

# UTJECAJ ZVUČNIH VALOVA NA PLAMEN

---

Silaj, Josip

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:746170>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-19**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel sigurnosti i zaštite

Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Josip Silaj

# **UTJECAJ ZVUČNIH VALOVA NA PLAMEN**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2019

Karlovac University of Applied Sciences  
Safety and Protection Department

Professional graduate study of Safety and Protection

Josip Silaj

# **Sound wave impact on flame**

Final paper

Karlovac,2019

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel sigurnosti i zaštite

Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Josip Silaj

# **UTJECAJ ZVUČNIH VALOVA NA PLAMEN**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

dr.sc.Zvonimir Matusinović

Karlovac,2019



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Trg J.J.Strossmayera 9  
HR-47000, Karlovac, Croatia  
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510  
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni/specijalistički studij: **Sigurnost i zaštita**

Usmjerenje: **Zaštita od požara**

Karlovac, 23.8.2019.

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Josip Silaj

Matični broj: 0420411026

Naslov: Utjecaj zvučnih valova na plamen

Opis zadatka:

- opisati procese gorenja
- opisati temperature i boje plamena
- opisati djelovanje zvuka
- odrediti raspon frekvencija potrebnih za gašenje plamena
- proučiti utjecaj zvučnih valova na plamen

Zadatak zadan:

17.3.2019.

Rok predaje rada:

28.8.2019.

Predviđeni datum obrane:

26.9.2019.

Mentor:

dr.sc. Zvonimir Matusinović, pred.

Predsjednik ispitnog povjerenstva:

dr.sc. Nikola Trbojević, prof. v.š.

## PREDGOVOR

Ovim završnim radom završava se i zaokružuje moje ukupno petogodišnje obrazovanje na Veleučilištu u Karlovcu. Zahvaljujem se svim kolegama studentima na zajedničkim predavanjima i druženjima te svim profesorima Odjela sigurnosti i zaštite - smjer zaštita od požara na pruženom znanju, a posebno se zahvaljujem mentoru dr.sc.Zvonimiru Matusinoviću koji mi je svojim stručnim savjetima i znanjem pomogao u izradi ovog završnog rada.

Najveće zahvale idu mojoj obitelji koja mi je bila najveća podrška tijekom cjelokupnog petogodišnjeg obrazovanja, koja je vjerovala u mene i moj uspjeh od samog početka te mi pružala motivaciju do samoga kraja.

## SAŽETAK

U današnje vrijeme gašenje požara ima mnoge razne nedostatke.. Potreba za novim tehnikama i sredstvima za gašenje požara od bitne je važnosti jer požari nanose materijalnu štetu i vrlo često završavaju sa ozljedama i smrtnim ishodom. Zvučni val mogao bi biti potencijalna alternativa za današnje načine gašenja požara. Zvučni tlak i brzina zraka proizvedeni iz zvučnika glavne su karakteristike istraživanja koje je provedeno u ovom radu.. Cilj završnog rada je proučavanje i analiza utjecaja različitih frekvencija zvučnog vala na plamen. Napravljena je simulacija zvučnog vala koja proučava širenje zvučnog vala u usmjerivaču zvuka. Korištene su tri različite vrste gorivih tvari –kruto, tekuće i plinovito gorivo.. Kombinacija izmjenjujućih visokih i niskih tlakova zajedno sa velikom brzinom strujanja zraka uzrokuje poremećaje u odnosu zraka i goriva te dovodi do smanjenja graničnog sloja plamena i na kraju gašenja plamena. Sustav gašenja požara zvukom bio bi zasada uspješan samo u početnim stadijima požara, te ga, zasada nije moguće primjenjivati u daljnjim stadijima požara.

**Ključne riječi:** plamen, zvuk, val, utjecaj

## ABSTRACT

Nowdays, firefighting has many varied disadvantages. The need for new techniques and means of firefighting is essential because fires cause material damage and very often end with injuries and fatalities. A sound wave could be a potential alternative to common firefighting methods. The sound pressure and air velocity produced from the speakers are the main features of this research. The aim of this research in this final paper is to study and analyze the effect of different frequencies of a sound wave on a flame. A simulation of sound wave was carried out to study behavior acoustic wave propagation in the collimator and surrounding environment. Three different sources of flames were used to with three different state of fuel—solid, liquid and gas. The combination of varying high and low pressure and coupled with high flow air velocity, which in then causes disturbances in air–fuel ratio at the flame boundary (leading to thinning of flame boundary), is one of the possible explanation leading to flame extinction. The sound extinguishing system for the time being would be successful on its own in the initial stages of fire and cannot be used for further stages of fire.

**Key words:** flame, sound, wave, effect



	Stranica
ZAVRŠNI ZADATAK.....	I
PREDGOVOR.....	II
SAŽETAK.....	III
SADRŽAJ.....	IV
1. UVOD.....	1
2. VATRA.....	2
2.1. Povijest.....	2
2.2. Otkriće vatre.....	3
3. GORENJE.....	5
3.1. Vrste gorenja.....	6
3.1.1. Potpuno izgaranje.....	6
3.1.2. Nepotpuno izgaranje.....	7
3.2. Plamen.....	8
3.2.1. Boja plamena.....	9
3.2.2. Temperatura plamena.....	12
3.3. Svjetlost.....	16
3.3.1. Boje.....	17
3.3.2. Doprinosa Ruđera Boškovića tumačenju svjetlosti.....	19
4. ZVUK.....	20
4.1. Ton.....	21
4.2. Izvori zvuka.....	22
4.3. Val.....	23
4.3.1. Energija zvučnog vala.....	24
4.3.2. Glasnoća ili jakost glasa.....	27
4.3.3. Brzina zvuka.....	27
4.3.4. Zvučni zid.....	29
5. UTJECAJ ZVUČNIH VALOVA NA PLAMEN.....	35
5.1. Djelovanje zvučnog vala.....	35
5.2. Gašenje krutih tvari zvukom.....	39
5.3. Gašenje zapaljivih plinova zvukom.....	40

5.4. Gašenje zapaljivih tekućina zvukom.....	41
5.5. Vakuum efekt usmjerivača zvuka.....	42
6. ZAKLJUČAK	
7. LITERATURA	
8. PRILOG	
8.1. Popis slika	
8.2. Popis tablica	

## 1. UVOD

Sredstva za gašenje požara pokušavaju eliminirati jedan od elemenata koji su nužni za proces gorenja (požarni trokut) kako bi ugasili plamen. Gašenje požara u zatvorenim prostorima oduvijek nailazi na određene vrste problema kao što su ograničeno kretanje, pristup vodi, ugljičnom dioksidu ili drugim sredstvima za gašenje požara. Jednostavan, neovisan i pouzdan sustav za gašenje požara je potreban kako bi se riješili takvi problemi. Svemirske postaje i podmornice glavni su primjeri u kojima se takva nova tehnologija može primjenjivati.

Utjecaj zvuka na plamen nije novo otkriće. Ponašanje plamena uslijed djelovanja zvuka otkriveno je još polovicom 19.st., ali se proučavanju utjecaja zvuka na plamen dalo puno više značaja u posljednjih desetak godina. DARPA (Američka agencija za razvoj i istraživanje) prva je 2008.g. uspješno izvela pokuse gašenja plamena zvukom.

## **2. VATRA**

Vatra (iz ilirskog ili iz tračkog koji je prvo značio “ognjište”, kao rumunjski. vatră ili albanski. vatër/votër; oganj) je prirodna pojava koja prati neke kemijske procese, posebno burnu oksidaciju organskih tvari, pri čemu nastaje toplina i svjetlost (gorenje). Vatra je vidljiva kemijska reakcija i to je ujedno brz, samoodrživ oblik oksidacije tijekom kojeg gorivo emitira gorući užareni plin u obliku pomičnog svjetlećeg plamena. Vatra može biti i obojana raznim pirotehničkim kompozicijama.

### **2.1. Povijest**

Vatra je bila jedan od ključnih elemenata u evoluciji modernoga čovjeka. Jedna je od adaptivnih prednosti (poput izradbe i uporabe oruđa te govora) koje su ljudima omogućile preživljavanje u različitim životnim uvjetima. Pružala je toplinu, zaštitu od divljih životinja, omogućila promjenu prehrambenih navika (kuhanje hrane), uspješniji lov i dr. Prema arheološkim nalazima, pretpostavlja se da je vatra ljudima (*Homo erectus*) bila poznata prije približno 300 000 godina. U početku su se ljudi služili vatrom koja je nastala prirodno (udarom groma, iz vulkana, spontanom trenjem ili šumskim požarom), a poslije su ju izazivali i sami, vjerojatno trljanjem suharka o suharak ili izbijanjem iskre s pomoću kremenjača. U staroj Kini, Heladi i Peruu upotrebljavala su se zrcala s pomoću kojih se, refleksijom i koncentriranjem Sunčevih zraka, palila vatra.

O iznimnoj važnosti vatre u kulturnom razvoju čovjeka svjedoče mnogobrojne legende i mitovi o pronalasku vatre što dolaze u gotovo svim kulturama svijeta. Prema legendama različitih australskih plemena, do vatre se dolazi odlaskom u podzemlje ili ona nastaje u borbi sa zmijama (štap kojim se ubijaju zmije puca i iz njega izbija vatra). Na sličan način nastaje vatra i u perzijskom mitu (prema spjevu Šahnami): junak gađa zmiju, ali ju promaši, kamenom udara o stijenu i nastaje prva vatra. Isto tako (udarcem od kamen) i u nordijskoj (helenskoj) mitologiji, Prometej buktinjom prenosi vatru sa Sunčevih kola na zemlju. Vrlo je čest motiv otmica ili krađa vatre od bogova (kako kod starih Grka tako i kod naroda Afrike, Azije, Južne Amerike i Australije).

Svaka vrsta vatre, unutar mitološkoga i religioznog sustava neke zajednice, ima svojega boga i ognjište, oltar (Hestija, Apolon, Helije, Loki, Lug i dr.). U svijetu magije vatra je pročišćavajući (purifikacijski) element, što se zadržalo i u kršćanskom mitu. Održavanje i

prenošenje vatre sačuvalo se, uza sve specifične modifikacije, od prastaroga kulta ognjišta do modernih Olimpijskih igara. Obožavanje vatre zastupa možda najbolje kult Sunca. Među istaknutim su obožavateljima vatre bili stari Meksikanci, Asirci i Feničani. Glavni bog starih Arijaca bio je bog ognja Agni (usp. lat. *ignis*).

Štovanje vatre održalo se u hinduizmu i zoroastrizmu sve do danas. Simbol vatre zauzima jedno od najistaknutijih mjesta u ljudskoj simbolici, povezan s najvažnijim trenutcima egzistencije (rođenjem, ljubavlju i smrću). Ponovno rađanje iz pepela, žarka ljubav i plamen ljubavi, v. propasti i slične figure, govore o privlačnosti i užasu koje taj fenomen sadrži. Koliko je god teško bilo doći do vatre, još ju je teže bilo održavati. Stoga je održavanje vatre bila jedna od najvažnijih dužnosti staroga svijeta, tradicijskih društava i religioznih ustanova. Vječite vatre koje gore u hramovima danonoćno održavali su Egipćani, Grci, Rimljani, Perzijanci i Peruanci, katolici i pravoslavci. Ako bi se ugasila vatra koju su čuvale svećenice (vestalke) u rimskom hramu Veste, morala je prestati svaka javna djelatnost. U Heladi je pritanej (mjesto gdje se izvorno čuvala vječna vatra) bio središte društvenog života. Prisega ognjištem smatrala se najjačom, a i molitva povezana s njom. Ognjište je sjedište lara i penata, ugašena vatra na njem smatrala se uvijek jednim od najgorih znakova. Prema vjerovanju antičkog svijeta i mnogih tradicijskih kultura, i duša je sastavljena od vatre. Aristotel smatra da je Zeus ime za nebesku vatru.

Vatra je bit same prirode i svega što postoji (Heraklit). Brahma, Oziris, meksički Quetzalcoatl, skandinavski Tor, galski Taranis i slavenski Perun, veliki su bogovi vatre. Stari su narodi vjerovali da će svijet skončati u velikom požaru, što proriču i Biblija i skandinavske sage.[1]

## **2.2. Otkriće vatre**

Kada smo naučili kontrolirano koristiti vatru, počelo je vrijeme tehnološkog napretka čovječanstva. Vatra je ubrzo poboljšala kvalitetu života naših predaka jer je pružala svjetlost, toplinu, zaštitu te je omogućila izradu različitog kamenog alata. Otkrićem vatre (Slika 1.), ljudi su počeli kuhati hranu, što je, tvrde znanstvenici, uvjetovalo povećanje ljudskog mozga. Vatra je također imala ulogu obiteljskog i religioznog središta.



Slika 1. Otkriće vatre.[2]

Svrhovito korištenje vatre, omogućila je i migracije, jer jedino oni koji su ovladali vještinom kontroliranja vatre uspjeli su preživjeti surove prirodne uvjete. Smatra se da su ljudi otkrili vatru prije milijun godina, ali dugo se nije znalo kada su to počeli svakodnevno koristiti vatru, primjerice za kuhanje ili pečenje hrane.

U časopisu *Journal of Archeological Science*[3], objavljen je članak koji govori o fantastičnom otkriću u Izraelu. Naime, u pećini Qusem otkriveno je 300 000 godina staro ognjište, koje je korišteno tokom dužeg vremena, tako da je to najraniji dokaz o korištenju vatre tokom kontinuiranog vremenskog perioda. U ognjištu promjera dva metra pronađena je i prilično debela naslaga drvenog pepela te ostaci životinjskih kostiju i tla, koji su bili na visokim temperaturama. U pećini, koja je služila ljudima kao dom, pronađeni su i ostaci kamenog alata koji su korišteni za rezanje životinjskog mesa.

I bi svjetlost!

### 3. GORENJE

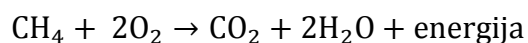
Gorenjem ili izgaranjem goriva može nastati plamen. (Slika 2.)



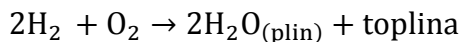
Slika 2. Prikaz gorenja.[4]

Gorenje ili izgaranje je kemijski proces, kod kojeg dolazi do oksidacije gorivih sastojaka nekog goriva. To je proces između goriva i oksidansa, u kojem se stvara toplina zbog promjene kemijskih sastojaka. Oslobađanjem topline može se pojaviti svjetlost, u obliku žarenja ili plamena. Goriva, interesantna za primjenu su najčešće organske tvari (posebno ugljikovodici) kao plinovi, tekućine ili krute tvari.

Kod potpunog izgaranja, gorivi sastojci reagiraju sa oksidansima, kao što su kisik ili fluor, i proizvodi su spojevi svih kemijskih elemenata u gorivu sa oksidansima. Na primjer:



Jednostavan primjer može biti gorenje vodika i kisika, koji se koristi za pogon raketnih motora:



Rezultat je vodena para.

Potpuno izgaranje je gotovo nemoguće postići. U stvarnosti, gorenjem dolazi do kemijske ravnoteže, gdje će biti prisutan velik broj različitih kemijskih spojeva, u većem ili manjem udjelu, kao recimo ugljikov monoksid ili čisti ugljik (čađa ili pepeo), uz proizvode gorenja. Dodatno, gorenje u atmosferskom zraku, koji sadrži 78% dušika, stvorit će čitav niz dušikovih oksida.[4]

### **3.1. Vrste gorenja**

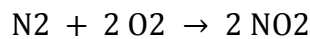
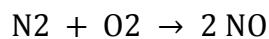
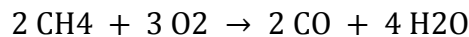
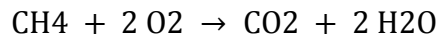
#### **3.1.1. Potpuno izgaranje**

Kod potpunog izgaranja, gorivi sastojci izgaraju u kisiku, stvarajući ograničen broj proizvoda. Kada ugljikovodik izgara u kisiku, kemijska reakcija će stvoriti samo ugljikov dioksid i vodu. Kada kemijski elementi izgaraju, nastaju prije svega oksidi tih elemenata. Ugljik će stvoriti ugljikov dioksid, dušik će stvoriti dušikov dioksid, sumpor stvara sumporov dioksid, a željezo stvara željezov (III) oksid.

Za gorenje nije najpovoljniji uvijek potpuni stupanj oksidacije i ono može ovisiti o temperaturi. Na primjer, sumporov trioksid se neće uvijek stvoriti gorenjem sumpora. Dušikovi oksidi se počinju stvarati iznad 1 540 °C i više dušikovih oksida se stvara sa većom temperaturom. Ispod tih temperatura, dušik ostaje u molekulama (N<sub>2</sub>). Proizvodi gorenja ovise i o višku ili pretičku kisika. Kod većine industrijskih primjena i u vatri, atmosferski zrak je izvor kisika (O<sub>2</sub>). U zraku, svaki 1 kg kisika je pomiješan sa približno 3,76 kg dušika. Dušik ne sudjeluje uvijek u gorenju, ali kod većih temperatura, dio dušika će se pretvoriti u dušikove okside (NO<sub>x</sub>), obično između 0,002% do 1%. Uz to, gdje je prisutan ugljik, dio



ugljika će se pretvoriti u ugljikov monoksid. Gorenje metana sastoji se od čitavog niza kemijskih reakcija:



### 3.1.2. Nepotpuno izgaranje

Nepotpuno izgaranje će se pojaviti samo onda kada nema dovoljno kisika, da omogući gorivu potpunu reakciju pri stvaranju ugljikovog dioksida i vode. Gorenje se može gasiti i sa odvodima topline, kao što su čvrsta površina ili rešetka za gorenje. Za većinu goriva, kao što je dizel, ugljen ili drvo, prije izgaranja se odvija piroliza. Kod nepotpunog izgaranja, proizvodi pirolize ostaju neizgoreni i pojačavaju dim sa štetnim tvarima i plinovima. Djelomična oksidacija može stvoriti i opasne tvari; djelomična oksidacija etanola stvara štetni etanal (acetaldehid), a ugljik stvara otrovni ugljikov monoksid.

Kvaliteta gorenja se može popraviti sa konstrukcijom uređaja za gorenje, kao što su plamenici ili motori s unutarnjim izgaranjem. Daljnja poboljšanja se mogu postići sa katalizatorima (kao što je katalitički pretvornik) ili jednostavnim djelomičnim vraćanjem ispušnih plinova u postupak gorenja. Takve uređaje zahtijevaju i zakoni o zaštiti okoliša, recimo za automobile u raznim državama, a potrebni su i za velike uređaje za izgaranje, kao što su kod termoelektrana, da bi postigli dozvoljenu razinu dimnih plinova.

Stupanj izgaranja se može mjeriti i proučavati opremom za testiranje. Dobavljači klimatizacije, vatrogasci i inženjeri, koriste uređaje za provjeru izgaranja, da bi proučili efikasnost plamenika i klipnih motora, za vrijeme izgaranja. Posebno je to važno za prijevozna vozila, kako bi se smanjilo zagađivanje.[4]

### 3.2. Plamen

Plamen (od latinskog *flamma*) je vidljivi (s emisijom svjetla), plinski dio vatre. To je pojava kod koje dolazi do izrazitog oslobađanja energije (egzotermna reakcija), pogotovo uslijed izgaranja (samoodrživa redoks reakcija – redukcija i oksidacija). Ako je plamen dovoljno topao da ionizira plinove, može se pojaviti i plazma.



Slika 3. Slojeviti plamen svijeće.[5]



Slika 4. Plamen drvenog ugljena.[5]

Boja i temperatura plamena ovisi o vrsti goriva koje sudjeluje u izgaranju, što možemo primijetiti ako držimo upaljeni upaljač u blizini upaljene svijeće. Ako upotrijebimo

toplinu na molekule fitilja svijeće, one će isparavati. U tom stanju, one mogu reagirati sa kisikom u zraku, što daje dovoljno topline, koja će ponovo isparavati molekule fitilja svijeće i tako održavati ravnomjerni plamen. Visoka temperatura plamena uzrokuje isparavanje i molekula goriva (vosak), koje se raspadaju, stvarajući različite produkte nekompletnog izgaranja i slobodne radikale (slobodni radikali su atomi, molekule i ioni, koji imaju neparan broj elektrona, pa su time izuzetno kemijski reaktivni), koji međusobno reagiraju i sa oksidansom koji je prisutan (oksidans je tvar koja prima elektrone i time oksidira druge tvari). Dovoljna energije u plamenu će pobuditi elektrone u nekim kratkotrajnim prijelaznim reakcijama, kao recimo nastanak  $C-H$  i  $C$ , koje rezultiraju u emisiji vidljive svjetlosti, budući da imaju višak energije. Što je temperatura izgaranja plamena veća, to je i veća energija elektromagnetskog zračenja, kojeg isijava plamen (vidi crno tijelo).

Osim kisika kao oksidansa i drugi plinovi se mogu uključiti u stvaranju plamena, kao na primjer, vodik koji izgara u klorovodiku, stvara plamen i emitira plinoviti klorovodik (HCl), kao proizvod izgaranja. Sljedeća kombinacija, jedna od mnogih, je reakcija hidrazina ( $N_2H_4$ ) i dušikovog tetraoksida ( $N_2O_4$ ), koja se obično koristi kao pogon za rakete – hipergoličko gorivo. Polimeri fluora mogu dovesti fluor kao oksidans za metalna goriva, npr. kombinacija magnezij/teflon/viton (MTV pirolant).

Kemijska kinetika koja se javlja kod plamena je veoma složena i obično uključuje velik broj kemijskih reakcija i međuprodukata, obično radikala. Na primjer, da bi se opisalo izgaranje bioplina, treba 53 vrste reakcija i 325 osnovnih reakcija.

Postoje različiti načini rasporeda komponenti kod izgaranja u plamenu. Kod difuzionog plamena, kisik i gorivo se spajaju tek kad se susreću u plamenu. Plamen svijeće je difuzioni plamen, jer prvo se dešava hlapljenje goriva, pa se stvara laminarno strujanje (slojevito) vrućeg plina, koji se miješa sa kisikom i sagorijeva.

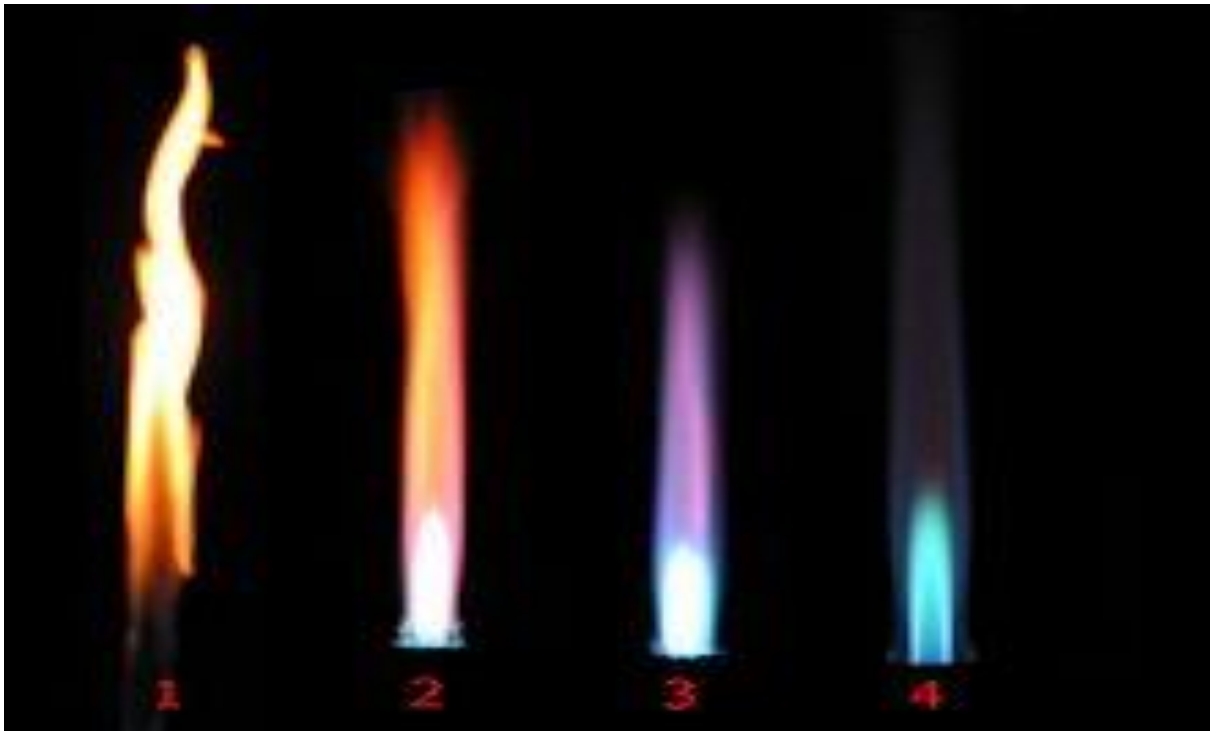
### 3.2.1. Boja plamena

Boja plamena (Slika 5.) ovisi o nekoliko čimbenika, najvažniji su tipična radijacija crnog tijela (isijavanje) i spektralni pojasevi, dok spektralne linije emisije i spektralne linije upijanja igraju vrlo malu ulogu. Kod tipičnog izgaranja ugljikovodika, boja plamena uglavnom ovisi o dovodu kisika i dobrom mješanju kisika i goriva, koje određuje stupanj izgaranja i time koja će se temperature postići.



Slika 5. Boja plamena svijeće.[5]

U laboratoriju, pod normalnom gravitacijom i sa zatvorenim ventilom kisika, Bunsenov plamenik (Slika 6.) će goriti sa žutim plamenom, na oko 1000 °C. To je zbog užarenosti jako malih čestica čađe, koje nastaju u plamenu. Sa povećanjem dovoda kisika, manje će biti prisutno isijavanje čađe, a više će doći do potpunog izgaranja i reakcija će stvoriti dovoljno energije da pobudi ionizaciju molekula plinova, što dovodi do plavičaste boje. Spektar dobro pomiješanog kisika i potpuno izgorenog butana, stvara plamen na desnoj strani slike plave boje, posebno zbog pobuđenih molekula radikala, koje emitiraju svjetlo ispod 565 nm, u plavom i zelenom području, vidljivog spektra svjetlosti.[5]



Slika 6. Različite vrste plamena kod Bunsenovog plamenika.[6]

Različite vrste plamena Bunsenovog plamenika, koje ovise o dovodu kisika. Na lijevoj strani je bogato gorivo bez pomiješanog kisika, stvara žuti čađavi difuzijski plamen; na desno je tanak, pun pomiješanog kisika, plamen, bez čađe i boju plamena stvaraju molekule radikala, posebno C-H i C pojasna emisija. Ljubičasta boja je smetnja zbog fotografskog procesa.

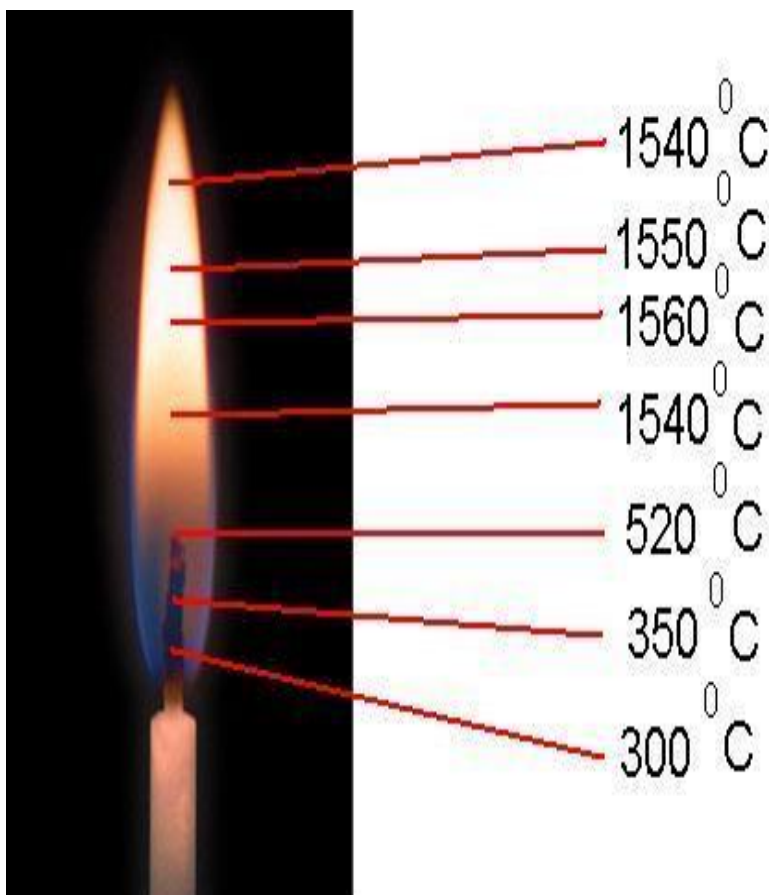
Temperature plamena običnog plamenika su oko 1600 °C, svijeće oko 1400 °C, propan plamenika oko 1995 °C, a mnogo topliji kisik + acetylen plamenik stvara 3000 °C. Cianogen (CN)<sub>2</sub> stvara čak i još topliji plamen, sa temperaturom 4525 °C, kada izgara s kisikom.

Hladniji difuzioni plamen (nepotpuno izgaranje) bit će crven, malo narančast i bijel, ako temperatura raste. Što je temperature veća, to će boja biti sve više bjelija. Prijelaz se može dobro opaziti kod vatre, blizu goriva je bijela boja, iznad toga je narančasta i na kraju plamena je crvena boja, a tim redom se i temperature smanjuje. Plava boja se pojavljuje samo ako se smanji količina čađi i ako pobuđene molekule radikala prevladavaju pa se tako plava boja može vidjeti blizu osnove svijeće, gdje je manje prisutno čađi.

Posebne boje mogu se dobiti dodavanjem tvari koje pobuđuju plamen, a u analitičkoj kemiji ta se pojava koristi u ispitivanju plamenom, da se utvrdi prisutnost nekih metalnih iona. U pirotehnici, neke se pirotehničke boje dodaju za stvaranje posebnih efekata za vatromet.[7]

### 3.2.2. Temperatura plamena

Temperatura plamen (Slika 7.) ovisi o mnogim stvarima, koje ga mogu mijenjati. Treba napomenuti da boja plamena ne određuje nužno i temperaturu plamena, jer emisija svjetlosti idealnog crnog tijela, nije jedina koja utječe na boju plamena pa je zato boja plamena samo približna procjena.



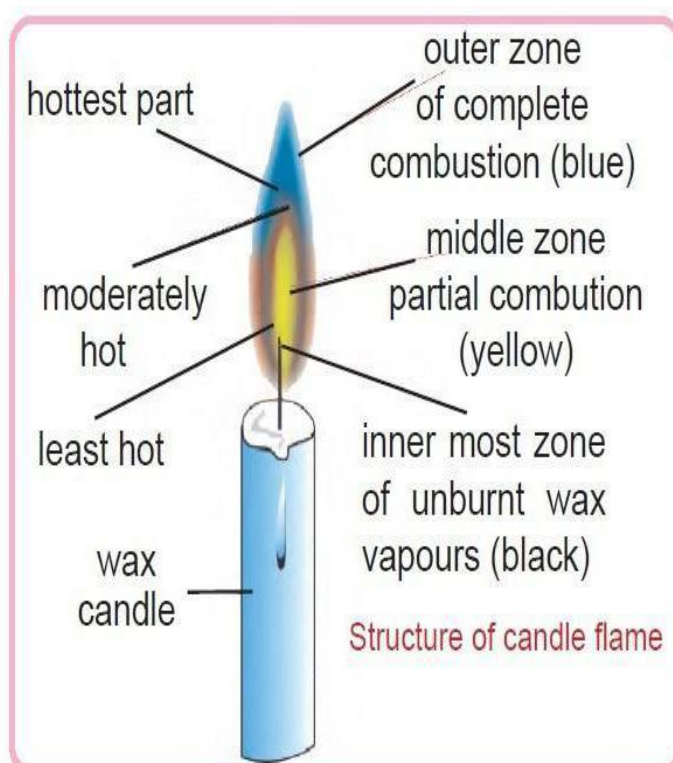
Slika 7. Prikaz temperatura plamena svijeće.[7]

Čimbenici koji utječu na temperaturu plamena su:

- adijabatski plamen (adijabatski proces je proces bez prijenosa topline), što znači da temperatura plamena ovisi postoji li prijenos topline na okolinu ili ne
- atmosferski tlak
- prisutstvo kisika, kao dio atmosferskog zraka
- gorivo koje izgara (ovisi o brzini izgaranja goriva)

- prisustvo oksidacije (gubitka elektrona) kod goriva
- temperatura okolnog zraka, recimo ako je zrak hladniji i toplina će se brže odvoditi, te će plamen biti hladniji te
- stehiometrijski proces izgaranja, tako će recimo i premali i preveliki dovod kisika smanjiti temperaturu plamena

Kod gorenja svijeće (Slika 8.) vidljive su različite zone gorenja plamena. Na vrhu plamena možemo primijetiti kako se odvija potpuno sagorijevanje (plava zona) i dolazi do razvoja visoke temperature, dok se pri dnu plamena (crna zona) ne razvija visoka temperatura jer nema dovoljno kisika. U sredini plamena (žuta zona) dolazi do djelomičnog izgaranja plinova.



Slika 8. Prikaz zone gorenja svijeće.[8]

Kod požara kuća ili zgrada, plamen će obično biti crven i stvarati dosta dima. Crvena boja plamena, u odnosu na uobičajenu žutu boju plamena, govori nam da je temperatura nešto niža. To je zato što u stambenim prostorijama je nedostatak kisika i događa se nepotpuno izgaranje, pa su temperature plamena 600 – 800 °C. To znači da se stvara puno ugljičnog monoksida CO (koji je goriv ako je velika temperatura). Treba upozoriti na opasnost

od povratnog udara, a to se dešava kada požar dobije dovoljno kisika, tada ugljični monoksid izgara i stvara temperature sve do 2000 °C i to je jedan od najvećih problema za vatrogasce.

Uobičajene temperature plamena

Ispitivanje plamena natrija (Slika 9.). Treba napomenuti da žuta boja ne dolazi zbog emisije čađi (plava boja na dnu pokazuje potpuno sagorijevanje), već dolazi od spektralne linije atoma natrija.



Slika 9. Gorenje natrija.[6]



Tablica 1. Temperatura plamena, za različite tvari (kod 20 °C zraka i tlaka od 1 bara).[8]

Materijal koji gori	Temperatura plamena (°C)
Vatra drvenog ugljena	750–1200
Metan (prirodni plin)	900–1500
Propan plamenik	1200–1700
Plamen svijeće	~1100 (glavnina), vrući dio 1300-1400
Magnezij	1900–2300
Vodikov plamenik	Do ~2000
Acetilen(Etin) plamenik	Do ~2300
Kisik+acetilen plamenik	Do ~3300
Povratni udar kod požara	1700–1950
Bunsenov plamenik	900–1600 (ovisi o dotoku kisika)

## Hladni plamen

Kod nižih temperatura od 120 °C, mješavina goriva i zraka može kemijski reagirati i stvoriti veoma slabi plamen, kojeg zovemo hladni plamen. Tu pojavu je otkrio Humphry Davy 1817. godine. Proces ovisi o pažljivoj ravnoteži temperature i koncentracije reaktivne mješavine i ako su uvjeti povoljni, ona se može zapaliti bez vanjskog utjecaja.

## Plamen u svemiru

Kod nulte gravitacije, prijenos topline na okolinu se ne odvija i ne može odnijeti tople proizvode izgaranja od izvora goriva, tako da plamen ima kuglasti oblik (Slika 10.).



Slika 10. Kuglasti oblik plamena kod nulte gravitacije.[5]

2000. pokusi koje je provela NASA, pokazali su da gravitacija igra dodatnu ulogu u oblikovanju plamena. Normalni raspored plamena kod normalne gravitacije ovisi o prijenosu topline. Kod male ili nulte gravitacije, kao u svemiru, prirodnog odvoda topline nema, plamen postaje kuglast, dobija više plavu boju i izgaranje je bolje.

### 3.3. Svjetlost

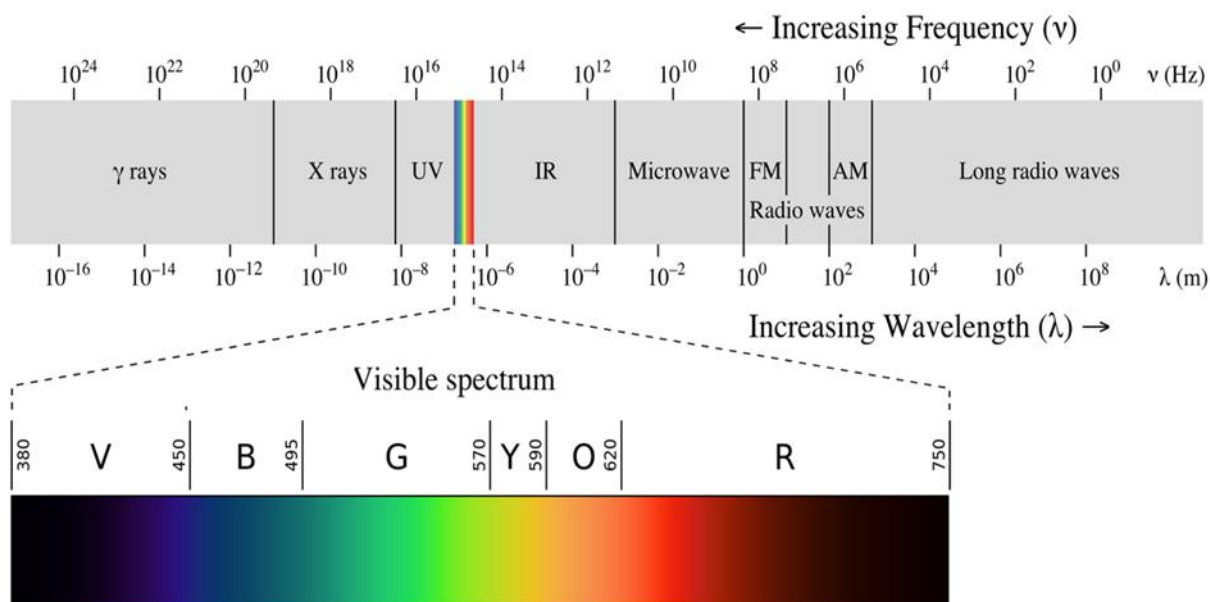
Svjetlost je elektromagnetsko zračenje koje je vidljivo ljudskom oku (Slika 11.). Ljudsko oko u prosjeku može vidjeti svjetlost s valnom duljinom u rasponu od 380 do 780 nm (vidljiva svjetlost), koje ljudsko oko razlikuje kao boje, od ljubičaste s najmanjom do crvene s najvećom valnom duljinom. Svjetlost u širem smislu uključuje i ultraljubičasto i infracrveno zračenje. Kao i sve ostalo elektromagnetsko zračenje, svjetlost se širi konačnom brzinom  $c$  (brzina svjetlosti), koja u vakuumu iznosi 299 792 458 m/s.[9]

$$E = mc^2$$

U prozirnim materijalima ta se brzina mijenja u omjeru  $c_{\text{mat}} = c_{\text{vak}}/n$

gdje je:  $n$  - indeks loma za određeni materijal.

Indeks loma ovisi o frekvenciji svjetlosti i uvijek je veći od jedinice. Prema relativističkoj fizici brzina svjetlosti u vakuumu univerzalna je konstanta, jednaka u svim sustavima, bez obzira na njihovu relativnu brzinu. Ona je ujedno najveća moguća brzina širenja signala.



Slika 11. Spektar elektromagnetskih valova s istaknutim dijelom vidljive svjetlosti.[9]

### 3.3.1. Boje

Ljudsko oko reagira samo na vrlo ograničeni raspon valnih duljina na vidljivu svjetlost (Tablica 2.). Međutim, ono odlično raspoznaje i vrlo male razlike unutar tog raspona. Te male razlike nazivamo boje. Boje su dakle male frekvencijske razlike u području vidljive svjetlosti. Najkraću valnu duljinu imaju ljubičasta i plava svjetlost, a najdulju crvena svjetlost. Spektar vidljivog zračenja čine:

- ljubičasta boja (najveća frekvencija, najkraća valna duljina),
- plava boja,
- zelena boja,
- žuta,
- narančasta boja i

- crvena boja (najniža frekvencija, najdulja valna duljina).

Tablica 2. Boje vidljive ljudskom oku.[9]

Boja	raspon valnih duljina	frekvencijski raspon
crvena	~ 625 – 740 nm	~ 480 – 405 THz
narančasta	~ 590 – 625 nm	~ 510 – 480 THz
žuta	~ 565 – 590 nm	~ 530 – 510 THz
zelena	~ 500 – 565 nm	~ 600 – 530 THz
cijan	~ 485 – 500 nm	~ 620 – 600 THz
plava	~ 440 – 485 nm	~ 680 – 620 THz
ljubičasta	~ 380 – 440 nm	~ 790 – 680 THz

Bijela svjetlost sastavljena je od kontinuiranog niza svih boja vidljivog spektra. U praksi pod bojom nekog tijela možemo smatrati boju koje tijelo reflektira kada je osvijetljeno bijelom svjetlošću, to jest tijelo će biti obojeno nekom bojom ako mu površina apsorbira bijelu svjetlost samo na određenom valnom području. Boja dakle ovisi o frekvenciji reflektiranog zračenja. Bijela površina je ona koja u jednakoj mjeri reflektira sva valna područja bijele svjetlosti.

Crna površina je ona koja u potpunosti apsorbira bijelu svjetlost. Siva površina u jednakoj mjeri reflektira sva valna područja bijele svjetlosti, ali ih i djelomično apsorbira. Bijela, crna i siva su akromatske boje, a sve ostale boje su kromatske. Osnovna svojstva kromatskih boja:

- ton (pojam vezan za ime boje na primjer crvena, zelena),
- svjetlina (ovisi o jakosti ili intenzitetu zračenja),
- zasićenost (ovisi o čistoći boje).

Kraće se valne duljine učinkovitije raspršuju po zraku nego dulje valne duljine. Nebo je plavo jer se kratke valne duljine (plava svjetlost) najviše raspršuju. Sunce isijava najviše energije u vidljivom dijelu spektra elektromagnetskoga zračenja. Vrlo vruća zvijezda emitira većinu svjetlosti u ultraljubičastom području. Vrlo hladna zvijezda (na temperaturi nižoj od

1000 K) većinu zračenja emitira u infracrvenom području. Sunce, po mnogome prosječna zvijezda, emitira većinu energije u vidljivom dijelu elektromagnetskoga spektra.

Vegetacija upija crvenu i plavu svjetlost, a zrcali zelenu, pa nam stoga biljke izgledaju zeleno. Tvar koja upija plavo, a reflektira crveno izgleda nam crvena; koja upija crvenu svjetlost, a reflektira plavu je plava; koja podjednako reflektira svjetlost u svim bojama je bijela ili crna ili siva. Npr. ruža je crvena zato što se sve boje osim crvene upijaju unutar ruže, a samo se crvena boja reflektira. Crno i bijelo su u osnovi isto, a razlika je samo u količini reflektirane svjetlosti, a ne u njihovoj boji. Sve boje koje vidimo na Zemlji i drugdje su samo pitanje koje se valne duljine Sunčeve svjetlosti najbolje reflektiraju.[9]

### 3.3.2. Doprinos Ruđera Boškovića tumačenju svjetlosti

Bošković je smatrao da „svjetlost može biti kao neko fino istakanje i kao neka para koju izbacuje žestoka vatrena fermentacija“.[10] Tvrdio je da je struktura svjetlosnih čestica, iako su male mase, složena i da se zrake različitih boja međusobno razlikuju. Kako bi objasnio zašto se na prelasku iz jednog optičkog sredstva u drugo dio svjetlosnog snopa reflektira a dio prelama, pretpostavio je da je svjetlosna čestica složena od mnoštva čestica nižeg reda povezanih elastičnim silama. Ako u trenutku emisije čestice koje čine svjetlosnu česticu dobiju različite početne brzine sporije će čestice usporavati brže a brže će ubrzavati sporije pa će se svjetlosna čestica rastezati i stezati. Ovisno je li svjetlosna čestica rastegnuta ili stegnuta u trenutku kad dolazi do granične površine između dva optička sredstva ona će se odbiti ili proći.

Boškovićevi opisi zagrijavanja tvari s pomoću svjetlosti zvuče moderno: „Sunčeve zrake podavaju vrlo neznatnim česticama tijela gibanje iz kojeg nastaje toplina.“

Osmislio je (ali nije proveo) pokus kojim je s pomoću dva teleskopa od kojih je jedan napunjen vodom namjeravao utvrditi je li svjetlost čestične ili valne prirode.[10]

## 4.ZVUK

Dugo je vremena proučavanje zvučnih pojava bilo isključivo vezano za probleme glazbe i glazbenih instrumenata. Tek 19.st. bilježi znatan napredak akustike kao grane fizike, koji je Rayleigh sažeo u dva sveska svoje „Teorije zvuka“(1877-1878). Razvitak radiofonije i elektronike dvadesetih godina prošlog stoljeća daje snažan podstrek istraživanjima iz grane akustike. Angažiraju se sredstva industrije radi pronalaženja boljih aparatura za komunikacije (Bell Telephone Laboratories).

Razvijaju se izvori ultrazvuka (P.Langevin) i iskorištavaju u kemiji, medicini, navigaciji, ispitivanju materijala, ribolovu itd. Arhitekti se također služe akustikom kako bi postigli što bolje zvučne efekte u velikim dvoranama.

Usporedno sa usavršavanjem naprava za zapisivanje (gramofon, tonfilm, magnetofon) i reprodukciju glazbe i govora (pojačala, zvučnici) raste i potreba za suzbijanjem i izoliranjem buke koja sve više ometa život u gradovima i industrijskim centrima (promet, strojevi, mlazni avioni).

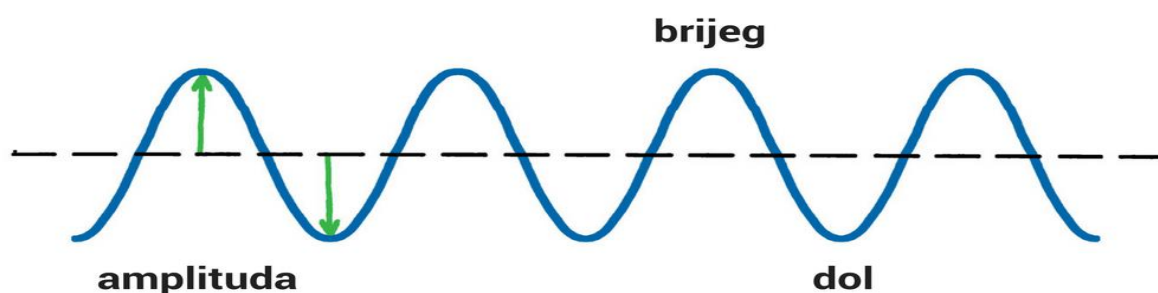
Akustika (grč. ἀκουστικός: slušni) je grana fizike koja se bavi proučavanjem nastajanja, širenja i osjetom zvuka. Zvuk je osjet što ga prima ušni živac našeg uha. Da se ušni živac podraži na osjet zvuka, potreban je izvor zvučne energije i sredstvo (medij) koji tu energiju prenosi od izvora do našeg uha. Izvor zvuka je uvijek mehaničko titranje nekog tijela. Kad udarimo o neki predmet, na primjer trgnemo napetu žicu, čujemo zvuk, a taj osjet zvuka prestaje čim spriječimo titranje tijela. Energija zvuka širi se nekim sredstvom (medijem) u obliku mehaničkog vala. To sredstvo je obično zrak, a može biti i tekuće ili elastično čvrsto tijelo. Bez sredstva u kojem se šire mehanički valovi ne možemo čuti zvuk. Prema pravilnosti titranja razlikujemo ton, šum i buku. Ton je zvuk koji se sastoji od harmoničkih titraja, dok su šum i buka smjesa titraja različitih frekvencija i amplituda.

Ljudsko uho ne zamjećuje sve mehaničke titraje već samo one kojima frekvencija leži u granicama od 16 do 20 000 Hz. Titraje niske frekvencije zamjećuje uho kao dubok, a titraje visoke frekvencije kao visok ton, dok su titraji frekvencije niže od 16, a više od 20 000 Hz za naše uho nečujni. Te su granice osjetljivosti uha za frekvencije mehaničkih titraja pojedinačne, to jest različite za pojedine ljude. Neki čuju vrlo visoke titraje, a drugi ne.

Zvuk se širi u longitudinalnim valovima, ali zvuk nije dio elektromagnetnog spektra kao što su to svjetlosni ili radio valovi. Zvuk nastaje kada neka materija vibrira. Frekvencija

tih vibracija mjeri se jedinicama koje se nazivaju herci (prema njemačkom fizičaru Heinrichu Rudolfu Hertz u koji je dao veliki fizikalni doprinos u elektromagnetizmu). Herci se označavaju oznakom Hz. Pojam frekvencija odnosi se na broj titraja u sekundi, a varijacije u frekvenciji zvuka proizvode njegovu visinu, odnosno zvuk visokog ili niskog tonaliteta.

Titraj je najjednostavnije mehaničko gibanje elastičnog tijela od točke mirovanja do lijeve i desne strane. Raspon od krajnje lijeve do krajnje desne točke tog gibanja zove se amplituda (Slika 12.). Pričvrstimo li olovnu kuglicu na tanku nit i otklonimo je za izvjestan kut od njenog ravnotežnog položaja, onda ta kuglica na niti vrlo male težine predstavlja matematičko njihalo. Kuglica se neće zaustaviti u svom ravnotežnom položaju već će oko njega titrati ili oscilirati. Put njihala između krajnjih točaka zove se jedan titraj, a vrijeme koje je potrebno da njihalo učini jedan titraj zove se period ili vrijeme titraja.[11]



Slika 12. Prikaz amplitude kod zvučnog vala.[12]

#### 4.1. Ton

Ton (grčki τόνοσ; napetost; glas; boja) je složeni zvuk koji nastaje pravilnim i periodičnim titranjem zraka, a parcijalni su mu tonovi u maksimalno harmoničnom odnosu, te mu se stoga precizno može odrediti takozvana tonska visina. Ton se, za razliku od zvuka u užem smislu riječi (čiji su parcijalni tonovi u manje harmoničnom odnosu, a visina manje jednoznačna),

tradicionalno drži osnovnim elementom glazbe. Ton ima četiri bitna obilježja: visinu, trajanje, intenzitet i boju:

- visinu određuje frekvencija titranja izvora tona, što se u europskoj umjetničkoj glazbi smatra primarnim obilježjem tona. Naznačuje ju se položajem note, kao znaka za ton u notnom crtovlju;
- trajanje tona ovisi o vremenu titranja, a u notaciji ga se regulira sustavom notnih vrijednosti;
- intenzitet ili glasnoća tona ovisi o amplitudi titranja te ga se označuje ponešto neodređenim oznakama za dinamiku;
- boja je rezultat međudjelovanja različitih obilježja tona (ponajviše odnosa parcijalnih tonova), a uvelike ovisi i o konkretnim okolnostima proizvodnje tona. Budući da je usko vezana za materijal i građu glazbenog instrumenta, boja tona ovisi o raznolikosti načina njegove proizvodnje na pojedinom instrumentu, uporabi velikoga broja različitih instrumenata te vještini njihova kombiniranja u veće sastave (takozvana instrumentacija).

## 4.2. Izvori zvuka

Izvori zvuka su fizikalna tijela koja titraju frekvencijom od 16 do 20 000 Hz u nekom elastičnom sredstvu, na primjer napeta struna ili glazbena vilica u zraku. Najjednostavniji je oblik titranja izvora zvuka harmoničko titranje. Harmoničko titranje stvara harmoničke valove. Čisti ton nastaje ako se frekvencija titranja ne mijenja. Složeni tonovi sadrže više frekvencija. Po Fourierovu teoremu složeni ton može se prikazati kao zbroj sinusnih titranja osnovnom frekvencijom  $\nu_0$  i višim harmonicima frekvencije  $n \cdot \nu_0$ , ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ). Šum je posljedica potpuno nepravilna titranja. Valovi nastali titranjem izvora frekvencijom većom od 20 kHz opisuju se kao ultrazvuk (mogu ih čuti neke životinje, na primjer psi i šišmiši), a frekvencijom manjom od 16 Hz kao infrazvuk (mogu ih čuti na primjer patke i slonovi).

Jakost zvuka (oznaka  $I$ ) je fizikalna mjerna veličina koja opisuje energiju zvučnoga vala u vremenskom razdoblju (intervalu) kroz površinu okomitu na smjer širenja vala. Mjerna je jedinica vat po metru kvadratnom ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Prag čujnosti je najmanja jakost zvuka koju ljudsko uho može čuti.

$$I_0 = 1 \text{ pW} / \text{m}^2 = 0,000\ 000\ 000\ 001 \text{ W} / \text{m}^2$$



Razina jakosti zvuka (oznaka L) mjerna je veličina prilagođena osjetljivosti ljudskoga uha, deseterostruki logaritam omjera jakosti nekoga zvuka i praga čujnosti.

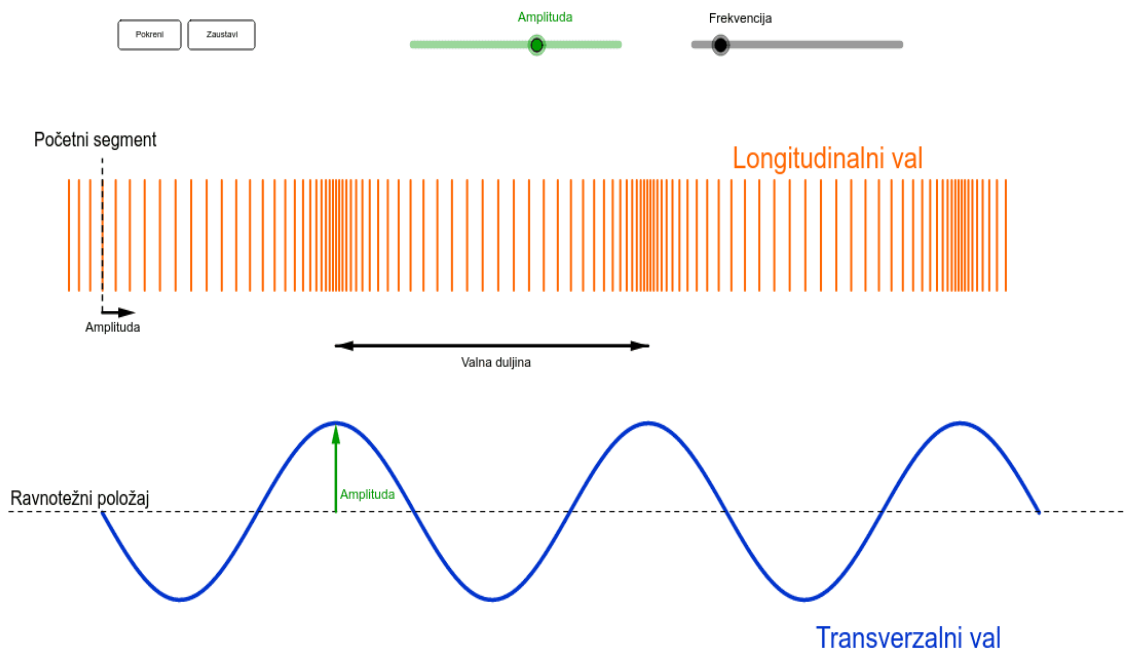
$$L = \frac{1}{2} \times l_n \left( \frac{I}{I_0} \right) N_0 = \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right) B = 10 * \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right) dB$$

### 4.3. Val

Val (Slika 13.) je širenje poremećaja kojim se prenosi energija kroz neko sredstvo (medij), a da se sredstvo kao cjelina ne pomiče. Kada se valovi nađu na granici između dvaju različitih sredstava, dolazi do njihova ogiba, refrakcije (loma) ili refleksije (odbijanja) i u posebnim uvjetima do stojnih valova. Mehanički valovi se mogu širiti samo kroz neku tvar (medij), dok se elektromagnetski valovi mogu širiti i vakuumom.

Valovi također mogu biti:

- longitudinalni – čestice titraju u smjeru širenja vala. Najvažniji primjer longitudinalnih valova su valovi zvuka u zraku. U tekućinama i plinovima samo se rasprostiru longitudinalni valovi;
- transverzalni – čestice titraju poprečno na smjer širenja. U čvrstim tijelima mogu se rasprostirati i transverzalni i longitudinalni valovi;
- progresivni – val se širi u određenom smjeru i pritom se energija prenosi s čestice na česticu;
- stojni – neke čestice titraju, a neke stalno miruju; energija se ne prenosi prostorom.



Slika 13. Prikaz transverznog i longitudinalnog vala.[12]

Valovi zvuka proizvode tlak na tijelo na koje udaraju. Jakost zvuka je količina energije koju isijava izvor zvuka u 1 sekundi kroz površinu od  $1 \text{ m}^2$  okomito na smjer njegovog širenja i mjeri se u  $\text{W/m}^2$ . Iz izraza za gustoću energije vidimo da je jakost zvuka veća što je veća gustoća sredstva  $\rho$  u kojem se zvuk širi i što je veća amplituda  $A$  vala. Međutim, kod prostornih valova gustoća energije opada s kvadratom udaljenosti.

#### 4.3.1. Energija zvučnog vala

Pri širenju vala u svim smjerovima od njegova izvora djelić mase  $m$  ima brzinu

$$v = A \cdot \omega$$

analogno prema izrazu

$$v = r \cdot \omega,$$

gdje je  $r = A$  - amplituda vala, a energiju (u džulima = J).

## Mjerne jedinice jakosti zvuka

### Decibel

Decibel (oznaka dB) je decimalna jedinica brojčane jedinice bel iznimno dopuštene izvan SI (Međunarodni sustav mjernih jedinica). Decibel je jedinica razine neke fizikalne veličine (razine snage, napona, struje, jakosti zvuka i drugog). Poseban je naziv za broj jedan kada je razina (na primjer snage  $P_2$  prema snazi  $P_1$ ) izračunana jednadžbom:

### Bel

Bel (prema A. G. Bellu; oznaka B) je brojčana jedinica razine određene fizikalne veličine prema odabranoj usporedbenoj vrijednosti, kada je ta razina određena dekadskim logaritmom omjera vrijednosti tih veličina. Bel je iznimno dopuštena jedinica izvan SI (Međunarodni sustav mjernih jedinica), povezana s jedinicom neper (Np) jednadžbom:

$$L = \frac{1}{2} * \ln 10 (Np)$$

Većinom se upotrebljava decimalna jedinica decibel ( $dB = 0,1 B$ ). Na primjer ako je snaga nekog signala 1 W, a dogovorena usporedbena snaga 1 mW, tada je razina signala:

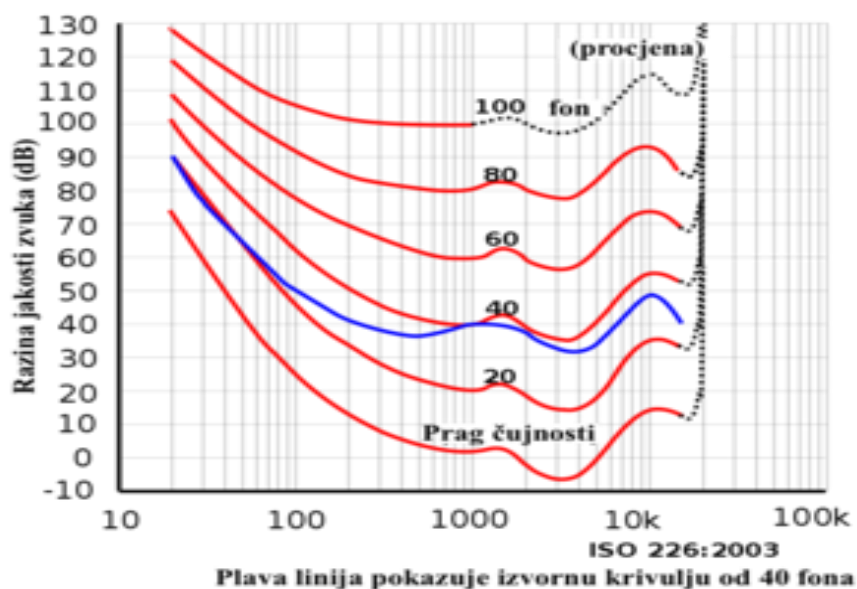
$$L = 10 * \log_{10} \left( \frac{1}{0,001} \right) dB = 10 * \log_{10} 10^3 dB = 30 dB$$

### Neper

Neper (po J. Napieru ili Neperu; oznaka Np) je brojčana jedinica razine određene fizikalne veličine prema odabranoj usporedbenoj vrijednosti, kada je ta razina određena prirodnim logaritmom omjera vrijednosti tih veličina, pa je poseban naziv broja jedan

( $N_p = 1$ ). Neper je iznimno dopuštena jedinica izvan SI. Rabi se uglavnom u elektrokomunikacijama za izražavanje gušenja signala.

Usporedba razine jakosti zvuka (dB) i glasnoće ili jakosti zvuka (fon) prema standardu ISO 226 iz 2003.



Slika 14. Osjet zvuka ili osjetljivost uha.[11]

Slušni osjet (Slika 14.) jakosti zvuka osniva se na fiziološkom djelovanju, to jest na podraživanju slušnih živaca. Zato je potrebno utvrditi kako taj slušni osjet ovisi o jakosti zvuka, odnosno o zvučnom tlaku. Ispitivanje je pokazalo da je za svaki čist ton potreban neki minimalni zvučni tlak da bi ga uho moglo čuti. Taj minimalni tlak kod kojeg se još određeni ton čuje zove se prag ili granica čujnosti. No zvučni tlak može biti opet tako velik da prouzrokuje bol u ušima pa se zato zove granica bola. Granica čujnosti i granica bola ovisne su o frekvenciji, to jest kod različitih frekvencija one su različite. Osjetljivost uha je najveća kod frekvencije oko 2 700 Hz. Ljudsko uho osjeća zvukom izazvanu promjenu tlaka zraka (akustički tlak). Za zvučni val frekvencije 1 kHz i jakosti koja odgovara pragu čujnosti

( $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ ), amplituda pomaka čestice iznosi oko  $10^{-11} \text{ m}$ , dok je amplituda akustičkoga tlaka oko  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ . Za zvuk na granici bola pomak je čestice  $10^{-5} \text{ m}$ , a akustički tlak  $30 \text{ Pa}$ .

#### 4.3.2. Glasnoća ili jakost glasa

Kao mjera za fiziološko djelovanje izvora zvuka na uho služi jakost glasa. Jakost glasa ovisi o jakosti zvuka, odnosno o zvučnom tlaku i s ovim se ne smije zamijeniti. Jakost glasa ili glasnoća je fiziološki, a jakost zvuka fizikalni pojam. Tako na primjer jakost glasa 10 motornih vozila nije 10 puta veća od jakosti glasa jednog vozila. Jedinica za jakost glasa je fon. Jakost zvuka od  $2,5 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$  odgovara jakosti glasa od nula fona.

Glasnoća zvuka jest osjet jakosti zvuka u ljudskom uhu. Ovisi o jakosti i frekvenciji zvuka. Razina glasnoće izražena u fonima jest, dogovorno, jednaka razini jakosti u decibelima za zvuk frekvencije  $1\ 000 \text{ Hz}$  u cijelom području od granice čujnosti do granice bola. Primjeri razine glasnoće (Tablica 3.) različitih složenih zvukova dani su u sljedećoj tablici:

Tablica 3. Razine glasnoće.[10]

Vrsta zvuka	Razina glasnoće (fon)
prag osjeta	0
šaptanje	20
tiha glazba	40
bučan govor	60
prometna ulica	80
prolazak brzog vlaka	100
motor zrakoplova	120
prag bola	130

#### 4.3.3. Brzina zvuka

Brzina zvuka je brzina kojom se širi zvučni val u nekom mediju (sredstvu). Zvuku je potrebno neko vrijeme da prijeđe stanovitu daljinu. U to se možemo uvjeriti ako na nekoj daljini promatramo čovjeka koji cijepa drva. Opazit ćemo da je čovjek već gotovo drugi put podigao sjekiru i tek onda čujemo udarac. Mjerenja su pokazala da brzina zvuka u zraku raste

s temperaturom i vlagom, a da je neovisna o tlaku i frekvenciji. Znači da se dugi i kratki valovi rasprostiru istom brzinom. Brzina zvuka je različita kroz različita tijela. Zvuk se širi brže kroz tekućine nego kroz zrak, a još brže u krutim tijelima. Općenito je brzina zvuka veća što je veća gustoća sredstva u kojem se on širi.

Kod krutih medija ovisi o elastičnosti dok kod plinova ovisi o izentropskom (adijabatskom) koeficijentu plina te o njegovoj temperaturi, dok ne ovisi o gustoći i tlaku plina. Brzina valova ovisi o mediju kroz koje se valovi šire pa je na primjer brzina mehaničkih valova u čvrstom tijelu:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

a u plinu:

$$v = \sqrt{\frac{\kappa \times P}{\rho}}$$

gdje je: E - modul elastičnosti,  $\rho$  - gustoća tijela ili plina,  $\kappa$  - adijabatski koeficijent plina, p - tlak plina.

Brzina zvuka (Tablica 4.) u zraku temperature 20 °C iznosi 343 m/s (1 235 km/h na 0 metara nadmorske visine). Kako za pojedini plin brzina zvuka ovisi isključivo o njegovoj temperaturi, tako se kod zrakoplova prilikom povećanja visine leta brzina zvuka smanjuje uslijed smanjenja temperature zraka s visinom.[11]

Tablica 4. Brzina zvuka kod različitih medija.[11]

Medij	Brzina zvukau m/s na 20 °C i atmosferskom tlaku od 10 <sup>5</sup> Pa
poli(vinil-klorid), savitljivi	80
guma	150
ugljičkov dioksid	266 (na 20°C)
kisik	317 (na 20°C)
zrak	319 (na - 20°C)
zrak	343 (na 20°C)
pluto	500
helij	981
etanol	1 170
olovo	1 250
vodik	1 280
benzen	1 320
voda	1 485
krv	1 570
mineralno ulje (SAE 20/30)	1 740
drvo, bukovo	3 300
beton	3 750
bakar	4 700
željezo	5 170
staklo	5 500
mramor	6 150
aluminij	6 300

#### 4.3.4. Zvučni zid

Zvučni zid (Slika 15.) je aerodinamička pojava koja nastaje pri dosezanju brzine zvuka neke letjelice ili drugoga objekta. Premda se zrak pri malim brzinama strujanja smatra nestišljivim fluidom, pri većim brzinama postaje stišljiv. Tako zrakoplov u letu stvara poremećaj tlaka okolnoga zraka, koji se pri manjim brzinama strujanja nalazi neznatno ispred zrakoplova. Kada zrakoplov dosegne brzinu zvuka (ovisno o temperaturi, od 1–152 do 1

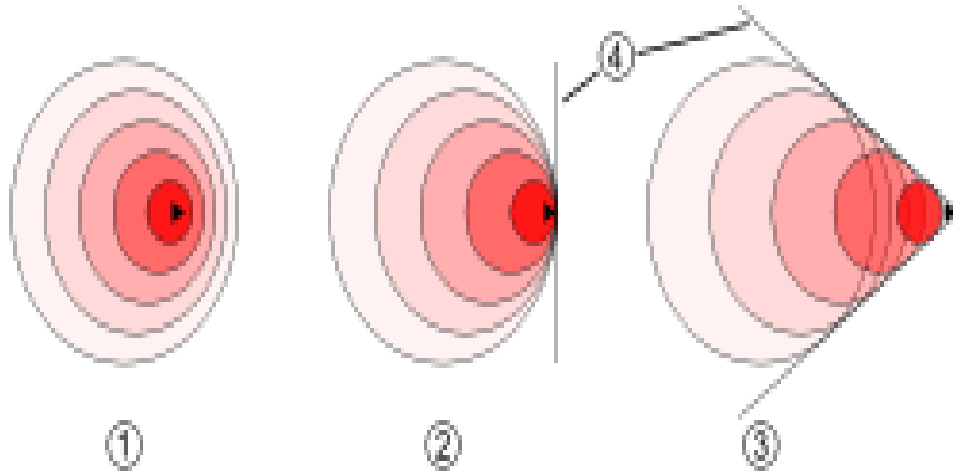
224 km/h), stvara se poremećaj tlaka neposredno pred zrakoplovom, otpor znatno poraste pa nastaju udarni valovi, koje promatrači na tlu doživljavaju kao prasak (takozvano probijanje zvučnoga zida). Razvojem zrakoplova vršne su se brzine približavale brzini zvuka, pa je postao očit razoran utjecaj udarnih valova, jer su neki zrakoplovi bili znatno oštećeni pri letu u tom području brzina. Zbog toga se dugo vjerovalo da zrakoplov ne može nadmašiti brzinu zvuka.



Slika 15. Northrop F/A-18 probija zvučni zid.[13]

Ipak su nakon Drugog svjetskog rata američki inženjeri, primjenjujući rezultate njemačkih istraživanja, konstruirali raketni zrakoplov X-1, kojim je 1947. pilot Chuck Yeager prvi probio zvučni zid, a poslije su i neki putnički zrakoplovi (na primjer francuski Concorde te ruski Tupoljev Tu-144) letjeli brzinom većom od brzine zvuka. Iz tog razloga kod današnjih zrakoplova brzina se izražava Machovim brojem. Machov broj je omjer između brzine zrakoplova i brzine zvuka. Tako na primjer zrakoplov ima Machov broj 1 ako može postići brzinu zvuka, a Machov broj 2 ako može postići dvaput veću brzinu od brzine zvuka (Slika 16.).

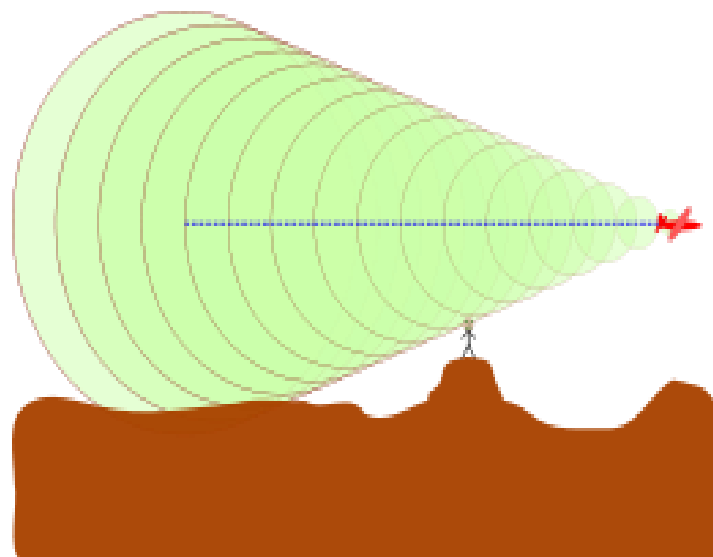




Slika 16. Probijanje zvučnog zida.[13]

Brzine zvuka:

1. Podzvučna
2.  $Ma=1$ mah,
3. Nadzvučna
4. Zvučni zid.



Slika 17. Prikaz stožca udarnog vala.[13]

Zvučni udar kojeg proizvodi zrakoplov pri brzini od  $M = 2,92$  (dakle, 2,92 brzine zuka), izračunat iz kuta stožca od  $20^\circ$ . Promatrač čuje udar kada ga dosegne rub stožca udarnog vala (Slika 17.) kojeg proizvodi zrakoplov.

### Refleksija ili odbijanje zvuka

Zvuk se odbija ili reflektira kad u svom rasprostiranju naiđe na zapreku. Refleksija zvuka zbiva se uvijek tako da je kut upadanja jednak kutu odbijanja. U šumi ili planinama ćemo refleksiju ili odbijanje zvuka još jače osjetiti. Odbijeni zvuk se vraća i mi ga čujemo kao ponovljeni zvuk. To vraćanje zvuka, koje nastaje odbijanjem zvučnih valova zove se jeka. Međutim, jeka može postati vrlo neugodna i nezgodna u prostorijama. Da bismo jeku čuli odijeljeno od zvuka, moramo biti udaljeni od pregrade od koje se zvuk odbija više od 17m, jer se inače zvuk i jeka stope zajedno u jedan zvuk.

### Lom i ogib zvuka

Da postoji lom zvučnih valova, pokazuju pojave koje nastaju pri eksploziji. Tom prilikom zrake zvuka dolaze u visini do slojeva zraka u atmosferi niže temperature u kojima se zvuk širi manjom brzinom. Zato se zrake zvuka lome prema okomici na taj sloj. Međutim, u visinama od 40 do 60 km temperatura zraka opet raste, pa se zvuk širi većom brzinom, a zrake zvuka se lome od okomice i konačno odbijaju na jednom sloju zraka. Posljedica je toga da se zvuk čuje do udaljenosti od 70km, a onda se do otprilike 180 km uopće ne čuje. Taj pojas od 70 do 180 km, u kojem se zvuk ne čuje zove se pojas šutnje. Od 180 km pa do 250 km, zvuk se ponovo čuje.

Ogib zvuka je pojava širenja zvuka također iza zapreke što se tumači Huygensovim načelom ili Huygensovim principom. Ta je pojava ogiba zvuka mnogo veća kod zvučnih valova nego kod valova na vodi.

### Objašnjenje

Zvuk ustvari predstavlja slijedno zgušnjavanje i prorjeđivanje medija– u ovom slučaju zraka.

Brzina prostiranja zvuka je različita ovisno od medija, a za zrak se uzima da iznosi 341 m/s ili 1227,6 km/h u uvjetima međunarodne standardne atmosfere. Zrakoplov tijekom kretanja kroz zrak izaziva poremećaje kontinuiteta zraka to jest formira zračne valove slično

onome što čini brod kada plovi. Dolazi do promjene tlaka zraka to jest do titranja čestica zraka u pravcu širenja vala, a brzina poremećaja jednaka je brzini zvuka.

S povećanjem brzine leta zrakoplova povećava se amplituda zvučnih valova to jest dolazi do povećanja tlaka zraka na isturenim dijelovima zrakoplova. Što je zrakoplov bliži brzini zvuka to se poremećaj tlaka zraka približava zrakoplovu tako da se ne stigne proširiti ispred i obavijestiti čestice zraka o nailasku poremećaja. Molekule neobaviještenog zraka nalijeću na aeroprofil zrakoplova slijedeći njegov oblik što ima za posljedicu povećanje tlaka, gustoće i temperature zraka u vrlo kratkom vremenskom razdoblju. Prilikom prelaska na nadzvučnu brzinu leta zrak na pojedinim dijelovima zrakoplova, obično kabina pilota i spoj krila i trupa, stvara zračne valove koji putuju ispred zrakoplova to jest točke probijanja brzine zvuka. Ispred zrakoplova se formira prepreka sastavljena od valova malog poremećaja koju nazivamo zvučnim zidom. U trenutku prelaska brzine zvuka dešava se skokovita i vremenski kratka promjena parametara zraka te poremećaj zraka prelazi iza zrakoplova. Tijekom leta nadzvučnim brzinama zrakoplov neprekidno oblikuje zvučne valove koji se šire duž njegove putanje. Slikovito rečeno to izgleda slično situaciji kada iz automobila u pokretu ispuštamo predmete koji nastavljaju padati ka tlu. Gledano iz pilotske kabine zvučni zid se kreće iza zrakoplova i simetrično se širi u zračnom prostoru (Mahov konus). Međutim, kada pilot izvodi zrakoplovom manevar, oštri zaokret ili naglo popinjanje, zvučni zid će putovati ka tlu ispred zrakoplova.

Zvuk koji možemo čuti na tlu (često u govoru također nazivan probijanje zvučnog zida) to jest iznenadni prasak (pucanj) zračnih valova koji su nastali na dijelovima zrakoplova prilikom prelaska na nadzvučne brzine. U stvari možemo čuti dva praska: prvi je u trenutku prelaska sa podzvučne na nadzvučnu brzinu, a drugi prilikom povratka sa nadzvučne na podzvučnu brzinu. Promjena tlaka zraka prouzročena zvučnim zidom je zanemarive veličine što je otprilike jednako tlaku koji bi iskusili ako bi nas lift spustio za dva ili tri kata brže nego obično. Upravo promjena magnitude vršnog tlaka opisuje pojam zvučnog zida.

Postoje dva tipa praska (buke) koju možemo čuti, N-zvučni valovi i U-zvučni valovi. Zvučni valovi N-tipa se stvaraju u stabilnim uvjetima leta kada zračni val ima oblik sličan onome koje ima slovo N. U takvoj vrsti valova najveći vršni nadtlak je na prednjoj strani da bi se smanjivao ka krajevima i postepeno prešao u normalno područje tlaka zraka. Valovi U-oblika nastaju u manevrima zrakoplova i imaju oblik slova U pri čemu je veličina vršnog nadtlaka zraka veća u usporedbi sa N-valovima. Borbeni piloti moraju u miru uvježbavati letenje nadzvučnim brzinama kako bi u ratu bili uspješni.

## Zvučna izolacija

Zvučna izolacija je svojstvo građevinske konstrukcije da u što većoj mjeri spriječi prenošenje zvučne energije iz jednog prostora u drugi. Zvučna izolacija se dijeli na:

- zvučnu izolaciju od udarne buke (prenosi se konstrukcijom ili krutim medijem)
- zvučnu izolaciju od prostorne buke (prenosi se zrakom putem zračnih valova)

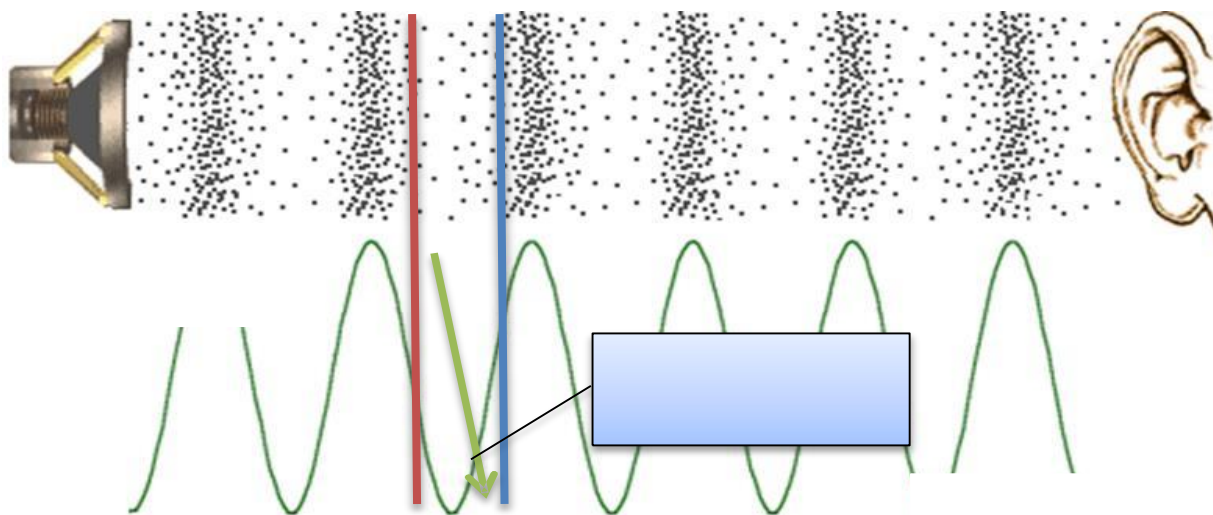
S obzirom na to da nije moguće izolirati sve izvore buke, a nije prirodno da se zaštitimo od primanja svih zvukova, moramo pronaći način da spriječimo dolazak samo neusklađenih i složenih zvučnih valova. Metoda koja se najčešće rabi za određivanje zvučne izolacije je zvučna izolacijska moć  $R_w$ , a brojčano se izražava u decibelima (dB). Pri tome je važno upamtiti da zvučna izolacijska moć  $R_w$  za neki materijal iskazan u dB ne pokazuje koliko buke taj materijal propušta, već iskazuje za koliko dB on smanjuje njezinu razinu. To znači da vanjsku ulaznu buku od 110 dB jednostruko staklo  $d = 4$  mm ( $R_w = 30$  dB) smanjuje za 30 dB i u prostor nam ulazi buka od 80 dB.[13]

## 5. UTJECAJ ZVUČNIH VALOVA NA PLAMEN

Utjecaj zvuka na plamen nije novo otkriće. Međudjelovanje između plamena i zvuka u orkestralnoj dvorani prvi je otkrio američki znanstvenik John Leconte 1858 godine. Njemački fizičar Heinrich Rubens 1900-ih pokazao je tehniku utjecaka zvuka na plamen koristeći cijev sa otvorima na vrhu cijevi. Na jedan kraj cijevi bio je priključen zvučnik dok je na suprotnoj strani bio priključen dovod plina. Paljenjem plina koji izlazi na otvorima i mijenjanjem frekvencije zvuka može se utjecati na veličinu plamena i taj efekt se naziva Rubensova cijev. Američka agencija za napredno istraživanje obrambenih sustava DARPA 2008. je uspjela ugaziti plamen pomoću zvuka koristeći frekvencije od 30 Hz do 150 Hz.[14] Sva kasnija istraživanja pokazala su kako se plamen puno brže ugasi kod frekvencija između 60 Hz i 92 Hz. Poznato nam je kako plamen nemožemo čuti, razlog tome je što se zvuk gorenja plamena nalazi u ultrazvučnom dijelu zvuka, odnosno frekvencijama većim od 20 kHz.

Kako bismo uspjeli ugaziti plamen potrebno je ukloniti jedan od tri elementa koji su potrebni za kontinuirani proces gorenja, a to su goriva tvar, kisik i topline. Plamen se može ugaziti oduzimanjem topline, oduzimanjem gorive tvari, oduzimanjem kisika i prekidanjem kemijskih lančanih reakcija u procesu gorenja. Osnovni princip gašenja požara zvukom je uklanjanje kisika iz gorive tvari i oduzimanje topline.

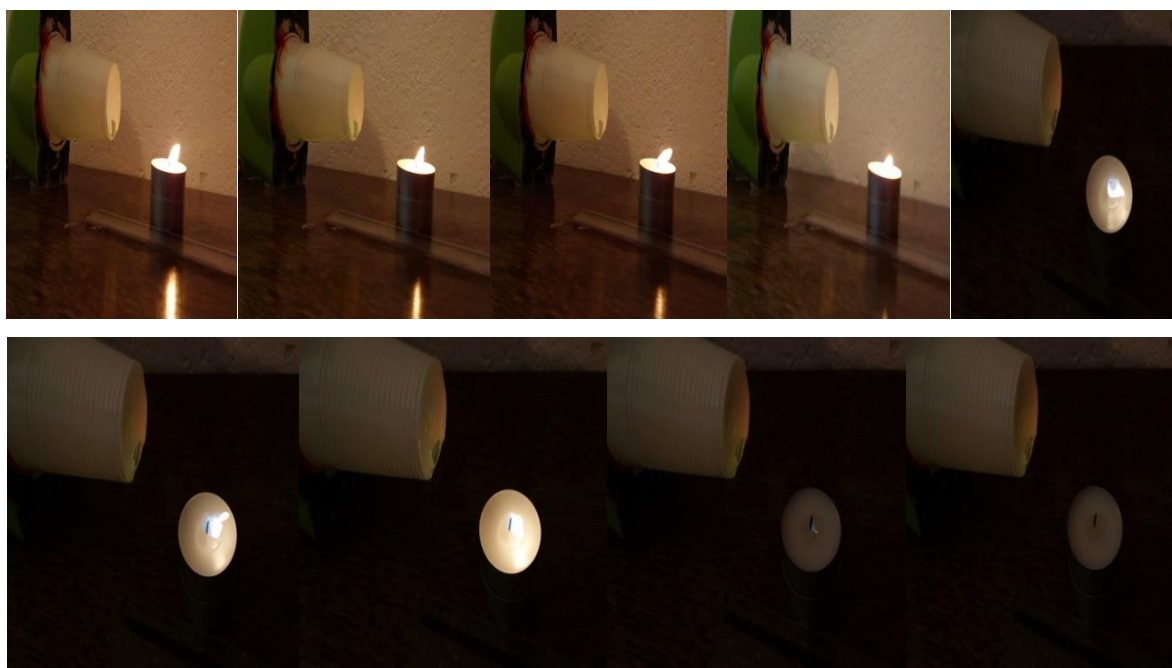
### 5.1. Djelovanje zvučnog vala



Slika 18. Djelovanje zvučnog vala.[15]

Na slici je prikazano djelovanje zvučnog vala (Slika 18.) na ljudsko uho. Crvenom bojom je označen brijeg vala, odnosno nadtladni dio vala u kojem dolazi do sabijanja čestica zraka i porasta temperature. Plavom bojom je označen dol vala, odnosno podtladni dio vala u kojem dolazi do prorijeđivanja čestica zraka i pada temperature.

Kombinirano djelovanje temperature, tlaka i odnosa zraka i gorive tvari prema plamenu utjecati će na ponašanje plamena u zvučnom okruženju. Poremećaji u temperaturi i tlaku utječu na brzinu gorenja materijala i uzrokuju nestabilnost izgaranja, što na kraju dovodi do gašenja plamena.



Slika 19. Ponašanje plamena svijeće uslijed utjecaja zvuka

Na slici je prikazan pomak plamena uslijed djelovanja zvuka (Slika19.). Kako kroz plamen prolazi nadtladni val plamen se počinje pomicati u smjeru prolaska nadtlalnog vala. Nakon što je nadtladni val prošao, plamen se vraća na početni položaj gdje se nalazi podtladni val koji oduzima dio kisika iz okoline i hladi plamen. Takav proces kontinuirano traje sve dok se plamen ne ugasi.

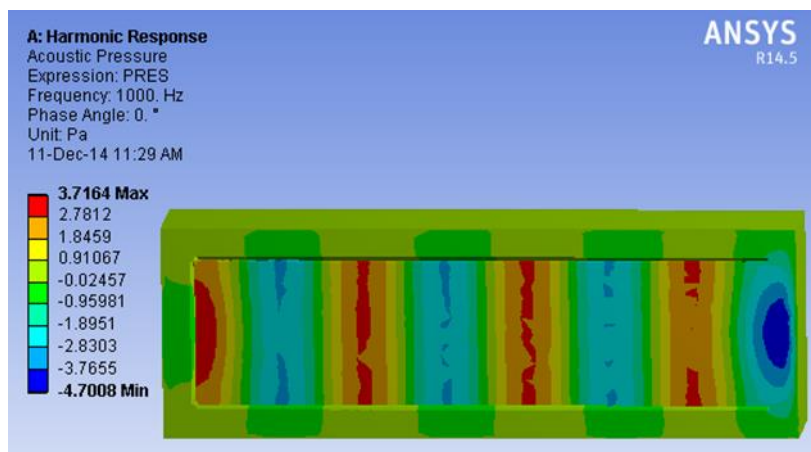
Sljedeći primjeri pokazuju utjecaj frekvencije i udaljenost od izlaza zvuka iz usmjerivača zvuka na plamen (Tablica 5.). Pokus je napravljen sa frekvencijama u rasponu od 30Hz do 90Hz i udaljenostima od 3 cm, 5 cm i 7 cm.

Tablica 5. Vrijeme gašenja kod različitih frekvencija i različitih udaljenosti

Frekvencija	Udaljenost od izlaza zvuka iz usmjerivača		
	3cm	5cm	7cm
40Hz	2,73s	3,7s	nema utjecaja
50HZ	0,82s	15,92s	nema utjecaja
60HZ	0,94s	5,91s	nema utjecaja
70HZ	0,65s	0,75s	nema utjecaja
80HZ	1,32s	0,15s	0,85s
90HZ	0,01s	0,4s	0,7s

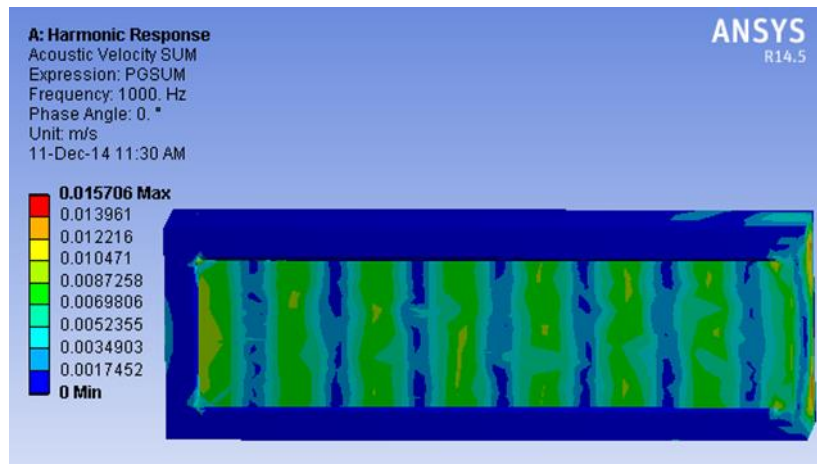
Prema tablici je vidljivo kako frekvencija bitno utjeće na razvoj plamena. Neke će frekvencije u kraćem vremenu ugaziti plamen ako se nalaze blizu plamena dok će neke frekvencije puno bolje utjecati na plamen ako su udaljenije od njega.

#### Simulacija zvučnih valova



Slika 20. Konture zvučnog tlaka.[15]

Na slici je prikazan profil zvučnog tlaka (Slika 20.) gdje je crvenom i žutom bojom vidljiv porast tlaka i temperature dok je plavom bojom označen pad temperature i tlaka.



Slika 21. Konture brzine zvuka.[15]

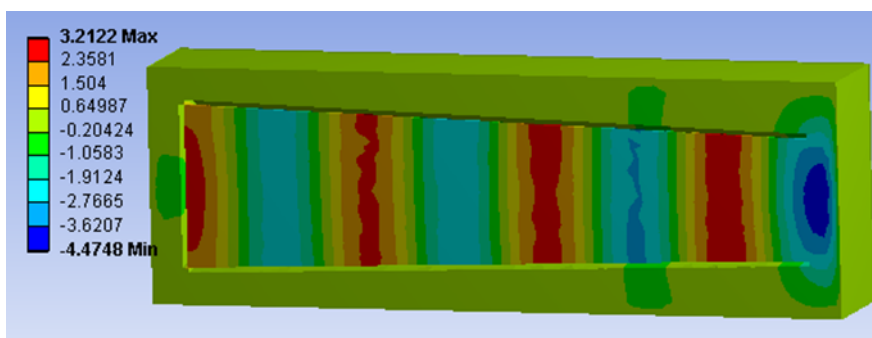
Brzina zvuka na prethodnoj slici (Slika 21.) ne pokazuje nesmetani profil konstantnog protoka zraka kao što je to vidljivo kod profila zvučnog tlaka. Područje označeno žutom bojom označava veću brzinu od područja označenog plavom bojom.

#### Usmjerivači zvuka

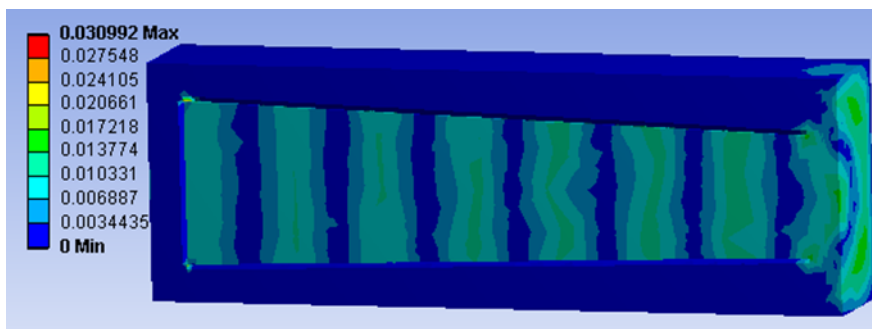
Izvedena su dva usmjerivača zvuka koji će se koristiti u ovoj simulaciji. Promjer na kraju prvoga usmjerivača zvuka je smanjen za 25% dok je promjer na kraju drugog usmjerivača zvuka, odnosno izlazu zvuka smanjen za 50%.

Vidljivo je kako se izlazna brzina zvuka povećava sa smanjenjem promjera dok se zvučni tlak smanjuje sa smanjenjem promjera usmjerivača zvuka. Kako je promjer na kraju usmjerivača zvuka smanjen na 25%, tlak zvuka (Slika 22.) se smanjuje za 14% dok se brzina zvuka povećava za 97% (Slika 23.). Isto tako kako je na drugom usmjerivaču zvuka izlaz smanjen za 50%, tlak zvuka (Slika 24.) se smanjuje za 40%, dok se brzina zvuka (Slika 25.) povećava za 155%. Obje usporedbe napravljene su uz pomoć usmjerivača zvuka bez ikakvog sužavanja na izlazu zvuka.

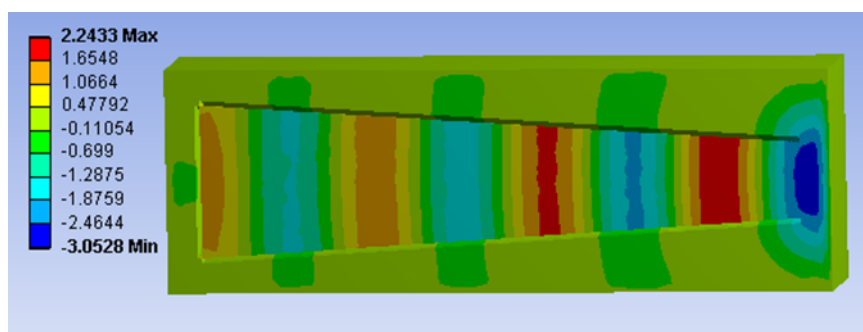




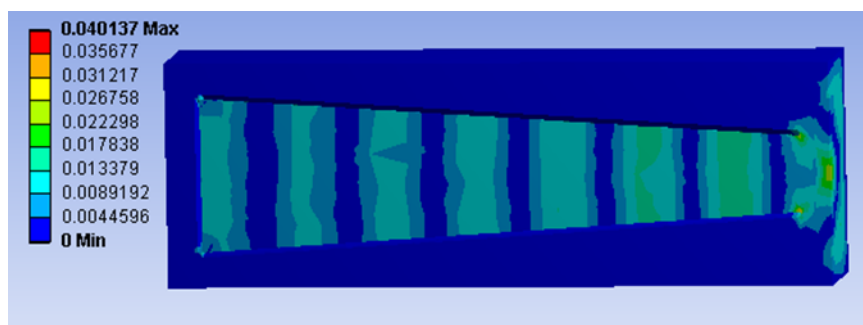
Slika 22. Tlak zvuka - 25% manji promjer na izlazu.[15]



Slika 23. Brzina zvuka - 25% manji promjer na izlazu.[15]



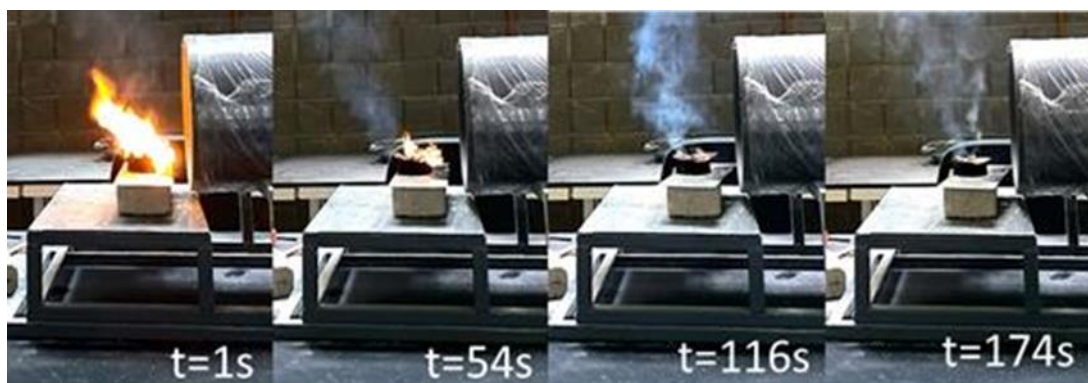
Slika 24. Tlak zvuka - 50% manji promjer na izlazu.[15]



Slika 25. Brzina zvuka - 50% manji promjer na izlazu.[15]

## 5.2. Gašenje krutih tvari zvukom

Kod krutih tvari plamen se ne ugasi brzo (Slika 26.), ali plamen se s vremenom smanjuje i na kraju ugasi (otprilike tri minute). Uzrok tome je zagrijana kruta tvar koju je potrebno ohladiti zvukom kako bi prestala gorjeti. U ovom slučaju vidimo bitan učinak hlađenja gorive tvari zvučnim valom jer nije dovoljno samo ukloniti plamen nego i ohladiti gorivu tvar kako ne bi došlo do ponovnog zapaljenja gorive tvari. Vidljiva je i penetracija vatre (Slika 27.) u komade drveta koje je korišteno pri gašenju zvukom.



Slika 26. Vrijeme potrebno za gašenje krute tvari.[15]

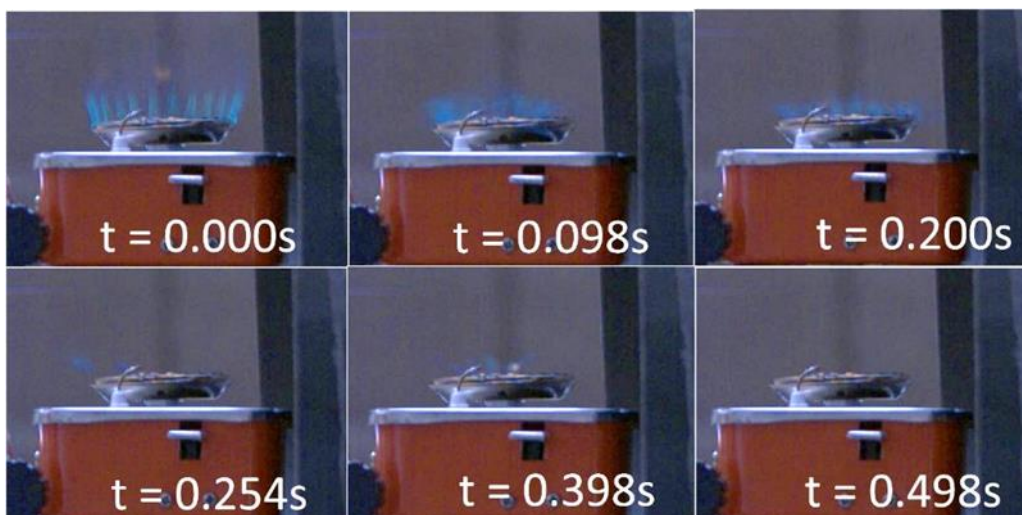


Slika 27. Penetracija vatre u drvetu.[15]

### 5.3. Gašenje zapaljivih plinova zvukom

Kod gašenja zapaljivih plinova (Slika 28.) plamen se ugasi trenutno unutar jedne sekunde. Kada govorimo o plamenu plinova, trebamo znati kako vremena gašenja zapaljivih plinova uvelike ovise o temperaturi izgaranja plinova. Tako na primjer, nije isto ako gasimo plamen propana, plamen drvenog ugljena ili plamen magnezija. Što je veća temperatura gorenja zapaljivih plinova to je više vremena potrebno kako bismo uspjeli ugasi plamen utjecajem zvučnih valova.

Kada govorimo o utjecaju zvuka na prisutnost kisika u okolini plamena i temperaturi izgaranja određenih plinova, tada visoka temperatura ima pozitivan utjecaj jer prilikom izgaranja se troši više kisika kod visokih temperatura i tada zvučni val ima bolji učinak u djelovanju oduzimanja kisika plamenu.



Slika 28. Gašenje zapaljivih plinova zvukom.[15]

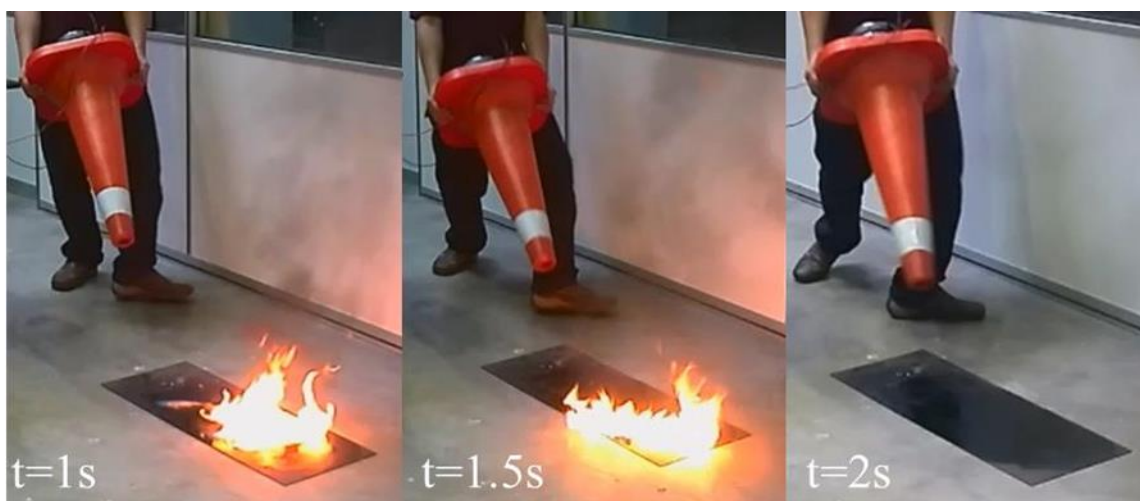
#### 5.4. Gašenje zapaljivih tekućina zvukom

Kod zapaljivih tekućina gašenje uz pomoć zvuka nije izvedivo. Uzrok tomu je površina zapaljive tekućine koja uslijed djelovanja zvučnih valova vibrira te se na taj način povećava površina tekućine i dolazi do bržeg isparavanja i procesa gorenja.

Stoga je upotrebljen usmjerivač zvuka sa 25% manjim izlazom (Slika 29.). Na ravnoj metalnoj ploči izliven je benzin. Slike ispod pokazuju postupak gašenja benzina pomoću zvuka.



Slika 29. Gašenje zapaljivih tekućina zvukom.[15]



Slika 30. Gašenje zapaljivih tekućina zvukom.[15]

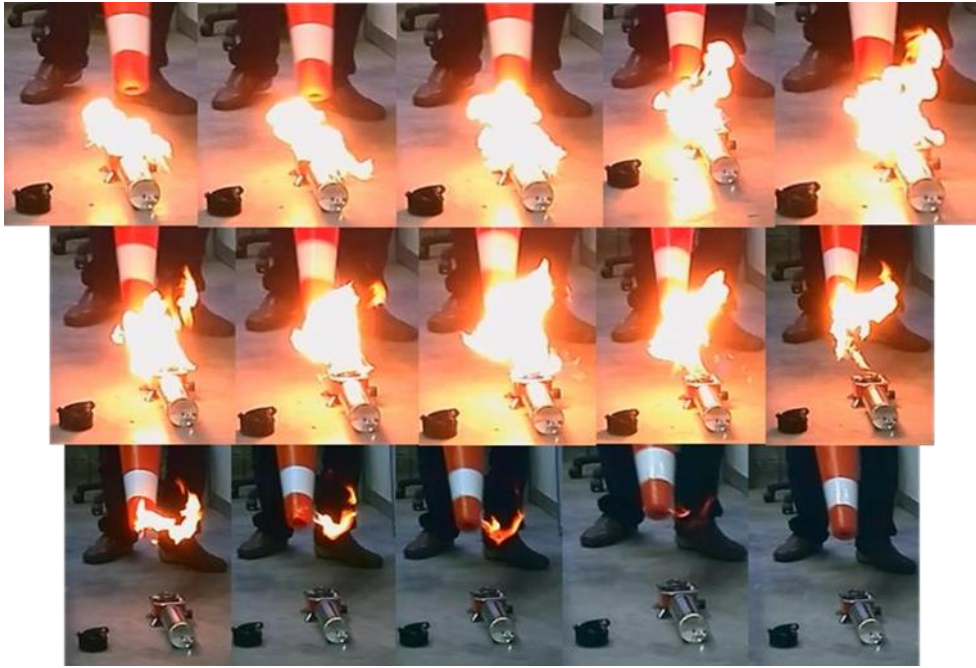
Rezultati gašenja krutih goriva, zapaljivih tekućina i zapaljivih plinova usmjerivačem zvuka sa izlazom smanjenim za 25%.

Tablica 6. Vrijeme sa smanjenim izlazom usmjerivača za 25%. [15]

Vrsta goriva	Vrijeme gašenje	Frekvencija
Kruto gorivo	4 s	92 Hz
Tekuće gorivo	2 s	
Plin	5 s	

### 5.5. Vakuum efekt usmjerivača zvuka

Budući da usmjerivač zvuka proizvodi veliku brzinu strujanja zraka na izlazu, to dovodi do boljeg učinka gašenja zapaljivih tvari. Prema zakonu o plinovima viša temperatura dovodi do povećanja tlaka, takvo pravilo vrijedi i za plamen. Na izlazu iz usmjerivača zvuka dolazi do povećanja brzine zraka i pada tlaka. Prema tome dolazi do stvaranja vakuum efekta (Slika 31.) i usisavanja plamena prema izvoru zvuka. Budući da se zvuk sastoji od visokih i niskih tlakova (dolova i brijegova), vakuum efekt nije aktualan cijelo vrijeme, nego ga je moguće ostvariti na određenoj duljini između izvora zvuka i plamena.



Slika 31. Vakuum efekt usmjerivača zvuka.[15]

## ZAKLJUČAK

Izvedenom simulacijom može se vidjeti kako se zvučni val širi unutar usmjerivača zvuka na temelju profila zvučnog tlaka i brzine zraka. Također je napravljen usmjerivač zvuka sa smanjenim izlazom kako bi se proučavao utjecaj na zvuk. Prema tome moguće je vidjeti kako se brzina zvuka povećava s izlazom, dok se tlak zvuka smanjuje s izlazom.

Na temelju dobivenih rezultata vidljivo je kako zvučni val može ugasiti plamen. Postoje razne teorije koje objašnjavaju kako zvučni val djeluje na plamen. U prvom dijelu eksperimenta pretpostavlja se da izmjenjivanje zvučnog tlaka i brzine zraka dovodi do gašenja plamena. Ipak na temelju drugog dijela eksperimenta uočeno je da brzina zraka čini glavni doprinos gašenju plamena zvukom. Međutim, za sve napravljene pokuse, upotrebljena je puno veća energija nego što ju je predstavljao plamen koji se gasio. Ovakav sustav za gašenje požara mogao bi se upotrebljavati za gašenje početnih požara.

## LITERATURA

- [1] Vatra, Wikipedija, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Vatra>
- [2] Otkriće vatre, <https://prijelomnitrenuciupovijesti.wordpress.com/,pristupljeno> 14.7.2019.
- [3] R. Shahhack-Gross, Evidence for the repeated use of a central hearth at Middle Pleistocene (300 ky ago) Qesem Cave, Israel, Journal of Archeological Science, Volumen 44, 2014, 12-21
- [4] Lackner M.: Handbook of Combustion,2010.
- [5] Plamen,Wikipedija, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Plamen>, pristupljeno 12.7.2019.
- [6] Law, C. K. (2006.) "Laminar premixed flames", [Combustion physics](#), Cambridge England: Cambridge University Press [ISBN 0521870526](#)
- [7] Thomas, N. (1952). "Cyanogen Flames and the Dissociation Energy of N<sub>2</sub>". The Journal of Chemical Physics **20** (3): 369–374
- [8] The hottestpart of the candle, <https://warmandcozy.ru> ,pristupljeno 11.6.2019.
- [9] Svjetlost,Wikipedija, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Svjetlost>, pristupljeno 29.6.2019.
- [10] Goran Pichler, Svjetlost, Leksikon Ruđera Boškovića, 2011, str. 129-131
- [11] Zvuk, "Hrvatska enciklopedija", Leksikografski zavod Miroslav Krleža, [www.enciklopedija.hr](http://www.enciklopedija.hr), 2016
- [12] <https://www.geogebra.org/m/eFvxujfV> ,pristupljeno 13.7.2019.
- [13] Zvučni zid, "Hrvatska enciklopedija", Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2016  
[www.enciklopedija.hr](http://www.enciklopedija.hr)
- [14] <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/darpas-fire-suppression-system-extinguishes-flames-with-sound/>
- [15] Arulandom A.A. Study of Sound Wave as a Flame Extinguisher, 2015

## PRILOG

Popis slika:

Slika 1. Otkriće vatre.....	4
Slika 2. Prikaz gorenja.....	5
Slika 3. Slojeviti plamen svijeće.....	8
Slika 4. Plamen drvenog ugljena.....	8
Slika 5. Boja plamena svijeće.....	10
Slika 6. Različite vrste plamena kod Bunsenovog plamenika.....	11
Slika 7. Prikaz temperatura plamena svijeće.....	12
Slika 8. Prikaz zone gorenja svijeće.....	13
Slika 9. Gorenje natrija.....	14
Slika 10. Kuglasti oblik plamena kod nulte gravitacije.....	16
Slika 11. Spektar elektromagnetskih valova s istaknutim dijelom vidljive svjetlosti.....	17
Slika 12. Prikaz amplitude kod zvučnog vala.....	21
Slika 13. Prikaz transverzalnog i longitudinalnog vala.....	24
Slika 14. Osjet zvuka ili osjetljivost uha.....	26
Slika 15. Northrop F/A – 18 probija zvučni zid.....	30
Slika 16. Probijanje zvučnog zida.....	31
Slika 17. Prikaz stošca udarnog vala.....	31
Slika 18. Djelovanje zvučnog vala.....	35
Slika 19. Ponašanje plamena svijeće usred utjecaja zvuka.....	36
Slika 20. Konture zvučnog tlaka.....	37
Slika 21. Konture brzine zvuka.....	38
Slika 22. Tlak zvuka – 25% manji promjer na izlazu.....	39
Slika 23. Brzina zvuka – 25% manji promjer na izlazu.....	39
Slika 24. Tlak zvuka – 50% manji promjer na izlazu.....	39
Slika 25. Brzina zvuka – 50% manji promjer na izlazu.....	39
Slika 26. Vrijeme potrebno za gašenje krute tvari.....	40
Slika 27. Penetracija vatre u drvetu.....	40
Slika 28. Gašenje zapaljivih plinova zvukom.....	41
Slika 29. Gašenje zapaljivih tekućina zvukom.....	41



Slika 30. Gašenje zapaljivih tekućina zvukom.....	42
Slika 31. Vakuum efekt usmjerivača.....	43

Popis tablica:

	Stranica
Tablica 1. Temperatura plamena, za različite tvari (kod 20 °C zraka i tlaka od 1 bara).....	15
Tablica 2. Boje vidljive ljudskom oku.....	18
Tablica 3. Razine glasnoće.....	27
Tablica 4. Brzina zvuka kod različitih medija.....	29
Tablica 5. Vrijeme gašenja kod različitih frekvencija i različitih udaljenosti.....	37
Tablica 6. Vrijeme sa smanjenim izlazom usmjerivača za 25%.....	42