več kot 60 % energije vetra.

Pod domnevo idealnega laminarnega toka, neskončnega števila vetrovnih rezil in ničelne vlečne sile je nemški fizik in pionir vetrovne energije dr. Albert Betz objavil papir »Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren« (angl. Theoretical limit for best utilization of wind by wind motors). Betzova teorija zagovarja, da nobena aksialno horizontalna turbina ne bo izplenila več kot .593 oz. prikazano procentualno 59.3 % kinetične energije vetra.¹⁶

¹⁵ 10.2.6, Giorgio Simbolotti, Giancarlo Tosato, Wind Power, IEA-ETSAP & IRENA Technology Brief, E07, 2012

¹⁶ 10.1.12, Ranjbar M. H., Nasrazadani S. A., Kia H. Z., Gharali K., Reaching the betz limit experimentally and numerically, University of Tehran, 2019



10.2.29, Efektivnost vetrnih turbin, The Effect of the Number of Blades on the Efficiency of A Wind Turbine

(VIR: <https://iopscience.iop.org/>)

9.8 FREECAD

Fraza »Free« označuje program kot odprtokodni (angl. open source). Da se lahko programski projekt tako označi, mora imeti vso temeljno kodo objavljeno na spletu. Dostop do nje ni omejen, prenese jo lahko vsakdo in jo po želji tudi modificira.

Fraza »CAD« (angl. computer aided design) pomeni računalniško podprto oblikovanje. Kot ime zagovarja, da uporabnik s pomočjo računalnika ustvari 2 ali 3 dimenzionalne objekte.

Program FreeCAD je primarno namenjen strojništvu in njegovemu oblikovanju izdelkov, vendar se prilega tudi širšemu naboru rabe okoli inženirstva, arhitekture, analize elementov, 3D tiskanja in mnogim drugim vlogam. Projekt v prostem času vzdržuje skupnost prizadevnih razvijalcev in uporabnikov.

Posamezne elemente bi bilo prezahtevno sestaviti iz plastičnih mas in kartona. V takšnih primerih sva se poslužila 3D oblikovanja z osebnim računalnikom. Preprost koncept ali

zarisana skica se z lahkoto preoblikuje v pristni model, katerega ja možno natisniti s 3D tiskalnikom.

Oblikovanje s programom FreeCAD pa je zmeraj sledilo sledečemu orisu.

- Izris dvodimenzionalne oblike ter usklajeno omejevanje in fiksiranje s poljubnimi parametri,
- migracija in razširitev oblike oz. skice v trodimenzionalen model,
- nadaljnja obdelava telesa s kopico orodij,
- morebitni dodatek sekundarne skice in vnovično preoblikovanje telesa.¹⁷



10.2.30, FreeCAD logotip, FreeCAD

(VIR: <https://wiki.freecad.org/>)

9.9 SLICER

Preden lahko pričnemo s 3D tiskanjem, moramo zbrati potrebne »sestavine« programske opreme, ki bodo vodile postopek tiska od priprave modela do upravljanja tiskalnikov. Do sedaj smo že ustvarili prototip z zgoraj omenjeno aplikacijo, toda preden lahko to izvozimo v 3D printer, nas čaka pomemben korak »rezanje« (angl. slicing).

¹⁷ 10.1.13, FreeCAD skupnost, About FreeCAD

Rezalnik za 3D tiskanje, znan tudi kot programska oprema za rezanje ali program za pripravo na tiskanje - je računalniški program, ki pretvori trodimenzionalni model v jezik, ki ga 3D tiskalnik razume.

Aplikacija digitalno nareže model na ravne plasti in natančno določi traso potovanja, kateri sledi konica printerja ter sloje enega za drugim natisne. Izdelava s posamičnimi nanosi omogoča večjo fleksibilnost in ustvarjalnost pri procesu razvijanja.

Cura je odprtokodna 3D rezalna aplikacija za tiskalnike. Ohranja in vzdržuje jo ekipa zaposlenih pri podjetju Ultimaker, podjetje za proizvodnjo 3D tiskalnikov. To aplikacijo bova koristila tudi midva.¹⁸



10.2.31, Ultimaker Cura logotip, Ultimaker Cura 4.12.0\Cura.ico

(VIR: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>)

9.10 ANYCUBIC MEGA X

Podjetje Anycubic, ustanovljeno leta 2015, je postalo eno prepoznavnejših blagovnih znamk 3D tiskalnikov na trgu. Kot dobro znan izvajalec raziskav in razvoja tiskalnikov je podjetje vzpostavilo omrežje prodaje in trženja za stranke po celem svetu. Z naprednim prefinjenim

¹⁸ 10.1.14, Ultimaker javni uslužbenci, Ultimaker Cura

izdelkom in profesionalnimi storitvami izpopolnjuje zahteve inovativnega modeliranja in izboljšuje uporabniško izkušnjo.

Anycubic Mega X, eden od kar 20 raznolikih tiskalnikov, je zgrajen za velike volumne printa. S svojimi $300 \times 300 \times 305 \text{ mm}$, lahko natisne modele, ki jih številni drugi ne zmorejo. Je odlična izbira za začetnike in strokovnjake svojega področja, zato se ne ustrašite nadpovprečne velikosti. Ne le da ima obseg izdelave, tudi lastnosti, kot so natančnost in visoka kakovost, ta tiskalnik postavijo v ospredje konkurence.¹⁹



10.2.32 Anycubic logotip, Anycubic

(VIR: <https://www.anycubic.com/pages/about-anycubic>)

9.11 ARDUINO IDE

Odprtokodna programska oprema (angl. open source) Arduino IDE (angl. integrated development environment) olajša postopek pisanja programske kode in prenašanja le te na ploščico. Deluje kot osnovna beležnica, le da vsebuje raznovrstna orodja za estetsko oblikovanje, popravke sintakse in iskanje napak.²⁰

¹⁹ 10.1.15, Anycubic javni uslužbenci, About Anycubic Who are we?

²⁰ 10.1.10, Arduino skupnost, What is Arduino?

9.12 NAČRTOVANJE 3D TISKA

- »Quality« omogoča nastavitve debeline posamezne plasti (angl. layer) bodisi talne, stropne, stenske ali polnile. Majhna širina slojev dovede večjo naklonjenost detajlom, kar ne nudi dodatne vrednosti krilom. Cena preciznosti pa se seveda odraža v času, katerega nimava na pretek.
- »Walls« prilagajajo, tako kot ime pove, širino stene. Izberemo lahko razdaljo med zunanjo in notrajno ploščo ali natančneje število vertikalnih nanosov.
- »Top/Bottom« pa sorodno kot vrhnja nastavitve spreminja širino ploskve, le da se ta navezuje na podlago in povrhnjico.

Naj vas ime »majhna« prenosna vetrna elektrarna ne zavede. Četudi najin izdelek pade globoko v kategorijo majhne vetrne turbine, bo premer kril man kot 1m, kar je za amaterski projekt omembe vredno. Z večavo razdalje se masa in sile na vozlišča hitro nakopičijo. Močna konstrukcijska trdnost postaja pomembna spremenljivka v tem projektu. Ker večino navora prenašajo povrhnji oboki ali drugače rečeno zunanje plasti, bova vzdrževala čvrstost z debelino le teh.

- »Infill« določa procentualno vrednost zapolnjenosti v notranjosti modula. Nudi variabilnost različnih vzorcev polnitve, takšne za čvrstost in nosilnost ali elastičnost in pospešeno tiskanje. Zaradi pomanjkanja časa sva več energije usmerila v nizkokakovostne, a hitro sestavne prototipe.
- 3D tiskalnik najbolje tiska stojične modele; pri zapletenejših, v katerih se pričnejo pojavljati previsi in lokovi, pa modelarji niso zmožni izdelati tega brez »supporta«. V tem predelu sporočimo tiskalniku, kje želimo podporo, kakšen naj bo njen vzorec in gostota polnila. Čas se močno navezuje na količino tiska in mnogo opornih točk pri tem ne pomaga. Zgodilo se je, da smo zaradi nadležne količine, le te popolnoma spremenili način pristopa k tiskanju.
- Eden od pomembnejših faktorjev dodane trdnosti pa je tudi smer tiska. V primeru, da bi konica s polnilom zmeraj potekala od leve proti desni, bi artefakt vzdolžno ostal krepak, toda že majhna prečna sila bi privedla do zloma. Da se temu izognemo,

zagotovimo, da se vsaka plast natisne pod izmenjajočim se kotom 45° , s čimer zagotovimo maksimalno možno trpežnost.

To so bili glavni parametri, med katerimi smo iskali pravo ravnovesje in posledično dobili zanimive končne izdelke. Seveda pa to niso edine konfiguracije, s katerimi smo se »igrali«. V upanju optimizacije procesa smo testirali različne hitrosti konice tiskalnika in kvaliteto, preizkušali smo razne vzorce polnila ter trdnost izdelka, incilizacijske plasti, na katerih stoji tisk in nepremičnost objekta, da jih naštejemo le nekaj.

Do sedaj smo pretvorili datoteko in nativnega formata *FCStd* vsesplošno rabljeno *STL* obliko, katero lahko obdeluje vsak sodobnejši modelarski program. Preden pa prenesemo končni izdelek na tiskalnik, pa nas čaka še zadnja preobrazba in sicer v *G – code*

G – code je programski jezik numeričnega krmiljenja in je v uporabi zlasti v računalniško podprtem oblikovanju. Dokument je podan v obliki navodil, ki povedo motorjem, kam se pomakniti, kako hitro in kakšni poti pri tem slediti.

9.13 3D TISK

Po velikem naporu smo prišli do takšne adaptacije, da bi ji končno lahko rekli del vetrnice. Razrezano datoteko vnovično prenesemo, a tokrat na spominsko kartico (angl. Western Digital SanDisk *SDHC* memory card), jo vstavimo v tiskalnik in delo končano? Ne čisto.

Med potekajočim procesom se lahko stvari hitro zalomijo. Najpogostejši incidenti so zlomi filameta, trk robotske roke ob predmet, premaknitev objekta med obdelovanjem in povs materiala zaradi nezadostne podpore. Na žalost to težko preprečimo, lahko le ublažimo izgubo. Za artikel, ki se bo načrtno tiskal več dni, predhodno izvedemo testni polizdelek, da se prepričamo o pravilno nastavljenih merah in ustrezni arhitekturni togosti; namesto tiskanja večih segmentov hkrati se zaradi časovnih razlogov raje odločimo za natis le ene komponente. V primeru okvare bi tako izgubili le posamezni potencialni izdelek; primerno se informiramo glede izbranih parametrov ter njihovih vplivov in odnosov s preostalimi faktorji in seveda tudi

učinek na končni produkt. Preostane nam le, da aktivno spremljamo sam proces tiska, da ob nezgodi čim hitreje odpravimo napake.

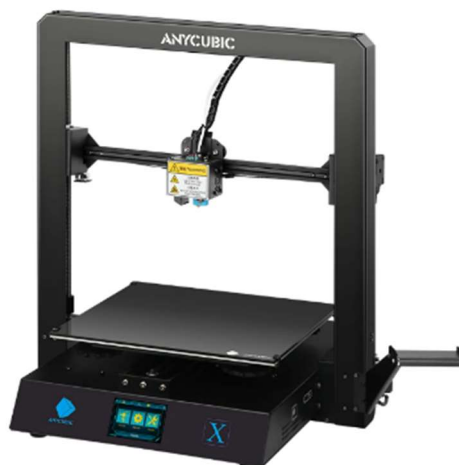


10.2.33, Ponesrečen primer tiska, Nik Žlebnik Jančič

(VIR: lasten)

V zgornji sliki lahko vidimo neuspeli poskus tiska. Zaradi premajhne vrednosti podpornega polnila se je višje ležeči sloj pričel pogrezati in gubati; potujočo robotsko roko je ob trčenju zamaknilo in povzročilo, da so se povrhnji sloji prestavili.

Spodaj pa je slika tiskalnika, ki smo ga uporabljali v času raziskave



10.2.34, Izgled 3D tiskalnika, Anycubic Mega X, Anycubic

(VIR: <https://www.anycubic.com/pages/about-anycubic>)

9.14 VAAVUD

O podjetju Vaavud, s sedežen na Danskem, ki izdelujejo takšne in podobne merilce ni znano veliko. Tudi na spletu nisva uspela poiskati podatkovnih listin o delovanju, parametrih in notranji zgradbi. Vendar smo s skupnim znanjem s področja elektrotehnike dognali, da hitrost vetra ustvarja različno frekvenco elektromagnetnega sevanja, ki ga izhodni in vhodni 3,5 mm zvokovni port zazna, bere in pretvori v berljive informacije na zaslonu telefona.

9.15 ROTACIJA NOSILNEGA STOLPA

Zopet je na pomoč priskočil mentor Peter Vrčkovnik z še enim merilcem vetra, a ta je nekoliko drugačen. Je produkt istega podjetja Vaavud, zato je z izgledom precej podoben. Vizualna razlika je edino v dodanih žepkih. Objektivnega opisa delovanja zopet ne poznamo. Lahko smo le presodili, da različna smer vetra z različno silo pritiska na zakrilca, posledično spremeni elektromagnetno polje, ki se ustvarja, katerega telefon preko 3,5 mm zvokonega porta sprejme in spremeni v podatke. Tako ima dvojno funkcijo; hkrati lahko meri hitrost in smer vetra. To bi

seveda bila optimalna rešitev, a je povzročala velike preglavice s svojim nezanesljivim delovanjem. Pogosto na zaslonu ni prikazovala ničesar ali pa je vprašljive izpise izrisala le za kratek čas.



10.2.35, Merilec hitrosti in smeri vetra, Vaavud Sleipnir smartphone wind meter, Nik Žlebnik Jančič

(VIR: lasten)

9.16 PROGRAMSKA KODA

```
#include <kywrd.h>
#include <cfg.h>
#include <Arduino.h>
#include <Servo.h>

Servo sg90 ;

byte i_arg [ SC ] = { 2 , 3 } ;
byte * plus = & i_arg [ Z ] ;
byte * minus = & i_arg [ ST ] ;

byte o_arg [ ST ] = { 4 } ;
byte * yaw = & o_arg [ Z ] ;

i i ( i_arg , sizeof ( i_arg ) , o_arg , sizeof ( o_arg ) ) ;

byte pos = Z ;

void setup ()
{
  i.i_p_cfg () ;

  sg90.attach ( * yaw ) ;

  Serial.begin ( 9600 ) ;
}

void loop ()
{
  if ( DR ( * plus ) )
    pos ++ ;

  else if ( DR ( * minus ) )
    pos -- ;

  sg90.write ( pos ) ;

  DLY ( 10 ) ;

  Serial.println ( pos ) ;
}
```


Zapisana koda, ki žene motorček, izkorišča določeno število knjižnic. Beseda knjižnica v programerskem žargonu izraža izrabo predhodno napisane datoteke; ta je lahko lastna ali od druge osebe. Trem od teh je avtor raziskovalec Filip Pačnik, preostala pa je od Arduino skupnosti. Možgani za projektom Arduino niso le razvili same ploščice in gonilnikov za programiranje, temveč številne skripte za elektronske komponente. Knjižnica »*Servo.h*« je ena takih in hkrati tista, ki jo napisana koda izkorišča. S tem se izognemo uram dodatnega kodiranja in prebiranja dokumentacijskih sredstev proizvajalcev servo motorjev.

10 VIRI IN LITERATURA

10.1 VIRI LITERATURE

1. [Adnan Z. Amin, A roadmap to 2050, International Renewable Energy Agency, 2018](#)
2. [Klaus J., Olindo I., Arno H. M. S., Renè A. C. M. M. van S., Miro Z., Solar Energy, Delft University of Technology, 2014](#)
3. [Wei Tong, Fundamentals of wind energy, Kollmorgen Corporation, 2010](#)
4. [Carlin P. W., Laxson A. S., Muljadi E. B., The History and State of the Art of Variable-Speed Wind turbine Technology, National Renewable Energy Laboratory, 2001](#)
5. [Probst O., Martínez J., Elizondo J., Monroy O., Small Wind Turbine Technology, Tecnológico de Monterrey, 2014](#)
6. [Giorgio Simbolotti, Giancarlo Tosato, Wind Power, IEA-ETSAP & IRENA Technology Brief E07, 2016](#)
7. [Peter J. Schubel, Richard J. Crossley, Wind Turbine Blade Design, University of Nottingham, 2012](#)
8. [Renken C., The Blade Design of Wind Energy Turbines, Engineering Communications](#)
9. [Rebecca Matulka, Matty Greene, How 3D Printers Work, Energy.gov, 2014](#)
10. [Arduino skupnost, What is Arduino?](#)
11. [Dan Ancona, Jim Mc Veigh, Wind Turbine - Materials and Manufacturing Fact Sheet, Princeton Energy Resources International, LLC, 2001](#)
12. [Ranjbar M. H., Nasrazadani S. A., Kia H. Z., Gharali K., Reaching the betz limit experimentally and numerically, University of Tehran, 2019](#)
13. [FreeCAD skupnost, About FreeCAD](#)
14. [Ultimaker javni uslužbenci, Ultimaker Cura](#)
15. [Anycubic javni uslužbenci, About Anycubic, Who are we?](#)

10.2 VIRI SLIKOVNEGA MATERIALA

1. [Odstotkovna proizvodnja električne energije po viru, International Energy Agency, 1990-2018](#)
2. [Odstotkovna proizvodnja električne energije po viru v Sloveniji, International Energy Agency, 1990-2020](#)
3. [International Renewable Energy Agency](#)
4. [Coriolisova sila, National Oceanic and Atmospheric Administration](#)
5. [Idealizirana atmosferska cirkulacija, Kollmorgen Corporation](#)
6. [Ancient Persian windmills, Mohammad Hossein Taghi](#)
7. [Namestitev prvih vetrnih elektrarn, U.S. Department of Energy](#)
8. [Rast zmogljivosti in premera rotorja vetrnih turbin, IEA & IRENA, 1985-2016](#)
9. Regijska klasifikacija vetrne turbine, Filip Pačnik
10. [Primeri temeljev vetrnih turbin na morju, Carbon Trust](#)

11. [Alternativni konfiguraciji orientacije gredi in rotorja, Multidisciplinary Digital Publishing Institute](#)
12. [Efektivnost vetrnih turbin, The Effect of the Number of Blades on the Efficiency of A Wind Turbine](#)
13. [vzorčen načrt rezila in klasifikacija regij, Wind Turbine Blade Design](#)
14. Dvižna in vlečna sila v aeroprofilu, Filip Pačnik
15. [FeeCAD logotip, FreeCAD](#)
16. [Ultimaker Cura logotip, Ultimaker Cura 4.12.0\Cura.ico](#)
17. [Anycubic logotip, Anycubic](#)
18. [Arduino plošča, Mega 2560 rev3, Arduino cc](#)
19. Fotografija avtorjev, profesor in mentor dipl. inž. elektrotehnike Peter Vrčkovnik
20. Izgled programa FreeCAD, verzija 0.19, Filip Pačnik
21. Izgled programa Ultimaker Cura, verzija 4.12.0, Filip Pačnik
22. Ponesrečen primer tiska, Nik Žlebnič Jančič
23. [Izgled 3D tiskalnika, Anycubic Mega X, Anycubic](#)
24. Vrtalnik za ustvarjanje merskih pogojev, Parkside *PBH 800 A1*, Nik Žlebnič Jančič
25. Merilec hitrosti vetra, Vaavud smartphone wind meter, Nik Žlebnič Jančič
26. Merilec vrtljajev, Digital laser tachometer *DT – 2234C+*, Nik Žlebnič Jančič
27. Merilca napetosti in toka, *UNI – T UT39C, EM391*, Nik Žlebnič Jančič
28. Merilec hitrosti in smeri vetra, Vaavud Sleipnir smartphone wind meter, Nik Žlebnič Jančič
29. Rotacijski mehanizem, Servo motor in arduino, Filip Pačnik

10.3 VIRI GRAFOV

1. Rezultati meritev primerka 2, Vrtljaji na minuto, Nik Žlebnič Jančič
2. Rezultati meritev primerka 2, Napetost na sponkah generatorja, Nik Žlebnič Jančič

10.4 VIRI TABEL

1. [Odvisnost komponente vetrne turbine od enote teže in cene, Wind Turbine - Materials and Manufacturing Fact Sheet](#)
2. Rezultati meritve primerka 1, Nik Žlebnič Jančič
3. Rezultati meritev modificiranega primerka 1, Nik Žlebnič Jančič
4. Rezultati meritev primerka 4, Nik Žlebnič Jančič

10.5 VIRI ENAČB

1. [Blade element momentum, BEM theory](#)