

# Akustika violine

---

Kalšan, Ema

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Academy of Music / Sveučilište u Zagrebu, Muzička akademija**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:116:656964>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-22**



Repository / Repozitorij:

[Academy of Music University of Zagreb Digital Repository - DRMA](#)



**MUZIČKA AKADEMIJA  
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**

**VI. ODSJEK**

**EMA KALŠAN**

**AKUSTIKA VIOLINE**

**DIPLOMSKI RAD**



**ZAGREB, 2022.**

MUZIČKA AKADEMIJA  
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
VI. ODSJEK

# AKUSTIKA VIOLINE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. art. Davor Philips

Student: Ema Kalšan

Akadska godina: 2021/2022

ZAGREB, 2022.

DIPLOMSKI RAD ODOBRILO MENTOR

izv. prof. art. Davor Philips

---

Potpis

U Zagrebu, 28.6.2022.

Diplomski rad obranjen \_\_\_\_\_ ocjenom \_\_\_\_\_.

POVJERENSTVO:

1. \_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_
4. \_\_\_\_\_
5. \_\_\_\_\_

OPASKA:

PAPIRNATA KOPIJA RADA DOSTAVLJENA JE ZA POHRANU KNJIŽNICI MUZIČKE  
AKADEMIJE

## SADRŽAJ

1. Sažetak.....	5
2. Ključne riječi.....	5
3. Uvod.....	6
4. Povijest violine.....	7
4.1 Obitelj Stradivari.....	9
5. Uvod u akustiku.....	10
6. Fizika zvuka.....	10
6.1 Valovi i valno gibanje.....	10
6.2 Veličine kojima opisujemo zvučni val.....	12
7. Građa i akustika violine.....	13
7.1 Helmholtzove vibracije.....	15
7.2 Zvuk koji violina stvara.....	18
8. Akustički spektar.....	18
9. Tonska ovojnica.....	20
10. Zaključak.....	23
11. Oznake.....	23
12. Literatura.....	24

## 1. Sažetak

Talijanska gradnja violina je poznata u svijetu po svojim violinama iz 16. i 17. stoljeća. Ovim radom ću objasniti njihovu povijest, dugotrajni razvoj violine kroz stoljeća do današnjeg modernog izgleda i oblika, te s fizikalne strane objasniti zašto su one toliko cijenjene, što čini njihovu akustiku specifičnima i razlikuje ih od ostalih violina. Proučavanjem ovih instrumenata i njihovih komponenata dobivamo znanje koje se primjenjuje za gradnju novih violina, i možda u budućnosti znanost pomogne u postizanju akustike ovih posebnih instrumenata.

2. KLJUČNI POJMOVI: violina, povijest violina, talijanska gradnja, Stradivari, akustika violine, fizika zvuka

## 1. Summary

Italian violin craftsmanship is world famous for the violins made in the 16th and 17th century. This paper is going to explain their history, the evolution of violin through the centuries until it achieved today's modern look, explain why they are so valuable with physics and what makes their acoustics so special and differentiates them from other violins. By studying these instruments and their parts we collect knowledge that can be applied in making new violins, and maybe in the future science will be the key to achieving acoustics close to these special instruments.

2. KEY WORDS: violin, history of violin, Italian craftsmanship, Stradivari, violin acoustics, physics of the sound

### 3. Uvod

Zvuk je pojava s kojom se svakodnevno susrećemo u životu i ima veliku ulogu u našem funkcioniranju. Neke stvari specifično prepoznamo po tome kako zvuče, ili kako se glasaju. Od našeg govora i komunikacije s drugim ljudima, intonacije istog, neki ljudi imaju dubok glas, neki možda i piskutav. Hodajući po gradu susrećemo se sa zvukom prometa, bukom urbane sredine i užurbanog života. Buka je po definiciji svaki neželjeni zvuk koji čujemo, no svaka osoba odlučuje što je za nju neželjeni zvuk, dakle buka nije svima ista.

U nekim mirnijim sredinama možemo čuti prirodu, vjor vjetra u šumi ili glasanje životinja, koje po tome identificiramo. I svakako, ne smijemo zaboraviti glazbu koja je neizbježni dio ljudskih života i vrlo bitan fizički, a pogotovo emocionalni podražaj. Bilo kakva filmska umjetnost ne može biti potpuna bez glazbe, ili najobičnija kava u mirnom kafiću, uvijek će svirati pozadinska muzika. Malo izraženije je svakako odlazak na koncert gdje dolazimo isključivo da bismo čuli izvedbu nekog orkestra ili solista.

Violina je instrument s plemenitom bojom i inspirirajućim zvukom koji oduševljava ljude od njenog postanka. Violina je imala dug razvojni put do oblika kakav ima danas, a njezino savršenstvo postigli su upravo talijanski majstori iz malog gradića na sjeveru Italije, Cremona. Obitelji Amati, Guarneri i Stradivari bili su kruna graditeljstva violine stvorivši nevjerojatne instrumente koji još danas ispunjavaju koncertne dvorane diljem svijeta svojim toplim, bogatim i svečanim zvukom čiju su tajnu znali samo talijanski majstori. Specifičnost gradnje, materijala i strpljenje koji su doveli do tih instrumenata, i postavili uzor za sve graditelje violina u budućnosti su blago koje su ove obitelji prenosile generacijama.

Akustika ovih violina se ipak može fizički objasniti i iz proučavanja ovih instrumenata možemo saznati informacije koje nam objašnjavaju zašto su ove violine bolje od bilo kojih modernih i izrađenih u današnje vrijeme, i pokušati se uz znanje i iskustvo približiti produktu koji su talijanski majstori postigli u 17. stoljeću.

## 4. Povijest violine

Violina je lako moguće najpoznatiji instrument, a to je postala već u 16. stoljeću kako za plemiće, tako i za pučane, čineći ju demokratskim instrumentom i potvrdom da glazba može spojiti ta dva svijeta. To je gudački instrument s 4 žice i najmanjih je dimenzija od modernih žičanih instrumenata. Riječ *violina* dolazi od srednjovjekovne riječi *vitula* koja znači žičano glazbalo. Razvoj violine je bio kompleksan proces, uz nastajanje mnogo žičanih instrumenata diljem Europe. Prvo valja spomenuti sličnost s lirom koja datira do 9. stoljeća, a jedan pravi predak violine je rabab, antičko žičano glazbalo koje je bilo popularno u islamskom svijetu. Rabab je imao dvije žice od svile koje su bile prikvačene na čivije i naštimate u kvinte. Instrument je imao dug vrat i oblik kruške te se pojavio u zapadnoj Europi kroz 11. i 12. stoljeće. Violina kakvu poznajemo je rezultat potrage za postizanjem savršenog zvuka i instrumentom koji može podnijeti zahtjevan repertoar kojeg je postojalo sve više. Virtuoznost je postajala ekstremno cijenjena i glazbenici su trebali instrument koji ju može podnijeti. Tako je došlo do razvoja novih oblika žičanih instrumenata, sve do moderne violine.

Novi oblik koji valja spomenuti je rebec, instrument koji se bazira na rababu i pojavio se prvi put u Španjolskoj, vjerojatno za vrijeme Križarskih ratova. Rebec je imao tri žice i držao se na ramenu. Utjecaj na današnju violinu su također imala poljska žičana glazbala, bugarska gadulka i ruski instrumenti guduk i smyk, za koje znamo iz freski iz 11. stoljeća.

U 13. stoljeću, žičani instrumenti su dosegli novi razvoj. Francuska viela je bila novo postignuće i bila je malo drugačija od rebecca. Imala je 5 žica i bila je veća nego žičani instrumenti do tad, slična modernoj violini. Imala je akustičke otvore oblika slova C.

Tek za vrijeme vladanja Henryja VIII (1509.-1547.) se riječ violina pojavljuje i imenuje ju onakvu kakvu danas poznajemo. Tad se razvio instrument s tri žice i svirao se prstima i povlačenjem gudala, najčešće za plesove i kulturne manifestacije koje su zahtijevale od instrumenta prodoran zvuk i preciznu projekciju istog.

U 15. stoljeću u Italiji, imamo dva instrumenta koja valja spomenuti. Jedan je viola da braccio, s tri žice i sličnog oblika i veličine kao viela, samo su C otvori zamijenjeni s



danas poznatim f otvorima. Drugi instrument je viola da gamba koja je bila vrlo popularna za vrijeme renesanse, ali s vremenom su bile zamijenjene glasnijim instrumentima i onim prikladnijim za aristokratske manifestacije.

Violina kao violina se prvi put pojavila u sjevernoj Italiji u ranom 16. stoljeću, u gradu Brescia u pokrajini Lombardiji. Još od 1485. godine, Brescia je grad bogat graditeljima gudačkih instrumenata, kao i njihovih vrsnih svirača jer je upravo tamo otvorena škola koja je pokrivala sve instrumente renesanse; viola da gamba, violone, lira, lirone, violetta i viola da braccio. Riječ violina nalazimo u dokumentima tog grada iz 1530. godine. Iako nijedan instrument nije sačuvan iz ranih desetljeća tog stoljeća, violine su prikazane u slikarstvu iz tog razdoblja i zato znamo da su postojali.

Violina se proširila po Europi i pretežito se koristila za plesnu glazbu, a u aristokratskim krugovima i kao solistički instrument ili dio ansambla.

Prvu modernu violinu izgradio je Andrea Amati, jedan od najpoznatijih graditelja violina u Cremoni, u prvoj polovici 16. stoljeća. Između 1542. i 1546. Amati je napravio nekoliko violina s tri žice. Prva Amatijeva violina s četiri žice je iz 1555., a njegova najstarija očuvana violina je čak iz 1560. godine.

Pretpostavlja se da je učio s Gasparom da Salom u Bresciji. Škola za gradnju instrumenata je postojala 50 godina prije nego je gradnja instrumenata postala popularna u Cremoni, ali je sav interes je prešao upravo u Cremonu oko 1630. nakon što je kuga pogodila sjevernu Italiju i Bresciu.

Andrea Amati je usavršio svoju struku i stvorio dinastiju graditelja violina koji su gradili violine njegovim stilom, s vlastitim modifikacijama koje su dovele do gradnje ponekih nevjerojatnih instrumenata. Andrea je radio violine u dvije veličine, manju i veću, koja je kasnije postala poznata kao „grand Amati“. Također je uveo svoj specifičan lak boje jantara.

Andrea je imao dva sina, Antonio i Girolamo koji su većinu života radili skupa.

Girolamo je imao sina, Nicolo, koji je postao najpoznatiji Amati i od njega su učili majstori iz dvije najpoznatije obitelji graditelja, Stradivari i Guarneri. Najveći doprinos Amatija razvoju violine je bio tanki, ravni, šuplji oblik koji su Stradivari usavršili i dokazali da je najbolji oblik violine za koncerte i repertoar koji se svirao.

## 4.1 Obitelj Stradivari

Antonio Stradivari rođen je 1644. godine i otvorio je svoju radnju u Cremoni u kojoj je radio do svoje smrti 1737. Njegova percepcija geometrije i dizajna violine je postala model za graditelje violina kroz iduća stoljeća. Stradivari je uz violine radio i harfe, gitare, viole i violončela, napravio je više od 1100 instrumenata, a sačuvano ih je oko 650, što je stvarno dosta. Također, tisuće violina su napravljene po uzoru na Stradivarija. Originalni Stradivari koristi latinski natpis u unutrašnjosti violine; Antonius Stradivarius Cremonensis Faciebat Anno (godina). Ovaj opis upućuje na majstora, grad i godinu kad je violina napravljena, a kopije koje su napravljene iza 1891. imaju i svoju državu podrijetla pokraj opisa.

Violine Antonija Stradivarija stoje na posebnom glasu u glazbenom svijetu. Najbolje očuvana Stradivarijeva violina ima nadimak „the Messiah“, čuva se u termalno kontroliranoj kutiji u muzeju na Oxfordu u Engleskoj. Stradivarijevi instrumenti su traženi zbog njihove povijesne vrijednosti, a posebice zbog vizualnog izgleda. Superiorni su svim novijim instrumentima zbog briljantnog zvuka i dubine, specifične projekcije zvuka kao stvorene za velike dvorane i koncerte. Uz svu tehnologiju današnjice ipak je nemoguće napraviti instrumente koji zvuče bolje od onih iz 17. i 18. stoljaća.

Glazbenici i znanstvenici još traže objašnjenje i razlog što to zapravo čini Stradivarijeve violine tako posebnima. Rane teorije su se fokusirale na lak, možda je u lak dodan tajni sastojak, ali kemijske analize iz 2000-ih godina nisu otkrile ništa neobično u sastavu Stradivarijevog laka.

Novi predmet istraživanja se fokusirao na drvo od kojeg su violine napravljene. Znanstvenici pretpostavljaju da je hladnija klima tzv. Malog Ledenog Doba (1300.-1850.) bila bitan faktor, jer je uzrokovala sporiji rast alpske smreke, što je dovelo do gušćeg drva i boljeg provođenja zvuka. Također je pronađeno da je drvo tretirano s kemikalijama poput aluminija, kalcija i bakra, što je također imalo utjecaj na njegove akustičke predispozicije.

Na akustiku Stradivarijevih violina, neki pretpostavljaju, utječe i veličina f otvora. On ih je izduljio i suzio što proporcionalno proizvodi više zvuka.

## 5. Uvod u akustiku

Akustika violine je kompleksna stvar, a Stradivarijeve violine zvuče upravo tako jer su se poklopili genijalnost majstora i fizika zvuka koju možemo objasniti. Međusobnim nadopunjavanjem dolazimo do izvrsnog instrumenta čiji je zvuk neprocjenjiv.

Akustika je interdisciplinarna znanost koja proučava nastanak i širenje valova u različitim medijima u tri agregatna stanja, plinovito, tekuće i kruto. Zvuk kakvog mi poznajemo, je ustvari relativni podražaj koji nastaje kao posljedica malih, ali znatnih promjena atmosferskog tlaka (atmosferski tlak se označava s  $p_{at}$  i iznosi 101 325 Pa, što je jednako 1 bar). Zvuk se širi zrakom, ali i tekućinama i krutinama, dakako drugačijom brzinom. Mi ne moramo čuti svaki zvuk, niti ne možemo, a naše osvještenje zvuka ovisi o frekvencijskom opsegu (20 Hz-20 kHz) i dinamici amplituda zvučnog tlaka 20  $\mu$ Pa -100 Pa.

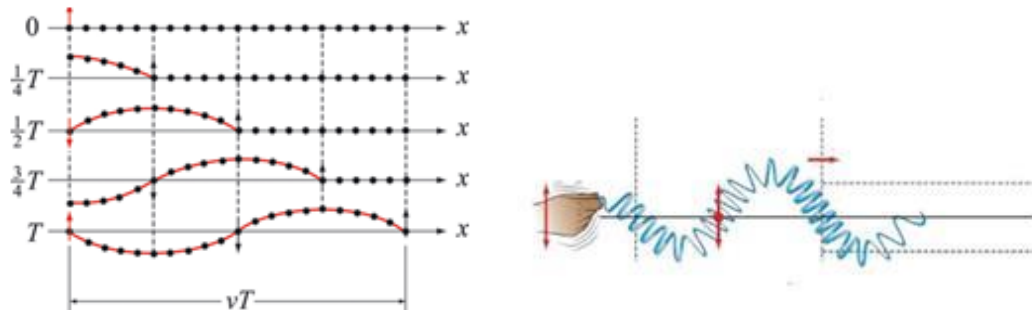
## 6. Fizika zvuka

### 6.1 Valovi i valno gibanje

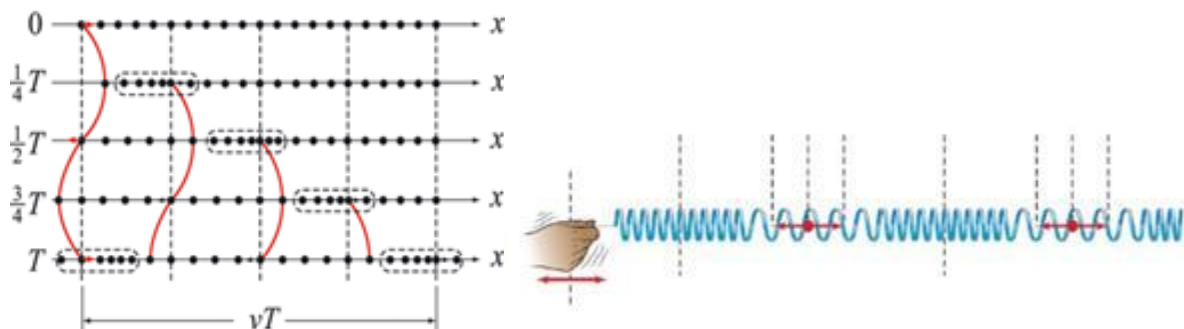
Energija se može prenositi s jednog mjesta na drugo gibanjem čestica tijela i valnim gibanjem. Val je prijenos poremećaja (energije titranja) u nekom sredstvu (mediju). Može biti mehanički val (nema prijenosa tvari) koji se širi kroz elastična sredstva i elektromagnetski val koji se širi vakuumom. Na primjer, ako bacimo kamen u vodu nastat će valovi, oni prenose poremećaj i energiju, a čestice ne putuju valom. Gibanje vala na vodi sastoji se od brjegovia i dolova, a čestice vode titraju oko svog ravnotežnog položaja. U sredstvu kojim se val širi susjedne čestice su povezane elastičnim silama. Ako se jedna čestica pomakne iz ravnoteže, to uzrokuje pomak i susjedne čestice i tako se poremećaj lančano širi i val se giba kroz sredstvo.

Promjene ravnotežnog stanja čestica u nekom mediju nastaju djelovanjem vanjske sile koja uzrokuje titranje molekula.

Val može biti transverzalni, kod njega čestice titraju okomito na smjer širenja vala, i longitudinalni, u tom slučaju čestice titraju u smjeru širenja vala.



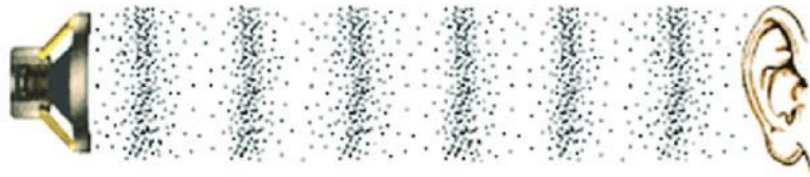
Slika 1. Transverzalni val



Slika 2. Longitudinalni val

Zvuk se širi upravo zbog elastičnih veza između molekula u sredstvu. U plinovima i tekućinama valovi zvuka su isključivo longitudinalni, a u krutinama mogu biti i transverzalni.

Akustički parametar koji mjerimo najlakše je dinamički tlak. Osim njega mjeri se i zvučni intenzitet. Akustički sustav čine tri parametra, izvor zvuka, potom medij u kojem se zvuk širi i konačna destinacija zvuka, prijatelj zvučnog vala (uho, mikrofona). Ova tri parametra se opisuju osnovnim jednađbama u fizici, a to su jednađbe stanja, gibanja i kontinuiteta.



Slika 3. Akustički sustav

Zvučni val nema uvijek istu brzinu. U zraku se tako val kreće brzinom 340 m/s, u vodi je malo brži s 1500 m/s, dok je u željeznoj žici brzina čak 5000 m/s. Brzina širenja zvuka ovisi o uvjetima okoline, o temperaturi, o vlažnosti zraka (ako je medij zrak). Zanimljivo je da što je materijal gušće građe, zvuk kroz takav medij prolazi brže (npr. metalna ploča).

## 6.2 Veličine kojima opisujemo zvučni val

Zvuk je longitudinalni val (slika 2.), a opisujemo ga karakterističnim veličinama vala; amplituda, period, frekvencija, valna duljina i brzina širenja. Veza između brzine zvučnog vala ( $c$ ), frekvencije ( $f$ ) i valne duljine daje izraz:  $c=f\lambda$ .

Frekvencija je fizikalna veličina koja izražava broj titraja koje čestice medija kroz koji zvuk prolazi naprave u jednoj sekundi, mjerna jedinica je Hz. Zvukovi ispod 16 Hz su infrazvukovi, više od 20 000 Hz zovemo ultrazvukom. Kod zvučnih valova, frekvencija je upravo ona veličina koja izražava ono što mi znamo kao visinu tona; primjerice, ton  $a$  na koji se orkestar štima ima u pravilu frekvenciju 440 Hz, dakle dogodi se 440 titraja u jednoj sekundi.

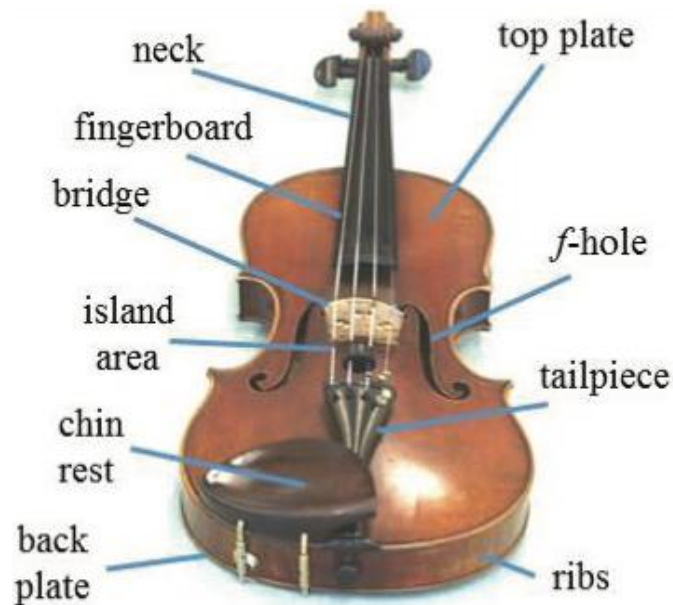
Valna duljina je udaljenost dvaju susjednih točaka s najvećim zgušnjenjima ili razrjeđenjima u mediju kojim se zvuk širi. Može se kraće objasniti na dva načina, udaljenost između dvije susjedne čestice na valu koje jednako titraju (titraju u fazi), dakle imaju jednaku elongaciju i smjer gibanja, ili se može definirati kao udaljenost koju val prijeđe za vrijeme jednog perioda titranja čestica vala.

U akustici je spektar valnih duljina, odnosno frekvencija relativno velik. Zvuk koji mi čujemo je u rasponu od oko 16 Hz do oko 20 kHz, odnosno valovi valne duljine veće od 20 m i manje od 2 cm, što je više od 10 oktava. Oktava je spektar frekvencija u kojem omjer gornje i donje granice spektra iznosi 2.

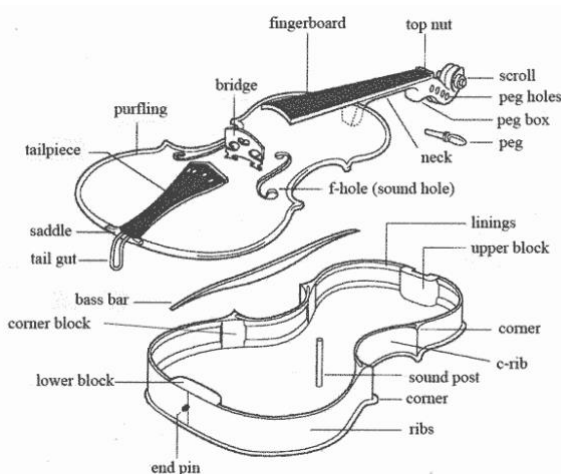
Amplitudu objašnjavamo kao otklon od srednje vrijednosti one veličine kojom opisujemo zvučni val, odnosno titranje. Kod titranja odnosno valova na žici, jednostavnije je reći da je to pomak iz ravnotežnog položaja. Amplituda je veličina osjetljiva na promjenu tlaka zraka. Dakle ako se ona povećava, mi čujemo pojačavanje zvuka, ako se smanjuje čujemo stišavanje do granice gdje više ne čujemo zvuk. U akustici se zato uvela mjerna jedinica decibela (dB) koja izražava logaritam omjera amplitude i pripadajućeg tlaka zraka, što je mnogo jednostavnije izražavanje i shvaćanje ove veličine, od iznosa njene osnovne i referentne razine koje mogu biti razlike reda veličine  $10^6$ , što nije najpraktičnije izražavanje u fizikalnom smislu.

## 7. Građa i akustika violine

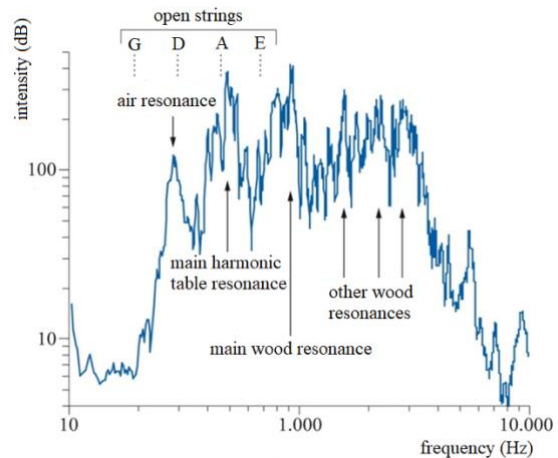
Akustika violine se fizički može objasniti kao šuplja rezonantna kutija s tankim rezonantnim pločama i ponaša se kao oscilator. Na kvalitetu zvuka koji razlikuje tvorničku violinu iz dućana i najprofinijeg Stradivarija utječu vibracije i akustičke propozicije fizičkog izgleda instrumenta. Uz tanke drvene ploče i simetrično tijelo, možemo povezati akustiku violine s violom, pa s violončelom i na kraju s kontrabasom, ali mi ćemo se samo fokusirati na akustiku violine. Kao primjer za osnovni prikaz violine i njezinih dijelova uzeli smo francusku violinu iz 19. stoljeća (Slika 4.) i malo detaljniji prikaz (Slika 5.).



Slika 4. Osnovni dijelovi violine



Slika 5. Detaljnija građa violine



Slika 6. Grafički prikaz akustike violine, rezonancija pojedinih praznih žica

Akustiku violine kakvu danas poznajemo, postigli su talijanski majstori spomenuti na početku ovog rada, Amati, kao graditelj najstarije očuvane violine, potom Guarneri i Stradivari koji su doveli akustiku violine do današnje profinjenosti i specifičnosti. Zanimljivo je kako su majstori tada znali točno kako i čime napraviti instrument s nevjerojatnim proporcijama, lijepim izgledom i akustikom koju se danas ne može postići gradnjom. Zahvaljujući zajedničkom radu graditelja violina, kustosa,

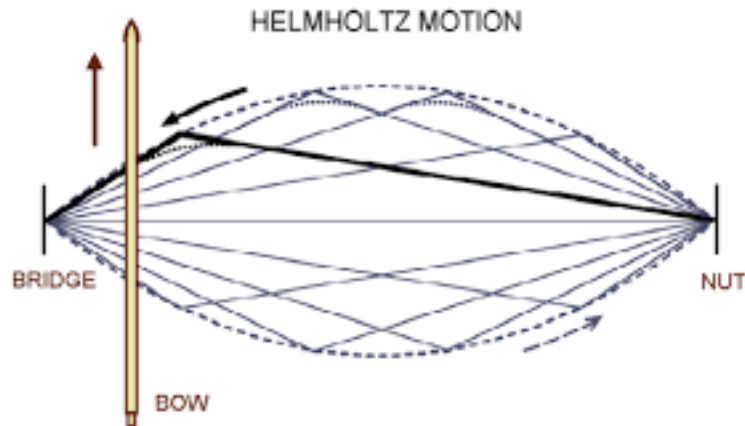
violinista, vlasnika violina i akustičara, danas imamo informacije i objašnjenje zašto su talijanski instrumenti iz 17. stoljeća po akustičkim predispozicijama bolji nego ijedni drugi. Ova saznanja i objašnjenja otvaraju nova vrata današnjim modernim graditeljima violina koji bi se mogli približiti uz pomoć znanosti nekadašnjem savršenstvu zvuka violine. Čak i Stradivarijevi instrumenti koji su očuvani ne zvuče kako su zvučali nekad jer su i oni modernizirani kako bi instrumenti reagirali na povećanje virtuoznih zahtjeva sviranja violinista i da bi mogli projicirati zvuk kroz velike koncertne dvorane kakve danas imamo.

Violine se zato ne sviraju s crijevnim žicama kao nekad nego imamo metalom obložene žice, imaju izduženi vrat, drugačije se štimaju i imaju moderni konjić te moderno gudalo.

## 7.1 Helmholtzove vibracije

Violinska kutija projicira zvuk laički rečeno kao glasni zvučnik. Vibracije kutije uzrokuju fluktuacije unutar kutije, što potiče Helmholtzove vibracije f otvora. Da bismo razumjeli kako je žica podražena pomakom gudala, i kako različit dodir struna i žice utječe na dinamiku i boju svakog tona, prvo trebamo objasniti kako se žica normalno ponaša ispod gudala. S obzirom da žice za vrijeme sviranja titraju velikom frekvencijom nevidljivom ljudskom oku, i da ona ovisi o kojoj žici se radi dakako, jasno je da stoji znanstveno objašnjenje iza toga kako se žica giba i proizvodi taj specifičan zvuk. Njemački fizičar Hermann von Helmholtz je našao način da objasni upravo ovu pojavu na zanimljiv način. Koristeći vibracijski mikroskop, imitirao je ponašanje žice u kontroliranom okruženju. Otkrio je da u svakoj točki žice, žica varira između dvije brzine i ne miče se sinusoidnim pokretom s jednog na drugi kraj kako se mislilo, već je žica sastavljena od dva ravna dijela s relativno oštrim vrhom. Ovaj vrh, koji se zove Helmholtzov kut, putuje žicom gore-dolje, i za a žicu se to događa 440 puta u sekundi (frekvencija). Zbog ovog kuta nam se žice kad gledamo prostim okom prikazuju kao sinusoidno titranje koje nam je poznato kad gledamo žicu dok se svira, ali mikroskopski gledano, ovo je objašnjenje.



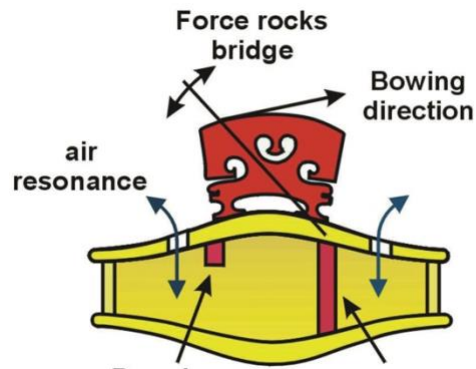


Slika 7. Helmholtzov pokret žice i kut

Vibracijama rubova proizvode se fluktuacije unutar kutije instrumenta, što pobuđuje Helmholtzovo rezoniranje f otvora. Helmholtzove rezonancije su lokalizirani protoci zraka koji ulaze i izlaze naizmjenice kroz f otvore na gornjoj dasci violine. Frekvencija rezonancije je određena veličinom i geometrijom f otvora i kompresibilnošću zraka unutar kutije. Ovo jako pomaže projiciranju zvuka nižih frekvencija.

Pokreti gudalom po žici proizvode silu s pilastim valom koji utječe na konjić. Same žice pritišću konjić velikom silom, a zbog dušice koja se nalazi između gornje i donje daske, pokreti gudala uzrokuju da se konjić također pomiče naprijed nazad.

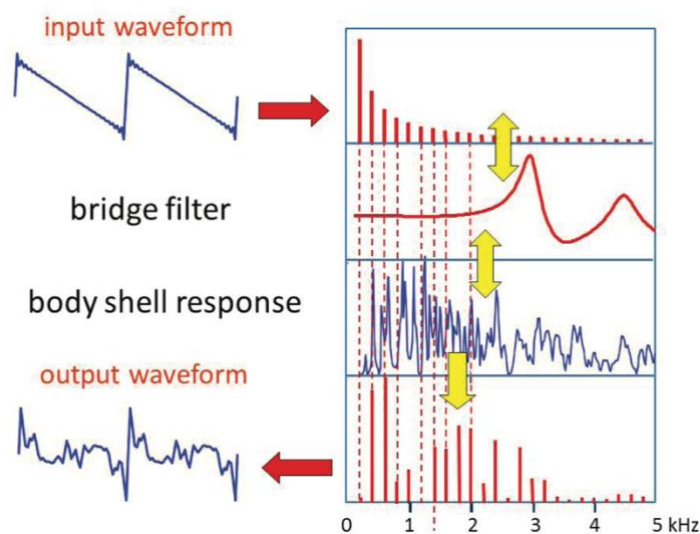
Naravno, ovo su infinitezimalni pomaci koji se mogu shvatiti i kao superpozicija, a djeluju okomito na smjer kretanja gudala. Konjić i područje između njega i žičnjaka djeluju kao akustični transformator koji „skuplja“ vibracijsku energiju iz titranja žice i šalje ju kroz f otvore i dušicu da se proširi cijelim instrumentom i vibrira gornjom i donjom daskom. Daljnje vibracije kroz rezonantnu kutiju ćemo objasniti kasnije.



Slika 8. Shematski prikaz vibriranja u konačnici cijelog instrumenta zbog Helmholtzove rezonancije  $f$  otvora, uzrokovana povlačenjem gudala i posljedičnim asimetričnim pomicanjem konjića

Da bi violina proizvela zvuk, očito je da vibracije žice trebaju prenijeti energiju u ostatak instrumenta preko konjića. Kao rezultat, svaka žica daje svoj dio u ukupnu rezonanciju instrumenta silom trenja koja se događa između žice i gudala namazanog kalofonijem.

Ako je žica čija vibracija doprinosi Helmholtzovom valu previše povezana s osnovnom rezonancijom instrumenta, i potez s najmanjim trenjem između žice i strune neće moći iskontrolirati val na određenom tonu. Ton potom skače za oktavu ili stvara neugodan, grakćući zvuk, više poznat kao „vuk“. Ova mana prati i najbolje violine i utječe na mogućnost postizanja tona, pogotovo kod nekih violončela.



Slika 9. Transformacija vala dobivenog strunama u projicirani zvuk čije su vibracije preko konjića prešle u rezonantnu kutiju

## 7.2 Zvuk koji violina stvara

Zbog multirezonantnosti violine i različitog odgovora instrumenta na razne podražaje, zvučni val koji dobijemo na van je različit od Helmholtzovog vala koji smo inicijalno postigli i rezonirali kroz violinsku kutiju. Zvuk varira od note do note, čak i na jednoj noti, ovisno o količini i vrsti vibrata koji je na njoj upotrijebljen. Percepcija zvuka violine je prepoznatljiva, ali istančanom uhu su dakako čujne promjene gudala i žica i kvaliteta istih, što razlikuje i same violine. Sve fluktuacije u frekvenciji, amplitude, čak i na jednoj noti jako utječu na kvalitetu zvuka violine. Kompleksnost zvuka leži na mnogim parametrima poput smjera gudala, upotreba vibrata, upotreba određenog dijela struna (manje ili više struna), sile trenja i superpozicija refleksije valova od rubova rezonantne kutije. Svi ovi faktori mijenjaju percepciju zvuka u uhu i omogućuju mozgu da se fokusira na zvuk i njegovu projekciju.

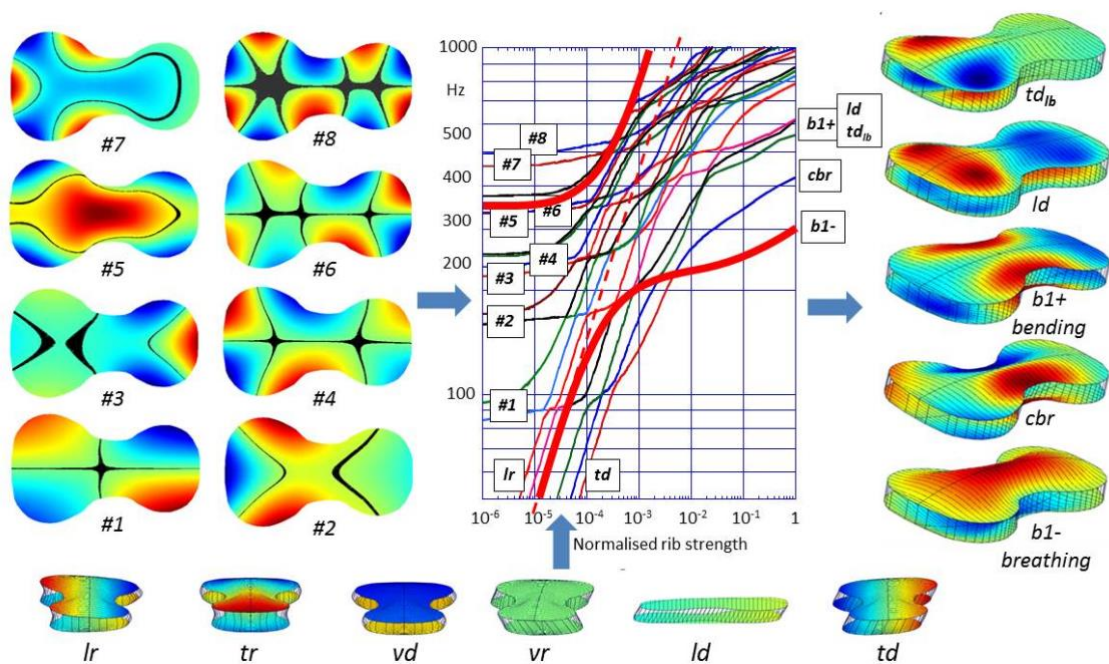
## 8. Akustički spektar

Frekvencijski spektar violine je relativno velik i specifičan je za svaku violinu zasebno, što će razlikovati međusobno neke od najboljih Stradivarija, a pogotovo Stradivarija i možda tvorničku violinu.

Na niskim frekvencijama pronađeno je da „lošije“ violine obično imaju jako slab zvuk bez specifične projekcije, dok je na visokim frekvencijama odgovor violine jako ovisan o vibraciji konjića. Ovo se lako dokazuje dodavanjem sordine na konjić specifične mase i oblika, što povećava kvalitetu tona na visokim frekvencijama i s upotrebom sordine, dovodi do „toplijeg“ i „mekšeg“ zvuka. Zaključujemo da veličina i masa konjića, kao i njegov dizajn jako utječu na zvuk instrumenta.

Uspješni model koji pokazuje načine rezoniranja violine ustvari objašnjava razliku između sklopljene rezonantne kutije i svake rezonantne ploče individualno, i pokazuje kako se ploče ponašaju spajanjem i protokom zraka kroz kutiju, postavljanjem dušice, žica, hvataljke, žičnjaka.

Izrađen je softver koji može demonstrirati vibracije i rezoniranje svake individualne ploče nakon spajanja u rezonantnu kutiju, naravno s pojednostavljenim modelom violine. Ovo uključuje variranje utjecaja svake pojedine komponente kako bismo razumjeli efekt spajanja u jednu cjelovitu rezonantnu kutiju. Na slici 10. vidimo ilustraciju transformacije vibracija svake individualne rezonantne ploče u cjelokupnu rezonantnu kutiju spojenu na krajevima. Ovo je iznimno važno graditeljima violina koji savijaju i prilagođavaju rezonantne ploče kako bi postigli optimalne propozicije za dobru violinu. Načini rezoniranja i vibracije violine gornje i donje daske su izračunati variranjem izdržljivosti bočnih ploča nakon spajanja rezonantne kutije kroz šest redova veličine (od nule, odnosno zasebne ploče, do normalne vrijednosti za debljinu od 1mm, visinu 3 cm). Upravo to vidimo na slici, na lijevoj strani je 8 načina rezoniranja zasebne rezonantne ploče, a na desnoj nekoliko prikaza vibracija rezonantne kutije nakon uravnoteženog spajanja.



Slika 10. Transformacija vibracija iz zasebnih gornjih i donjih ploča u vibracije kompletno spojene violine čija se vrijednost najbolje mjeri na bočnicama

Ploče koje su nekad bile samostalne, u spojenom obliku veliku ulogu u vibracijama im igraju sami rubovi duž cijele rezonantne kutije. Sami rubovi ne smiju činiti

prepreku vibracijama ili na sebi imati bilo kakve neravnine ili ograničenja, jer to utječe na projekciju zvuka.

Na višim frekvencijama, dakle iznad 10 kHz, vibracije cjelokupne violine na određenoj rezonantnoj frekvenciji ovise o količini stojnih valova sličnih valnih duljina i njihov raspored u kutiji te gornjoj i donjoj ploči.

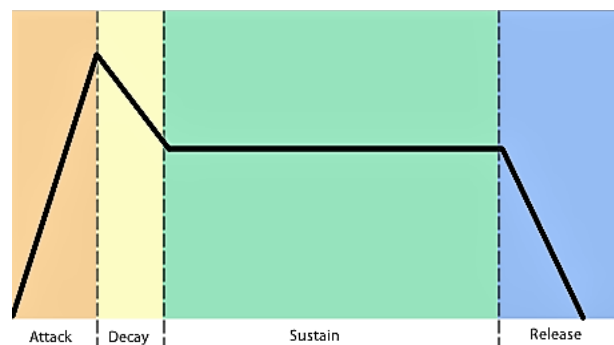
Potom treba obratiti pažnju na vibracije ostalih dijelova konačne violine. Vrat violine i hvataljka povezani su s rezonantnom kutijom. Dodatkom ovih dijelova dodajemo još šest novih vibracijskih razina, od kojih je najvažnija vibracijska razina duljinom vrata i hvataljke, koja najznačajnije utječe na ukupnu vibraciju rezonantne kutije, ali opet minimalno. Dušica je ključan dio koji spaja gornju i donju ploču i uravnotežuje vibracije, a i olakšava gornju ploču jer je donja uvijek građena od čvršćeg drva jer svakako dobiva više vibracija, a gornja je građena od nježne smreke.

Ovo objašnjenje akustike violine, odnosno ovaj model koji uključuje vibracijske sposobnosti rezonantnih ploča spojenih bočnim pločama u cjelokupnu kutiju, dušicu, vibracije vrata i hvataljke, a naravno i žičnjaka i žica koje su okidač. Ovaj model je tipična teorija oscilatora i može se primijeniti na sve vibracijske i akustičke propozicije violine i srodnih instrumenata.

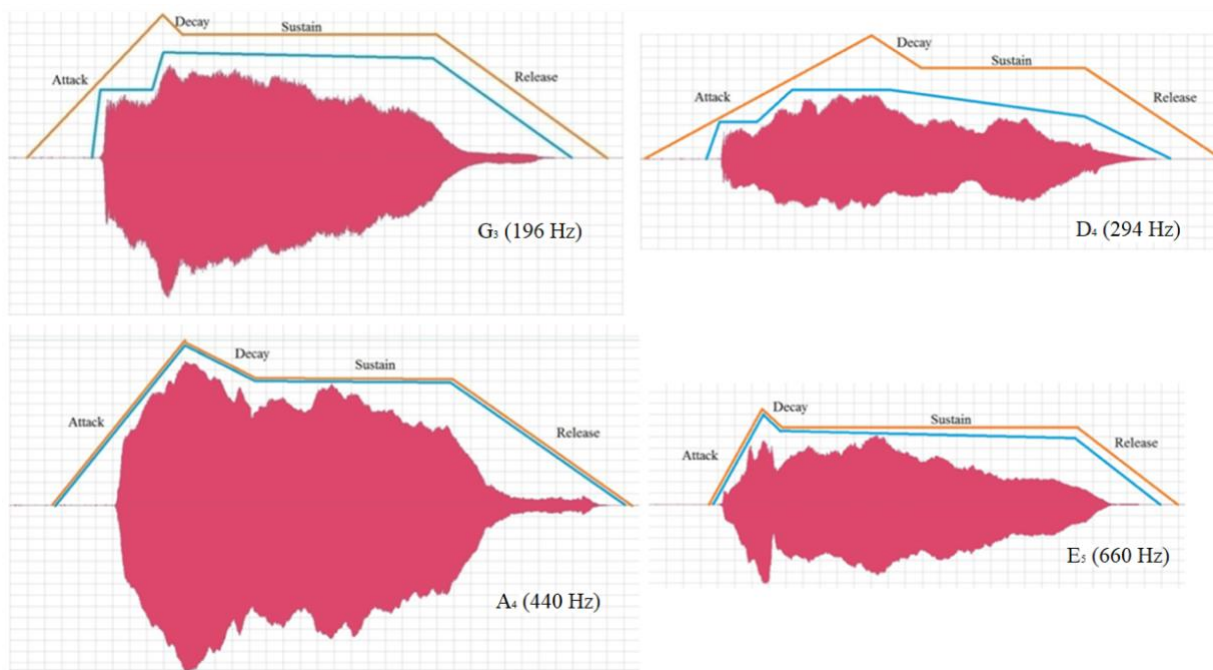
## 9. Tonska ovojnica

Proučavanje akustičkih karakteristika nekog instrumenta se u principu dijeli na dvije faze; prva je harmonijska analiza koja povezuje intenzitet zvuka s određenom frekvencijom, a druga faza proučava tonsku ovojnica, tj. ADSR ovojnica koja je najtipičnija tonska ovojnica. Oba tipa analize su potrebna za karakterizaciju akustičkih predispozicija nekog instrumenta. Izraz tonska ovojnica opisuje promjenu amplitude zvučnog vala od njegovog nastanka, pa sve dok ton ne nestane. Svaki zvuk ima karakteristični razvoj, zato razlikujemo svaki instrument. Kad pritisnemo tipku na klaviru, čujemo instantni „udar“ zvuk, potom na violini ili flauti možemo postići zvuk koji se razvija i traje koliko god izvođač to želi. Zato imamo dva osnovna oblika tonske ovojnice; slobodni razvoj, u kojem izvođač ne može učiniti previše da nakon početka tona pojača dinamiku ili produlji ton koliko želi, ton će kad-tad nestati

(npr. gitara, klavir, čembalo), i imamo kontrolirani razvoj, u koji spadaju gudački instrumenti koji itekako mogu držati ton, tu spada violina na koju se mi fokusiramo. Već spomenuta tipična ADSR ovojnica ima četiri faze i skraćenica je prvih slova ovih četiriju komponenata. Udar (attack) je faza od nastanka tona do njegovog najvećeg intenziteta, primjerice kod klavira nastaje odmah, a zaključili smo da kod violine ovisi o sviraču, on ton može produljiti. Stišavanje (decay) je kratka i nagla promjena u amplitudi nakon udara koja dovodi do stabilizacije. Treća faza je zadržavanje (sustain) u kojoj je zvuk stabilan sve dok se ulaže energija u njegovu stabilizaciju, dakle povlačenje gudala ili držanje tipke dok se ne otpusti. Zadnja faza je otpust (release) u kojoj izvođač jednostavno prestaje ulagati energiju i ton prestaje (konačno stišavanje). Ovime smo raščlanili tonsku ovojnicu i zaključili da ton na violini može biti itekako kontroliran i s obzirom da violina ima veliki dinamički raspon (pianissimo 58 dB, a fortissimo i do 99 dB), jednim tonom možemo dokazati sve četiri faze tonske ovojnice.



Slika 11. Četiri faze tonske ovojnice



Slika 12. Tonska ovojnica Bernardinijeve violine iz 2006. godine, ADSR praznih žica. Primjetimo da svaka žica ima svoju frekvenciju, i na svakoj žici svakako možemo postići sve četiri faze tonske ovojnice

## 10. Zaključak

Gradnja violina je vrlo kompleksan proces i svaki korak koji poduzmemo u proučavanju znanosti koja stoji iza zanata stižemo malo bliže postizanju izvanrednih instrumenata koje poznajemo samo iz poznatih talijanskih obitelji. Akustika violine je kompleksna stvar i kao što smo objasnili u ovom radu, može se objasniti na nekoliko načina. Svaki violinist koji razumije akustiku koja stoji iza njegovog instrumenta će mu olakšati kontrolu nad instrumentom, postizanje profinjenijeg i ljepšeg zvuka te će znati bolje projicirati zvuk. Ovo, ali puno detaljnije proučavaju graditelji violina. Violine izgrađene na sliku onih iz 16. stoljeća, mogu se pohvaliti oku prisnom simetrijom, ljepotom, i čine jednu posebnu granu umjetnosti. Violina stvara glazbu, a glazba oplemenjuje. Svaki pomak gudala, trzaj žice, svaka vibracija koja prolazi kroz tijelo violine je mala kapljica koja čini konačni plemeniti zvuk po kojem je ovaj divan instrument itekako prepoznatljiv.

## 11. Oznake

Hz: herz, jedinica frekvencije

dB: decibel, jedinica intenziteta zvuka

mm: milimetar, jedinica duljine

cm: centimetar, jedinica duljine

Pa: paskal, jedinica za tlak

μPa: mikropaskal, jedinica za tlak

bar: jedinica za tlak

m/s: metar po sekundi, jedinica za brzinu



## 12. Literatura

- Berdahl, E. J.; Smith III, J. O. (2007). *Traveling Waves In A Vibrating String*. Stanford: Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA), and the Department of Electrical Engineering, Stanford University.
- Burroughs, C. B.; Wang, L. M. (1999). *Directivity Patterns of Acoustic Radiation from Bowed Violins*. Lincoln: University of Nebraska.
- Fletcher, N. H.; Rossing, T. D. (1997). *The Physics of Musical Instruments*. New York: Springer Science+Business Media.
- Forster, S. A.; Sandys, W. (2006). *History of the violin*. New York: Dover Publications, Inc.
- Gough, C. E. (2016). *Violin acoustics*. Birmingham: School of Physics and Astronomy, University of Birmingham.
- Gough, C. E. (2016). „Modelling violin modes“. U: *Acoustics today*. Internet. 10. lipnja 2022.
- Grubeša, S.; Petošić, A.; Suhanek, M. (2018). *Osnove akustike, buka okoliša i zvučna izolacija te mjere za zaštitu od buke u otvorenom i zatvorenom prostoru*. Zagreb: Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu.
- Herak, J. (2001). *Osnove kemijske fizike*. Zagreb: Farmaceutsko-biokemijski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- Leccese, F. (2018). *The bowed string instruments: acoustic characterization of unique pieces from the Italian*. IOP Publishing Ltd.
- Lokki, T.; Pätynen, J. (2010). *Directivities of Symphony Orchestra Instruments*. Helsinki: Helsinki University of Technology, Department of Media Technology.
- Mansour, H. (2016). *The bowed string and its playability: Theory, simulation and analysis*. Montreal: Department of Music Research, McGill University.