

Szegedi Tudományegyetem

Természettudományi és Informatikai Kar

Kísérleti Fizikai Tanszék

Szakdolgozat

# A Naprendszer-hasonlósági index

Készítette: Mészáros Richárd

Fizika BSc szakos hallgató

Témavezető: Dr. Szatmáry Károly

egyetemi tanár

Szeged

2020

# Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	2
2. Az exobolygók felfedezési módszerei.....	2
2.1. Közvetlen módszerek.....	2
2.2. Közvetett módszerek.....	3
3. Az exobolygók osztályozása.....	6
4. A Föld-hasonlósági index.....	7
5. A Naprendszer-hasonlósági index.....	8
5.1. Első verzió.....	8
5.2. Második verzió.....	11
5.3. Eredmények.....	13
6. Összefoglalás.....	24
Köszönetnyilvánítás.....	24
Irodalomjegyzék.....	25

# 1. Bevezetés

A felfedezett exobolygók asztrobiológiai potenciáljának vizsgálatára 2011-ben bevezetésre került a Föld-hasonlósági index (ESI, Schulze-Makuch et al. 2011,[2]). Dolgozatom témájául a felfedezett exobolygó rendszerek hasonló módon való vizsgálatát választottam.

A második és harmadik fejezetben összefoglalom az exobolygók keresési módszereit és ezen bolygók típusait. A negyedik fejezetben röviden bemutatom a Föld-hasonlósági indexet.

Az ötödik fejezetben a Föld-hasonlósági index mintájára bevezetem a Naprendszer-hasonlósági index fogalmát. Ismertetem kiszámításának módját, és alkalmazom a legalább 4 bolygót tartalmazó exobolygó rendszerekre. A kapott eredményekből következtetek arra, hogy a Naprendszer egyedinek számít, vagy hasonlít-e az ismert bolygórendszerek számottevő részéhez.

## 2. Az exobolygók felfedezési módszerei ([9],[11])

Az exobolygók kimutatására számos módszert dolgoztak ki. Ezeket a módszereket két fő csoportba sorolhatjuk. Közvetlenül, direkt módon nagyon nehéz kimutatni a halvány bolygót a sok-sok nagyságrenddel fényesebb csillaga mellett. Az esetek döntő többségében a közvetett módszerek jártak sikerrel, amikor a bolygónak a csillagára gyakorolt hatását lehetett megfigyelni.

A két legsikeresebb a fedési és a radiális sebesség módszere, az eddig felfedezett bolygók 76,1, illetve 19,3 százalékát detektálták velük a NASA Exoplanet Archive adatbázisa szerint.

### 2.1. Közvetlen módszerek

Képalkotás koronográffal: Ebben az esetben a különlegesen felszerelt űrtávcső a bolygóknál sokkal fényesebb csillagot kitakarja.

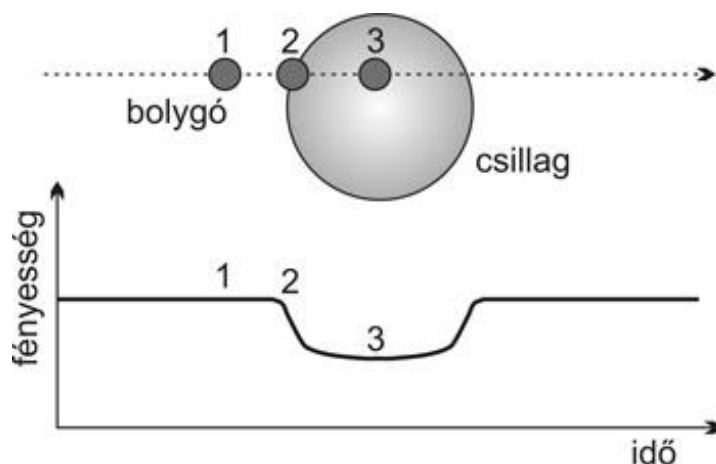
Infravörös többletsugárzás: A bolygó hőmérsékleti sugárzása hozzáadódik a csillagéhoz.

## 2.2. Közvetett módszerek

Fedési módszer: Ha egy objektum (például bolygó, barna törpe) elhalad a csillaga előtt, akkor a csillag fényességében csökkenést lehet észlelni. A módszer csak akkor működik, ha a bolygót a csillaga előtt látjuk elhaladni. Akkor beszélhetünk kísérő által okozott elhalványodásról, ha ez periodikusan megismétlődik. A fényességcsökkenés függ a bolygó és a csillag sugarának hányadosától, valamint a csillag hőmérsékletétől, vagyis adott méretarány esetén minél hidegebb a csillag, annál kisebb az intenzitás csökkenése. A fedési fénygörbe fotometriai vizsgálatából sok mindenre választ kaphatunk: a keringési periódusára, excentricitására, illetve a bolygó sugarának nagyságára.

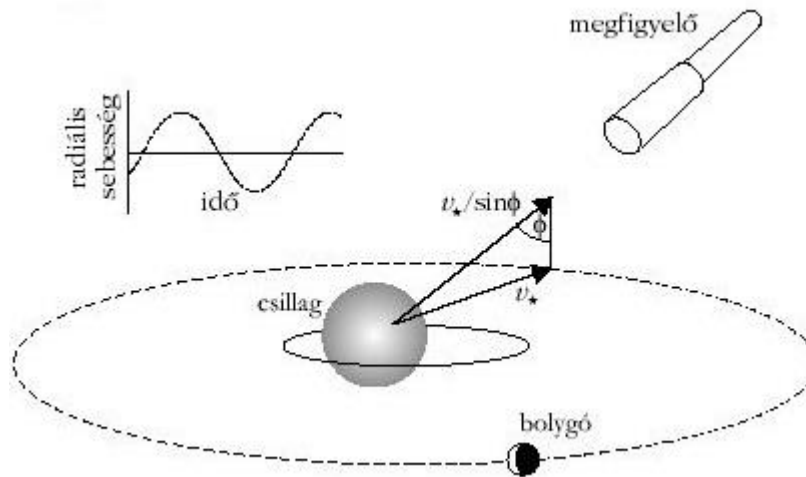
Átvonulás során az égitest légköre által produkált ún. kompozit spektrum is tanulmányozható, mivel a bolygó légkörének spektruma ráakódik a csillagéra, és a bolygó színekvonalainak Doppler-eltolódásából adódóan szét lehet választani őket egymástól. Ennek a módszernek az adja a fontosságát, hogy ilyen módszerrel a bolygó színeképe, ezáltal kémiai összetétele is tanulmányozható, ami elméletileg lehetővé teszi a felszínén az életre utaló víz, vagy szerves molekulák kimutatását – kellő érzékenységű műszerrel.

A fedési módszer az infravörös tartományban is működik, de pont „fordítva”: az exobolygók a központi csillagukhoz képest infravörösben kevésbé halványak (alacsonyabb felszíni hőmérsékletük miatt elektromágneses sugárzásuk csúcsa esik az infravörös tartományba), emiatt központi csillaguk mögött eltűnve észrevehetően lecsökken a rendszer infravörös összsugárzása. Mivel az infravörös tartományban a megfigyelések végzése a földi légkör zavaró hatásai miatt sokkal nehezebb, ezért ezzel a módszerrel nem keresnek bolygókat.



1. ábra: A csillag fényességcsökkenése, mikor elhalad előtte a bolygója (Szatmáry, 2006).

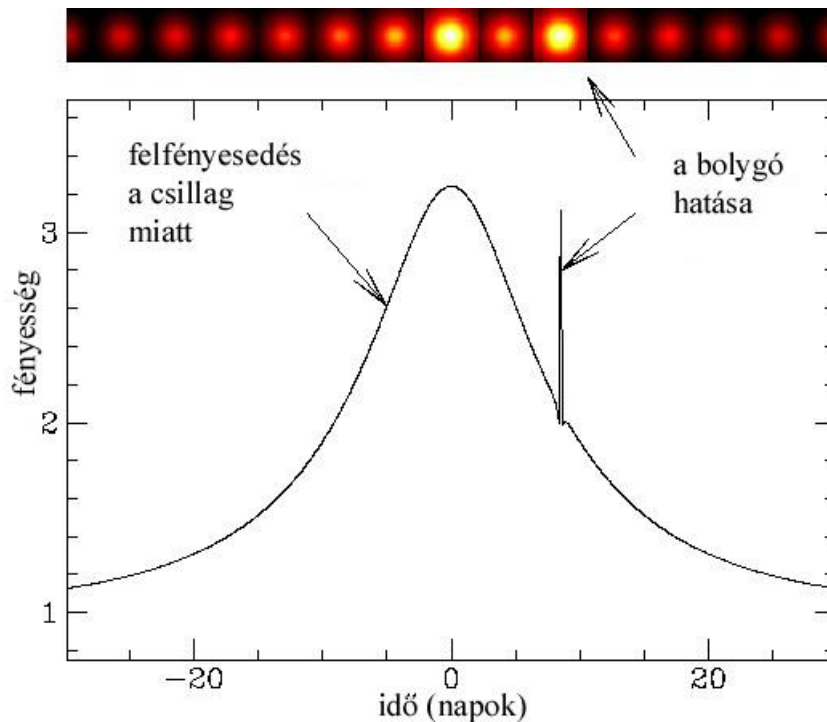
Radiális sebesség mérése: A bolygó és a csillag a rendszer közös tömegközéppontja körül kering, ezért a csillag látóirányú sebessége változik, így a Doppler-effektusnak megfelelően a színeképvonalak hullámhossza periodikusan eltolódik, közeledéskor a kék, távolodáskor a vörös irányba. A módszerrel a bolygó minimális tömege becsülhető.



2. ábra: A csillag radiális sebessége változik, ha van bolygója (Szatmáry,2007) [13].

Asztrometria: A bolygó gravitációs hatása változásokat idéz elő a csillag sajátmozgásában. Ez az elmozdulás mérhető a háttércsillagokhoz képest.

Gravitációs mikrolencse hatás: A bolygó és a csillag kettős gravitációs mikrolencseként viselkedik, amikor a rendszer elhalad egy harmadik, távoli csillag előtt, egy felfényesedést lehet észlelni, amelyet a központi csillag okoz, ennek fénygörbéjére rakódik rá a bolygó által okozott rövidebb ideig tartó fényesedés. A módszerrel nagy távolságból is ki lehet mutatni a csillagok kísérőit, és sok olyan paraméter is mérhető, amely más módszerekkel nem, vagy csak nehezen megállapítható. Komoly hátrány viszont, hogy a jelenség egyszeri és megismételhetetlen.



3. ábra: Egy háttércsillag felfényesedése, ha elhalad közöttünk egy bolygós csillag (Szatmáry,2006).

Timing-effektus: A Timing-effektus alapelve az, hogy egy pontosan ismert, rendszeresen ismétlődő jelenség bekövetkezéseinek apró zavarai mutatják ki az ezt befolyásoló hatást, ami szerencsés esetben egy exobolygó. Egy, már ismert bolygót tartalmazó rendszerben a bolygó pályájának zavarai (például fedési módszernél a csillag előtti átvonulások között eltelt idő apró változásából) következtethetnek más bolygók meglétére.

Pulzárjelek modulációja: A pulzár jeleinek frekvenciája periodikusan változik a bolygó gravitációs hatása miatt, mert a közös tömegközéppont körül a pulzár is kering, rendszeresen közeledve-távolodva.

### 3. Az exobolygók osztályozása ([10],[13])

A felfedezett exobolygók sokfélék, tulajdonságaik alapján csoportokba sorolhatjuk őket. Jelenleg 4151 exobolygó felfedezését erősítették meg (2020. 04. 19.) Ezek közül méretük alapján 1393 Neptunusz-szerű, 1306 Jupiter-szerű gázóriás, 1286 ún. szuper-Föld, 160 Föld vagy annál kisebb méretű kőzetbolygó [4],[7]. Az exobolygókat egyéb tulajdonságaik alapján több kisebb csoportba is sorolhatjuk.

A gázóriások között nagy számban fedeztek fel ún. forró Jupitereket. Ezen bolygók kis excentricitású, közeli pályán keringenek csillaguk körül, sokszor néhány napos keringési periódussal. Az árapály-erők kiegyenlítő hatása miatt a forró Jupiterek tengely körüli forgása kötött, azaz egy keringés alatt egyszer fordulnak meg tengelyük körül, vagyis felszínükön egy év egy nappal egyenlő. Emiatt légkörükben szélsőséges időjárási jelenségek lehetnek [12]. Számítógépes szimulációk arra utalnak, hogy ezek a bolygók a csillaguktól távolabb jönnek létre, de az anyagkorongban keringve fékeződnek, és fokozatosan beljebb kerülnek. A forró Jupitereknél nagyobb számban létezhetnek az ún. forró Neptunuszok.

A felfedezett Jupiter és Neptunusz méretű exobolygók között találtak rendkívül alacsony sűrűségű bolygókat (angolul „puffy planet” vagy „hot-Saturn”, illetve „super-puff planet”). A „puffy planet” típusú bolygók csillagukhoz közel keringenek, a csillagtól származó intenzív hő és a bolygó belső hője együttesen járul hozzá a légkör felfújódásához. Ezek többnyire két Jupiter-tömeg alatti bolygók. A „super-puff” típusú bolygók tömege néhány Föld-tömeg, de a Neptunusznál nagyobb a sugaruk. Erre magyarázatként szolgálhat, hogy ezek valójában kisebb méretű, nagy gyűrűrendszerrel rendelkező bolygók.

A szuperföldek olyan bolygók, amelyek tömege nagyobb a Földénél, de kisebb a Neptunuszénál, a felső tömeghatáruk 10 Föld-tömeg. Sűrűségük alapján a felépítésük többféle lehet. Az alacsony sűrűségűek főleg hidrogénből és héliumból állhatnak. A közepes sűrűségű szuperföldek magas víztartalmúak lehetnek vagy sűrűbb maggal és vastag gázburokkal rendelkeznek. A magasabb sűrűségűek anyagát a Földhöz hasonlóan vas és különböző kőzetek alkotják.

## 4. A Föld-hasonlósági index ([2])

A Föld hasonlósági index egy olyan 0 és 1 közé eső mérőszám, amely megmutatja, hogy a vizsgált bolygó mennyire hasonlít a Földhöz. Ehhez a bolygók sűrűségét, sugarát, hőmérsékletét és szökési sebességét hasonlítjuk össze.

A Föld-hasonlósági index (ESI) a következőképpen számítható ki (Schulze-Makuch et al. 2011, [2]):

$$ESI = \sqrt{ESI_I \cdot ESI_S}$$

A képletben  $ESI_I$  a bolygó belsejére,  $ESI_S$  a bolygó felszínére vonatkozó hasonlósági index.

A bolygó belsejére vonatkozó hasonlósági index:

$$ESI_I = \sqrt{ESI_r \cdot ESI_\rho}$$

$ESI_r$  a sugárra,  $ESI_\rho$  a sűrűségre vonatkozó hasonlósági index.

A bolygó felszínére vonatkozó hasonlósági index:

$$ESI_S = \sqrt{ESI_{ve} \cdot ESI_{Ts}}$$

$ESI_{ve}$  a szökési sebességre,  $ESI_{Ts}$  a felszíni hőmérsékletre vonatkozó hasonlósági index.

A különböző tulajdonságok hasonlósági indexeit a Bray-Curtis hasonlósági index súlyozott átalakításával nyerjük (Bloom, 1981,[8]).

$ESI_r$ ,  $ESI_\rho$ ,  $ESI_{ve}$ ,  $ESI_{Ts}$  a következőképpen számítható ki:

$$ESI_x = \left| 1 - \frac{|x - x_0|}{x + x_0} \right|^w$$

A képletben  $x$  ill.  $x_0$  a bolygóra ill. a Földre vonatkozó érték,  $w$  a súlyozó kitevő.

Az ESI kiszámításához a Schulze-Makuch et al. (2011) által használt súlyozó kitevőket használjuk fel: sugárnál 0,57-et, sűrűségnél 1,07-et, szökési sebességnél 0,70-et, hőmérsékletnél 5,58-at.



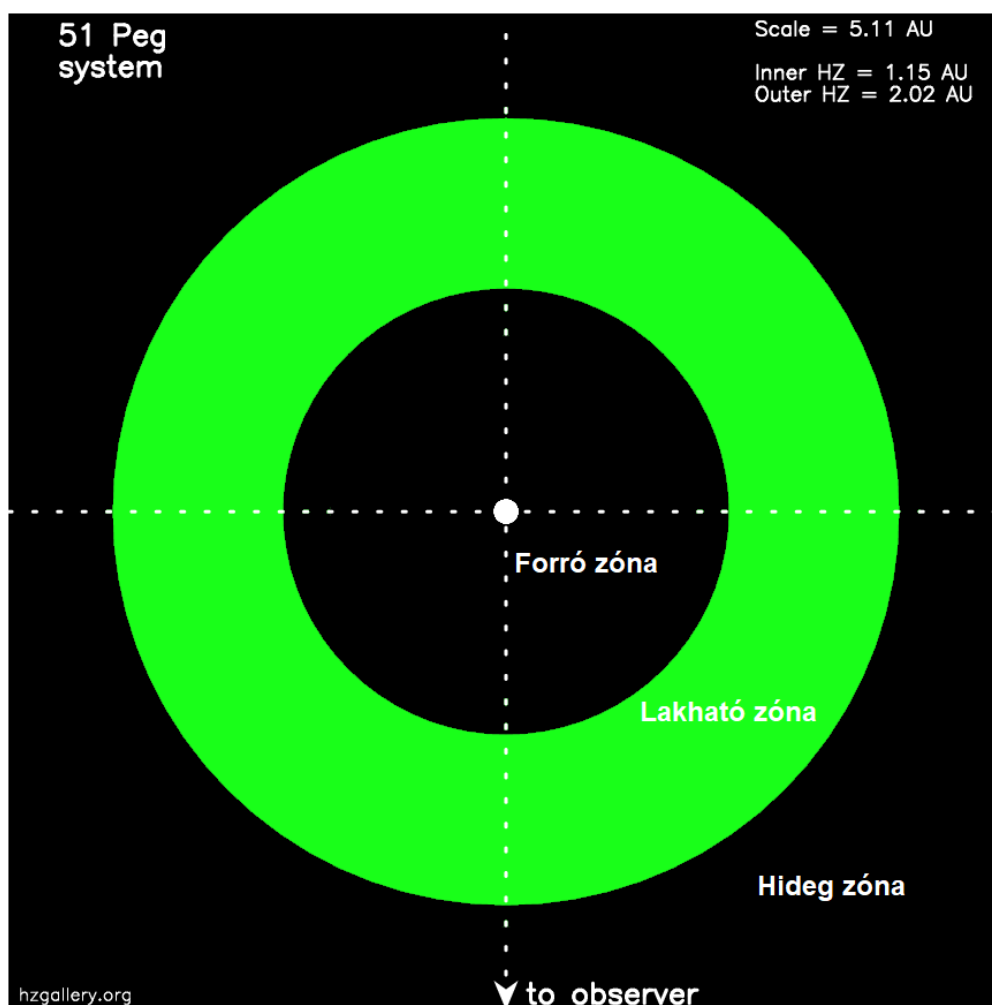
## 5. A Naprendszer-hasonlósági index

Ebben a fejezetben szeretném ismertetni a dolgozatban célként kitűzött Naprendszer-hasonlósági index bevezetését és kiszámításának módját.

A Naprendszer-hasonlósági index egy olyan 0 és 1 közé eső mérőszám, amely megmutatja, hogy a vizsgált bolygórendszer mennyire hasonlít a Naprendszerre.

### 5.1. Első verzió

A Naprendszer-hasonlósági index képletének meghatározásakor a bolygórendszereket három, a hőmérséklettől függő részre osztottam: a forró, a lakható és a hideg zónára. Mindhárom zónára hasonlósági indexet definiáltam, ezek kombinálásával számítottam ki a Naprendszer-hasonlósági indexet.



4. ábra: A bolygórendszerek felosztása

A Naprendszer-hasonlósági index képletének meghatározásakor figyelembe vettem az ún. lakhatósági zóna és a lakhatósági zónától beljebb eső ún. forró zóna szélességét. Ezek függenek az adott csillag luminozitásától. A képlet megalkotása során még felhasználtam a forró, lakható és a hideg zónában elhelyezkedő bolygók számát és Föld-hasonlósági indexét. A különböző tulajdonságok összehasonlításakor egy kivétellel a Föld-hasonlósági index által is használt Bray-Curtis hasonlósági-indexet használtam fel. A forró és a lakható zóna esetében három, a hideg zónánál két tulajdonságot hasonlítottam össze. A különböző zónák hasonlósági indexét a mértani középpel határoztam meg.

A forró zóna hasonlósági indexe:

$$HI_f = \sqrt[3]{\left(1 - \left|\frac{D_f - D_{f0}}{D_f + D_{f0}}\right|\right) \cdot \left(1 - \left|\frac{N_f - N_{f0}}{N_f + N_{f0}}\right|\right) \cdot \left(1 - \left|\frac{ESI_f - ESI_{f0}}{ESI_f + ESI_{f0}}\right|\right)}$$

A képletben  $D_f$  a forró zóna szélessége csillagászati egységben,  $N_f$  a forró zónában elhelyezkedő bolygók száma,  $ESI_f$  a forró zónában lévő bolygók Föld-hasonlósági indexeinek számtani átlaga.  $D_{f0}$ ,  $N_{f0}$ ,  $ESI_{f0}$  a Naprendszer-béli értékek.

A lakható zóna hasonlósági indexe:

$$HI_l = \sqrt[3]{\left(1 - \left|\frac{D_l - D_{l0}}{D_l + D_{l0}}\right|\right) \cdot \left(1 - \left|\frac{N_l - N_{l0}}{N_l + N_{l0}}\right|\right) \cdot ESI_{max}}$$

A képletben  $D_l$  a lakható zóna szélessége csillagászati egységben,  $N_l$  a lakható zónában elhelyezkedő bolygók száma,  $ESI_{max}$  a Földre leginkább hasonlító bolygó Föld-hasonlósági indexe.  $D_{l0}$ ,  $N_{l0}$  a Naprendszer-béli értékek.

A hideg zóna hasonlósági indexe:

$$HI_h = \sqrt{\left(1 - \left|\frac{N_h - N_{h0}}{N_h + N_{h0}}\right|\right) \cdot \left(1 - \left|\frac{ESI_h - ESI_{h0}}{ESI_h + ESI_{h0}}\right|\right)}$$

A képletben  $N_h$  a hideg zónában elhelyezkedő bolygók száma,  $ESI_h$  a hideg zónában lévő bolygók Föld-hasonlósági indexeinek számtani átlaga.  $N_{h0}$ ,  $ESI_{h0}$  a Naprendszer-béli értékek.

Ezen hasonlósági indexek fontos tulajdonsága, hogy zérus bolygószám esetén zérus értéket adnak, így a bolygórendszer nélküli csillag Naprendszer hasonlósági indexe nulla.

A Naprendszer-hasonlósági indexet definiáló képlet a következő:

$$NHI = \frac{1}{4} HI_f + \frac{1}{2} HI_l + \frac{1}{4} HI_h$$

A képletben  $HI_f$  a forró zóna,  $HI_l$  a lakható zóna,  $HI_h$  a hideg zóna hasonlósági indexe.

Az ún. lakhatósági zónák külső és belső határainak meghatározásához a következő összefüggéseket használtam fel (Kane & Gelino 2012),[1]:

Elsőként szükségünk van az adott csillag luminozitására, amely a következő módon számítható ki:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

ahol  $R$  a csillag sugara,  $T_{\text{eff}}$  a csillag effektív hőmérséklete, és  $\sigma$  a Stefan-Boltzmann állandó. Ezután felhasználva az „elszabaduló” üvegházhatás és a maximális üvegházhatás határeseteit a lakható zóna két szélén, a megfelelő csillag fluxusok ezeken a határokon (Underwood et al. 2003),[3]:

$$S_{\text{belső}} = 4,190 * 10^{-8} T_{\text{eff}}^2 - 2,139 * 10^{-4} T_{\text{eff}} + 1,268$$

$$S_{\text{külső}} = 6,190 * 10^{-9} T_{\text{eff}}^2 - 1,319 * 10^{-5} T_{\text{eff}} + 0,2341$$

A lakhatósági zóna belső, illetve külső határa a következő módon számítható ki:

$$r_{\text{belső}} = \sqrt{\frac{L}{S_{\text{belső}}}}$$

$$r_{\text{külső}} = \sqrt{\frac{L}{S_{\text{külső}}}}$$

A képletekben a luminozitás Nap-luminozitás egységekben szerepel, a határokat csillagászati egységben kapjuk.

## 5.2. Második verzió

Itt az első verzióban nem szereplő tulajdonságokat is figyelembe vettem a Naprendszer-hasonlósági index képletének megalkotásakor. A forró és lakható zónák hasonlósági indexeiben nem szerepelnek a zónák szélességei, ehelyett bevezettem a luminozításokat összehasonlító csillag hasonlósági indexet. A képletben szerepel egy ötödik hasonlósági index is, ami a bolygópályák egymástól való átlagos távolságát veszi figyelembe.

A csillag hasonlósági indexe:

$$HI_{cs} = 1 - \left| \frac{L - L_0}{L + L_0} \right|$$

A képletben  $L$  a vizsgált csillag luminozitása,  $L_0$  a Nap luminozitása.

A forró zóna hasonlósági indexe:

$$HI_f = \sqrt{\left(1 - \left| \frac{N_f - N_{f0}}{N_f + N_{f0}} \right| \right) \cdot \left(1 - \left| \frac{ESI_f - ESI_{f0}}{ESI_f + ESI_{f0}} \right| \right)}$$

A képletben  $N_f$  a forró zónában elhelyezkedő bolygók száma,  $ESI_f$  a forró zónában lévő bolygók Föld-hasonlósági indexeinek számtani átlaga.  $N_{f0}$ ,  $ESI_{f0}$  a Naprendszer-béli értékek.

A lakható zóna hasonlósági indexe:

$$HI_l = \sqrt{\left(1 - \left| \frac{N_l - N_{l0}}{N_l + N_{l0}} \right| \right) \cdot ESI_{max}}$$

A képletben  $N_l$  a lakható zónában elhelyezkedő bolygók száma,  $ESI_{max}$  a Földre leginkább hasonlító bolygó Föld-hasonlósági indexe.  $N_{l0}$  a Naprendszer-béli érték.

A hideg zóna hasonlósági indexe:

$$HI_h = \sqrt{\left(1 - \left| \frac{N_h - N_{h0}}{N_h + N_{h0}} \right| \right) \cdot \left(1 - \left| \frac{ESI_h - ESI_{h0}}{ESI_h + ESI_{h0}} \right| \right)}$$

A képletben  $N_h$  a hideg zónában elhelyezkedő bolygók száma,  $ESI_h$  a hideg zónában lévő bolygók Föld-hasonlósági indexeinek számtani átlaga.  $N_{h0}$ ,  $ESI_{h0}$  a Naprendszer-béli értékek.

A bolygópályák egymástól való átlagos távolságának hasonlósági indexe:

$$HI_p = 1 - \left| \frac{D - D_0}{D + D_0} \right|$$

A képletben  $D$  a vizsgált rendszer,  $D_0$  a Naprendszer bolygópályáinak átlagos távolsága.

A bolygópályák egymástól való átlagos távolságát a következőképpen számítottam ki:

$$D = \sqrt[n-1]{(a_2 - a_1) \cdot (a_3 - a_2) \cdot \dots \cdot (a_n - a_{n-1})},$$

ahol  $a_1$  a csillaghoz legközelebb eső,  $a_2$  a második legközelebbi,  $a_n$  a legtávolabbi bolygó fél nagytengelye.

A távolságok összehasonlításánál a Naprendszer annyi bolygóját vettem figyelembe, ahány bolygó az adott exobolygó rendszerben van. Például a jelenlegi tudásunk szerint a hat bolygóval rendelkező HD 10180 rendszere estén a Naprendszer első hat bolygóját vettem figyelembe.

A Naprendszer-hasonlósági indexet definiáló képlet a következő:

$$NHI = \frac{1}{6} HI_{cs} + \frac{1}{6} HI_f + \frac{1}{3} HI_l + \frac{1}{6} HI_h + \frac{1}{6} HI_p$$

A képletben  $HI_{cs}$  a csillag,  $HI_f$  a forró zóna,  $HI_l$  a lakható zóna,  $HI_h$  a hideg zóna,  $HI_p$  bolygópályák egymástól való átlagos távolságának hasonlósági indexe.

### 5.3. Eredmények

Összesen 81, legalább négy bolygót tartalmazó exobolygó rendszert vizsgáltam meg. A Naprendszerre a legjobban hasonlító rendszer mindkét verzió szerint a HD 34445 csillag bolygórendszere, hasonlósági indexe 0,71, illetve 0,72.

A bolygók és a csillagok adatait a The Exosolar Planet Encyclopaedia ([exoplanet.eu/catalog/](http://exoplanet.eu/catalog/)) [4], a NASA Exoplanet Archive ([exoplanetarchive.ipac.caltech.edu](http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu)) [5] és a Habitable Zone Gallery ([www.hzgalleries.org](http://www.hzgalleries.org)) [6] adatbázisából vettem. Az előbb felsorolt katalógusok nem minden esetben tartalmazták a bolygók összes adatát, ilyenkor a szükséges hiányzó adatokat a <https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/> [7] oldalról szereztem. A lakhatósági zónák meghatározásakor a Habitable Zone Gallery ábrái is segítséget nyújtottak.

A bolygók hőmérsékleteit az alábbi képlet alapján határoztam meg (Kane S.R. and Gelino D.M.: 2012, The Habitable Zone Gallery) [1]:

$$T = \left( \frac{L_*(1 - A)}{16\pi\sigma r^2} \right)^{\frac{1}{4}}$$

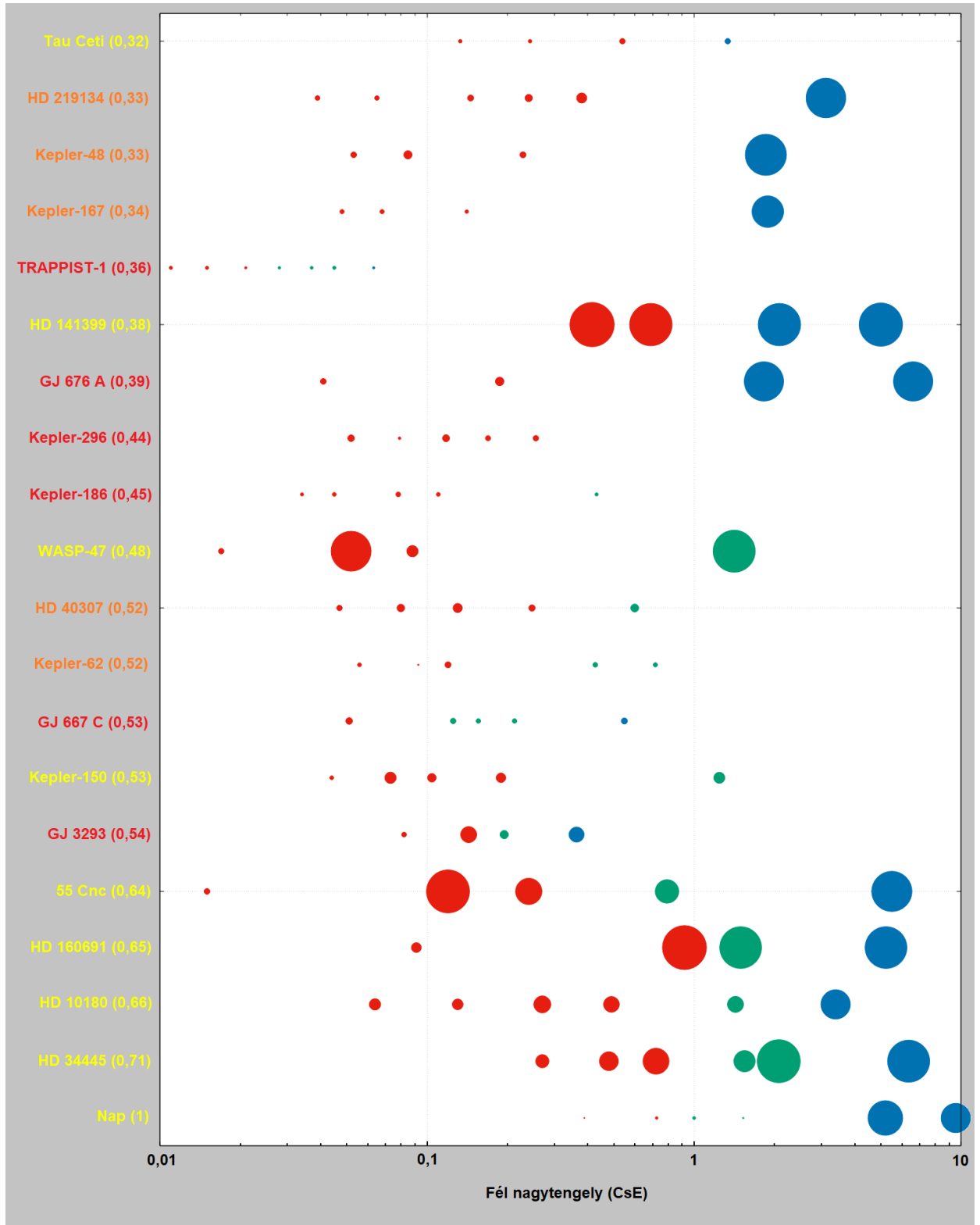
vagy

$$T = T_* \sqrt{\frac{R}{2r}} (1 - A)^{\frac{1}{4}}$$

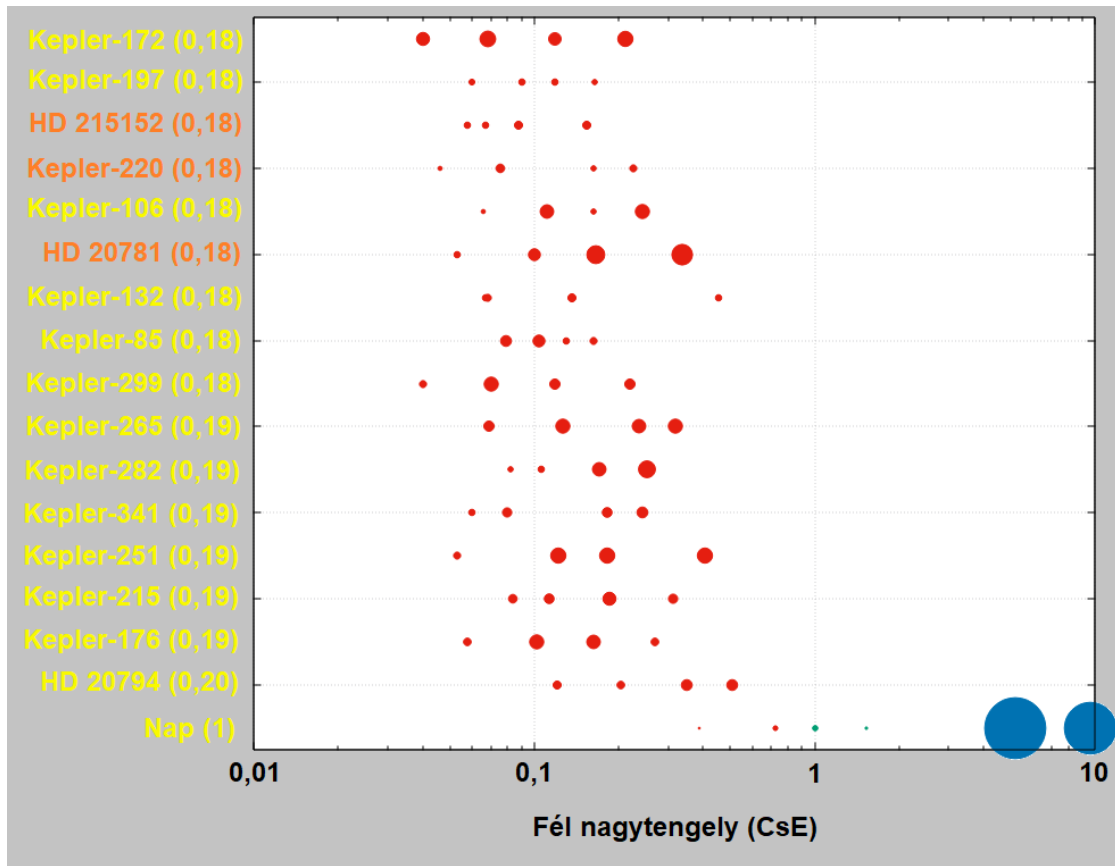
A képletekben  $L$  a csillag luminozitása,  $T_*$  a csillag felszíni hőmérséklete,  $A$  (Bond) albedó,  $r$  a csillag-bolygó távolság. Mivel az exobolygók albedóját nem ismerjük, minden bolygót abszolút fekete testként vettem számba, azaz 0 albedóval számítottam ki az egyensúlyi hőmérsékletüket.

A vizsgált rendszereket saját készítésű ábrákon is összehasonlítottam. Az ábrákon a bolygók nagysága a sugarukkal arányos. A bolygók színe azt mutatja meg, hogy a bolygó a lakhatóság szempontjából mekkora távolságra vannak a csillagjuktól. Piros szín jelzi, ha a bolygó a forró zónában kering. A zöld színű bolygók a lakhatósági zónában vannak, a kék színűek pedig a hideg zónában. A bolygórendszerek csillagait a jobb szemléltethetőség kedvéért színes betűkkel

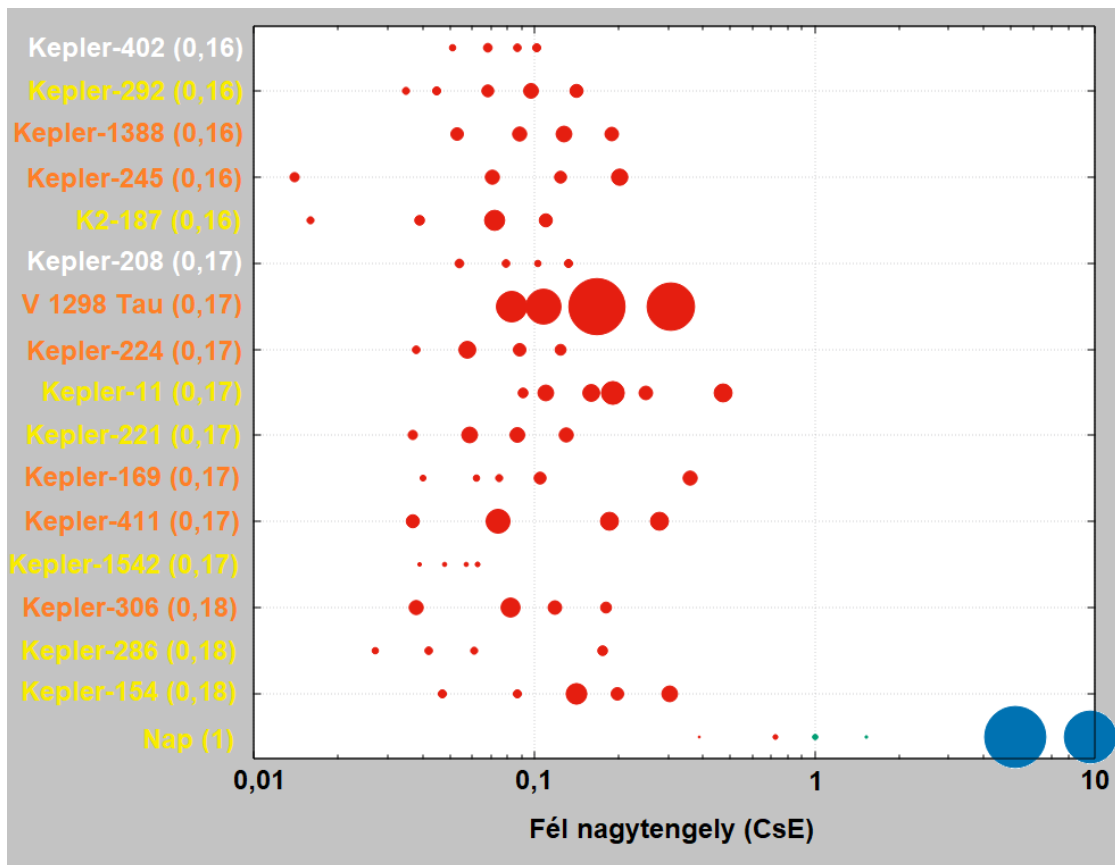
írtam. Piros színnel az M, narancs színnel a K, sárga színnel a G, fehér színnel az F színképosztályú csillagokat jelöltem. A csillagok neve mellett, zárójelben a bolygórendszer hasonlósági indexe látható.



5. ábra: A 19 legnagyobb Naprendszer-hasonlósági indexű bolygórendszer

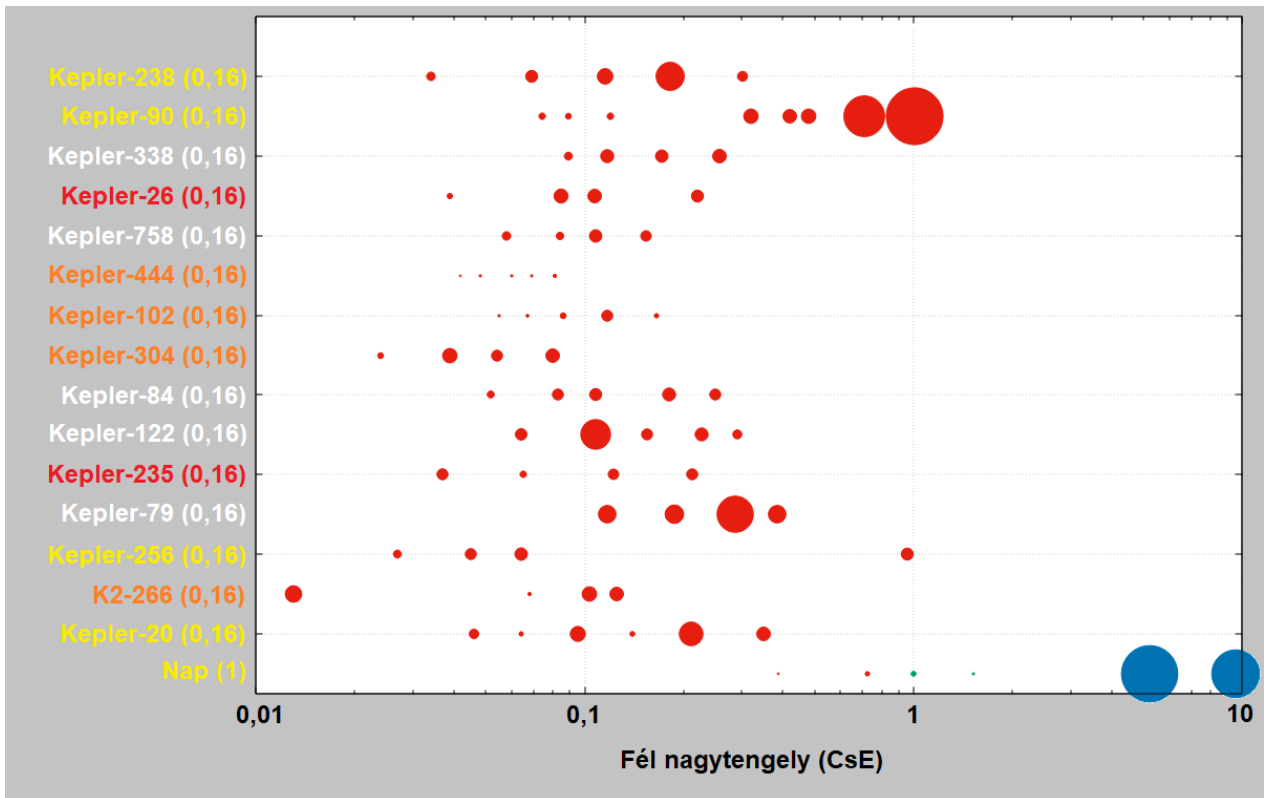


6. ábra: Az alacsony hasonlósági indexű bolygórendszerek (első rész)

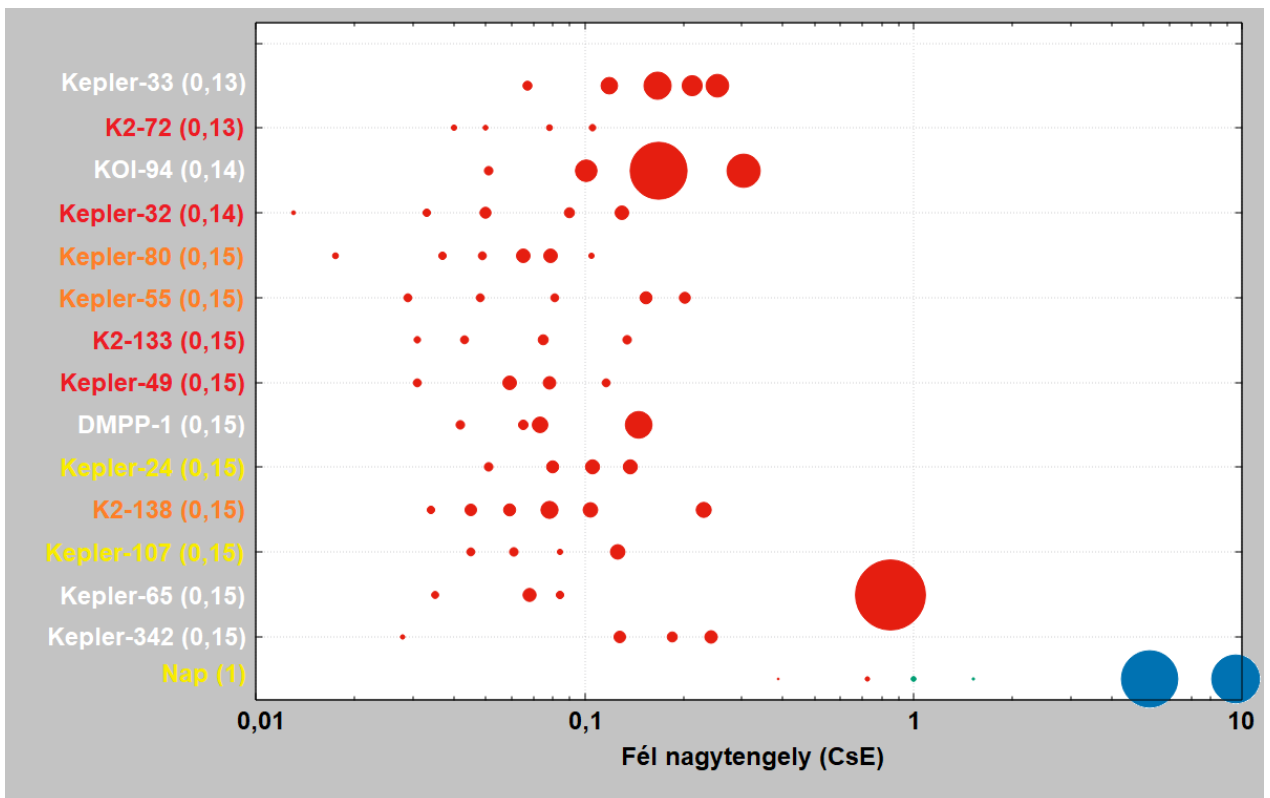


7. ábra: Az alacsony hasonlósági indexű bolygórendszerek (második rész)





8. ábra: Az alacsony hasonlósági indexű bolygórendszerek (harmadik rész)



9. ábra: Az alacsony hasonlósági indexű bolygórendszerek (negyedik rész)

A következő táblázatokban közlöm a vizsgált bolygók és bolygórendszerek adatait. Az első öt táblázatban a bolygók adatai és a belőlük számolt ESI értékek, valamint a bolygópályák egymás közötti átlagos távolsága láthatók. Az utolsó két táblázatban a 81 vizsgált bolygórendszer adatai és hasonlósági indexei láthatók, csökkenő sorrendben.

Bolygó	Fél nagy teng. (CsE)	Tömeg (Föld)	Sugár (Föld)	Hőmérséklet	Sűrűség (kg/m <sup>3</sup> )	Szökési seb.	ESI sugár	ESI sűrűség	ESI szökési seb.	ESI hőmérséklet	ESI belső	ESI külső	ESI	Pálya á.táv.
Merkúr	0,387	0,055	0,382	448	5442	4253	0,55	0,99	0,55	0,77	0,84	0,39	0,57	0,336
Vénusz	0,723	0,815	0,948	327	5276	10393	0,97	0,98	0,96	0,92	0,98	0,78	0,87	0,277
Föld	1	1	1	278	5515	11209	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,524
Mars	1,524	0,107	0,532	226	3919	5027	0,69	0,83	0,62	0,90	0,82	0,62	0,71	3,679
Jupiter	5,203	318	11,19	122	1252	59751	0,16	0,37	0,32	0,61	0,35	0,17	0,24	4,352
Szaturusz	9,555	95,16	9,45	90	622	35568	0,19	0,20	0,48	0,49	0,27	0,11	0,17	9,665
Uránusz	19,22	14,54	4,007	64	1246	21351	0,40	0,37	0,69	0,37	0,45	0,06	0,16	10,89
Neptunusz	30,11	17,2	3,809	51	1717	23818	0,42	0,47	0,64	0,31	0,52	0,03	0,13	1,877
Kepler-90 b	0,074	2,3	1,3	1181	5549	14746	0,87	1,00	0,86	0,38	0,96	0,06	0,25	0,015
Kepler-90 c	0,089	1,8	1,2	1076	5950	13834	0,91	0,96	0,90	0,41	0,95	0,08	0,28	0,031
Kepler-90 i	0,12	2,3	1,3	914	5480	14780	0,86	1,00	0,86	0,47	0,96	0,11	0,33	0,2
Kepler-90 d	0,32	8,6	2,9	568	1984	19366	0,52	0,53	0,73	0,66	0,59	0,28	0,40	0,1
Kepler-90 e	0,42	7,6	2,7	496	2195	18868	0,55	0,57	0,75	0,72	0,62	0,36	0,47	0,06
Kepler-90 f	0,48	8,7	2,9	464	1972	19384	0,51	0,53	0,73	0,75	0,59	0,40	0,49	0,23
Kepler-90 g	0,71	25,4	8,1	381	2614	62710	0,22	0,64	0,30	0,84	0,51	0,41	0,46	0,3
Kepler-90 h	1,01	381,6	11,3	320	1450	65071	0,16	0,42	0,29	0,93	0,37	0,53	0,45	0,087
TRAPPIST-1 b	0,011	0,9	1,1	406	3683	9960	0,96	0,80	0,94	0,81	0,88	0,55	0,69	0,004
TRAPPIST-1 c	0,015	1,4	1,1	342	6445	12768	0,97	0,92	0,93	0,90	0,95	0,72	0,83	0,006
TRAPPIST-1 d	0,021	0,4	0,8	288	4927	8194	0,87	0,94	0,84	0,98	0,93	0,90	0,91	0,007
TRAPPIST-1 e	0,028	0,6	0,9	252	4516	9323	0,96	0,90	0,91	0,95	0,93	0,84	0,89	0,009
TRAPPIST-1 f	0,037	0,7	1,0	219	3230	8961	0,98	0,74	0,89	0,88	0,85	0,67	0,75	0,008
TRAPPIST-1 g	0,045	1,3	1,1	199	5151	12204	0,94	0,97	0,96	0,83	0,96	0,59	0,76	0,018
TRAPPIST-1 h	0,063	0,3	0,8	173	4229	7416	0,86	0,87	0,80	0,77	0,89	0,44	0,63	0,008
HD 10180 c	0,064	13,2	3,7	1889	1442	21197	0,43	0,41	0,69	0,26	0,49	0,02	0,10	0,066
HD 10180 d	0,13	12,0	3,5	843	1550	20781	0,44	0,44	0,70	0,50	0,51	0,12	0,25	0,14
HD 10180 e	0,27	25,6	5,5	579	868	24272	0,31	0,27	0,63	0,65	0,36	0,25	0,30	0,22
HD 10180 f	0,49	23,0	5,1	430	948	23756	0,33	0,29	0,64	0,79	0,38	0,44	0,41	0,94
HD 10180 g	1,43	23,3	5,2	259	937	23816	0,32	0,29	0,64	0,96	0,37	0,77	0,54	1,951
HD 10180 h	3,381	65,7	9,5	164	422	29467	0,19	0,14	0,55	0,74	0,22	0,35	0,28	0,327
HD 219134 b	0,039	4,7	1,6	1015	6344	19270	0,77	0,93	0,74	0,43	0,89	0,09	0,28	0,026
HD 219134 c	0,065	4,4	1,5	783	6932	19018	0,80	0,89	0,74	0,52	0,88	0,15	0,36	0,0813
HD 219134 f	0,146	7,3	2,0	527	5164	21520	0,67	0,97	0,68	0,69	0,88	0,31	0,52	0,0937
HD 219134 d	0,24	16,2	2,4	414	6451	29094	0,59	0,92	0,56	0,80	0,82	0,44	0,60	0,14
HD 219134 g	0,38	10,8	3,3	326	1682	20335	0,47	0,47	0,71	0,92	0,54	0,70	0,61	2,73
HD 219134 h	3,11	108,1	12,8	114	286	32603	0,15	0,10	0,51	0,58	0,17	0,17	0,17	0,150
HD 34445 e	0,27	16,8	4,3	644	1201	22276	0,38	0,36	0,67	0,60	0,44	0,21	0,30	0,21
HD 34445 d	0,48	30,8	6,1	480	759	25257	0,28	0,24	0,61	0,73	0,33	0,36	0,34	0,24
HD 34445 c	0,72	53,4	8,4	393	492	28218	0,21	0,16	0,57	0,83	0,24	0,49	0,34	0,82
HD 34445 f	1,54	37,8	6,9	268	643	26302	0,25	0,21	0,60	0,98	0,29	0,79	0,48	0,53
HD 34445 b	2,07	260,8	13,9	238	535	48547	0,13	0,18	0,38	0,92	0,22	0,57	0,36	4,29
HD 34445 a	6,36	120,8	13,6	132	267	33455	0,14	0,09	0,50	0,64	0,16	0,23	0,19	0,623
Kepler-11 b	0,091	1,9	1,8	933	1784	11505	0,71	0,49	0,99	0,46	0,62	0,11	0,27	0,019
Kepler-11 c	0,11	2,9	2,9	860	677	11268	0,52	0,22	1,00	0,49	0,37	0,14	0,22	0,05
Kepler-11 d	0,16	7,3	3,1	714	1327	17134	0,49	0,39	0,79	0,56	0,49	0,18	0,30	0,03
Kepler-11 e	0,19	9,5	4,2	637	714	16908	0,39	0,23	0,80	0,61	0,35	0,23	0,28	0,06
Kepler-11 f	0,25	2,0	2,5	563	716	10049	0,57	0,23	0,95	0,66	0,39	0,31	0,35	0,22
Kepler-11 g	0,47	25,1	3,3	416	3754	30789	0,46	0,81	0,53	0,80	0,72	0,43	0,56	0,052
Kepler-20 b	0,046	9,7	1,9	1207	8301	25589	0,70	0,80	0,61	0,37	0,80	0,05	0,21	0,018
Kepler-20 e	0,064	3,1	0,9	1027	26247	21161	0,93	0,35	0,69	0,43	0,56	0,08	0,21	0,031
Kepler-20 c	0,095	12,8	3,0	851	2481	22922	0,49	0,62	0,66	0,49	0,63	0,12	0,28	0,045
Kepler-20 f	0,14	14,3	1,0	695	71947	41752	0,98	0,14	0,62	0,57	0,35	0,16	0,23	0,07
Kepler-20 g	0,21	20,0	4,7	578	1055	23085	0,35	0,32	0,65	0,65	0,40	0,26	0,32	0,14
Kepler-20 d	0,35	10,1	2,7	438	2682	21467	0,53	0,65	0,69	0,78	0,67	0,43	0,54	0,048
Kepler-80 f	0,018	1,9	1,2	1352	5967	14115	0,90	0,96	0,89	0,34	0,95	0,05	0,21	0,020
Kepler-80 d	0,037	6,7	1,5	927	10493	23570	0,79	0,69	0,64	0,46	0,77	0,10	0,28	0,012
Kepler-80 e	0,049	4,1	1,6	807	5535	18000	0,77	1,00	0,77	0,51	0,93	0,14	0,36	0,016
Kepler-80 b	0,065	6,9	2,7	702	2013	18068	0,55	0,53	0,77	0,57	0,60	0,19	0,34	0,014
Kepler-80 c	0,079	6,7	2,7	635	1817	17597	0,54	0,50	0,78	0,61	0,57	0,23	0,36	0,026
Kepler-80 g	0,105	1,5	1,1	551	5738	12944	0,94	0,98	0,93	0,67	0,97	0,32	0,56	0,017
55 Cnc e	0,015	8,1	1,9	1958	6393	23050	0,69	0,93	0,65	0,25	0,86	0,02	0,12	0,105
55 Cnc b	0,12	264,3	13,9	717	543	48872	0,13	0,18	0,37	0,56	0,22	0,14	0,18	0,120
55 Cnc c	0,24	54,4	8,5	495	485	28318	0,21	0,16	0,57	0,72	0,24	0,33	0,28	0,550
55 Cnc f	0,79	44,8	7,6	285	566	27245	0,23	0,19	0,58	0,99	0,27	0,80	0,46	4,713
55 Cnc d	5,503	1233,2	13,0	104	3094	109155	0,14	0,72	0,19	0,54	0,48	0,10	0,22	0,425
GJ 667 C b	0,051	5,7	2,2	427	2847	17958	0,62	0,68	0,77	0,79	0,71	0,47	0,58	0,074
GJ 667 C c	0,125	3,8	1,8	270	3795	16458	0,72	0,82	0,81	0,99	0,82	0,89	0,85	0,031
GJ 667 C f	0,156	2,5	1,5	242	4602	14847	0,82	0,91	0,86	0,93	0,90	0,78	0,83	0,057
GJ 667 C e	0,213	2,5	1,5	207	4602	14847	0,82	0,91	0,86	0,85	0,90	0,61	0,74	0,336
GJ 667 C g	0,549	4,5	2,0	129	3116	16765	0,67	0,72	0,80	0,63	0,75	0,26	0,44	0,081
HD 40307 b	0,047	4,0	1,8	905	3606	16585	0,71	0,79	0,81	0,47	0,80	0,11	0,30	0,033
HD 40307 c	0,08	6,6	2,5	684	2465	18398	0,58	0,62	0,76	0,58	0,66	0,20	0,36	0,050
HD 40307 d	0,13	9,5	3,0	532	1850	19793	0,49	0,50	0,72	0,69	0,57	0,31	0,42	0,117
HD 40307 f	0,247	5,2	2,1	388	2976	17539	0,64	0,70	0,78	0,83	0,73	0,55	0,63	0,353
HD 40307 g	0,6	7,1	2,6	257	2312	18630	0,56	0,59	0,75	0,96	0,64	0,81	0,72	0,091

1. táblázat: A vizsgált bolygók adatai (első rész)

K2-138 b	0,034	3,1	1,5	1399	5071	16144	0,80	0,96	0,82	0,33	0,92	0,04	0,20	0,011	
K2-138 c	0,045	6,3	2,3	1180	2861	18553	0,61	0,68	0,75	0,38	0,71	0,06	0,21	0,014	
K2-138 d	0,059	7,9	2,4	1041	3208	20411	0,59	0,74	0,71	0,42	0,73	0,08	0,24	0,019	
K2-138 e	0,078	13,0	3,4	896	1849	21969	0,46	0,50	0,68	0,47	0,55	0,11	0,24	0,026	
K2-138 f	0,104	1,6	2,9	786	358	8295	0,51	0,12	0,85	0,52	0,27	0,15	0,20	0,127	
K2-138 g	0,231	4,3	3,0	518	865	13379	0,50	0,27	0,91	0,70	0,41	0,36	0,38	0,025	K2-138
Kepler-102 b	0,055	4,3	0,5	861	228417	33903	0,64	0,05	0,50	0,49	0,17	0,11	0,13	0,012	
Kepler-102 c	0,067	3,0	0,6	782	84799	25492	0,73	0,12	0,61	0,52	0,30	0,14	0,20	0,019	
Kepler-102 d	0,086	3,8	1,2	689	12755	20114	0,92	0,60	0,72	0,57	0,74	0,19	0,38	0,031	
Kepler-102 e	0,117	8,9	2,2	594	4501	22480	0,62	0,90	0,67	0,64	0,82	0,25	0,45	0,048	
Kepler-102 f	0,165	5,2	0,9	497	42083	27246	0,94	0,23	0,58	0,72	0,45	0,33	0,38	0,024	Kepler-102
Kepler-122 b	0,064	6,1	2,3	1274	2607	18056	0,60	0,64	0,77	0,36	0,68	0,05	0,19	0,044	
Kepler-122 c	0,108	29,0	5,9	980	789	24905	0,29	0,25	0,62	0,44	0,34	0,09	0,17	0,047	
Kepler-122 d	0,155	5,5	2,2	818	2838	17690	0,63	0,68	0,78	0,51	0,71	0,14	0,31	0,072	
Kepler-122 e	0,227	27,7	2,6	676	8692	36585	0,56	0,78	0,47	0,58	0,74	0,17	0,35	0,065	
Kepler-122 f	0,292	36,0	1,8	596	37046	50837	0,73	0,26	0,36	0,64	0,44	0,20	0,30	0,056	Kepler-122
Kepler-150 b	0,044	2,1	1,3	1239	5852	14496	0,89	0,97	0,87	0,37	0,95	0,06	0,23	0,029	
Kepler-150 c	0,073	13,2	3,7	962	1451	21205	0,43	0,42	0,69	0,45	0,49	0,09	0,21	0,031	
Kepler-150 d	0,104	8,2	2,8	806	2079	19211	0,53	0,55	0,74	0,51	0,60	0,14	0,29	0,085	
Kepler-150 e	0,189	9,9	3,1	598	1806	19988	0,49	0,49	0,72	0,63	0,56	0,25	0,37	1,051	
Kepler-150 f	1,24	12,9	3,6	233	1471	21091	0,43	0,42	0,69	0,91	0,50	0,68	0,58	0,095	Kepler-150
Kepler-154 e	0,047	2,9	1,5	1269	4654	15466	0,80	0,92	0,84	0,36	0,89	0,05	0,22	0,040	
Kepler-154 f	0,087	2,9	1,5	933	4654	15466	0,80	0,92	0,84	0,46	0,89	0,11	0,31	0,054	
Kepler-154 d	0,141	14,1	3,8	733	1368	21464	0,41	0,40	0,69	0,55	0,47	0,17	0,28	0,057	
Kepler-154 b	0,198	5,7	2,3	617	2722	17830	0,61	0,66	0,77	0,62	0,70	0,24	0,41	0,105	
Kepler-154 c	0,303	9,0	2,9	498	1939	19594	0,51	0,52	0,73	0,72	0,58	0,35	0,45	0,060	Kepler-154
Kepler-169 b	0,04	1,5	1,1	1050	5738	12944	0,94	0,98	0,93	0,42	0,97	0,09	0,29	0,022	
Kepler-169 c	0,062	1,9	1,2	844	5967	14115	0,90	0,96	0,89	0,50	0,95	0,14	0,36	0,013	
Kepler-169 d	0,075	2,1	1,3	767	5852	14496	0,89	0,97	0,87	0,53	0,95	0,16	0,39	0,030	
Kepler-169 e	0,105	5,5	2,2	648	2849	17701	0,63	0,68	0,78	0,60	0,71	0,22	0,40	0,254	
Kepler-169 f	0,359	7,2	2,6	351	2310	18704	0,56	0,59	0,75	0,88	0,64	0,64	0,64	0,038	Kepler-169
Kepler-186 b	0,034	1,2	1,1	728	4575	11672	0,93	0,91	0,98	0,55	0,93	0,19	0,42	0,011	
Kepler-186 c	0,045	2,1	1,3	635	4758	14004	0,85	0,93	0,89	0,61	0,92	0,24	0,47	0,033	
Kepler-186 d	0,078	2,5	1,6	483	3703	14311	0,78	0,80	0,88	0,73	0,83	0,40	0,57	0,032	
Kepler-186 e	0,11	2,2	1,3	407	4995	14230	0,86	0,95	0,88	0,81	0,93	0,53	0,71	0,322	
Kepler-186 f	0,432	1,7	1,1	209	6900	13913	0,95	0,89	0,89	0,86	0,92	0,63	0,76	0,044	Kepler-186
Kepler-238 b	0,034	3,6	1,7	1798	3902	16276	0,73	0,83	0,82	0,27	0,83	0,02	0,14	0,035	
Kepler-238 c	0,069	6,3	2,4	1262	2552	18207	0,59	0,63	0,76	0,36	0,67	0,05	0,19	0,046	
Kepler-238 d	0,115	9,6	3,1	978	1835	19857	0,49	0,50	0,72	0,44	0,56	0,09	0,23	0,067	
Kepler-238 e	0,182	169,8	5,6	776	5319	61694	0,30	0,98	0,31	0,53	0,70	0,11	0,28	0,119	
Kepler-238 f	0,301	13,5	2,0	604	9372	29154	0,67	0,74	0,56	0,63	0,76	0,22	0,41	0,060	Kepler-238
Kepler-292 b	0,035	2,3	1,3	1244	5480	14780	0,86	1,00	0,86	0,37	0,96	0,06	0,23	0,010	
Kepler-292 c	0,045	2,8	1,5	1097	4807	15366	0,81	0,93	0,84	0,40	0,91	0,08	0,26	0,023	
Kepler-292 d	0,068	5,6	2,2	893	2782	17759	0,62	0,67	0,77	0,47	0,70	0,11	0,28	0,029	
Kepler-292 e	0,097	7,6	2,7	747	2210	18930	0,55	0,57	0,74	0,54	0,62	0,16	0,32	0,044	
Kepler-292 f	0,141	6,1	2,4	620	2587	18072	0,60	0,64	0,77	0,62	0,68	0,24	0,40	0,023	Kepler-292
Kepler-296 c	0,052	4,7	2,2	572	2578	16493	0,63	0,64	0,81	0,65	0,69	0,28	0,44	0,027	
Kepler-296 b	0,079	3,2	0,9	464	21269	20727	0,97	0,41	0,70	0,75	0,62	0,39	0,49	0,039	
Kepler-296 d	0,118	5,0	2,3	380	2349	16648	0,61	0,60	0,80	0,84	0,66	0,58	0,62	0,051	
Kepler-296 e	0,169	3,0	1,7	335	3052	14582	0,73	0,71	0,87	0,91	0,76	0,73	0,74	0,086	
Kepler-296 f	0,255	3,9	1,8	259	3718	16507	0,72	0,81	0,81	0,96	0,81	0,84	0,82	0,046	Kepler-296
Kepler-32 f	0,013	0,5	0,8	1201	4771	8549	0,90	0,93	0,87	0,38	0,93	0,06	0,24	0,020	
Kepler-32 e	0,033	2,9	1,5	754	4674	15477	0,80	0,92	0,84	0,54	0,90	0,17	0,39	0,017	
Kepler-32 b	0,05	9,4	2,2	612	4869	23169	0,63	0,94	0,65	0,62	0,85	0,23	0,44	0,040	
Kepler-32 c	0,09	7,7	2,0	456	5308	21993	0,67	0,98	0,68	0,76	0,88	0,40	0,60	0,040	
Kepler-32 d	0,13	7,8	2,7	380	2169	18986	0,54	0,56	0,74	0,84	0,62	0,56	0,59	0,027	Kepler-32
Kepler-33 b	0,067	3,7	1,8	1474	3517	16055	0,72	0,78	0,82	0,32	0,80	0,04	0,17	0,052	
Kepler-33 c	0,119	0,4	3,3	1113	63	3882	0,47	0,02	0,51	0,40	0,11	0,06	0,08	0,047	
Kepler-33 d	0,166	3,9	5,4	941	138	9555	0,31	0,05	0,92	0,46	0,14	0,11	0,12	0,047	
Kepler-33 e	0,213	5,6	4,0	830	467	13168	0,40	0,16	0,92	0,50	0,28	0,14	0,20	0,041	
Kepler-33 f	0,254	9,7	4,5	762	590	16443	0,36	0,19	0,81	0,53	0,31	0,16	0,22	0,047	Kepler-33
Kepler-444 b	0,042	0,0	0,4	1041	3725	3511	0,55	0,81	0,48	0,42	0,75	0,07	0,23	0,006	
Kepler-444 c	0,048	0,1	0,5	991	3716	4507	0,66	0,81	0,57	0,44	0,79	0,08	0,26	0,012	
Kepler-444 d	0,06	0,2	0,5	871	7399	6884	0,69	0,85	0,76	0,48	0,83	0,12	0,32	0,009	
Kepler-444 e	0,069	0,1	0,5	802	3630	4852	0,70	0,79	0,60	0,51	0,80	0,13	0,32	0,012	
Kepler-444 f	0,081	0,3	0,7	765	5841	7836	0,81	0,97	0,82	0,53	0,93	0,16	0,39	0,009	Kepler-444
Kepler-55 d	0,029	3,2	1,6	1004	4322	15776	0,77	0,88	0,83	0,43	0,87	0,09	0,28	0,019	
Kepler-55 e	0,048	3,0	1,6	780	4473	15645	0,78	0,90	0,83	0,53	0,88	0,16	0,37	0,033	
Kepler-55 f	0,081	3,2	1,6	601	4322	15776	0,77	0,88	0,83	0,63	0,87	0,26	0,48	0,073	
Kepler-55 b	0,154	473,8	2,4	435	181667	156450	0,58	0,06	0,13	0,78	0,19	0,25	0,22	0,048	
Kepler-55 c	0,202	353,0	2,2	380	180355	141654	0,62	0,06	0,15	0,84	0,19	0,32	0,25	0,038	Kepler-55
Kepler-62 b	0,056	8,9	1,3	802	21765	29204	0,87	0,40	0,55	0,51	0,59	0,13	0,27	0,037	
Kepler-62 c	0,093	4,0	0,5	619	141844	30586	0,70	0,07	0,54	0,62	0,23	0,21	0,22	0,027	
Kepler-62 d	0,12	14,0	2,0	544	10398	30020	0,68	0,69	0,54	0,68	0,74	0,27	0,45	0,307	
Kepler-62 e	0,427	35,9	1,6	289	47115	52883	0,77	0,21	0,35	0,98	0,40	0,66	0,51	0,291	
Kepler-62 f	0,718	35,0	1,4	223	68461	55779	0,83	0,15	0,33	0,89	0,34	0,49	0,41	0,097	Kepler-62

2. táblázat: A vizsgált bolygók adatai (második rész)

Kepler-82 d	0,034	3,8	1,8	1345	3752	16374	0,72	0,81	0,81	0,34	0,81	0,05	0,20	0,029
Kepler-82 e	0,063	6,7	2,5	988	2449	18419	0,58	0,61	0,76	0,44	0,66	0,09	0,25	0,105
Kepler-82 b	0,168	12,2	4,1	605	962	19262	0,39	0,30	0,74	0,63	0,40	0,25	0,31	0,095
Kepler-82 c	0,263	13,9	5,6	484	428	17598	0,30	0,14	0,78	0,73	0,25	0,38	0,31	0,076
Kepler-82 f	0,339	20,9	4,8	426	1015	23287	0,34	0,31	0,65	0,79	0,39	0,45	0,42	0,068 Kepler-82
Kepler-84 d	0,052	40,0	1,4	1379	84155	60370	0,84	0,12	0,31	0,34	0,31	0,03	0,10	0,031
Kepler-84 b	0,083	20,2	2,2	1091	10344	33899	0,62	0,70	0,50	0,41	0,72	0,06	0,21	0,025
Kepler-84 c	0,108	2,5	2,4	956	991	11396	0,59	0,30	0,99	0,45	0,46	0,11	0,22	0,073
Kepler-84 e	0,181	7,3	2,6	739	2279	18740	0,56	0,58	0,75	0,55	0,63	0,17	0,33	0,069
Kepler-84 f	0,25	5,5	2,2	629	2849	17701	0,63	0,68	0,78	0,61	0,71	0,23	0,41	0,044 Kepler-84
GJ 3293 e	0,082	3,3	1,6	381	4177	15900	0,76	0,86	0,83	0,84	0,85	0,58	0,71	0,061
GJ 3293 b	0,143	23,5	5,2	284	929	23871	0,32	0,29	0,64	0,99	0,37	0,83	0,56	0,051
GJ 3293 d	0,194	7,6	2,7	245	2210	18921	0,55	0,57	0,74	0,94	0,62	0,75	0,68	0,168
GJ 3293 c	0,362	21,1	4,9	179	1010	23337	0,34	0,31	0,65	0,78	0,39	0,43	0,41	0,081 GJ 3293
GJ 676 A d	0,041	4,4	1,9	755	3375	16924	0,68	0,76	0,80	0,54	0,77	0,16	0,36	0,146
GJ 676 A e	0,187	8,1	2,8	346	2106	19174	0,53	0,55	0,74	0,89	0,61	0,65	0,63	1,633
GJ 676 A b	1,82	2130,6	12,7	116	5791	145407	0,15	0,98	0,14	0,59	0,57	0,12	0,26	4,78
GJ 676 A c	6,6	2162,4	12,7	58	5877	146488	0,15	0,97	0,14	0,35	0,57	0,03	0,12	1,045 GJ 676 A
HD 141399 b	0,415	143,4	14,3	467	268	35437	0,13	0,09	0,48	0,75	0,16	0,34	0,23	0,274
HD 141399 c	0,689	422,9	13,7	363	912	62332	0,14	0,28	0,30	0,87	0,29	0,44	0,36	1,401
HD 141399 d	2,09	375,2	13,7	209	809	58712	0,14	0,26	0,32	0,86	0,27	0,44	0,35	2,91
HD 141399 e	5	209,9	14,0	138	421	43380	0,13	0,14	0,41	0,66	0,20	0,23	0,21	1,038 HD 141399
HD 20781 b	0,053	1,9	1,2	1017	6008	14156	0,90	0,96	0,88	0,43	0,95	0,09	0,29	0,047
HD 20781 c	0,1	5,3	2,2	738	2877	17566	0,63	0,69	0,78	0,55	0,72	0,17	0,35	0,065
HD 20781 d	0,165	10,6	3,3	577	1705	20252	0,47	0,47	0,71	0,65	0,54	0,27	0,38	0,172
HD 20781 e	0,337	14,0	3,8	402	1374	21444	0,41	0,40	0,69	0,82	0,48	0,50	0,49	0,081 HD 20781
HD 20794 b	0,121	2,7	1,5	777	4884	15295	0,82	0,94	0,85	0,53	0,91	0,16	0,38	0,082
HD 20794 c	0,203	2,4	1,4	598	5380	14945	0,85	0,99	0,86	0,63	0,95	0,27	0,50	0,146
HD 20794 d	0,349	4,8	2,0	456	3118	17193	0,66	0,72	0,79	0,76	0,75	0,42	0,56	0,16
HD 20794 e	0,509	4,8	2,0	449	3145	17181	0,66	0,73	0,79	0,76	0,75	0,44	0,57	0,124 HD 20794
HD 215152 b	0,058	1,8	1,2	847	5953	13858	0,91	0,96	0,89	0,49	0,95	0,13	0,36	0,009
HD 215152 c	0,067	1,7	1,2	783	5923	13590	0,92	0,96	0,90	0,52	0,96	0,16	0,39	0,021
HD 215152 d	0,088	2,8	1,5	685	4765	15420	0,81	0,93	0,84	0,58	0,90	0,20	0,43	0,066
HD 215152 e	0,154	2,9	1,5	518	4609	15471	0,80	0,91	0,84	0,70	0,89	0,35	0,56	0,023 HD 215152
K2-133 b	0,031	2,4	1,3	665	5409	14875	0,85	0,99	0,86	0,59	0,95	0,22	0,45	0,012
K2-133 c	0,043	3,2	1,6	571	4285	15836	0,77	0,87	0,83	0,65	0,86	0,29	0,50	0,032
K2-133 d	0,075	4,7	2,0	435	3205	17115	0,67	0,74	0,79	0,78	0,76	0,46	0,59	0,06
K2-133 e	0,135	3,6	1,7	324	3877	16258	0,73	0,83	0,82	0,92	0,83	0,75	0,79	0,028 K2-133
K2-187 b	0,016	2,2	1,3	1980	5623	14713	0,87	0,99	0,86	0,25	0,96	0,02	0,13	0,023
K2-187 c	0,039	3,9	1,8	1281	3679	16477	0,71	0,80	0,81	0,36	0,81	0,05	0,21	0,033
K2-187 d	0,072	10,2	3,7	945	1100	18580	0,42	0,33	0,75	0,45	0,43	0,10	0,21	0,038
K2-187 e	0,11	6,3	2,4	763	2574	18193	0,59	0,64	0,76	0,53	0,68	0,16	0,33	0,031 K2-187
K2-266 b	0,013	11,3	3,3	1519	1736	20720	0,47	0,48	0,70	0,31	0,54	0,03	0,13	0,055
K2-266 c	0,068	0,3	0,7	666	4564	7189	0,83	0,91	0,78	0,59	0,90	0,21	0,43	0,035
K2-266 d	0,103	8,9	2,9	540	1961	19552	0,51	0,52	0,73	0,68	0,58	0,30	0,42	0,022
K2-266 e	0,125	14,3	2,7	492	3855	25629	0,54	0,82	0,61	0,72	0,75	0,34	0,51	0,035 K2-266
K2-285 b	0,038	9,7	2,6	1091	3076	21673	0,56	0,72	0,68	0,41	0,71	0,07	0,22	0,044
K2-285 c	0,082	15,7	3,5	743	1964	23620	0,44	0,53	0,64	0,54	0,56	0,16	0,30	0,036
K2-285 d	0,118	6,5	2,5	621	2359	18157	0,58	0,60	0,76	0,62	0,65	0,24	0,39	0,062
K2-285 e	0,18	10,7	2,0	502	7959	26256	0,68	0,82	0,60	0,71	0,80	0,32	0,51	0,046 K2-285
K2-72 b	0,04	1,3	1,1	468	5604	12202	0,96	0,99	0,96	0,75	0,98	0,43	0,65	0,01
K2-72 d	0,05	1,0	1,0	418	5406	11209	1,00	0,99	1,00	0,80	0,99	0,53	0,73	0,028
K2-72 c	0,078	1,7	1,2	335	5830	13368	0,93	0,97	0,91	0,91	0,96	0,74	0,84	0,028
K2-72 e	0,106	2,2	1,3	287	5678	14671	0,87	0,99	0,87	0,98	0,95	0,91	0,93	0,020 K2-72
KOI-94 b	0,051	10,5	1,7	1662	11581	27775	0,74	0,65	0,58	0,29	0,73	0,03	0,14	0,05
KOI-94 c	0,101	15,6	4,3	1246	1071	21312	0,38	0,33	0,69	0,36	0,41	0,05	0,15	0,067
KOI-94 d	0,168	106,2	11,3	895	409	34409	0,16	0,14	0,49	0,47	0,21	0,10	0,14	0,136
KOI-94 e	0,304	35,0	6,6	665	685	25896	0,26	0,22	0,60	0,59	0,31	0,19	0,24	0,077 KOI-94
Kepler-106 b	0,066	5,3	0,8	1123	53014	28496	0,90	0,19	0,56	0,40	0,40	0,06	0,16	0,045
Kepler-106 c	0,111	10,4	2,5	863	3689	22910	0,57	0,80	0,66	0,49	0,76	0,12	0,30	0,052
Kepler-106 d	0,163	8,1	1,0	714	52104	32729	0,97	0,19	0,51	0,56	0,41	0,16	0,25	0,08
Kepler-106 e	0,243	11,2	2,6	584	3693	23436	0,56	0,80	0,65	0,65	0,75	0,25	0,44	0,057 Kepler-106
Kepler-107 b	0,045	3,5	1,6	1594	4902	16703	0,78	0,94	0,80	0,30	0,90	0,03	0,17	0,016
Kepler-107 c	0,061	9,4	1,7	1380	11113	26576	0,75	0,66	0,59	0,34	0,74	0,04	0,17	0,023
Kepler-107 d	0,084	3,8	1,1	1174	17912	21285	0,97	0,47	0,69	0,38	0,66	0,06	0,20	0,042
Kepler-107 e	0,126	8,6	2,9	956	1894	19217	0,51	0,51	0,74	0,45	0,58	0,10	0,24	0,025 Kepler-107
Kepler-132 b	0,067	1,9	1,2	1215	5967	14115	0,90	0,96	0,89	0,37	0,95	0,06	0,24	0,001
Kepler-132 c	0,068	2,2	1,3	1206	5761	14639	0,88	0,98	0,87	0,37	0,95	0,06	0,24	0,068
Kepler-132 d	0,136	3,0	1,5	853	4499	15661	0,79	0,90	0,83	0,49	0,88	0,13	0,34	0,319
Kepler-132 e	0,455	1,8	1,2	466	5952	13706	0,92	0,96	0,90	0,75	0,96	0,43	0,64	0,028 Kepler-132
Kepler-1388 c	0,053	5,7	2,3	674	2723	17832	0,61	0,66	0,77	0,58	0,70	0,20	0,38	0,036
Kepler-1388 b	0,089	7,2	2,6	516	2295	18718	0,56	0,59	0,75	0,70	0,64	0,33	0,46	0,039
Kepler-1388 d	0,128	8,6	2,9	432	2020	19387	0,52	0,54	0,73	0,78	0,59	0,45	0,52	0,06
Kepler-1388 e	0,188	6,6	2,5	356	2468	18406	0,58	0,62	0,76	0,88	0,66	0,63	0,65	0,044 Kepler-1388

3. táblázat: A vizsgált bolygók adatai (harmadik rész)







Csillag	L.Z. külső h.	F.Z. szél.	F.Z. Bolygók	F.Z. ESI átlag	L.Z. szél.	L.Z. Bolygók	ESI	H.Z. Bolygók	H.Z. ESI átlag	Bolygók	F.Z. H. Index	L.Z. H. Index	H.Z. H. Index	NHI
Nap	1,656	0,836	2	0,72	0,82	2	1	4	0,18	8	1,00	1,00	1,00	1,00
HD 34445	2,346	1,182	3	0,33	1,164	2	0,48	1	0,19	6	0,75	0,73	0,62	0,71
HD 10180	1,901	0,957	4	0,26	0,944	1	0,54	1	0,28	6	0,69	0,69	0,56	0,66
HD 160691	2,269	1,145	2	0,26	1,124	1	0,44	1	0,27	4	0,77	0,63	0,57	0,65
55 Cnc	1,321	0,672	3	0,19	0,649	1	0,46	1	0,22	5	0,67	0,65	0,60	0,64
GJ 3293	0,283	0,143	2	0,63	0,14	1	0,68	1	0,41	4	0,65	0,51	0,49	0,54
Kepler-150	1,464	0,741	4	0,28	0,723	1	0,58	0	0	5	0,71	0,71	0,00	0,53
GJ 667 c	0,23	0,116	1	0,58	0,114	3	0,85	1	0,44	5	0,53	0,55	0,48	0,53
Kepler-62	0,822	0,419	3	0,31	0,403	2	0,51	0	0	5	0,69	0,70	0,00	0,52
HD 40307	0,844	0,43	4	0,43	0,414	1	0,72	0	0	5	0,70	0,69	0,00	0,52
WASP-47	1,769	0,896	3	0,14	0,873	1	0,42	0	0	4	0,63	0,65	0,00	0,48
Kepler-186	0,435	0,221	4	0,54	0,214	1	0,76	0	0	5	0,62	0,59	0,00	0,45
Kepler-296	0,386	0,196	4	0,5	0,19	1	0,82	0	0	5	0,59	0,59	0,00	0,44
GJ 676 A	0,553	0,281	2	0,49	0,272	0	0	2	0,19	4	0,74	0,00	0,81	0,39
HD 141399	2,176	1,101	2	0,29	1,075	0	0	2	0,28	4	0,79	0,00	0,72	0,38
TRAPPIST-1	0,047	0,023	3	0,81	0,024	3	0,89	1	0,63	7	0,34	0,34	0,42	0,36
Kepler-167	0,922	0,47	3	0,42	0,452	0	0	1	0,22	4	0,75	0,00	0,60	0,34
Kepler-48	1,27	0,71	3	0,37	0,56	0	0	1	0,33	4	0,79	0,00	0,53	0,33
HD 219134	0,925	0,472	5	0,48	0,453	0	0	1	0,17	6	0,69	0,00	0,62	0,33
Tau Ceti	1,237	0,628	3	0,62	0,609	0	0	1	0,68	4	0,86	0,00	0,41	0,32
HD 20794	1,371	0,695	4	0,5	0,676	0	0	0	0	4	0,79	0,00	0,00	0,20
Kepler-176	1,28	0,72	4	0,43	0,56	0	0,72	0	0	4	0,77	0,00	0,00	0,19
Kepler-215	1,682	0,85	4	0,38	0,832	0	0	0	0	4	0,77	0,00	0,00	0,19
Kepler-251	1,444	0,73	4	0,39	0,714	0	0	0	0	4	0,76	0,00	0,00	0,19
Kepler-341	1,67	0,843	4	0,34	0,827	0	0	0	0	4	0,75	0,00	0,00	0,19
Kepler-282	1,426	0,722	4	0,37	0,704	0	0	0	0	4	0,75	0,00	0,00	0,19
Kepler-265	1,853	0,935	4	0,35	0,918	0	0	0	0	4	0,74	0,00	0,00	0,19
Kepler-299	1,635	0,827	4	0,31	0,808	0	0	0	0	4	0,74	0,00	0,00	0,18
Kepler-85	1,344	0,681	4	0,36	0,663	0	0	0	0	4	0,74	0,00	0,00	0,18
Kepler-132	2,067	1,04	4	0,36	1,027	0	0	0	0	4	0,73	0,00	0,00	0,18
HD 20781	1,192	0,606	4	0,38	0,586	0	0	0	0	4	0,73	0,00	0,00	0,18
Kepler-106	1,758	0,886	4	0,29	0,872	0	0	0	0	4	0,72	0,00	0,00	0,18
Kepler-220	0,773	0,394	4	0,55	0,379	0	0	0	0	4	0,72	0,00	0,00	0,18
HD 215152	0,941	0,479	4	0,43	0,462	0	0	0	0	4	0,71	0,00	0,00	0,18
Kepler-197	1,965	0,989	4	0,3	0,976	0	0	0	0	4	0,71	0,00	0,00	0,18
Kepler-172	1,591	0,806	4	0,27	0,785	0	0	0	0	4	0,71	0,00	0,00	0,18
Kepler-154	1,618	0,817	5	0,33	0,801	0	0	0	0	5	0,71	0,00	0,00	0,18
Kepler-286	1,353	0,685	4	0,3	0,668	0	0	0	0	4	0,71	0,00	0,00	0,18
Kepler-306	0,933	0,475	4	0,41	0,458	0	0	0	0	4	0,71	0,00	0,00	0,18
K2-285	1,028	0,523	4	0,36	0,505	0	0	0	0	4	0,70	0,00	0,00	0,17
Kepler-1542	1,546	0,782	4	0,24	0,764	0	0	0	0	4	0,69	0,00	0,00	0,17
Kepler-411	0,958	0,488	4	0,35	0,47	0	0	0	0	4	0,69	0,00	0,00	0,17
Kepler-169	1,004	0,511	5	0,42	0,493	0	0	0	0	5	0,68	0,00	0,00	0,17
Kepler-221	1,167	0,593	4	0,29	0,574	0	0	0	0	4	0,68	0,00	0,00	0,17
Kepler-11	1,709	0,864	6	0,33	0,845	0	0	0	0	6	0,68	0,00	0,00	0,17
Kepler-224	0,887	0,452	4	0,35	0,435	0	0	0	0	4	0,67	0,00	0,00	0,17
V 1298 Tau	1,695	0,863	4	0,21	0,832	0	0	0	0	4	0,67	0,00	0,00	0,17
Kepler-208	2,357	1,184	4	0,26	1,173	0	0	0	0	4	0,66	0,00	0,00	0,17
K2-187	1,404	0,711	4	0,22	0,693	0	0	0	0	4	0,66	0,00	0,00	0,16
Kepler-245	1,113	0,566	4	0,26	0,547	0	0	0	0	4	0,66	0,00	0,00	0,16
Kepler-1388	0,575	0,293	4	0,5	0,282	0	0	0	0	4	0,66	0,00	0,00	0,16
Kepler-292	1,194	0,606	5	0,3	0,588	0	0	0	0	5	0,66	0,00	0,00	0,16
Kepler-402	2,266	1,138	4	0,24	1,128	0	0	0	0	4	0,66	0,00	0,00	0,16
Kepler-20	1,476	0,748	6	0,3	0,728	0	0	0	0	6	0,65	0,00	0,00	0,16
K2-266	0,716	0,365	4	0,37	0,351	0	0	0	0	4	0,65	0,00	0,00	0,16
Kepler-256	1,801	0,911	4	0,19	0,89	0	0	0	0	4	0,64	0,00	0,00	0,16
Kepler-79	2,383	1,195	4	0,23	1,188	0	0	0	0	4	0,64	0,00	0,00	0,16
Kepler-235	0,493	0,251	4	0,54	0,242	0	0	0	0	4	0,64	0,00	0,00	0,16
Kepler-122	2,166	1,089	5	0,26	1,077	0	0	0	0	5	0,64	0,00	0,00	0,16
Kepler-84	2,065	1,038	5	0,25	1,027	0	0	0	0	5	0,64	0,00	0,00	0,16
Kepler-304	0,826	0,421	4	0,29	0,405	0	0	0	0	4	0,64	0,00	0,00	0,16
Kepler-102	0,971	0,495	5	0,31	0,476	0	0	0	0	5	0,63	0,00	0,00	0,16
Kepler-444	1,005	0,511	5	0,3	0,494	0	0	0	0	5	0,63	0,00	0,00	0,16
Kepler-758	2,633	1,32	4	0,23	1,313	0	0	0	0	4	0,63	0,00	0,00	0,16
Kepler-26	0,446	0,227	4	0,55	0,219	0	0	0	0	4	0,63	0,00	0,00	0,16
Kepler-338	2,983	1,502	4	0,25	1,481	0	0	0	0	4	0,63	0,00	0,00	0,16
Kepler-90	2,146	1,078	8	0,39	1,068	0	0	0	0	8	0,63	0,00	0,00	0,16
Kepler-238	2,35	1,186	5	0,25	1,164	0	0	0	0	5	0,62	0,00	0,00	0,16
Kepler-342	2,691	1,35	4	0,21	1,341	0	0	0	0	4	0,61	0,00	0,00	0,15
Kepler-65	2,604	1,305	4	0,2	1,299	0	0	0	0	4	0,61	0,00	0,00	0,15
Kepler-107	2,443	1,232	4	0,19	1,211	0	0	0	0	4	0,61	0,00	0,00	0,15
K2-138	1,273	0,646	6	0,25	0,627	0	0	0	0	6	0,61	0,00	0,00	0,15
Kepler-24	1,926	0,97	4	0,16	0,956	0	0	0	0	4	0,61	0,00	0,00	0,15
DMPP-1	2,138	1,163	4	0,18	0,975	0	0	0	0	4	0,61	0,00	0,00	0,15
Kepler-49	0,562	0,286	4	0,34	0,276	0	0	0	0	4	0,60	0,00	0,00	0,15
K2-133	0,351	0,178	4	0,58	0,173	0	0	0	0	4	0,59	0,00	0,00	0,15
Kepler-55	0,686	0,35	5	0,32	0,336	0	0	0	0	5	0,59	0,00	0,00	0,15
Kepler-80	0,761	0,388	6	0,35	0,373	0	0	0	0	6	0,59	0,00	0,00	0,15
Kepler-32	0,459	0,233	5	0,45	0,226	0	0	0	0	5	0,58	0,00	0,00	0,14
KOI-94	2,787	1,398	4	0,17	1,389	0	0	0	0	4	0,58	0,00	0,00	0,14
K2-72	0,219	0,11	4	0,79	0,109	0	0	0	0	4	0,53	0,00	0,00	0,13
Kepler-33	3,113	1,569	5	0,16	1,544	0	0	0	0	5	0,52	0,00	0,00	0,13

6. táblázat: A vizsgált bolygórendszerek adatai és Naprendszer-hasonlósági indexei, első verzió





## **6. Összefoglalás**

Dolgozatomban az exobolygó rendszerek Naprendszerhez való hasonlóságát vizsgáltam, a Föld-hasonlósági index mintájára. Ezt számszerűsítve, két különböző módon számítható Naprendszer-hasonlósági indexet is bevezettem.

Általánosságban elmondható, hogy a vizsgált bolygórendszerek nagy többsége nem hasonlít a Naprendszerre. Többségük a csillaghoz közel keringő bolygókból áll, egymáshoz viszonylag közel elhelyezkedve.

Az exobolygók detektálására használt módszerek jelenleg nem elég érzékenyek ahhoz, hogy a csillagok körül keringő összes bolygót észrevegyük. A vizsgált bolygórendszerek közül feltehetően soknak lehet még felfedezetlen bolygója, ami azt jelentheti, hogy egyes bolygórendszerek valójában jobban hasonlítanak a Naprendszerre, mint amire a rendelkezésre álló adatok utalnak. A másik nagy kérdés a holdak jelenlétének gyakorisága. Személyes véleményem szerint a csillaghoz közel keringő bolygókból, egymáshoz szorosan közel lévő bolygópályákkal rendelkező bolygórendszer esetén a holdak jelenlétének esélye igen csekély. Azonban az eddig összegyűlt adatok alapján levonható az a következtetés, hogy a Naprendszerhez hasonló bolygórendszerek nem számítanak gyakorinak. A felfedezett bolygók, bolygórendszerek sokfélesége arra utal, hogy a bolygórendszerek kialakulása, fejlődése többféleképpen megy végbe, és a Naprendszerünk sajátos szerkezete, kialakulási folyamata kis valószínűségű eset lehet a többihez képest.

## **Köszönetnyilvánítás**

Ezúton szeretném megköszönni témavezetőmnek, Dr. Szatmáry Károlynak a sok segítséget és javaslatot, amit a szakdolgozat elkészítése során nyújtott.

## Irodalomjegyzék

Felhasznált irodalom:

- [1] Kane S.R. and Gelino D.M.: 2012, The Habitable Zone Gallery, *PASP* 124, 323-328.
- [2] Schulze-Makuch D., Mendez A., Fairen A.G., von Paris P., Turse C., Boyer G., Davila A.F., Resendes de Sousa Antonio M., Catling D., Irwin L.N.: 2011, A Two-Tiered Approach to Assessing the Habitability of Exoplanets, *Astrobiology* 11, No. 10, 1041-1052.
- [3] Underwood D.R., Jones B.W., Sleep P.N.: 2003, The evolution of habitable zones during stellar lifetimes and its implications on the search for extraterrestrial life, *International Journal of Astrobiology* 2 (4), 289-299.
- [4] [exoplanet.eu/catalog/](http://exoplanet.eu/catalog/)
- [5] [exoplanetarchive.ipac.caltech.edu](http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu)
- [6] [www.hzgallery.org](http://www.hzgallery.org)
- [7] <https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/>
- [8] Bloom, S.A. (1981). Similarity indices in community studies: potential pitfalls. *Marine Ecology Progress Series* 5:125–128.
- [9] Szatmáry K.: Exobolygók. *Magyar Tudomány*, 2006. augusztus, 968. o.
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/Exoplanetology>
- [11] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Exobolygó>
- [12] [https://hu.wikipedia.org/wiki/Forró\\_jupiter](https://hu.wikipedia.org/wiki/Forró_jupiter)
- [13] Szatmáry K.: Bolygók mindenütt, *Fizikai Szemle* 2007/12. 433.o.

## NYILATKOZAT

Alulírott Mészáros Richárd, Fizika BSc szakos hallgató (WHQ7HJ) A Naprendszer-hasonlósági index című szakdolgozat szerzője fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések általános szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Szeged, 2020. év 05. hó 15. nap

.....  
*a hallgató aláírása*