



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
Villamos Energetika Tanszék

Törő Dominik

**VILLAMOS AUTÓ  
TÖLTŐÁLLOMÁSOK  
SZTOCHASZTIKUS  
MODELLEZÉSE**

KONZULENS

**Dr. Farkas Csaba**

BUDAPEST, 2019

# Tartalomjegyzék

<b>Összefoglaló .....</b>	<b>4</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>5</b>
<b>1 Bevezetés .....</b>	<b>6</b>
1.1 Villamos autó típusok .....	8
1.1.1 Battery Electric Vehicles (BEV).....	8
1.1.2 Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) .....	8
1.1.3 Hybrid Electric Vehicles (HEV).....	8
1.2 Villamos autók töltése .....	9
1.2.1 Akkumulátortechnológia .....	10
1.2.2 Vezetékes töltés .....	10
1.2.3 Akkumulátorcserélő állomások .....	12
1.2.4 Vezeték nélküli töltés.....	13
<b>2 Töltőállomások az irodalomban .....</b>	<b>14</b>
2.1 Gyorstöltőállomás létesítés, méretezés .....	14
2.2 Modellezési megoldások a szakirodalomban.....	16
<b>3 Sztochasztikus modell.....</b>	<b>22</b>
3.1 Töltőállomással kapcsolatos modellek .....	22
3.1.1 Beérkezés, kialakuló várakozási sor .....	22
3.1.2 Kiszolgálás modellezése .....	24
3.2 Villamos autókkal kapcsolatos modellek.....	25
3.2.1 Beérkezési intenzitás.....	25
3.2.2 Érkezéskori töltöttség nagysága.....	25
3.2.3 Akkumulátorok, töltési karakterisztikák.....	26
3.2.4 Töltési idő .....	29
<b>4 Eredmények kiértékelése .....</b>	<b>30</b>
4.1 Alapvető modellezési megfontolások .....	30
4.1.1 Szimuláció felbontása .....	30
4.1.2 Töltési karakterisztika leképzése .....	31
4.2 Töltőállomás méretezése.....	31
4.2.1 Töltőfejek kihasználtsága .....	32
4.2.2 A lehető legtöbb ügyfél kiszolgálása/legkevesebb ügyfél elvesztése.....	35

4.2.3 Minimális várakozási idő.....	38
4.3 Paraméterek változtatásának hatásai.....	41
4.3.1 Statisztikák.....	42
4.3.2 Járműtípusok.....	43
4.3.3 Ügyfelek türelmetlensége .....	43
4.3.4 Hőmérséklet.....	45
4.3.5 Kiszolgálási mód.....	46
4.4 Szimulációból kinyerhető egyéb adatok .....	48
4.4.1 Töltési idők eloszlása.....	48
4.4.2 Érkezések száma az idő függvényében.....	49
4.4.3 Töltőállomáson/sorban tartózkodók száma az idő függvényében.....	51
<b>5 Záró gondolatok.....</b>	<b>53</b>
<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>54</b>
<b>Függelék.....</b>	<b>60</b>

# Összefoglaló

A dolgozatom célkitűzése egy töltőállomás sztochasztikus modellezése, a vonatkozó nemzetközi szakirodalom áttekintése, a beérkezési intenzitás, az autókra jellemző töltési karakterisztikák és a beérkezéskori töltöttségi szint modellezése, majd ezek alapján egy olyan sztochasztikus modell készítése MATLAB környezetben, melynek segítségével különböző intenzitású járműforgalom mellett meg lehet határozni a szükséges töltőfejek számát.

A fentieknek megfelelően munkámat a téma bevezetésével, a villamos autók típusainak ismertetésével kezdtem, majd a töltési lehetőségeinek rövid áttekintését követően szakirodalomkutatással folytattam a dolgozatot. Külön dolgoztam fel a gyorsöltőállomás létesítéssel, méretezéssel foglalkozó, valamint külön a töltőállomás modellezéssel foglalkozó cikkeket.

Az átfogó irodalomkutatást követően a sztochasztikus modell felépítésének bemutatásával folytattam a dolgozatomat. Először ismertettem a töltőállomással kapcsolatos modelleket, a beérkezést, kialakuló várakozási sort leíró matematikai modellt, valamint a kiszolgálás leképzésére vonatkozó lehetőségeket is, majd ezt követően a villamos autókkal kapcsolatos modellekkel foglalkoztam, nevezetesen az érkezésre és távozásra vonatkozó töltöttségi statisztikákkal, töltési karakterisztikákkal és a töltési idő meghatározásával.

A dolgozatom utolsó nagy tartalmi egysége a felépített modell eredményeinek kiértékelésével foglalkozik. Bemutatom a méretezéskor szem előtt tartandó szempontokat, megvizsgálom a modell bemeneti paramétereinek végeredményre gyakorolt hatását, illetve ismeretem az időfüggő beérkezési intenzitás mellett végzett szimuláció eredményeit is.

# Abstract

Even though the popularity of electric cars is increasing every year, we still face limitations by the current battery technology. To eliminate the main disadvantage of the batteries – the limited range – we need a properly sized fast charging station infrastructure.

The main goal of this paper is to find the optimal number of charging installation for the charging stations.

After a short introduction to the topic, I described the main types of electric vehicles (EVs) and charging alternatives, which was followed by a research on others' work on charging station sizing and modeling.

Then, I described mathematical models related to queueing theory, which will be necessary for the stochastic simulations. Following that, I detailed the main parts of my MATLAB model, such as EV charging characteristics, state of charge (SoC) related statistics, charging time calculation, service mode alternatives etc.

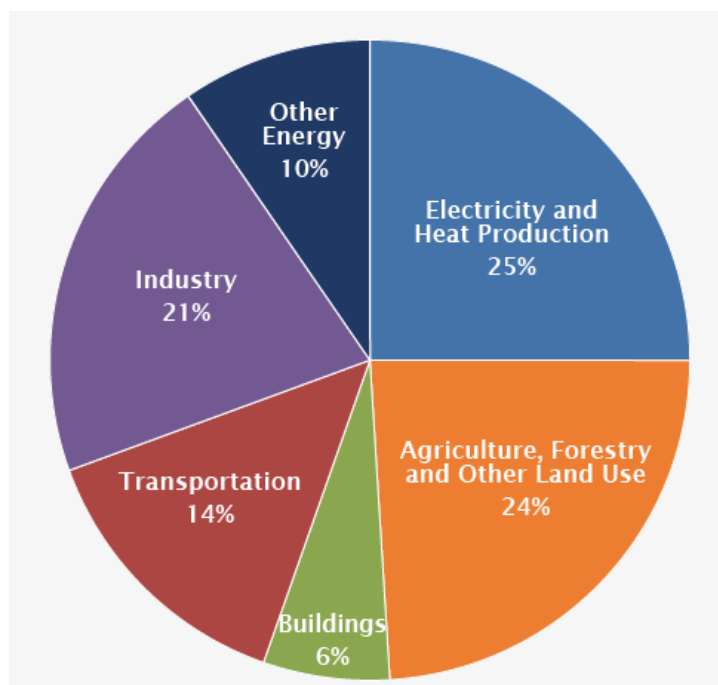
In the next chapter I interpreted the results of the stochastic simulations and evaluated them from different perspectives.

Finally, in the closing chapter, I included my final thoughts on the topic, conclusion on the results, and opportunities for improvement.

# 1 Bevezetés

Számos probléma motiválta a kutatókat, tudósokat és mérnököket, hogy megoldást találjanak a hosszútávon fenntartható közlekedés kérdéseire. Ilyen a folyamatosan apadó nyersanyagkészletek, a fejlődő országok gyorsuló urbanizációja, valamint a törekvés a légszennyezettség visszaszorítására és a globális felmelegedés megfékezése, hatásainak lassítása. A nyomásra a politikai döntéshozók is reagáltak, olyan szabályok alkalmazásával, melyek motiválják a CO<sub>2</sub> kibocsátás csökkentését, a villamos járművek (Electric Vehicles, EV) terjedését. Az autógyártóknak is érdeke, hogy megfeleljenek az új szabályzatoknak, hiszen be nem tartásuk komoly anyagi és presztízis veszteséget von maga után (erre kiváló példa a Volkswagen 2015-ös esete). [1]

Fontos azonban megjegyezni, hogy a légkörbe juttatott GHG (greenhouse gas, üvegházhatású gáz) csupán 14%-áért felelős a közlekedés szektor. Továbbá ebbe a 14%-ba bele kell érteni a vasúti, légi, és tengeri közlekedést hozzájárulását is. [2] a kibocsátást több szemszögből is vizsgálja, mint pl. GHG összetétele, kibocsátás alakulása az évek során, regionális kibocsátás mértéke.

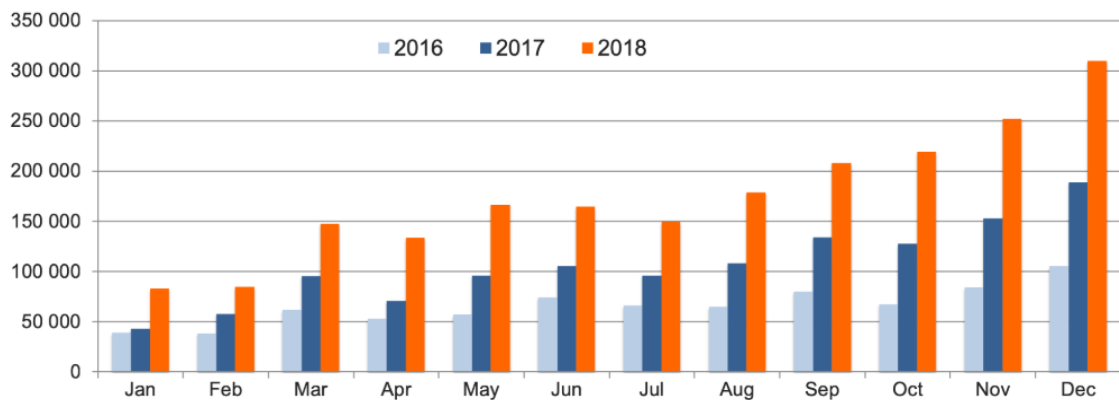


1. ábra. Globális üvegházhatású-gáz kibocsátás gazdasági szektorokra bontva [2]

Másik fontos szempont, hogy csak akkor értelmes valódi alternatívaként emlegetni az EV-ket, ha a teljes élettartamra vetített környezeti lábnyomuk kisebb, mint a hagyományos autóké. Ezt kérdőjelezi meg [3], ami szerint az akkumulátorok

gyártásához szükséges lítium, kobalt és mangán kitermelését is figyelembe véve, 15 éves életciklus mellett már akár 10%-kal is több káros anyagot bocsáthatnak a levegőbe, benzines társaiknál. Azonban ha ezeket a problémákat kezeljük, már valódi megoldásról beszélhetünk.

Az éves szinten eladott villamos járművek számának növekedése továbbra is megfigyelhető (2. ábra). A globális piacot nézve a 2017-es adatokhoz képest 64%-kal több jármű talált gazdára, 2018-ban 2,1 millió modellt értékesítettek (a személyautókon kívül a kamionokat is beleértve). [4]



2. ábra. Értékesített villamos járművek száma globálisan [4]

Hazánkban is közel megduplázódott a villamos autók száma csupán egy év leforgása alatt. A 2017. december-2018. november közötti időszakban 4500-ról 8500-ra nőtt a hazai zöld rendszámmal rendelkező autók száma. Pontos statisztikai adatokat, további kategorizált bontást [5] szolgáltat.

A jövőben nem várható a terjedés ütemének lassulása. A különböző forrásokat tanulmányozva számos becslést találtam a 2030-ra becsült EV-k számáról, de a várható darabszám valahol 125-228 millió között van, attól függően, hogy mennyire optimistán állunk a kérdéskörhöz, hogy alakulnak a jövőben a szabályozások, az emberek hozzáállása és az egyéb befolyásoló tényezők. [6], [7]

A fentieket figyelembe véve szükséges a villamos autók témakörével foglalkozni, a velük járó problémákat időben észrevenni és még azelőtt megoldani őket, hogy azok komolyabb gondokat okozhatnának. Az EV-k a hálózati feszültségminőségre gyakorolt hatásuktól kezdve az újfajta gyártási eljárásokon keresztül a piaci integrációig bezárólag számos megoldandó feladatot állítanak a mérnökök elé.

Ezen problémák közül én a villamos autó töltőállomások méretezésével foglalkoztam. A munkám célja olyan sztochasztikus modell létrehozása, melynek

segítségével különböző szempontok szerint méretezni lehet a létesítendő EV töltőállomásokat.

A dolgozatot egy rövid elméleti bevezetéssel kezdem, melyben a munkám szempontjából fontos ismereteket összefoglalom a villamos autókkal, a töltőállomásokkal kapcsolatban, majd áttérek a sztochasztikus modellezésre. A szükséges elméleti háttér ismertetését követően a saját modellem felépítésével foglalkozom. A dolgozatot a szimulációs eredmények – különböző szempontok szerinti – kiértékelésével zárom, majd javaslatot teszek a megfelelő méretezési eljárásra.

## **1.1 Villamos autó típusok**

Attól függően, hogy milyen mértékben támaszkodnak a villamos energiára, mint elsődleges energiaforrásra, három fő EV típust különböztethetünk meg, – az angol rövidítéseket használva – BEV, PHEV és HEV-ről beszélhetünk. [8]

### **1.1.1 Battery Electric Vehicles (BEV)**

A BEV-k (melyekre gyakran csak EV-ként hivatkoznak) nem rendelkeznek belsőégésű motorral, teljes mértékben villamos energia hajtja őket. A villamos motort és az összes elektronikai berendezést a jármű akkumulátorai táplálják, ennél fogva közvetlenül nem bocsátanak ki semmiféle károsanyagot a környezetbe. A BEV-eket külső forrásból származó villamos energiával lehet feltölteni.

### **1.1.2 Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)**

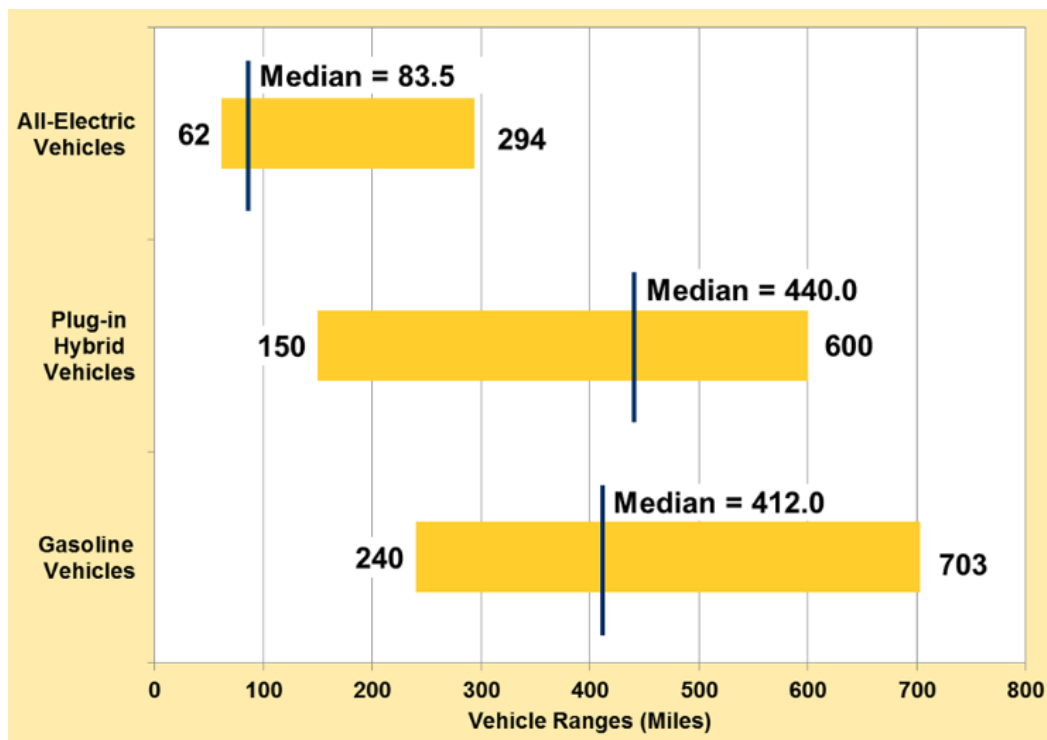
A PHEV-eket nem csak külső forrásból származó villamos energiával tölthetjük fel, hanem képesek a fékezés kinetikus energiáját is hasznosítani erre a célra, ezen kívül rendelkeznek belsőégésű motorral is. Tisztán a villamos energiára támaszkodva 10-40 mérföldet képesek megtenni.

### **1.1.3 Hybrid Electric Vehicles (HEV)**

Ezeket a hibrid járműveket hagyományos motorok hajtják, melyeket akkumulátorok támogatnak (üzemanyag-fogyasztás és károsanyag-kibocsátás szempontjából) a magasabb hatásfok elérése érdekében. Az akkumulátor töltése azonban nem külső forrásra csatlakoztatva történik, hanem tisztán a fékezési energia átalakításával, ennél fogva az ilyen járművek nem képezik a vizsgálatom tárgyát a továbbiakban.



Az egyes típusok által megtehető maximális távolság töltésenként a technológiából eredően eltér.



3. ábra. Hatótávolságok összehasonlítása [9]

A 3. ábra alapján egyértelműen látszik a hatótávok közötti különbség. Ahogy az várható volt, a BEV-hez tartozik a legkisebb medián távolság. Fontos azonban megjegyezni, hogy ezek a számok évről évre változnak. [9] írása óta a Tesla bemutatott újabb modelleket, melyek névleges hatótávolsága 300 mérföldet is meghaladja. A Tesla Model S 100D akár 335 mérföldet is képes megtenni egy töltéssel a hivatalos adatok szerint.

## 1.2 Villamos autók töltése

A hagyományos tankolás egy egyszerű, gyors folyamat, pár perc alatt több tíz MW-os teljesítmény-átvitelt valósítunk meg az üzemanyagtank feltöltésekor.

Az EV-k töltésekor három fő lehetőség közül választhatunk, vezetékes töltés, vezeték nélküli töltés, vagy akkumulátorcserélő állomások. Ezek áttekintése előtt azonban magával az akkumulátortechnológiával foglalkozom, mivel ez alapvetően behatárolja milyen töltési lehetőségek közül választhatunk.

### 1.2.1 Akkumulátortechnológia

A napjainkban legelterjedtebben használt akkumulátor típusok megismerésében [10] nyújtott segítséget.

Lítium-ion (Li-ion), olvadt só (Na-NiCl<sub>2</sub>), nikkelfém hibrid (Ni-MH) és lítiumkén (Li-S) típusokat vizsgáltak megbízhatóság, költség- és energiahatékonyság szempontjából. A modellezés, mérés, és kiértékelés végeztével az alábbi konklúzióra jutottak a szerzők.

A Na-NiCl<sub>2</sub> akkumulátorok előnye az alacsony ár, hosszú élettartam, kiváló működés még durva körülmények között is, továbbá a kiemelkedő energiafogyasztás (12,6kWh/100km). Hátrányuk azonban az akkumulátorok üzemi hőmérséklete, melyet folyamatosan fent kell tartani, még akkor is, ha a jármű nincs használatban, különben az akkumulátorban lévő elektrolit megszilárdul.

A Li-S akkumulátorok alacsony árak, megnövekedett kapacitásuk miatt ígéretes alternatívának bizonyulnak, azonban a magas energiafogyasztásuk (17,2kWh/100km) miatt csak nagy kapacitású rendszerekben ajánlott a használatuk.

A Ni-MH akkumulátorok nem bizonyultak hatékony megoldásnak, még a kedvezőnek mondható energiafogyasztás (15,7kWh/100km) ellenére sem. A konstrukció nem hatékony, a telepek túl nehezek, továbbá a technológia, amin alapulnak, ma már egyszerűen idejétmúltak számít.

A villamos járművek akkumulátorait tekintve legnagyobb piaci részesedéssel a Li-ion akkumulátorok rendelkeznek, melyek mérsékelt (14,7kWh/100km) energiafogyasztással, folyamatosan csökkenő árakkal és egyre fejlődő gyártástechnológiával, élettartammal jellemezhetők. A magas üzemi hőmérséklet azonban kihathat a teljesítményre és az élettartamra, továbbá biztonsági kockázatot is jelent, amire különös figyelmet kell fordítani (több tüzesetről is lehet olvasni, ezek közül egy hírhedtebb [11], amely egy megsérült Li-ion akkumulátor miatt kigyulladt Tesla Model S esetét mutatja be).

### 1.2.2 Vezetékes töltés

A vezetékes töltésen belül, attól függően, hogy milyen teljesítményű a töltőberendezés (ami meghatározza a szükséges feszültség szintet is) különböző töltési szintekről beszélhetünk, melyeket az 1. táblázat foglal össze. A szintekhez

értelemszerűen eltérő töltési idők tartoznak. Minél magasabb szintről (az angol terminológiában Level, de valahol Mode-ként hivatkoznak rá) beszélünk, annál nagyobb teljesítményre van szükség, de annál rövidebb idő alatt is tölthetjük fel az akkumulátort.

Érdemes azonban már itt megjegyezni, hogy a töltési idő függ az akkumulátor kezdeti töltöttségi szintjétől is, ugyanis nem mindegy, hogy 20%-ról szeretnénk 50%-ra, vagy 70%-ról 100%-ra (ennek oka a töltési karakterisztikák erősen nemlineáris jellege, melyről bővebben a 3.2.3 fejezetben írok).

**1. táblázat. Töltési módok [12]**

Szint	Teljesítmény (kW)	Üres akkumulátor becsült töltési ideje (óra)
1	1	8-15
2	3-20 (jellemzően 6)	3-8
3	Jellemzően 50, esetenként 20	0,3-1

Az 1. táblázathoz képest a töltési szintekhez további információkat szolgáltat a 2. táblázat, mely kiegészíti annak adatait a szintekhez tartozó feszültségzintekkel, áramértékekkel, maximálisan elérhető teljesítményekkel és a beépítendő megszakítók névleges áramainak nagyságával.

**2. táblázat. Töltési módok villamos paraméterei [13]**

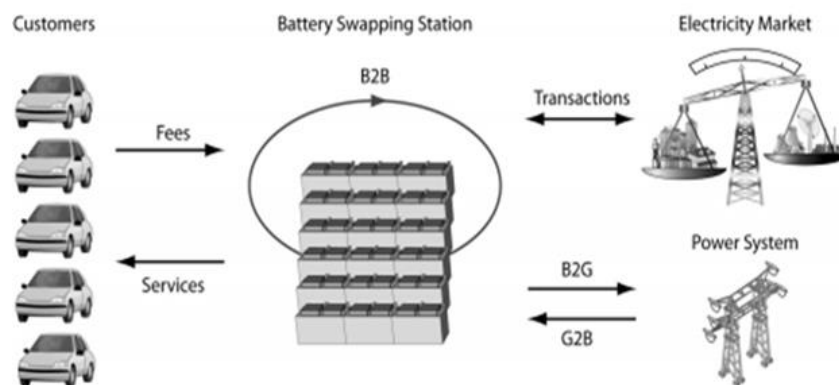
Töltési szint	Névleges feszültségzint (V)	Maximális áram (A)	Maximális teljesítmény (kW)	Szükséges megszakító határérték (A)
1 (AC)	120V AC, 1-fázis	12A	1.44	min. 15A
2 (AC)	208-240V AC, 1-fázis	32A	7.7	40A
3 (DC)	max. 600V DC	max. 400A	240	Igény szerint

Az 1-es és 2-es szint otthoni és munkahelyi töltéshez ideális, hosszabb utak közben azonban gyors töltést várnak el az emberek, ahogy azt a hagyományos autóknál korábban megszokták. Erre nyújtanak megoldást a gyorstöltők, melyek a 3-as szintbe tartoznak. A 3-as szinten már csak DC töltésre van lehetőség, az 1-essel és 2-essel szemben, ahol AC töltés is lehetséges. Több szabvány, megoldás is elterjedt, úgy, mint a CHAdeMO (CHARGE de MOve), CCS (Combined Charging System) és a Tesla

Supercharger, azonban ezek töltőteljesítménye már meghaladja az 50kW-ot, ezért már villámtöltőként emlegetik őket.

### 1.2.3 Akkumulátorcserélő állomások

Egy másik lehetőség akkumulátorcserélős állomások (Battery Swapping Stations, röviden BSS) építése. A vezetékes töltéssel szemben, ahol az akkumulátor az autó szerves része, itt cserélhető elemként szerepelne, így az EV-k árát is csökkenteni lehetne, hiszen az akkumulátorok egy harmadik fél tulajdonában lennének. (Szintén ezt a gondolatot fogalmazza meg [42] egy szemléletes telefonszolgáltatói analógián keresztül, amely párhuzamba hozza a kommunikációhoz szükséges vezeték nélküli hálózatot a teljes BSS hálózattal.) A BSS-eken a lemerült akkumulátorokat teljesen feltöltöttekre lehetne cserélni, ami elviekben gyorsabb folyamat, mint a gyorsöltők által jelenleg elérhető töltési idők. Egy ilyen csere – BSS megvalósítástól függően – 1-5 percet venne igénybe. A BSS-en várakozó akkumulátorok pedig a rendszerszabályozásban is részt vehetnének (4. ábra). [14]



4. ábra. BSS koncepció [14]

A BSS-ek azonban a várakozásokkal ellentétben nem terjedtek el széleskörűen. Az eddigi talán legambiciózusabb vállalkozás az izraeli Better Place nevű vállalat volt, melynek csődje sokaknak egyet jelentett a BSS konstrukció életképtelenségével. (A Better Place csődjéről részletesen ír [15]). Ezért három fő okot szokás felelőssé tenni. Az EV-k Li-ion akkumulátorainak standardizálása elmaradt, a harmadik féltől bérelt/lízingelt akkumulátorcsomagok megbízhatósága kérdéses, illetve nem tudtak egy igazán életképes üzleti modellt alkotni a konstrukcióhoz. [14]

Az alapgondolat azonban nem elvetendő. [16] a vertikálisan integrált piac liberalizációjával járó lehetőségek keretein belül vizsgálja a BSS-ek által nyújtott lehetőségeket. [17] ennél még tovább megy. Nem csak azt állítja, hogy kiegészítő

opcióként érdemes használni az akkumulátorcserélős állomásokat, hanem azt írja, hogy egyenesen nélkülözhetetlenek az EV-k sikeres széleskörű elterjedéséhez. Ehhez javasolja, és vizsgálja a B2G (battery to grid), G2B (grid to battery) és a B2B (battery to battery) konstrukciókat.

A kezdeti nehézségek, és a még mindig meglévő kihívások ellenére azonban látható, hogy számos előnye van a vezetékes töltéssel szemben, melyekkel [18] és [19] is részletesen foglalkozik. A legfontosabb a korábban is említett gyorsaság, tartalékolhatóság és a rendszer kímélése. A hagyományos vezetékes töltés esetén a fogyasztók sztochasztikusan érkeznek, és csúcsidőszakban könnyen előfordulhat, hogy olyan teljesítményigényt támasztanak a töltőállomás felé, ami a rendszer stabilitását is veszélyeztetheti. Ilyen problémával BSS esetén nem kell számolni. [20]

#### **1.2.4 Vezeték nélküli töltés**

A vezeték nélküli töltéssel máshonnan közelítjük meg a problémát, mint az előző két esetben. Itt a hangsúly nem a gyors és ritka, hanem a lassú, de gyakori töltésen van. A saját garázsunk és a munkahelyi parkolóban elhelyezett vezeték nélküli töltőn kívül akár az autópályákon is el lehetne helyezni ilyen töltőket, amik menet közben folyamatosan meghajtanák és töltenek is a járművet. A megoldásnak több előnye is van. Nem kell a töltőkábelrel foglalkozni, nem áll fenn a sérült szigetelés esetén az áramütés veszélye, nem kell annyira óvni a szennyeződéstől, a környezeti hatásoktól, a vandalizmustól a töltőt. [21]

A vezeték nélküli töltő telepítésének a felhasználásra gyakorolt hatásait vizsgálja [22], ami egy előzetes tanulmány, azonban a szerzők ígérik a folytatás publikálását is, amiben hosszabb időtáv alatt gyűjtött adatok alapján biztosabb eredményt szeretnének közölni, továbbá az akkumulátor kapacitás degradációját és annak hatását a töltési sebességre is meg szeretnék vizsgálni.

Otthoni töltést választva elég a saját hálózatunkat átalakítani, hogy képes legyen kiszolgálni az extra fogyasztót, munkahelyi töltés esetén ismert a kiszorgálandó autó flotta nagysága, azonban az autópályákon, főbb közlekedési csomópontok közelében telepített töltőállomásokra érkező autók száma pontosan nem ismert, statisztikai adatok alapján azonban becsülhető. Munkám célja az ilyen gyorstöltőállomások méretezésének vizsgálata. BSS méretezésével nem foglalkoztam, azonban a felépített modellt némi módosítást követően ilyen célra is fel lehet használni.

## 2 Töltőállomások az irodalomban

Ebben a részben a gyorstöltőállomás méretezéssel kapcsolatos irodalomkutatás után a beérkezési intenzitás modellezésével, majd az autókra jellemző töltési karakterisztikákkal, beérkezéskori töltöttséggel, töltési idővel és egyéb, a szimuláció szempontjából fontos paraméterekkel foglalkozom.

### 2.1 Gyorstöltőállomás létesítés, méretezés

A villamos autók népszerű kutatási témának számítanak, így számos cikk elérhető, melyek különböző szempontokból vizsgálják a problémát.

Létesítéskor fontos figyelembe venni, hogy topológiailag hogyan helyezkednek el a már meglévő töltőállomások a telepítendő töltőállomáshoz képest. Ekkor gráfelméleti megközelítéssel dolgozhatunk, amivel azonban átkerülünk egy NP-nehéz problémakörbe, az EVCSP-be (EV charging station placement problem). Ezzel foglalkozik részletesen [23].

Az optimális létesítési hely megtalálására más megközelítés is alkalmazható. [24]-ben egy forgalom-modellező szoftvert alkottak a szerzők, míg [25] úgynevezett FCLM (Flow-Capturing Location-Allocation Model) megközelítést használ. Azonban e módszerek mélyén is gráfelméleti megfontolások, módszerek húzódnak.

Szintén az ideális elhelyezkedéssel és méretezéssel foglalkozik [26]. A szerzők először a környezeti tényezőket mérlegelik, aztán egy primál-duál feladatként megfogalmazott optimalizálást végeznek, mind műszakilag (beépítendő teljesítmény, hálózati hatások, stb.), mind gazdaságilag. A gazdasági számításokhoz megalkotott célfüggvény diszkontált beruházási, működési, üzemeltetési és hálózati veszteségi költségeket tartalmaz. A peremfeltételeket a hálózati áramlások és minőségi előírások alapján írták fel. A kiadódó primál-duál feladat megoldásának részletes tárgyalása után egy teszt hálózaton bemutatják a módszer működését, ami alapján valóban alkalmas az eljárás gazdasági-műszaki (elsősorban a hálózati visszahatást vizsgálták, hálózati veszteség minimalizálása, szabványos feszültség tartása, kibocsátott harmonikusok stb.) optimalizálásra.

Hasonlóan [26]-hoz, [27] is a földrajzi elhelyezkedés és a hálózati visszahatás függvényében igyekszik optimalizálni. A megfogalmazott módszertan segítségével

Pareto-optimumot találnak a szerzők, majd szintén szimulációval támasztják alá a felvetésüket.

Az EV töltőállomások tervezésekor gazdasági szempontokat is figyelembe vehetünk. [28] lineáris programozás segítségével próbál optimumot találni együttműködő EV töltőállomások profitmaximalizálásra. A korábban hivatkozott [20], [26] és számos egyéb cikk is vizsgál anyagi szempontokat, melyeket külön nem emelek ki a továbbiakban, de fontos megemlíteni, hogy egy műszaki megoldás mellé mindenképpen szükséges egy megfelelő gazdasági elemzés is a beruházás megtérüléséről. A profit maximalizáláshoz hozzátartozik a töltésért felszámított tarifa is, melyet szintén lehet optimalizálni, pl. az egyes töltőállomások közötti kommunikáció kiépítésével, mely alapján valós idejű tarifák segítségével lehetne ösztönözni az autósokat, hogy azt a töltőállomást válasszák, ahol épp kevesebben töltenek, így egyenletesebb terhelés érhető el a hálózaton. Hasonlóan figyelembe lehet venni a napon belüli csúcs-völgy időszakokat. Az árazás optimalizálásával foglalkozik [29].

A töltőállomás tervezéshez azok elhelyezkedését, és a telepítés, üzemeltetés gazdasági optimumát is figyelembe veszi [30]. Tovább pontosítja az eredményeket, hogy a töltési igényt, a felhasználói viselkedést, úthálózatok struktúráját is beépítették a matematikai modelljükbe, majd peremfeltételeket fogalmaznak meg, ami így egy kvadratus programozási feladat megoldásához vezet. A feladatot – a több cikkben is ajánlott – Cplex szoftverrel oldották meg. A szerzők a töltőállomás méretezéshez bevezetnek egy „jármű-óra” változót, ami a töltési igényt hivatott leképezni. A jármű-órát a – statisztikai adatok alapján – egyidejűleg a töltőállomáson tartózkodó autók számának és az ott töltött idejük szorzataként kapjuk meg. Így a bevezetett változó nagysága tükrözi a töltési igényt. A töltőállomások optimális létesítési helyét szintén gráfelméleti módszerekkel vizsgálják.

[13] a töltőállomásra szükséges beépítendő töltőtéljesítményt méretezi, fixált 10 töltő mellett. Az autók érkezését normál eloszlással közelíti, melynek várható értéke 2,5 perc, szórása 1,25 perc. Az autók beérkezéskori töltöttségét (normál eloszlás 20%-50% között, 35%-os várható értékkel és 7,5%-os szórással), akkumulátor kapacitást (5kWh-60kWh között normál eloszlással, 32,5kWh várható értékkel és 13,75kWh szórással), töltési sebességet, töltési karakterisztikát mind becsüli, azonban nem támasztja alá ezen értékek jogosultságát. A szimulációhoz Monte Carlo módszert használ, majd ez

alapján ad becslést a szükséges beépítendő teljesítményre, illetve a terheltség kiegyenlítésére szolgáló tároló méretezésére is.

A témához nem kapcsolódik szorosan, de fontos megemlíteni a töltőállomások elterjedésével járó hálózatstabilitási és feszültségminőségi problémákat is, melyekre különös figyelmet kell szentelni, hogy a villamosenergia-rendszer továbbra is megfelelően működjön tovább, az elterjedő töltőállomásokkal együtt is. Ez a téma terület is számos kutatás középpontját képezi, úgy, mint [31], vagy akár [32], ahol sztochasztikus load-flow futtatásokkal becsülik a FCS, BSS, ESS rendszerek hálózati hatásait.

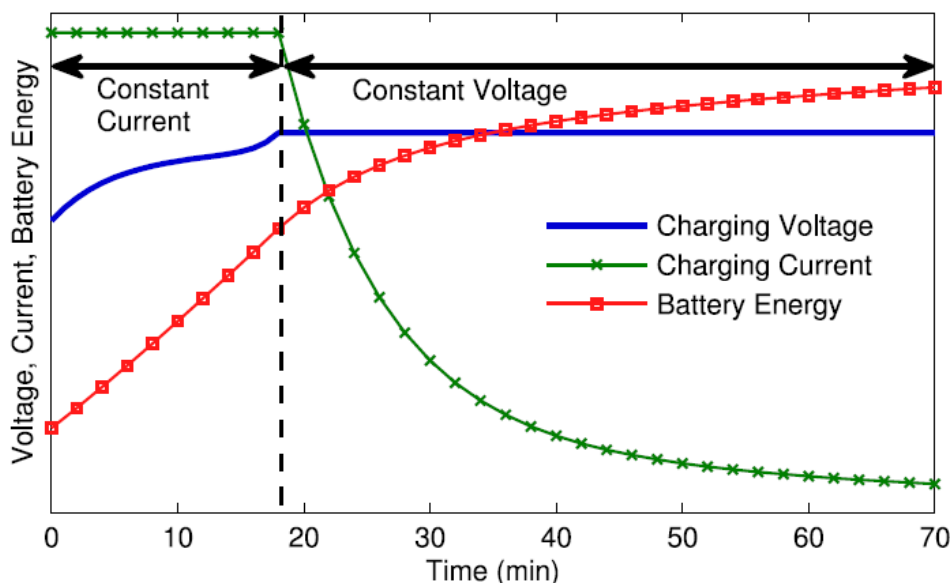
## 2.2 Modellezési megoldások a szakirodalomban

Ebben a fejezetben megvizsgálom, hogy milyen modellezés jellemző a szakirodalomban a gyorsöltőállomásokra (röviden FCS, az angol Fast Charging Station rövidítéseként). Erre több lehetőség is kínálkozik, az általam megvizsgáltak alapján azonban elmondható, hogy jellemzően valamilyen sorbanállás-elméleti megközelítéssel, azon belül is döntően M/M/c szerint modellezik a FCS-eket (Fast Charging Station). (A sorbanállás-elmélet háttéréről részletesebben a 3.1.1 fejezetben írok, ahol feloldom a kapcsolódó betűszavakat, rövidítéseket is.)

Mint ismeretes, DC gyorsöltés során, ahogy nő az akkumulátor töltöttségi szintje (röviden SoC, az angol State of Charge rövidítéseként) úgy csökken a töltés sebessége. Annak érdekében, hogy maximalizálni lehessen a FCS bevételét és minimalizálni a várakozó EV-k számát, [33] szerzői lehetőséget adnak a FCS üzemeltetőnek, hogy korlátot szabhasson az állomáson a töltés utáni maximális SoC-ra. A FCS-t M/G/S/K rendszer szerint modellezték. Mivel az ilyen rendszerekre érvényes zárt alakú megoldás még nyitott probléma a matematika számára, ezért numerikus közelítésekkel éltek. A modell nem exponenciális eloszlást használ a töltési időre, (pl. [34]-gyel szemben, ahol M/M/S sorral modellezték) aminek oka, hogy figyelembe veszik a beérkezéskori töltöttséget is, ami nagyban befolyásolja a töltőállomáson eltöltött időt.

Az FCS-en, a DC gyorsöltést CCCV (constant current constant voltage, azaz állandó áram állandó feszültség) szerint kezelte [33]. A töltés állandó áram szakasza addig tart, amíg a feszültség el nem ér egy küszöbszintet, ahol a töltési mód átvált állandó feszültségűre (CV). Egy jellegzetes CCCV karakterisztikát mutat az 5. ábra.





5. ábra. Li-ion akkumulátor CCCV töltési karakterisztikája [33]

Az EV akkumulátor karakterisztikája miatt a CV szakaszon a töltőáram nagysága exponenciálisan csökken, ami csökkenti a töltőtéljesítményt, növeli a töltési időt, ezáltal csökkenti az üzemeltető profitját, hiszen a kiszolgálási idő nő, de kevesebb teljesítményt vesz fel a fogyasztó. Ebből a gondolatmenetből következik, hogy miért érdemes a FCS üzemeltetőnek megszabni a maximálisan kiválasztható SoC-t.

[33] a beérkező EV-k kezdeti SoC eloszlását csonkított normál eloszlással közelíti, majd ebből, a fent bemutatott CCCV modellből számított töltőtéljesítményből, és a maximális SoC-ból számítja a töltési időt.

[35] a szükséges töltőtéljesítmény meghatározására valószínűségi alapú, sztochasztikus load-flow eljárást alkalmaz. A töltőállomásra érkező autók kiszolgálását M/M/c sorral modellezik. A beérkezési és kiszolgálási idők exponenciálisnak feltételezését azzal indokolják, hogy az érkezések és a töltési folyamatok függetlenek, ezért Poisson-folyamatként kezelhetők. A várakozási sor maximumát végtelennek tekintik az egyszerűség kedvéért. Az M/M/c sorral modellezett állomáson az egyszerre töltődő EV-k száma zárt alakban felírható. A lakóövezetekre viszont M/M/c/k/N<sub>max</sub> modellt használnak ( $c \leq k \leq N_{\max}$ ). Az egyszerre töltődő EV-k számára azonban még ennél a modellnél is felírhatunk zárt alakú összefüggést.

A szimulációs eredményekből adódó hisztogramra Weibull-eloszlást, míg a lakóövezeti szimulációból adódó hisztogramra normális-eloszlást illesztettek, majd az illesztés jóságáról a Kolmogorov-Smirnov (K-S) teszttel győződtek meg.

Másfajta megközelítést használ [36]. Az EV-knek nemcsak a beérkezését, de azok mozgását is modellezi diszkrét idejű, diszkrét állapotterű Markov-lánccal. Az egyéves szimulációs időablakban (így a szezonális változásokat is figyelembe véve) minden EV négy állapot egyikében tartózkodhat. Az így felépített Markov-lánc ciklostacionárius, mivel az átmeneti valószínűségek periodikusan ismétlődnek (az ilyen folyamatok modellezésével foglalkozik részletesen [37]).

[38] szintén M/M/c modellel dolgozik, az EV-k kiszolgálását pedig FCFS szerint kezelik. Az M/M/c modell mellett leginkább annak egyszerűsége és könnyen kezelhetősége miatt döntöttek a szerzők. Az érkezést és kiszolgálást is Poisson-folyamatként kezelték, szintén különösebb indoklás nélkül. A beérkező EV-k kezdeti töltöttségi szintjét pedig egyenletes eloszlással (1% és 90% között) határozták meg a szimuláció során.

Rendszerszintű költségoptimalizálást végez [39], melyhez az érkező járműveket a korábbi cikkhez hasonlóan Poisson-folyamatként kezeli, konstans érkezési rátával, azonban nem M/M/c, hanem független M/M/1 sorok összeségeként modellezi a sorbanállási folyamatot, így az M/M/1-re felírható zárt alakú egyenletekkel tudnak tovább dolgozni.

[40] szerzői olyan Markov-modellt építettek, mely lehetővé tette a PHEV-k mobilitásából adódó töltési lehetőségeket (rugalmasan az utazási időtől függően), azonban nem vették figyelembe a parkolási állapotok közötti töltési lehetőségeket, az eltérő jellegű utak közötti fogyasztáskülönbségeket, illetve a másodlagos üzemanyag használatának alternatíváját a gyorstöltőállomásokkal szemben. Ezen kívül nem lehetett számolni a villany és a másodlagos üzemanyag árának optimális viszonyával a különböző töltőtípusoknál, valamint a kapcsolódó CO<sub>2</sub>-kibocsátással. Ezeket a hiányosságokat azonban már pótolta a szerzők, a 2 évvel később megjelent cikkükben, [41]-ben. A PHEV-k beérkezési folyamatát továbbra is Markov-lánccal kezelik, a járművek hálózati hatását és további piaci szempontokat is részletesen vizsgálják a frissebb írásukban, azonban a szimulációkhoz lassú töltést feltételeztek.

Az 1.2.3 fejezetben szereplő akkumulátorcserélős állomások méretezése [42] központi témája. Külön sorbanállási modellt használnak a várakozó EV-kre és az állomáson megtalálható akkumulátorokra. A kidolgozott modell jóságát olyan indikátorok jellemzik, mint a blokkolás valószínűsége, azonnali kiszolgálás valószínűsége, átlagos kiszolgálási idő és a foglalt töltők átlagos száma. Az EV-k

sorbanállását M/D/s/N szerint modellezik, Poisson-folyamattal az érkezésre vonatkozóan. Fontos különbség azonban a hagyományos M/D/s/N sorokhoz képest, hogy a beérkezett járművek akkor is sorban állnak, ha van szabad töltőcserélő, de nincsen teljesen feltöltött szabad akkumulátor. Az akkumulátor cserére 90s-ot számolnak. Az érkezéskori töltöttség sűrűségfüggvényének milyenségéről azonban nem nyilatkoznak.

A töltőállomáson található akkumulátorok szabályozásba való bevonását vizsgálja [43]. Az autók érkezését szintén Poisson-folyamattal képezik le, a SoC-t pedig normál eloszlással közelítik. Az akkumulátorok cserélésére szükséges időt azonban nem tekintik konstansnak, hanem egyenletes eloszlás segítségével adják meg a szimulációs programnak.

Szintén akkumulátorcserélős állomásokat vizsgál [44]. A BSS dinamikus árazásának kialakításához szükséges az energiaár és az EV-k érkezésének modellezése is. Mindkét esetben Markov-láncokat használnak. Amennyiben az EV állomásra érkezésekor nincs cserére alkalmas teljesen feltöltött akkumulátor, az EV-t elutasítják, nem foglalkoznak várakozási sorral. A PHEV-k érkezését időtől függő beérkezési rátával vették figyelembe. A legnagyobb különbség az eddigi irodalmakkal szemben, hogy a töltőállomást DBMAP/PH/N/R sorral modellezik. A DBMAP diszkrét-idejű csoportos Markov érkezési folyamatot jelöl (a választást azonban nem indokolják a szerzők). Mivel a töltést eltérő kezdeti SoC szinten kezdik a beérkező PHEV-k, ezért diszkrét-idejű fázis-típusú (PH) eloszlást használnak a kezdeti töltöttség leképzésre. Az N a BSS-en található töltők számát, míg az R az akkumulátorok számát jelöli.

[45] középpontjában a V2G (Vehicle to Grid) koncepció vizsgálata áll, melyhez szükség van a járművek sztochasztikus modellezésére. Az eddigi megközelítésekkel szemben azonban itt nem valamilyen Markov-folyamattal dolgoznak, hanem statisztikai adatokból generált valószínűségi eloszlásokkal számolnak. A kiindulási alap egy 167000 adatpontot tartalmazó, 25000 háztartás bevonásával készített felmérés, amely a megtett utak típusát, távolságát, időtartamát, célját, stb. tartalmazza. A felmérés a lakossági célú járműhasználat viselkedését jellemzi csupán, a kereskedelmi szállítás leírására egy másik – kevesebb, csupán 98500 adatpontot tartalmazó – statisztikát alkalmaznak a szerzők. A szerzők a mintasor kellő nagyságával indokolják annak használhatóságát, jóságát, nem térnek ki más modellezési alternatívára.

[46] smart mérők által biztosított adatokból alkotott Big Data segítségével alkot sorbanállási modellt az EV töltési igény modellezésére. Mivel a modell valós mérési

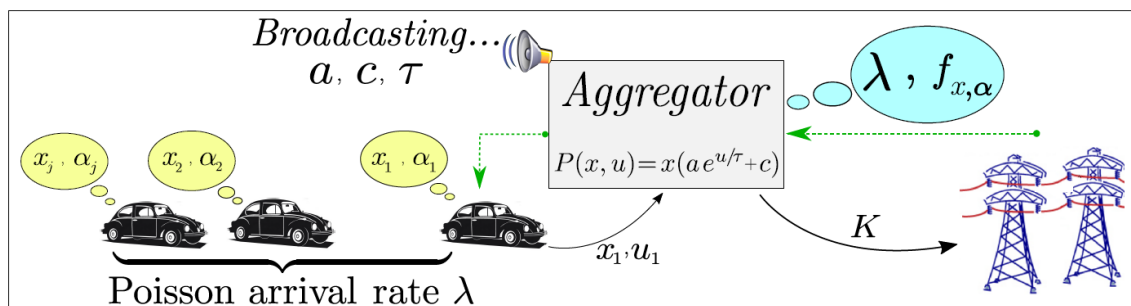
adatokból készül, ezért képes leképezni a lakossági EV töltési szokások nem homogén, periodikus mivoltát a nem homogén Poisson érkezési rátával és a töltési idő empirikus eloszlásával. Az így alkotott modellt a valós mérési adatok összehasonlításával validálják. A szerzők áttekintik az irodalomban jellemzően előforduló sorbanállási modelleket, úgy, mint  $M/M/N_{\max}$ ,  $M/M/\infty$  vagy  $M/M/s$ . Ezeket azonban, az esetek többségében megalapozatlan feltételezések mellett használják, vagy nem indokolják meg használatuk okát kellően. Az általános  $M_1/M_2/\infty/N_{\max}$  modell az EV érkezési rátát állandónak feltételezi, függetlenül a már töltődő EV-k számától. Ez végtelen kiszolgálókapacitás mellett még elfogadható feltételezés, azonban véges töltőállomásoknál már nem, ezért folyamatosan változó, az éppen töltődő EV-k számától függő érkezési ráta bevezetésével élnek a szerzők, így pontosabb képet alkotva a valóságról. Egy másik feltételezés, amivel az  $M_1/M_2/\infty/N_{\max}$  modell dolgozik, hogy az EV-k beérkezési rátája egy időtől független állandó. Azonban a szerzők mérési eredménye alapján (amit 37 EV töltési szokásának megfigyelése alapján készítettek [47]) ez nem igaz, van egy 24 óránként ismétlődő napi periodicitása a rátának. Az időfüggés leképezésére nem-homogén Poisson folyamattal dolgoznak tovább a szerzők, időtől függő érkezési rátával ( $\lambda(t)$ ). Végül, az utolsó általános feltételezés, amivel az  $M_1/M_2/\infty/N_{\max}$  modellek élni szoktak, hogy az EV-k töltési rátája mindig exponenciális eloszlású, ami azonban nem teljesen igaz, hiszen ehhez az exponenciális eloszláshoz hasonlóan az akkumulátoroknak is memóriamentesnek kellene lenniük.

[48] a töltőállomás energiaigényét teljes mértékben megújuló energiaforrásokkal fedezi, aminek a sztochasztikus termelésének előjelzésére kidolgozott modell jóságát egy erre a célra bevezetett mutatóval jellemzik. Ennél azonban tovább mennek a szerzők, az irodalomban korábban bemutatott általánosnak tekinthető FIFO kiszolgálással szemben egy kétlépcsős folyamatot javasolnak. Első lépésben azt vizsgálják meg, hogy az EV egyáltalán beléphet-e a töltőállomásra, majd csak utána kezdődhet a töltés ütemezése. Mivel a töltőállomás teljesen ki van szolgáltatva a megújuló termelés sztochasztikus jellegének, így fontos elkülöníteni ezt a két lépést, hiszen előfordulhat, hogy nem áll rendelkezésre kellő teljesítmény a kiszolgáláshoz. Értelemszerűen egy ilyen állomás, amennyiben a megújuló forrás alatt napelemeket értünk – ahogy a szerzők is – csak nappal képes üzemelni. A járművek töltőállomásra érkezését azok szemi-periodikus jellege miatt időtől függő érkezési rátával jellemezhető Poisson-folyamatként modellezik. A napelemek által (historikus adatok, időjárás előrejelzés és normál eloszlás

kombinációja alapján) előjelzett és ténylegesen termelt energia közti hibához alkalmazkodnia kell az ütemező algoritmusnak. A szimulációs eredményeik alapján a javasolt módszertan hatékonyabb kiszolgálást eredményez a FCFS ütemezésnél.

[49] szintén megújuló források segítségével üzemeltetett töltőállomásokkal foglalkozik. Az EV érkezéseket valódi adatok alapján modellezik, melyek a szerzők szerint elég átfogóak ahhoz, hogy minden évszakra eltérő profilt tudjanak alkotni. Az állomás működését két lépésben optimalizálják, külön a kapacitástervezést és külön a kiszolgálást, azonban a kettő nem független egymástól, így egy kétlépcsős sztochasztikus programozási feladatot kell megoldani.

A töltőállomás kapacitástervezésével és tarifaárazásával foglalkozik [50]. A töltést biztosító létesítményeket (pl. parkolóhelyek a repülőtereken, éttermeknél, hoteleknél, bevásárlóközpontoknál, dedikált gyorsöltőállomásoknál), egyfajta aggregátorként kezelik. A töltőállomásra sztochasztikusan, Poisson-folyamat szerint, konstans rátával érkező EV használók között a töltés megkezdése előtt egyszeri interakció történik. Az érkezéskor a felhasználó közli az energiaigényét, és a „türelmetlenségét”, ami alapján az aggregátor meghatározza a szolgáltatás árát (6. ábra).



6. ábra. Aggregátor döntéséhez szükséges információk, kommunikációs csatornák [50]

A „türelmetlen” vevők energiaigényét is kielégíti az aggregátor, azonban magasabb árat határoz meg érte, míg a „türelmes” vevők kedvezményesen kapják ugyanazt az energiamennyiséget, így korlátozni tudja a várható maximális egyidejű energiaigényt az állomáson. A várakozási sort M/G/∞ modellel képezték le.

## 3 Sztochasztikus modell

Ebben a fejezetben a töltőállomás méretezéshez szükséges modellek elméleti háttérét, felépítését, annak főbb elemeit mutatom be. A determinisztikus modell a folyamat jellegéből (járművek beérkezésének, kezdeti töltöttség, elérni kívánt töltöttségi szint stb. véletlenszerűsége) adódóan azonnal elvetendő, csak sztochasztikus modellel érdemes, értelmes megközelíteni a problémát.

### 3.1 Töltőállomással kapcsolatos modellek

A töltőállomással kapcsolatos modellezési feladatokat, külön-külön pontokban, logikailag csoportosítva vizsgálom a továbbiakban.

#### 3.1.1 Beérkezés, kialakuló várakozási sor

Az irodalomkutatás alapján elmondható, hogy a töltőállomásra való beérkezést és a kialakuló várakozási sort leggyakrabban a sorbanállás-elmélet eszközeivel kezelik. A korábban használt, de eddig meg nem magyarázott jelölések feloldásában [51] nyújtott segítséget.

A Kendall-féle jelölés-rendszert bevezetve könnyedén osztályozhatjuk az elemi sorbanállási rendszereket. Általános formájuk:

$$A/B/m/K/n/D$$

,ahol  $A$ : a beérkezési időközök eloszlásfüggvénye,  $B$ : a kiszolgálási idő eloszlásfüggvénye,  $m$ : a kiszolgálók száma,  $K$ : a rendszer befogadóképessége,  $n$ : az igényforrás számossága,  $D$ : a kiszolgálás  $D$  elv szerint történik.

Ha az említett eloszlások exponenciálisak, akkor az  $M$  jelölést használjuk. Továbbá, ha a befogadóképesség vagy az igényforrás számossága végtelen, és a kiszolgálás elve FIFO, akkor ezeket a jelöléseket elhagyjuk.

Így pl. az  $M/M/1$  egy egykiszolgálós Poisson beérkezéssel és exponenciális kiszolgálási idővel jellemzett rendszert jelöl. Az  $M/G/m$  rendszerrel a beérkezések Poisson-folyamat szerint történnek, a kiszolgálási idők általános eloszlásúak, és  $m$  szerver áll rendelkezésünkre. Az  $M/M/r/K/n$  rendszer esetén az igények egy  $n$  elemű forrásból származnak, ahol exponenciális eloszlású ideig tartózkodnak, a kiszolgálást  $r$

egység végzi exponenciális eloszlású ideig és a rendszerben egyidejűleg maximum  $K$  igény tartózkodhat. [51]

A Poisson-folyamat egy olyan sztochasztikus, számláló folyamat, amely (nem szimultán, azaz nem egyszerre történő) érkezések számát és időközzeit modellezi exponenciális eloszlású független valószínűségű változók segítségével. Az események memóriamentes folyamatok, az egyes időintervallumoknál nem számít, hogy mi történt a múltban. Homogén Poisson-folyamat esetén az események közötti idők  $\lambda$  paraméterrel jellemezhető exponenciális eloszlást követnek. [52] [53] [54] [55]

Továbbá a többször emlegetett Markov-láncokról pár gondolat. A Markov-lánc alatt a Markov-tulajdonságú sztochasztikus folyamatokat értjük. Tömören összefoglalva a Markov-tulajdonság annyit jelent, hogy a rendszer jövőbeli állapota egyértelműen meghatározható annak jelenbeli állapotának ismeretében, hiszen az magában foglalja az összes jövőt befolyásoló információt, nincs szükség a múltbeli állapotok ismeretére. [56]

A MATLAB környezetben felépített modellemben a beérkezések exponenciális eloszlást követnek, a kiszolgálási idők általános eloszlásúak (hogy pontosan milyenek, azt a 4.4.1 részben vizsgálom), a kiszolgálók száma véges (az állomáson lévő töltőfejek száma), ahogy a rendszer befogadóképessége is, az igényforrás tekinthető végtelennek, a kiszolgálás pedig alapvetően FIFO elv szerint történik, de vizsgáltam egyéb kiszolgálási elveket is. Egy ilyen rendszert M/G/c/K/D modellel lehet leírni. Ez már jóval bonyolultabb, mint az irodalomkutatás során olvasott cikkekben előszeretettel használt M/M/c modell, így analitikus elemzése már csak korlátozottan, vagy egyáltalán nem lehetséges, számítógépes szimulációval azonban kezelhető a probléma. A beérkezést jellemző  $\lambda$ -t konstansnak tekintettem, így különböző intenzitású járműforgalom mellett tudtam vizsgálni a szükséges töltőfejek számát. Ezen felül modelleztem az – irodalomkutatásban már bemutatott előnyökkel rendelkező – időfüggővé tett beérkezési intenzitást is, majd az így kapott eredményeket párhuzamosan értékeltem ki a konstans  $\lambda$  mellett kapott eredményekkel. (Az exponenciális eloszlást annak várható értékével is definiálhatjuk, amit  $\mu$ -vel jelölünk, és értéke megegyezik  $\lambda$  reciprokával. Alapértelmezetten a MATLAB-nak is  $\mu$ -t kell megadnunk, ha exponenciális eloszlást szeretnénk létrehozni.)

A töltőállomáson elhelyezett, elhelyezendő töltőket állandó teljesítményűnek, 50kW-osnak feltételeztem.

### 3.1.2 Kiszolgálás modellezése

A töltőállomáson várakozó járművek kiszolgálási sorrendjét több elv szerint lehet végezni. Ebben az alfejezetben bemutatom a főbb megoldásokat, melyekről bővebben [57]-[60]-ban írnak.

- LIFO (Last in first out)

Az utolsóként érkezett fogyasztót szolgáljuk ki először.

- Legrövidebb idő először

Azt a fogyasztót szolgáljuk ki először a sorban, akinek a beérkezéskori töltöttsége és az elérni kívánt töltöttségi szintje alapján becsült töltési ideje a legrövidebb.

- FIFO (First in first out)

Másnéven FCFS (first-come, first-served). Az (irodalomkutatás alapján is) egyik legelterjedtebb megközelítés. Azt a fogyasztót szolgáljuk ki először, aki legrégebb óta várakozik a sorban.

- Véletlenszerű sorrend

Lehetőség van a sorban álló ügyfelek közül sorsolással kiválasztani a következő töltendő járművet.

- Prioritást megengedve

A fenti lehetőségekkel kombinálható. Amennyiben egy felhasználó valamilyen oknál fogva elsőbbséget élvez (pl. kiemelt ügyfél, extra díjat fizetett a gyors kiszolgálásért stb.), a következő felszabaduló töltőnél ő kerül sorra, akkor is, ha vannak előtte a sorban.

A fenti megoldások közül alapértelmezésként a FIFO kiszolgálási elv mellett végeztem a szimulációkat, azonban megvizsgáltam a LIFO, véletlenszerű kiszolgálás és a legrövidebb idő először elv alapján történő kiszolgálásokat is.

#### 3.1.2.1 Ügyfelek viselkedésének hatása a kiszolgálásra

A valóság pontosabb modellezése érdekében (8 perc várható értékű, 1 perc szórású) normális eloszlás segítségével a sorba beálló ügyfelek „türelmetlenségét” is leképeztem. Amennyiben az ügyfél türelme elfogy, és rendelkezik elég töltöttséggel (legalább 30%-kal, mivel ez feltehetően elég, hogy elérjen egy másik töltőpontot), akkor



kiáll a sorból. (Végtelenül türelmes ügyfelek esetén is végeztem szimulációkat, melynek eredményeit a 4.3.3 részben mutatom be.)

Végezetül feltételeztem, hogy a beérkező járművek a már várakozó EV-k számától függetlenül beállnak a sorba, mindaddig, amíg van szabad hely a sorban.

## 3.2 Villamos autókkal kapcsolatos modellek

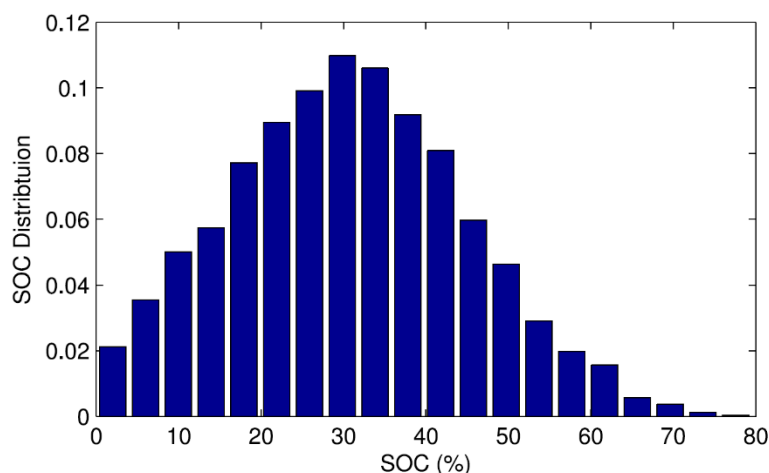
A töltőállomásra érkező villamos autókkal kapcsolatos modellezési feladatokat, hasonlóan a töltőállomáshoz, külön-külön pontokba szedve vizsgálom a következőkben.

### 3.2.1 Beérkezési intenzitás

Igaz, az autók érkeznek be a töltőállomásra, ám a beérkezési intenzitásuk, eloszlásuk a töltőállomás sorbanállás-modelljében van figyelembe véve, így itt nem ismétlen meg az ott leírtakat.

### 3.2.2 Érkezéskori töltöttség nagysága

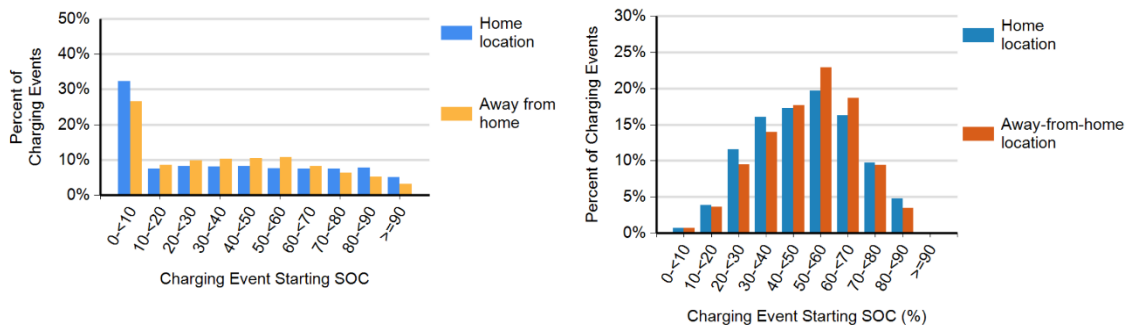
A kezdeti töltöttségi szintet (initial SoC) lehet becült értékek alapján modellezni (így tettek [33] szerzői is, akik csonkított normál eloszlással közelítették az érkezéskori töltöttségi szinteket, ahogy azt a 7. ábra is mutatja), vagy valódi mérések alapján készített statisztikák segítségével.



7. ábra. Beérkező járművek kezdeti töltöttségi szintjének eloszlása [33]

A statisztikák azonban jelentős eltérést mutatnak, a felhasználói szokásoktól, járműtípustól, vizsgált terület adottságaitól függően (milyen sűrűn vannak töltőállomások létesítve). Ezt szemlélteti a 8. ábra is. A méréseket ugyanaz a szervezet végezte,

ugyanazon régióban, azonos időintervallumot átfogóan, csupán más járműveket vizsgálva.



**8. ábra. Chevrolet Volt (bal), Nissan Leaf (jobb) típusú EV-k kezdeti töltöttségi szintjére vonatkozó statisztikák [61], [62]**

Ezen hisztogramokról számomra (a gyorstöltőállomások szempontjából) az Away from home (nem otthoni töltés) adatok relevánsak. A szimulációk során a különböző statisztikák végeredményre gyakorolt hatásait is vizsgáltam (lásd 4.3.1 fejezet).

### 3.2.3 Akkumulátorok, töltési karakterisztikák

Az akkumulátorok elméleti, gyakorlati háttéréről az 1.2.1 Akkumulátortechnológia fejezetben írtam.

A modellemben a járművek töltési karakterisztikáit [63] mérési eredményei alapján képeztem le a GRABIT [64] és a MATLAB-ba beépített Curve Fitting Tool segítségével. Az EV-k főbb adatait a 3. táblázat mutatja be.

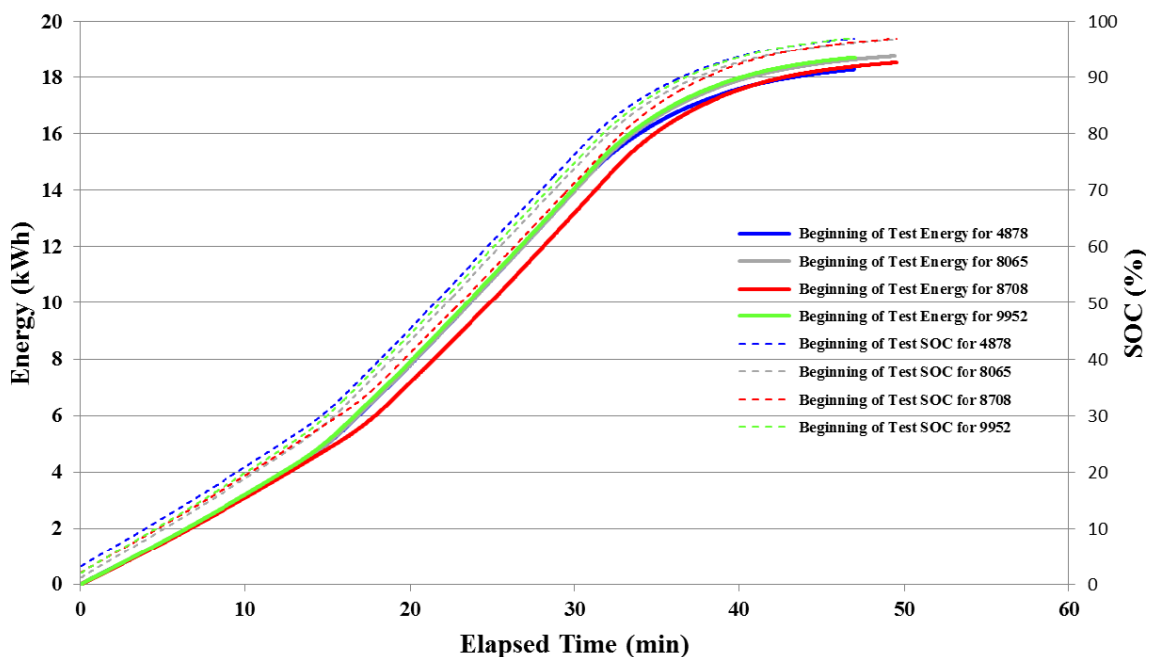
**3. táblázat. Modellezett járművek főbb műszaki paraméterei [63]**

Jármű típusa	Névleges DC töltőáram (A)	Akkumulátor kapacitás (kWh)/(Ah)
2012 Mitsubishi i-MiEV	120	16/50
2013 Nissan Leaf	120	24/66,2
2014 BMW i3	100	18,8/60
2015 Volkswagen e-Golf EV	100	24,2/75
2015 Kia Soul EV	120	27/75
2015 Chevrolet Spark EV	100	19/52

Az itt szereplő BEV-k közös tulajdonsága még az 50kW-os névleges töltőteliesség, a lítium-ion akkumulátor, illetve kompatibilitás a CHAdeMO töltési szabvánnyal.

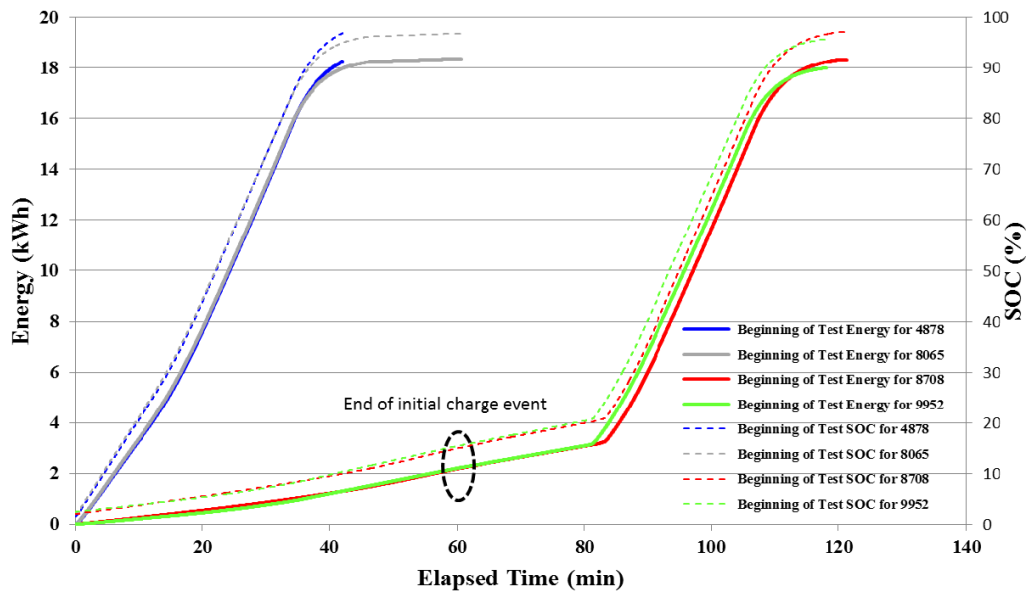
A töltési karakterisztikákon kívül a teljes töltési időt és a töltéshez szükséges összes energia nagyságát (a telepek feltöltésén kívül az akkumulátorok hőmérséklet szabályozására is szükséges energiát fordítani) is kimérték. A méréseket három különböző hőmérsékleten is elvégezték (0°C, 25°C és 50°C), az idő előrehaladtával többször megismételve, így az akkumulátorok teljesítményromlása megfigyelhetővé válik.

A karakterisztikák jellege a hőmérséklet növekedésével egyre jobban torzul. A mért EV-k közül ez a jelenség legjobban a Chevrolet Spark esetén figyelhető meg (9. ábra, 10. ábra). Amennyiben a torzulás olyan mértékűt ölt, ami már nem elfogadható, vagy az akkumulátorokra veszélyes lenne a környezeti hőmérsékleten felül a töltés által generált többlet hő, a jármű szabályozórendszere nem engedélyezi a töltést (pl. BMW i3 már 50°C-on sem engedte a töltés megkezdését).



9. ábra. Chevrolet Spark töltési karakterisztikája 0°C-on [65]

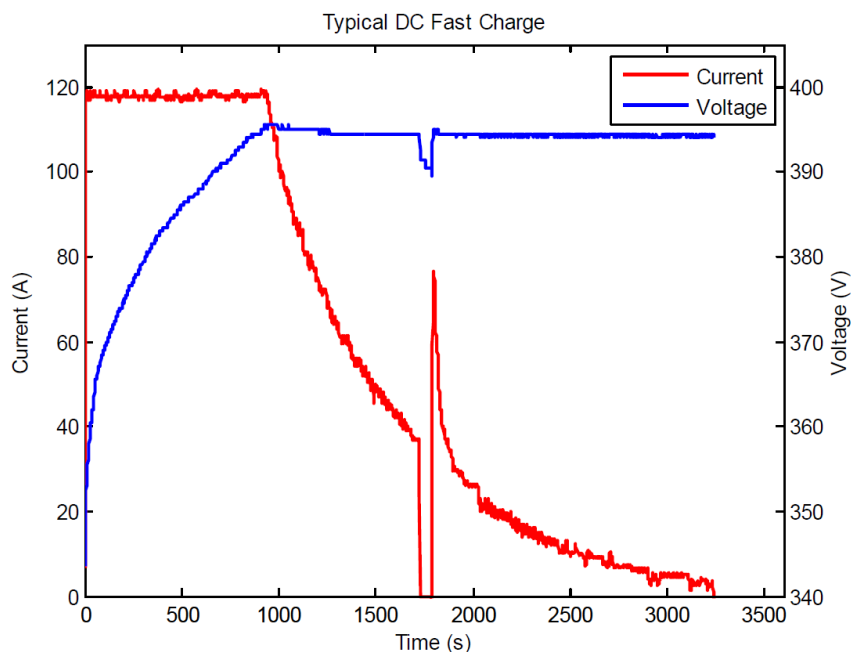
A folyamatos vonalak az akkumulátorba táplált energiát, míg a szaggatott vonalak az akkumulátor töltöttségi szintjét mutatják. Az egyes színek az azonos „kilóméteróraálláshoz” tartozó mérési eredményeket jelzik.



10. ábra. Chevrolet Spark töltési karakterisztikája 50°C-on [65]

Látható, hogy a mérések során az SoC egyik esetben sem éri el teljesen a 100%-os töltöttségi szintet, így a modellemben közelítéssel kellett élnem. Alapvetően két lehetőség közül választhattam, melyeket a 4.1.2 fejezetben részletezek.

A gyorstöltés (és lassú töltés) akkumulátorra gyakorolt hatásait vizsgálja [66], melynek keretein belül többek között töltési-, kisülési-, akkumulátor hőmérséklet-, kapacitás-, hatótávkarakterisztikákat is kimértek. Ezek közül kiemelném az itt bemutatott gyorstöltési karakterisztikát (11. ábra), mely egy 50kW-os gyorstöltő által töltött Nissan Leaf EV feszültség- és áram karakterisztikáját mutatja az idő függvényében.

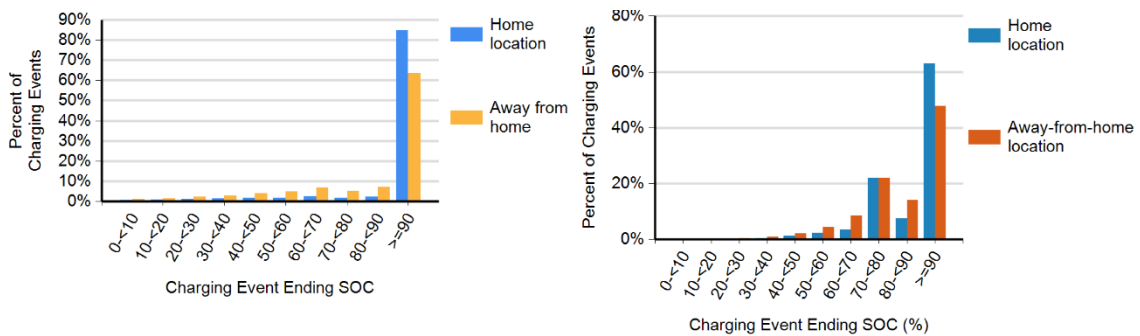


11. ábra. 2012 Nissan Leaf feszültség- és áram karakterisztikája a töltés során [66]

Ez összhangban van a CCCV modell (5. ábra) alapján elvárt karakterisztikával. A töltés felénél megfigyelhető, hogy egy rövid időre megáll a töltés (ez a kezdeti töltés, vagy angol kifejezéssel „initial charge” vége), majd egy újabb töltési szakasz kezdődik, ami a teljes töltöttségi szint eléréséig tart (angol kifejezés erre a szakaszra „top-off charge”).

### 3.2.4 Töltési idő

A töltési idő meghatározásához szükség van a beérkezéskori töltöttségi szint (3.2.2 Érkezéskori töltöttség nagysága), a töltési karakterisztika (3.2.3 Akkumulátorok, töltési karakterisztikák) és az elérni kívánt töltöttségi szint ismeretére (12. ábra). Ezek segítségével pedig már triviálisan kiszámítható a kérdéses idő.



12. ábra. Chevrolet Volt (bal), Nissan Leaf (jobb) típusú EV-k töltés végi töltöttségi szintjére vonatkozó statisztikák [61], [62]

A kezdeti töltöttségi szinttel kapcsolatban (8. ábra) megfogalmazott megállapítások itt is érvényesek, azaz, hogy az egyes statisztikák jelentős eltéréseket mutatnak egymáshoz képest, a korábban felsorolt okok miatt.

Mivel ezek a statisztikák nem elég finom felbontásúak az SoC-re vonatkozóan, ezért a felhasználókról feltételeztem, hogy az egyes százalék tartományokban lévő köztes SoC értékeket ugyanolyan valószínűséggel választják végcélként, ezt a viselkedést pedig az egyenletes eloszlás írja le.

## 4 Eredmények kiértékelése

Ebben a fejezetben bemutatom, kiértékelem a korábbi fejezetekben leírt elméleti háttér alapján felépített sztochasztikus modellem szimulációs eredményeit.

### 4.1 Alapvető modellezési megfontolások

A töltőállomás méretezéshez szükséges szimulációk futtatása előtt néhány alapvető modellezési kérdéssel kellett foglalkoznom. Ezek közül kettőt emelek ki, a szimulációs időlépcső felbontását és a töltési karakterisztika leképezését, melyek az eredmények pontosságára és hitelességére is nagy hatást gyakorolnak.

#### 4.1.1 Szimuláció felbontása

A felépített MATLAB programnak a felhasználó adhatja meg, hogy milyen finom (másodperces, vagy perces) felbontással szeretne dolgozni.

Értelemszerűen a másodperces felbontás jelentős többletszámítási igényt jelent, így a program futási ideje jelentősen megnő, ezért használata csak különösen indokolt esetben javasolt. Cserébe viszont pontosabb képet kapunk az egyes változók időbeli alakulásáról. Ezek ismeretében, valamint a feladat típusát figyelembe véve, már a felhasználó feladata döntenie a használni kívánt felbontásról.

A vizsgálataim során számomra elegendő volt a perces felbontás használata, hiszen a két felbontás mellett ugyanolyan konfigurációjú szimulációt lefuttatva, az eredmények minőségileg egyeztek, az azok közötti különbségek elhanyagolhatók voltak.

Fontos azonban itt megjegyezni, hogy a modell sztochasztikus jellegéből adódóan akkor sem kapunk tökéletesen egyező eredményeket, ha két teljesen azonosan felparaméterezett szimuláció eredményeit hasonlítjuk össze. Éppen ezért szükséges úgy megválasztani a szimulációs idő hosszát, hogy az kellően hosszú legyen, hogy a futtatás eredménye minőségileg megkülönböztethető legyen egy másképp felparaméterezett futtatás eredményétől, azonban elég rövidnek is kell lennie, hogy a program belátható időn belül lefusson.

Az általam vizsgált beérkezési intenzitások mellett a számomra ideális szimulációs időtartam három napnak adódott.

### **4.1.2 Töltési karakterisztika leképzése**

Mint azt már a 3.2.3 fejezetben említettem, a töltési karakterisztikák leképzésekor alapvetően két lehetőség közül választhattam.

Az első lehetőség, hogy a beérkező járművekhez legfeljebb olyan elérni kívánt töltöttségi szintet társítok, melyről még van mérési adat. Ekkor, ha olyan értéket kapnánk statisztika alapján, amiről már a töltési karakterisztika nem nyújt információt, mindaddig újra kell generálni a töltöttségi szintet a statisztika alapján, amíg olyan érték jön ki, amiről már nyilatkozik a karakterisztika (ez jelentős többszámítást eredményez), vagy a kapott töltöttségi szinthez legközelebb lévő ismert karakterisztika pontra módosítjuk a sorsolás eredményét (ami a statisztika torzítását jelenti). Ezzel a módszerrel azonban biztos, hogy nem becsüljük túl (vagy alul) a töltési karakterisztika nem ismert pontjait.

A második lehetőség, hogy a meglévő pontok alapján görbeillesztéssel (lineáris interpoláció segítségével) közelítem a karakterisztika hiányzó szakaszát. Ennél a módszernél a statisztikához hű maradok, azonban plusz bizonytalanság jelenik meg a karakterisztika nem ismert pontjainak becsléséből adódóan. Miután minden – általam vizsgált EV-re vonatkozó – becsült karakterisztika az ellenőrzés után hitelesnek tűnt, ezt a módszert választottam alapértelmezettnek a szimulációk során.

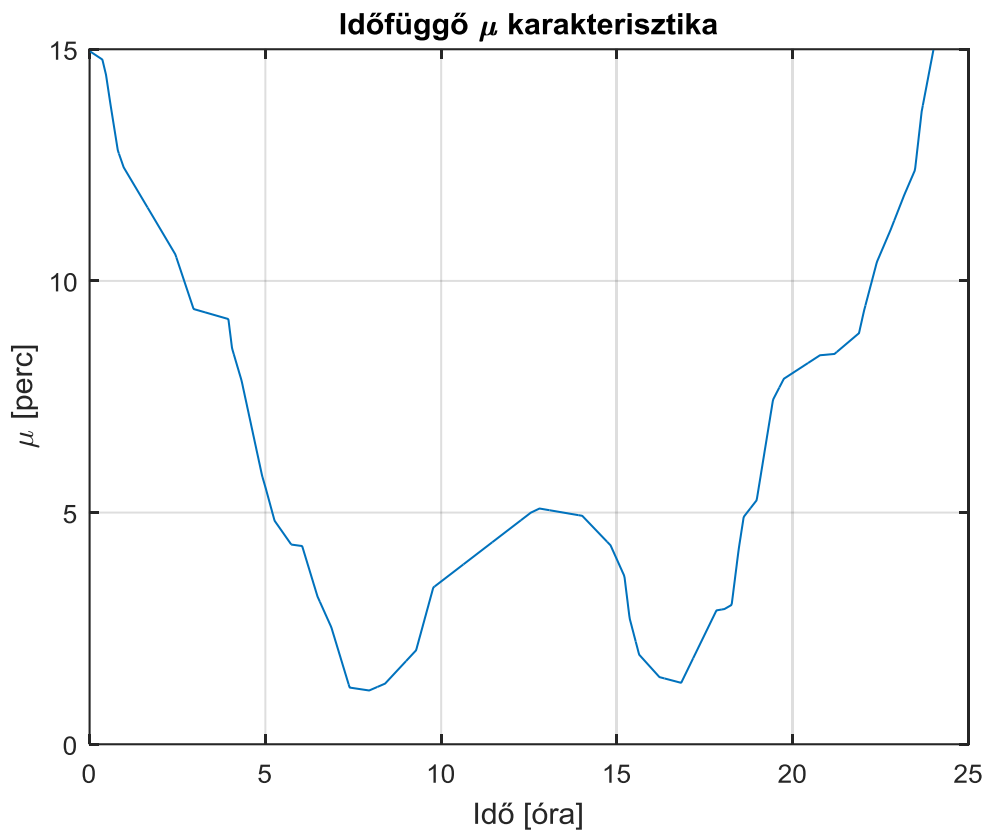
## **4.2 Töltőállomás méretezése**

Az elhelyezendő töltőfejek számának meghatározásakor több szempontot is szem előtt kell tartani. Szeretnénk elérni a töltőfejek lehető legjobb kihasználtságát, minimálisan megvárakoztatni az ügyfeleket, és mindemellett kiszolgálni a lehető legtöbb potenciális vásárlót. Ezeket a szempontokat vizsgálom a továbbiakban külön-külön.

Minden szimuláció alapértelmezett bemeneti paraméterkészlete egyezik, azaz a szimulációs időlépcső perces felbontású, a 25°C-on kimért töltési karakterisztikák nem ismert pontjait illesztett görbékkel közelítem, egy szimuláció pedig három napos időtartamot ölel fel. A kód valós töltöttségi szintre vonatkozó statisztikák alapján dolgozik (8. ábra, 12. ábra bal oldali statisztikái), a beérkezések várható értéke öt perc, a beérkező járművek típusát pedig véletlenszerűen sorsolom ki (3. táblázatban szereplő EV-k közül).

A szimulációkat időfüggetlen beérkezési ráta mellett végeztem, így vizsgálni tudtam különböző járműforgalmak mellett szükséges töltőfejek számát. Az esetek

túlnyomó többségében az irodalomkutatásban is ezt a megközelítést választották, azonban előfordult, hogy időfüggővé tették a beérkezési intenzitást. Annak érdekében, hogy átfogóbb képet kapjak a töltőállomás méretezésről, én is felkészítettem a MATLAB modellem az időfüggő  $\mu$  kezelésére. Ehhez szükségem volt egy időfüggő beérkezési ráta karakterisztikára, amit pontos forgalmi statisztikák hiányában a 13. ábra szerint becsültem.



**13. ábra. Időfüggő beérkezési ráta karakterisztika**

A karakterisztikában két terhelési csúcsot feltételeztem, egyet reggel 7:30 körül, egyet pedig délután 16:00 környékén. A forgalmi statisztikák természetesen állomásról állomásra teljesen eltérhetnek egymástól, azok lokációjától, díjszabásától, ügyfélkörének felhasználói szokásától függően.

Általánosságban elmondható, hogy minél pontosabb adatokat kap bemenetként a szimuláció, a program annál pontosabb eredményt fog szolgáltatni a felhasználónak.

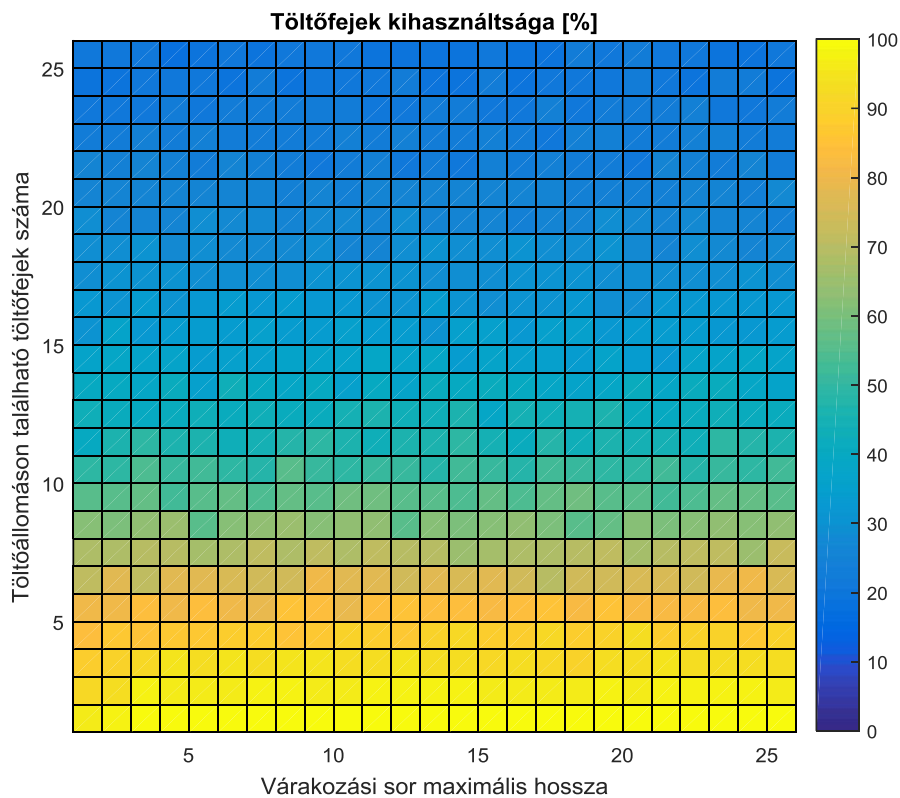
#### **4.2.1 Töltőfejek kihasználtsága**

A kihasználtság alakulásáról előzetesen azt feltételeztem, hogy a várakozási sor hosszának növelésével egyre jobban javulni fog, hiszen így növeljük az esélyét, hogy



azonnal beálljon egy sorban álló ügyfél a távozó EV helyére. Ezen kívül joggal feltételezhetjük, hogy magasabb járműforgalom mellett azonos töltőfej – várakozási sor arányok mellett javulnak a kihasználtság értékek.

Az erre vonatkozó szimulációs eredményeket a 14. ábra mutatja. A töltőfejek töltéssel töltött idejét a teljes szimulációs időtartamra vetítettem, így szemléletes százalékos értékeket kapunk.



**14. ábra. Töltőfejek százalékos kihasználtsága különböző töltőfej-várakozási sor arányok mellett**

Az előzetes várakozásaimmal ellentétben a várakozási sor növelése nem befolyásolta effektíven a töltőfejek kihasználtságát. Nézzük meg mi okozta ezt, az alábbi eseteken keresztül:

- a) 1 töltőfej – 1 hosszú sor
- b) 1 töltőfej – 25 hosszú sor
- c) 25 töltőfej – 1 hosszú sor
- d) 25 töltőfej – 25 hosszú sor

Az a) és b) esetekben közel 100%-os, míg a c) és d) párosnál csupán 20%-os kihasználtságot kaptunk.

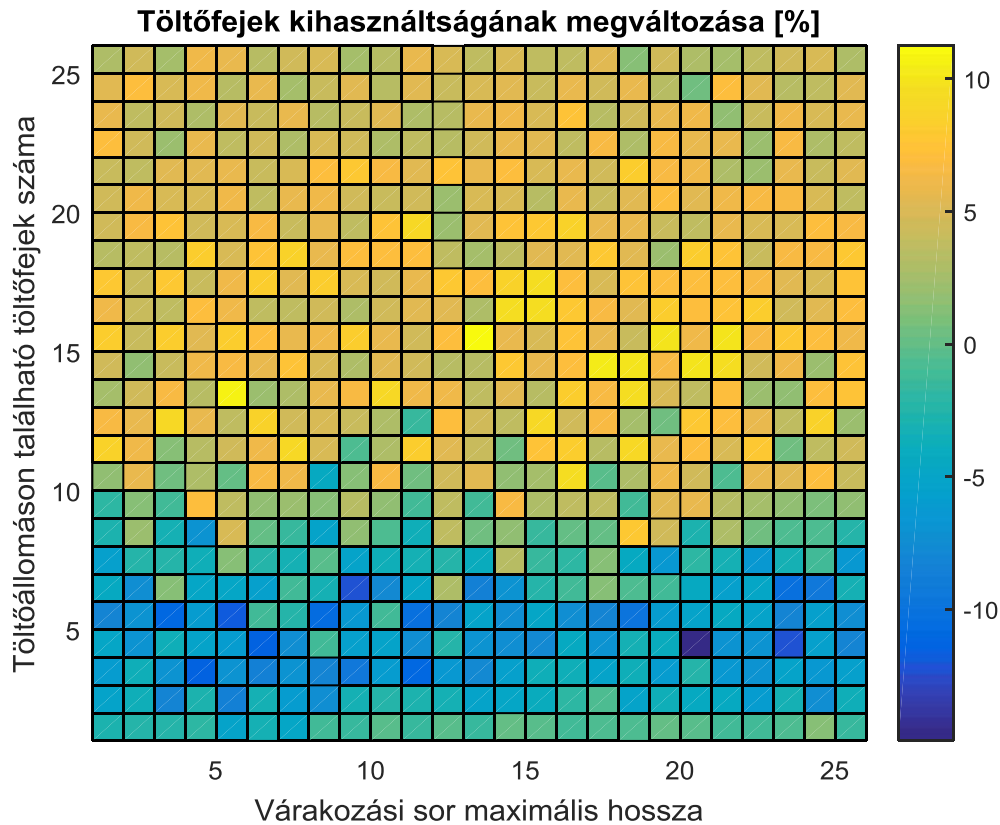
Az a) esetben érthetően magas a kihasználtság, még ritkább beérkezések mellett is (36. ábra, 37. ábra), hiszen ha az átlagos töltési időnél gyakoribb a beérkezések között eltelt idő, akkor várhatóan mindig lesz valaki a sorban, aki egyből elkezdi használni a megüresedő töltőfejet. A b) esetben ugyanez mondható el, a különbség csak annyi a hosszabb sorral, hogy tovább növelhetjük az azonnali pótlás esélyét, azonban mint látjuk, ez a növekmény a vártnál kisebb, mivel már alapból is kiemelkedő értéket kaptunk. Ezekhez képest a c) esetben romlik a kihasználtság, hiszen egyszerűen nincs elég érkezés, hogy ilyen sok töltőfej fokozatosan használatban legyen. Mivel már így sincs elég beérkezés, ezért – az amúgy feltehetően az idő döntő részében üres – sor hosszát növelve d) esetben érthetően nem lesz javulás a kihasználtságban.

Ezen szélsőséges esetek megmagyarázásával már a köztes töltőfej – várakozási sor párosításokhoz tartozó eredmények is értelmezhetőek.

Ezek alapján elmondhatjuk, hogy amennyiben a kihasználtságot tartjuk szem előtt, akkor elsősorban a beérkezési intenzitásról kell pontos adatokkal rendelkezünk, majd azok alapján meghatározni a töltőállomáson elhelyezendő töltőfejek számát, a várakozási sor túlméretezése (parkoló nagysága) ekkor nem szempont.

#### **4.2.1.1 Kihasználtság időfüggő beérkezési ráta esetén**

Az eredményen (15. ábra) látottakat két részre bonthatjuk, a 10 töltőfej alatti és feletti tartományra. Ennek a határvonalnak a karakterisztika jellege az oka.



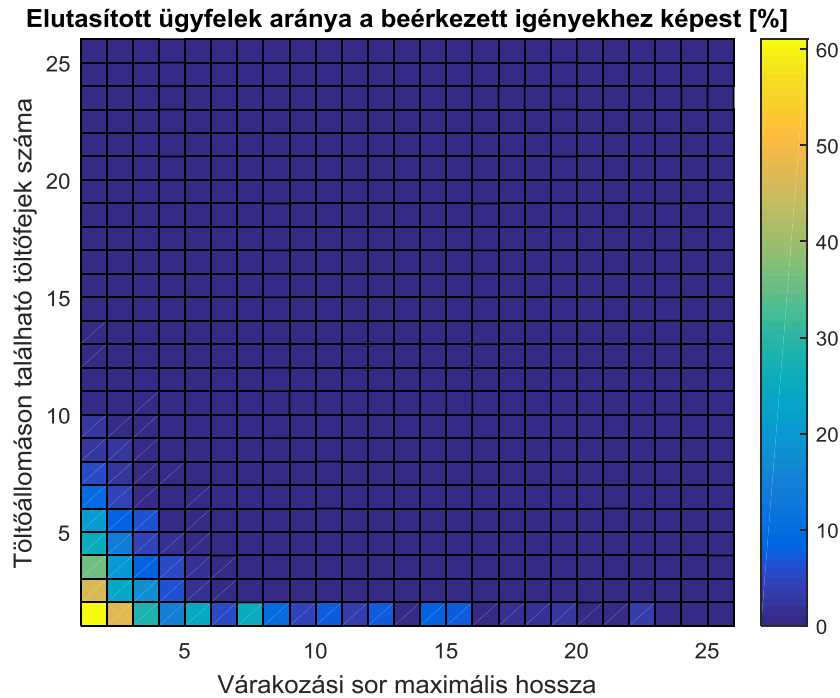
15. ábra. Töltőfejek kihasználtságának megváltozása időfüggő  $\mu$  esetén

A csúcsidőszak alatt beérkező plusz töltési igények csak akkor tudnak extra kihasználtságra változni, ha van elég töltőfej (esetünkben ez épp 10 darab), ellenkező esetben azokat el kell utasítani, és a völgyidőszakbeli ritka beérkezések miatt az átlagos kihasználtság rosszabb lesz a viszonyítási alapul vett 5 perces rátához képest.

#### 4.2.2 A lehető legtöbb ügyfél kiszolgálása/legkevesebb ügyfél elvesztése

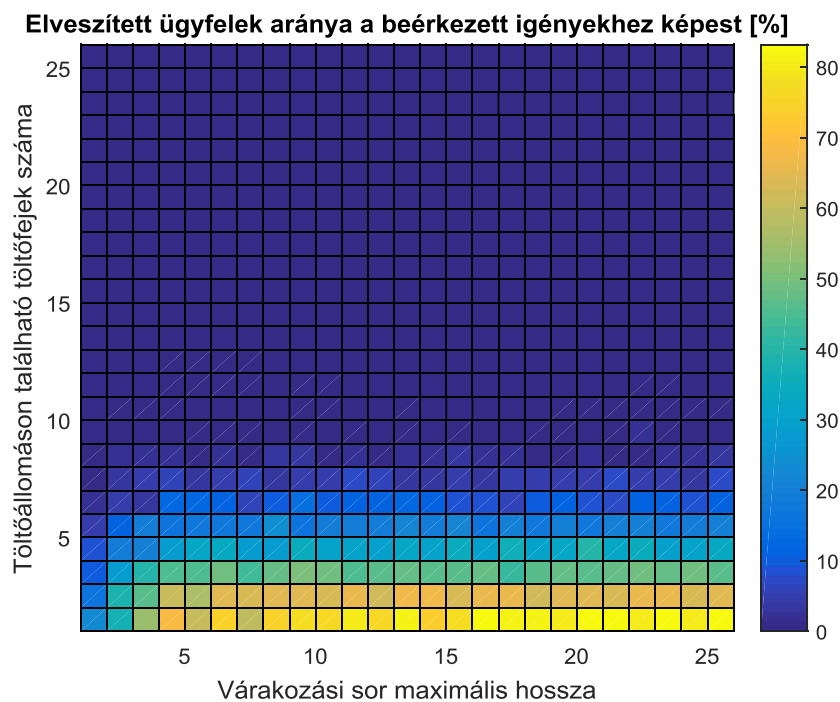
Az állomásra betérő ügyfelekkel alapvetően három dolog történhet

- a várakozási sorba helyhiány miatt nem tud beállni, az ügyfelet el kell utasítani (16. ábra),
- beáll a várakozási sorba, azonban a túl hosszú várakozási idő miatt elfogy a türelme, ekkor (ha van elegendő töltöttsége) kiáll a sorból (17. ábra),
- beáll a várakozási sorba, majd ha lesz szabad töltőfej, feltölti a járművet a kívánt töltöttségi szintre, és elégedetten távozik az állomásról (18. ábra).



16. ábra. Elutasított ügyfelek aránya a beérkezett igényekhez képest

Az elutasítandó ügyfelek száma csökkenthető, ha elegendően hosszú a várakozási sor, vagy ha megnöveljük az állomáson található töltőfejek számát. Az elutasított ügyfelek arányát mutató hő térkép még szemléletesebb, ha sűrűbb beérkezést állítunk be a szimuláció alatt. Ekkor természetesen az azonos konfigurációkhoz tartozó értékek megnövekednek (38. ábra).

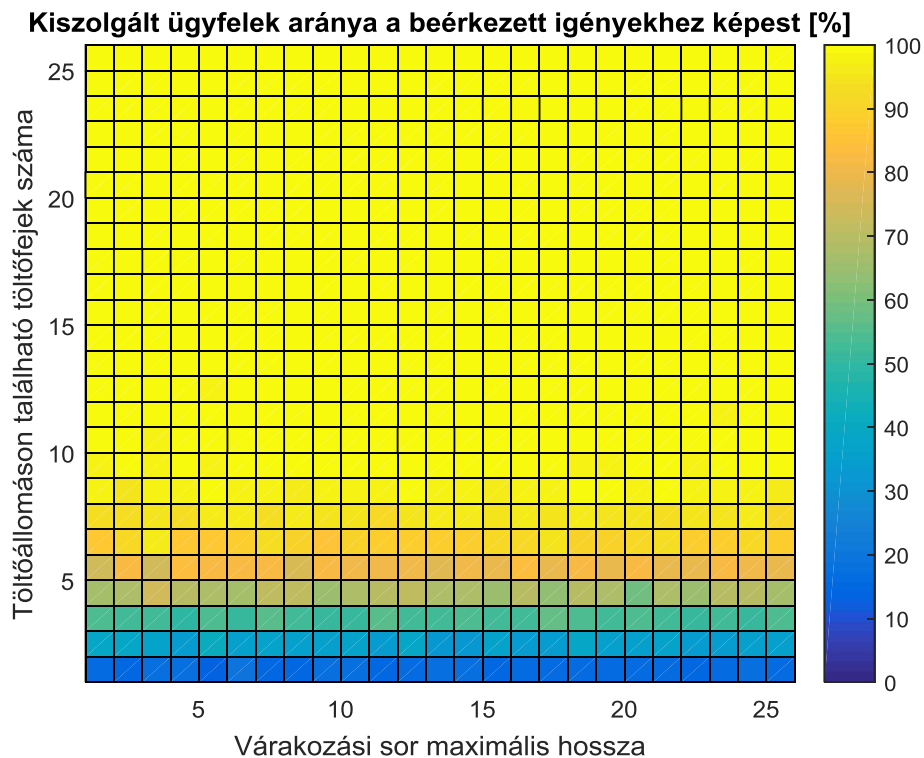


17. ábra. Elveszített ügyfelek aránya a beérkezett igényekhez képest

Megfigyelhető, hogy az elveszített ügyfelek aránya azonos töltőfejszám mellett, növekvő sorhossz mellett sem növekszik tetszőlegesen sokáig. Ennek oka, hogy a sorhossz növelésével hiába nőnek várhatóan az átlagos várakozási idők, így pedig egyre több ügyfélnek fogy el a türelme, a kiálláshoz szükséges legalább 30%-os töltöttségi szint megmarad, ami felső korlátot szab a kiálló ügyfelek számának.

Továbbá az is megfigyelhető, hogy az állomáson lévő töltőfejek számának növekedésével az elveszített ügyfelek aránya is egyre kisebb értékekhez konvergál. Ez érthető is, hiszen több töltőfejjel arányosan több ügyfelet is ki tudunk szolgálni azonos érkezési ráta mellett, így a sor gyorsabban halad, egyre inkább nő az ügyfelek tőrészhatáron belüli kiszolgálásának valószínűsége.

(A sűrűbb érkezési rátához tartozó eredményeket a 39. ábra mutatja.)



**18. ábra. Kiszolgált ügyfelek aránya a beérkezett igényekhez képest**

Amennyiben egy jármű beáll a sorba, és nem fogy el a türelme mielőtt sorra kerülhetne, akkor biztosan ki lesz szolgálva. Az eredmény helyességéről meggyőződhetünk, ha figyelembe vesszük azokat az EV-ket is, melyek a szimulációs időtartam végén még épp töltődnek, valamint az elutasított és elveszített ügyfelekre vonatkozó hőtérképeket is. Ha ezeket összegezzük, akkor már szimuláció nélkül is megkaphatnánk a kiszolgálásra vonatkozó eredményt. Mivel ez tökéletesen megfelel a

szimuláció által szolgáltatott hőtésképpel (18. ábra), ezért a kapott szimulációs eredmény helyes. (A sűrűbb érkezési rátához tartozó eredményeket a 40. ábra mutatja.)

#### **4.2.2.1 Elutasított, elveszített, kiszolgált ügyfelek aránya időfüggő beérkezési ráta mellett**

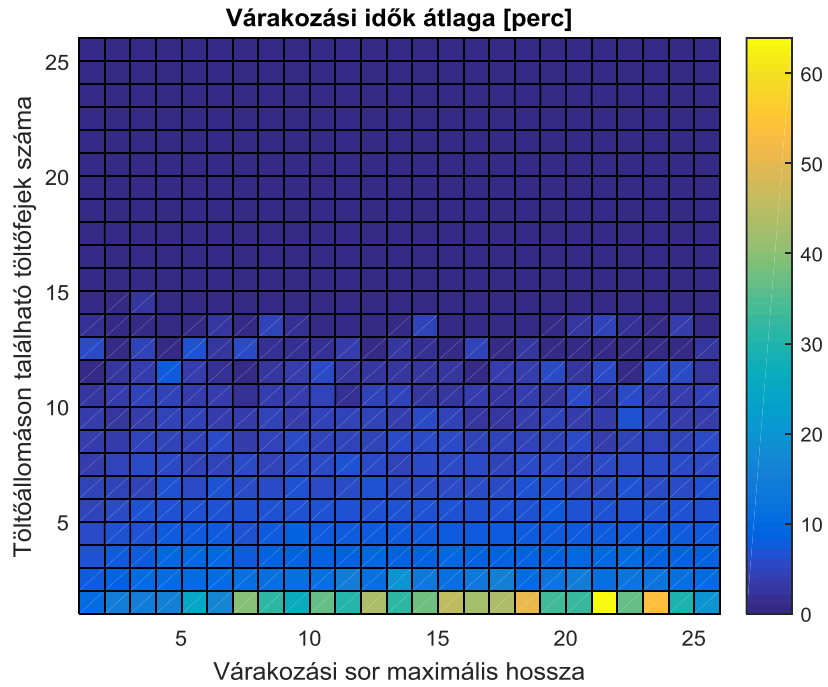
Az elutasított ügyfelek arányára vonatkozó eredmény (41. ábra) jellegre a konstans  $\mu = 2$  perc mellett kapott eredményekre (42. ábra) hasonlít, hiszen  $\mu(t)$  esetén az elutasított ügyfelek arányát a csúcsidőszakok határozzák meg, ahol is  $\mu \cong 1 - 2$  perc.

Az elveszített ügyfelek arányának alakulására (43. ábra) is elmondható, hogy a csúcsidőszaki forgalom lesz legnagyobb hatással (vessük ezt össze a konstans  $\mu = 2$  perc konfigurációjú szimuláció eredményeivel, amit a 39. ábra mutat).

A kiszolgált ügyfelek aránya pedig már – a korábban leírt kiegészítéssel – megkapható az elveszített és elutasított ügyfelek arányának ismeretében (44. ábra).

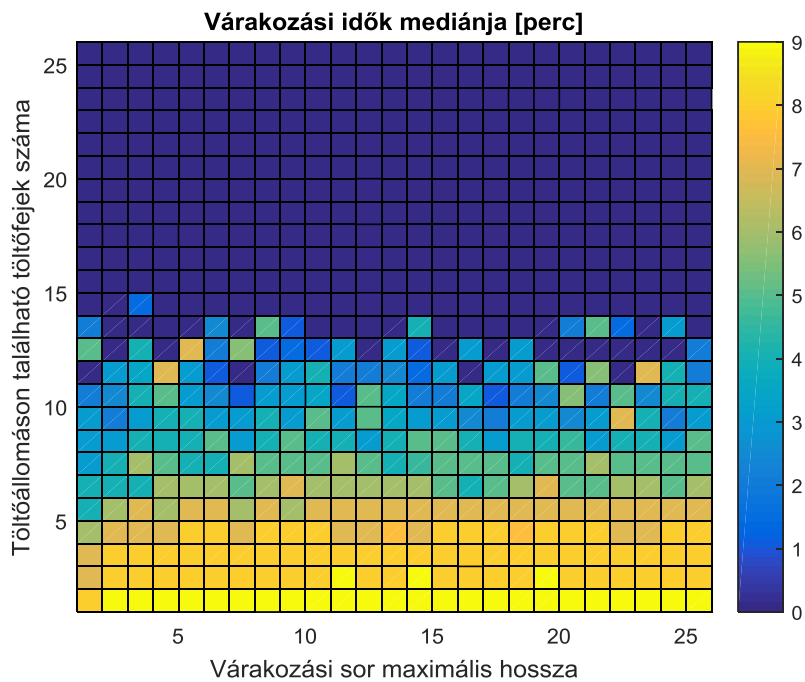
#### **4.2.3 Minimális várakozási idő**

Míg a korábbi pontokban adott volt, mi is a vizsgálandó szempontot egyértelműen leíró mutató, addig a minimális várakozási időnél már az azt jellemző mérőszám megválasztását is át kell gondolni. Mivel már egy konkrét paraméterkészlettel ellátott szimuláció is több száz, több ezer sorbaállást generál, ezért körültekintően kell megválasztani, hogy milyen statisztikai mutatóval jellemezzük ezeket. Első gondolat lehetne, hogy ezen idők átlagát tekintjük (19. ábra), azonban az átlagnak, mint statisztikai mutatónak nagy hátránya, hogy azt már néhány szélsőséges eredmény is képes erőteljesen eltorzítani.



**19. ábra. Várakozási idők átlaga**

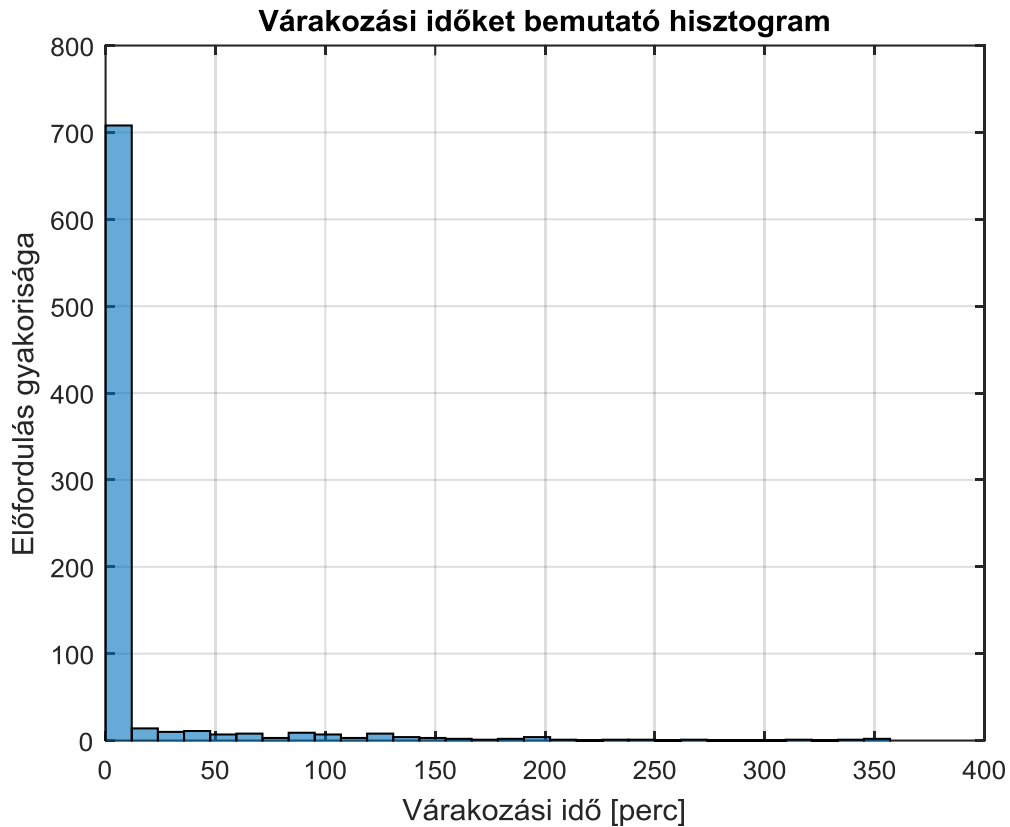
Éppen ezért célszerűbb a várakozási értékek mediánját venni, amit a 20. ábra mutat.



**20. ábra. Várakozási idők mediánja**

Ezen már jobban megfigyelhető a várakozási idők és a várakozási sor – töltőfej darabszám viszony közötti kapcsolat (ami még hangsúlyosabban előjön sűrűbb beérkezések mellett, amit a 45. ábra mutat).

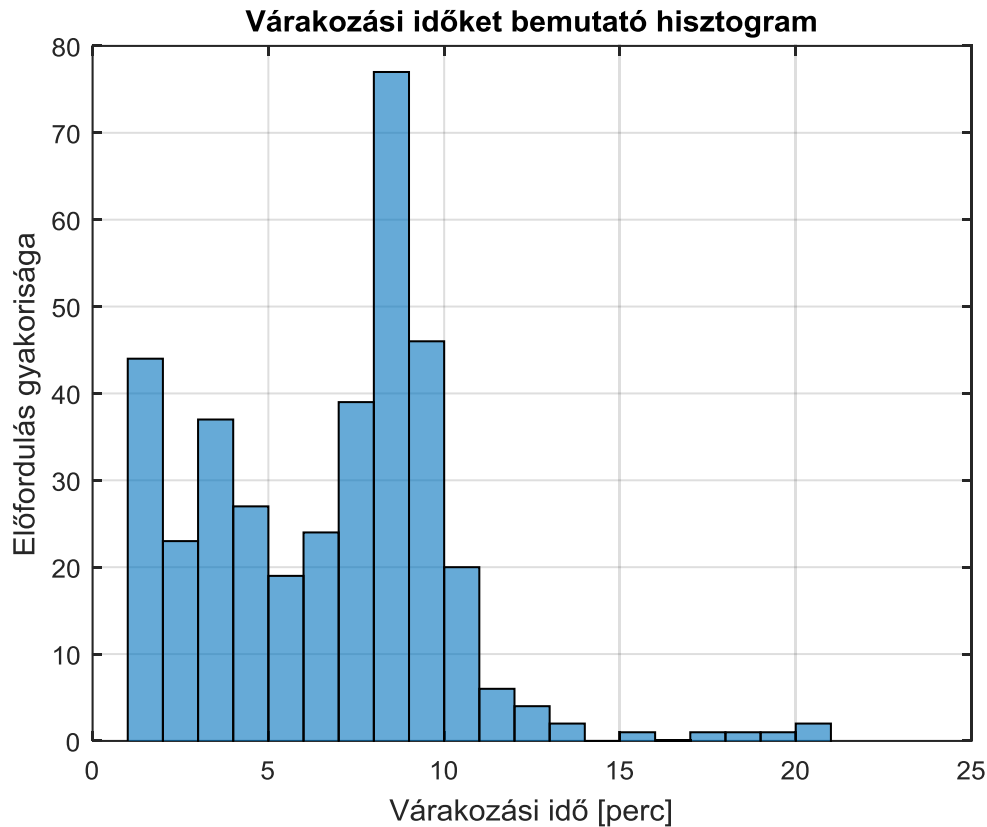
A két statisztikai mutató közötti eltérést megérthetjük, ha megnézzük, milyen eloszlást is mutatnak a várakozási idők a legtöbb várakozó EV-vel rendelkező (1 töltőfej – 25 hosszú várakozási sor páros) konfiguráció mellett (21. ábra).



**21. ábra. Várakozási időket bemutató hisztogram**

Az itt látottakat számszerűsítve elmondható, hogy a várakozási idő a 10 percet az esetek 14,9%-ában, a 30 percet 10,4%-ában, az 50 percet 8,4%-ban, míg a 100 percet az esetek 4,9%-ban haladja meg. Ezek azok a szituációk, amikor az EV kénytelen kivárni a sorát, még akkor is, ha elfogyott a türelme, mivel nincs elég töltőfeje, hogy kiálljon a sorból. Ennél a konkrét kiemelt esetenél azért is alakulhatnak ki extrém magas várakozási idők, mivel a töltőállomás a beérkezési intenzitáshoz mérten jelentősen alul van méretezve. Ha megnöveljük a töltőfejek számát 5-re, máris kiiktathatjuk az ilyen extrém hosszú várakozásokat, kellően felgyorsítva a kiszolgálást (22. ábra).





**22. ábra. Várakozási időket bemutató hisztogram, megnövelt töltőfejszám mellett**

A fentieket figyelembe véve elmondhatjuk, hogy egy statisztikai mutató iránymutatásnak megfelelő lehet, azonban az igazán pontos kép alkotásához külön-külön vizsgálni kell az egyes konfigurációkhoz tartozó várakozási idő hisztogramokat is.

#### **4.2.3.1 Várakozási idők alakulása időben változó beérkezési ráta mellett**

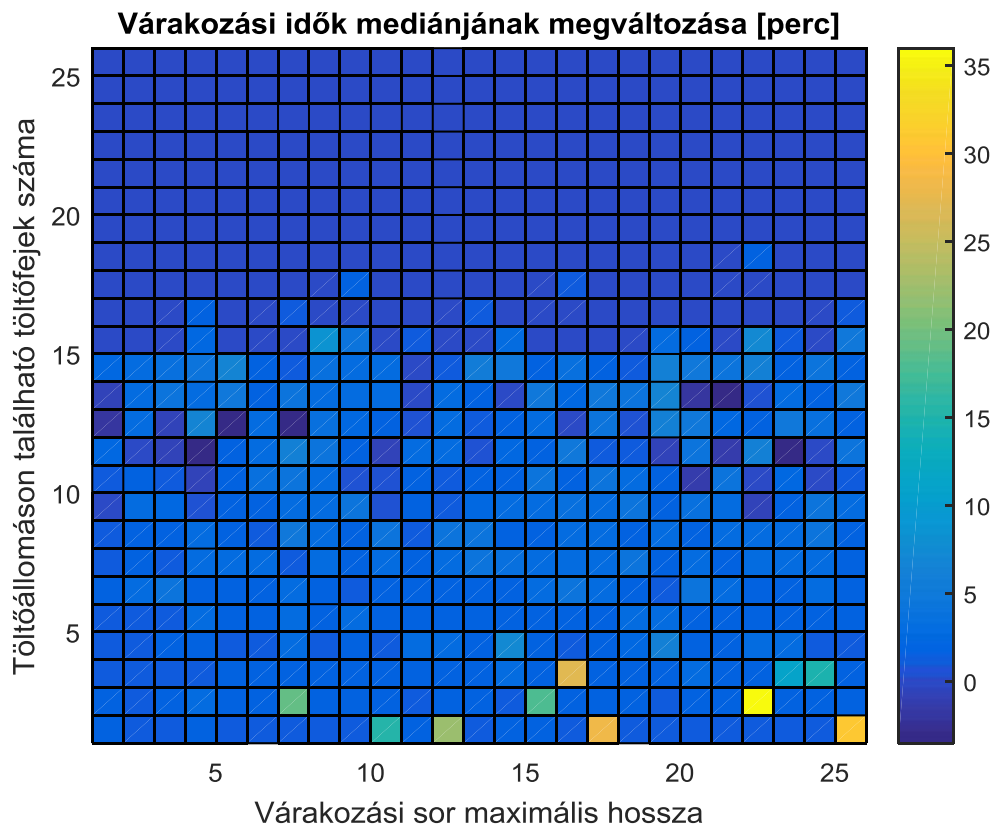
A várakozási idők mediánját bemutató hőterkép (46. ábra) első ránézésre hasonlíthat a sűrűbb beérkezések mellett kapott eredményekre (45. ábra), azonban jobban megnézve őket láthatjuk, hogy az összetettebb – időfüggő  $\mu(t)$  – folyamat esetén már az eredmények nem mutatnak olyan szabályosságot, mint azt konstans  $\mu$  mellett tették. Ez az árnyaltság még egyértelműbbé válik, ha az egyes konfigurációkhoz tartozó hisztogramokat külön-külön összehasonlítjuk.

### **4.3 Paraméterek változtatásának hatásai**

A továbbiakban azt vizsgálom, hogy milyen hatással van az eredményekre a 4.2 fejezet elején bemutatott alap paraméterek megváltoztatása.

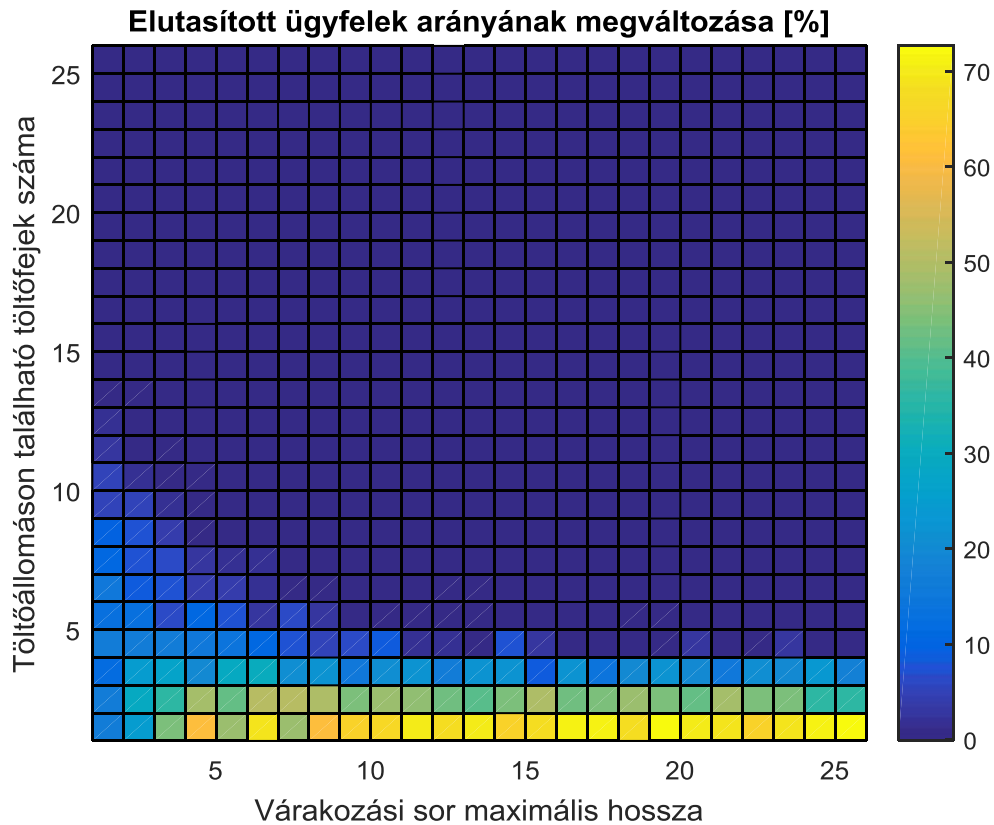
### 4.3.1 Statisztikák

Ezúttal a 8. ábra és a 12. ábra jobboldali statisztikái szerint rendelttem a kezdeti és távozáskori töltöttségi szinteket az EV-khez. Ezek az adatok közvetlenül hatással vannak a töltési időre, ezért az elutasított (a korábban bemutatott összefüggések miatt ezen keresztül az elveszített és kiszolgált) ügyfelek arányának változására számítottam.



23. ábra. Várakozási idők mediánjainak megváltozása módosított statisztikák mellett

Látható, hogy az EV-k tovább tartózkodtak az állomáson (23. ábra), ezért több beérkező igényt kellett elutasítani (24. ábra), az eredmények tehát megfeleltek a várakozásaimnak.



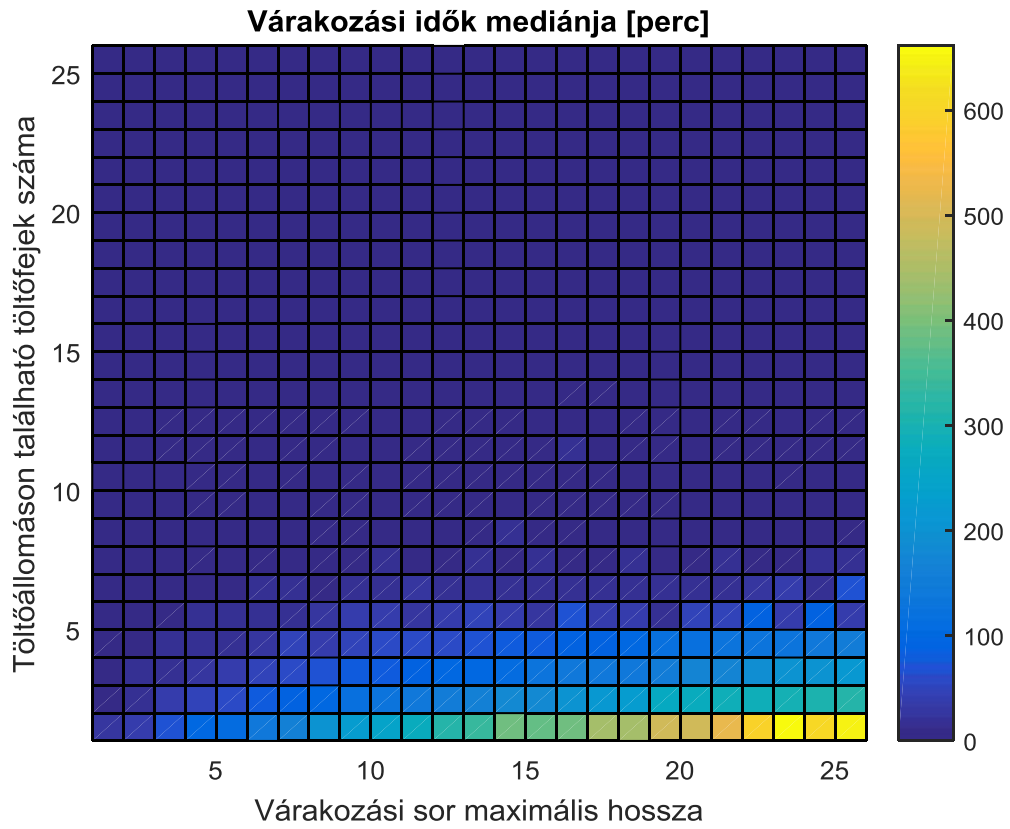
24. ábra. Elutasított ügyfelek arányának megváltozása módosított statisztikák esetén

### 4.3.2 Járműtípusok

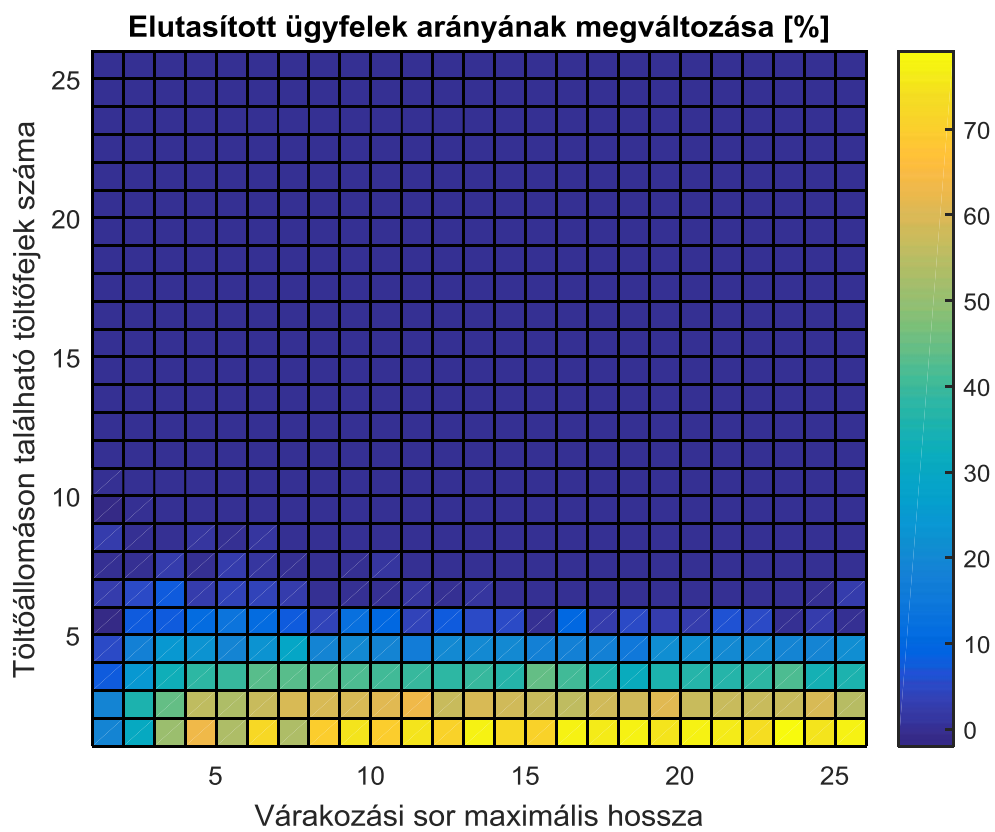
Alapértelmezésben hat különböző EV szerepelt a szimulációban, melyek azonos valószínűséggel érkeztek be a töltőállomásra. Végeztem azonban hat különböző szimulációt melyekben mindig csak egyféle EV típust engedtem beérkezni az állomásra. Azt vártam, hogy az újabb járműtípusok (BMW i3, Volkswagen e-Golf) esetén a kedvezőbb töltési karakterisztikák gyorsabb töltési időket eredményeznek, ami miatt a várakozási sor gyorsabban haladhat, így több ügyfelet tudunk kiszolgálni, kevesebb igényt kell elutasítani, azonban ilyen hatást nem tudtam kimutatni.

### 4.3.3 Ügyfelek türelmetlensége

Megvizsgáltam mi történik, ha az ügyfelek végtelenül türelmesek, azaz mindenki megvárja a sorra kerülését, függetlenül attól, hogy ahhoz mennyi időt kell várni. Az eredményeket a 25. ábra és a 26. ábra mutatja.



25. ábra. Várakozási idők mediánja, végtelenül türelmes ügyfelek esetén

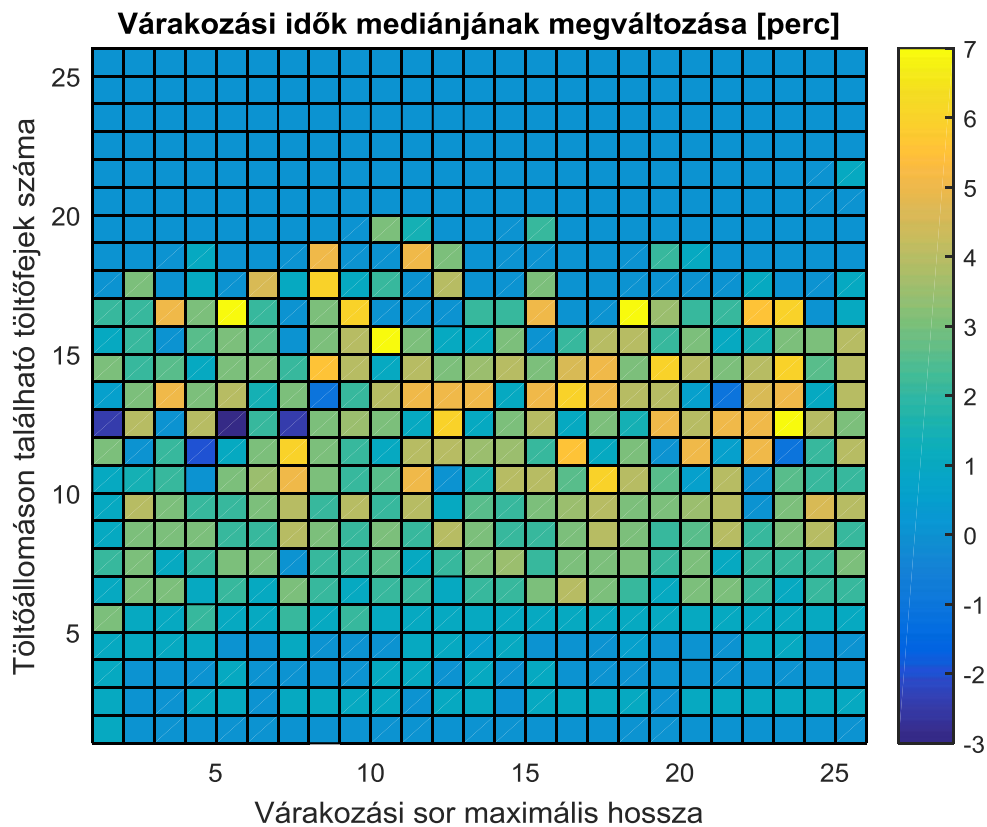


26. ábra. Elutasított ügyfelek arányának megváltozása, végtelenül türelmes ügyfelek mellett

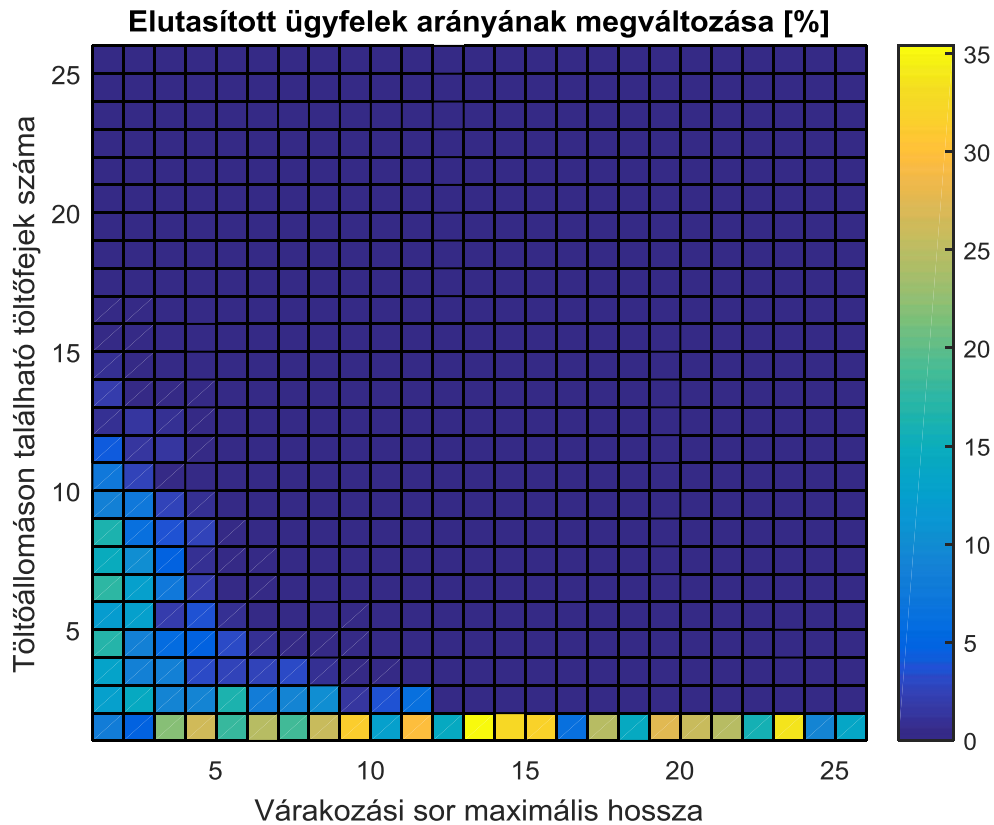
Természetesen ebben a konfigurációban nem veszítünk el egy ügyfelet se, így az EV-k tovább tartózkodnak az állomáson (a várakozási idők jelentősen megnőnek, ahogy azt a 25. ábra is mutatja), amiből az következik, hogy jóval több beérkező igényt kell elutasítanunk (26. ábra).

#### 4.3.4 Hőmérséklet

A 3.2.3 fejezetben bemutatam a töltési karakterisztikák hőmérsékletfüggését. Általánosságban elmondható, hogy az általam vizsgált EV-k 25°C-on érvényes töltési karakterisztikái gyorsabb töltést eredményeznek a 0°C-on érvényeseknél. A hosszabb várakozási idők (27. ábra) és a megnövekedett elutasított ügyfélszám (28. ábra) is ezt támasztja alá.



27. ábra. Várakozási idők megváltozása, 0°C-on történő töltés mellett



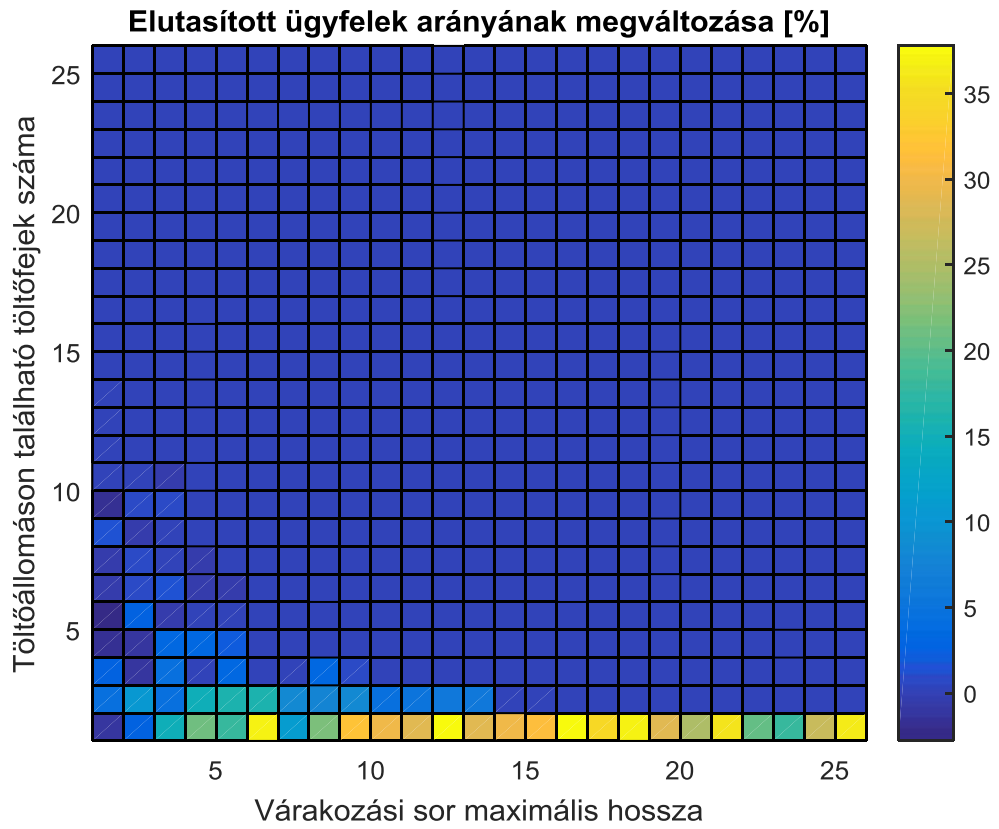
28. ábra. Elutasított ügyfelek aránya, 0°C-on történő töltés mellett

### 4.3.5 Kiszolgálási mód

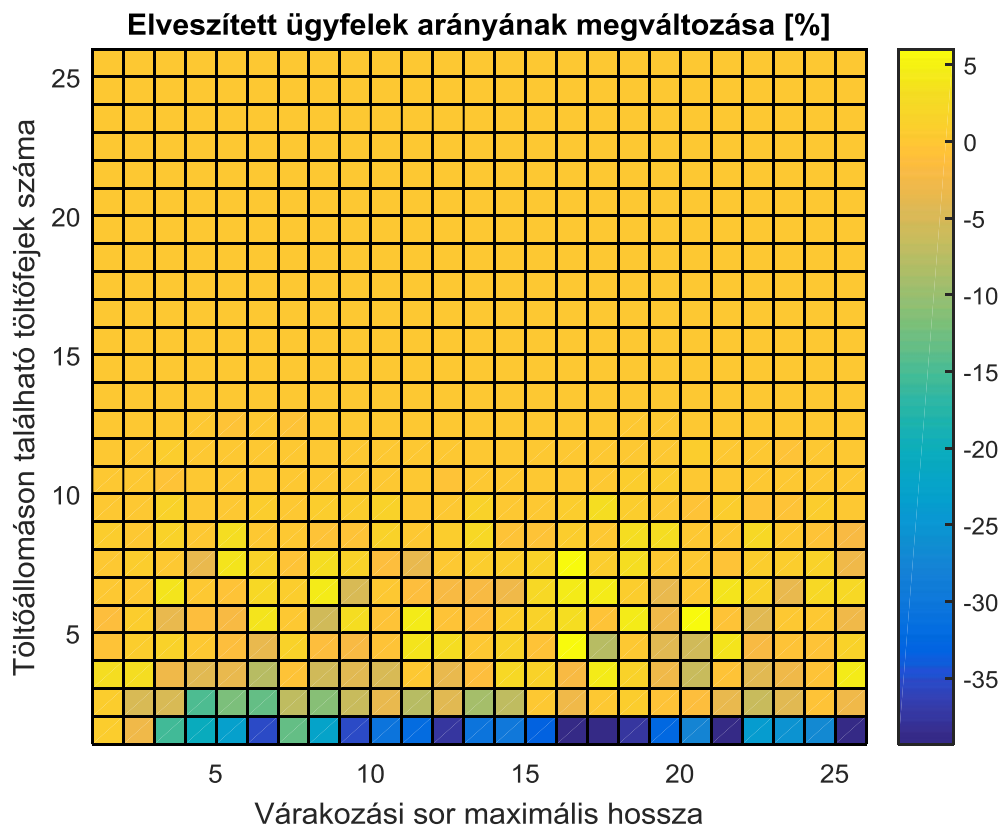
Végezetül megnéztem, milyen különbségek adódnak, ha a FIFO helyett más – 3.1.2-ben bemutatott – kiszolgálási elv szerint történik az állomáson a kiszolgálás.

Előzetesen jelentős különbségekre számítottam az eltérő kiszolgálási módok alkalmazásától, azonban, mivel kellően hosszú időtartamot nézek, a minőségi mutatókat döntően a beérkezési ráta és a töltőállomás méretezés, és nem pedig a kiszolgálási mód határozza meg.

Elmondható azonban, hogy LIFO kiszolgálás mellett, alulméretezett állomás esetén az elutasított ügyfelek aránya nőtt (29. ábra), az elveszített ügyfelek száma pedig csökkent (30. ábra).



29. ábra. Elutasított ügyfelek arányának megváltozása, LIFO kiszolgálás mellett



30. ábra. Elveszített ügyfelek arányának megváltozása, LIFO kiszolgálás mellett

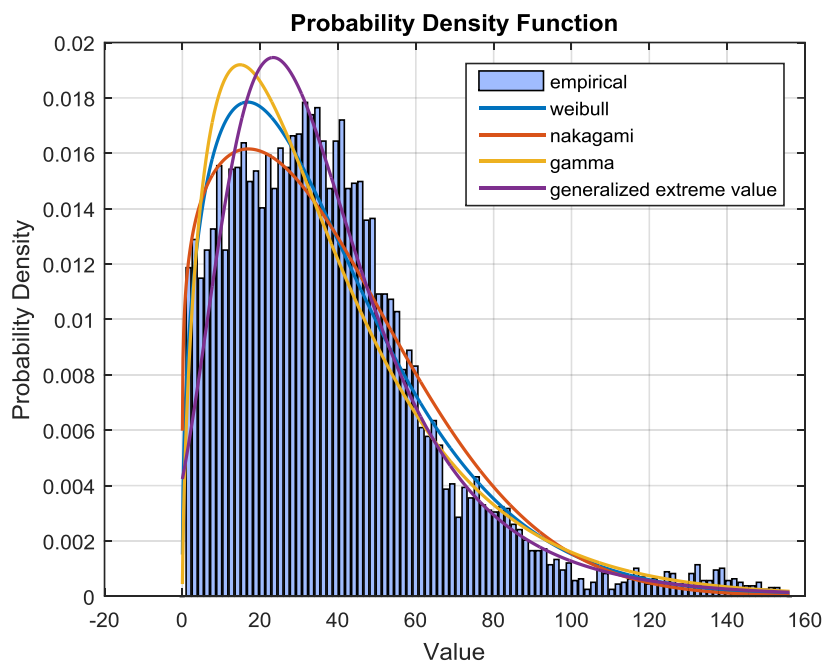
Legrövidebb töltési idő elvet alkalmazva is sikerült csökkenteni az elveszített ügyfelek számát. A véletlenszerű ügyfél kiválasztás azonban nem mutatott érdemi eltérést a FIFO mellett kapott eredményekhez képest.

## 4.4 Szimulációból kinyerhető egyéb adatok

A MATLAB programot úgy építettem fel, hogy a korábban bemutatott főbb minőségi mutatókon kívül egyéb értékes adatok is kinyerhetők legyenek belőle, melyek segítségével átfogóbb képet kaphatunk a töltőállomáson zajló folyamatokról.

### 4.4.1 Töltési idők eloszlása

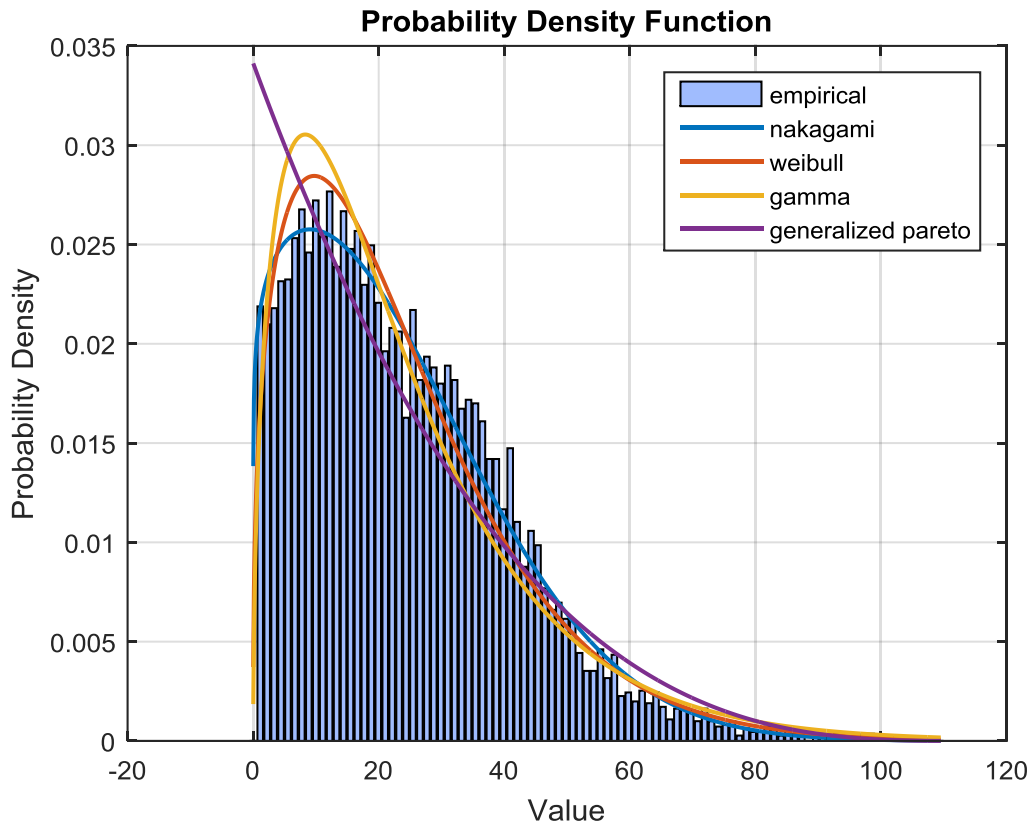
A töltési idők eloszlását mutatja be a 31. ábra, melyre a legjobban illeszkedő sűrűségfüggvényt [67] segítségével határoztam meg. Az ábrán már az előfordulási gyakoriságot normalizálva látjuk, hogy valódi sűrűségfüggvényeket kapjunk. A vízszintes tengelyen pedig a töltési idők láthatóak perc dimenzióban. Az illesztés alapján a töltési idők eloszlását, azaz a kiszolgálást legjobban a Weibull-eloszlás írja le.



31. ábra. Töltési idők eloszlására illesztett sűrűségfüggvények

Amennyiben a 4.1.2-ben bemutatott másik módszer szerint kezelem a karakterisztikákat, azaz csak olyan pontokat engedek meg felvenni, melyekről biztosan van mért adat, akkor a 32. ábra szerint módosulnak a töltési idők.



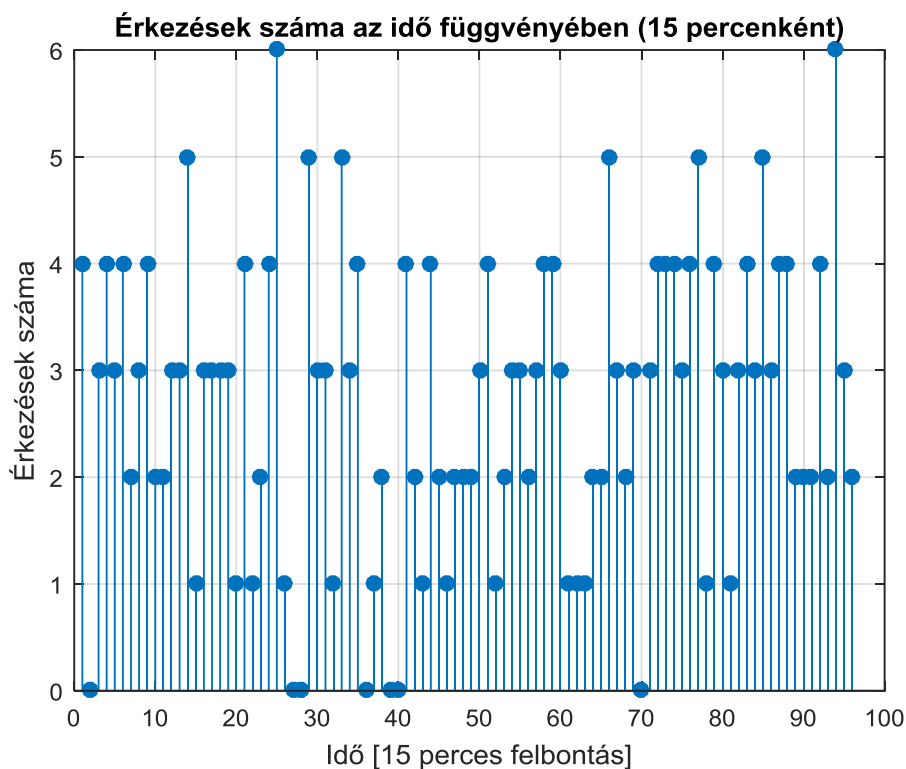


**32. ábra. Töltési idők eloszlása, töltési karakterisztika becslés nélkül**

A kiszolgálást legjobban leíró függvények attól függően is változnak, hogy milyen statisztika szerint rendelék kezdő- és végtöltöttséget az EV-khez. Ha ezeket a 4.3.1 szerint megváltoztatom, a töltési időket máris a Gamma-eloszlás írja le legjobban. Ezen kívül, ha a töltés 0°C-on történik (4.3.4-hez hasonlóan), akkor az általánosított Pareto-eloszlásé lesz a legjobb illeszkedés.

#### 4.4.2 Érkezések száma az idő függvényében

A töltőállomás méretezéskor a várható beérkezések számának pontos becslése kiemelt fontosságú feladat. Amennyiben ismerjük a beérkezéseket leíró függvényeket, azok paramétereit, a probléma akár egy várhatóérték számításra is visszavezethető, amit összevetve a szimulációs eredményekkel, átfogóbb képet kapunk a beérkezésekről, így végeredményben jobb döntést hozhatunk a beépítendő töltőfejek számáról.



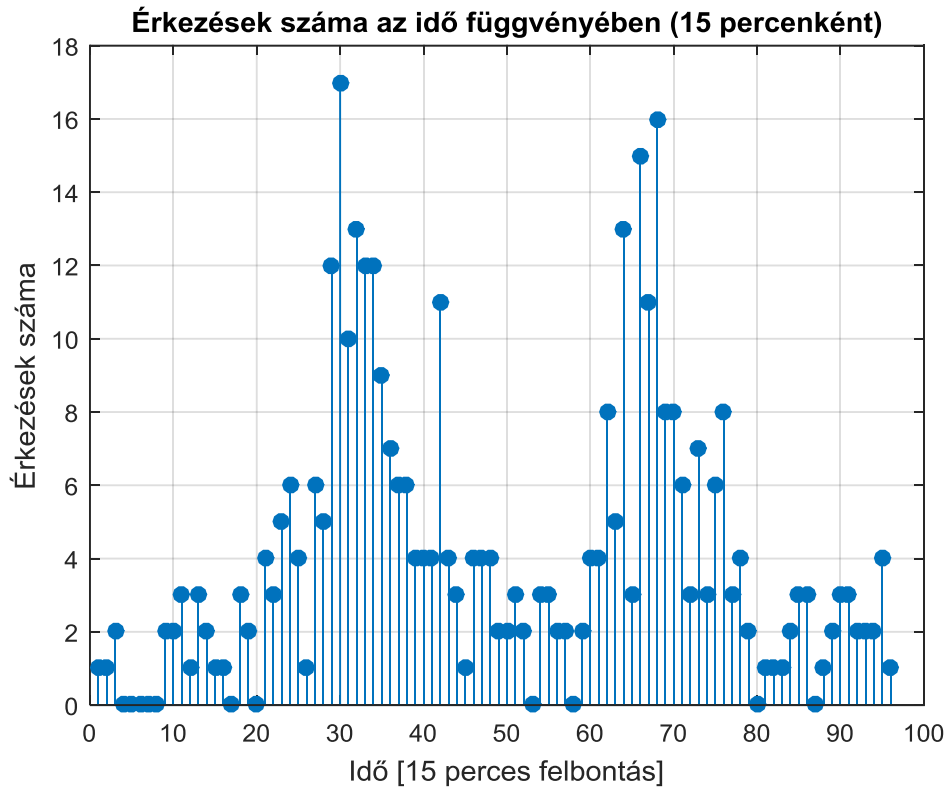
**33. ábra.** Érkezések száma az idő függvényében, negyedórás intervallumokra összegezve

Az alapértelmezett paraméterkészlet mellett lefutott szimuláció eredményét mutatja a 33. ábra. Az áttekinthetőség érdekében azonban a szimulációs időtartam egy nap volt, valamint a beérkezések számát negyedórás intervallumokra összegeztem.

A beérkezések között eltelt idők várható értékének beállított 5 perces időtartamnak jól láthatóan megfelel a kapott eredmény.

#### 4.4.2.1 Érkezések száma az idő függvényében, időtől függő beérkezési intenzitás mellett

Az eredmény (34. ábra) összhangban van az általam megadott beérkezési ráta karakterisztikával (13. ábra), a csúcs- és völgyidőszakok egyértelműen azonosíthatók.

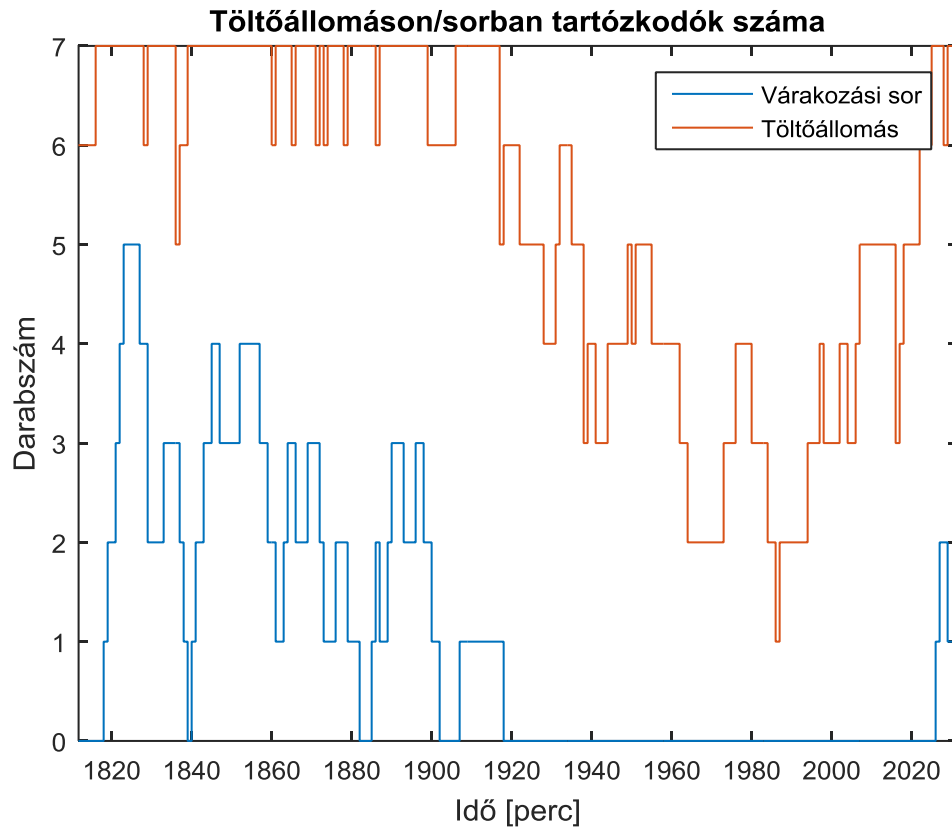


34. ábra. Érkezések száma az idő függvényében (időfüggő beérkezési ráta mellett)

#### 4.4.3 Töltőállomáson/sorban tartózkodók száma az idő függvényében

Számos hasznos információt leolvashatunk egy olyan időfüggvényről, amely bemutatja az állomáson tartózkodó ügyfelek számának időbeli alakulását. Ilyen a várakozási sorból a töltőfejekhez szükséges átkerülési idő, az állomás kihasználtságának alakulása az idő függvényében, az állomáson tartózkodó EV-k számának alakulásából pedig a várakozási sor és a töltőfejek túl- és/vagy alulméretezettségére következtethetünk. Ezen felül a program minőségileg helyes működéséről is meggyőződhetünk.

Ezt szemléltetendően, kiemeltem a 7 hosszú várakozási sor – 7 töltőfej konfigurációra futtatott szimulációból egy bő három órás részletet, amelyen végig követhető az állomáson, a várakozási sorban tartózkodó EV-k számának alakulása (35. ábra).



**35. ábra. Töltőállomáson és várakozási sorban tartózkodók száma az idő függvényében**

Látható, hogy ez a konfiguráció – a kiemelt időablak alapján – töltőfej szempontból alul-, várakozási sorhossz szempontjából pedig túlméretezett. A teljes szimulált időtartamot megvizsgálva is erre a következtetésre jutottam, mivel a várakozási sorban tartózkodók száma egyetlen egyszer sem érte el a sor maximális kapacitását, míg a töltőfejek számának növelése az idő jelentős részében indokolt lett volna.

Az időfüggvény összhangban van a 4.2-ben bemutatott minőségi mutatók megfelelő celláiban mutatott értékekkel.

Az időfüggvények vizsgálata kiemelten fontossá válik, amikor időfüggő beérkezési rátákkal dolgozunk, hiszen ekkor a folyamat összetettsége miatt már elengedhetetlen, hogy az időfüggvényeket a minőségi mutatókkal párhuzamosan értékeljük ki.

## 5 Záró gondolatok

A sztochasztikus szimulációk segítségével alaposan körbejártam a töltőállomás-méretezés kérdését. Azon felül, hogy különböző intenzitású járműforgalmak mellett vizsgáltam az egyes minőségi mutatók szempontjából az ideális beépítendő töltőszámot, a valósághoz közelebbi, időfüggő beérkezési intenzitás esetét is tanulmányoztam, hogy valódi méretezési problémák megoldásakor igazi segédeszközzé válhasson a programom.

Az állomáson szükséges töltőfejek számának meghatározásakor több szempontot szem előtt kell tartani, melyeket a dolgozatomban külön-külön körbejártam. A különböző igények (maximális kihasználtság, ügyfelek kiszolgálása, elégedettsége, minimális várakozási idők) az esetek többségében egymással ellentmondó irányba mozdítanak el az elhelyezendő töltőfejek számát, így mérlegelni kell, számunkra mik is az igazán fontos szempontok, mivel végeredményben mindenképp kompromisszumos megoldást kell választanunk.

A dolgozathoz felépített programomat éppen ezért úgy alkottam meg, hogy annak segítségével a felhasználó több szempontból vizsgálhassa a problémát, értékelhesse ki az eredményeket, majd segítségével hozhasson döntést.

A dolgozat több pontján hangsúlyoztam, hogy a szimuláció eredményei csak annyira jók, mint amennyire a bemeneti adatok, melyekből dolgozik a program. Ebből adódóan a munka továbbfejlesztési, bővítési lehetőségei magában foglalják pontosabb információk, statisztikák beszerzését, mérését (beérkezési járműforgalomra, EV töltési karakterisztikákra, valamint kezdeti és végleges töltöttségi szintre vonatkozóan). Ezen kívül lehetőség van a szimulációt kiegészíteni prioritásos kiszolgálással, nagyobb teljesítményű, gyorsabb töltőkkel, ügyfelek viselkedésének valósághűbb modellezésével (pl. sorhosszfüggő magatartás bevezetésével).

A fent felsoroltakon kívül még továbbfejlesztési lehetőség a témához kapcsolódó egyéb tématerületek vizsgálata is, úgy, mint a töltőállomás lokációjának megválasztása, hálózatra gyakorolt hatások elemzése, vagy akár gazdasági szempontok figyelembevétele a tervezés során.

## Irodalomjegyzék

- [1] Statista, *Electric Mobility – Statistics&Facts*, published by Statista Research Department, Jan 16, 2019, <https://www.statista.com/topics/1010/electric-mobility/>
- [2] EPA, United States Environmental Protection Agency, *Global Greenhouse Gas Emission Data*, <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>
- [3] Christoph Buchal, Hans-Dieter Karl und Hans-Werner Sinn, *Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO2-Bilanz?*, ifo Schnelldienst 8/2019 72. Jahrgang 25. April 2019, <http://www.cesifo-group.de/DocDL/sd-2019-08-sinn-karl-buchal-motoren-2019-04-25.pdf>
- [4] EV Volumens, The Electric Vehicle World Sales Database, *Global EV Sales for 2018-Final Results*, <http://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/>
- [5] Villanyautósok, *Csúcson a zöld rendszámok kiadása*, <https://villanyautosok.hu/2018/11/08/csucson-a-zold-rendszamok-kiadasa/>
- [6] Darrin Qualman, *Electric car numbers, and projections to 2030*, July 10, 2018, <https://www.darrinqualman.com/electric-car-numbers/>
- [7] Tom DiChristopher, *Electric vehicles will grow from 3 million to 125 million by 2030, International Energy Agency forecast*, May 20, 2018, <https://www.cnbc.com/2018/05/30/electric-vehicles-will-grow-from-3-million-to-125-million-by-2030-iea.html>
- [8] EVgo, *Types of Electric Vehicles: BEV, PHEV and HEV*, <https://www.evgo.com/why-evs/types-of-electric-vehicles/>
- [9] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, Fact #939: August 22, 2016 *All-Electric Vehicle Ranges Can Exceed Those of Some Gasoline Vehicles*, <https://www.energy.gov/eere/vehicles/fact-939-august-22-2016-all-electric-vehicle-ranges-can-exceed-those-some-gasoline>
- [10] C Iclodean, B Varga, N Burnete, D Cimerdean and B Jurchiș, *Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 252 (2017) 012058, doi: 10.1088/1757-899X/252/1/012058
- [11] Ben Klayman, *Tesla grapples with impact of battery fire in U.S.*, October 3, 2013, <https://www.reuters.com/article/us-autos-tesla-fire/tesla-grapples-with-impact-of-battery-fire-in-u-s-idUSBRE9920SX20131003>
- [12] ChargeHub, *2019 Guide On How To Charge Your Electric Car With Charging Stations*, <https://chargehub.com/en/electric-car-charging-guide.html>

- [13] Sanzhong Bai, Yu Du, Srdjan Lukic: *Optimum design of an EV/PHEV charging station with DC bus and storage system*
- [14] Parag Diwan, *Is Battery Swapping a Viable Option for Public Transportation EVs?*, Jun 19, 2018, <https://medium.com/@pdiwan/is-battery-swapping-a-viable-option-for-public-transportation-evs-adb4ced74ff2>
- [15] Financial Times, *Electric car group Better Place files for bankruptcy*, <https://www.ft.com/content/f36f685a-c5d5-11e2-99d1-00144feab7de#axzz2xsteelHZ>
- [16] Niawei Gong, Xianjue Luo, Honglian Ma, Qi Wang, Danyang Chen, „*Optimal Bidding Strategy of GENCOs With Volatile Wind Power and Battery Swapping Station*”, 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia)
- [17] Zhao Qiang, Wang Jinkuan and Han Yinghua, „*Multi-Objective Stochastic Economic Dispatch of Power System with Battery Swapping Stations*”, Proceedings of the 35th Chinese Control Conference July 27-29, 2016, Chengdu, China
- [18] Vineet Chatterjee, *Battery Swapping in Electric Vehicles- Concept, Feasibility and Challenges*, October 17, 2018, <https://automotiveelectronics.com/battery-swapping-electric-vehicles/>
- [19] Levi Tillemann and Colin McCormick, *The Faster, Cheaper, Better Way to Charge Electric Vehicles*, 10.18.18, <https://www.wired.com/story/the-faster-cheaper-better-way-to-charge-electric-vehicles/>
- [20] Yu Zheng, Zhao Yang Dong, Yan Xu, Ke Meng, Jun Hua Zhao and Jing Qiu: *Electric Vehicle Battery Charging/Swap Stations in Distribution Systems: Comparison Study and Optimal Planning*, IEEE Transactions on power systems, vol. 29, no. 1., january 2014
- [21] Curtis Moldrich, *What is wireless electric car charging? EV tech explained*, January 30, 2019, <https://www.carmagazine.co.uk/electric/what-is-electric-car-wireless-charging-wevc-and-how-does-it-work-/>
- [22] Huawei Yang, Yabiao Gao, Kathleen Blair Farley, Mike Jerue, Jason Perry and Zion Tse: *EV Usage and City Planning of Charging Station Installations*, University of Georgia, Athens, GA, Southern Company Services Inc., Birmingham, AL, JuiceCar Inc., Athens, GA
- [23] Albert Y.S. Lam, Yiu-Wing Leung, and Xiaowen Chu: *Electric Vehicle Charging Station Placement: Formulation, Complexity, and Solutions*, IEEE Transactions on smart grid, vol. 5, no. 6, november 2014
- [24] H. Ryoji, T. Ikeya, and K. Okano: *A road traffic simulator to analyze layout and effectiveness of rapid charging infrastructure for electric vehicle*, Proc. 2011 IEEE Vehicle Power Propul. Conf. (VPPC), Chicago, IL, USA, pp. 1-6.
- [25] M. Cruz-Zambrano, C. Corchero, L. Igualada-Gonzalez, and V. Bernardo: *Optimal location of fast charging stations in Barcelona: A flow-capturing*

- approach*, Proc. 2013 10th IEEE Int. Conf. Eur. Energy Market (EEM), Stockholm, Sweden, pp. 1-6
- [26] Zhipeng Liu, Fushuan Wen, and Gerard Ledwich: *Optimal Planning of Electric-Vehicle Charging Stations in Distribution Systems*, IEEE Transactions on power delivery, vol. 28, no. 1, january 2013
- [27] Guibin Wang, Zhao Xu, Fushuan Wen, and Kit Po Wong: *Traffic-Constrained Multiobjective Planning of Electric-Vehicle Charging Stations*, IEEE Transactions on power delivery, vol. 28, no. 4, october 2013
- [28] Yuta Susowake, Huang Yongyi, Tomonobu Senjyu, Abdul Motin Howlader, Paras Mandal: *Optimum Operation Plan for Multiple Existing EV Charging Stations*, 2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)
- [29] Yijia Cao, Shengwei Tang, Canbing Li, Peng Zhang, Yi Tan, Zhikun Zhang, and Junxiong Li: *An Optimized EV Charging Model Considering TOU Price and SOC Curve*, IEEE Transactions on smart grid, vol. 3, no. 1, march 2012
- [30] Long JIA, Zechun HU, Yonghua SONG, Zhuowei Luo: *Optimal Siting and Sizing of Electric Vehicle Charging Stations*
- [31] H. Wang, F. S. Wen, J. B. Xin, „Charging and discharging characteristics of electric vehicles as well as their impacts on distribution systems”, Journal of North China Electric Power University, vol 38, no. 5, pp.17-24, Sept. 2011
- [32] Wang, Y., Yang, Y., Zhang, N., & Huang, M. (2017). *An Integrated Optimization Model of Charging Station/Battery-Swap Station/Energy Storage System Considering Uncertainty*. 2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). doi:10.1109/icei.2017.21
- [33] Pingyi Fan, Bilguun Sainbayar, Shaolen Ren, "Operation analysis of fast charging stations with energy demand control of electric vehicles", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6., no. 4., February 2015., pp. 1819-1826.
- [34] S. Bae and A. Kwasinski, „Spatial and temporal model of electric vehicle charging demand,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 1, pp. 394-403, Mar. 2012
- [35] Gan Li, Xiao-Ping Zhang: *Modeling of plug-in hybrid electric vehicle charging demand in probabilistic load-flow calculations*, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3., no. 1., March 2012., pp. 492-499.
- [36] F.J. Soares, J.A. Peças Lopes, P.M. Rocha Almeida, C.L. Moreira, Luís Seca, "A stochastic model to simulate electric vehicles motion and quantify the energy required from the grid", 17th Power Systems Computation Conference, Stockholm, August. 22-26., 2011.
- [37] S. Bittanti, G. Nicolao, "Markovian representations of cyclostationary processes", in Topics in Stochastic Systems: Modelling, Estimation and Adaptive Control. vol. 161, L. Gerencsér and P. Caines, Eds., ed: Springer Berlin / Heidelberg, 1991, pp. 31-46.

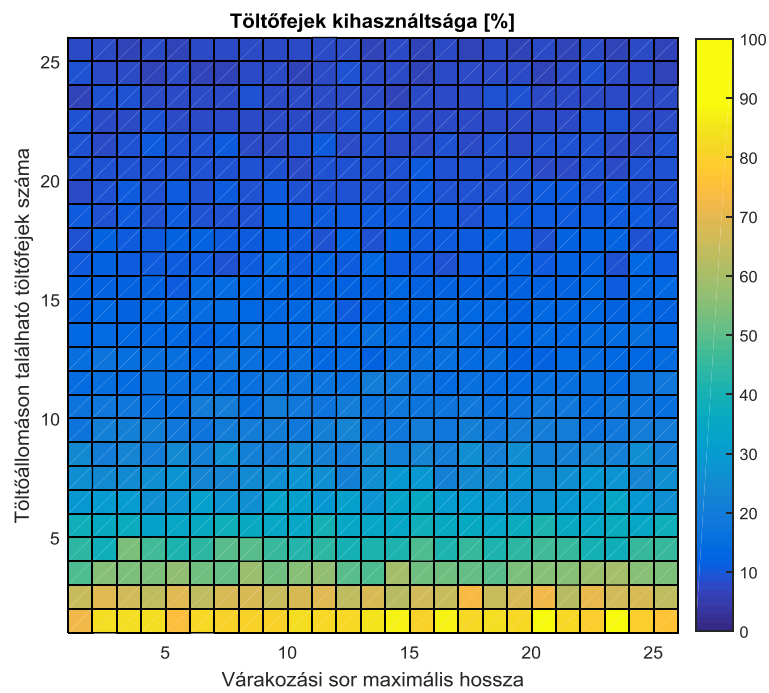


- [38] Dhaou Said, Soumaya Cheraoui, Lyes Khoukhi, "*Queuing model for EVs charging at public supply stations*", 9th International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Sardinia, 1-5. July 2013., pp. 65-70.
- [39] Mustafa Ammous, Syrine Belakaria, Sameh Sorour and Ahmed Abdel-Rahim, „*Joint Delay and Cost Optimization for Electric On-Demand Vehicles with In-Route Charging*”, 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)
- [40] P. Grahn, K. Alvehag, and L. Söder, “*Plug-in-vehicle mobility and charging flexibility Markov model based on driving behavior*”, in Proc. 9th Int. Conf. Eur. Energy Market (EEM12), 2012.
- [41] Pia Grahn, Karin Alvehag, Lennart Söder, "*PHEV utilization model considering type-of-trip and recharging flexibility*", IEEE Transactions on Smart Grid, vol.5., no.1., January 2014., pp. 139- 148.
- [42] Xiaoqi Tan, Bo Sun, Danny H.K. Tsang, "*Queuing Network Models for Electric Vehicle Charging Station with Battery Swapping*", 2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Venice, Italy, 3-6. November 2014., pp. 1-6.
- [43] Pingping Xie, Jizhong Zhu, Peizheng Xuan, „*Analysis of controllable capacity for electric vehicle battery swapping stations*”, The 6th International Conference on Renewable Power Generation (RPG), 19-20 October 2017, J. Eng., 2017, Vol. 2017, Iss. 13, pp. 2125-2129
- [44] Quimin Dong, Dusit Niyato, Ping Wang, Zhu Han, "*The PHEV charging scheduling and power supply optimization for charging stations*", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65., no. 2., February 2016., pp. 566-580.
- [45] Jonas Fluhr, Klaus-Henning Ahlert, Christof Weinhardt, "*A stochastic model for simulating the availability of electric vehicles for services to the power grid*", 43rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), 5-8. January 2010., Honolulu, pp. 1-10.
- [46] Xiaochen Zhang, Santiago Grijalva, "*An advanced data driven model for residential electric vehicle charging demand*", 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, USA, 26-30. July, 2015., pp. 1-5.
- [47] Pecan Street Dataport - A Universe of Data, Available Around the World. Available: <https://dataport.pecanstreet.org/>
- [48] Yuchang Wang, John Thompson, „*Admission and Scheduling Mechanism for Electric Vehicle Charging with Renewable Energy*”, ICC2017: WT06-Workshop on Integrating Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grid (ICT4SG)
- [49] Hao Wang, Arish Balasubramani, Zilong Ye, „*Optimal Planning of Renewable Generations for Electric Vehicle Charging Station*”, 2018 Workshop on Computing, Networking and Communications (CNC)

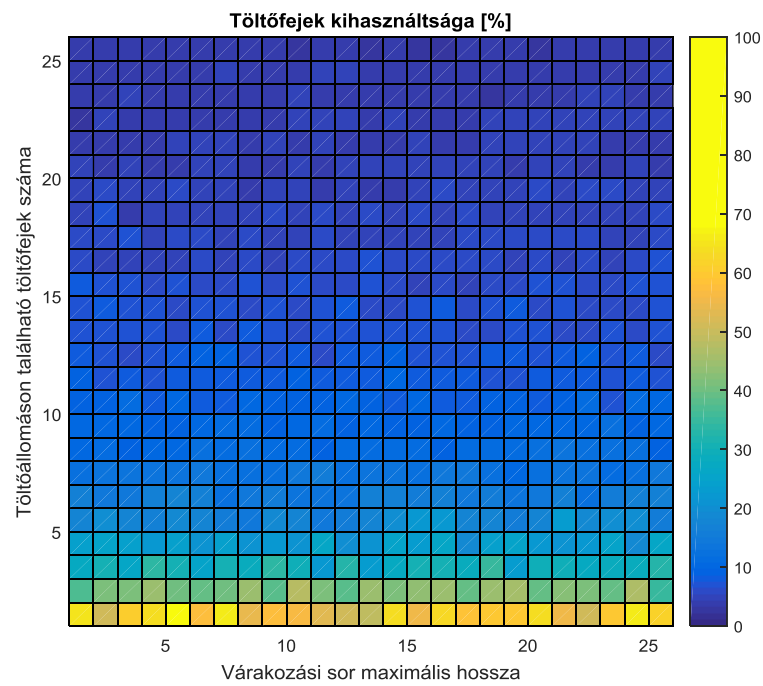
- [50] Parthe Pandit and Samuel Coogan, „Discount-based Pricing and Capacity Planning for EV Charging under Stochastic Demand”, 2018 Annual American Control Conference (ACC), June 27-29, 2018. Wisconsin Center, Milwaukee, USA
- [51] Dr. Sztrik János, "A sorbanállási elmélet alapjai", Debreceni Egyetem, Informatikai Kar, [http://irh.inf.unideb.hu/~jsztrik/education/16/SOR\\_Main.pdf](http://irh.inf.unideb.hu/~jsztrik/education/16/SOR_Main.pdf)
- [52] Arnold O. Allen, „Probability, Statistic, and Queueing Theory with Computer Science Applications”
- [53] F. Cannizzaro, G. Greco, S. Rizzo, E. Sinagra, „Results of the measurements carried out in order to verify the validity of the poisson-exponential distribution in radioactive decay events”, International Journal of Applied Radiation and Isotopes, Vol. 29. pp. 649-652, doi: 10.1016/0020-708X(78)90101-1
- [54] Daniel Willkomm, Sridhar Machiraju, Jean Bolot, Adam Wolisz, „Primary User Behavior in Cellular Networks and Implications for Dynamic Spectrum Access”, IEEE Communications Magazine, 47(3), 88-95., doi: 10.1109/MCOM.2009.4804392
- [55] Martin F. Arlitt, Carey L. Williamson, „Internet Web Servers: Workload Characterization and Performance Implications”, IEEE/ACM Transactions on Networking, 5(5), 631-645. doi: 10.1109/90.649565
- [56] Gargniuc, Paul A. (2017). *Markov Chains: From Theory to Implementation and Experimentation*. USA, NJ: John Wiley & Sons. pp. 1-235. ISBN 978-1-119-38755-8
- [57] Manuel, Laguna (2011). *Business Process Modelling, Simulation and Design*. Pearson Education India. p. 178. ISBN 9788131761359
- [58] Penttinen A., Chapter 8 –*Queueing Systems*, Lecture Notes: S-38.145 – Introduction to Teletraffic Theory
- [59] Harchol-Balter, M. (2012). „Scheduling: Non-Preemptive, Size-Based Policies”. *Performance Modeling and Design of Computer Systems*. pp. 499-507. doi.:10.1017/CBO9781139226424.039. ISBN 9781139226424
- [60] Harchol-Balter, M. (2012). „Scheduling: SRPT and Fairness”. *Performance Modeling and Design of Computer Systems*. pp. 518-530. doi.:10.1017/CBO9781139226424.041. ISBN 9781139226424
- [61] U.S. Department of Energy, Vehicle Technologies Office, *EV Project Chevrolet Volt Vehicle Summary Report*, Reporting period: January 2013 through March 2013, INL/MIS-11-24041
- [62] U.S. Department of Energy, Vehicle Technologies Office, *EV Project Nissan Leaf Vehicle Summary Report*, Reporting period: January 2013 through March 2013, INL/MIS-11-21904
- [63] Advanced Vehicles, Idaho National Laboratory, <https://avt.inl.gov/>

- [64] MathWorks File Exchange, GRABIT:  
<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/7173-grabit>
- [65] Advanced Vehicles, Idaho National Laboratory, 2015 Chevrolet Spark EV – DC Fast Charging at Temperature Test Results,  
<https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/fsev/2015SparkDCFCAtTempBOT.pdf>
- [66] Matthew Shirk, Jeffrey Wishart, *Effects of Electric Vehicle Fast Charging on Battery Life and Vehicle Performance*, March 2015, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, Idaho 83415, INL/CON-14-33490
- [67] MATLAB Central, File Exchange:  
<https://blogs.mathworks.com/pick/2012/02/10/finding-the-best/> ,az itt ajánlott allfitdist.m az alábbi GitHub oldalon érhető el:  
<https://github.com/dcherian/tools/blob/master/misc/allfitdist.m>

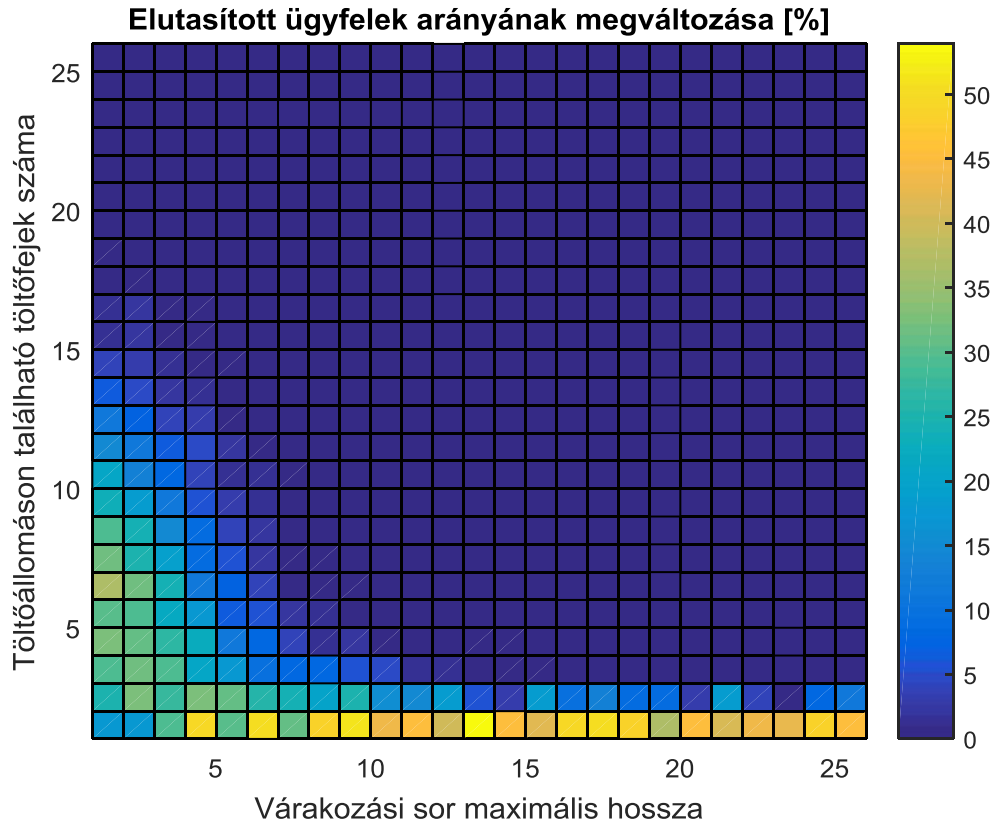
# Függelék



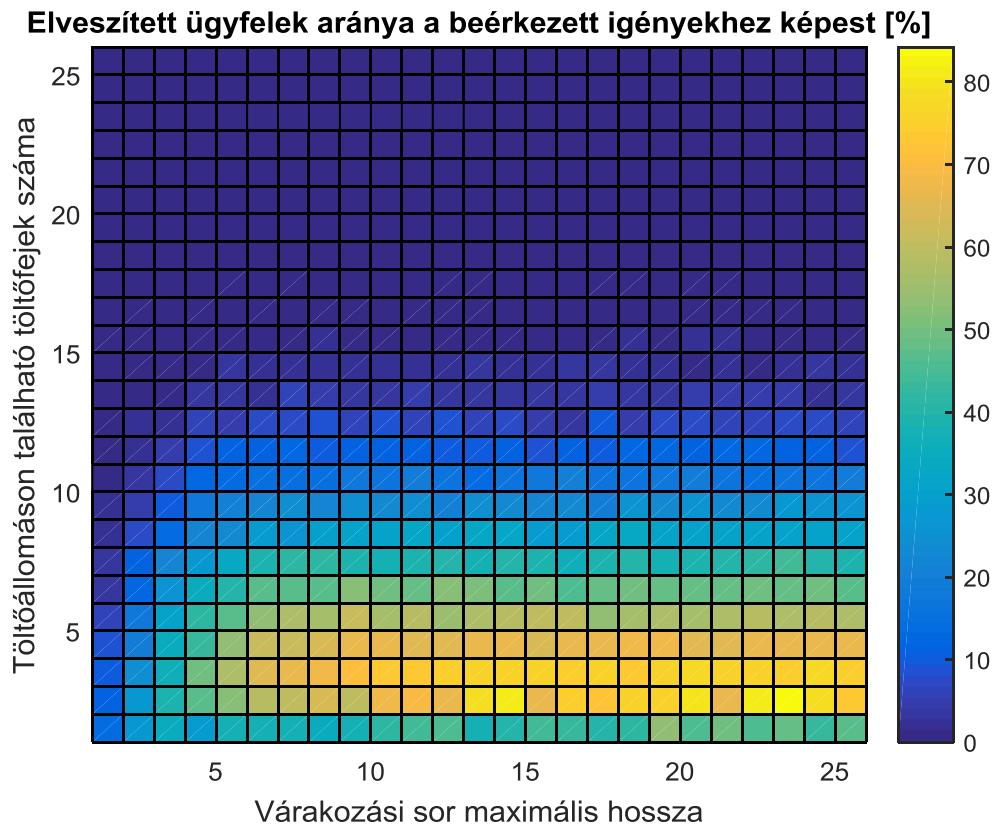
36. ábra. Töltőfejek százalékos kihasználtsága különböző töltőfej-várakozási sor arányok mellett ( $\mu = 15$  perc)



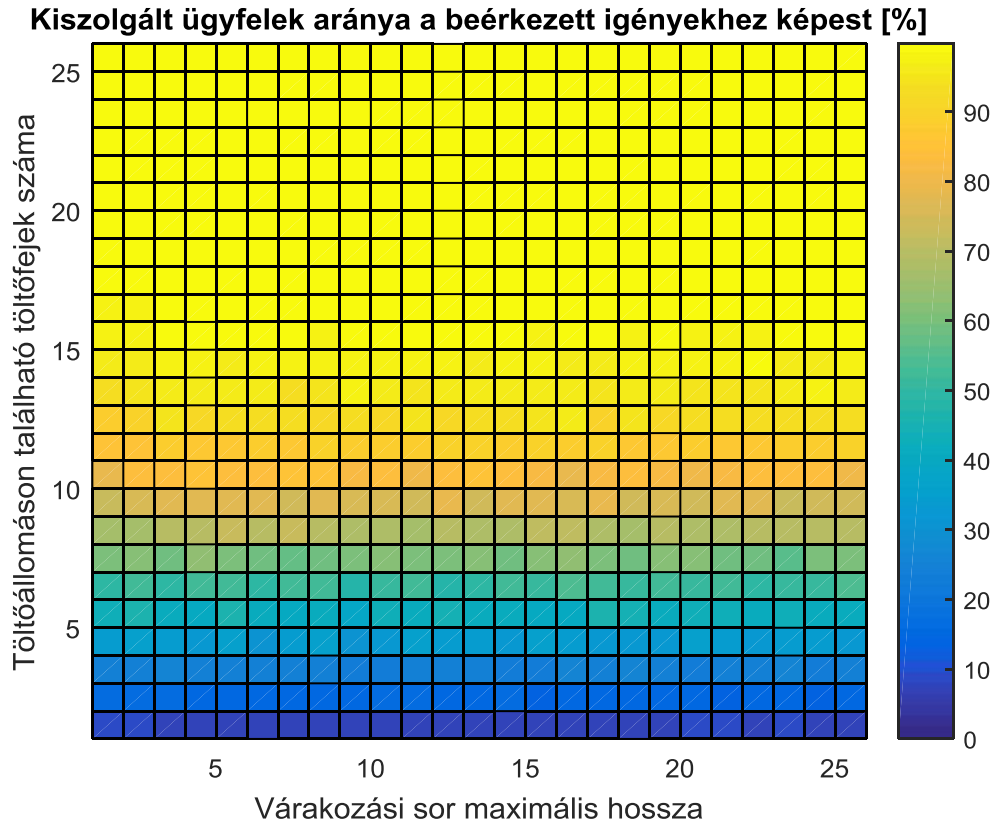
37. ábra. Töltőfejek százalékos kihasználtsága különböző töltőfej-várakozási sor arányok mellett ( $\mu = 30$  perc)



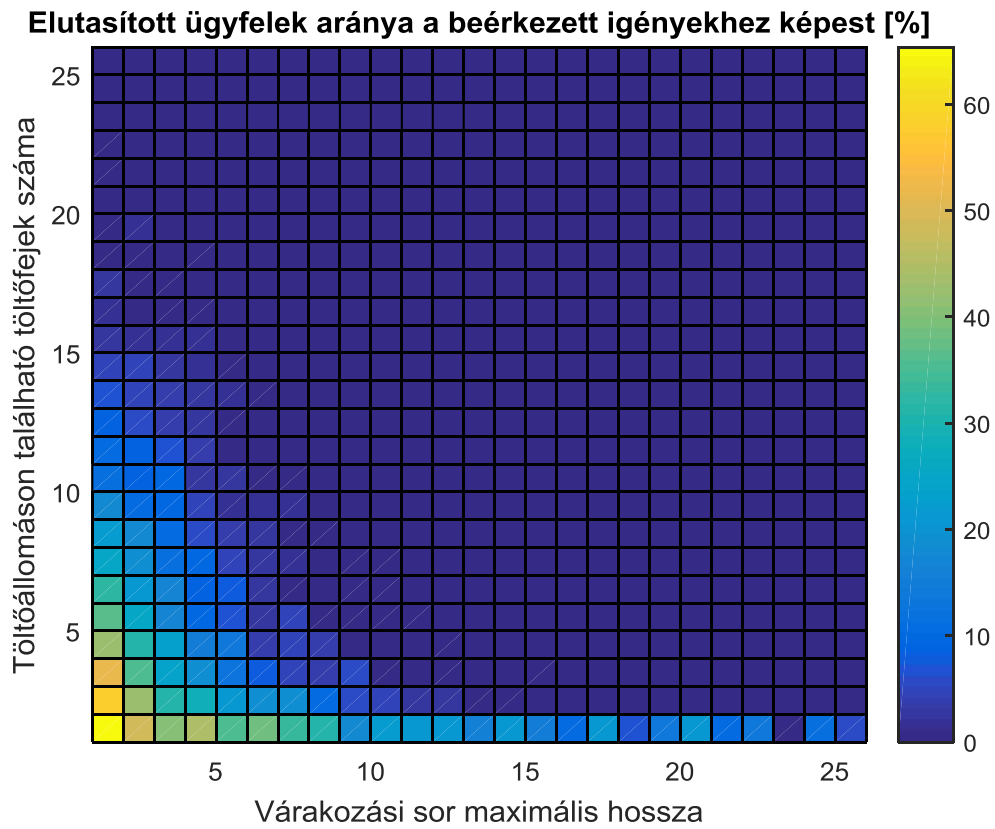
38. ábra. Elutasított ügyfelek arányainak megváltozása sűrű ( $\mu = 2 \text{ perc}$ ) beérkezések mellett



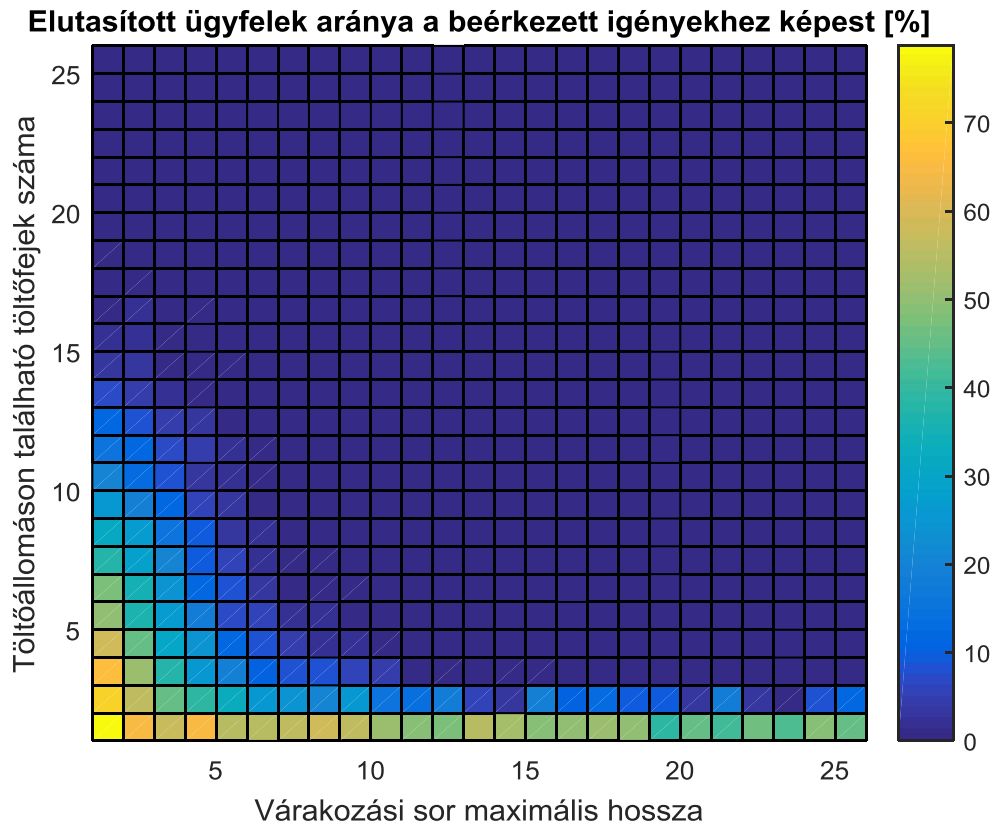
39. ábra. Elveszített ügyfelek aránya a beérkezett igényekhez képest ( $\mu = 2 \text{ perc}$ )



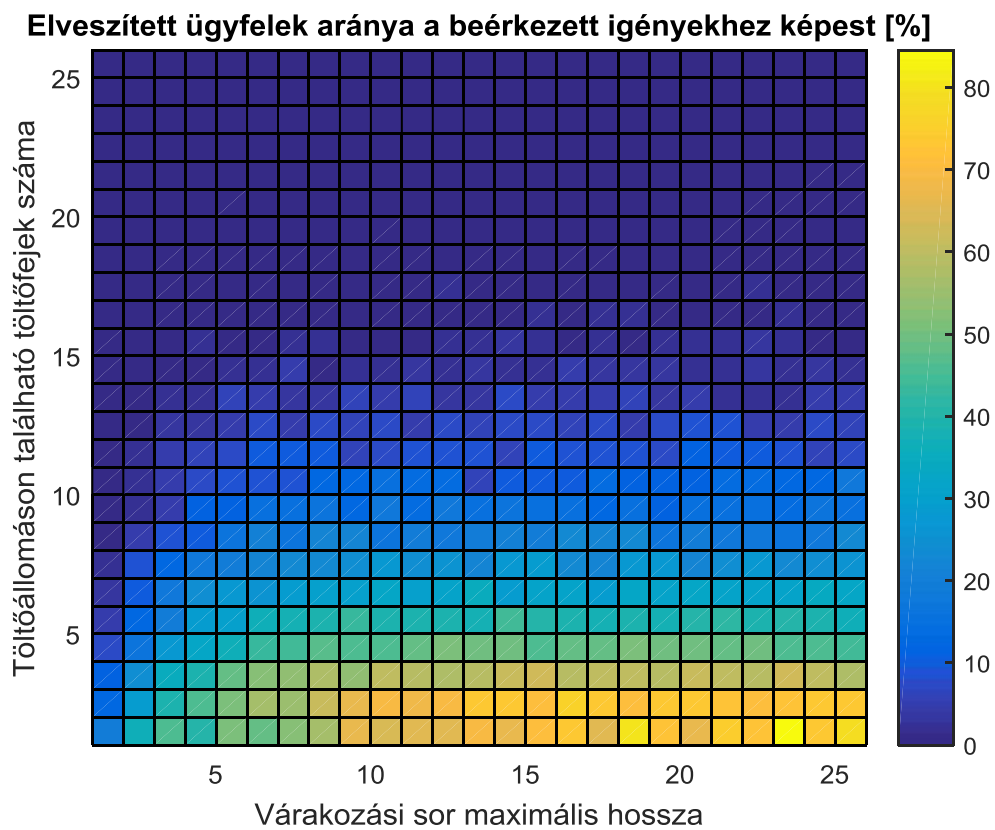
40. ábra. Kiszolgált ügyfelek aránya a beérkezett igényekhez képest ( $\mu = 2$  perc)



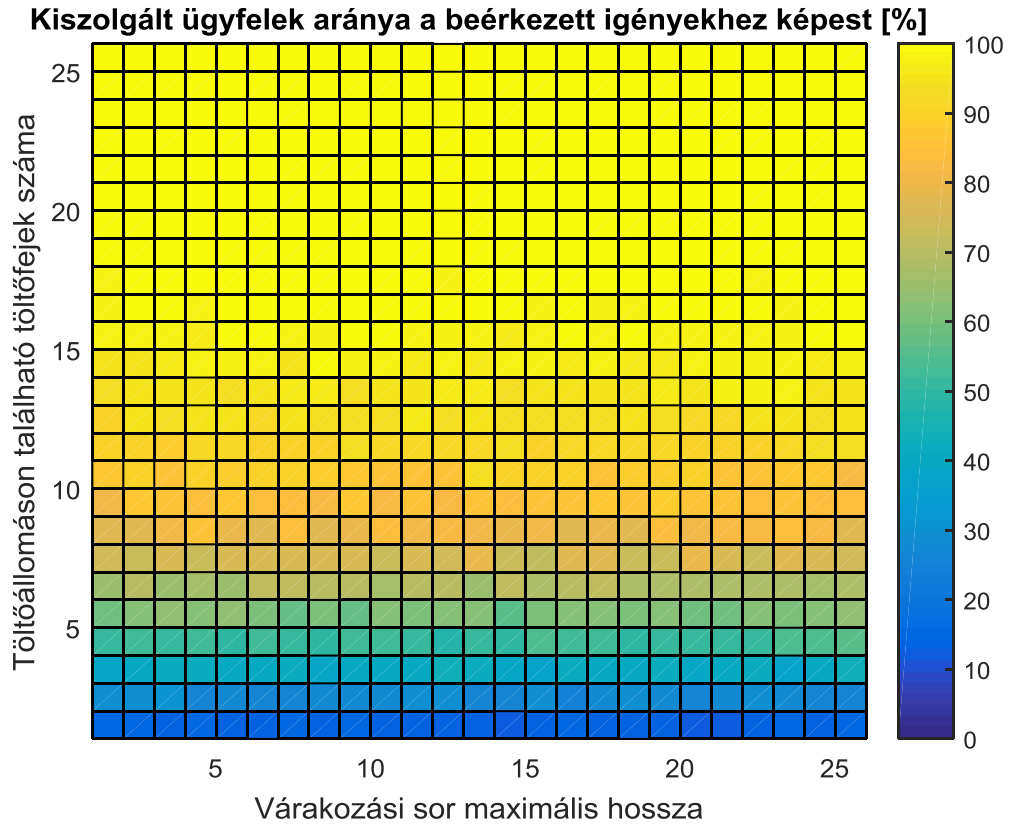
41. ábra. Elutasított ügyfelek aránya, időfüggő beérkezési ráta mellett



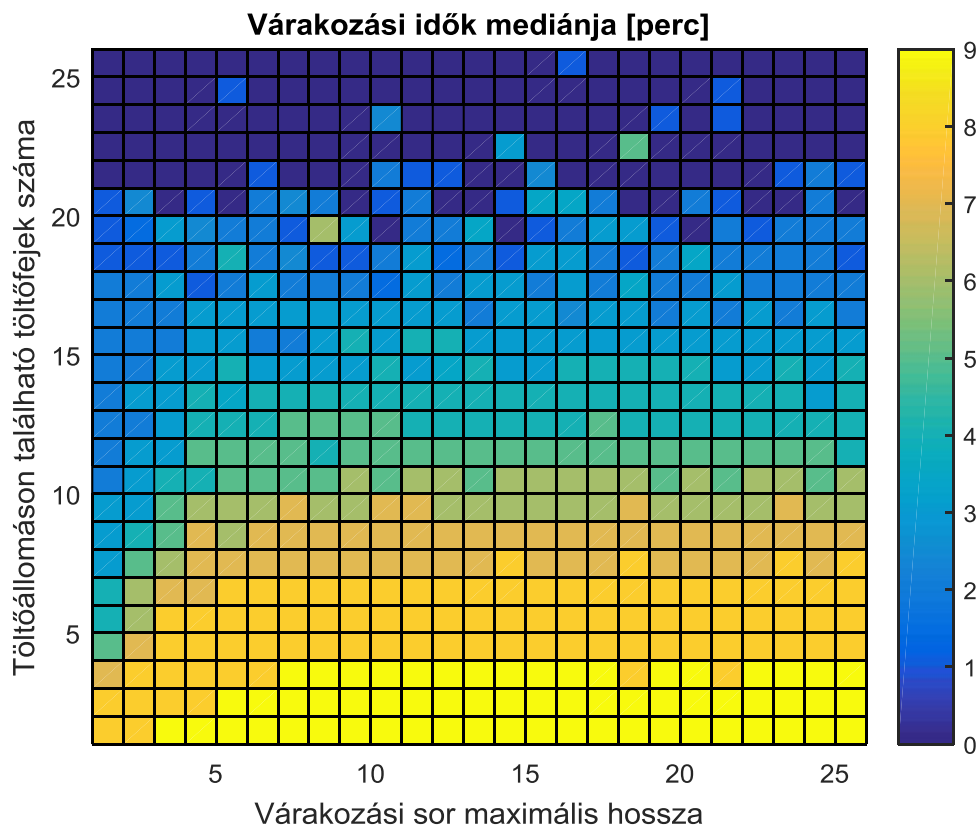
42. ábra. Elutasított ügyfelek aránya sűrűbb ( $\mu = 2$  perc) beérkezések mellett



43. ábra. Elveszített ügyfelek aránya, időfüggő beérkezési ráta mellett

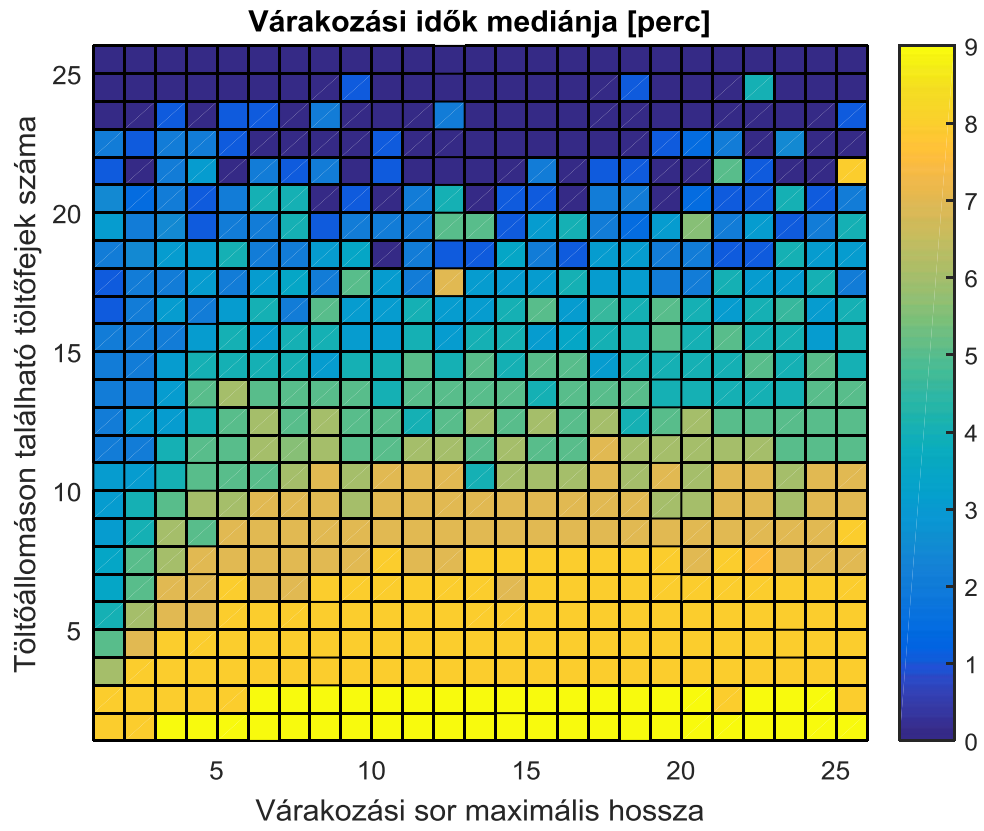


44. ábra. Kiszolgált ügyfelek aránya, időfüggő beérkezési ráta mellett



45. ábra. Várakozási idők mediánja ( $\mu = 2$  perc)





**46. ábra. Várakozási idők mediánja, időben változó beérkezési intenzitás mellett**