

NATJECANJE IZ ASTRONOMIJE 2022. GODINE

# JESU LI SVI PLANETARNI SUSTAVI SLIČNI?

8. RAZRED OŠ, JEDAN NATJECATELJ

<b>Sažetak rada</b> .....	<b>3</b>
<b>Uvod</b> .....	<b>4</b>
<b>Motivacija i cilj</b> .....	<b>4</b>
<b>O egzoplanetima</b> .....	<b>5</b>
Što su egzoplaneti? .....	5
Kako otkrivamo egzoplanete? .....	5
Osnovne karakteristike egzoplaneta .....	9
Sastav egzoplaneta .....	14
Habitabilnost egzoplaneta .....	14
<b>O vrstama zvijezda</b> .....	<b>15</b>
Što su zvijezde .....	15
Vrste zvijezda .....	16
<b>O planetarnim sustavima</b> .....	<b>18</b>
<b>Metodologija</b> .....	<b>20</b>
<b>Materijali i izvori podataka</b> .....	<b>20</b>
<b>Postupak preuzimanja podataka</b> .....	<b>20</b>
Značenje stupaca tablice.....	21
<b>Učitavanje knjižnica i tablice</b> .....	<b>21</b>
<b>Kategorizacija po masi i volumenu</b> .....	<b>23</b>
<b>Po udaljenosti od zvijezde</b> .....	<b>24</b>
<b>Programi za planetarne sustave</b> .....	<b>26</b>
<b>Programi za vrste zvijezda</b> .....	<b>29</b>
<b>Rezultati</b> .....	<b>31</b>
<b>Problemi tijekom programiranja</b> .....	<b>33</b>
<b>Rasprava i zaključak</b> .....	<b>34</b>
<b>Literatura i izvori</b> .....	<b>37</b>
<b>Popis slika</b> .....	<b>38</b>
<b>Popis tablica</b> .....	<b>38</b>
<b>Popis grafova</b> .....	<b>39</b>
<b>Prilog</b> .....	<b>40</b>

## 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 mog praktičnog rada je pronaći sličnosti i razlike u planetarnim sustavima, te neka zapažanja, to jest korelacije, između vrste planeta, broj zvijezda ili vrste zvijezda. Sve korelacije su vizualne, nisam ih računala u ovom praktičnom radu. Kako bih odgovorila na glavno pitanje, provela sam istraživanje na podacima o potvrđenim egzoplanetima iz NASA-ine baze podataka. U istraživanju kategorizirala sam egzoplanete i zvijezde, te sortirala ih po planetarnim sustavima. Kategorizirala sam planete po 6 kategorija: Terestrički planet, Super Zemlje, planete slične Neptunu, Plinovite divove, Vruće Neptune i Vruće Jupitera. 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 planeti koji kruže oko A tipa zvijezda stvaraju se većinom masovni planeti, te da generalno što je zvijezda veće mase (B i O tip-a) da brojnost masivnih egzoplaneta raste. Kod planetarnih sustava sa više zvijezda sam također ustanovila da se mogu formirati samo masovni planeti. Dodatno, potvrdila sam Keplerov 3. zakon.

### 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 naš Sunčev sustav jedini? 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. Dapače, našli smo planete koje je teško i zamisliti. Na primjer, planeti sa oblacima od silicija, planeti prekriveni lavom, planeti koji su cijeli prekrivenim oceanom, oni kojima treba samo 18 sati da obiju zvijezdu, onima gdje je temperatura viša od većina zvijezda ili planet gdje možda pada kiša dijamanta. 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 egzoplaneta postoje i što možemo saznati o njima sa trenutnom tehnologijom;
- ⇒ Izraditi program koji će kategorizirati planete po njihovim svojstvima;
- ⇒ Uspoređivati različite planetarne sustave;
- ⇒ Saznati jesu li svi planetarni sustavi slični, totalno različiti ili postoje neke odnose ili zapažanja koje ih povezuju.

### ŠTO SU EGZOPLANETI?

Egzoplaneti su planeti koji kruže oko drugih zvijezda osim našeg Sunca. Pronašli smo egzoplanete koji kruže oko pulsara, neutronske zvijezde, 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 pronalazjenja egzoplaneta, možemo uvidjeti koliko su udaljeni od zvijezde, koji im je orbitalni period, koliki im je radijus ili masa ovisno o kojoj metodi pronalazjenja govorimo. Također, možemo uvidjeti ekscentricitet 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 parametara egzoplaneta.

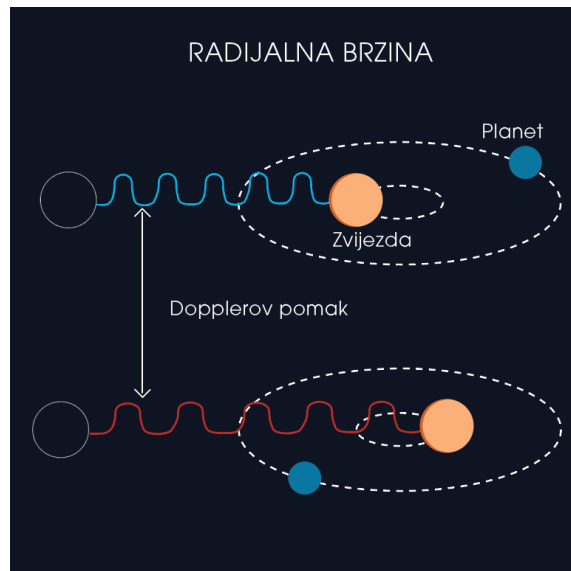
### KAKO OTKRIVAMO EGZOPLANETE?

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

- ⇒ Radikalna brzina
- ⇒ Tranzit egzoplaneta
- ⇒ Gravitacijsko mikrolenziranje
- ⇒ Izravno fotografiranje

### METODA 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.

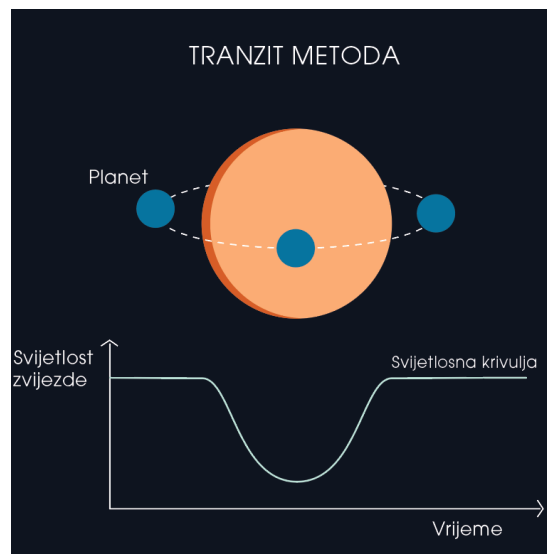


Slika 1: slikoviti prikaz radijalne brzine

Ali, znanstvenici nemaju način promatrati kruženje zvijezde oko središta mase direktno. Umjesto toga, znanstvenici koriste jedno zanimljivo svojstvo svjetla. Kada tijelo koje emitira svjetlost prilazi nama, valna duljina te svjetlost se smanji, i svjetlo postaje lagano plava. Suprotno, ako tijelo koje emitira svjetlost pomiče se unatrag u odnosu na Zemlju, njegova valna duljina svjetlost se poveća, i svjetlo postaje lagano crveno. Ovaj fenomen se naziva **Dopplerov pomak**, i vrlo je koristan u kozmologiji i astrofizici. No, kada tražimo egzoplanete, možemo koristiti Dopplerov pomak i utvrditi je li se zvijezde u pitanju pomiču prema nama ili od nas, kako kruži oko svoje nevidljive točke. Koliko je velik Dopplerov pomak ukazuje na masu planeta, te može se utvrditi orbitalni period planeta a iz njega udaljenost planeta od zvijezde.

## TRANZIT METODA

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. Razlog tome jest nagib putanje Zemlje i putanje Merkura i Venera što donosi komplikacija kod podudaranja staza. Kada planet prolazi ispred zvijezde, on blokira mali udio zvijezdine ukupne svjetlosti.

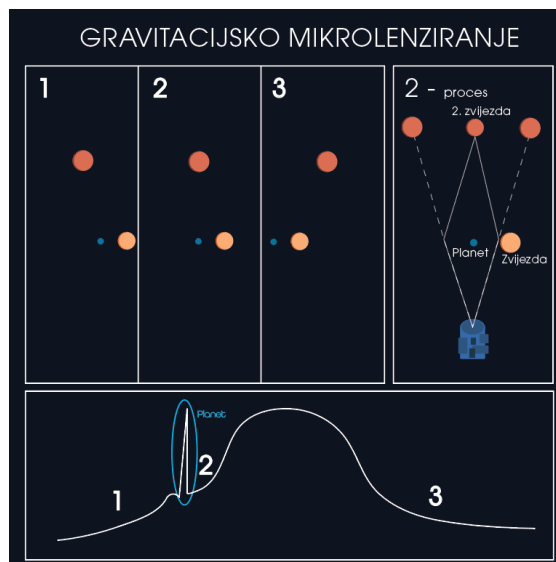


Slika 2: slikoviti prikaz metode tranzita

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 svjetlost zvijezde, i kada planet prelazi zvijezdu, možemo vidjeti pad svjetlosti zvijezde. Sve podatke bilježimo u **svjetlosnoj 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. Osim egzoplaneta, krivulje mogu prikazati drugu zvijezdu ili mogu biti i greške u mjernom instrumentu.

## GRAVITACIJSKO MIKROLENZIRANJE

Svemir je mreža prostora i vremena. Ovu činjenicu je ustanovio Albert Einstein 1936. godine u svojoj *Generalnoj teoriji o Relativnosti*. Svjetlo putuje po mreži prostora i vremena, a masa npr. zvijezde napravi udubinu u mreži.



**Slika 3: slikoviti prikaz gravitacijskog mikrolenziranja**

Kada zvijezda prođe ispred pozadinske zvijezde, svijetlost pozadinske zvijezde će se povećati i napraviti će se leća koja povećava svijetlost prve zvijezde. 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. Razlog rijetkog korištenja je zbog poravnavanja pozadinske zvijezde i zvijezde koju želimo promatrati.

## IZRAVNO FOTOGRAFIRANJE

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.





Slika 4: slikoviti prikaz izravnog fotografiranja

Budući da je zvijezdino svjetlo 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 svjetlost zvijezde u teleskop. Ako je planet koji kruži oko promatrane zvijezde vrlo masivan, on se može fotografirati. 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

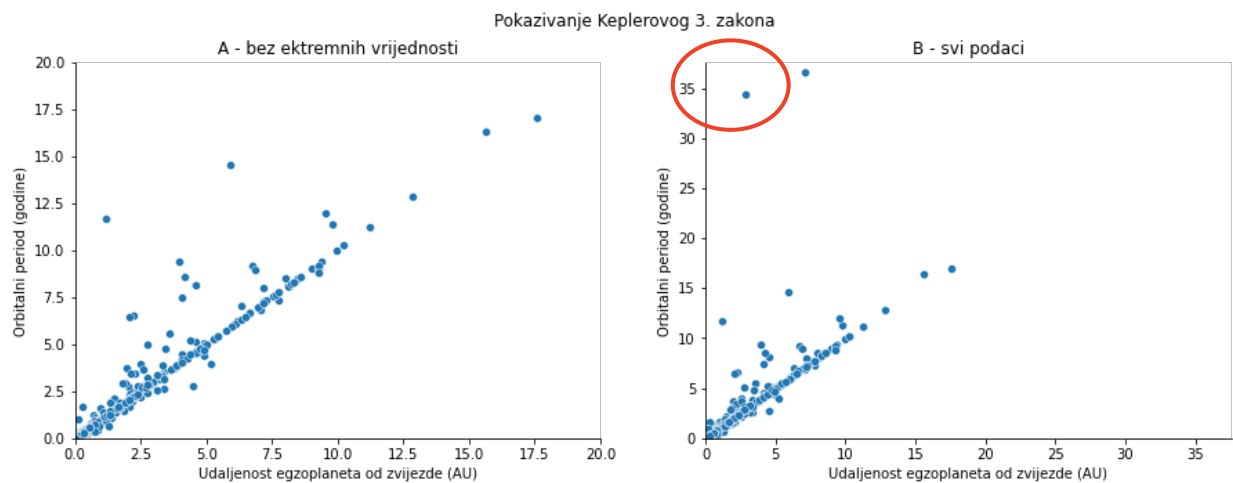
Orbitalni period planeta je vrijeme koje je potrebno da planet napravi krug oko njegove zvijezde. Udaljenost ovisi o orbitalnom periodu planeta. Kao što znamo iz Keplerovog trećeg zakona koji glasi:

$$P^2 = a^3$$

gdje  $P$  je orbitalni period;  $a$  je udaljenost planeta od njegove zvijezde. Ali, ova jednačba vrijedi samo za planete našeg Sunčevog sustava. Kako bi jednačba vrijedila za planete drugih planetarnih sustava, moramo uzeti u obzir masu zvijezde. Modificirana jednačba glasi:

$$a^3 = P^2 * \frac{M_z}{M_s}$$

gdje  $a$  je udaljenost planeta od njegove zvijezde;  $P$  je orbitalni period;  $M_z$  je masa zvijezde;  $M_s$  je masa Sunca.

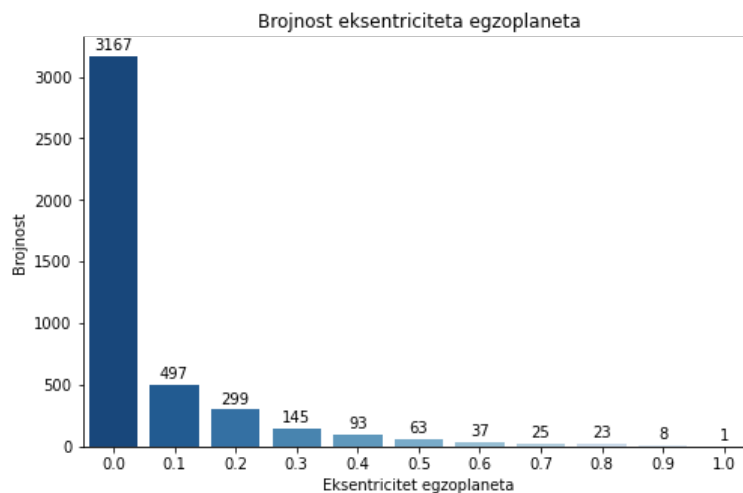


**Grafikon 1: pokazivanje Keplerovog 3. zakona**

Modificiranu jednadžbu Keplerovog 3. zakona možemo provjeriti koristeći podatke za ovaj projekt (poglavlje [Metodologija](#)). Rezultati su prikazani u grafikonu 1 gdje grafikoni A i B prikazuju proporcionalnost modificirane jednadžbe. Razlika između grafikona A i B su 2 egzoplaneta s ekstremnim orbitalni periodima u vrijednostima većim od 20.

## EKSENTRICITET

Ekscentricitet je vrijednost od 0 do 1 koja nam govori koliko je eliptična orbita planeta. Što je vrijednost bliža nuli, orbita je bliža krugu a što je bliža 1 onda je bliža elipsi.

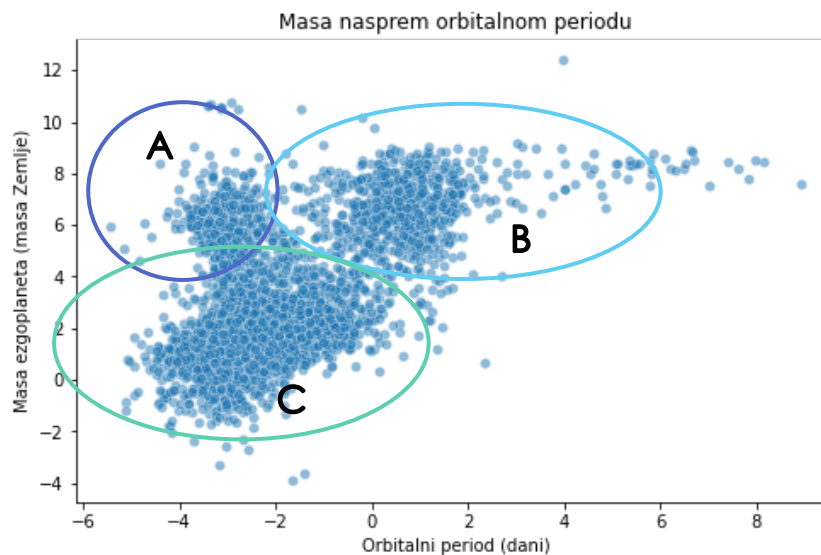


**Grafikon 2: brojnost ekscentriciteta egzoplaneta**

Iz grafa koji prikazuje udaljenost planeta od njegovog ekscentriciteta, možemo uvidjeti da najviše planeta ima ekscentricitet blizu ili jednak 0, što je očekivano budući da svi planeti u našem sunčevom sustavu imaju vrlo male ekscentricitete. No, možemo vidjeti da postoji velik broj egzoplaneta s ekscentricitetom većim od 0, što znači da naša teorija da svi planeti imaju vrlo kružne orbite nije točna.

## MASA EGZOPLANETA

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

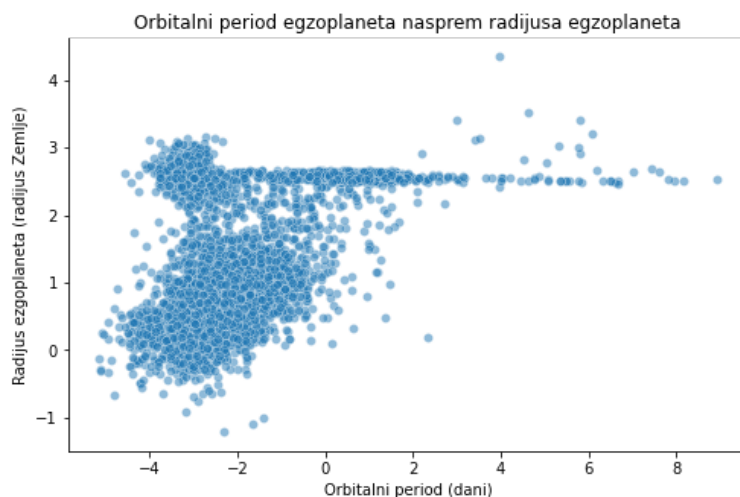


Grafikon 3: masa egzoplaneta i orbitalni period

Kao što vidimo iz grafa, imamo 3 posebne grupe. A grupa sadržava vrlo masivne planete, koji se nalaze jako blizu njihovih zvijezda. Takvu vrstu planeta zovemo **vruče Jupitera** budući da se nalaze blizu njihovih zvijezda i imaju masu koja je približno jednaka ili veća od Jupiterove mase. Grupa B 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. Grupa C sadržava planete koji imaju 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. Možemo primijetiti da su masa egzoplaneta i orbitalni period u logaritamskoj skali. Razlog tome jest da vrijednosti variraju, te postoje neki planeti s ekstremima, tako da logaritmi ublažavaju ekstreme.

## 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 4: radijus egzoplaneta i orbitalni period**

Ponovno imamo 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. Gustoća je jedna od najosnovnijih svojstva tvari, budući da svaka tvar ima svoju specifičnu gustoću. Računamo gustoću pomoću formule:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Gdje je  $m$  masa, a  $V$  volumen tijela. Gustoća egzoplaneta izražava se u  $g/cm^3$ .

## 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 gdje se nalazi u konačnici. 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 sam naziv kaže. Ali, 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 astrobiolozima 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 Zemljinog radijusa. 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. Dodatno, 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 1: Mogući sastav egzoplaneta

Gustoća egzoplaneta ( $g/cm^3$ )	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 primjer za život na egzoplanetima. Osnova za sav život na Zemlji je voda, odnosno tekuća voda. No, postojanje tekuće vode nije moguće kod svih egzoplaneta. Ako se planet nalazi u **habitabilnoj zoni** oko njegove zvijezde, moguće je odrediti može li postojati tekuća voda na njegovoj površini. No, riječ habitabilna zona je zavarajuća. Ako planet ima tekuću vodu, ne znači da postoji život nego da postoji mogućnost života. Svejedno, cilj je potraga za vodom, odnosno tekućom vodom, na egzoplanetima. Osim vode, 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. Određivanje habitabilnosti je vrlo kompliciran proces, jer ima mnogo faktora koji se ne mogu precizno odrediti. Zbog toga u ovom praktičnom radu se neću fokusirati na habitabilnost, nego na same egzoplanete i njihove karakteristike.

### ŠTO SU ZVIJEZDE

Zvijezde su ogromna tijela u svemiru građena od plazme vodika i helija. Zvijezde stvaraju i emitiraju svjetlost 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. Proces traje sve dok se ne nakupi dovoljno plina da se dogodi kolaps i nastane **protozvijezda**. Protozvijezda se vrlo brzo vrti, i kako sve više vremena prolazi ona 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 svjetlosti emitira zvijezda
- ⇒ Boja: od crvene do plave boje koja 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 HR 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**.

### 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 blizu 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, jer su najhladnije<sup>1</sup> i najmanje zvijezde. 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 od 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<sup>2</sup>. 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

<sup>1</sup> Najhladnije zvijezde su crvene boje.

<sup>2</sup> engl. tidally locked



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 razvije 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 održavanja života.

---

### SPEKTRALNI TIP A

Zvijezde spektralnog tipa A su sjajnije 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

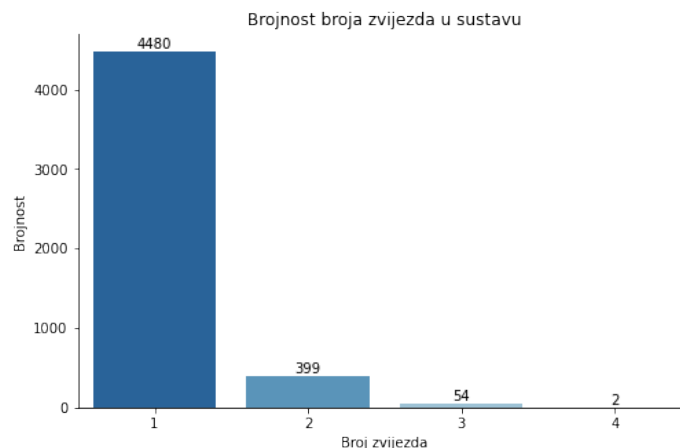
Zvijezde spektralnog tipa B su vrlo sjajne i masivne, najčešće bijele do svijetlo plave boje. Slično kao i A tip zvijezda, ovaj tip zvijezda ne sadržava konvektivnu zonu ali također ne sadržava koronu, te se rotiraju vrlo brzo. Ove zvijezde žive vrlo kratko te umiru u velikoj eksploziji gdje postoji 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 svjetlosti i ogromne mase, formiranje egzoplaneta trebalo bi biti vrlo rijetko te teško. A habitabilni egzoplaneti oko ovakve zvijezde su nezamislivi.

## O PLANETARNIM SUSTAVIMA

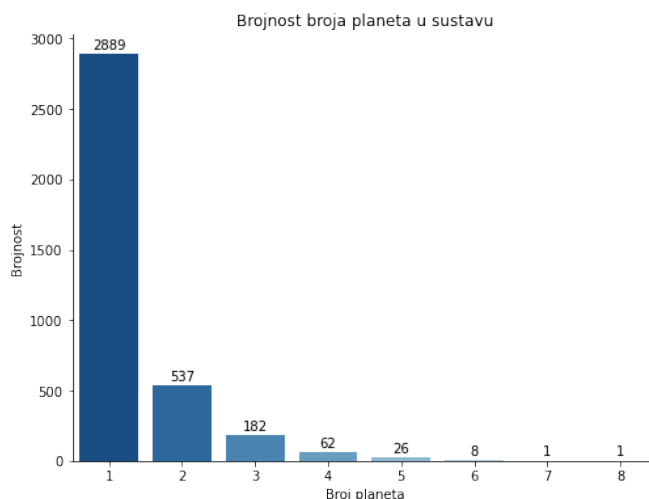
Planetarni sustavi su sustavi u kojem jedan ili više egzoplaneta kruži oko jedne ili više zvijezda. Neki planetarni sustavi mogu imati više od jedne zvijezde, kao što je prikazano na ovome grafu:



Grafikon 5: brojnost zvijezda u planetarnim sustavima

U gornjem grafikonu 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 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 6: 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 grafikona 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:

- ⇒ računalo
- ⇒ instaliran programski jezik Python

Koristila sam podatke sa [NASA Exoplanet Archive](https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html)<sup>3</sup>. Kompletan Python kod nalazi se unutar alata Jupyter bilježnica, gdje sam pisala Python program i Markdown<sup>4</sup> tekst, kako bi mi bilo lakše se snaći u programu. Više o Jupyter Notebooks možete saznati ovdje: <https://jupyter.org/>

### 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

Postupak preuzimanja tablice:

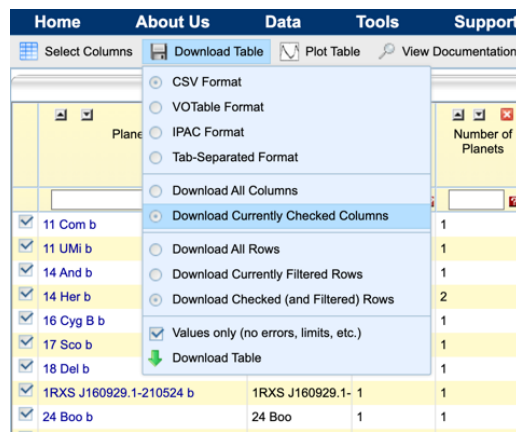
1. Otvoriti stranicu: [Planetary Systems Composite Data](https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/TblView/nph-tblView?app=ExoTbls&config=PSCompPars)<sup>5</sup>.
2. Pritisnuti gumb "Download Table",
3. Selektirati CSV format budući da naša knjižnica u pythonu, Pandas library, čita podatke iz CSV tablica,
4. Kliknuti "Download currently checked columns" tako da program preuzme stupce samo koje želimo, a oni su navedeni ispod u daljnjem tekstu
5. Kliknuti gumb "Download Checked (and Filtered) rows", što znači da program preuzima sve redove koje sam htjela (u ovom slučaju sve redove),
6. Pritisnuti kvačicu na opciju "Values only". Ovo je vrlo važno, budući da program briše sve nesigurnosti u podacima te vrijednosti koje mi nisu potrebne, što pročišćuje tablicu te je onda uredna za korištenje.

---

<sup>3</sup> <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

<sup>4</sup> <https://www.markdownguide.org/>

<sup>5</sup> <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/TblView/nph-tblView?app=ExoTbls&config=PSCompPars>



Slika 5: prikaz preuzimanja tablice podataka

## ZNAČENJE STUPACA TABLICE

Preuzeta tablica ima sljedeće stupce:

- ⇒ **"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
- ⇒ **"st\_mass"**: masa zvijezde
- ⇒ **"sy\_dist"**: udaljenost zvijezde od Zemlje

Kompletan kod korišten za ovaj projekt možete pronaći u [Prilog-u](#).

## 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 grafova
- ⇒ seaborn library: knjižnica za crtanje grafova

⇒ gc: brisanje nepotrebnih podataka za oslobađanje memorije računala

```
%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 podacima, **exo\_data**, pomoću pandas knjižnice.

```
#učitavanje podataka
exo_data = pd.read_csv('exo_data.csv')
```

Na kraju, trebamo provjeriti jesu li podaci dobro učitani. Za taj zadatak koristimo funkciju, **shape** i **head()**, gdje funkcija shape ispisuje dimenzije učitane tablice, a head ispisuje prvih 5 redova tablice, no možemo i odrediti koliko redova želimo ispisati.

```
# pregledavanje tablice
print(exo_data.shape)
>>> (4935, 18)

exo_data.head()
```

Tablica je točno učitana te izgleda ovako:

**Tablica 2: tablica exo\_data**

	pl_name	hostname	sy_snum	sy_pnum	pl_orbper	pl_orbsmax	pl_rade	pl_bmasse	pl_orbeccen	st_teff	st_mass	st_met	sy_dist
0	11 Com b	11 Com	2	1	326.03000	1.29	12.1	6165.6000	0.231	4742.0	2.70	-0.35	93.1846
1	11 UMi b	11 UMi	1	1	516.21997	1.53	12.3	4684.8142	0.080	4213.0	2.78	-0.02	125.3210
2	14 And b	14 And	1	1	185.84000	0.83	12.9	1525.5000	0.000	4813.0	2.20	-0.24	75.4392
3	14 Her b	14 Her	1	2	1773.40002	2.93	12.9	1481.0878	0.370	5338.0	0.90	0.41	17.9323
4	16 Cyg B b	16 Cyg B	3	1	798.50000	1.66	13.5	565.7374	0.680	5750.0	1.08	0.06	21.1397

## 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 u 4 vrste, potrebna nam je tablica mase i radijusa po kojoj određujemo svaku vrstu. Tablica 2 nam pruža raspone masa i radijusa koje smo naveli u uvodu rada.

Tablica 3: 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 tablici, čita vrijednost radijusa i spremi ju u varijablu *r*, te vrijednost mase i spremi ju u varijablu *m*;
2. No, nema svaki planet radijus i masu. Zato provjeravamo je li egzoplanet, kojeg kategoriziramo, ima zabilježen 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**, unašamo 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 (Not a Number)** 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 Jupiteri: plinovite divove s ophodnim periodom manjim od 10 dana
- ⇒ Vruće Neptuni: planete slične Neptunu s ophodnim periodom manjim od 4 dana

Kategorizaciju na vruće Jupiteri i vruće Neptuni napraviti ćemo na drugačiji način.



1. Definirati ćemo novi stupac pod nazivom `exo_class_ext`
2. Klasificirat ćemo egzoplanete koji su Plinoviti divovi i Slični Neptunu koristeći kriterije navedene prethodno (duljina orbitalnog perioda Vrućih Jupitera i Neptuna)
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 4:** prikazuje koje planete je program klasificirao

exo_class_ext	Vrući Jupiter	Vrući Neptun
exo_class		
Plinoviti div	572	0
Slični Neptunu	0	133

```
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 5: ažurirana tablica `exo_data`

	pl_name	hostname	sy_snum	sy_pnum	pl_orbper	pl_orbsmax	pl_rade	pl_bmasse	pl_dens	pl_orbeccen	st_teff	st_mass	st_met	sy_dist	exo_class	exo_class_ext
0	11 Com b	11 Com	2	1	326.03000	1.29	12.1	6165.6000	19.10	0.231	4742.0	2.70	-0.35	93.1846	Plinoviti div	Plinoviti div
1	11 UMi b	11 UMi	1	1	516.21997	1.53	12.3	4684.8142	13.80	0.080	4213.0	2.78	-0.02	125.3210	Plinoviti div	Plinoviti div
2	14 And b	14 And	1	1	185.84000	0.83	12.9	1525.5000	3.90	0.000	4813.0	2.20	-0.24	75.4392	Plinoviti div	Plinoviti div
3	14 Her b	14 Her	1	2	1773.40002	2.93	12.9	1481.0878	3.79	0.370	5338.0	0.90	0.41	17.9323	Plinoviti div	Plinoviti div
4	16 Cyg B b	16 Cyg B	3	1	798.50000	1.66	13.5	565.7374	1.26	0.680	5750.0	1.08	0.06	21.1397	Plinoviti div	Plinoviti div

## 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, `pt` i `st`, gdje `pt` je tablica s brojem vrsta egzoplaneta, a `st` tablica s podacima zvijezde koje ću na kraju spojiti u jednu tablicu, `planetary_systems`.

Prvo ćemo napraviti `pt` pomoću funkcije `crosstab()`<sup>6</sup>. U tablicu `ht` uzimam podatke za ime sustava i kategorije egzoplaneta. Te vrijednosti prebacujem u tablicu `pt` koristeći funkciju `crosstab()`. Nakon toga ispisujemo koliko redova ima tablica, da provjerimo je li se broj smanjio od 4935 te za kasnije da usporedimo sa brojem redova u tablici `st` i uvidimo moguće greške.

```
ht = exo_data[['hostname', 'exo_class_ext']].copy()
pt = pd.crosstab([ht['hostname']], [ht['exo_class_ext']], dropna=False)
pt = pd.DataFrame(pt)
print(pt.shape[0])
pt.head()
```

Broj redova je **3704**, koji je manji od početnog broja. Iz toga možemo zaključiti da je program izuzeo redove gdje se zvijezde ponavljaju. Provjerila sam to koristeći funkciju `nunique()` koja broji koliko jedinstvenih vrijednosti sadrži stupac. Program je izuzeo sve redove gdje se zvijezde ponavljaju jer se vrijednost koristeći funkcije `nunique()` podudara s brojem 3704. Tablica `pt` izgleda ovako:

<sup>6</sup> Ova funkcija broji koliko ima vrsta egzoplaneta za svaku zvijezdu u tablici.

Tablica 6: tablica pt

exo_class_ext	Plinoviti div	Slični Neptunu	Super Zemlja	Terestrički	Vrući Jupiter	Vrući Neptun
hostname						
11 Com	1	0	0	0	0	0
11 UMi	1	0	0	0	0	0
14 And	1	0	0	0	0	0
14 Her	2	0	0	0	0	0
16 Cyg B	1	0	0	0	0	0

Sljedeći korak je stvaranje tablice **st**. Kod ove tablice uzimamo naziv zvijezde, broj planeta u sustavu, broj zvijezda u sustavu, metalicitet zvijezde i temperatura zvijezde. Onda brišemo duple redove zbog ponavljanja zvijezda.

```
st = exo_data[['hostname', 'sy_snum', 'sy_pnum', 'st_met', 'st_teff']].copy()
st.drop_duplicates(inplace=True)
print(st.shape[0])
st.head()
```

Tablica **st** izgleda ovako:

Tablica 7: tablica st

	hostname	sy_snum	sy_pnum	st_met	st_teff
0	11 Com	2	1	-0.35	4742.0
1	11 UMi	1	1	-0.02	4213.0
2	14 And	1	1	-0.24	4813.0
3	14 Her	1	2	0.41	5338.0
4	16 Cyg B	3	1	0.06	5750.0

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

```
st['check'] = st.groupby('hostname')['hostname'].transform('count')
st[st['check'] >= 2]
```

Kada pokrenemo ovaj program, dobijemo sljedeću tablicu:

Tablica 8: tablica sa brojem 2 u koloni check

	hostname	sy_snum	sy_pnum	st_met	st_teff	check
3	14 Her	1	2	0.41	5333.00	2
51	BD+20 2457	1	2	-0.79	4259.00	2
52	BD+20 2457	1	2	-1.00	4137.00	2
65	BD-08 2823	1	2	-0.06	4815.00	2
66	BD-08 2823	1	2	-0.07	4745.00	2
...	...	...	...	...	...	...
4770	WASP-18	2	2	0.19	6400.00	2
4849	WASP-8	2	2	0.17	5600.00	2
4850	WASP-8	2	2	0.17	5690.00	2
4899	bet Pic	1	2	-0.21	8033.68	2
4900	bet Pic	1	2	-0.21	7890.00	2

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. Metalicitet je koliko puta zvijezda ima veći ili manji metalicitet od sunca, te se izražava u logaritamskom obliku. Zbog toga su neke vrijednosti negativne. Metalicitet je vrlo težak za izmjeriti. Stoga su vrijednosti neprecizne, te dolazi do varijacija. Također, temperatura je isto teška za izmjeriti, te postoje određene varijacije. Kako bismo riješili ovaj problem potrebno uzela sam prosječnu vrijednosti za jednu zvijezdu.

```
st['st_metallicity'] = st.groupby('hostname')['st_met'].transform('mean')
st = st.drop(['st_met'],axis=1)
st.drop_duplicates(inplace=True)

st['st_temperature'] = st.groupby('hostname')['st_teff'].transform('mean')
st = st.drop(['st_teff'],axis=1)
st.drop_duplicates(inplace=True)

print(st.shape[0], pt.shape[0])
```

No, i sada kada uspoređujemo broj redova **st** i **pt**, možemo vidjeti da **st** ima 2 planeta više od **pt**. 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 **pt**. 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 **st** i **pt** pomoću funkcije **pd.merge**, te specificirati da ih želimo spojiti preko imena zvijezda. Spajamo tablicu **pt** na tablicu **st**. No prije toga moramo maknuti kolonu **check** iz tablice **st**, budući da nam više nije potrebna. Također moramo specificirati da želimo izuzeti cijeli stupac **check**, ne samo

redove s određenom vrijednosti u stupcu check, te to postizemo s argumentom `axis=1`. Isto tako moramo resetirati `index` u tablici `pt`, kako bi se točno spojili sa tablicom `st`.

```
st = st.drop(['check'], axis=1)
st.head()

pt = pt.reset_index()
planetary_systems = pd.merge(st, pt, on='hostname', how='left')
planetary_systems.head()
```

Tablica `planetary_systems` izgleda ovako:

Tablica 9: tablica `planetary_systems`

	hostname	sy_snum	sy_pnum	st_metallicity	st_temperature	Plinoviti div	Slični Neptunu	Super Zemlja	Terestrički	Vrući Jupiter	Vrući Neptun
0	11 Com	2	1	-0.3500	4742.00	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	11 UMi	1	1	-0.0200	4213.00	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	14 And	1	1	-0.2400	4813.00	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	14 Her	1	2	0.4075	5326.47	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	16 Cyg B	3	1	0.0600	5750.00	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

## 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 10: spektralna klasifikacija zvijezda

Klasifikacija zvijezde	Donja granica temperature (Kelvin)	Gornja granica temperature (Kelvin)
<b>O</b>	30000	100000
<b>B</b>	10000	30000
<b>A</b>	7500	10000
<b>F</b>	6000	7500
<b>G</b>	5200	6000
<b>K</b>	3700	5200
<b>M</b>	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. Granice definiramo pomoću funkcije `pd.Interval()`. 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 za mapiranje spektralnih kategorija po riječniku stellar za svaki red u tablici. Rezultat pohranjujemo u novu kolonu, **st\_spect**.

```
planetary_systems['st_spect'] =
planetary_systems['st_temperature'].map(stellar)
planetary_systems.head()
```

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

**Tablica 11: klasifikacija zvijezda po spektralnom tipu**

	hostname	sy_snum	sy_pnum	st_metallicity	st_temperature	Plinoviti div	Slični Neptunu	Super Zemlja	Terestrički	Vrući Jupiter	Vrući Neptun	st_spect
0	11 Com	2	1	-0.3500	4742.00	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	K
1	11 UMi	1	1	-0.0200	4213.00	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	K
2	14 And	1	1	-0.2400	4813.00	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	K
3	14 Her	1	2	0.4075	5326.47	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	G
4	16 Cyg B	3	1	0.0600	5750.00	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	G

## 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 12: sažetak karakteristika egzoplaneta**

	Masa	Radijus	Gustoca	Ekscentricitet
Plinoviti div	723.22350	13.10	1.780	0.1825
Vrući Jupiter	299.07803	13.60	0.665	0.0000
Slični Neptunu	9.60000	2.93	1.950	0.0000
Vrući Neptun	8.91000	2.83	2.090	0.0000
Super Zemlja	3.29000	1.62	4.180	0.0000
Terestrički	0.56600	0.86	4.890	0.0000

Ova tablica prikazuje **medijane** za masu, radijus, gustoću i ekscentricitet svih kategorija egzoplaneta. Zašto medijan umjesto prosječne vrijednosti? Zato što neki egzoplaneti u tablici imaju vrlo velike vrijednosti koje nisu precizne. Prosječna vrijednost bi uzela u obzir ove veće vrijednosti te bi bila drugačija ako se ove veće vrijednosti izuzmu iz izračuna. Medijan je drugačiji od prosječne vrijednosti u tome što je on srednji broj u listi sortiranih brojeva, te zbog toga velike vrijednosti nemaju veliki utjecaj na konačni izračun.

Iz tablice 12 možemo vidjeti da najveći ekscentricitet 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 Zemlje 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 13: broj egzoplaneta u sustavu i koje su vrste unutar njih**

sy_pnum	1	2	3	4	5	6	7	8
exo_class_ext								
Plinoviti div	569	211	44	25	6	4	0	2
Slični Neptunu	732	367	222	84	49	24	0	3
Super Zemlja	884	396	224	117	60	17	4	3
Terestrički	93	39	24	12	7	0	3	0
Vrući Jupiter	526	33	9	2	2	0	0	0
Vrući Neptun	85	22	14	8	1	3	0	0

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 kakve za sada poznajemo. 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 14: vrste egzoplaneta i broj zvijezda**

sy_snum	1	2	3	4
exo_class_ext				
Plinoviti div	701	136	22	2
Slični Neptunu	1395	83	3	0
Super Zemlja	1631	65	9	0
Terestrički	161	12	5	0
Vrući Jupiter	463	94	15	0
Vrući Neptun	124	9	0	0

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 15: vrsta zvijezde i broj planeta u sustavu**

sy_pnum	1	2	3	4	5	6	7	8
st_spect								
A	17	2	0	0	0	0	0	0
B	8	1	1	0	0	0	0	0
F	579	89	24	12	3	0	0	1
G	1293	258	99	27	11	5	0	0
K	752	151	42	18	11	3	0	0
M	111	30	15	5	1	0	1	0
O	1	2	0	0	0	0	0	0

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 16: vrsta egzoplaneta i spektralni tip zvijezde

	Plinoviti div	Slični Neptunu	Super Zemlja	Terestrički	Vrući Jupiter	Vrući Neptun
A	8.0	2.0	1.0	0.0	10.0	0.0
B	7.0	0.0	0.0	2.0	1.0	0.0
F	111.0	255.0	293.0	28.0	202.0	9.0
G	312.0	814.0	760.0	79.0	253.0	69.0
K	294.0	334.0	507.0	51.0	96.0	40.0
M	28.0	50.0	132.0	17.0	6.0	15.0
O	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

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 podacima 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.

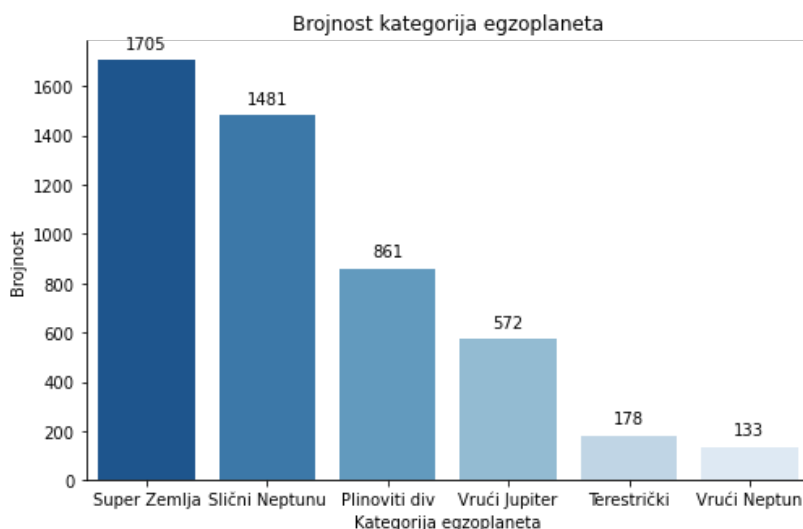
Kategorizacija egzoplaneta po gustoći nije bio moguć zbog nepreciznih vrijednosti radijusa i mase kod nekih egzoplaneta, te bi imali nepreciznu gustoću. Gustoća mora biti vrlo precizna jer male promjene imaju velik utjecaj na konačan sastav planeta. Zbog navedenog razloga, nisam htjela da mnogo egzoplaneta ima krivi sastav.

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 između 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 podataka 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 planiranju i upravljanju projektom.

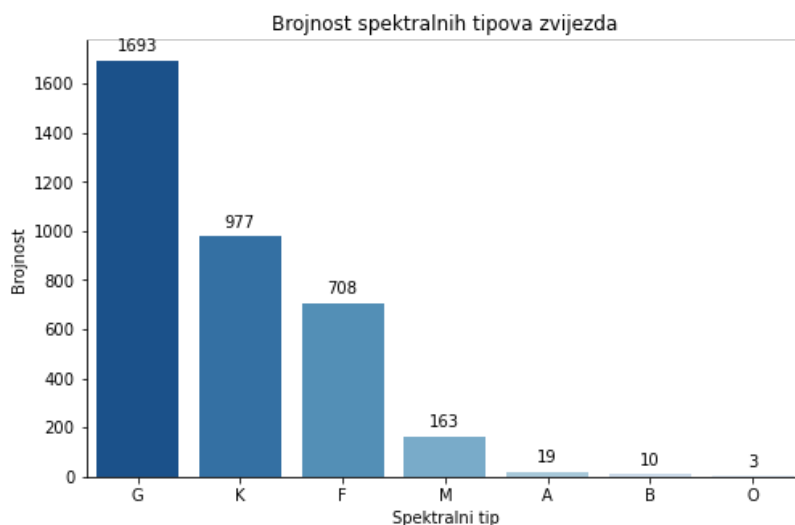
Radeći na ovom praktičnom radu naučila sam mnogo toga o egzoplanetima, njihovim vrstama, kategorijama i o habitabilnosti i raznolikosti planeta u svemiru.

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 trenutno 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 neka opažanja koja spajaju vrste planeta i vrste zvijezda i sl.



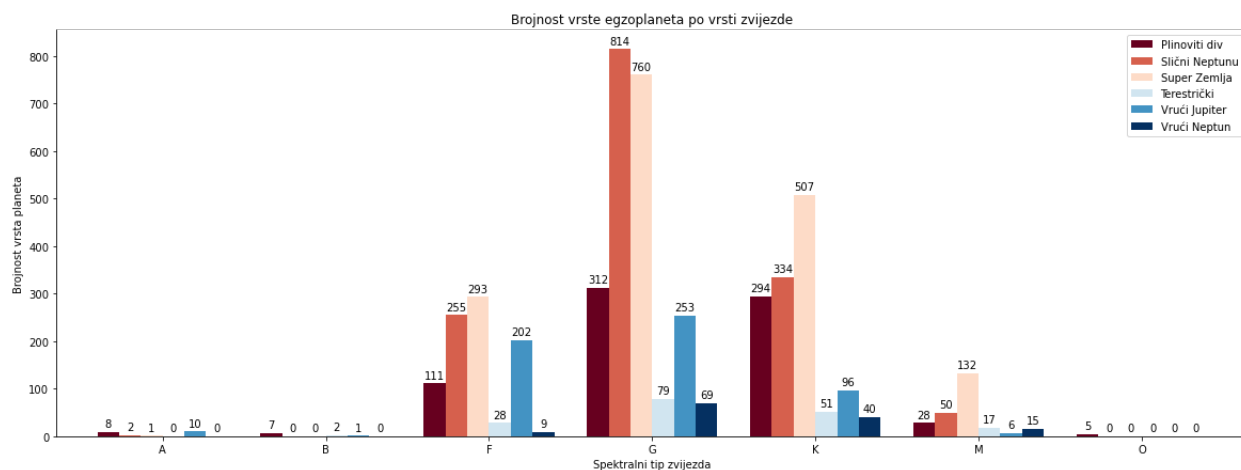
**Grafikon 7: Brojnost kategorija egzoplaneta**

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.



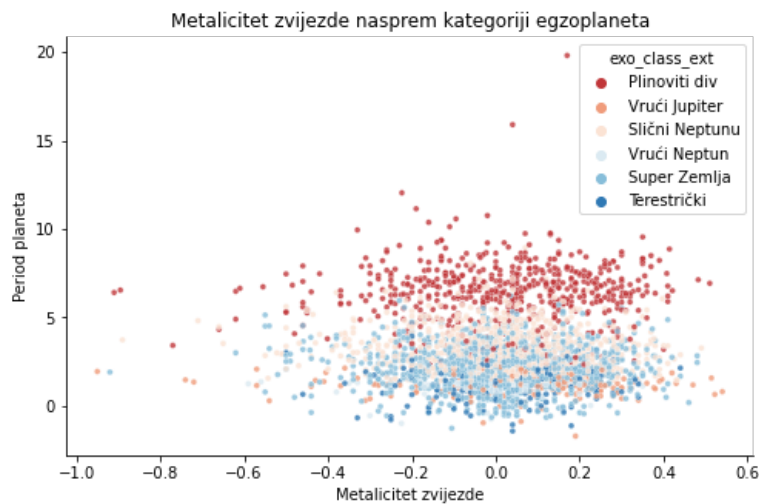
**Grafikon 8: brojnost spektralnih tipova zvijezda**

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.



**Grafikon 9: 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 10: 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.

- [1] <https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/overview/>
- [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](http://www.ifa.hawaii.edu/~howard/ast241/exoplanet_properties.pdf)
- [5] [https://www.planetarybiology.com/calculating\\_habitable\\_zone.html](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](https://en.wikipedia.org/wiki/Red_dwarf)
- [16] [https://en.wikipedia.org/wiki/K-type\\_main-sequence\\_star](https://en.wikipedia.org/wiki/K-type_main-sequence_star)
- [17] [https://www.youtube.com/watch?v=Dgwjb\\_h8wNg](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](https://en.wikipedia.org/wiki/O-type_star)
- [20] [https://en.wikipedia.org/wiki/B-type\\_main-sequence\\_star](https://en.wikipedia.org/wiki/B-type_main-sequence_star)
- [21] [https://en.wikipedia.org/wiki/A-type\\_main-sequence\\_star](https://en.wikipedia.org/wiki/A-type_main-sequence_star)

[22] [https://en.wikipedia.org/wiki/G-type\\_main-sequence\\_star](https://en.wikipedia.org/wiki/G-type_main-sequence_star)

[23] [https://www.jpl.nasa.gov/edu/pdfs/exoplanets\\_answers.pdf](https://www.jpl.nasa.gov/edu/pdfs/exoplanets_answers.pdf)

## POPIS SLIKA

Slika 1: slikoviti prikaz radijalne brzine .....	6
Slika 2: slikoviti prikaz metode tranzita.....	7
Slika 3: slikoviti prikaz gravitacijskog mikrolenziranja.....	8
Slika 4: slikoviti prikaz izravnog fotografiranja .....	9
Slika 5: prikaz preuzimanja tablice podataka .....	21

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Mogući sastav egzoplaneta .....	14
Tablica 2: tablica exo_data .....	22
Tablica 3: rasponi mase i radijusa za vrstu egzoplaneta .....	23
Tablica 4: prikazuje koje planete je program klasificirao.....	25
Tablica 5: ažurirana tablica exo_data .....	26
Tablica 6: tablica pt .....	27
Tablica 7: tablica st .....	27
Tablica 8: tablica sa brojem 2 u koloni check .....	28
Tablica 9: tablica planetary_systems .....	29
Tablica 10: spektralna klasifikacija zvijezda .....	29
Tablica 11: klasifikacija zvijezda po spektralnom tipu .....	30
Tablica 12: sažetak karakteristika egzoplaneta .....	31
Tablica 13: broj egzoplaneta u sustavu i koje su vrste unutar njih .....	31
Tablica 14: vrste egzoplaneta i broj zvijezda .....	32
Tablica 15: vrsta zvijezde i broj planeta u sustavu .....	32
Tablica 16: vrsta egzoplaneta i spektralni tip zvijezde .....	33

## POPIS GRAFOVA

Grafikon 1: pokazivanje Keplerovog 3. zakona .....	10
Grafikon 2: brojnost ekscentriciteta egzoplaneta .....	10
Grafikon 3: masa egzoplaneta i orbitalni period.....	11
Grafikon 4: radijus egzoplaneta i orbitalni period .....	12
Grafikon 5: brojnost zvijezda u planetarnim sustavima.....	18
Grafikon 6: brojnost planeta u planetarnim sustavima.....	19
Grafikon 7: Brojnost kategorija egzoplaneta .....	34
Grafikon 8: brojnost spektralnih tipova zvijezda .....	35
Grafikon 9: brojnost vrste egzoplaneta po vrsti zvijezde.....	35
Grafikon 10: metalicitet zvijezde nasprem vrsti planeta .....	36

```

#učitavanje knjižnica
%matplotlib inline # mogućnost ispisivanja grafikona unutar programa
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
import gc

#učitavanje podataka
exo_data = pd.read_csv('exoplanets.csv')

# pregledavanje tablice
print(exo_data.shape)
exo_data.head()

#funkcija za anotiranje grafova
def annotate_countplot(sp, df: pd.DataFrame(), perc_height:float,
font_size:int=10):
    for p in sp.patches:
        height = p.get_height()

        sp.text(p.get_x() + p.get_width()/2.,
                height + len(df) * perc_height, height,
                ha = 'center', fontsize = font_size)

# grafikon 3
plt.figure(figsize=(8,5))
p =
sns.scatterplot(x=np.log(exo_data['pl_orbsmax']),y=np.log(exo_data['pl_bmasse']),
alpha=0.5).set(title='Masa nasprem orbitalnom periodu')
sns.despine()
plt.xlabel('Orbitalni period (dani)')
plt.ylabel('Masa egzoplaneta (masa Zemlje)')
plt.show()

# grafikon 2
plt.figure(figsize=(8,5))
scp = sns.countplot(x=round(exo_data['pl_orbeccen'],1),palette='Blues_r',data =
exo_data)
annotate_countplot(scp,exo_data,0.01)
sns.despine()
plt.xlabel('Eksentricitet egzoplaneta')
plt.ylabel('Brojnost')
plt.title('Brojnost eksentriciteta egzoplaneta')
plt.show()

# grafikon 1

```



```

ht = exo_data[exo_data['pl_orbper']<1000].copy() # uzimajući u obzir vrijednosti
koje nisu ekstremne

_,_ = plt.subplots(nrows=1,ncols=2, figsize=(15,5)) # crtanje 2 sporedna grafa
plt.suptitle('Pokazivanje Keplerovog 3. zakona')
a = ht['pl_orbsmax']**3
P = ((ht['pl_orbper']/365)**2) * ht['st_mass']
plt.subplot(1,2,1)
sns.scatterplot(x=a, y=P)
sns.despine()
plt.xlim(0,20)
plt.ylim(0,20)
plt.title('A - bez ekstremnih vrijednosti')
plt.xlabel('Udaljenost egzoplaneta od zvijezde (AU)')
plt.ylabel('Orbitalni period (godine)')

plt.subplot(1,2,2)
sns.scatterplot(x=a, y=P)
sns.despine()
plt.title('B - svi podaci')
plt.xlim(0, (np.max(P)+1))
plt.ylim(0, (np.max(P)+1))
plt.xlabel('Udaljenost egzoplaneta od zvijezde (AU)')
plt.ylabel('Orbitalni period (godine)')

plt.show()

# grafikon 4
plt.figure(figsize=(8,5))
sns.scatterplot(x=np.log(exo_data['pl_orbsmax']),y=np.log(exo_data['pl_rade']),
alpha=0.5).set(title='Orbitalni period egzoplaneta nasprem radijusa egzoplaneta')
sns.despine()
plt.xlabel('Orbitalni period (dani)')
plt.ylabel('Radijus egzoplaneta (radijus Zemlje)')
plt.show()

# kategorizacija egzoplaneta po masi i radijusu
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()

# popunjavanje praznih vrijednosti s NaN objektom
exo_data['exo_class'] = exo_data.exo_class.fillna(np.nan)

# klasificiranje egzoplaneta po udaljenosti od zvijezde
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()

# provjeravanje klasifikacije iznad
test = pd.crosstab(exo_data['exo_class'],exo_data['exo_class_ext'])
test.head()

# popunjavanje stupca exo_class_ext s vrijednostima iz stupca exo_class
exo_data['exo_class_ext'] =
exo_data['exo_class_ext'].fillna(exo_data['exo_class'])
exo_data.head()

# stvaranje tablice 13
pl_num = pd.crosstab(exo_data['exo_class_ext'],exo_data['sy_pnum'])
pd.DataFrame(pl_num)
pl_num.head()

# stvaranje tablice 14
st_num = pd.crosstab(exo_data['exo_class_ext'],exo_data['sy_snum'])
pd.DataFrame(st_num)
st_num.head()

# tablica 12
medijan_mase =
exo_data.groupby('exo_class_ext')['pl_bmasse'].agg('median').to_dict()
medijan_gustoce =
exo_data.groupby('exo_class_ext')['pl_dens'].agg('median').to_dict()
medijan_radijusa =
exo_data.groupby('exo_class_ext')['pl_rade'].agg('median').to_dict()
medijan_eks =
exo_data.groupby('exo_class_ext')['pl_orbeccen'].agg('median').to_dict()

```

```

summary = pd.DataFrame(index=exo_data['exo_class_ext'].unique())
summary['Masa'] = summary.index.map(medijan_mase)
summary['Radijus'] = summary.index.map(medijan_radijusa)
summary['Gustoca'] = summary.index.map(medijan_gustoce)
summary['Eksentricitet'] = summary.index.map(medijan_eks)
summary

# stvaranje pt tablice
ht = exo_data[['hostname', 'exo_class_ext']].copy()
pt = pd.crosstab([ht['hostname']], [ht['exo_class_ext']], dropna=False)
pt = pd.DataFrame(pt)
print(pt.shape[0])
pt.head()

# stvaranje st tablice
st = exo_data[['hostname', 'sy_snum', 'sy_pnum', 'st_met', 'st_teff']].copy()
st.drop_duplicates(inplace=True)
print(st.shape[0])
st.head()

# rješavanje problema s metalicitetom i temperaturom
st['st_metallicity'] = st.groupby('hostname')['st_met'].transform('mean')
st = st.drop(['st_met'], axis=1)
st.drop_duplicates(inplace=True)

st['st_temperature'] = st.groupby('hostname')['st_teff'].transform('mean')
st = st.drop(['st_teff'], axis=1)
st.drop_duplicates(inplace=True)

print(st.shape[0], ct.shape[0])
st.head()

# provjeravanje st tablice
st['check'] = st.groupby('hostname')['hostname'].transform('count')
st[st['check'] >= 2]

# brisanje duplih stupaca
st = st.drop(['check'], axis=1)
st.head()

# spajanje tablica pt i st
pt = pt.reset_index()

planetary_systems = pd.merge(st, pt, on='hostname', how='left')
planetary_systems.head()

# kategorizacija zvijezda
sstellar = {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',
}
# mapiranje zvijezda
planetary_systems['st_spect'] = planetary_systems['st_temperature'].map(stellar)
planetary_systems.head()

# tablica 15
spectral = pd.crosstab(planetary_systems['st_spect'],planetary_systems['sy_pnum'])
pd.DataFrame(spectral)
spectral.head(10)
# tablica 16
cols = ['Plinoviti div', 'Slični Neptunu', 'Super Zemlja',
        'Terestrički', 'Vrući Jupiter', 'Vrući Neptun']
ht = pd.DataFrame(index=planetary_systems.st_spect.unique())
for pl_type in cols: #
    st_sum_pl =
planetary_systems.groupby('st_spect')[pl_type].agg('sum').to_dict()
    ht[pl_type] = ht.index.map(st_sum_pl)
ht.dropna(inplace=True)
ht.sort_index(inplace=True)

# GRAFOVI
# grafikon 7
plt.figure(figsize=(8,5))
scp = sns.countplot(x=exo_data['exo_class_ext'],palette='Blues_r',data =
exo_data,order=exo_data['exo_class_ext'].value_counts().index)
annotate_countplot(scp,exo_data,0.01)
sns.despine()
plt.xlabel('Kategorija egzoplaneta')
plt.ylabel('Brojnost')
plt.title('Brojnost kategorija egzoplaneta')
plt.show()

# grafikon 8
plt.figure(figsize=(8,5))
scp = sns.countplot(x=planetary_systems['st_spect'],palette='Blues_r',data =
planetary_systems,order=planetary_systems['st_spect'].value_counts().index)
annotate_countplot(scp,planetary_systems,0.01)
sns.despine()
plt.xlabel('Spektralni tip')
plt.ylabel('Brojnost')
plt.title('Brojnost spektralnih tipova zvijezda')
plt.show()

# grafikon 5
plt.figure(figsize=(8,5))
scp = sns.countplot(x=exo_data['sy_snum'],palette='Blues_r',data =
planetary_systems,order=planetary_systems['sy_snum'].value_counts().index)
annotate_countplot(scp,planetary_systems,0.01)
sns.despine()
plt.xlabel('Broj zvijezda')
plt.ylabel('Brojnost')
plt.title('Brojnost broja zvijezda u sustavu')
plt.show()

```

```

# grafikon 6
_, _ = plt.subplots(nrows=1, ncols=1, figsize=(8, 6))
scp = sns.countplot(x = planetary_systems['sy_pnum'], data = planetary_systems,
palette='Blues_r')
annotate_countplot(scp, planetary_systems, 0.01)
plt.xlabel('Broj planeta')
plt.ylabel('Brojnost')
plt.title('Brojnost broja planeta u sustavu')
sns.despine()

# grafikon 9
pl = ht.plot(kind="bar", rot=0, colormap='RdBu', figsize=(20, 7), width=0.8)
annotate_countplot(pl, ht, 1.5)
plt.xlabel('Spektralni tip zvijezda')
plt.ylabel('Brojnost vrsta planeta')
plt.title('Brojnost vrste egzoplaneta po vrsti zvijezde')
sns.despine()
plt.show()

# grafikon 10
plt.figure(figsize=(8, 5))
sns.scatterplot(x=planetary_systems['st_metallicity'], y=np.log(exo_data['pl_orbper']),
hue=exo_data['exo_class_ext'], palette='RdBu', alpha=0.8, s=15).set(title='Metalicitet zvijezde nasprem kategoriji egzoplaneta')
sns.despine()
plt.xlabel('Metalicitet zvijezde')
plt.ylabel('Period planeta')
plt.show()

```