Natjecanje iz astronomije 2022. godine

Jesu li svi planetarni sustavi slični?

8. razred OŠ, jedan natjecatelj

Sadržaj

[Sažetak rada 4](#_Toc98247002)

[Uvod 5](#_Toc98247003)

[Motivacija i cilj 5](#_Toc98247004)

[O egzoplanetima 5](#_Toc98247005)

[Što su egzoplaneti? 5](#_Toc98247006)

[Kako otkrivamo egzoplanete? 6](#_Toc98247007)

[Osnovne karakteristike egzoplaneta 8](#_Toc98247008)

[Sastav egzoplaneta 13](#_Toc98247009)

[Habitabilnost egzoplaneta 13](#_Toc98247010)

[O vrstama zvijezda 14](#_Toc98247011)

[Što su zvijezde 14](#_Toc98247012)

[Vrste zvijezda 15](#_Toc98247013)

[O planetarnim sustavima 17](#_Toc98247014)

[Metodologija 18](#_Toc98247015)

[Materijali i izvori podataka 18](#_Toc98247016)

[Postupak preuzimanja podataka 18](#_Toc98247017)

[značenje stupaca tablice 19](#_Toc98247018)

[Učitavanje knjižnica i tablice 20](#_Toc98247019)

[Kategorizacija po masi i volumenu 21](#_Toc98247020)

[Po udaljenosti od zvijezde 22](#_Toc98247021)

[Programi za planetarne sustave 24](#_Toc98247022)

[Programi za vrste zvijezda 26](#_Toc98247023)

[Rezultati 28](#_Toc98247024)

[Egzoplaneti 28](#_Toc98247025)

[Povezanost vrste zvijezde i planeta 28](#_Toc98247026)

[Povezanost vrste zvijezde i planetarnim sustava 29](#_Toc98247027)

[Problemi tijekom programiranja 30](#_Toc98247028)

[Rasprava i zaključak 31](#_Toc98247029)

[Literatura i izvori 32](#_Toc98247030)

[Popis slika 32](#_Toc98247031)

[Popis tablica 32](#_Toc98247032)

[Popis grafova 32](#_Toc98247033)

# **Sažetak rada**

U ovom sam se praktičnom radu bavila istraživanjem sličnosti i razlike egzoplanetarnih sustava. Egzoplanet je planet koji kruži oko zvijezde koja nije Sunce, te planetarni sustavi sadrže jednu ili više zvijezda, te jedan ili više egzoplaneta.

Glavni cilj mojeg praktičnog rada je pronaći sličnosti i razlike u planetarnim sustavima, te korelacije između vrste planeta, broj zvijezda ili vrste zvijezda. Kako bih odgovorila na glavno pitanje, provela sam istraživanje s podatcima o egzoplanetima s NASA-ine baze podataka i kategorizirala egzoplanete i zvijezde, te soritrala ih po planetarnim sustavima. Kategorizirala sam planete po 6 kategorija: Terestrički planet, Super Zemlje, planete slične Neptunu, Plinovite divove, Vruće Neptune i Vruće Jupitere. Zvijezde sam kategorizirala po 7 spektralnih tipova: M, K, G, F, A, B i O.

Analizom rezultata za egzoplanete, zvijezde i planetarne sustave uvidjela sam kakvi sve planetarni sustavi postoje. Ima mnogo sustava s jednom zvijezdom i jednim planetom, što upućuje na monotonost u planetarnim sustavima. No, u multiplanetarnim sustavima ima mnogo razlika u vrstama egzoplaneta, broju zvijezda, i broju planeta. Ustanovila sam da oko A tipa zvijezda stvaraju se većinom masovni planeti, te da generalno što je zvijezda veće mase (B i O tip) da brojnost masivnih egzoplaneta raste. Kod planetarnih sustava sa više zvijezda sam također ustanovila da se mogu formirati samo masovni planeti. Osim toga potvrdila sam Keplerov 3. zakon.

# Uvod

## Motivacija i cilj

Kada razmišljam o astronomiji, moja prva pomisao je egzoplanet. Planet izvan našeg sunčevog sustava. U povijesti astronomije, ljudi su mislili kako je Zemlja središte svemira. Od geocentrične teorije sunčevog sustava, do ideje da je naša galaktika jedina u svemiru. To smo sve dokazali pogrešnim, uvidjeli da Zemlja kruži oko Sunca, i da je naša galaktika jedna od bezbroj njih u svemiru. A što je s planetima? Je li Zemlja naš jedini planet? To pitanje je trebalo duže da se odgovori, ali jednoga dana u listopadu 1995. godine i to pitanje je bilo odgovoreno. Pronašli smo planet koji kruži oko zvijezde slične našem Suncu. Taj planet zove se 51 Peg b. On je plinoviti div kojemu treba svega 4 dana da napravi krug oko njegove zvijezde. Kada su to znanstvenici saznali, nisu mogli vjerovati kako takva vrsta planeta može biti toliko blizu zvijezde. Jedan planet je otvorio vrata novoj znanosti, gdje u malo više od 20 godina smo pronašli preko 4000 egzoplaneta. I našli smo planete koje je teško i zamisliti. Planeti sa oblacima od silicija, planeti prekriveni lavom, planeti koji su cijeli prekrivenim oceanom, oni kojima treba samo 18 sati da obiđu sunce, onima gdje je temperatura viša od većina zvijezda ili planet gdje možda pada kiša dijamanata. Svi ovi planeti bude našu prirodnu znatiželjnost o svemiru. Pitamo se, kakvi su drugi planetarni sustavi? Jesu li oni kao naš Sunčev sustav? Odgovor na ovo pitanje otvorilo bi nam mnogo vrata u istraživanju formiranja i opstanak egzoplaneta te kakve sve još vrste možemo očekivati. Također nam može pomoći u potrazi za drugom zemljom. Zato je cilj mojeg ovogodišnjeg rada da probam djelomično odgovoriti na to pitanje, koristeći se najsnažnijim alatom danas: analizom podataka. Ciljevi ovog praktičnog rada su:

* Naučiti kakve sve vrste imamo egzoplaneta i što možemo saznati o njima sa trenutnom tehnologijom;
* Izraditi program koji će kategorizirati planete po njihovim svojstvima;
* Uspoređivati različite planetarne sustave od vrste zvijezda do vrste zvijezda;
* Saznati jesu li svi planetarni sustavi slični, totalno različiti ili postoje neke korelacije koje ih povezuju.

## O egzoplanetima

### Što su egzoplaneti?

Egzoplaneti su planeti koji kruže oko drugih zvijezda osim našeg Sunca. Pronađeni su oko svih vrsta zvijezda, osim O tipa zvijezda jer njihov životni vijek je prekratak u odnosu vremena kojeg je potrebno da bi se egzoplaneti razvili. No, unatoč O tipu zvijezda, pronašli smo egzoplanete koji kruže oko pulsara, neutronskih zvijezda, odnosno mrtvih zvijezda. Prema današnjoj statistici, kaže se da svakoj zvijezdi u našoj galaksiji pripada barem jedan planet, a kod nekih zvijezda pronašli smo cijele sustave planeta. S našim metodama pronalaženja egzoplaneta, možemo uvidjeti koliko su udaljeni od zvijezde, koji im je orbitalni period, koliki im je radijus ili masa ovisno o kojoj metodi pronalaženja govorimo. Također, možemo uvidjeti eksentricitet egzoplaneta. Koristeći masu i radijus egzoplaneta možemo izračunati gustoću i pomoću nje približno odrediti kompoziciju egzoplaneta. Pomoću udaljenosti egzoplaneta i temperaturi njegove zvijezde možemo odrediti prosječnu temperaturu egzoplaneta, no to ovisi o unutarnjoj građi egzoplaneta, ima li atmosferu ili ne te od čega je sastavljena njegova atmosfera ako ju ima. Na kraju, možemo odrediti je li egzoplanet habitabilan, pomoću habitabilne zone i drugih parametra egzoplaneta.

### Kako otkrivamo egzoplanete?

Otkrivanje egzoplaneta nije lak zadatak. Danas se koriste 4 metode za otkrivanje egzoplaneta, a one su:

* Radijalna brzina
* Tranzit egzoplaneta
* Gravitacijsko mikrolenziranje
* Izravno fotografiranje

#### Metoda radijalne brzine

A picture containing diagram

Description automatically generated

Slika : slikoviti prikaz radijalne brzine

Ova metoda bazira se na znanju da i planet i zvijezda imaju masu, te kada planet kruži oko zvijezde, zvijezda ne ostaje stalno na istome mjestu. Zvijezda i planet zajedno kruže oko **središta mase,** gdje masa zvijezda i masa planeta zajedno djeluju. No, masa zvijezde je mnogo puta veća od mase planeta, te je središte mase unutar same zvijezde. To znači da planet kruži oko zvijezde, a i zvijezda oko sebe. Da nema planeta, zvijezda ne bi kružila oko nevidljive točke, i onda ne bi bilo planeta. Ali, znanstvenici nemaju način promatrati kruženje zvijezde oko središta mase direktno. Umjesto toga, znanstvenici koriste jedno zanimljivo svojstvo svijetla. Kada tijelo koje emitira svijetlost prilazi nama, valna duljina te svjetlost se stisne, i svijetlo postaje lagano plava. Suprotno, ako tijelo koje emitira svijetlost pomiče se unatrag u odnosu na Zemlju, njegova valna duljina svjetlost se rastegne, i svijetlo postaje lagano crveno. Ovaj fenomen se naziva **Dopplerov pomak,** i vrlo je koristan u kozmologiji i astrofizici. No, u potražnji egzoplaneta, možemo koristiti Dopplerov pomak i utvrditi je li se zvijezde u pitanju primiču prema nama ili od nas, kako kruži oko svoje nevidljive točke. Koliko je velik Dopplerov pomak ukazuje masu planeta, te može se utvrditi orbitalni period planeta a iz njega udaljenost planeta od zvijezde.

#### tranzit metoda

Diagram, schematic

Description automatically generated

Slika : slikoviti prikaz metode tranzita

U našem Sunčevom sustavu dva planeta, Merkur i Venera, mogu izvesti fenomen koji se zove **tranzit.** Vrlo je rijedak događaj, dogodi se kada planet prođe točno ispred Sunca i vidi se kao mala crna točkica. Kada planet prolazi ispred zvijezde, on blokira mali udio zvijezdine ukupne svijetlosti. Ali, moramo zapaziti da je taj udio vrlo malen, budući da omjer veličine Sunca i planeta je vrlo velik. Tranzit planeta možemo iskoristiti i u potrazi egzoplaneta, što se pokazalo najuspješnijom metodom do sada. Pratimo svijetlost zvijezde, i kada planet prelazi zvijezdu, možemo vidjeti pad svijetlosti zvijezde. Sve podatke bilježimo u **svijetlosnoj krivulji,** koju obrađujemo, crtamo i određujemo je li planet ili ne. Kada smo potvrdili da ta zvijezda ima jedan planet, ili ih ima više, možemo odrediti period planeta pa i ujedno njegovu udaljenost od zvijezde te na kraju radijus planeta.

#### gravitacijsko mikrolenziranje

Chart

Description automatically generated with low confidence

Slika : slikoviti prikaz gravitacijskog mikrolenziranja

Svemir je mreža prostora i vremena. Ovu činjenicu je ustanovio Albert Einstein 1936. godine u svojoj *Generalnoj teoriji o Relativnosti*. Svijetlo putuje po mreži prostora i vremena, a masa npr. zvijezde napravi udubinu u mreži. Kada zvijezda prođe ispred pozadinske zvijezde, svijetlost pozadinske zvijezde će se povečati i napraviti će se leća koja povećava svijetlost prve zvijezde. Ovo ne bi bilo moguće bez Einsteinove teorije relativnosti. Ako zvijezda koja prođe ispred pozadinske zvijezde ima planet(a), onda će se u krivulji svijetlosti pojaviti još jedna mala krivulja koja označava pojačanje svijetlosti zbog prelaska planeta. Ovom metodom se mogu pronaći vrlo mali planeti, te ustanoviti masa, orbitalni period i udaljenost od zvijezde. Nije često korištena metoda, no ima mnogo potencijala.

#### Izravno fotografiranje

A picture containing chart

Description automatically generated

Slika : slikoviti prikaz izravnog fotografiranja

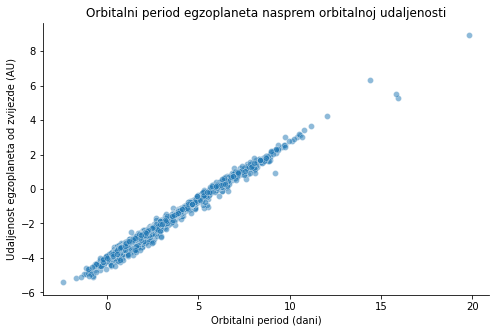
Kad bi uspoređivali planet i zvijezdu, vidjeli bi da je planet mnogo puta manji od zvijezde. Zato kada pogledate zvijezdu kroz teleskop, ne vidite planet kako kruži oko nje. No, ipak je moguće fotografirati egzoplanet koristeći vrlo moćne teleskope. Budući da je zvijezdino svijetlo vrlo jako, od nje se ne vidi ako išta drugo kruži oko zvijezde, tako da prvi korak u izravnom fotografiranju je sklanjanje zvijezde. Taj zadatak obavimo koristeći se koronografom, koji blokira svijetlost zvijezde u teleskop. Ako ta zvijezda ima vrlo veliki planet koji kruži oko nje, možemo ga fotografirati i imati sliku egzoplaneta. Ova metoda nam pruža najsigurniju sliku da egzoplaneti postoje i nalaze li se oko te zvijezde, no ova metoda je ujedno i najteža za izvesti, te se ne koristi često.

### Osnovne karakteristike egzoplaneta

#### Orbitalni period i udaljenost od zvijezde

Orbitalni period planeta je vrijeme koje je potrebno da planet napravi krug oko njegove zvijezde. Udaljenost ovisi o orbitalnom periodu planeta. Kao što znamo iz Keplerovog trećeg zakona koji glasi:

Gdje *P* je orbitalni period, a *a* je udaljenost planeta od njegove zvijezde.

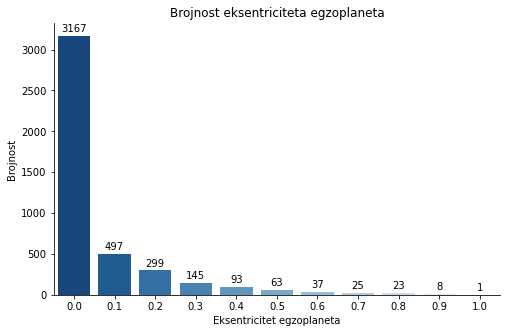


Grafikon : Orbitalni period i udaljenost od zvijezde

Ako nacrtamo graf koji prikazuje orbitalni period i udaljenost od zvijezde iz tablice podataka koju smo preuzeli za ovaj praktičan rad, možemo uočiti da Keplerov zakon vrijedi i kod egzoplanetarnih sustava, budući da su obje vrijednosti proporcionalne. Također možemo primijetiti da su orbitalni period i udaljenost od zvijezde u logaritamskoj skali. Razlog tome jest da vrijednosti variraju, te postoje neki planeti s ekstremima, tako da logaritmi ublažavaju ekstreme.

#### Eksentricitet

Ekentricitet je vrijednost od 0 do 1 koja nam govori koliko je eliptična orbita planeta. Što je vrijednost bliža nuli, orbita je kružnija a što je bliža 1 onda je eliptičnija.

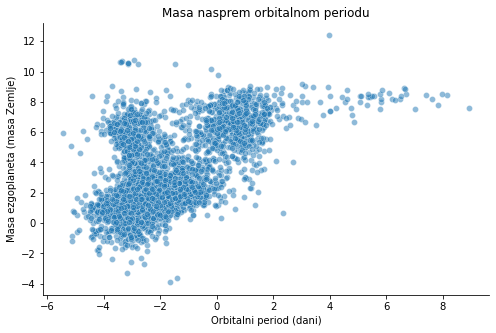


Grafikon : brojnost eksentriciteta egzoplaneta

Iz grafa koji prikazuje udaljenost planeta od njegovog eksentriciteta, možemo uvidjeti da najviše planeta ima eksentricitet blizu ili jednak 0, što je očekivano budući da svi planeti u našem sunčevom sustavu imaju vrlo male eksentricitete.

#### Masa egzoplaneta

Masa egzoplaneta može se izračunati iz metode radijalne brzine. Crtajući graf koji uspoređuje udaljenost egzoplaneta i njegovu masu, pronalazimo nešto interesantno.

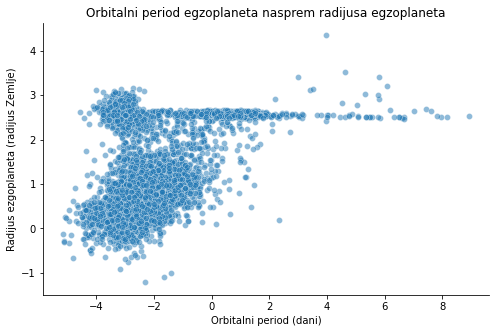


Grafikon : masa egzoplaneta i orbitalni period

Kao što vidimo iz grafa, imamo 3 posebne grupe. Prva grupa su vrlo masivni planeti, koji se nalaze jako blizu njihovih zvijezda. Takvu vrstu planeta zovemo **vruće Jupitere** budući da se nalaze blizu njihovih zvijezda i imaju masu koja je približno jednaka ili veća od Jupiterove mase. Druga grupa sastoji se od planeta velikih masa, no koji su udaljeniji od njihovih zvijezda. Ovi planeti se zovu **plinoviti divovi**, koji su slični kao naš Jupiter i Saturn. Treća skupina planeta su planeti mase manje od Jupitera pa do mase slične Zemlji. U ovoj grupi nalazimo egzoplanete koji su **terestrički**, planeti slični ili manji Zemlji. **Super Zemlje**, koje su 2-3 puta veće od Zemlje. Na kraju imamo **planete slične Neptunu** koji su slični Neptunu po veličini i masi. Ove 4 klasifikacije egzoplaneta koristit ćemo kroz cijeli papir.

#### Radijus egzoplaneta

Radijus egzoplaneta možemo izračunati uz pomoć tranzit metode. Crtajući graf koji uspoređuje udaljenost egzoplaneta i njegov radijus, možemo potvrditi pretpostavke koje vidimo iz prethodnog grafa.



Grafikon : radijus egzoplaneta i orbitalni period

Ponovno vidimo 3 posebne grupe, no uočujemo da su grupe više odvojene, te da egzoplaneti u skupu plinovitih divova svi imaju skoro identičan radijus samo se nalaze na različitim udaljenostima.

#### Gustoća

Gustoća je jedno vrlo važno svojstvo egzoplaneta koja će biti vrlo korisna u procjeni sastava egzoplaneta. Gustoće je jedna od najosnovnijih svojstva tvari, budući da svaka tvar ima svoju specifičnu gustoću. Računamo gustoću pomoću iduće formule:

Gdje je *m* masa, a *V* volumen tijela. Gustoća egzoplaneta izražava se u .

#### 4 vrste egzoplaneta

##### Plinoviti divovi

Plinoviti divovi su planeti slični Jupiteru i Saturnu. Oni imaju masu između 60 i 10000 Zemljinih masa. Raspon radijusa im je od 10 do 44 puta Zemljinog radijusa. Oni se sastoje od plinova kao vodik i helij, te imaju male gustoće. Plinovite divove je najlakše otkriti budući da su masivni i ogromne veličine.

###### Vrući jupiteri

Vrući Jupiteri su podvrsta plinovitih divova. Zovu se "vrući" Jupiteri zato što se nalaze vrlo blizu njihovih zvijezda. Orbitalni period vrućeg Jupitera je ispod 10 dana. Vrući Jupiteri su znanstvenicima upropastili modele formiranja planetarnih sustava, budući da nisu znali da je moguće da plinoviti div može biti toliko blizu njegove zvijezde. Današnje teorije o tome kako mogu vrući Jupiteri nastati govore da su se oni originalno formirali dalje od njihovih zvijezda, gdje ima mnogo zvjezdane prašine i mnogo vodika i helija. Kada se planet formirao, krenuo je migrirati prema zvijezdi (navedi razlog, pogledaj u Planet factory), gdje se danas nalazi. Nažalost kod nekih vrućih Jupitera temperatura je toliko velika da im atmosfera polako isparava.

##### Planeti slični Neptunu

Planeti slični Neptunu slični su, kako sam naziv kaže, Neptunu. Raspon mase je od 6 do 60 puta Zemljine mase, te raspon radijusa je od 2.5 do 10 puta Zemljin radijus. Guste atmosfere planeta sličnih Neptunu sastoje se najvjerojatnije od vodika, helija i malo metana. Njihova gustoća je slična gustoći plinovitih divova, budući da je građena od istih tvari.

##### Super Zemlje

Super Zemlje su veće od Zemlje kao što naziv kaže, naziv ne upućuje na sastav egzoplaneta. Raspon mase super Zemlja jest od 1 do 6 puta Zemljine mase, a raspon radijusa jest od 1.6 do 2.5 puta radijusa Zemlje. Super Zemlje mogu biti različite građe, te sadržavati ili ne sadržavati atmosferu. Sve karakteristike super Zemlje ovise o gustoći egzoplaneta, koje se mogu vidjeti u Tablici 1. Super Zemlje su vrlo zanimljive nama, budući da bi mogle podržavati život.

##### Terestrički

Terestrički planeti su vrlo zanimljivi astrobiologima budući da su oni najpogodniji za život. Raspon mase ovih planeta je od 0.05 do 1 puta Zemljine mase, te raspon radijusa je od 0.1 do 1.6 puta Zemljin radijus. Terestrički planeti se najčešće sastoje od kamena i metala, te mogu ili ne moraju sadržavati atmosferu. Terestrički planeti su najsličniji po građi i masi s Zemljom, te su vrlo bitni u potrazi za životom. Ali oni su vrlo mali, te ih je teško pronaći s metodama otkrivanja egzoplaneta.

### Sastav egzoplaneta

Sastav egzoplaneta ovisi o njegovoj gustoći. Neke gustoće egzoplaneta su prikazane u Tablici 1.

Tablica : Mogući sastav egzoplaneta

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Gustoća egzoplaneta | Mogući sastav egzoplaneta | Vrsta egzoplaneta |
| 0.2-1 | Vodik, helij, | Plinoviti divovi, vrući divovi |
| 1 | Voda | Vodeni planet |
| 1-2 | Vodik, helij, amonija, metan | Slični Neptunu |
| 2-3 | Kameni planet s atmosferom | Super Zemlja, terestrički planet |
| 3-4 | Ugljik, kamen, metali | Super Zemlja, terestrički planet |
| 4-6 | Kamen, silicij, metali | Super Zemlja, terestrički planet |
| 6-8 | Željezo, teški metali, | Terestrički planet |

### Habitabilnost egzoplaneta

U otkrivanju egzoplaneta najvažnija njegova karakteristika je li on habitabilan ili ne. S trenutnom tehnologijom nije moguće saznati postoji li život na nekome planetu, no možemo koristiti Zemljin život kao uzor na život na egzoplanetima. Osnova za sav život na Zemlji je voda, odnosno tekuća voda. No, nije tekuća voda moguća kod svih egzoplaneta. Ako se planet nalazi u **habitabilnoj zoni** oko njegove zvijezde, može se odrediti može li postojati tekuća voda na njegovoj površini. No, riječ habitabilna zona je zavarajuća. Ako planet ima tekuću vodu, ne znači da ima život nego da postoji mogućnost života. Svejedno, cilj je potraga za vodom, tekućom vodom, na egzoplanetima. Osim vode i atmosfera je obavezna za život koji je iznad površine. Razlog tome jest da atmosfera i magnetsko polje štite egzoplanet od štetnih zraka od njegove zvijezde i svemira. Habitabilnost je vrlo komplicirana, te se ne može točno ili precizno odrediti. Mnogo faktora utječe na habitabilnost, mnogi od kojih nije trenutačno dobiti podatke. Zbog toga u ovom praktičnom radu se neću fokusirati na habitabilnost, nego na same egzoplanete i njihovim karakteristikama.

## O vrstama zvijezda

### Što su zvijezde

Zvijezde su ogromna tijela u svemiru građena od plasme vodika i helija. Zvijezde stvaraju i emitiraju svijetlost pomoću nuklearne fuzije, to jest spajanje nukleusa atoma vodika u helij što stvara mnogo energije. Fuzija održava zvijezdu stabilnom i omogućava joj dug život. Životni vijek zvijezde ovisi o njezinoj veličini. Što je veća zvijezda, odnosno masivnija, kraći joj je životni vijek.

Zvijezde nastaju u hladnim maglicama, punim zvjezdane prašine, vodika i helija. Gravitacija nakuplja plinove u male hrpice, koji nakupljaju više plinova, i tako sve dok ne nakupi dovoljno plina da se dogodi kolaps i nastane **protozvijezda.** Ona se vrlo brzo vrti, i kako sve više vremena prolazi postaje manja i vrti se sve brže kako bi ostala stabilna. Kada temperatura u njezinoj jezgri dosegne 15 milijuna stupnjeva Celzijevih, nuklearna fuzija započinje i zvijezda je rođena.

Svaka zvijezda je drugačija, i 2 važne karakteristike zvijezda su:

* Luminozitet: koliko svijetlosti emitira zvijezda
* Boja: od crvene do plave boje, zvijezdina boja označava njezinu temperaturu. Što je boja crvenija, zvijezda je hladnija, te što je zvijezda više plava toplija je.

Pomoću ovih karakteristika, znanstvenici Ejnar Hertzsprung i Henry Norris Russell su napravili graf, HR dijagram koji predstavlja zvjezdinu boju odnosno temperaturu nasprem njezinom luminozitetu. Iz ovog grafa možemo vidjeti različite vrste zvijezda i sve spektralne tipove: M,K,G,F,A,B i O. M je najhladniji tip zvijezda, dok je O najvrućiji tip zvijezda. Uz njih još imamo i bijele patuljke.

Zvijezde umiru kada im ponestane vodika za fuziju, te se jezgra smanji a vanjski slojevi povećaju i hlade. Dio vanjskih slojeva je odstranjeno, te jezgra postane još manja. Jezgri se poveća temperatura na dovoljno visoku razinu da započne fuzija helija. Vanjski slojevi se ponovno povećaju. Kada ponestane helija za fuziju, najčešće zvijezda nema dovoljno mase da započne fuziju ugljika, te zvijezda eksplodira i ostane samo jezgra iza nje. Ta jezgra zove se bijeli patuljak, kojeg smo prethodno spomenuli. U nekim slučajevima ostane i planetarna maglica kada plinovi od vanjskih slojeva su pod radijacijom mrtve zvijezde pa onda sjaje u raznim bojama. No sve zvijezde ne umiru na isti način. Ako je zvijezda dovoljno masivna, može imati fuziju elemenata sve do željeza, zato što željezo upija energiju koja je potrebna za zvjezdin opstanak, te zvijezda eksplodira u ogromnoj eksploziji nazvanoj **supernova**. Iza zvijezde nastane **neutronska zvijezda,** ili ako zvijezda ima dovoljno mase, nastane **crna rupa.**

### Vrste zvijezda

#### Bijeli patuljci

Bijeli patuljci su jezgre od mrtvih zvijezda. One nastaju procesom objašnjenim iznad. Njihova gustoća i površinska gravitacija mnogo su puta veće od one na Zemlji ili Suncu. Njihov spektralni tip je tip D, koji nije pronađen kod 7 glavnih spektralnih tipova budući da nisu zvijezde primarne skupine. Nakon nastanka bijelih patuljaka, oni su vrlo vrući ali imaju vrlo mali luminozitet jer su vrlo male zvijezde, oko veličine Zemlje i mase pola Sunca. Bijeli patuljci su građeni od jezgre tekućeg kisika i ugljika, sloj helija i tanke atmosfere vodika. U svojoj jezgri nema fuzije, no zvijezda ostaje stabilna zbog elektrona. Elektroni ne vole biti vrlo blizi jedno drugomu, te zbog njihovih istih polariteta, materija u zvijezdi se ne uruši i zvijezda ostaje stabilna. Nakon trilijuna godina, one se ohlade u crne patuljke, potpuno mrtve zvijezde toliko crne da se ne vide u svemiru. One bi bile zadnje zvijezde pred sam kraj svemira. Što se tiče habitabilnosti, bijeli patuljci su vrlo sigurna opcija, jer nisu aktivne zvijezde. Planeti bi morali biti blizu zvijezde, no nema opasnosti od sunčevih erupcija, prominencija i sl.

#### Spektralni tip M

Ovi tipovi zvijezda se često nazivaju i crveni patuljci, budući da su ovo najhladnije zvijezde, te zato što su hladne crvene su boje. Zvijezde spektralnog tipa M su najmanje i najhladnije zvijezde, no njih ima najviše. Za razliku od bijelih patuljaka, crveni patuljci imaju aktivnu fuziju iz vodika u helij, sve dok se helij ne nakupi u jezgri. Nakon što više nema vodika za fuziju, zvijezda nema dovoljno mase da fuzira helij, te zvijezda tiho umire, i postaje crni patuljak, kao i bijeli patuljci. Crveni patuljci dobra su opcija za život jer jako dugo žive, no postoji opasnost sunčevih erupcija i sunčevih oluja. Crveni patuljci imaju nestabilnu magnetnu silu, te imaju najveće oluje i erupcije. Erupcije i oluje su velika opasnost za život zbog radijacije.

Naša Zemlja ima debeli magnetski omotač, te nas štiti od većine radijacije iz svemira i Sunca. Planeti koji bi bili habitabilni oko crvenih patuljaka trebali bi biti vrlo blizu zvijezdi, toliko blizu da su uvijek okrenuti s istom stranom prema zvijezdi. Ovo znači da je na jednoj strani uvijek dan, odnosno vrlo toplo, a na drugoj strani mrak odnosno uvijek hladno. Osim ovih prepreka za život, postoji mogućnost za habitabilni egzoplanet koji kruži oko M tipa zvijezde. Isto tako postoje i zvijezde koje su crveni divovi ili crveni hiperdivovi, najveće zvijezde u svemiru. Nisu osobito vruće niti sjajne, te vrlo brzo umiru.

#### Spektralni tip K

Zvijezde spektralnog tipa K se često nazivaju narančasti patuljci, jer su prividno narančaste boje. Manji su u masi od našeg Sunca, te imaju manji luminozitet. Završavaju svoj život slično kao naše Sunce, s crvenim divom te na kraju bijelim patuljkom. K tip zvijezda je vrlo interesantan za život, jer ove zvijezde su najpogodnije za planete koji bi mogli biti habitabilni. Prvi razlog jest da ih ima 3 puta više od G tipa zvijezda, zvijezda vrste Sunca. Također, budući da imaju manji luminozitet i masu od Sunca, lakše je detektirati egzoplanete. Osim toga, njihov životni raspon je od otprilike 20 do 70 milijardi godina, što je mnogo više milijardi godina od zvijezde tipa G. Ali, za razliku od crvenih patuljaka koji još duže žive, K tip zvijezda nije toliko aktivan, to jest nema mnogo sunčevih erupcija ili oluja, nego je zvijezda većinom vremena mirna. Također, habitabilni planeti ne bi trebali biti toliko blizu zvijezde da su uvijek okrenuti istom stranom prema zvijezdi, što olakšava razvoj života. Na kraju, K tip zvijezda ne emitira toliko radijacije kao zvijezde tipa G, A, F, B ili O.

#### Spektralni tip G

Zvijezde spektralnog tipa G su slične u masi i luminozitetu kao Sunce. Žive oko 10 milijardi godina, budući da ove zvijezde nisu efikasne sa svojim skladištem vodika, te nakon toga završavaju život kao bijeli patuljci, s planetarnom maglicom. Oko 10% svih zvijezda u galaksiji su G tipovi zvijezda, najčešće nazvani žuti patuljci. No, nisu sve G zvijezde žuti patuljci. Neke zvijezde, ali rijetke, su žuti hiperdivovi. Ove zvijezde su vrlo masivne, i mnogo puta sjajnije od sunca. Što se tiče planeta oko G tipova zvijezda imamo dokaz da se život može razviti na planetu: Zemlja. Egzoplaneti su pronađeni oko G tipa zvijezda, te su povoljne za život.

#### Spektralni tip F

Zvijezde spektralnog tipa F su sjajnije i imaju veću masu od Sunca. Također emitiraju puno više UV zračenja i drugih štetnih zraka. Budući da imaju veći luminozitet, habitabilna zona oko F tipa zvijezda je veći, što znači da može podržati više planeta u habitabilnoj zoni. Njihov životni tijek je od 2-4 milijardi godina, sasvim dovoljno da se život razvije. No, UV zrake i radijacija iz svemira je problem, budući da previše radijacije ubija stanice i uzrokuje mutacije u DNA. Ali, ako se život razvijo ispod površine planeta ili u moru, onda bi ga zemlja ili voda štitila od zraka, te život bi bio siguran. Druga opcija je da planet ima vrlo debelu atmosferu. F tipovi zvijezda iako su sjajnije i veće od Sunca imaju mogućnost podržavanja života.

#### Spektralni tip A

Zvijezde spektralnog tipa A su sjanije od prethodnih zvijezda i veće temperature, no imaju jednu razliku. Ne sadržavaju konvektivnu zonu, koja omogućuje magnetsko polje zvijezde. Zbog navedene činjenice, zvijezde tipa A nemaju jake sunčeve vjetrove te nisu aktivne. No, loša činjenica jest da se zvijezde tipa A vrlo brzo rotiraju oko svoje osi, što otežava detekciju egzoplaneta radijalnom brzinom, te je zbog toga manji broj otkrivenih egzoplaneta nego što bi ih možda bilo. Također ove zvijezde žive vrlo kratko te nisu najbolja opcija za život u svemiru. Istraživanja pokazuju da ove zvijezde najčešće imaju plinovite divove, odnosno masivne planete. U ovom praktičnom radu pokušat ću pokazati tu činjenicu.

#### Spektralni tip B

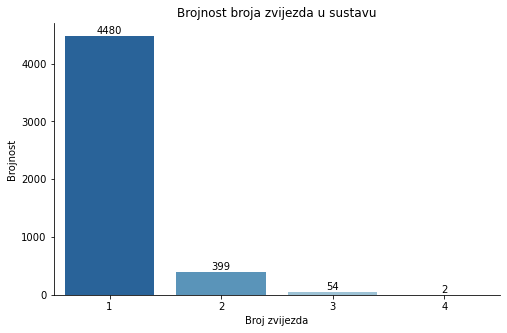
Zvijezde spektralnog tipa B su vrlo sjajne i masivne, najčešće bijele do svijetlo plave boje. Slično kao i A tip zvijezda, ovaj tip zvijezda ne sadržava konvektivnu zonu ali također ne sadržava koronu, te se rotiraju vrlo brzo. Ove zvijezde žive vrlo kratko te umiru u velikoj eksploziji gdje postoji mogućnost da se planeti unište. Zbog toga život na planetu koji kruži oko B zvijezde je gotovo nezamisliv.

#### Spektralni tip O

Zvijezde spektralnog tipa O najsjanije zvijezde od svih navedenih do sada. Ove zvijezde su vrlo rijetke, te njihov životni vijek je vrlo kratak. O tip zvijezda je vrlo čest u sustavima s više od jedne zvijezde. Zbog rijetkosti, intenzivne svijetlosti i ogromne mase, formiranje egzoplaneta trebalo bi biti vrlo rijetko te teško. A habitabilni egoplaneti oko ovakve zvijezde su nezamislivi.

## O planetarnim sustavima

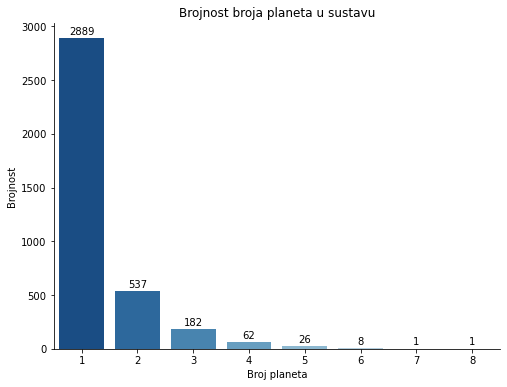
Planetarni sustavi su sustavi u kojem jedan ili više egzoplanet kruži oko jedne ili više zvijezda. Neki planetarni sustavi mogu imati više od jedne zvijezde, kao što je prikazano na ovome grafu:



Grafikon : brojnost zvijezda u planetarnim sustavima

Ovdje možemo vidjeti da najviše ima egzoplaneta koji kruže oko jedne zvijezde, što je i očekivano. No, možemo vidjeti da postoje sustavi s 2, 3, ili 4 zvijezda. Ovo zapažanje donosi mnogo pitanja o formiranju egzoplaneta, kao npr. kako se egzoplaneti mogu formirati oko više zvijezda? Ovo pitanje je trenutačno aktualno, te znanstvenici nemaju jedinstveni niti konačan odgovor na ovo pitanje.

Koliko planeta ima svaki planetarni sustav? Naš sunčev sustav ima 8 planeta. Je li to tipično za druge sustave? Po sljedećem grafu možemo vidjeti da to nije tako.



Grafikon : brojnost planeta u planetarnim sustavima

Vidimo da skoro svi otkriveni planetarni sustavi imaju samo jedan planet, te što je veći broj planeta, brojnost pada. Ovo zapažanje nam daje do znanja da je naš sunčev sustav već pri formaciji poseban, jer je vrlo rijetko da sustav ima 8 planeta, no kao što možemo vidjeti iz grafa naš sustav je jedinstven. Jedna teorija o velikoj brojnosti sustava s jednim planetom jest da naši teleskopi nisu dovoljno precizni da pronađu planete koji su vrlo mali. Zato trenutno mislimo da ima mnogo sustava s jednim ili dvoje planeta. U zadnjem dijelu ovog rada ćemo uvidjeti koliko su zapravo planetarni sustavi raznoliki ili jednoliki.

# Metodologija

## Materijali i izvori podataka

Za ovaj projekt, potrebno je imati:

* kompjuter/laptop
* instaliran programski jezik Python

Koristila sam podatke sa [NASA Exoplanet Archive](https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html). Kompletan Python kod nalazi se unutar alata Jupiter notebooks, gdje sam pisala Python program i Markdown tekst, kako bi mi bilo lakše se snaći u programu.

## Postupak preuzimanja podataka

pronalazak tablice po potrebi

Tablicu koju sam izabrala za ovaj projekt zove se [Planetary Systems Composite Data](https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/TblView/nph-tblView?app=ExoTbls&config=PSCompPars), zato što sadržava sve potrebne podatke o svim egzoplanetima otkrivenim do sada. Za razliku od drugih tablica, ova je jedina koja ima samo jedan red podataka za svaki odabrani planet, što je poželjno za ovaj projekt.

Preuzimanje tablice

Preuzela sam tablicu tako da sam pritisnula gumb "Download table", selektirala CSV format budući da naša knjižnica u pythonu, Pandas library, čita podatke iz CSV tablica. Također sam kliknula "Download currently checked columns" tako da program preuzme stupce samo koje želim, a oni su navedeni ispod. Također, stisnula sam gumb "Download Checked (and Filtered) rows", što znači da program preuzima sve redove koje sam htjela (u ovom slučaju sve redove). Na kraju sam pritisnula kvačicu na opciju "Values only". Ovo je vrlo važno, budući da program briše sve nesigurnosti u podatcima te vrijednosti koje mi nisu potrebne, što pročišćuje tablicu te je onda uredna za korištenje.

Graphical user interface, application, table, Excel

Description automatically generated

Slika : prikaz preuzimanja tablice podataka

### Značenje stupaca tablice

* **"pl\_name": ime planeta**
* **"hostname": ime zvijezde**
* **"sy\_num”: broj zvijezda u sustavu**
* **"sy\_pnum”: broj planeta u sustavu**
* **"pl\_orbper”: vremenski interval kojemu treba da planet napravi krug oko njegove zvijezde**
* **"pl\_orbsmax”: udaljenost planeta od zvijezde**
* **"pl\_rade”: radijus planeta**
* **"pl\_bmasse”: najbolja aproksimacija mase planeta**
* **"pl\_dens”: gustoća planeta**
* **"st\_teff":** temperatura površine zvijezde
* **"st\_met":** metalicitet zvijezde
* **"sy\_dist":** udaljenost zvijezde od Zemlje

## Učitavanje knjižnica i tablice

Prvi korak je učitavanje svih potrebnih knjižnica. Za ovaj praktičan rad koristila sam sljedeće knjižnice

* Pandas library: knjižnica koja se koristi za obradu podataka
* Numpy library: knjižnica za matematičke operacije
* Matplotlib.pyplot: knjižnica za crtanje jednostavnih grafova
* Seaborn library: knjižnica za crtanje složenih grafova
* Gc: brisanje nepotrebnih podataka za oslobađanje memorije kompjutera

|  |
| --- |
| %matplotlib inline  import pandas as pd  import numpy as np  import matplotlib.pyplot as plt  import seaborn as sns  import gc |

Nakon učitavanja knjižnica, potrebno je učitati tablicu s podatcima, **exo\_data***,* pomoću Pandas knjižnice.

|  |
| --- |
| *#učitavanje podataka*  exo\_data = pd.read\_csv('exo\_data.csv') |

Na kraju, trebamo provjeriti jesu li podatci dobro učitani. Za taj zadatak koristimo funkciju, **head(),** koja ispiše prvih 5 redova tablice, no možemo i odrediti koliko redova želimo ispisati.

|  |
| --- |
| *# pregledavanje tablice*  exo\_data.head() |

Tablica je točno učitana te izgleda ovako:

Tablica : tablica exo\_data

Table

Description automatically generated

## Kategorizacija po masi i volumenu

U kategorizaciji po masi i volumenu, kategorizirat ćemo planete u 4 vrste koje smo naveli u uvodu praktičnog rada:

* Terestrički planeti
* Super Zemlje
* Planeti slični Neptunu
* Plinoviti divovi

Kako bismo kategorizirali 4935 egzoplaneta na 4 vrste, potrebna nam je tablica mase i radijusa po kojemu određujemo svaku vrstu. Tablica 2 nam pruža raspone masa i radijusa koje smo naveli u uvodu rada.

Tablica : rasponi mase i radijusa za vrstu egzoplaneta

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Masa (Zemljina masa) | Radijus (Radijus Zemlje) | Vrsta egzoplaneta |
| 0.05-1 | 0.1-1.6 | Plinoviti divovi |
| 1-6 | 1.6-2.5 | Slični Neptunu |
| 6-60 | 2.5-10 | Super Zemlja |
| 60-100000 | 10-44 | Terestrički planet |

Funkcija za kategorizaciju egzoplaneta formirana je na sljedeći način:

1. Program prolazi kroz svaki red u programu, i za varijablu **r** čita njegovu vrijednost i spremi ju, te za varijablu **m** čita njegovu vrijednost i također ju spremi;
2. No, nema svaki planet radijus i masu. Zato provjeravamo je li egzoplanet kojeg kategoriziramo ima radijus ili masu;
3. Ako egzoplanet ima radijus a nema masu, onda ga kategoriziramo s skalom radijusa iz Tablice 2;
4. Ako egzoplanet ima masu, onda ga kategoriziramo s skalom mase iz Tablice 2;
5. Na kraju, kada program pronađe planet čiji radijus ili masa je usklađen s rasponom pojedine vrste egzoplaneta, u novi stupac nazvan **exo\_class**, unaša vrstu planeta u obliku teksta kao npr. "Plinoviti div". Nakon upisa novog podatka, program prelazi na sljedeći red;
6. Na kraju, sve nepotrebne podatke, odnosno m i r koje više nećemo koristiti možemo izbrisati.

|  |
| --- |
| **for** row **in** range(exo\_data.shape[**0**]):  r = exo\_data.loc[row,'pl\_rade'] *# preuzmi radijus*  m = exo\_data.loc[row,'pl\_bmasse'] *# preuzmi masu*  *# ==== IMA RADIJUS =====*  **if** (np.isnan(m) **and** **not** np.isnan(r)):  **if** (r < **1.6**):  exo\_data.loc[row, 'exo\_class'] = "Terestrički"  **elif** (r >= **1.6**) **and** (r < **2.5**):  exo\_data.loc[row, 'exo\_class'] = "Super Zemlja"  **elif** (r >= **2.5**) **and** (r < **10**):  exo\_data.loc[row, 'exo\_class'] = "Slični Neptunu"  **elif** (r >= **10**):  exo\_data.loc[row, 'exo\_class'] = "Plinoviti div"  *# ==== IMA MASU =====*  **elif** (np.isnan(m) == False):  **if** (m < **1**):  exo\_data.loc[row, 'exo\_class'] = "Terestrički"  **elif** (m >= **1**) **and** (m < **6**):  exo\_data.loc[row, 'exo\_class'] = "Super Zemlja"  **elif** (m >= **6**) **and** (m < **60**):  exo\_data.loc[row, 'exo\_class'] = "Slični Neptunu"  **elif** (m >= **60**):  exo\_data.loc[row, 'exo\_class'] = "Plinoviti div"  **del** m,r,row  gc.collect() |

One egzoplanete koji nemaju ni masu ni radijus ne možemo klasificirati. U tablicu ćemo onda ispuniti sve redove bez vrijednosti sa **NaN** objektom koji kaže Pythonu da nema vrijednosti.

|  |
| --- |
| exo\_data['exo\_class'] = exo\_data.exo\_class.fillna(np.nan) |

## Po udaljenosti od zvijezde

Sljedeći korak je kategorizirati egzoplanete po njihovim udaljenostima od Sunca. U ovom koraku dodajemo 2 nove kategorizacije

* Vruće Jupitere: plinovite divove s ophodnim periodom manjim od 10 dana
* Vruće Neptune: planete slične Neptunu s ophodnim periodom manjim od 4 dana

Kategorizaciju na vruće Jupitere i cruće Neptune napraviti ćemo na drugačiji način.

1. Napraviti ćemo novu kolonu, **exo\_class\_ext**
2. Klasificirat ćemo egzoplanete koji su Plinoviti divovi i Slični Neptunu s kriterijima navedenim iznad
3. Izbrisat ćemo nepotrebne podatke
4. Koristit ću funkciju **crosstab**, koja napravi tablicu pomoću dva stupca i onda ih možemo uspoređivati. Ovaj dio postupka služi samo kao provjera je li program uzeo samo Plinovite divove i planete Slične Neptunu ili zabunom planete neke druge vrste što ne želimo
5. Nakon provjere, prepisati podatke iz kolone **exo\_class** u novu kolonu **exo\_class\_ext** umjesto **NaN** vrijednosti
6. Provjeriti kako izgleda tablica i je li sve točno prepisano

|  |
| --- |
| exo\_data['exo\_class\_ext'] = np.nan  **for** row **in** range(exo\_data.shape[**0**]):  p = exo\_data.loc[row,'pl\_orbper']  c = exo\_data.loc[row,'exo\_class']  **if** (p > **0**) **and** (p < **4**) **and** (c == "Slični Neptunu"): *# Research paper*  exo\_data.loc[row, 'exo\_class\_ext'] = "Vrući Neptun"  **elif** (p > **0**) **and** (p < **10**) **and** (c == "Plinoviti div"): *# Research paper*  exo\_data.loc[row, 'exo\_class\_ext'] = "Vrući Jupiter"  **del** p,c,row  gc.collect()  test = pd.crosstab(exo\_data['exo\_class'],exo\_data['exo\_class\_ext'])  test.head() |

**Test** tablica izgleda ovako, te možemo vidjeti da je sve u redu.

Tablica : prikazuje koje planete je program klasificirao

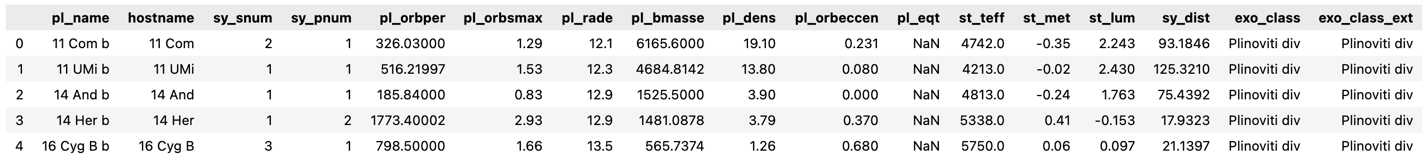
Table

Description automatically generated

|  |
| --- |
| exo\_data['exo\_class\_ext'] = exo\_data['exo\_class\_ext'].fillna(exo\_data['exo\_class'])  exo\_data.head() |

Te tablica **exo\_data,** izgleda ovako:

Tablica : ažurirana tablica exo\_data



## Programi za planetarne sustave

Trenutačno tablica **exo\_data** sadržava podatke za svaki planet, te broji zvijezdu onoliko puta koliko planeta ima u tom sustavu. U novoj tablici, **planetary\_systems** želim da sadrži podatke o zvijezdama te koje vrste egzoplaneta taj sustav sadržava. Taj cilj ću postići tako da napravim 2 tablice, **ct** i **dt**, gdje **ct** je tablica s brojem vrsta egzoplaneta, a **dt** tablica s podatcima zvijezde koje ću na kraju spojiti u jednu tablicu, **planetary\_systems.**

Prvo ćemo napraviti **ct** pomoću funkcije **crosstab.** U tablicu **ht** uzimam podatke za ime sustava i kategorije egzoplaneta. Te vrijednosti prebacujem u tablicu **ct** te je prikazana brojnost vrste egzoplaneta u svakom sustavu. Također ispisujemo koliko redova ima tablica, da provjerimo je li se broj smanjio od 4935 te za kasnije da usporedimo sa brojem redova u tablici **dt** i uvidimo moguće greške.

|  |
| --- |
| ht = exo\_data[['hostname','exo\_class\_ext']].copy()  ct = pd.crosstab([ht['hostname']],[ht['exo\_class\_ext']],dropna=False)  ct = pd.DataFrame(ct)  **print**(ct.shape[**0**])  ct.head() |

Broj redova je **3704.** Tablica **ct** izgleda ovako:

Tablica : tablica ct

Table

Description automatically generated

Sljedeći korak je stvaranje tablice **dt**. Kod ove tablice uzimamo naziv zvijezde, broj planeta u sustavu, broj zvijezda u sustavu, metalicitet zvijezde i temperatura zvijezde. Onda brišemo duple kolone i tablica je spremna.

|  |
| --- |
| dt = exo\_data[['hostname','sy\_snum','sy\_pnum','st\_met','st\_teff']].copy()  dt.drop\_duplicates(inplace=True)  **print**(dt.shape[**0**])  dt.head() |

Tablica **dt** izgleda ovako:

Tablica : tablica dt

Table

Description automatically generated

Ali, kod printanja broja redova tablice uočimo problem. Broj redova ovdje je **3887**, a to je 183 zvijezda više. Kako bismo vidjeli koji je problem, moramo uvrstiti novu kolonu, **check**, koja će provjeravati koliko ima redova sa istom zvijezdu i staviti koliko takvih redova ima. Nakon toga možemo filtrirati redove sa brojem 2 u koloni **check** i uvidjeti problem.

|  |
| --- |
| dt['check'] = dt.groupby('hostname')['hostname'].transform('count')  dt[dt['check']>=**2**] |

Kada pokrenemo ovaj program, dobijemo sljedeću tablicu:

Tablica : tablica sa brojem 2 u koloni check

Table

Description automatically generated

Ovdje možemo vidjeti da za dvije zvijezde imamo različita mjerenja metaliciteta i temperature zvijezde, što je normalno. Metalicitet zvijezde je omjer između elemenata težih od helija i vodika nasprem količini vodika i helija. Ali, metalicitet se izražuje u logaritnom obliku, odnosno koliko puta zvijezda ima veći ili manji metalicitet od sunca, te zato su neke vrijednosti negativne. Metalicitet je vrlo težak za izmjeriti i neprecizan, te zato postoje varijacije. Temperatura je isto teška za izmjeriti, te postoje varijacije. Kako bismo riješili ovaj problem potrebno je uzeti prosječnu vrijednosti između obje vrijednosti za istu zvijezdu.

|  |
| --- |
| dt['st\_metallicity'] = dt.groupby('hostname')['st\_met'].transform('mean')  dt = dt.drop(['st\_met'],axis=**1**)  dt.drop\_duplicates(inplace=True)  dt['st\_temperature'] = dt.groupby('hostname')['st\_teff'].transform('mean')  dt = dt.drop(['st\_teff'],axis=**1**)  dt.drop\_duplicates(inplace=True)  **print**(dt.shape[**0**], ct.shape[**0**]) |

No, i sada kada uspoređujemo broj redova **dt** i **ct,** možemo vidjeti da **dt** ima 2 planeta više od **ct**. Ako ponovno provjerimo zašto sa našom check kolonom, vidimo da se ništa ispisuje. Zaključak je da ta 2 planeta nemaju masu ni radijus, te nisu klasificirani pod **exo\_class\_ext** te nisu dio tablice **ct**. Ova 2 planeta neće utjecati na tablicu **planetary\_systems**, jer su potrebni za broj zvijezda i planeta u sustavu, no neće prisustvovati u izračunima i grafovima vezanih za kategorije egzoplaneta. Sada možemo spojiti tablice **dt** i **ct** pomoću funkcije **merge**, te specificirati da ih želimo spojiti preko imena zvijezda. No prije toga moramo maknuti kolonu **check** iz tablice **dt,** budući da nam više nije potrebna. Također moramo resetirati **index** u tablici **ct**, kako bi se mogla lakše spojiti sa tablicom **dt.**

|  |
| --- |
| dt = dt.drop(['check'],axis=**1**)  dt.head()  ct = ct.reset\_index()  planetary\_systems = pd.merge(dt, ct, on='hostname',how='left')  planetary\_systems.head() |

Tablica **planetary\_systems** izgleda ovako:

Tablica : tablica planetary\_systems

Table

Description automatically generated

## Programi za vrste zvijezda

Za ovaj praktičan rad, zvijezde ću kategorizirati po njihovim spektralnim kategorijama, O, B, A, F, G, K, M. Zvijezde se kategoriziraju po temperaturi, odnosno Tablici 10:

Tablica : spektralna klasifikacija zvijezda

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Klasifikacija zvijezde | Donja granica temperature (Kelvin) | Gornja granica temperature (Kelvin) |
| O | 30000 | 100000 |
| B | 10000 | 30000 |
| A | 7500 | 10000 |
| F | 6000 | 7500 |
| G | 5200 | 6000 |
| K | 3700 | 5200 |
| M | 2400 | 3700 |

U Pythonu postoji objekt koji se zove **dictionary**, odnosno riječnik. U njemu se mogu pohraniti podatci i povezati se sa riječju. Kasnije u programu mogu se tražiti te riječi u riječniku i koristiti za druge svrhe. Za potrebe kategorizacije zvijezda, potrebno je napraviti riječnik gdje svaka spektralna kategorija ima svoju donju i gornju granicu, te da je vrijednost strogo veća od donje granice. Naš riječnik će se zvati **stellar**.

|  |
| --- |
| stellar = {pd.Interval(**2400**,**3700**,closed='left'):"M",  pd.Interval(**3700**,**5200**,closed='left'):'K',  pd.Interval(**5200**,**6000**,closed='left'):'G',  pd.Interval(**6000**,**7500**,closed='left'):'F',  pd.Interval(**7500**,**10000**,closed='left'):'A',  pd.Interval(**10000**,**30000**,closed='left'):'B',  pd.Interval(**30000**,**100000**,closed='left'):'O',  } |

Nakon kreiranja riječnika, možemo upotrijebiti elegantnu funkciju, **map(),** koju ćemo koristiti da kategoriziramo zvijezde. Prvo kreiramo novu kolonu, **st\_spect**, gdje ćemo pohranjivati ključeve riječnika. Nakon toga moramo reći funkiciji map koju vrijednost da uzima u obzir i po kojem sistemu da kategorizira, odnosno riječniku.

|  |
| --- |
| planetary\_systems['st\_spect'] = planetary\_systems['st\_temperature'].map(stellar)  planetary\_systems.head() |

Sada tablica **planetary\_systems** izgleda ovako:

Tablica : klasifikacija zvijezda po spektralnom tipu

Table

Description automatically generated

# Rezultati

U ovom praktičnom radu htjela sam uvidjeti sličnost ili različitost planetarnih sustava u svemiru.

U sljedećoj tablici možemo vidjeti sažetak najvažnijih karakteristika egzoplaneta za svaku kategoriju:

Tablica : sažetak karakteristika egzoplaneta

Table

Description automatically generated

Ova tablica prikazuje **medijane** za masu, radijus, gustoću i eksentricitet svih kategorija egzoplaneta. Zašto medijan umjesto prosječne vrijednosti? Zato što neki egzoplaneti u tablici imaju vrlo velike vrijednosti koje nisu precizne prosječna vrijednost ispada jako velika. Medijan je drugačiji od prosječne vrijednosti u tome da uzme vrijednost koja se najčešće ponavlja.

Iz tablice 12 možemo vidjeti da najveći eksentricitet imaju plinoviti divovi, najveći planeti, dok svi ostali imaju kružne orbite. Također možemo vidjeti da je najčešća gustoća kod plinovitih divova ustvari sastav vodika i helija, dok kod Super Zemlji i terestričkih planeta gustoća kamena. Mase i radijusi su svi proporcionalni predviđenim veličinama za sve vrste egzoplaneta, što nam ukazuje da je kategorizacija precizna, naravno s određenom količinom volatilnosti.

Tablica : broj egzoplaneta u sustavu i koje su vrste unutar njih

Table

Description automatically generated with low confidence

Iz Tablice 13 možemo vidjeti od čega se sastoje sustavi od 1-8 planeta. Iz tablice možemo vidjeti samo jedan sustav s 8 planeta, što znači da je naš sunčev sustav jedinstven i nije sličan ostalim sustavima u svemiru. Taj sustav s 8 planeta je vrlo raznolik, sadrži 3 vrste egzoplaneta: 2 plinovita diva, 3 planeta slična Neptunu i 3 Super Zemlje. Također imamo samo jedan sustav s 7 planeta, koji ima samo 4 Super Zemlje i 3 terestrička planeta. Iz tablice vidimo da ima najviše sustava s jednim egzoplanetom, i to s Super Zemljom kao samostalan planet. To ukazuje da je formiranje planeta odnosno više od jednog planeta teško, te da je najlakše imati samo jedan planet. Generalno, planetarni sustavi su raznoliki, s različitim kombinacijama. Sustavi s jednim planetom su vjerojatno dosta slični, no nije moguće potvrditi ako ne znamo sve ostale parametre tih egzoplaneta.

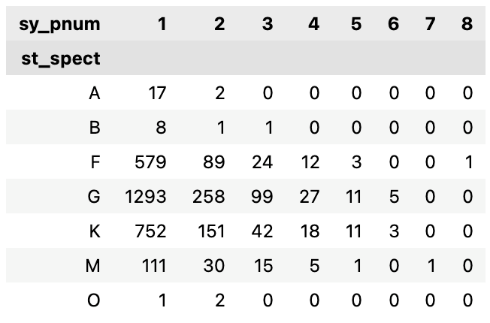
Tablica : vrste egzoplaneta i broj zvijezda

Table

Description automatically generated

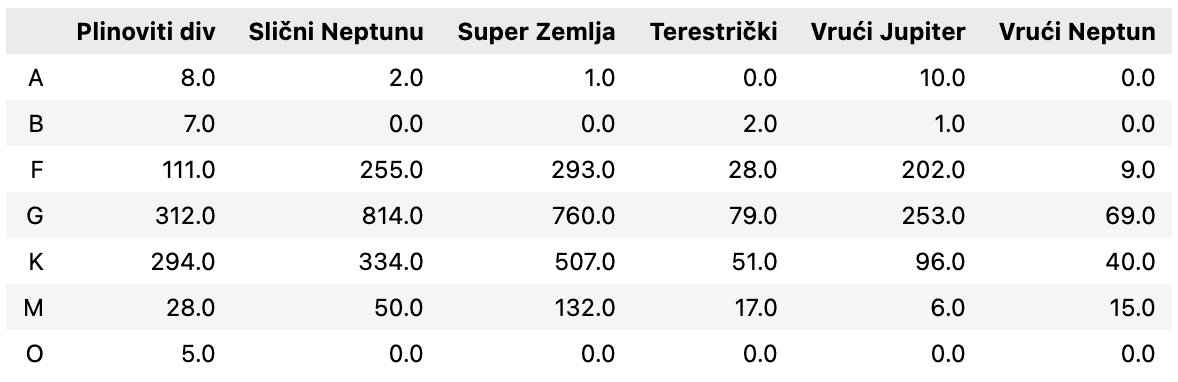
Iz tablice 14 možemo vidjeti da postoje sustavi sa 4 zvijezde i taj sustav sadržava 2 plinovita diva. Ovo je očekivano, budući da je vrlo teško formirati planete oko 2 zvijezde. Najčešći sustavi su s 1 zvijezdom, gdje je formiranje planeta relativno jednostavno. Možemo vidjeti da kako sustavi postaju kompliciraniji, odnosno s većim brojem zvijezda da ima sve manje terestričkih planeta i super zemlja, a više plinovitih divova.

Tablica : vrsta zvijezde i broj planeta u sustavu



U tablici 15 možemo vidjeti da najveći broj sustava egzoplaneta imaju spektralne klasifikacije G,K,F i M, te da najviše ima sustava s 1 egzoplanetom kao i kod tablice 13. Nakon tipa F broj egzoplaneta i planetarnih sustava je sve manji, zbog većeg luminoziteta i kraćeg životnog vijeka zvijezde.

Tablica : vrsta egzoplaneta i spektralni tip zvijezde



Iz tablice 16 možemo vidjeti da kod A tipa zvijezda većina planeta su plinoviti, te da kod zvijezda više mase većina egzoplaneta su plinoviti, iako ih ima vrlo malo. G tip zvijezda ima najviše vrsta planeta svih vrsta. F,K i M tip zvijezda imaju najviše Super Zemlja od ostalih vrsta egzoplaneta.

## Problemi tijekom programiranja

Pri radu susrela sam se sa nekim problemima. Prvi je bio učitavanje tablicu s podatcima u Python. Tablica je ispisivala neobične brojeve, te sam kasnije shvatila da sam preuzela tablicu koja uključuje volatilnost u mjerenju što je poremetilo čitanje i ispisivanje tablice.

Sljedeći problem je bio crtanje grafova za uvod u egzoplanete. Podatci su sadržavali neke egzoplanete s velikim vrijednostima koji su mi poremetili crtanje svih ostalih vrijednosti. Kada sam uvela logaritamsku ljestvicu problem se riješio, te sam krenula koristiti knjižnicu seaborn umjesto matplotlib za crtanje grafova. Razlog tome jest da seaborn ima puno više opcija te je lakši za koristiti.

Kategorizacija egzoplaneta prema gustoći je bio dodatan problem jer za neke planete koji imaju veliku gustoću zbog nepreciznosti u masi i radijusu bi preuzeli sastav koji je nemoguć za tu vrstu planeta. Sastav egzoplaneta je puno kompliciraniji od običnog raspona, te sam odustala od sastava za potrebe ovog praktičnog rada. Sličan problem je bio i za habitabilnost, no ovjde nisam imala dostupan podatak za izračun habitabilne zone.

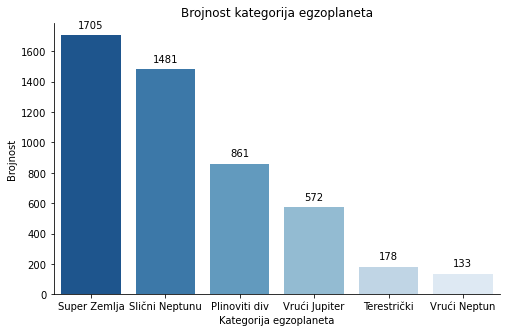
Jedan od manjih problema je bila različitost metaliciteta i temperature kod iste zvijezde, no zbog znanja statistike, problem je bio jednostavan za riješiti. Izračunala sam prosječnu vrijednost izmađu oba podataka te sam uspjela napraviti završnu tablicu s planetarnim sustavima.

Na kraju, način rada je bio u početku spor, i nefikasan. Pri kraju projekta otkrila sam da analiza podatak u početku treba biti razbacana i neuredna, ali da onda korak po korak se treba rasčistiti i uredno napisati. Ovaj projekt me naučio mnogo toga o upravljanju radom i praktičnim radom.

# Rasprava i zaključak

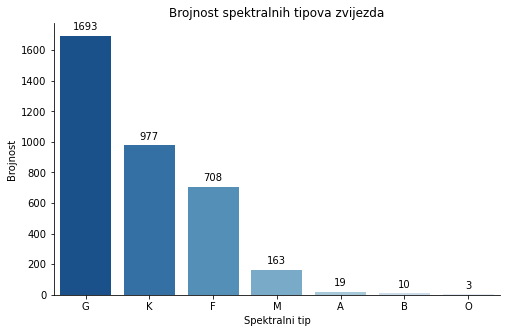
Radeći na ovom praktičnom radu naučila sam mnogo toga o egzoplanetima, njihovim vrstama, kategorijama i o habitabilnosti i raznolikosti planeta u svemiru.

Na početku ovog praktičnog rada postavila sam pitanje jesu li svi planetarni sustavi slični. Zahvaljujući velikom analizom podataka, mogu reći da ima mnogo sličnih sustava, ali i mnogo raznolikih sustava. Slični sustavi su oni s jednim planetom, odnosno u sustavima gdje je jedini planet jednak mnogim drugim sustavima. No, svaki planet je jedinstven i ima neku karakteristiku koja se trenutačno može ili ne može mjeriti koja ih međusobno razlikuje. Ali, ima i mnogo sustava s više planeta gdje se kategorije egzoplaneta razlikuju, s više ili manje vrsta. Što se tiče sličnosti sa našim Sunčevim sustavom, nema sustava identičnom ili čak vrlo sličnim našem sustavu. On je jedinstven. Osim odgovaranja na glavno pitanje, otkrila sam neke korelacije ili opažanja koja spajaju vrste planeta i vrste zvijezda i sl.



Grafikon : Brojnost kategorija egzoplaneta

U kategorizaciji egzoplaneta, možemo vidjeti da broj Super Zemlja je najveći, te da takav planet ni ne postoji u našem Sunčevom sustavu. Najmanje ima vrućih Neptuna, te se pojam naziva "Pustinja Vrućih Neptuna". Nakon Super Zemlja imamo planete slične Neptunu, pa plinovite divove i vruće jupitere i na kraju terestričke planete.



Grafikon : brojnost spektralnih tipova zvijezda

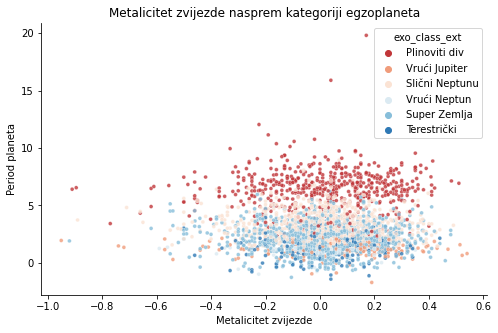
U kategorizaciji zvijezda, možemo vidjeti da najveći broj zvijezda je G tip zvijezda, tip našeg Sunca. Sljedeći po redu je K tip zvijezda, gdje su zvijezde najpovoljnije za život. Slijede F tip zvijezda, M tip zvijezda, te kao ugodno iznenađenje i zvijezde visoke spektralne kategorije tipovi A, B i O. Pronalaženje egzoplaneta oko spektralnih tipova visokih temperatura, velikog luminoziteta i velike mase je iznenađujuće, pa postavlja nova pitanja oko formiranje egzoplaneta. Kako se može formirati egzoplanet oko zvijezde koja živi par milijuna godina? Znanstvenici još danas odgovaraju na slična pitanja.

Chart, bar chart

Description automatically generated

Grafikon : brojnost vrste egzoplaneta po vrsti zvijezde

Kategorije egzoplaneta su raspoređene po spektralnom tipu zvijezda. Možemo vidjeti da G tip zvijezda ima najviše planeta od svih zvijezda, ponajviše planeta sličnih Neptuna. Dominantni planet u spektralnim tipovima manje masovnih zvijezda jest Super Zemlja. Kod zvijezda visokih masa dominiraju plinoviti divovi. Također možemo vidjeti da s porastom mase zvijezde nakon G tipa se smanjuje do samo 5 planeta kod O tipa zvijezda.



Grafikon : metalicitet zvijezde nasprem vrsti planeta

U grafikonu 10 možemo vidjeti kako se većinu egzoplaneta nalazi oko zvijezda s metalicitetom od -0.2 pa nadalje. Ovo zapažanje pokazuje da brojnost egzoplaneta ovisi o metalicitetu zvijezda, no iz dostupnih podataka i sa mojim iskustvom s programiranjem daljnje istraživanje nije moguće.

Uzimajući u obzir trenutne podatke možemo reći da je naš Sunčev sustav jedinstven. Ali, većina sustava u svemiru sadrži jedan planet iste vrste i iste zvijezde, što ukazuje na sličnost između sustavima. Unatoč tome postoje i mnogi sustavi s više vrsta planeta s manje sličnosti međusobno. Svemir je veliko mjesto, te sam sigurna da s budućim otkrićima egzoplaneta pronaći ćemo još više sličnosti i razlike među sustavima planeta, te čak i možda sustav sličan našem.

Bilo mi je zadovoljstvo raditi ovaj rad. Naučila sam mnogo toga o egzoplanetima, zvijezdama, planetarnim sustavima, kako programirati i organizirati rad te na kraju sam se zabavila crtajući grafove i eksperimentirati s podatcima.

# Literatura i izvori

[1] [https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/overview/](https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/overview/#:~:text=So%20far%20scientists%20have%20categorized,%2C%20super%2DEarth%20and%20terrestrial.&text=Some%20exoplanets%20are%20sunless%20rogues,the%20galaxy%20in%20permanent%20darkness.)

[2] <https://www.space.com/36935-planet-classification.html>

[3] <https://www.schoolsobservatory.org/discover/projects/exoplanets/properties>

[4] <http://www.ifa.hawaii.edu/~howard/ast241/exoplanet_properties.pdf>

[5] <https://www.planetarybiology.com/calculating_habitable_zone.html>

[6] <https://arxiv.org/abs/2104.02991v1>

[7] <https://www.planetary.org/articles/0415-favorite-astro-plots-4-classifying-exoplanets>

[8] <http://astro140.courses.science.psu.edu/theme4/census-and-properties-of-exoplanets/the-exoplanetary-census-today/>

[9] <http://astro140.courses.science.psu.edu/theme4/census-and-properties-of-exoplanets/general-properties-of-exoplanets/>

[10] <http://astro140.courses.science.psu.edu/theme4/census-and-properties-of-exoplanets/multiplanet-systems/>

[11] <http://astro140.courses.science.psu.edu/theme4/census-and-properties-of-exoplanets/exoplanet-composition/>

[12] <https://arxiv.org/pdf/2103.02127.pdf>

[13] <https://www.pnas.org/content/pnas/111/35/12622.full.pdf>

[14] <https://www.nationalgeographic.com/science/article/stars>

[15] <https://en.wikipedia.org/wiki/Red_dwarf>

[16] <https://en.wikipedia.org/wiki/K-type_main-sequence_star>

[17] <https://www.youtube.com/watch?v=Dgwjb_h8wNg>

[18] <https://www.youtube.com/watch?v=DjXEadnUV-g>

[19] <https://en.wikipedia.org/wiki/O-type_star>

[20] <https://en.wikipedia.org/wiki/B-type_main-sequence_star>

[21] <https://en.wikipedia.org/wiki/A-type_main-sequence_star>

[22] <https://en.wikipedia.org/wiki/G-type_main-sequence_star>

## Popis slika

[Slika 1: slikoviti prikaz radijalne brzine 7](#_Toc98501056)

[Slika 2: slikoviti prikaz metode tranzita 8](#_Toc98501057)

[Slika 3: slikoviti prikaz gravitacijskog mikrolenziranja 8](#_Toc98501058)

[Slika 4: slikoviti prikaz izravnog fotografiranja 9](#_Toc98501059)

[Slika 5: prikaz preuzimanja tablice podataka 22](#_Toc98501060)

## Popis tablica

[Tablica 1: Mogući sastav egzoplaneta 14](#_Toc98501064)

[Tablica 2: tablica exo\_data 24](#_Toc98501065)

[Tablica 3: rasponi mase i radijusa za vrstu egzoplaneta 25](#_Toc98501066)

[Tablica 4: prikazuje koje planete je program klasificirao 28](#_Toc98501067)

[Tablica 5: ažurirana tablica exo\_data 28](#_Toc98501068)

[Tablica 6: tablica ct 29](#_Toc98501069)

[Tablica 7: tablica dt 30](#_Toc98501070)

[Tablica 8: tablica sa brojem 2 u koloni check 30](#_Toc98501071)

[Tablica 9: tablica planetary\_systems 32](#_Toc98501072)

[Tablica 10: spektralna klasifikacija zvijezda 32](#_Toc98501073)

[Tablica 11: klasifikacija zvijezda po spektralnom tipu 33](#_Toc98501074)

[Tablica 12: sažetak karakteristika egzoplaneta 34](#_Toc98501075)

[Tablica 13: broj egzoplaneta u sustavu i koje su vrste unutar njih 34](#_Toc98501076)

[Tablica 14: vrste egzoplaneta i broj zvijezda 35](#_Toc98501077)

[Tablica 15: vrsta zvijezde i broj planeta u sustavu 35](#_Toc98501078)

[Tablica 16: vrsta egzoplaneta i spektralni tip zvijezde 36](#_Toc98501079)

## Popis grafova

[Grafikon 1: Orbitalni period i udaljenost od zvijezde 10](#_Toc98501080)

[Grafikon 2: brojnost eksentriciteta egzoplaneta 11](#_Toc98501081)

[Grafikon 3: masa egzoplaneta i orbitalni period 11](#_Toc98501082)

[Grafikon 4: radijus egzoplaneta i orbitalni period 12](#_Toc98501083)

[Grafikon 6: brojnost zvijezda u planetarnim sustavima 20](#_Toc98501084)

[Grafikon 7: brojnost planeta u planetarnim sustavima 20](#_Toc98501085)

[Grafikon 8: Brojnost kategorija egzoplaneta 37](#_Toc98501086)

[Grafikon 9: brojnost spektralnih tipova zvijezda 38](#_Toc98501087)