Pronalaženje *Blazhko* zvijezda izvan skupova zvijezda

Natjecanje iz astronomije 2024.

2. razred SŠ, jedan natjecatelj

[Sažetak Rada 4](#_Toc154744690)

[1 UVOD 5](#_Toc154744691)

[1.1 Motivacija i cilj 5](#_Toc154744692)

[1.2 Promjenjive zvijezde 6](#_Toc154744693)

[1.2.1 Tipovi promjenjivih zvijezda 6](#_Toc154744694)

[1.2.2 Mehanizam pulsiranja promjenjivih zvijezda 6](#_Toc154744695)

[1.2.3 Promatranje promjenjivih zvijezda - svjetlosne krivulje 6](#_Toc154744696)

[1.2.4 RR Lire zvijezde 8](#_Toc154744697)

[1.3 Blazhko efekt 8](#_Toc154744698)

[1.3.1 Značajke Blazhko efekta 8](#_Toc154744699)

[1.3.2 Dosadašnje spoznaje o efektu 8](#_Toc154744700)

[2 METODOLOGIJA 10](#_Toc154744701)

[2.1 Dohvat i priprema podataka 10](#_Toc154744702)

[2.2 Osnovna analiza podataka 11](#_Toc154744703)

[2.3 Selekcija RR Lyrae zvijezda 12](#_Toc154744704)

[2.3.1 Lomb-Scargle periodogram 12](#_Toc154744705)

[2.3.2 Selekcija po periodu i tipu krivulje 12](#_Toc154744706)

[2.4 Analiza RR Lyrae zvijezda 13](#_Toc154744707)

[2.4.1 Računanje preciznog perioda za RR Lyrae zvijezde 13](#_Toc154744708)

[2.4.2 Algoritam analize periodograma 13](#_Toc154744709)

[2.4.3 Računanje najboljeg *fita* za svjetlosnu krivulju 13](#_Toc154744710)

[2.4.4 Statističke metode analize *fita* svjetlosne krivulje 13](#_Toc154744711)

[2.4.5 Spremanje svih podataka 13](#_Toc154744712)

[2.5 Skupljanje kandidata za Blazhko zvijezde 14](#_Toc154744713)

[2.5.1 Filtriranje loših podataka 14](#_Toc154744714)

[2.5.2 Algoritam za prepoznavanje kandidata Blazhko zvijezda pomoću parametara 14](#_Toc154744715)

[2.6 Analiza Blazhko efekt kandidata 15](#_Toc154744716)

[2.6.1 Prikazivanje jedne faze RR Lyrae zvijezde 15](#_Toc154744717)

[2.6.2 Prikazivanje periodograma zvijezde 15](#_Toc154744718)

[2.6.3 Prikazivanje sezone promatranja zvijezde 15](#_Toc154744719)

[2.6.4 Prikazivanje podataka za svaku sezonu promatranja 15](#_Toc154744720)

[2.6.5 Stvaranje sučelja za identifikaciju Blazhko zvijezda 15](#_Toc154744721)

[2.6.6 Način provođenja identifikacije Blazhko zvijezda 16](#_Toc154744722)

[2.7 Pouzdanost u Blazhko zvijezde 16](#_Toc154744723)

[3 REZULTATI 17](#_Toc154744724)

[3.1 Osnovna analiza podataka 17](#_Toc154744725)

[3.2 Selekcija RR Lyrae zvijezda 17](#_Toc154744726)

[3.3 Analiza RR Lyrae zvijezda 17](#_Toc154744727)

[3.4 Potraga za Blazhko kandidatima 17](#_Toc154744728)

[3.5 Analiza Blazhko efekt kandidata 17](#_Toc154744729)

[3.6 Konačni katalog Blazhko zvijezda 17](#_Toc154744730)

[4 RASPRAVA I ZAKLJUČAK 18](#_Toc154744731)

[5 LITERATURA I IZVORI 19](#_Toc154744732)

[6 PRILOG - programi 20](#_Toc154744733)

# Sažetak Rada

U ovom praktičnom radu sam analizirala svjetlosne krivulje 7010 periodičnih promjenjivih zvijezda koje se nalaze izvan skupova zvijezda uspoređujući 2 baze podataka, LINEAR i ZTF, čija je razlika u vremenskom razdoblju otprilike 10 godina. Od njih 7010, pobliže sam analizirala 2710 RR Lyrae promjenjivih zvijezda za znakove *Blazhko efekta*. RR Lyrae promjenjive zvijezde imaju vrlo mali periodičan ciklus od 0.05 dana do 1.2 dana te su vrlo stari bijeli divovi s niskim metalicitetom.

Glavni cilj ovoga rada je bio da u bazi podataka od 2710 RR Lyrae zvijezda pronađem zvijezde koje pokazuju prisustvo *Blazhko efekta*. *Blazhko efekt* je pojava kod RR Lyrae zvijezda koja uzrokuje modulaciju svjetlosnih krivulja ovih zvijezda te promjene u amplitudi i periodu nakon duljih perioda vremena.

# 1 UVOD

## 1.1 Motivacija i cilj

Noćno nebo prepuno je zvijezda gdje svaka sije svojom svjetlošću i obasjava nebeski svod. Zvijezdin sjaj ovisi o njenoj temperaturi i radijusu, no on ipak nije konstantan. Sjaj zvijezde se stalno mijenja, zbog termodinamičkih fluktuacija same zvijezde koja se stalno širi i kontrahira što mijenja sjaj. Iako je promjena svjetlosti tipična za sve zvijezde, one su često minimalne i teško primjetne. Ali neke zvijezde, drastično mijenjaju svoju magnitudu te fluktuiraju po amplitudi od 1 do 2 magnitude. Ove zvijezde su promjenjive zvijezde. One su iznimno zanimljive te nam mogu mnogo informacija pridonijeti o strukturi galaksija, udaljenosti svemirskih objekata i dr. Poseban tip promjenjivih zvijezda jesu RR lire zvijezde. One pokazuju jedan misteriozan efekt u astrofizici koji do dan danas nije objašnjen, a taj efekt jest *Blazhko* efekt. Upravo zbog našeg minimalnog razumijevanja efekta te malog broja RR Lira zvijezda koje prikazuju ovaj efekt, odlučila sam istražiti postojanje efekta kod RR Lira zvijezda koje se ne nalaze u nekome specifičnome skupu. Pronalaženjem novih Blazhko zvijezda s drugačijim svojstvima od dosadašnjih zvijezda pridodaje znanju o Blazhko efektu kako bi znanstvenici mogli otkriti nove informacije i možda dokučiti zašto on nastaje te kako funkcionira.

Ciljevi ovog praktičnog rada su:

* Istražiti promjenjive zvijezde te kako funkcioniraju
* Razumjeti dosadašnje spoznaje o Blazhko efektu i kako ga prepoznati
* Dohvatiti i pripremiti svjetlosne krivulje RR Lira zvijezda iz dviju različitih baza podataka s ~10 godina razlike u vremenu promatranja
* Analizirati periode, *fitove* te periodograme RR Lira i odabrati kandidate za Blazhko zvijezde
* Vizualno analizirati kandidate te odrediti konačni katalog Blazhko zvijezda

## 1.2 Promjenjive zvijezde

### 1.2.1 Tipovi promjenjivih zvijezda

**Promjenjive zvijezde** su zvijezde čiji se sjaj, odnosno magnituda mijenja. Postoji više razloga zašto zvijezde mijenjaju svoj sjaj, stoga ih dijelimo na *intrinzične i ekstrinzične promjenjive zvijezde.* Intrinzično promjenjive zvijezde su one čiji mehanizam za mijenjanje sjaja funkcionira zbog fizičkih procesa unutar same zvijezde. Ekstrinzične promjenjive zvijezde mijenjaju svoj sjaj zbog vanjskih utjecaja, kao npr. ekliptične binarne zvijezde, zvjezdane pjege, promjena oblika zvijezde zbog gravitacijskih ili magnetskih utjecaja.

Sukladno tome, dijelimo intrinzične promjenjive zvijezde na **pulsirajuće, kataklizmičke, eruptivne promjenjive zvijezde i na mlade zvjezdane objekte.** U ovome radu se fokusiramo na *pulsirajuće promjenjive zvijezde.*

Ima mnogo vrsta pulsirajućih promjenjivih zvijezda te su samo neke od njih **RR Lire**, *Cefeide, W Virginis, RV Tauri, Delta Scuti, Sx Phoenix* zvijezde, a od zvijezda s dugim periodom su *Mira i djelomično-promjenjive zvijezde*.

### 1.2.2 Mehanizam pulsiranja promjenjivih zvijezda

Postoje 2 glavna načina pulsiranja promjenjivih zvijezda: radijalno i ne-radijalno pulsiranje. **Radijalno pulsiranje** je kada čitava zvijezda povećava i smanjuje svoj volumen, što uzrokuje promjenu svjetlosti.

Pulsirajuće zvijezde najčešće su starije zvijezde, budući da one imaju velike količine helija kao produkt nuklearne fuzije vodika. U slojevima zvijezde nalazi se djelomično ioniziran helij, koji ima veći kapacitet za primanje topline, što uzrokuje neefikasan prijenos energije iz jezgre prema površini zvijezde. Sloj prima sve više energije te ionizira se sve više helija. Zbog svog dobitka energije, slijedi volumno termičko rastezanje sloja, što povećava ukupni volumen zvijezde i smanjuje unutarnji termalni tlak. Povećanjem polumjera zvijezde povećava se i površina, a s time se gubi dio količine energije koja se emitira u svemir. Gubljenjem energije smanjuje se količina energije u slojevima s ioniziranim helijem te gravitacija započinje kontrakciju zvijezde. Svjetlost se ponovno može efikasno gibati do površine zvijezde, a termalni tlak se ponovno povisuje te ciklus počinje iznova.

Prethodno objašnjenim mehanizmom pulsiraju radijalno pulsirajuće zvijezde. No, osim *temeljnog načina pulsiranja*, gdje čitava zvijezda se povećava i smanjuje, postoje modovi pulsiranja gdje samo pojedini slojevi zvijezde se šire i kontrahiraju. Zvijezda može imati beskonačno mnogo modova odnosno slojeva zvijezde koji pulsiraju te ti slojevi onda mijenjaju svjetlost zvijezde.

Neradijalno pulsiranje je kada zvijezda *mijenja svoj oblik*, a ne volumen. Uzrok ovog načina pulsiranja može biti kada zvijezda gubi masu, zbog gravitacijskih utjecaja drugih tijela u sustavu zvijezda ili zbog magnetskih efekata.

### 1.2.3 Promatranje promjenjivih zvijezda - svjetlosne krivulje

Promjenjive zvijezde promatramo optičkim teleskopima koji se mogu nalaziti na zemlji ili u svemiru te oni sakupljaju svijetlost određen niz godina u **sezonama**. Vrstu podatka koju prikupljamo za promjenjive zvijezde zove se **svjetlosna krivulja**, jer ona prikazuje promjenu svijetlosti zvijezde u odnosu na proteklo vrijeme.

Svjetlosna nam otkriva mnoge aspekte jedne promjenjive zvijezde, kao što su period promjenjivosti, amplitudu promjene magnitude te oblik promjene svjetlosti jednog ciklusa. Iz ovih podataka možemo kategorizirati promjenjive zvijezde u njihove tipove, budući da svaki tip promjenjivih zvijezda ima svoj prosječni period te oblik krivulje.

Izračunom perioda možemo *prikazati jedan ciklus promjenjive zvijezde*. Slika 1 prikazuje ukupnu svjetlosnu krivulju za jednu zvijezdu iz podataka korištenih u ovome radu te prikaz jednog ciklusa promjenjivosti.

A graph of a graph of a graph

Description automatically generated with medium confidence

Slika 1: primjer ukupne svjetlosne krivulje i jednog ciklusa

### 1.2.4 RR Lire zvijezde

RR Lire su kratko-periodični bijeli divovi spektralnog tipa A s niskim metalicitetom. Često se nalaze u kuglastim skupovima budući da su oni stari skupovi zvijezda te su i RR Lire starije zvijezde. Upravo zbog toga koriste helij umjesto vodik kao glavno gorivo za nuklearnu fuziju, omogućavajući pulsirajući mehanizam promjenjivosti sjaja. Period im seže od 0.05 do 1.2 dana te amplituda sjaja od 0.3 do 2 magnitude. Sve RR lire imaju jednaku intrinzičnu svjetlost, stoga se koriste kao „standardne svijeće“ za računanje udaljenosti u svemiru. Prikazuju odnos perioda i luminoziteta u drugačijem omjeru od Cefeida (vrsta promjenjivih zvijezda). RR Lire su također najčešći tip pulsirajućih promjenjivih zvijezda prema dosadašnjim podatcima. Postoje 3 vrste RR Lira zvijezda, ovisno po načinu pulsiranja, no važno je napomenuti da RR Lira može promijeniti način pulsiranja tijekom svog života.

#### 1.2.4.1 RRAB tip

RRAB tip zvijezda je najčešća varijanta RR Lira zvijezda. One imaju asimetričan oblik svjetlosne krivulje zbog pulsiranja temeljnim načinom. Slika 3 prikazuje svjetlosnu krivulju RRAB tipa zvijezde.

#### 1.2.4.2 RRC tip

RRC zvijezde imaju simetričnu svjetlosnu krivulju s iznimno kratkim periodom, od 0.2 do 0.5 dana. Također, imaju vrlo malu promjenu magnitude za razliku od RRAB tipa. One pulsiraju u prvom modu pulsiranja. Slika 2 prikazuje svjetlosnu krivulju RRC tipa zvijezde.

A graph of a graph of a graph

Description automatically generated with medium confidence

Slika 2: Razlika između RRAB i RRC tipa zvijezda

Možemo vidjeti iz slike iznad da postoje razlike između oblika RRAB i RRC tipa zvijezda. RRAB imaju oštriji rast i pad magnitude, dok RRC ima zaobljen vrh i sporiji pad magnitude.

#### 1.2.4.3 RRD tip

RRD zvijezde pulsiraju i radijalno i u prvom modu ili ne-radijalnom načinom pulsiranja, što rezultira zbrajanjem promjene svjetlosti i jednog i drugog načina. Slika 3 prikazuje svjetlosnu krivulju RRD tipa zvijezde.

A graph of a graph showing the number of points

Description automatically generated with medium confidence

Slika 3: primjer RRD tipa zvijezde [1]

## 1.3 Blazhko efekt

### 1.3.1 Značajke Blazhko efekta

#### 1.3.1.2 Povezanost periodograma i Blazhko efekta

### 1.3.2 Dosadašnje spoznaje o efektu

# 2 METODOLOGIJA

## 2.1 Dohvat i priprema podataka

Za uspješnu analizu RR Lira u potrazi za Blazhko efektom, potrebno je razmatrati svjetlosne krivulje iste zvijezde u drugačijem vremenskom razdoblju. Zato u ovom praktičnom radu koristim 2 baze podataka: **LINEAR** i **ZTF**, kako bih mogla uspoređivati parametre zvijezda s vremenskim razmakom od otprilike 10 godina. U ovom praktičnom radu koristim sljedeće materijale:

* Računalo s pristupom internetu
* Web stranicu GitHub
* Programski jezik Python
* Programski paket Quarto
* Jupyter notebooks – Anaconda okolina

### 2.1.1 **LINEAR** podaci

**LINEAR** set podataka (Lincon Near-Earth Asteroid Research) sadrži 7010 svjetlosnih krivulja periodičnih promjenjivih zvijezda. Iako je izvorna misija ovog istraživanja bila pronaći asteroide, naknadno se promatrao značajan dio neba, uključujući sjaj raznih promjenjivih zvijezda. **LINEAR** istraživanje provedeno je s 2 teleskopa na lokaciji u Novom Meksiku. Dva su teleskopa ekvatorijalno postavljena tipa GEODSS, gdje je svaki teleskop označen kao *L1* i *L2*. Promatrali su široki dio vidljivog spektra i bliski infracrveni spektar.

Proces čišćenja podataka prije analize sadržavao je sljedeće postupke:

1. Uklanjanje šuma koje stvara kamera
2. Uklanjanje umjetnih linija i gradijenata zbog različite osjetljivosti piksela
3. Oduzimanje pozadinskog svjetla pomoću Poissonove statistike

Nakon čišćenja podataka, morali su biti astrometrijski ponovno kalibrirani, odnosno znanstvenici au morali osigurati da koordinate objekata u podacima odgovaraju drugom istraživanju, poput SDSS-a. Od svih podataka, 7% je imalo lošu astrometriju (koordinate nisu odgovarale) pa su ih znanstvenici uklonili iz skupa podataka. Ostali podaci imali su 1-2% pogreške u astrometriji.

Idući korak bio je ponovno kalibriranje fotometrije, odnosno filteri i svjetlosni izvori morali su biti ponovno kalibrirani kako bi odgovarali SDSS podacima. Ispravci su se odnosili na pogreške CCD kamere, ispravljanje magnituda objekata u podacima i ispravljanje podcijenjenih pogrešaka magnitude. Pošto je kalibracija odrađena, podaci su grupirani u različite kategorije, uključujući kategoriju promjenjivih zvijezda. Iako izvorni skup podataka ima 5 milijardi objekata, od njih samo 7010 su potvrđene periodične promjenjive zvijezde. Znanstvenici su naknadno analizirali promjenjivi dio skupa podataka kategorizirajući krivulje svjetlosti, izračunavajući njihove periode te izvodeći zaključke iz prethodnih faktora.

**LINEAR** podaci nalaze se unutar Python modula *AstroML*, kao već obrađen i pripremljen skup podataka od 7010 periodičnih promjenjivih zvijezda. **LINEAR** podatke učitavam na sljedeći način:

|  |
| --- |
| **from** astroML.datasets **import** fetch\_LINEAR\_sample  dataL = fetch\_LINEAR\_sample(data\_home='../inputs') |

Podatke spremam u lokalnu mapu zvanu inputs. **LINEAR** podaci strukturirani su unutar Python array objekta, odnosno multi-dimenzionalne liste. Struktura **LINEAR** je sljedeća:

1. dataL je objekt AstroML.datasets i sadrži sljedeće:
   1. dataL.ids popis je svih ID-ova zvijezda, gdje je ID identifikacijski broj zvijezde, svaka ima jedinstveni broj
   2. dataL.get\_light\_curve() je funkcija koja pristupa podacima za određeni ID krivulje svjetlosti. Svaka krivulja svjetlosti je array objekt gdje je svaki stupac **vrijeme**, **magnituda** i **pogreška** **magnitude**. Kako bi se dobio niz za svaki stupac, originalni niz mora biti transponiran – svaki stupac podataka pretvara se u zasebnu listu
2. dataL.targets sadrži sve metapodatke za svaku svjetlosnu krivulju, npr. rektascenciju, deklinaciju, itd.

### 2.1.2 Selekcija RR Lira iz **LINEAR** podataka

Kako bi kasnija analiza podataka bila efikasnija te da računalo štedi svoje resurse ne izvršavajući nepotrebne programe, odmah selektiram sve RR Lire iz LINEAR podataka koje onda kasnije tražim u ZTF podacima. Selekcija se odvija u nekoliko koraka.

Prvi korak jest preuzeti dodatne podatke o LINEAR zvijezdama kao period, informacije o boji te klasifikacija zvijezde kako bismo mogli izabrati RR Lire.

Drugo, potrebno je izračunati preliminarni period LINEAR zvijezda u originalnoj bazi podataka kako bismo ih usporedili s periodima u dodatnim podacima i razlikovali cikluse s jednim „padom“ i dva „pada“. Postoje 2 glavne razlike između tipova promjenjivih zvijezda: imaju jedan glavan pad u magnitudi pa ponovni porast ili imaju 2 uzastopna pada pa porasta magnitude te ih zovemo ekliptične binarne promjenjive zvijezde. Računanjem preliminarnog perioda možemo razlikovati

(keep on writing later)

### 2.1.2 **ZTF** podaci

*Zwicky Transient Facility* iliti ZTF je optičko istraživanje koje koristi Palomar 48-inčni Schmidtov teleskop za promatranje čitavog neba sjeverne hemisfere u 3 različita filtera: „*g“* odnosno zeleno (*engl. green*), „*r“* odnosno crveno*(engl. red)* i „*i“* odnosno infracrveno*(engl. infrared)*. Promatra nebo od listopada 2017. godine. Teleskop ima vrlo veliko vidno polje te onda ima sposobnost primanja mnogo podataka. Svi podaci koje ZTF prikupi pohranjuju se u IPAC, kojem se može pristupiti putem IRSA.

Podaci su obrađeni tako da svaki piksel ima prosječno 5 bitova, a iako je proces povećao šum neba za 1%, greška je zanemariva. Sve slike bile su FITS datoteke koje je ZTF-ov program obradio na sljedeći način:

1. Oduzeo šum koji nastaje od same kamere – dobiva se fotografijom kamere s zatvorenim objektivom
2. Kalibrira svjetlost svakog piksela ovisno o osjetljivosti svakog piksela na primanje svjetlosti
3. Korištenjem paketa *SCAMP* svi objekti su astrometrijski kalibrirani kako bi odgovarali koordinatama istraživanja *GAIA-e.*
4. Sve slike su fotometrijski kalibrirane prema istraživanju *PanSTARRS 1*.
5. Na kraju su zasićenosti boja slika kalibrirane, uklonjeni loši pikseli, instrumentalni artefakti te fantomski objekti

Svaka slika je zatim kategorizirana kao **pokretni** ili **promjenjivi** **izvor** pomoću algoritma *ZOGY*. Nadalje, točkasti pokretni objekti identificirani su pomoću prilagođenog *ZTF Moving-object Discovery Engine (ZMODE)*.

ZTF je uspio promatrati **prijelazne objekte,** supernove koje se nalaze u drugim galaksijama, a ZTF istraživanje promatralo je njihove krivulje svjetlosti. Promatrao je i neutrine i događaje povezani s gravitacijskim valovima tepokazalo se da bi znanstvenici mogli koristiti ZTF u budućnosti za promatranje sličnih događaja i pojava. Na kraju, promatrao je i promjenjive objekte što uključuje promjenjive zvijezde, ali i krivulje svjetlosti asteroida. Svjetlosne krivulje u ZTF skupu podataka nadograđene su svakih nekoliko mjeseci, a pohranjene su u HDF5 datotekama za svako polje promatranja. ZTF sadrži krivulje svjetlosti mnogih vrsta objekata, a neke od najznačajnijih vrsta su Be zvijezde, RR Lira zvijezde, krivulje svjetlosti NEO, Asteroida i aktivnost Kometa i Kentaura.

#### 2.1.2.1 Dohvat LINEAR koordinata

ZTF parove LINEAR zvijezdama tražimo pomoću **ra i dec** koordinata (rektascencije i deklinacije), tako što pretražujemo bazu podataka ZTF-a i tražimo podatke za zvijezde koje se nalaze kod dotičnih koordinata unutar malog radijusa. Iduća funkcija opisuje proces:

**def** **getZTFlightcurve**(ra, dec, radius=3.0):

'''

Ova funkcija koristi se koordinatama LINEAR zvijezde kako bi pronašla tu istu zvijezdu u ZTF podacima.

Argumenti:

ra(float): rektascenzija

da(float): deklinacija

radius(float): radijus područja potrage na nebu

'''

**try**:

lcq = lightcurve.LCQuery() # stvaranje ztfquery objekta za potragu neba

res = lcq.from\_position(ra, dec, radius) # traženje u podacima prema rektascenziji, deklinaciji i radijusu

# Selekcija samo podataka za vrijeme, magnitude, greške u magnitudi, filter te catflag

ZTFdata = res.data[['mjd', 'mag', 'magerr', 'catflags', 'filtercode']]

# Brisanje očitih lažnih točaka

ZTFdata = ZTFdata.loc[ZTFdata['catflags'] < 32768]

**except**:

# Ako nema podataka, spremi praznu tablicu

ZTFdata = pd.DataFrame(())

**return** ZTFdata

Funkcija stvara ztfquery objekt, koji je dio Python modula ztfquery, poseban modul ZTF-a. Preko ovog objekta, traži se područje neba s određenim radijusom koje odgovara unesenim koordinatama. Pošto je pronađena zvijezda, preuzeti su stupci podataka s vremenom, magnitudom, greškom magnitude, catflagom te filterom. **(objasni catflag**) Zatim se brišu očite lažne točke. Ako program nije uspio pronaći par LINEAR ID-u, sprema se prazna tablica podataka.

Zatim, pomoću iduće funkcije, tražimo parove za sve LINEAR RR Lire zvijezde:

**if** os.path.isfile(NAME): # ako ova datoteka postoji

ZTF\_data\_lc = np.load(NAME, allow\_pickle=**True**) # učitaj podatke

**else**:

Lids = Lrrlyr['ID'].to\_numpy()

rectascension = Lrrlyr['ra'].to\_numpy() # lista svih rektascenzija

declination = Lrrlyr['dec'].to\_numpy() # lista svih deklinacija

ZTF\_data\_lc = [] # postavljanje prazne liste koja će se ispuniti podacima

**for** i **in** tqdm(range(len(Lids))):

Lid = Lids[i] # određujemo svaki LINEAR ID

ra = rectascension[i] # pronalazimo dotičnu rektascenziju

dec = declination[i] # pronalazimo dotičnu deklinaciju

ZTFdata = getZTFlightcurve(ra, dec) # koristeći prethodnu funkciju, tražimo ZTF podatke

ZTF\_data\_lc.append((Lid, ZTFdata)) # spremamo ZTF podatke za dotičnu zvijezdu

# spremamo podatke na računalo

**if** i%10==0:

ZTF\_data\_lca = np.array(ZTF\_data\_lc, dtype=object)

np.save("../outputs/ZTF\_dataset\_"+end+".npy", ZTF\_data\_lca, allow\_pickle=**True**)

ZTF\_data\_lca = np.array(ZTF\_data\_lc, dtype=object)

np.save("../outputs/ZTF\_dataset\_"+end+".npy", ZTF\_data\_lca, allow\_pickle=**True**)

Pomoću petlje iznad, prolazim kroz sve selektirane RR Lire i tražim njihove ZTF parove. Nakon pripreme i dohvata podataka, možemo provesti osnovnu statističku analizu podataka.

## 2.2 Osnovna analiza podataka

Osnovnom analizom LINEAR i ZTF podataka uočavamo da LINEAR ima, kada bismo zbrojili broj mjerenja u svakoj svjetlosnoj krivulji RR Lira, 733550 mjerenja, dok ZTF parovi imaju 1423997 mjerenja. Mnogo veći broj mjerenja kod ZTF podataka je prisutan zbog strukture ZTF podataka: sadrži mjerenja u više filtera, točnije 3 filtera. Stoga, crveni filter ima 1772818 mjerenja, 1423997 mjerenja u zelenom i 337132 mjerenja u infracrvenom filteru. Iz idućeg grafa možemo vidjeti distribuciju mjerenja po svjetlosnoj krivulji za LINEAR zvijezde.

A graph of a number of people

Description automatically generated

Graf 1: distribucija mjerenja kod LINEAR RR Lira

Uočavamo da većina zvijezda ima malo iznad 200 mjerenja po krivulji, s uzastopnim porastom u brojnosti za otprilike 500 mjerenja po krivulji. Zapažanje je vrlo pozitivno, budući da za kasniju analizu potrebne su nam LINEAR zvijezde sa više od 250 mjerenja po krivulji za pouzdanu analizu. Idući dijagram prikazuje distribuciju mjerenja za sve ZTF filtere:

A graph of a number of different colored lines

Description automatically generated with medium confidence

Graf 2: distribucija mjerenja kod ZTF RR Lira

Vidimo da distribucije svih filtera imaju sličan oblik, međutim infracrveni grafikon ima manji raspon x-osi. Zeleni filtar najviše zvijezda ima broj mjerenja manje od otprilike 100 promatranja te otprilike 400-500 promatranja. Vrlo slična situacija je s crvenim filtrom, s nešto višim brojem opažanja, otprilike 500-600. Infracrveni filtar ima najmanji broj točaka, s većinom zvijezda ispod otprilike 50 promatranja te 100 točaka.

Drugi osnovan aspekt samih svjetlosnih krivulja je duljina promatranja dotične zvijezde. Zvijezda nije promatrana čitavo vrijeme, nego u kraćim sezonama ili u intervalima od jedne noći, budući da se ne promatra tokom dana. Iduća 2 dijagrama prikazuju razliku u vremenskom razdoblju promatranja kod LINEAR i ZTF parova:

A graph with numbers and lines

Description automatically generated

Graf 3: distribucija vremenskih perioda LINEAR zvijezda

A graph of a graph

Description automatically generated with medium confidence

Graf 4: distribucija vremenskih perioda ZTF zvijezda po filterima

Uočavamo kako kod LINEAR zvijezda, većina zvijezda ima od 1900 do 2000 dana vremenski period promatranja. Slična je situacija i kod ZTF zvijezda, no vidimo da postoji mnogo zvijezda sa izrazito kratkim periodom promatranja ili gdje je period jednak 0. Zapažanje perioda jednakim 0 objašnjavamo činjenicom da ne postoji ZTF par za svaku LINEAR zvijezdu, stoga ni neće imati vrijeme promatranja.

Koristeći se preliminarnim podacima o RR Lirama, možemo analizirati i druge karakteristike kao što su period, amplituda, i dr. Distribucija preliminarnih perioda (LINEAR zvijezda) prikazuje sljedeći dijagram:

A graph with a number of lines

Description automatically generated with medium confidence

Graf 5: distribucija preliminarnih perioda LINEAR zvijezda

Uočavamo kako svi periodi su unutar raspona tipičnih za RR Lire, gdje najviše zvijezda ima iznimno kratak period od 0.6 dana. Analizirajući amplitude LINEAR RR Lira, iz idućeg dijagrama uočavamo da je raspon amplituda unutar granica za mogućnosti zvijezde te da najviše zvijezda ima promjenu od otprilike 0.4 magnituda.

A graph of a number of different sizes

Description automatically generated with medium confidence

Graf 6: distribucija preliminarnih amplituda LINEAR RR Lira

Od ukupno 2710 RR Lira koje analiziram u ovome praktičnome radu, 2144 njih je tipa RRAB i 566 je tipa RRC te njihovu distribuciju vidimo na idućem grafu:

A graph with a bar

Description automatically generated

Graf 7: preliminarna distribucija RRAB i RRC tipa RR Lira

Također, možemo vidjeti da 79.11% našeg uzorka RR Lira su RRAB tipa, dok 20.89% uzorka su RRC tipa. U populaciji svih RR Lira, omjer RRAB prema RRC je sličan ovome omjeru [2].

Za kraj preliminarne analize, htjela sam iskoristiti dobivene ekvatorijalne koordinate, pretvoriti ih u galaktičke koordinate te analizirati prostornu distribuciju RR Lira.

A diagram of a star

Description automatically generated with medium confidence

Graf 8: prostorna distribucija RR Lira po galaksiji

Možemo vidjeti kako RRAB i RRC nisu grupirane u posebna područja nego su ravnomjerno raspršene po nebu te da se sve zvijezde nalaze na galaktičkoj širini višoj od 30º. Zapažanje pokazuje da zvijezde se ne nalaze u nekom posebnom skupu ni prema središtu galaksije.

## 2.4 Analiza RR Lira

Nakon što smo pripremili sve LINEAR i ZTF parove zvijezda, potrebno ih je detaljno analizirati za iduću fazu praktičnog rada. Analiza uključuje precizno računanje perioda i LINEAR i ZTF podataka za dotičnu zvijezdu, analizirati produkt računanja perioda odnosno periodogram i računanje vrijednosti chi2 te *fit* za svaku svjetlosnu krivulju.

### 2.4.1 Računanje preciznog perioda za RR Lira

U matematičkom smislu, svjetlosna krivulja je skup točaka u koordinatnom sustavu. Period je veličina koja određuje oblik ovih točaka u skupu, odnosno što je period veći izduženija je krivulja, a što je manji uža je krivulja. Pod „krivulja“ mislim na liniju koju bismo nacrtali povezujući sve točke svjetlosne krivulje kao aproksimacija njenog oblika, odnosno ***fit*** svjetlosne krivulje.

Kada bismo imali neke točke pozicionirane unutar koordinatnog sustava i htjeli bismo povući liniju koja najbolje spaja sve točke, prvo bismo nacrtali ravnu liniju. Linearna funkcija je najgrublja aproksimacija podataka te ih najčešće ne opisuje na najprecizniji način. Koristeći idući polinom po veličini, kvadratnu funkciju, možda bismo mogli bolje opisati točke. Ako koristimo kubnu funkciju ili polinom 4., 5. ili čak 6. stupnja, možemo još bolje opisati podatke i imati točniji *fit*.

Svjetlosnu krivulju također možemo prikazati kao set podataka ovisnim o vremenu, odnosno promjenu sjaja o vremenu možemo opisati valovima. Najjednostavniji matematički val jest *sinusoida.* Što više sinusoida spajamo zajedno, možemo postići kompleksniji val što je analogno procesu povećanja stupnja polinoma za što bolji *fit*.

Zato za računanje perioda promjenjivih zvijezda koristimo metodu koja se zove engl. Lomb-Scargle metoda. Ona se bazira na matematičkom Fourier nizu te uspješno radi za podatke koji nisu ravnomjerno raspoređeni po x-osi (razlike između svake 2 točke nisu jednake). Fourier transformacija uzima svjetlosnu krivulju, testira različite frekvencije sinusoida koja je građena od jednostavnijih sinusoida i određuje je li dotična frekvencija zbilja najbolji *fit* za podatke. Kvantificiranjem je li *fit* dobar postižemo veličinu zvanom *moć frekvencije*. Kada bismo nacrtali graf svake frekvencije i njene moći za dotičnu svjetlosnu krivulju, dobili bismo njen **periodogram**, koji je važan za daljnju analizu. Frekvencija sa najvećom vrijednošću moći bira se kao najbolja frekvencija za dotičnu svjetlosnu krivulju te je period recipročna vrijednost frekvencije. Graf ispod prikazuje kako izgleda tipični periodogram:

Insert sliku periodograma

### 2.4.2 Algoritam analize periodograma

### 2.4.3 Računanje najboljeg *fita* za svjetlosnu krivulju

### 2.4.4 Statističke metode analize *fita* svjetlosne krivulje

### 2.4.5 Spremanje svih podataka

## 2.5 Skupljanje kandidata za Blazhko zvijezde

### 2.5.1 Filtriranje loših podataka

### 2.5.2 Algoritam za prepoznavanje kandidata Blazhko zvijezda pomoću parametara

#### 2.5.2.1 Prvi sloj: periodogram

#### 2.5.2.2 Drugi sloj: bodovna skala svjetlosnih krivulja ovisno o parametrima

## 2.6 Analiza Blazhko efekt kandidata

### 2.6.1 Prikazivanje jedne faze RR Lyrae zvijezde

### 2.6.2 Prikazivanje periodograma zvijezde

### 2.6.3 Prikazivanje sezone promatranja zvijezde

### 2.6.4 Prikazivanje podataka za svaku sezonu promatranja

### 2.6.5 Stvaranje sučelja za identifikaciju Blazhko zvijezda

### 2.6.6 Način provođenja identifikacije Blazhko zvijezda

## 2.7 Pouzdanost u Blazhko zvijezde

# 3 REZULTATI

## 3.1 Osnovna analiza podataka

## 3.2 Selekcija RR Lyrae zvijezda

## 3.3 Analiza RR Lyrae zvijezda

## 3.4 Potraga za Blazhko kandidatima

## 3.5 Analiza Blazhko efekt kandidata

## 3.6 Konačni katalog Blazhko zvijezda

# 4 RASPRAVA I ZAKLJUČAK

# 5 LITERATURA I IZVORI

1. <https://ogle.astrouw.edu.pl/atlas/RR_Lyr.html>
2. <https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2018/12/aa33514-18/aa33514-18.html>

# 6 PRILOG – programi

|  |
| --- |
|  |