

„Mladi za napredek Maribora 2020“

37. srečanje

BIOMEHANIKA ČLOVEŠKE ČELJUSTI IN ZOB

Raziskovalno področje: Fizika

Raziskovalna naloga

Avtor: GAL ZAVRŠNIK

Mentor: MARKO JAGODIČ

Šola: II. GIMNAZIJA MARIBOR

Število točk: 158/ 170

Maribor, 2020

„Mladi za napredek Maribora 2020“

37. srečanje

BIOMEHANIKA ČLOVEŠKE ČELJUSTI IN ZOB

Raziskovalno področje: Fizika

Raziskovalna naloga

Maribor, 2020

Kazalo vsebine

Povzetek.....	7
Zahvala.....	8
1. Uvod.....	9
1.1 Raziskovalna vprašanja:	10
2. Teoretične osnove	11
2.1 Fizika človeške čeljusti in žvečenja:	11
2.2 Človeški zobje in čeljustni sklep	12
2.3 Človeški ugriz.....	13
2.4 Metode merjenja sile ugriza	14
3. Metode dela	15
3.1 Meritve sil na repliki čeljusti	17
3.2 Meritev sile maksimalnega ugriza.....	19
3.3 Metoda določitve realnih sil v mišicah.....	20
3.4 Metoda določitve sil na posamezne zobe in merjenje njihove površine	23
4. Analiza in rezultati	27
4.1 Merjenje razdalj na 3-D repliki čeljusti.....	27
4.2 Sile v mišicah v odvisnosti od sile bremena.....	28
4.3 Rezultati umerjanja merilnika sile.....	29
4.4 Rezultati meritev maksimalne sile ugriza.....	30
4.5 Rezultati meritev ročic sil na posamezne zobe.....	31
4.6 Izračun sil na zobe	31
4.7 Rezultati meritev površine zob	32
5. Diskusija.....	35
6. Družbena odgovornost.....	37
7. Literatura.....	38
8. Priloge.....	40
8.1 Koda za mikrokrmilnik na matični plošči (Arduino)	40

Kazalo slik

SLIKA 1: ŽVEKALNE MIŠICE	12
SLIKA 2: SKLEPNI DISK	13
SLIKA 3: FIZIKALNI MODEL Z OZNAČENIMI SILAMI IN RAZDALJAMI. PROGRAM, V KATEREM JE BILA SLIKA PRIPRAVLJENA NE OMOGOČA ZAPISA Z INDEKSOM, ZATO F1 POMENI F ₁ ITD.	17
SLIKA 4: MERITEV RAZDALJE MED DVEMA TOČKAMA S KLJUNASTIM MERILOM.....	18
SLIKA 5: (LEVO) REPLIKA ČLOVEŠKE ČELJUSTI V MERILNEM SISTEMU	19
SLIKA 6: (DESNO) MERILNIK SILE	19
SLIKA 7: REPLIKA S SILAMI V MERILNEM SISTEMU	20
SLIKA 8: ZGRADBA MERILNEGA LISTIČA	21
SLIKA 9: DEFORMACIJA MERILNEGA LISTIČA	21
SLIKA 10: OJAČEVALNIK	22
SLIKA 11: MERILNI SENZOR.....	22
SLIKA 12: MERILNI SENZOR V OHIŠJU	22
SLIKA 13: OHIŠJE ZA MERILNI SENZOR	22
SLIKA 14: REALNI MODEL ČLOVEŠKE SPODNJE ČELJUSTI Z DEFINIRANO RAZDALJO IN MERITVAMI.....	23
SLIKA 15: ANALIZA ZOB SPODNJE ČELJUSTI	25
SLIKA 16: ZOBJE V SPODNJEM ZOBNEM LOKU.....	25

Kazalo tabel

TABELA 1: VREDNOSTI R.....	27
TABELA 2: VREDNOSTI KOLIČINE d_1	27
TABELA 3: VREDNOSTI KOLIČINE d_2	27
TABELA 4: MERITEV K1 ZA SILO F1	28
TABELA 5: MERITEV K2 ZA SILO F2	29
TABELA 6: NAKLON PREMICE	29
TABELA 7: IZMERJENE VREDNOSTI MERILNIKA	30
TABELA 8: IZMERJENE RAZDALJE ROČIC R	31
TABELA 9: IZMERJENE SILE NA ZOBE.....	31
TABELA 10: IZMERJENE POVRŠINE ZOB LEVE STRANI SPODNJE ČELJUSTI	32
TABELA 11: IZMERJENE POVRŠINE DESNE LEVE STRANI SPODNJE ČELJUSTI.....	32
TABELA 12: IZMERJENE POVPREČNE POVRŠINE ZOB LEVE IN DESNE STRANI SPODNJE ČELJUSTI.....	32
TABELA 13: VREDNOSTI NAPETOSTI NA ZOBE.....	34

Kazalo grafov

GRAF 1: GRAF ODVISNOSTI SIL V MIŠICAH OD SILE BREMENA	28
GRAF 2 UMERITVENA KRIVULJA MERILNIKA SILE UGRIZA.....	29
GRAF 3: SILA NA ZOB V ODVISNOSTI OD POVRŠINE ZOBA.....	33
GRAF 4 NAPETOST V ODVISNOSTI OD POLOŽAJA ZOBA	34

Povzetek

V raziskovalni nalogi smo ugotavljali fizikalno delovanje človeške čeljusti in zob.

Na osnovi tridimenzionalnega modela človeške čeljusti v naravni velikosti, ki smo ga skenirali in natisnili v šoli, smo postavili osnovne teze mehanike čeljusti in mišic, ki sodelujejo ob ugrizu. Natisnjen model smo uporabili kot nadomestek človeške čeljusti. Na podlagi slednjega smo oblikovali koncept merjenja moči človeškega ugriza, ki smo ga izvedli tudi v praksi. Izdelali smo aparaturo, s katero smo merili sile pri ugrizu. Dobljene podatke smo analizirali in jih uporabili v izračunu realnih sil v mišicah pri ugrizu, ki ji ni bilo mogoče neposredno izmeriti. Proučevali smo prenos sil med maksimalnim ugrizom na vsakega izmed zob. Eno izmed raziskovalnih vprašanj je bilo tudi, kakšna je zveza med silo na posamezni zob in njegovo površino. Vse ugotovitve in rezultate smo kritično ovrednotili.

Zahvala

Iskreno se zahvaljujem mentorju za vso pomoč, vloženo delo in trud. Prav tako bi se rad zahvalil šoli, za posojene rekvizite in svojim staršem za pomoč pri izvedbi merilnega sistema.

1. Uvod

Brez premikov čeljusti si življenje le težko predstavljamo. Čeljust premikamo pravzaprav neprestano. Med govorom, smehom, zehanjem, prehranjevanjem, ... Lahko bi rekli, da nam premiki čeljusti omogočajo normalno življenje. So ključni za opravljanje ene izmed osnovnih fizioloških funkcij človeka, torej za prehranjevanje. Ljudje z zobmi hrano po navadi zmeljemo na velikost nekaj kubičnih milimetrov, preden jo pogoltnemo, vendar je velikost odvisna od narave hrane, osebnih navad in zgodnjega treninga. Prevelika količina žvečenja slabo vpliva na prebavo, prav tako lahko neustrezno drobljenje mesnih in rastlinskih vlaknin upočasni prebavo. Prav žvečenje ima pri tem odločilno vlogo. Vsi smo verjetno že slišali za zlata pravila prehranjevanja. Da moramo hrano prežvečiti vsaj dvajsetkrat, preden jo pogoltnemo, da jemo počasi, saj s tem hrano dobro zmeljemo, pri tem smo bolj sproščeni, naši možgani pa prejmejo informacijo, da smo bolj siti. Če jemo prehitro, s hrano pogoltnemo tudi veliko zraka, kar lahko povzroči neprijetnosti pri prebavi. Vse to je seveda odvisno od vrste hrane, ki jo zaužijemo. Podobni nasveti nas pravzaprav spremljajo že od ranega otroštva. So površinski in ne pokažejo neke globlje slike o tem, kako res žvečimo. Večina nas niti ne pomisli česa vsega je zmožno naše telo. Ste se morda kdaj vprašali, kaj sploh vsebuje človeški žvečilni sistem in kako deluje? Ali pa na primer, kako močno lahko ugriznemo ali kolikšna sila deluje v posameznih mišicah pri žvečenju? Morda zakaj so naši zobje razporejeni v zobnem loku tako kot so in zakaj so nekateri zobje večji od drugih. Na vse to in še več sem pomislil sam, ko so me aprilskega popoldanskega dne osvobodili življenja z zobnim aparatom in sem lahko prvič po dolgem času brez težav spet ugriznil v jabolko. Ker mi prvi zadetki na spletu in literatura v knjižnici niso dali pravih odgovorov, sem se odločil, da žvečenje podrobneje spoznam in ga raziščem tudi sam. Mnogi zobozdravniki in raziskovalci so že raziskovali človeško čeljust kot tako. Klineberg in Eckert [1] v raziskavi potrjujeta, da so premiki spodnje čeljusti zaradi svojih specifični lastnosti in sposobnosti zelo kompleksni. Prav mišice žvekalke, ki povzročajo premike, so vzrok za takšno zapletenost. Premike mišic žvekalke so analizirali na osnovi robotskega mehanskega modela, s katerim so uprizorili človeško žvečenje.

Med drugi so ugotovili, da se sposobnost žvečenja močno razlikuje glede anatomsko zgradbo posameznika. [2]

V raziskovalni nalogi se vprašanja o delovanju človeškega žvekalnega sistema lotevamo z različnimi modelirnimi metodami, fizikalnimi in mehanskimi meritvami in kvantitativnimi analizami. Raziskujemo, kakšna sila deluje pri človeškem ugrizu in kakšno breme nosijo posamezne mišice pri žvečenju.

Ker smo zmožni nadzirati moč ugriza nas natančneje zanima, kolikšna je sila pri maksimalnem ugrizu. Zanima nas, kakšna je povezava med silo na zob in površino zoba. V ta namen smo si v raziskovalni nalogi zastavili par ključnih vprašanj o delovanju človeškega žvekalnega sistema.

1.1 Raziskovalna vprašanja:

1. Kolikšne so sile v ključnih mišicah med maksimalnim ugrizom?
2. Kolikšne so sile na posamezne zobe med maksimalnim ugrizom in kakšna je zveza med silo na zob in njegovo površino?

V raziskovalni nalogi poskušamo čim boljše odgovoriti na obe raziskovalni vprašanji. Vse neznanke in raziskovalna vprašanja bomo obravnavali s fizikalnega vidika. V teoretičnem delu naloge predstavljamo osnove žvečenja kot mehanskega delovanja. Raziskovanje praktično temelji na specifičnih merilnih modelih s posebnimi merilnimi metodami, brez katerih kompleksnosti procesa človeškega žvečenja ne bi bilo mogoče poenostaviti. Metode merjenj so podrobneje opisane v teoretičnem delu naloge.

V praktičnem delu naloge se osredotočimo na načrtovanje smiselnih merilnih modelov za merjenje sile. S pomočjo modelov določimo sile pri normalnem človeškem ugrizu. Vsi rezultati meritev so podani v ločenem poglavju. V zaključnem delu naloge skupaj z analizo rezultatov opišemo možne izboljšave in razširitve naše raziskave.

2. Teoretične osnove

V teoretičnem delu raziskovalne naloge si bomo ogledali najpomembnejše osnove žvečenja kot fizikalnega pojava in same zobe v človeškem žvečnem aparatu. Ko žvečimo, premikamo spodnjo čeljusti navzgor in navzdol, pri čemer s stikom spodnjih in zgornjih zob drobimo trdne delce hrane. S premiki čeljusti se prehranjujemo, lažje govorno sporazumevamo, zehamo. Pomembno je, da poznamo fiziko človeške čeljusti, saj lahko le tako razumemo žvečenje in govorjenje kot naravni pojav, ki pomembno kroji naše vsakdanje življenje. Delovanje naše čeljusti oz. mišic mastike ter prenos sile pri žvečenju se je fiziološko in anatomsko evolucijsko zelo prilagodilo na razmere v katerih smo oz. živimo.

Poznavanje osnov premikanja čeljusti kot mehanskega delovanja in povezave fizikalnih zakonitosti sil z anatomijo in fiziologijo mišic je ključna in predstavlja osnovo vsakršnega raziskovanja delovanja mišic pri premiku spodnje čeljusti.

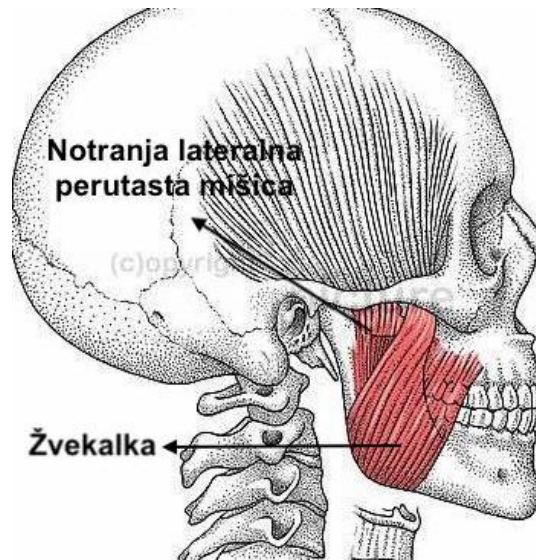
2.1 Fizika človeške čeljusti in žvečenja:

Ko govorimo o fiziki, ki se ukvarja z žvečenjem, je pomembno, da najprej razumemo, kako deluje naša spodnja čeljust, imenovana tudi mandibula. Ko razmišljamo o fiziki naše čeljusti lahko pomislimo na vzvod, saj ta deluje zelo podobno. Ko žvečimo hrano ali celo samo odpiramo in zapiramo usta, ko govorimo, se premika le naša spodnja čeljust. Zgornja čeljust je fiksna in je pritrjena na preostalem delu lobanje. Zato naša spodnja čeljust deluje kot nekakšen vzvod. V nadaljevanju si bomo ogledali, kaj povzroča premikanje spodnje čeljusti in katere so ključne zveze med gibanjem in silo, ki se sprosti med premiki te. [3]

Če želimo razumeti mehansko delovanje žvečenja, oz. premike spodnje čeljusti, moramo najprej poznati, kaj te premike povzroča. Čeljust deluje tako, da se gibljiva spodnja čeljustnica (mandibula) premika proti zgornji (maxilla), ki je fiksna. Gibe omogoča čeljustni ali tečajast sklep, ki ima gladko površino. [4] Za človeški ugriz je potrebno krčenje več kot 40 človeških čeljustnih mišic, pri čemer imajo večjo vlogo le štiri, ki spodnjo čeljustnico premikajo navzgor, naprej in vstran. Mi se osredotočamo le na dve, ki sta nujni za neposreden človeški ugriz. [5]

Žvekalka ali masetrna mišica poteka iz ličnega mostička na vogal spodnje čeljustnice, pod kotom približno 42° . [6] Njena glavna vloga je dviganje spodnje čeljusti in izvajanje bočnih gibov. Druga pomembna mišica je notranja lateralna perutasta mišica, ki poteka z lobanjske baze, predvsem z zagozdnice in se pripne na spodnjo čeljustnico, ki jo vleče naprej in navzgor, pod kotom približno 70° . [7]

Senčna mišica, ki poteka s senčnice na sprednji koničasti odrastek spodnje čeljustnice in jo poteza navzgor, navzdol in navzad v raziskovanje ne vključujemo¹, saj ta velike napore dosega v sodelovanju z drugimi mišicami in je kot samostojno ne moremo izmeriti. [8]



Slika 1: Žvekalne mišice

2.2 Človeški zobje in čeljustni sklep

Človeški zob v ožjem pomenu besede pomeni del zoba, ki ga vidimo v ustih in ga imenujemo zobna krona, in tisti del zoba, ki je skrit pod dlesnijo v zobni kosti in ga imenujemo zobna korenina. Zobe sestavljajo trdna zobna tkiva.

Zobje so v zobno vrsto postavljeni tako, da se z zobnimi kronami dotikajo in tvorijo neprekinjen zobni lok, ki omogoča normalno delovanje žvečnega sistema, kamor poleg zob v obeh zobnih lokih prištevamo še žvečne mišice, jezik, žleze slinavke in čeljustni sklep.

Človeški zobje so različno oblikovani. Spredaj so v zobnem loku sekalci, ki imajo obliko dleta in so namenjeni za sekanje hrane. Po vrsti jim sledita podočnika, s katerima hrano trgamo, nato po dva ličnika in po trije kočniki, ki imajo velike površine grizne ploskve in so namenjeni žvečenju in drobljenju hrane. Tretji kočnik imenujemo tudi modrostni zob, zraste pa le nekaterim. Velikost in položaj zob se razlikuje glede na njihovo funkcijo pri žvečenju. Sekalci na primer pomagajo pri drobljenju hrane, z ličniki hrano pregriznemo, medtem ko so kočniki

¹ Prvotno je bila, vendar so meritve in informacije iz literature pokazale, da ta sila bistveno ne vpliva. Zaradi enostavnosti sta v nadaljevanju obravnavani le dve sili.

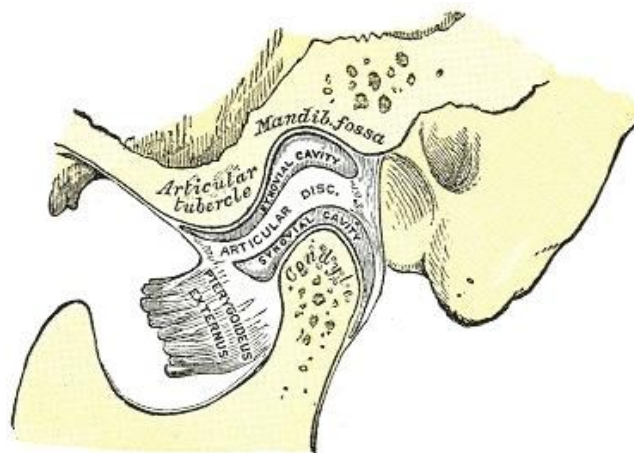
namenjeni za mletje čvrste hrane. Pri žvečenju so izpostavljeni največjim pritiskom, zato imajo največjo zobno krono in so pričvrščeni z več razvejanimi dolgimi koreninami. [9]

Čeljustni sklep je najbolj kompleksen sklep v človeškem telesu.

Čeljustni sklep sestavljata spodnja in zgornja čeljustnica. Na lobanjo jo vežejo mišice, kite in vezi, sestavlja pa jo poseben del imenovan kondil z okroglo glavico, ki je del čeljustnega sklepa. Med kondilom in zgornjo čeljustnico se nahaja hrustančni sklepni disk.

Čeljustni sklep deluje na dva načina. Spodnja čeljust se lahko odpira in zapira kot tečaj, to se dogaja med govorom in žvečenjem. Drugi način pa je translacijski gib, pri drsenju spodnje čeljusti naprej in navzdol, pri čemer se usta na široko odpro.

Sklepni disk med seboj loči dve kostni površini. Sklepna glavica kondila tako gladko drsi po sklepni površini in ne povzroča bolečine. [10]



Slika 2: Sklepni disk

Čeljustni sklep premika ogromno število mišic, ki so pripete na obrazu, lobanji in vratu, ki hkrati delujejo in premikajo spodnjo čeljust. Premiki čeljustnega sklepa nam omogočajo lažje govorjenje in prehranjevanje. Mišice, ki sodelujejo v povezavi s čeljustnim sklepom oziroma žvekalne mišice so ene najmočnejših mišic v telesu, posebno glede na njihovo velikost. [1]

2.3 Človeški ugriz

Človeški ugriz je ključen člen v verigi opravljanja osnovnih človeških funkcij. Ena izmed njih je tudi žvečenje snovi, ki ga lahko opišemo z dvema osnovnima gibljema čeljusti. S stiskanjem in mletjem. Stiskanje je sestavljeno iz zaporednega dviga in depresije čeljusti, pri čemer delujejo različne mišice. Največjo vlogo ima mišica žvekalka. Drugo gibanje imenujemo mletje. Vključuje skoraj vse čeljustne mišice, gibanje pa sledi krogu v vodoravni ravnini. [12]

Sile v mišicah se razlikujejo glede na vrsto hrane, ki jo žvečimo. Pri žvečenju živil, kot so piškoti, korenje in kuhano meso, se te sile po podatkih gibljejo med 70 N in 150 N. [13]

Obseg žvečilne sile je pokazatelj funkcionalnega stanja sistema žvečenja. Učinkovitost žvečenja je odvisna od številnih dejavnikov. Vzrok za slab človeški ugriz so večinoma parodontalne bolezni, zobne anomalije in splošno slabo stanje telesa. Žvečilno silo lahko določimo na dva načina. Neposredno, z vstavitvijo primerne orodja za prenos tovora med oba zoba ali posredno z uporabo fizioloških spremenljivk, povezanih z žvečenjem.

V raziskavi Amida in Ebrahima [14] so z merilniki sile ugotovili, da obstajajo velike razlike v silah žvečenja med spoloma. Rezultati te raziskave nakazujejo, da so sile pri žvečenju bistveno večje pri moških, kot pri ženskah. To pripisujejo anatomskim razlikam med spoloma, torej različni obliki čeljusti in velikosti zob, kar naj bi bila posledica postopnega evlucijskega razvoja. Prav tako so ugotovili, da se žvečna sila razlikuje od položaja žvečenja. Največja sila je bila izmerjena na zadnjem delu čeljustnega zobnega loka. Potrdili so, da obstaja povezava med žvečno silo in kotom čeljusti. Navajajo tudi, da imajo posamezniki z dolgim obrazom manjši oprijem pri stisku s hrano in posledično manjšo silo ugriza.

2.4 Metode merjenja sile ugriza

Metoda gnatodinometrije

Borelli je v eksperimentalni študiji leta 1681 oblikoval gnatodinometer, merilnik sile ugriza, ki spada v neposredni način merjenja. Meritve omogoča primerno orodje za prenos tovora med oba zoba, nek standardni senzor, ki je občutljiv na pritisk. Silo izmerimo z napravo imenovano gnatodinometer [15]. Metoda gnatodinometrije deluje na enakem principu kot naša metoda merjenja sil z merilnim modelom.

Prvi prototip so s tehnološkim razvojem zamenjali z elektronskim gnatodinometrom. Osnovni del merilnika sestavlja elastični element, nameščen med zobe, ki se pri ugrizu deformira, kar vodi do spremembe električnega upora. Rezultat spremembe upora se nato prikaže na LCD zaslonu, v newtonih. [16]

3. Metode dela

Za realizacijo eksperimentov in na splošno za delo smo uporabili različne materiale in pripomočke, računalniške programe in merilnike.

- 3-D skenirnik
- 3-D printer
- Računalnik
- Računalniška programa Logger Pro in Graphical Analysis
- Računalniški program Image J
- Šolski digitalni merilniki sil (Vernier GDX-FOR)
- Kljunasto merilo (± 0.01 mm)
- Stativni material
- Računalniški program SketchUp
- Mikrokrmilnik na matični plošči (Arduino)
- Računalniški program Arduino
- Merilni senzor
- Ojačevalnik
- Ohišje za merilni senzor
- Vsa mala oprema za vzpostavitev vezja

Neposredna meritev sil v mišicah ni možna. Prav tako sil v mišicah ni možno izračunati zgolj iz pogoja za ravnovesje navorov na spodnjo čeljust. Poznati bi morali velikosti in smeri delovanja sil v čeljustnem sklepu. Raziskovanje smo zato razdelili na več sklopov:

1. V prvem eksperimentu smo na realnem modelu čeljusti izmerili velikost sil v mišicah v odvisnosti od sile bremena na sprednje zobe. Pri tem smo upoštevali pravilne kote, pod katerimi delujejo sile. Upoštevali smo delovanje dveh ključnih sil. Masetrne mišice in notranje lateralne perutaste mišice.
2. Ker se koti s povečevanjem sile ne spreminjajo bistveno, smo pričakovali linearno odvisnost med silami v mišicah in silo bremena.
3. V drugem eksperimentu smo izmerili silo pri maksimalnem ugrizu s sprednjimi zobmi.

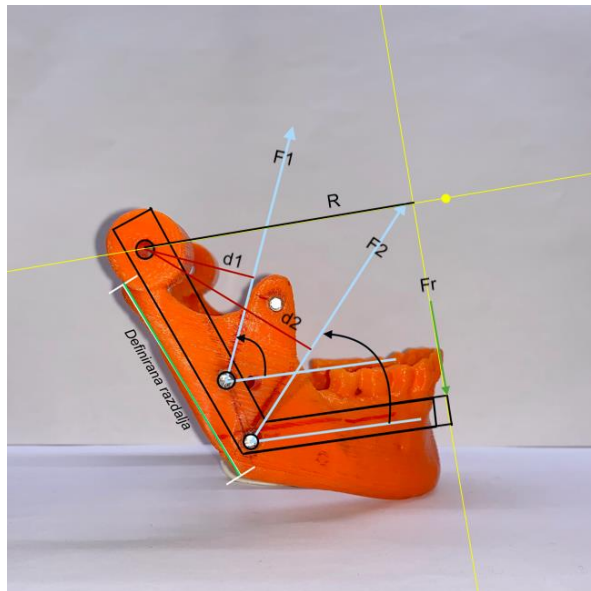
4. Podatke pridobljene pri merjenju odvisnosti sil v mišicah od sile bremena smo ekstrapolirali do izmerjene maksimalne sile ugriza in s tem določili sile v mišicah pri maksimalnem ugrizu. Tako smo odgovorili na **prvo raziskovalno vprašanje**.
5. Iz pogoja za ravnovesje navorov na spodnjo čeljust, smo lahko izračunali sile na posamezni zob.
6. Izmerili smo površino vrha krone vsakega zoba in raziskali odvisnost sile na zob od njegove površin, s čimer smo odgovorili na **drugo raziskovalno vprašanje**.

Pri eksperimentu smo uporabljali brezžične digitalne silomere, ki so z računalnikom komunicirali preko povezave Bluetooth. Podatke smo zajeli s programom Graphical Analysis, obdelali pa smo jih v programu Logger Pro. Meritve razdalj na čeljusti in zobeh smo izvedli v programih Logger Pro in ImageJ.

3.1 Meritve sil na repliki čeljusti

Z minimalnim fizikalnim modelom smo opisali delovanje mišic. Čeljust smo obravnavali kot vzvod, na katerega delujejo le tri sile. Koti pod katerimi delujejo sile smo določili na osnovi anatomije glave. Fizikalni model smo preverili tudi eksperimentalno in sicer z izdelavo replike čeljusti, ki smo jo skenirali s 3D skenerjem in nato natisnili s 3D printerjem v šoli. Vrtljiva je bila okoli iste osi, kot je prava čeljust. Ključni mišici pa smo nadomestili s silomeroma.

Na (Slika 3) je prikazana replika čeljusti. S črno je narisano poenostavljen fizikalni model z vrtilščem in dvema silama na ročico (mišicama). Fotografiji smo v računalniškem programu Logger Pro dodali merilo. Definirali smo najdaljšo nepopačeno razdaljo na fotografiji, ki smo jo predhodno na realnem 3-D modelu tudi izmerili.



Slika 3: Fizikalni model z označenimi silami in razdaljami. Program, v katerem je bila slika pripravljena ne omogoča zapisa z indeksom, zato F_1 pomeni F_1 itd.

Če želimo določiti sili, moramo poznati pravokotne razdalje sil od vrtilšča čeljusti, ki jim pravimo ročice. Na (Slika 3) so označene kot R , d_1 in d_2 . Razdalje smo izmerili na podlagi slikovne analize naše skice v računalniškem programu Logger Pro. Razdalja, ki smo jo uporabili kot merilo je razdalja od vrtilnega sklepa spodnje čeljusti do zadka spodnje čeljusti (na sliki označena kot »Definirana razdalja«). Fotografijo smo zajeli s telefonom v kar se da dobri ločljivosti. Izmerjene razdalje so prikazane v (Tabela 1, Tabela 2 in Tabela 3).



Slika 4: Meritev razdalje med dvema točkama s kljunastim merilom.

Repliko smo fotografirali tako, da so bile vse izmerjene razdalje približno v navpični ravnini. Pri uvažanju slike v računalniške programe, smo pazili da ni prišlo do popačenja slike. Na podlagi preprostega minimalnega fizikalnega modela smo izpeljali sistem enačb za navor. Navor je fizikalna količina, ki je enaka produktu sile in razdalji premice sile od osi. Predstavlja vektor, ki ima svojo velikost in smer. Usmerjen je proti vektorskemu produktu sile in ročice. Dogovorjena oznaka za navor je M . [17]

V primeru, da imamo sistem večih sil, velja pravilo, da je telo v ravnovesju, če je vsota vseh navorov enaka 0. Sile smo na sliki označili kot F_{max} , F_1 in F_2 .

$$\sum M = 0 \quad (1)$$

$$M = F \cdot r$$

$$M_1 = F_1 \cdot d_1$$

$$M_2 = F_2 \cdot d_2$$

$$M_{max} = F_{max} \cdot R \quad (2)$$

$$F_{max} = \frac{(F_1 \cdot d_1) + (F_2 \cdot d_2)}{R} \quad (3)$$

3-D skeniranje in 3-D tisk sta nam omogočila, da smo natisnili kopijo modela človeške čeljusti v naravni velikosti. Da bi lahko najboljše razumeli obnašanje sil (mišic) pri žvečenju smo izdelali merilni model za merjenje sil v mišicah pri žvečenju oziroma grizenju. Sam merilni model in postopek izdelave in merjenja z merilnim modelom sta opisana v nadaljevanju.

3.2 Meritev sile maksimalnega ugriza

Izdelava merilnik za merjenje sil na repliki čeljusti je nujno potrebna za odgovor na naše prvo raziskovalno vprašanje – kakšne so sile v mišicah pri ugrizu. Z eksperimentom na repliki smo izmerili odvisnost sil v mišicah od sile obremenitve. Smerni koeficient k je ključnega pomena za izračun realnih sil v mišicah pri žvečenju. Na tržišču obstajajo številni merilniki sile vendar z vsemi ne moremo imeriti sile pri ugrizu. V ta namen smo izdelali poseben merilni sistem, ki nam omogoča, da izmerimo sile v posameznih mišicah, ki bistveno vplivajo na žvečenje.

Na 3-D natisnjeni repliki čeljusti smo označili točke, kjer se glavne žvekalne mišice pritrjajo na spodnjo čeljust in na označenih točkah zvrtili luknjo na obeh straneh. Skoznjo smo napeljali kovinsko palico, ki služi kot oprijemališče za silomere. Repliko človeške čeljusti smo pritrdili na kovinske nosilce v ravnovesno lego, ki se ujema z lego zaprte čeljusti pri človeku. V točki vrtilišča je bila prosto vrtljiva. Na kovinske palice smo privezali toge vrvice, kot človeške žvekalne mišice. Kote smo določili na podlagi poteka mišičnih vlaken in pritrdišča mišice na spodnjo čeljust, v ravnovesni legi. Na drug konec togih vrvic smo z nosilci pritrdili elektronska merilnika sile, ki smo jih z bluetoothom povezali z računalnikom. Meritve smo opravljali v programu »Graphical Analysis«. (Slika 5, Slika 6, Slika 7) prikazujejo posamezne komponente merilnega sistema za merjenje sil v mišicah.



Slika 5: (levo) Replika človeške čeljusti v merilnem sistemu.

Slika 6: (desno) Merilnik sile.



Slika 7: Replika s silami² v merilnem sistemu.

Pred začetkom merjenja smo poskrbeli, da so bile toge vrvice napete. Nato smo merilnike postavili na 0 N. S tem smo zagotovili, da smo izmerili prave sile. Na sprednji del spodnje čeljusti smo počasi pritiskali z elektronskim merilnikom sile, ki nam natančno izmeri silo bremena. Pri tem smo pazili, da čeljusti nismo premaknili navzdol za več kot nekaj milimetrov, zato da se koti med meritvijo bistveno ne spremenijo.

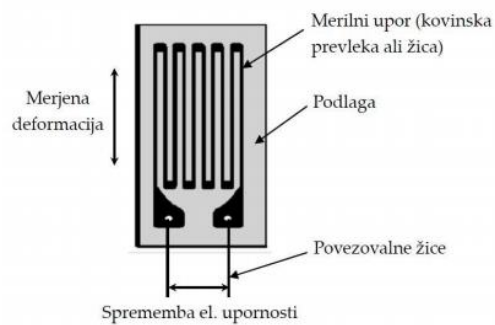
V programu Graphical Analysis, s katerim smo zajemali podatke, so se sočasno izrisovale časovne odvisnosti vseh treh sil. Izrisali smo odvisnost sil v mišicah od sile bremena (Graf 1). Zaradi linearnih odvisnosti smo lahko določili smerni koeficient premic, ki se je izmerkom najboljše prilegal. Meritve so prikazane v (Tabela 4 in Tabela 5).

3.3 Metoda določitve realnih sil v mišicah

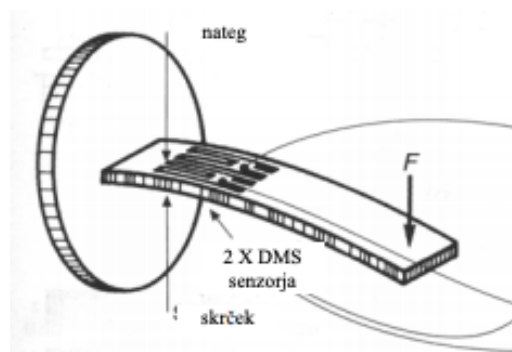
Za izračun sile obremenitve - F_{max} smo si morali zamisliti in izdelati povsem nov merilni sistem. Šele, ko bomo imeli podatek o maksimalni sili človeškega žvečilnega sistema, bomo lahko izračunali kolikšne so sile v posameznih mišicah pri žvečenju. Občutek ob ugrizu v neko snov ne omogoča neposredne ocene moči ugriza pri človeku. Kljub velikem izboru merilnikov na tržišču, smo si morali za naš problem zamisliti in sestaviti povsem nov merilnik, ki bo služil točno določenemu namenu. Merilnik, ki smo ga izdelali deluje podobno, kot deluje ročna digitalna tehtnica (predstavljena v teoretičnih osnovah). Nov merilnik nam omogoča, da izmerimo maksimalno silo človeškega ugriza. Temelji na repliki čeljusti. Za računalniški

² Na sliki je še tretji silomer (glej skrajno levo). Simuliral, je silo senčne mišice. Izkazalo se je, da je zelo majhna (Graf 1: Graf odvisnosti sil v mišicah od sile bremena. in zato ni vključena v model in obravnavo.

program Arduino smo napisali kodo, ki temelji na delovanju merilnih lističev. S prvimi meritvami smo opazili, da so izmerjeni podatki ponovljivi, nakar smo merilni model umerili. Raztezni merilnik, imenovan tudi merilni listič je eden najpomembnejših senzorjev električne merilne tehnike, ki se uporablja za merjenje mehanskih količin [18]. Kot že samo ime pove, se uporabljajo za merjenje napora oziroma raztezka. Merimo relativne deformacije, pri katerih se spremeni električna upornost. Merilne lističe ali DMS senzorje, kar se da tesno prilepimo na nosilec, tako da je njegova relativna deformacija enaka relativni deformaciji merilnega lističa [19]. Slika 8 prikazuje zgradbo merilnega lističa, Slika 9 pa deformacijo merilnega lističa. [20]



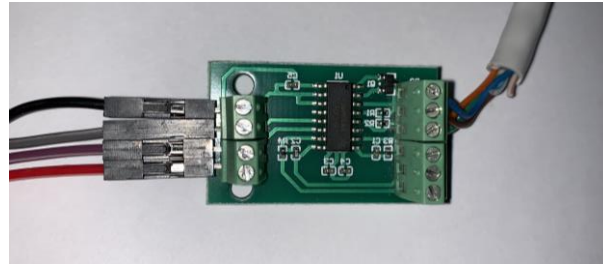
Slika 8: Zgradba merilnega lističa.



Slika 9: Deformacija merilnega lističa.



Slika 11: Merilni senzor.



Slika 10: Ojačevalnik.



Slika 13: Ohišje za merilni senzor.



Slika 12: Merilni senzor v ohišju.

Da bi bili izmerjeni podatki realni, smo morali naš merilni model umeriti. To smo opravili z več merjenji, pri čemer smo na merilni model z drugim umerjenim merilnikom sile enakomerno pritiskali, do njegove maksimalne izmeritve, nato pa pritisk popuščali dokler ni pokazal 0 N. V tem razponu smo opravili 10 meritev. Za vsako meritev smo zapisali vrednost na elektronskem merilniku sile in pri tej vrednosti odčitali podatek o sili, na merilni model, ki se nam je izpisal na zaslon računalnika. Merjenje smo ponovili vsaj trikrat. Rezultate smo prepisali v razpredelnico programa Logger Pro in izrisali graf sile umerjenega merilnika v odvisnosti od podatka, ki se nam je izpisal na našem merilnem modelu, ki je brez enote. V okviru napak je bil graf linearen, zato smo lahko določili naklon premice in naš merilnik umerili s pomočjo enačbe:

$$F_{max} = k \cdot M \quad (4)$$

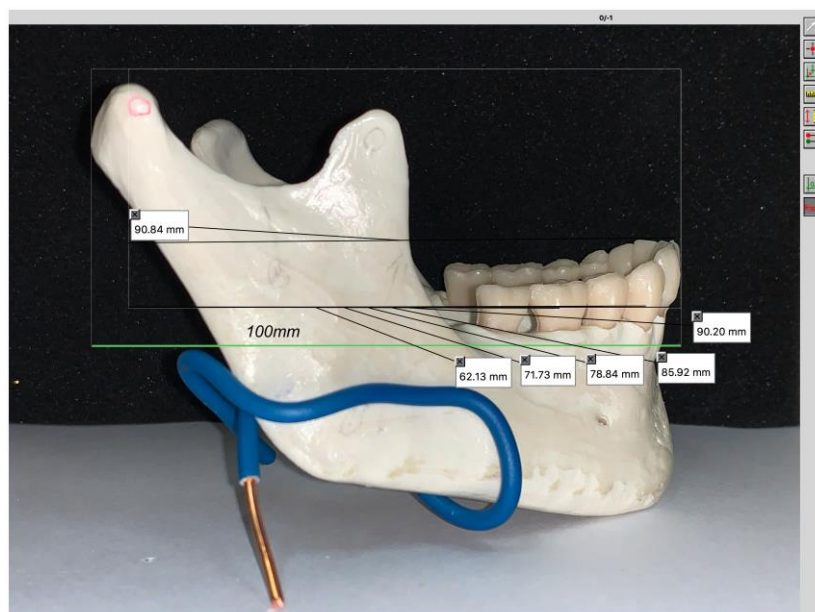
Zaradi čim natančnejših meritev smo F_{max} izmerili kar takoj po umeritvi merilnika. V merilnik sem grizel jaz, kar pomeni, da so rezultati meritev posledica lastne biološko-fizikalne sposobnosti žvekalnega sistema. Ko sem ugriznil v merilni model, se je na ekranu izpisala neka vrednost, ki smo jo nato enačbo (4) pretvorili v realno silo človeškega ugriza.

Maksimalno silo ugriza smo izmerili na koncu zob, na sekalcih. Meritev smo ponovili le petkrat, da pri ugrizu ne bi prišlo do kakšnih nezaželenih učinkov oziroma celo zloma katerega izmed zob. Po koncu merjenj smo izračunali povprečno realno maksimalno silo ugriza, ki je predstavljena v poglavju (4.2)

3.4 Metoda določitve sil na posamezne zobe in merjenje njihove površine

Iz poenostavljenega fizikalnega modela, ki smo ga opisali v poglavju (3.2) smo določili silo na posamezen zob pri maksimalnem ugrizu iz enačbe (3), pri čemer smo izmerili razdaljo r za posamezen zob. Tako smo lahko določili F , saj $(F_1 \cdot d_1) + (F_2 \cdot d_2)$ pri maksimalnem ugrizu poznamo. Zanima nas zanima, kolikšna sila bi delovala na posamezni zob, če bi z njim nekaj ugriznili, sila v mišičih pa bila maksimalna. Raziskujemo, ali prav ta vpliva na obliko in razporeditev zob v človeškem žvekalnem sistemu. Poglobimo se tudi v povezavo med silo na zob in njegovo površino. V nadaljevanju bo predstavljen minimalen merilni model in postopek meritev.

Za izračun sile, ki deluje na vsakega izmed zob, smo morali najprej izmeriti razdaljo ročice sile od vrtilišča čeljusti do določenega zoba v spodnji čeljusti. Zaradi natančnosti smo meritve opravljali na realnem modelu čeljusti in ne na njegovi 3-D repliki. Meritve smo opravili v računalniškem programu Logger Pro za analizo slike, ki smo jo prej umerili na podlagi izmerjene razdalje na realnem modelu čeljusti. Razdalje smo izmerili trikrat in sicer po enakem vzoru kot so prikazane na (Slika 14). Da bi prišlo do čim manjših napak, smo sliko zajeli pod pravim kotom. Vse meritve so prikazane spodaj.



Slika 14: Realni model človeške spodnje čeljusti z definirano razdaljo in meritvami.

Da lahko zobe natančno opredelimo, smo jih oštevilčili po pravilu štirih kvadrantov v spodnji čeljusti. Zob 1 je tako prvi zob v čeljustnem zobnem loku, torej sekalec. Ker sta zoba 1 in 2 v dlesen spodnje čeljusti vraščena tako blizu smo predpostavili, da imata enako razdaljo sile ročice in smo jima zato izmerili enake vrednosti razdalj. Pri merjenju razdalj je prišlo do napake meritev, saj je bilo težko določiti sredino zoba. To napako smo ocenili na 1 mm.

Ker poznamo sile v mišicah ob maksimalnem ugrizu in njihove ročice, lahko iz pogoja za ravnovesje navorov (3) izračunamo silo na posamezne zobe spodnje čeljusti. Spodaj bo predstavljen postopek izračuna sil na zobe. Izračuni so prikazani v tabeli v poglavju analiza in rezultati.

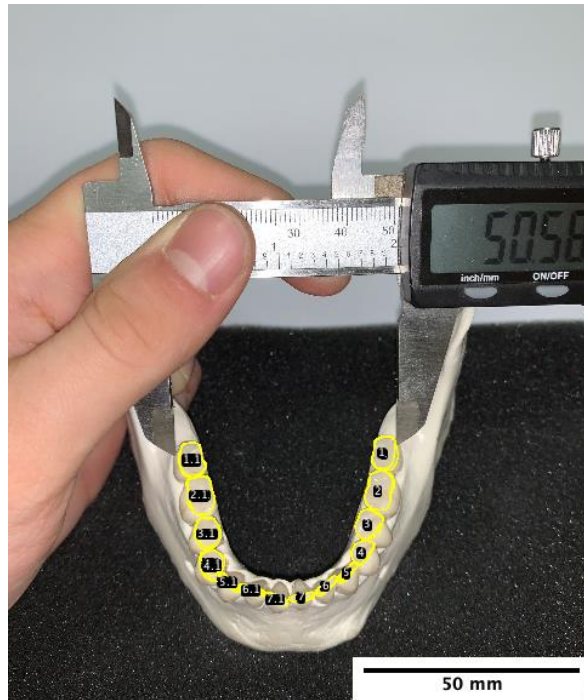
$$M_{max} = F_{max} \cdot r_{max} = r_i \cdot F_i \quad (5)$$

Silo na izbran zob smo označili kot F_i pri čemer je razpored i-ja od prvega do šestega zoba, torej od sprednjega sekalca pa do zadnjega kočnika. Razdaljo sile ročice zob ali r_i smo označili po enakem principu, pri čemer je r razdalja, i eden izmed šestih zob. Ker smo maksimalno silo ugriza izmerili na sekalcih, ročica sile predstavlja najdaljšo razdaljo meritev in je enaka razdalji r_1 in r_2 . Pri merjenju razdalj je prišlo do relativno malih napak meritev. Največjo napako ima najmanjša razdalja in sicer 2 %.

Sile bomo izračunali z naslednjo enačbo:

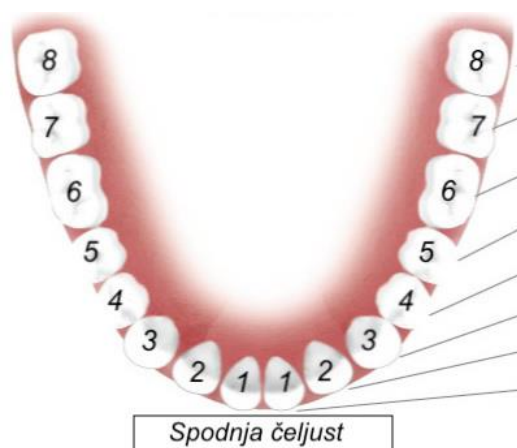
$$F_i = \frac{r_{max} \cdot F_{max}}{r_i} \quad (6)$$

Pri drugem raziskovalnem vprašanju nas zanima tudi kakšna je povezava med silo ugriza na zobe in površino zoba. Za izračun te moramo najprej določiti površine vseh zob, ki jih bomo upoštevali v nadaljnjem računanju. Površino zob smo izmerili s posebnim orodjem v računalniškem programu Image J. Vse meritve so realne, saj smo pred začetkom merjenj sliko spodnje čeljusti umerili. Analizirani zobje so tudi v tem primeru oštevilčeni po pravilu štirih kvadrantov v spodnji čeljusti. Zob 1 tako predstavlja prvi zob v čeljustnem zobnem loku, sekalec. Vemo, da ima merjenje in obrisovanje predmetov z računalniško miško precej veliko napako, zato smo meritve izvedli večkrat. Natančneje trikrat na vsakem izmed zob v zobnem loku spodnje čeljusti. Izračunali smo povprečje površine za vsakega izmed zob, tako na desni, kot na levi strani čeljustnega loka. Rezultati so vidni v (Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12)



Slika 15: Analiza zob spodnje čeljusti.

Na (Slika 16) so prikazane analize zob na repliki človeške čeljusti. Z rumeno barvo so označene površine zob. Zobje so na sliki označeni v nasprotnem vrstnem redu, kot jih bomo označevali v nadaljevanju. Označeni so v takšnem vrstnem redu, kot smo opravljali meritve. Zob 1D je torej zob 1 desno, zob 1L pa zob 1 levo.



Slika 16: Zobje v spodnjem zobnem loku.

Na (Slika 16) je označen zob 8 – modrostni zob, ki pa ga v našem primeru nismo upoštevali, saj ga naš realni model človeške čeljusti nima, (modrostni zob zraste le nekaterim).

Ker smo maksimalno silo ugriza definirali kot skupno silo v levi in desni mišici, moramo pri izračunu sile na zobe dobljeno vrednost deliti z dva. Napetosti na zobeh smo izračunali z enačbo (7), F_i v našem primeru pomeni silo na posamezen zob, S_i površino zoba, σ_i pa napetost na zobu. Izračunane napetosti na posameznem zobu so vidne v (*Tabela 13: Vrednosti napetosti na zobe*).

$$\sigma_i = \frac{F_i}{S_i} \quad (7)$$

4. Analiza in rezultati

Med preučevanjem smo se upirali na raziskovalni vprašanji, kateri smo si zastavili v uvodu. Bili sta ključnega pomena za izoblikovanje in izdelavo merilnih fizikalni modelov in vse meritve, ki smo jih na teh modelih opravili. Rezultate zaradi lažje preglednosti predstavljamo v ločenih sklopih, ki si sledijo v enakem vrstnem redu kot v poglavju (3) metode dela. Najprej predstavljamo rezultate izračunov smernih koeficientov, ki predstavljajo pomemben del za nadaljnje računanje. Na koncu odgovarjamo na najkompleksnejšo, drugo raziskovalno vprašanje, kjer pojasnimo vpliv sile na zobe. V diskusiji bomo ocenili natančnost izvedbe merilnih postopkov in predstavili možne izboljšave. Rezultati meritev so predstavljeni v sosledju raziskovanja.

4.1 Merjenje razdalj na 3-D repliki čeljusti

Razdalje R , d_1 in d_2 smo z računalniško analizo izmerili trikrat in izračunali povprečje treh meritev z napako meritve.

Tabela 1: vrednosti R

Meritev	R (mm)	R (mm)	δR
1	73 ± 1	72 ± 1	0,2 = 20 %
2	74 ± 1		
3	72 ± 1		

Tabela 2: vrednosti količine d_1

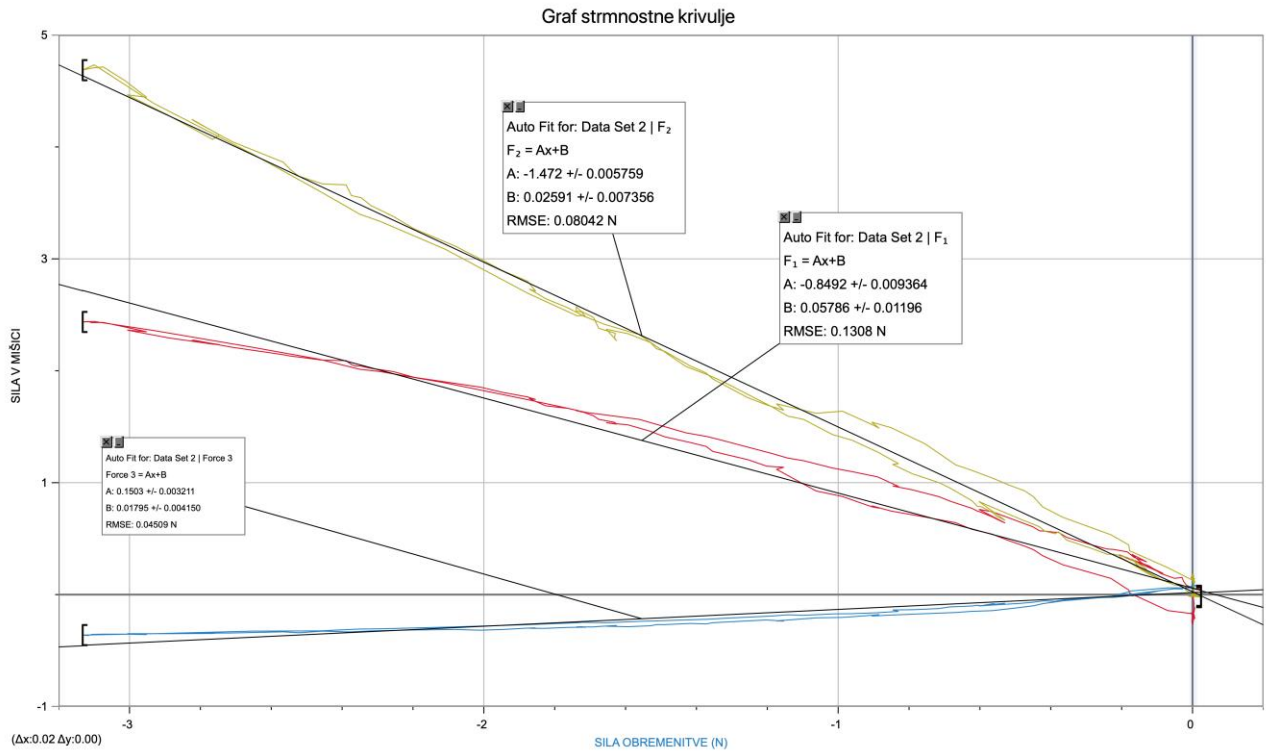
Meritev	d_1 (mm)	$\overline{d_1}$ (mm)	δd_1
1	30 ± 1	29 ± 1	0,1 = 10 %
2	31 ± 1		
3	29 ± 1		

Tabela 3: vrednosti količine d_2

Meritev	d_2 (mm)	$\overline{d_2}$ (mm)	δd_2
1	51 ± 1	51 ± 1	0,1 = 10 %
2	51 ± 1		
3	51 ± 1		

4.2 Sile v mišicah v odvisnosti od sile bremena

Graf 1 prikazuje izmerjeno odvisnost sile v mišicah od sile bremena na sprednje zobe. Z rumeno je prikazana sila v notranji lateralni perutasti mišici, z rdečo sila v masetrni mišici, z modro pa v senčni mišici, ki pa je nismo vključili v model, saj se je izkazalo, da nima ključne vloge pri ugrizu.



Graf 1: Graf odvisnosti sil v mišicah od sile bremena.

Graf 1 prikazuje linearno odvisnost sil v mišicah od sile bremena, zato smo določili smerne koeficiente za posamezne mišice in izračunali napako. Pri meritvah sile maksimalnega ugriza smo eksperiment izvedli trikrat, zato smo dobili tri različne krivulje odvisnosti, torej tri različne naklone premic iz katerih smo izračunali povprečje. Napako smo izračunali kot odstopanje razliko največje in najmanjše vrednosti naklona premice, ki smo ga nato delili z dva.

Tabela 4: Meritev k_1 za silo F_1 .

Meritev F_1	k_1	\bar{k}_1	Δk_1
1	1,74	1,6	0,1
2	1,47		
3	1,68		

$$k_1 = \bar{k}_1 \pm \Delta k_1 = 1,6 \pm 0,1 \Rightarrow \delta k_1 = \frac{0,1}{1,6} = 0,063 = 6,3\% \quad (8)$$

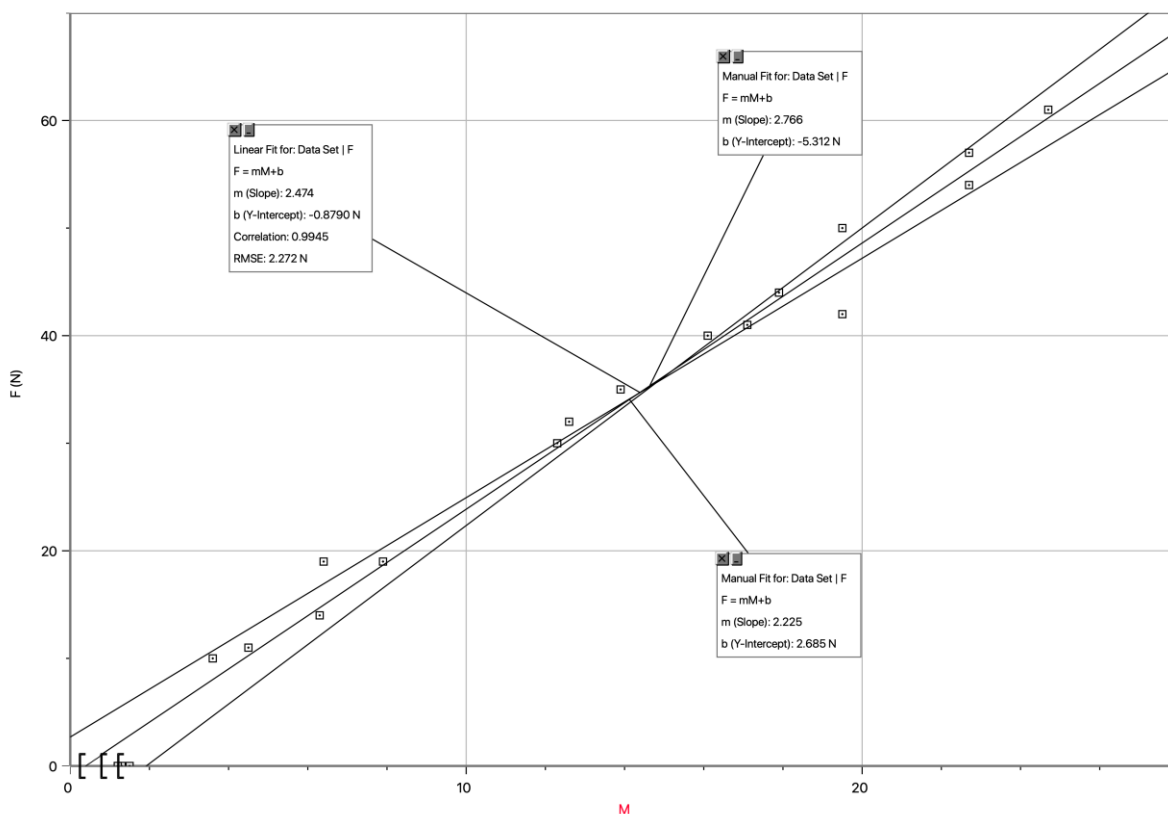
Tabela 5: Meritev k_2 za silo F_2 .

Meritev F_2	k_2	\bar{k}_2	Δk_2
1	0,51	0,7	0,2
2	0,85		
3	0,86		

$$k_2 = \bar{k}_2 \pm \Delta k_2 = 0,7 \pm 0,2 \Rightarrow \delta k_2 = \frac{0,2}{0,7} = 0,286 = 28,6\% \quad (9)$$

4.3 Rezultati umerjanja merilnika sile

Graf 2 prikazuje umeritveno krivuljo merilnika sile ugriza. Sami smo na oko določili največji in najmanjši naklon premice, ki nam je služila za izračun napake umeritvene krivulje. Meritve so prikazane v spodnji tabeli.



Graf 2 Umeritvena krivulja merilnika sile ugriza.

Tabela 6: Naklon premic.

k_{\max} (N)	k_{\min} (N)	\bar{k} (N)	Δk (N)
2,766	2,225	2,5	0,3

Na podlagi podatkov iz (Tabela 6) smo izračunal vrednost Δk .

$$\Delta k = \frac{k_{max} - k_{min}}{2} = \frac{2,766 - 2,225}{2} = 0,2755 \text{ N} = 0,3 \text{ N} \quad (10)$$

Spodnja enačba prikazuje izračun relativne napake povprečne vrednosti \bar{k} .

$$\delta k = \frac{0,3}{2,5} = 0,1 = 10\% \quad (11)$$

4.4 Rezultati meritev maksimalne sile ugriza

Spodnje tabele prikazujejo rezultate meritev maksimalne sile ugriza z izračunano napako.

Tabela 7: Izmerjene vrednosti merilnika.

Meritev	Podatek na merilniku	\bar{M}	ΔM
1	85	85	2
2	87		
3	87		
4	83		
5	82		

Primer izračuna napake merilnika maksimalne sile ugriza

$$M = \bar{M} \pm \Delta M = 85 \pm 2 \Rightarrow \delta M = \frac{2}{85} = 0,02 = 2\% \quad (12)$$

Na podlagi enačbe (4) smo izračunali maksimalno silo bremena - F_{max} . Absolutna napaka F_{max} je bila določena po pravilih za računanje z napakami.

$$F_{max} = (2,5 \pm 0,3) \cdot (85 \pm 2) \text{ N} = (213 \pm 31) \text{ N} \quad (13)$$

S tem, ko smo izračunali F_{max} , lahko odgovorimo na prvo raziskovalno vprašanje in izračunamo sili v mišicah F_1 in F_2 .

$$F_1 = k_1 \cdot F_{max} = (1,6 \pm 0,1) \cdot (213 \pm 31) \text{ N} = (341 \pm 71) \text{ N} \quad (14)$$

$$F_2 = k_2 \cdot F_{max} = (0,7 \pm 0,2) \cdot (213 \pm 31) \text{ N} = (149 \pm 64) \text{ N} \quad (15)$$

4.5 Rezultati meritev ročic sil na posamezne zobe

Spodnja tabela prikazuje rezultate meritev ročic sil na posamezne zobe z napako meritve.

Tabela 8: Izmerjene razdalje ročic r .

Zob	Meritev r_i (mm \pm 1 mm)			\bar{r} (mm \pm 1 mm)
	1	2	3	
1	91	91	91	91
2	91	91	91	91
3	90	90	90	90
4	86	86	86	86
5	79	79	79	79
6	72	72	72	72
7	62	62	62	62

4.6 Izračun sil na zobe

Kot primer izračuna sil na zobe, je spodaj prikazan izračun sile na sedmi zob – F_1 , na podlagi enačbe (6). Sile na ostale zobe so prikazane v tabeli.

$$F_7 = \frac{r_{max} \cdot F_{max}}{2 r_7}$$

$$F_7 = \frac{(91 \pm 1) \cdot (213 \pm 26)}{2(62 \pm 1)} \text{ N}$$

$$F_7 = (156 \pm 27) \text{ N}$$

Tabela 9: Izmerjene sile na zobe.

Zob	F [N]	ΔF [N]
1	107	18
2	107	18
3	108	18
4	113	19
5	123	21
6	135	23
7	156	27

4.7 Rezultati meritev površine zob

V spodnjih tabelah so prikazane meritve površine zob za levo in desno stran spodnje čeljusti.

Iz njih jih meritev smo izračunali povprečne površine zob z napako.

Tabela 10: Izmerjene površine zob leve strani spodnje čeljusti.

Stran spodnje čeljusti	Zob	S (mm ² ± 1 mm ²)			\bar{S} (mm ²)	ΔS (mm ²)
		1	2	3		
leva	1L	9	7	9	8	1
	2L	8	8	7	8	1
	3L	10	9	10	10	1
	4L	31	32	31	31	1
	5L	30	32	33	32	2
	6L	57	49	49	52	4
	7L	38	35	38	37	2

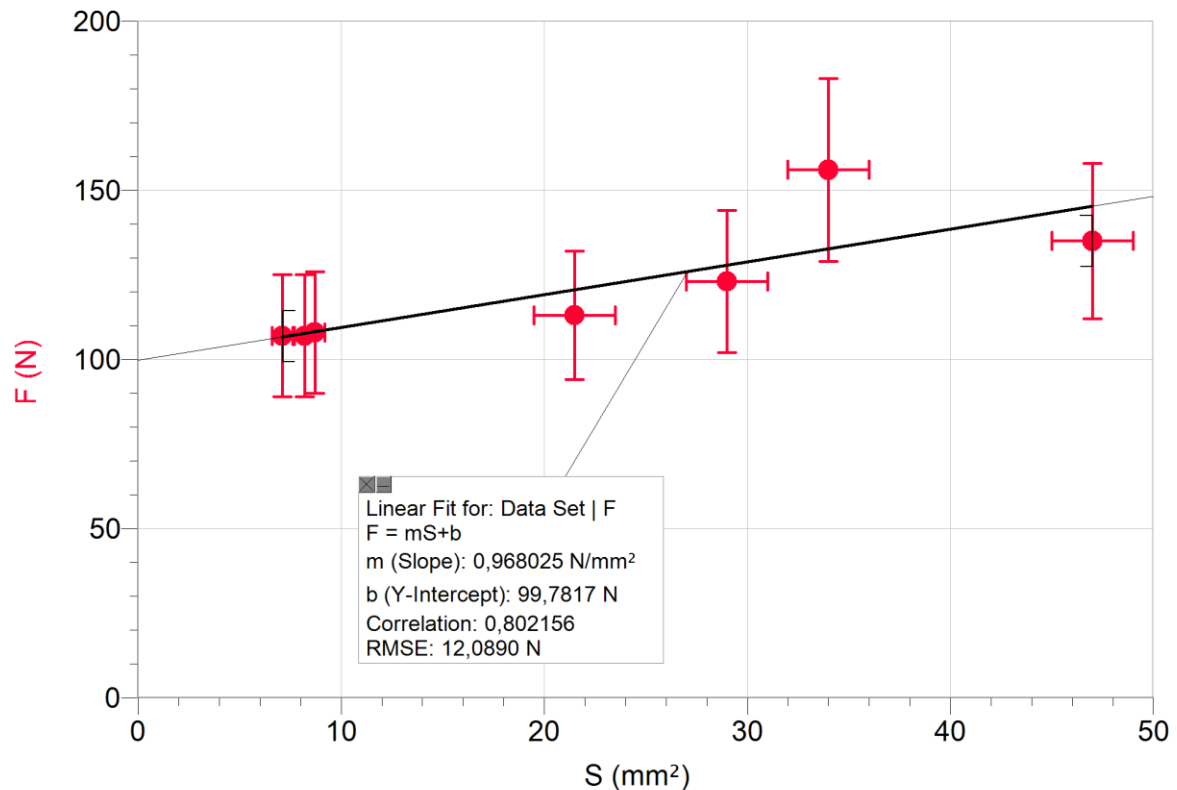
Tabela 11: Izmerjene površine desne leve strani spodnje čeljusti.

Stran spodnje čeljusti	Zob	S (mm ² ± 1 mm ²)			\bar{S} (mm ² ± 1 mm ²)	ΔS (mm ²)
		1	2	3		
leva	1D	8	6	7	7	1
	2D	8	9	8	8	1
	3D	8	9	9	9	1
	4D	20	23	21	21	2
	5D	30	29	28	29	1
	6D	46	45	50	47	2
	7D	34	34	34	34	1

Tabela 12: Izmerjene povprečne površine zob leve in desne strani spodnje čeljusti.

Zob	S (mm ²)
1	8 ± 1
2	8 ± 1
3	9 ± 1
4	26 ± 2
5	30 ± 2
6	49 ± 3
7	36 ± 3

Da bi dobili čim boljšo predstavo o zvezi med silo in površino zoba smo narisali graf sile na zob v odvisnosti od njegove površine (*Graf 3*)



Graf 3: Sila na zob v odvisnosti od površine zoba.

Iz grafa je razvidno, da silo v okviru merskih napak opišemo z linearno funkcijo, ni pa sorazmerna s površino, saj ne gre skozi koordinatno izhodišče. Naklon premice, ki se meritvam najboljše prilega je $0,97 \text{ N/mm}^2$, je pa merska napaka tako velika, da bi lahko skozi merske točke potegnili tudi premico z rahlo negativnim smernik koeficientom.

Želeli smo preveriti tudi, kako se napetost v zobeh spreminja. Če bi bila velikost zob (njihova površina) namreč zgolj odvisna od velikosti sile, ki nanje deluje, bi morala biti napetost na vseh zobeh enaka.

Kot primer izračuna napetosti na zobe predstavljamo izračun napetosti za zadnji kočnik ali zob₇. Vse ostale vrednosti so predstavljene v (*Tabela 13*) in smo jih izračunali po enakem postopku, kot ga opisuje enačba (16).

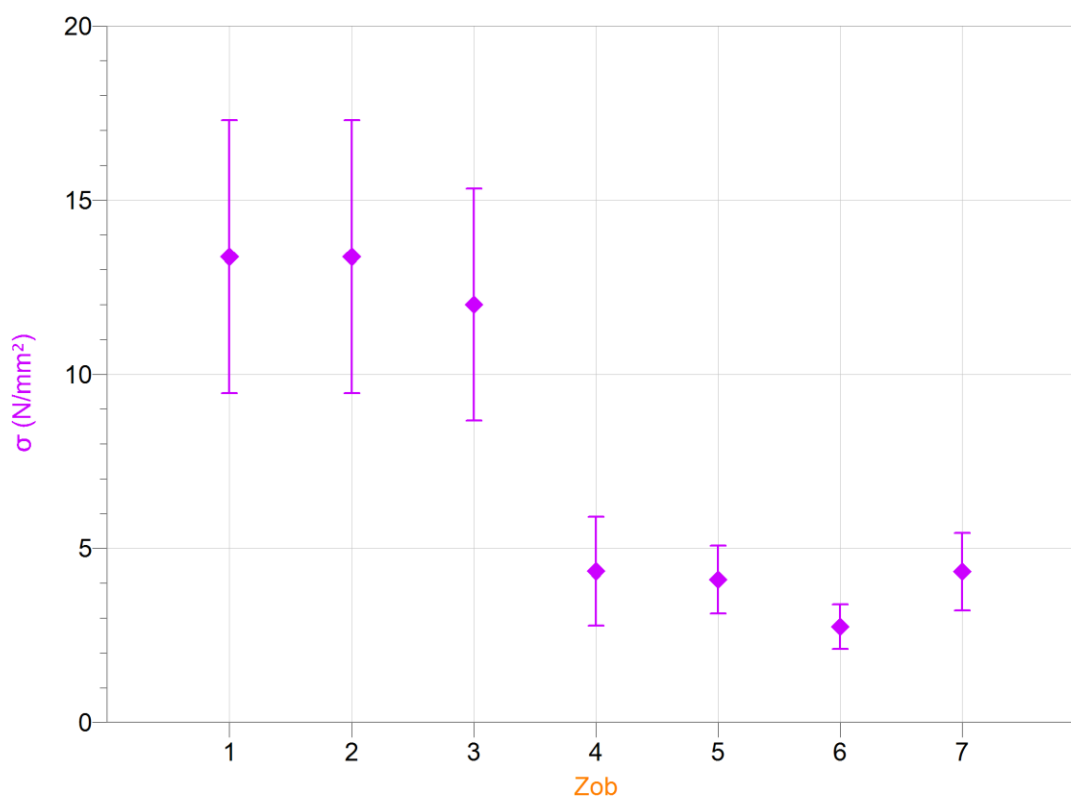
$$\sigma_7 = \frac{F_1}{S_1} \quad (16)$$

$$\sigma_7 = \frac{(157 \pm 27) \text{ N}}{(36 \pm 3) \text{ mm}^2} = 4 \pm 1 \text{ MPa} \quad (17)$$

Tabela 13: Vrednosti napetosti na zobe.

Zob	S [mm ²]	F [N]	σ [MPa]
1	8 ± 1	107 ± 18	13 ± 4
2	8 ± 1	107 ± 18	13 ± 4
3	9 ± 1	108 ± 18	12 ± 3
4	26 ± 2	113 ± 19	4 ± 1
5	30 ± 2	123 ± 21	4 ± 1
6	49 ± 3	135 ± 23	2,8 ± 0,6
7	36 ± 3	156 ± 27	4 ± 1

Graf 4 prikazuje odvisnost napetosti na zob od položaja zoba. Napetost je v okviru napake konstantna za par srednjih sekalcev in stranskih sekalcev in znaša (13 ± 4) N/mm². Za zadnje kočnike je napetost prav tako konstantna v okviru napake in znaša (4 ± 1) N/mm².



Graf 4 Napetost v odvisnosti od položaja zoba.

5. Diskusija

Vse opravljene meritve in izračuni so nam omogočili, da smo lahko odgovorili na raziskovalni vprašanji, ki smo si jih zadali v uvodu raziskovalne naloge. Poglobljeno smo raziskali delovanje človeške čeljusti pri človeškem ugrizu. Eksperimente in meritve smo opravili v točno določenem zaporedju. Tako na prvo, kot na drugo raziskovalno vprašanje nismo morali odgovoriti na preprost način. Vse dodatne meritve so bile tako rekoč nujne za nadaljevanje raziskovanja. V sklopu prvega raziskovalnega vprašanja smo izdelali preprost fizikalni model človeške čeljusti, s katerim smo zapisali enačbo za izračun dveh sil. Ugotovili smo, da tretja sila, torej sila v senčni mišici nima ključne vloge pri ugrizu. Ti dve sili sta masetrna mišica in notranja lateralna perutasta mišica, ki odgovarjata na prvo raziskovalno vprašanje: "Kolikšne so sile v ključnih mišicah med maksimalnim ugrizom."

Postopek izračuna teh dveh sil je zajemal izgradnjo fizikalnega modela človeške čeljusti in povsem novega merilnika sil, ki smo si ga zamislili in sestavili sami. 3-D replika človeške čeljusti nam je predstavljala osnovo za vse meritve pri raziskovanju. Na njej smo izmerili razdalje ročic sil in izvedli prve eksperimentalne meritve obremenitve na sprednje zobe.

Pri merjenju ročic sil je prišlo do relativno malih napak meritev. Največjo napako ima najmanjša razdalja in sicer 2 %. To je zelo malo. Za izračun ključne, maksimalne sile ugriza (obremenitve) smo morali izvesti še en dodaten eksperiment. Ta je zajemal idejo o povsem novem merilniku sile ugriza. Z izdelavo svojevrstnega merilnika sile smo lahko izmerili silo ugriza človeka. V merilnik sem grizel jaz, kar pomeni, da so rezultati meritev posledica lastne biološko-fizikalne spodobnosti žvekalnega sistema. Silo, ki deluje v posameznih mišicah pri žvečenju smo izračunali z enačbama (14) in (15). Rezultati so pokazali, da sta sili v obeh mišicah presenetljivo mali [4]³. Sila $F_1 = (341 \pm 71) \text{ N}$ in sila $F_2 = (149 \pm 64) \text{ N}$. Pri izračunu sile v mišici F_1 in F_2 smo dobili precej velike napake. Vzrok za takšna odstopanja so meritve, ki smo jih izvedli na mehanskem modelu in velika napaka pri meritvi maksimalne sile ugriza. Vsaka izmed meritev je bila obremenjena s precejšnjo napako, zato sta tudi izračuna sil F_1 in F_2 obremenjena z veliko napako meritve. Upoštevati moramo, da smo raziskovali enega izmed najkompleksnejših človeških sistemov, ki ga je že v osnovi težko določiti, analizirati in poenostaviti. Do končnih rezultatov smo prišli z več koraki, od katerih je bil vsak obremenjen z mersko napako.

³ V primerjavi z (Kadkhodazadeh M., et al., 2018) smo izmerili manjše sile. Te so posledica meritve maksimalne sile ugriza, saj smo v merilnik ugriznili tako močno, da še nismo čutili nelagodja. Nismo izmerili realne maksimalne sile temveč njen dober približek.

Drugo raziskovalno vprašanje je bilo tako rekoč nadaljevanje prvega. Raziskovali smo, kolikšne so sile na posamezne zobe med maksimalnim ugrizom in kakšna je zveza med silo na zob in njegovo površino oz. z drugimi besedami kolikšna je napetost na zobe. Tudi nanj nismo mogli odgovoriti neposredno. V sklopu drugega raziskovalnega vprašanja smo se osredotočili na analizo zob spodnje čeljusti. Izmeril smo razdalje posameznih zob in površine njihovih zobnih kron. S sistemom enačb, v katerem smo imeli maksimalno silo ugriza podano v sklopu odgovora na prejšnje raziskovalno vprašanje smo izračunali, kolikšna je sila na posamezne zobe pri žvečenju. Ugotovili smo, da je na zobeh z manjšo ročico (zadnji zobje) sila večja, da uspejo uravnotežiti navor zaradi sil v mišicah pri maksimalnem ugrizu. Sila na zobe ni zelo odvisna od površine. Rahlo narašča (*Graf 3*), kar je pričakovano, saj imajo zobje z večjo silo tudi večjo površino. Presenetljiva ugotovitev pa je bila, da sila na zobe ni neposredno odvisna od površine zobne krone. To se je zelo lepo impliciralo na primeru zadnjih dveh kočnikov. Zadnji kočnik je imel namreč manjšo površino zobne krone kot predzadnji, vendar kljub temu večjo silo. Tudi izračuni sile na posamezne zobe so obremenjeni s precejšnjo napako. Napaka teh sil je v glavnem posledica napake maksimalne sile ugriza in meritve površin zobne krone, ki so obremenjene z določeno vendar malo napako računalniške meritve.

V zadnjem delu naloge smo raziskovali, kolikšna je napetost na zobe pri ugrizu. V njegovem izračunu smo uporabili skoraj vse prejšnje rezultate, zato je po naši oceni predstavljal najkompleksnejše raziskovalno vprašanje. Ugotovil smo, da je napetost na zobe razlikuje glede na njihovo razporeditev. Funkcija sprednjih zob je nekoliko drugačna, saj je njihova glavna funkcija trganje hrane in morajo zaradi tega prenesti večje napetosti. Pri izračunu nismo določili največje napetosti, ki jo zob prenese ampak napetost, ki je v zobu, če ugriz le ta zob, sila v mišicah pa je enaka kot ob maksimalnem ugrizu s sekalci. Največja napetost je torej na sprednjih zobeh, ki imajo najmanjšo površino zobne krone. Kljub temu, da smo na zadnjih kočnikih izmerili največjo silo, na njih deluje precej mala napetost. Napake izračuna napetosti na zobe se gibajo med 20 in 27 procenti in glede na fizikalne meritve ustrezne. Tako velike napake so posledica velike napake izmeritve maksimalne sile ugriza in napake izračuna sil na posamezne zobe, pri čemer so napake računalniških meritev površine zobnih kron zanemarljivo majhne. Ocenili smo, da bi bile napake lahko manjše v primeru, če bi meritve maksimalne sile ugriza izmerili z natančnejšim, bolj robustnim merilnikom. Ta bi moral biti zgrajen tako, da bi ga lahko vstavili v usta bi tako izmerili silo ugriza na vsakem zobu posebej. V tem primeru, ne bi potrebovali toliko računskih postopkov, zaradi česar bi dobili manjše merske napake. Morda bi bila smiselna uporaba merilnika, ki bi deloval na principu piezo kristala. Slednji bi lahko bil manjši in natančnejši.

6. Družbena odgovornost

Pri pisanju raziskovalne naloge smo upoštevali osnovna načela družbene odgovornosti. Pri izvajanju poskusa nismo ogrožali zdravja nobenega dijaka, saj sem bil prostovoljec za poskus jaz sam. Z raziskovalno nalogo in povsem novimi merilnimi modeli, meritvami, analizami in izračuni želimo ustvariti zanimiv pogled na nove fizikalne probleme. Predvsem mlade želimo spodbuditi k raziskovanju nečesa nevsakdanjega in spodbuditi njihovo ustvarjalnost. Obravnava čeljusti, ki jo predstavljamo v tej nalogi, lahko služi tudi kot kompleksnejši računski primer pri obravnavi navorov v srednji šoli.

7. Literatura

- [1] Iven Klineberg & Steven E. Eckert, 2020. *Elsevier*. [elektronski vir]
Dostopno na URL naslovu: <https://search.library.utoronto.ca/details?10199241> [Dostopano januarja 2020].
- [2] Xu, W. & John E. Bronlund, 2010. *Mastication Robots*. Auckland, Nova Zelandija (Berlin): Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Stran 38, 284.
- [3] Lewis, R., 2020. *ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA*. [elektronski vir]
Dostopno na URL naslovu: <https://www.britannica.com/science/jaw> [Dostopano januarja 2020].
- [4] Dolinar, M., Šmit, I. T. & Manić, V. C., 2015. *Anatomija in Fiziologija človeka*. s.l.:Pipinova knjiga.
- [5] Anderson, P. C. & Pendleton, A. E., 2001. The Dental Assistant. In: *The Dental Assistant*. Albany, NY : Delmar.
- [6,7] Xu, W. & John E. Bronlund, 2010. *Mastication Robots*. Auckland, Nova Zelandija(Berlin): Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Stran 61
- [8] Dr. Draga Štiblar Martinič, d. in drugi, 2014. *Anatomija, histologija in fiziologija*. Ljubljana: Medicinska fakulteta Univerze v Ljubljani.
- [9] AG, C., 2018. *curaprox*. [elektronski vir]
Dostopno na URL naslovu: <https://www.curaprox.com/si-sl/nasi-zobje-pod-pritiski-z-vseh-strani> [Dostopano januarja 2020].
- [10,11] Maribor, Z., 2018. *Zobozdravstvo*. [elektronski vir]
Dostopno na URL naslovu: <https://www.zobozdravnikmaribor.si/blog/> [Dostopano januarja 2020].
- [12,13,14] Kadkhodazadeh M., Amid R. & Ebrahimi N., 2018. *Clinical Evaluation of a New Device to Measure Maximum Bite Force*. [elektronski vir]
Dostopno na URL naslovu: <https://www.pulsus.com/scholarly-articles/clinical-evaluation-of-a-new-device-to-measure-maximum-bite-force.pdf> [Dostopano januarja 2020].
- [15,16] Atakhanov, P. S. E., 2011. *Dodatne metode raziskovanja bolnikov ortopedske stomatologije*. [elektronski vir]
Dostopno na URL naslovu: <http://library.ziyonet.uz/ru/book/download/53243> [Dostopano januarja 2020].

[17] Rudolf Kladnik, Stane Kodba, Gibanje in sila, DZS, Ljubljana 2018, str. 119

[18] Engineering, O., 2019. Strain Gauges. [elektronski vir]

Dostopno na URL naslovu: <https://www.omega.com/en-us/resources/strain-gages> [Dostopano januarja 2020].

[19] Žust, P., 2018. In: Izdelava merilnega sistema za merjenje sile z uporabo merilnih lističev in mikrokontrolerja Arduino. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, pp. 18-19.

[20] Kolak, M., 2013. How Does a Digital Scale Work. [elektronski vir]

Dostopno na URL naslovu: <https://www.hunker.com/12183358/how-does-a-digital-scale-work> [Dostopano januarja 2020].

Programska oprema

- Trimble, 2020. *SketchUp*. [elektronski vir]
Dostopno na URL naslovu: <https://www.sketchup.com/try-sketchup> [Dostopano decembra 2019].
- Anon., 2020. *Image J*. [elektronski vir]
Dostopno na URL naslovu: <https://imagej.nih.gov/ij/index.html> [Dostopano januarja 2020].
- Vernier, 2020. *Logger Pro* [elektronski vir]
Dostopno na URL naslovu: <https://www.vernier.com/downloads/logger-pro-updates/> [Dostopano januarja 2020].

Viri slik

Slika 1: Žvekalne mišice

Dostopano preko URL naslova: <https://www.medizin-kompakt.de/masseter> [5.2.2020 ob 9:00]

Slika 3: Fizikalni model z označenimi silami in razdaljami. Program, v katerem je bila slika pripravljena ne omogoča zapisa z indeksom, zato F1 pomeni F1 itd.

Dostopano preko URL naslova: <https://www.zobozdravnikmaribor.si/blog/kako-je-zgrajen-najbolj-kompleksen-sklep-v-telesu/> [5.2.2020 ob 9:02]

Slika 8: Zgradba merilnega lističa.

Dostopano preko URL naslova: <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=112902&lang=slv> [2.2.2020 ob 20:11]

Slika 9: Deformacija merilnega lističa.

Dostopano preko URL naslova: http://lrtme.fe.uni-lj.si/lrtme/slo/UNIVSS/meri_pret/PREDAVANJE_X_Senzorji%20tlaka_2006.pdf [20.1.2020 ob 17:44]

Slika 16: Zobje v spodnjem zobnem loku.

Dostopano preko URL naslova: https://www.allieddental.com.au/whats-in-your-mouth/sm_permanent-teeth_enlarged/ [31.1.2020 ob 21:45]

8. Priloge

8.1 Koda za mikrokrmilnik na matični plošči (Arduino)

```
#include "HX711.h"
#define DOUT 3 // siva
#define CLK 2 // violicna

HX711 scale;

float calibration_factor = -7050; //-7050 worked for my 440lb max scale setup

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("HX711 calibration sketch");
  Serial.println("Remove all weight from scale");
  Serial.println("After readings begin, place known weight on scale");
  Serial.println("Press + or a to increase calibration factor");
  Serial.println("Press - or z to decrease calibration factor");

  scale.begin(DOUT, CLK);
  scale.set_scale();
  scale.tare(); //Reset the scale to 0

  long zero_factor = scale.read_average(); //Get a baseline reading
  Serial.print("Zero factor: "); //This can be used to remove the need to tare the scale. Useful in
permanent scale projects.
  Serial.println(zero_factor);
}

void loop() {
  scale.set_scale(calibration_factor); //Adjust to this calibration factor

  Serial.print("Reading: ");
  Serial.print(scale.get_units(), 1);
  Serial.print(" lbs"); //Change this to kg and re-adjust the calibration factor if you follow SI
units like a sane person
  Serial.print(" calibration_factor: ");
  Serial.print(calibration_factor);
  Serial.println();

  Serial.print(0.454 * scale.get_units(), 1); //scale.get_units() returns a float

  Serial.print(" kg");
```



```
if(Serial.available())
{
  char temp = Serial.read();
  if(temp == '+' || temp == 'a')
    calibration_factor += 10;
  else if(temp == '-' || temp == 'z')
    calibration_factor -= 10;
}
}
```