



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

Csőre Máté

TÖLTŐÁLLOMÁSOK
VILLAMOSENERGIA-
BESZERZÉSÉNEK ELEMZÉSE

KONZULENS

Dr. Divényi Dániel

BUDAPEST, 2018

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	4
Köszönetnyilvánítás	6
1 Bevezetés	7
2 Irodalmi áttekintés.....	9
2.1 Kitekintés a villamos gépjárművek globális trendjeire.....	9
2.1.1 A villamos autók és töltőállomások terjedésének üteme	9
2.2 Európai és hazai szabályozási környezet	15
2.2.1 Európai szabályozási környezet	15
2.2.2 Hazai szabályozási környezet	16
2.3 Kiegyenlítő energia szerepe	17
2.4 A dolgozat tárgyát képező probléma felvázolása	18
3 A modellek bemutatása	20
3.1 Töltőállomás terhelésére vonatkozó szimulációs modell bemutatása	20
3.1.1 Bemeneti paraméterek bemutatása	20
3.1.2 A szimulációs modell felépítése	21
3.1.3 A szimulációs modellel kimeneti adatai	26
3.2 Az elszámolási modell bemutatása	27
3.2.1 A bemeneti paraméterek meghatározása	27
3.2.2 Az elszámolási modell felépítése.....	28
4 Eredmények.....	31
4.1 Töltőállomásra vonatkozó eredmények	31
4.1.1 Terhelésváltozás a beérkező autók számának függvényében – nagyszámú minta átlagolása, azaz a menetrend alakulása a beérkező gépjárművek függvényében.....	32
4.1.2 Terhelésváltozás beérkezőautók számának függvényében – egy napra vonatkozólag.....	33
4.2 Az elszámolási modellre vonatkozó eredmények.....	35
4.2.1 A beszerzett energiamennyiségre vonatkozó adatok.....	35
4.2.2 Fajlagos kiegyenlítőenergia-költségek a beszerzett energiamennyiséghez viszonyítva.....	38
5 Összegzés.....	40
6 A munka következő szakasza.....	42

Irodalomjegyzék.....	43
-----------------------------	-----------

Összefoglaló

A villamos autózás elterjedéséhez szükséges töltési infrastruktúra kiépítése és üzemeltetése az elkövetkező évtized egyik legnagyobb kihívása. Piaci szempontból az autók, mint új, de várhatóan lakossághoz kötött fogyasztók fognak megjelenni a szektorban. Az otthoni töltési lehetőség mellett nem elhanyagolható jelentősége lesz a nyilvános töltőállomásoknak. A nyilvános töltőállomásokon beszerezhető töltési szolgáltatáshoz szükséges villamos energiát a mai struktúrájú villamosenergia-piacon kell megvásárolni.

A munka célja a villamos autók töltésére vonatkozó elszámolási modell vizsgálata. Ennek a kérdéskörnek az alaposabb körül járása a villamos autók alacsony száma, illetve a töltőinfrastruktúrához kapcsolódóan rendelkezésre álló kevés számú adat miatt jelenleg csak szimulációval végezhető el. Ennek érdekében a munka folyamán megalkotásra került egy paraméterezhető sztochasztikus szimulációs modell, amely a nyilvános töltőállomásra érkező autók teljesítményfelvételét modellezi. A modell lehetőséget biztosít a várakozási idő, a töltőfejek száma és a töltési teljesítmény időkarakterisztikája, mint paraméterek módosítására, illetve negyedórás terhelési görbék előállítására. A szimuláció outputjaként kapott terhelési görbék jellemzik a paraméterezett töltőállomás napi energiafelhasználását, amely alapján a töltőállomásra jellemző fajlagos költségek (havi és éves energiabeszerezési költségek különböző beszerzési portfóliók mellett, a fogyasztásokhoz tartozó kiegyenlítő energia mennyisége és költsége) becsülhetők.

Célom, hogy az általam megalkotott sztochasztikus szimulációs modell eredményeinek kiértékelésével megállapításokat tegyek a villamos autók elszámolási modelljére vonatkozóan.

Abstract

The installation and operation of charging infrastructure, which is essential for the propagation of the electric vehicles, will be one of the biggest challenges of the following decade. From the power market's point of view, the vehicles will appear as new, presumably household-related consumers in the sector. In addition to the home charging option, there will be noteworthy significance of public charging stations. The energy, procured from public charging stations for charging service, has to be purchased from the current power market.

The purpose of the work is to investigate the financial model for charging electric vehicles. Due to the low number of electric cars and the limited number of available data on the charging infrastructure, the simulation of the charging models is inevitable. Therefore, a scalable stochastic model was developed to simulate the power consumption of electric vehicles arriving at public charging stations. The model enables the setting of waiting time, the number of charging points as well as the time characteristic of charging power as parameters, in order to provide 15-minute load profiles. The load curves obtained as the output of the simulation describe the charging station's daily energy consumption. Based on the consumption data specific costs of the simulated charging station (monthly and annual energy procurement costs according to different portfolios, the amount and cost of balancing energy) can be estimated.

This work aims to evaluate the energy procurement of charging stations on the basis of the simulated results of the self-developed stochastic simulation model.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném hálásan megköszönni konzulensem, Dr. Divényi Dániel iránymutató meglátásait és hasznos észrevételeit, melyekkel segítette a TDK dolgozat létrejöttét.

1 Bevezetés

Az elektromobilitás napjaink egyre hangsúlyosabb szektora, a villamos gépjárművek elterjedésével és részarányának növekedésével lassan elérünk egy olyan kritikus penetrációhoz, amely számos kérdést vet fel akár a villamos autók használatának és töltésének hálózatra gyakorolt hatásával, akár a villamosenergia-piacon betöltött szerepükkel, vagy a rájuk vonatkozó regulációs irányelvekkel kapcsolatban.

A villamos autózás térnyerésével egyidejűleg a szükséges elektromos töltőinfrastruktúra kiépítése és üzemeltetése az elkövetkező évtized egyik legnagyobb kihívása lesz. Piaci szempontból a villamos autók, mint új, de várhatóan lakossághoz kötött fogyasztóként való megjelenése prognosztizálható a szektorban. Az otthoni töltési lehetőség mellett ugyanakkor nem elhanyagolható jelentőségű a villamos energia nyilvános töltőállomásokról vételezése. A nyilvános töltőállomásokon beszerezhető töltési szolgáltatáshoz szükséges villamos energiát a mai struktúrájú villamosenergia-piacon kell megvásárolni.

A dolgozat alapvető célkitűzése egy, a villamos autók töltésére vonatkozó elszámolási modell vizsgálata. A rentábilis üzemeltetéshez elengedhetetlen az autók megnövekedett számát, így az adott töltési pontokon megnövekedett villamosenergia-igényt is figyelembe vevő villamosenergia-beszerezési stratégia megválasztása. A problémakör megoldása a villamos autók relatíve alacsony száma, illetve a töltőinfrastruktúrához kapcsolódóan rendelkezésre álló kevés számú adat miatt jelenleg csak szimulációval végezhető el. Ennek érdekében a munka folyamán megalkottam egy paraméterezhető sztochasztikus szimulációs modellt, amely a nyilvános töltőállomásra érkező autók teljesítményfelvételét modellezi.

Dolgozatom első szakaszában rövid áttekintést nyújtok az elektromobilitási szektor fejlődéséről, a villamos autók térnyerését befolyásoló domináns trendekről és ehhez kapcsolódóan a töltőinfrastruktúra fejlődéséről, valamint a róluk vételezett villamos energia mennyiségének növekedéséről. Röviden ismertetem az elektromobilitási szektor regulációs környezetét, melynek részeként bemutatom az Európai Unió alternatív üzemanyagok infrastruktúrájának kiépítésére vonatkozó

irányelvét, majd áttekintem ezen irányelv hazai jogszabályi környezetbe való beépítését és gyakorlati alkalmazásba való átültetését. Az irodalmi áttekintés részeként definiálom azokat a szabályozási folyamatokat és fogalmakat – úgy, mint a kiegyenlítő energia és a mérlegkörök szerepe – amelyek az elszámolási modell vizsgálata szempontjából relevánsak lesznek.

A bevezetett keretrendszer felvázolását követően részletezem az általam fejlesztett szimulációs modell működését, amelynek segítségével vizsgálhatóvá vált egy villamos töltőállomásra vonatkozó energiabeszerzési modell. A modellen végzett szimulációk segítségével a kapott eredmények alapján vizsgálható a töltőállomás üzemeltetőjének energiabeszerzési portfóliója. A szimuláció outputjaként kapott terhelési görbék jellemzik a paraméterezett töltőállomás napi energiafelhasználását, amely alapján a töltőállomásra jellemző fajlagos költségek (havi és éves energiabeszerzési költségek különböző beszerzési portfóliók mellett, a fogyasztásokhoz tartozó kiegyenlítő energia mennyisége és költsége) becsülhetők. Az eredmények között ismertetem a töltőállomás kihasználtságának és napi terhelésének változását a beérkező járművek számának függvényében. Továbbá példát mutatok arra, hogyan módosul a menetrendtől való eltérés mértéke a beérkező autók számának függvényében, szimulációkkal demonstráltam, hogy a járműszám növekedésével a mentrendtől való eltérés csökken. Végül a kapott adatokra támaszkodva bemutatom, hogy milyen mértékben befolyásolja a kiegyenlítő energia a töltés során felhasznált energia fajlagos árát.

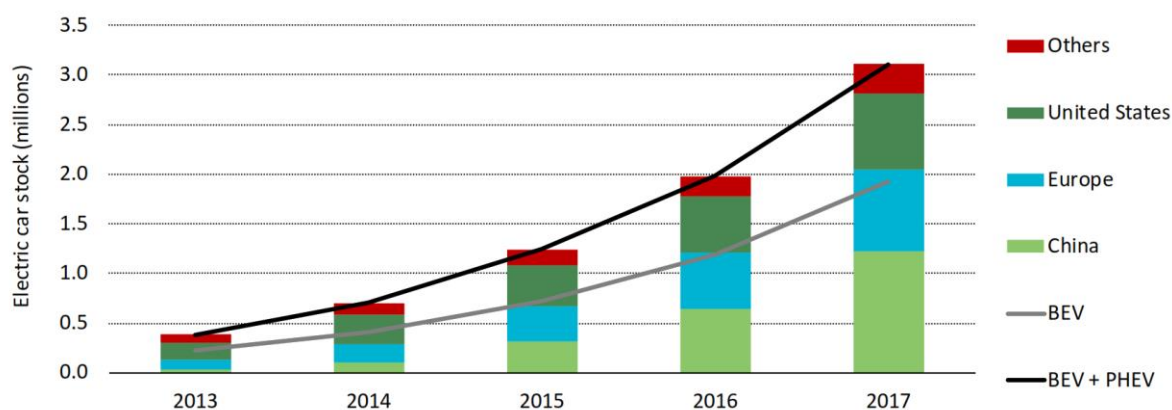
2 Irodalmi áttekintés

2.1 Kitekintés a villamos gépjárművek globális trendjeire

A Nemzetközi Energia Ügynökség (IEA) 2018-ban negyedik alkalommal adta ki az elektromos gépjárművek globális helyzetére vonatkozó kitekintését, amelyben – a szektor évenkénti szignifikáns növekedési mértéke okán – éves bontásban követhetjük figyelemmel a szektor trendszerű növekedését. A 2.1-es fejezetben az idei kiadványban (Global EV Outlook 2018, [1]) megjelentetett adatok nyomán igyekszem képet adni a dolgozat szempontjából releváns meglátásokról.

2.1.1 A villamos autók és töltőállomások terjedésének üteme

2017-ben az elektromos gépjárművek száma a világon már meghaladta a 3 milliót (1. ábra), a vizsgált bázisévtől (2013) számítva a villamos autók száma tízszeresére növekedett a világon.

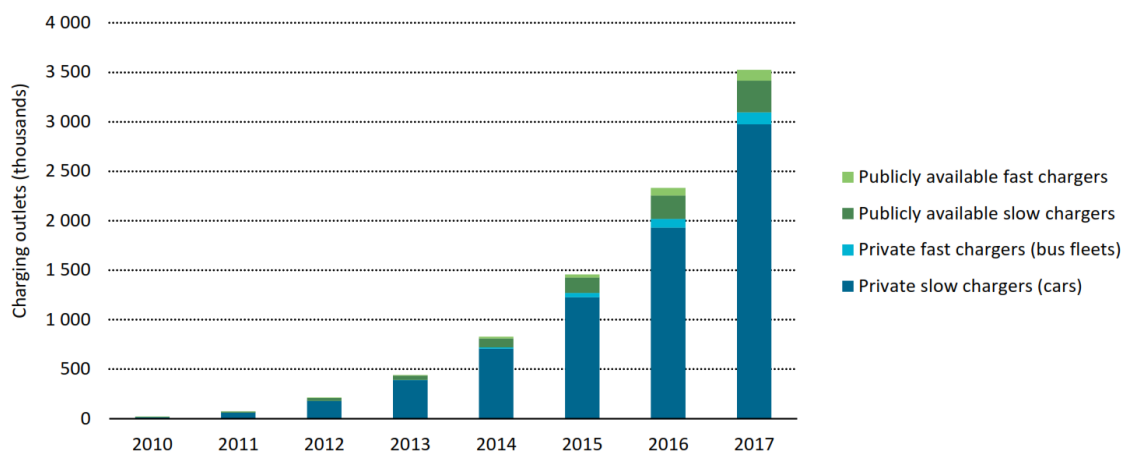


1. ábra: Az elektromos autók számának növekedése a kiemelt kereskedelmi piacokon 2013 és 2017 között, külön jelölve a tisztán villamos meghajtású (BEV) és tisztán tölthető + tölthető hibrid meghajtású (PHEV) gépjárművek számát¹ Európa, Egyesült Államok, Kína, és a világ többi területein [1]

¹ : Az összefoglaló írói villamos/elektromos autó alatt elsősorban a tisztán elektromos, illetve plug-in típusú tölthető hibrid meghajtású személygépjárműveket értik, azonban vizsgálatuk szókópja kiterjed a könnyű kereskedelmi gépjárművekre, úgy mint a buszok, teherautók, illetve az Ázsiában jelentős szereppel bíró két- és háromkerekű motorok.

Az ábra jól szemlélteti a növekedés gyorsuló ütemét, míg a kiemelt kereskedői piacok szerinti felosztás alapján az is látszik, hogy az utolsó vizsgált évre Kína vezető szerepre tett szert a gépjárművek számát tekintve, hogy az elektromos gépjárművek közel 40%-a már Kínában üzemel.

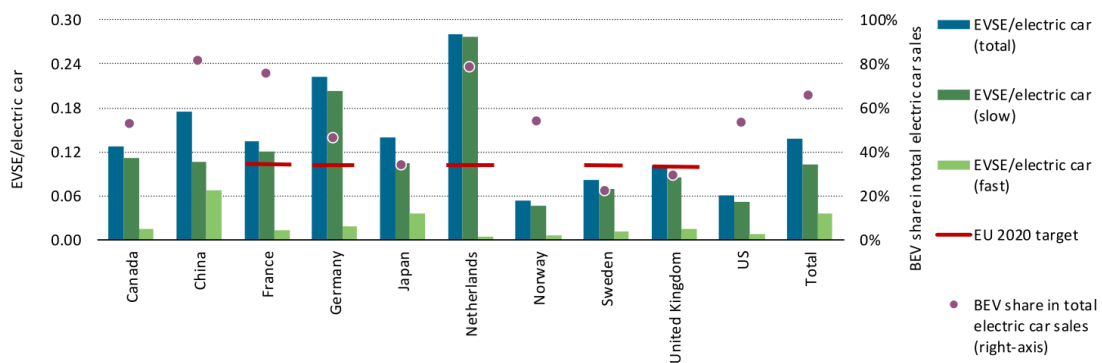
A kitekintés szerzői megjegyzik, hogy a villamos autók töltéséhez szükséges infrastruktúra kiépítése közelítően leköveti a gépjárművek elterjedésének trendjeit a növekedés mértékét, valamint az egységek számát tekintve is. A 2017-es évre közel 3 millió magáncélú töltő került telepítésre világszerte a munkahelyeken és az otthonokban (ezekből 366 000 tartozik flottákhoz, melyek közül szinte az összes Kínában, főként buszflották részére létesült). Az átjárhatóság, így az autók elterjedése szempontjából is releváns a közcélú töltőállomások száma, amely töltőállomások nagyobb hányada (2017-re elérte a 320 000-et) „lassú” töltésre alkalmas, szemben a gyorsöltésre alkalmas 110 000 közcélú töltőállomással (2. ábra).



2. ábra: A közcélú és magáncélú töltőállomások száma, világoszölddel a közcélú gyorsöltők, sötétzölddel a közcélú lassú töltők, míg világoskékkel a magáncélú gyorsöltők (ez buszflottákra jellemző) és sötétkékkel a magáncélú lassútöltők láthatók. A magáncéllal telepített töltők száma jelentősen felülmúlja a közcélú töltőállomások számát [1]

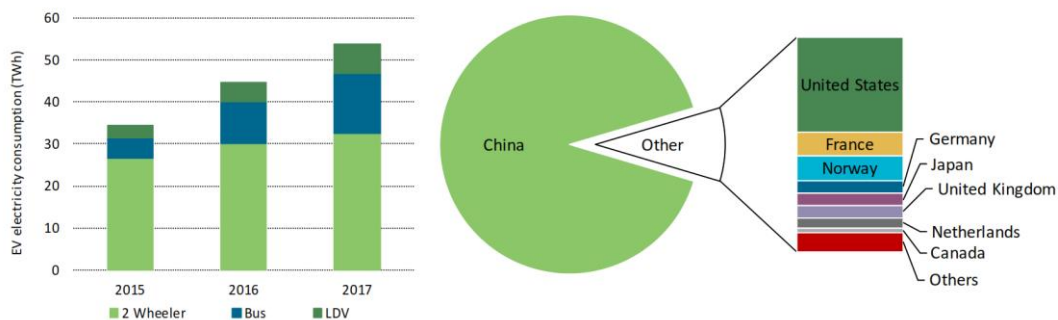
Fontos mérőszám az egy elektromos autóra jutó töltőfejek száma. Bár a tanulmány szerzői megjegyzik, hogy tekintettel arra, hogy az e-mobilitási piac minden országban még csak gyerekcipőben jár, ez az arány nem feltétlenül alkalmas a piacok összehasonlítására, mivel nehezen magyarázhatók a mérőszámonkénti eltérések. Azonban, ha figyelembe vesszük a piacok sajátosságait, gazdagodhatunk néhány értékes információval. Feltűnhet például, hogy azok az országok – úgy, mint Japán vagy Kína –

ahol a lakosság (legalábbis annak elektromos autóval rendelkező része) nagy népsűrűségű városokban él, nagyobb arányban rendelkeznek közcélú gyorsöltőkkel. Kínára vonatkozóan a szerzők megjegyzik, hogy a gyorsöltők nagy penetrációja tovább indokolható a kormányzati tulajdonban lévő flották és taxik jelenlétével. Ezek a járművek ugyanis jobban rá vannak szorulva a gyorsöltők által nyújtott szolgáltatásokra. További érdekesség, hogy míg Norvégiában a legnagyobb az elektromos autók részaránya az újonnan eladott autók közül, addig a közcélú villamos töltőhálózat részaránya a legalacsonyabbak között van (3. ábra).



3. ábra: Az egy elektromos autóra jutó közcélú töltők száma (baloldali tengely), kiemelt e-mobilitási piaccal rendelkező országoként. Pontok jelölik a jobb oldali tengelyhez tartozó tisztán elektromos hajtású autók részarányát az elektromos meghajtású gépjárművek között. Sötétkékekkel minden töltőtípusra vonatkozóan látható az egy villamos autóra jutó töltőszám, sötétzölddel a lassú töltőkre, míg világoszölddel a gyorsöltőkre nézve. Az EU tagországok esetén piros vonal jelzi az 2020-as célkitűzéseket [1]

A jelentős számú elektromos gépjármű és töltőállomás mellé a dolgozat szempontjából érdemes számosítani a hozzájuk tartozó villamosenergia-felhasználás mértékét. Ezzel ugyanis képet kaphatunk a villamosenergia-piac azon szegmenséről, amelyen a töltésekhez szükséges villamos energia kereskedelme zajlik (4. ábra). A legnagyobb felhasználó Kína, azonban az is látszik, hogy a keleti piacokon jóval nagyobb relevanciával bíró kétkerekű gépjárművek fogyasztják el a töltőkön vételezett energia nagyrészét.

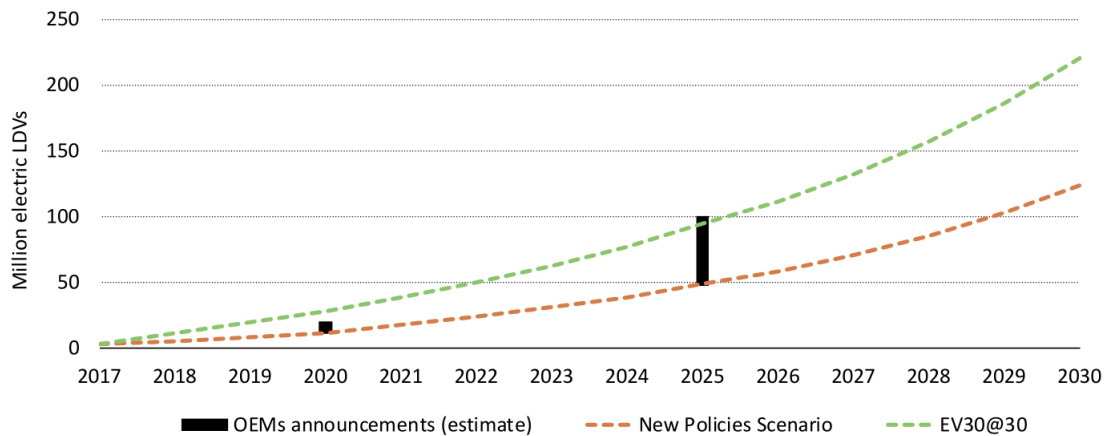


4. ábra: 2017-re a világ elektromos gépjárművek töltésére használt villamosenergia-mennyiség (54 TWh) meghaladta Magyarország teljes 2017-es éves energiafogyasztásának mértékét (45 TWh).

Az oszlopdiaagramon a kétkerekű járművek (világoszöld), a buszok (sötétkék), és a könnyűgépjárművek (sötétzöld, az amerikai egyesült államokbeli megfogalmazás szerinti Light Duty Vehicle, LDV kategória magába foglalja a személygépjárműveket is) részarányai láthatók, míg a kördiagramon az összes energiafogyasztás országonként eltérő aránya látható [1]

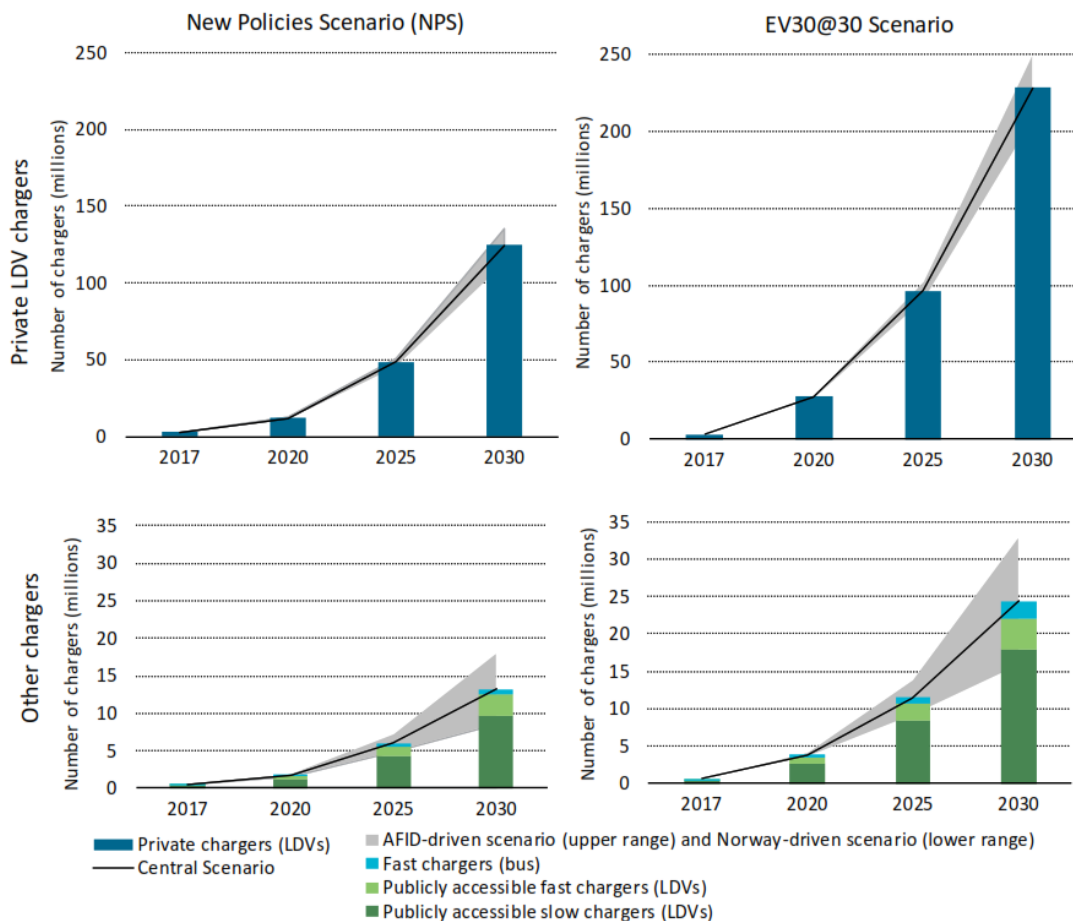
Mіндеzen adatokból jól látszik, hogy napjainkra az e-mobilitás szektor megkerülhetetlen részelemévé vált a világgazdaságnak és a villamosenergia-kereskedelemnek. A bemutatott adatok lehetővé teszik, hogy képet kapjunk a szektor nagyságáról, jelenlegi helyzetéről, és a trendek alakításában domináns szereplőkről. A következőkben – az [1] összefoglalónak megfelelően – a teljesebb kép kedvéért ismertetem azokat az előrejelzéseket, amelyek a szektor növekedés mértékének becslésére irányulnak.

Az IEA szakemberei a szektor növekedésének prognosztizálásához kétféle mérési módszert használnak. A New Policies Scenario (NPS) előrejelzési módszer a Párizsi éghajlatvédelmi egyezmény keretében tett nemzeti vállalásokat is figyelembe veszi, tekintettel az országonkénti szabályozásokra és a kormányzatok által már végrehajtott mérésekre. Az EV30@30-ra épülő előrejelzési mód az Electric Vehicles Initiative tagországainak EV30@30 néven tett vállalásait foglalja magában arra az esetre nézve, amennyiben ezek ki lennének terjesztve globális szintre (eszerint 2030-ra a gépjárművek 30%-át elektromos meghajtásúra cserélik, nem számítva a kétkerekű gépjárműveket). Az előbbi a realistább, míg az utóbbi az optimistább forgatókönyvet képviseli. Az előrejelzéseknek megfelelően 2030-ra nézve az eladott villamos gépjárművek száma gyorsuló ütemben fog növekedni. Alátámasztja ezt a gépjármű gyártók becslése is az eladott villamos autók számát tekintve. (5. ábra)



5. ábra: Az IEA becslései a villamos gépjárművek számára (narancssal az NPS, zölddel az EV30@30 forgatókönyv) a gyártók célértékeinek figyelembevételével (fekete). 2030-ra a realista előrejelzés szerint több, mint 100 millió elektromos gépjárműre számíthatunk az utakon [1]

A töltőállomások száma a becslések szerint az eddigiekhez hasonlóan követi majd a villamos gépjárművek számának változását (6. ábra). Mindkét scenárió szerint a privát töltők térnyerése mellett szükségesen nőni fog a közcélú töltőállomások száma, azon belül is a gyorsöltők részaránya, mindamellett, hogy a privát töltőállomások egy nagyságrenddel nagyobb arányban lesznek jelen. A realista forgatókönyv szerint 2030-ra több mint 100 millió privát töltőállomás létesülhet, míg a publikus töltők száma a legoptimistább scenárió becslése szerint 2030-ra 33 millióra nőhet.



6. ábra: A töltőállomások várható száma az NPS és az EV30@30 scenárió alapján, sötétkékkel a privát töltőállomások, világoszölddel a publikus gyorsöltők, míg sötétzölddel a publikus lassúöltők láthatók. Világoskék jelzi a buszok által használt gyorsöltőket [1]

Az ismertett előrejelzések szerint a szektorban megjelenő töltőegységek és gépjárművek száma gyorsuló ütemben fog nőni. A kitekintés értelmében ehhez mérten a villamosenergia-felhasználás mértéke is jelentősen nőni fog. Európát nézve az EV30@30 forgatókönyv akár több mint 150 TWh-val, amely a világ jelenlegi éves fogyasztásának közel háromszorosa. Kína esetén ehhez mérten több mint 250 TWh-val számol, amelyet az ország jelenlegi éves fogyasztásának (a világ éves fogyasztásának 91%-a, 49,1 TWh [1]) ötszörösére becsülnek.

2.2 Európai és hazai szabályozási környezet

2.2.1 Európai szabályozási környezet

A dolgozat szempontjából releváns szabályozási környezetet az Európai Unió 2014/94/EU irányelve [2] határozza meg, amely az alternatív üzemanyagok infrastruktúrájának kiépítésére vonatkozik. Ez az Európai Parlament által elfogadott direktíva előírja a tagállamok számára, hogy nemzeti szinten milyen jogszabályok alkotása szükséges a direktívában meghatározott célok eléréséhez. Ezen felül tájékoztatási kötelezettséget is ró rájuk, amelynek értelmében a nemzeti kormányok beszámolnak, hogy mik azok a lépések, amiket az infrastruktúra kiépítésének fejlesztése érdekében tesznek.

Mindemellett a dolgozat kérdésköréhez kapcsolódóan előírásra kerül, hogy „a tagállamoknak biztosítaniuk kell a gépjárművek villamos energiával történő ellátását szolgáló, nyilvánosan hozzáférhető infrastruktúra kiépítését” úgy, hogy „biztosított legyen az elektromos járművek közlekedése legalább a városi/elővárosi agglomerációkban és más sűrűn lakott területeken” [2]. Az előírásban szerepel, hogy a töltőállomások számát a tagállamok a 2020-ig becsült elektromos gépjárművek száma alapján szükségesek meghatározni. A direktíva ökölszabályként 10 villamos autónként legalább 1 villamos töltőállomás építését szorgalmazza, figyelembe véve a gépjárművek típusát, így a hozzájuk tartozó töltési technológiát. Emellett szorgalmazza a társasházak, irodaépületek és üzleti negyedek közelében felépített töltőállomások kialakítását, illetve a főbb közösségi közlekedési csomópontokon – úgy mint repülőterek, vasútállomások kikötői terminálok – való telepítést.

A dolgozat tárgyát képező töltőállomás elszámolási modell vizsgálatakor a direktíva alábbi pontjaiban foglaltakat szükséges figyelembe venni:

- *8. pont:* e szerint a „tagállamok biztosítják, hogy a nyilvános elektromos töltőállomások üzemeltetői szabadon beszerezhessék a villamos energiát bármely uniós villamosenergia-szolgáltatótól, a szolgáltatóval kötött megállapodás függvényében. Az elektromos töltőállomások üzemeltetői számára lehetővé kell tenni, hogy szerződéses alapon elektromos járművek feltöltésével kapcsolatos szolgáltatásokat nyújtsanak a fogyasztóknak, más szolgáltatók nevében és megbízásából is.”

- *12. pont:* „a tagállamok biztosítják, hogy a jogi keret lehetővé tegye azt, hogy elektromos töltőállomások villamosenergia-ellátásának céljából az adott háztartás vagy létesítmény ellátását biztosító szolgáltatótól eltérő szolgáltatóval is szerződést lehessen kötni.”
- *30. pont:* amely kimondja, hogy „az elektromos járművek töltésére szolgáló állomások kiépítését és üzemeltetését olyan versenypiacként kell kialakítani, amely a töltési infrastruktúra bevezetése vagy üzemeltetése iránt érdeklődő valamennyi fél számára nyitott.” [2]

A következőkben bemutatásra kerül, hogy a hazai szabályozási környezetben miként került implementálásra az előbbieken ismertetett direktíva.

2.2.2 Hazai szabályozási környezet

Magyarországon a 2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiáról (VET) [3] 2016-os módosításával jelent meg az elvi lehetősége annak, hogy aki töltőállomással rendelkezik, az számlát állíthasson ki az általa üzemeltetett töltőállomásokon elfogyasztott villamos energia után. Ez a 2.2.1. fejezetben ismertetetteknek megfelelően elengedhetetlen eleme a versenypiac kialakításának, illetve ezzel kezdődött meg az EU-s direktíva áttemelése a hazai jogalkotásba. A törvényben ezzel definiálásra kerül az elektromos gépjármű, az elektromos gépjármű töltésének, illetve a töltőállomásokat üzemeltető szereplő szerepköre. Ilyen formán egy újabb szereplő jelent meg a villamosenergia-piacon, név szerint a töltőállomás-üzemeltető, akinek a tevékenysége a Magyar Energetikai és Közműszabályozási Hivatal (MEKH) által engedélyköteles. 2017. július 14-én hatályba lépett 170/2017. (VI. 29.) kormányrendelet [4] hatására már a gyakorlatban is adott a lehetőség a számla kiállítására.

A töltési engedélyesre vonatkozó engedélykötelezettség alól kivételt képeznek azok a fogyasztók, akiknek a töltési tevékenysége nem gazdasági haszonszerzésre irányul, ezzel megadva a lehetőséget pl. céges villamosautó-flották kialakításának, illetve a lakossági fogyasztók esetén az otthontöltésre.

Dolgozatom szempontjából a továbbiakban a töltőállomás-üzemeltető szerepköre említésre méltó, ugyanis az ő feladata lesz a töltőállomáson forgalmazott villamos energia beszerzése, így a jelenlegi struktúrájú villamosenergia-piacon a

villamos autók fogyasztási tulajdonságaiból adódó elszámolási problémák is elsősorban az ő szerepkörét terhelik.

2.3 Kiegyenlítő energia szerepe

Ahhoz, hogy a villamos autók töltéséhez kötődő elszámolási problémakör felvázolásra kerülhessen, szükséges a kiegyenlítő energia, illetve a kiegyenlítőenergia-díj definiálása. A kiegyenlítő energia fogalmát a VET vezeti be, az elszámolás pontos módját pedig A Magyar Villamosenergia-rendszer Kereskedelmi Szabályzata (Kereskedelmi Szabályzat) határozza meg [5]. A következőkben nem célokom a VET és a Kereskedelmi Szabályzat részletes ismertetése, így a dolgozat értelmezéséhez szükséges alapvető folyamatokat igyekszem csak bevezetni.

A VET értelmében, a hazai VER-ben úgynevezett mérlegkörök, elszámolási szerveződések kerülnek kialakításra. Minden hazai elszámolási pont egy mérlegkörbe kell, hogy tartozzon. Egy elszámolási pont abban az esetben lesz mérlegkörtag, ha mérlegkör-tagsági szerződéssel rendelkezik az adott mérlegkörre vonatkozóan. A mérlegkörtagok menetrendet biztosítanak a mérlegkörfelelős részére, ezzel a mérlegkörfelelős nyomon követheti a mérlegkörbe tartozó szereplők előre becsült fogyasztását, termelését, egymás közötti kereskedelmi mérlegét, illetve import-export kereskedelmének mértékét. A mérlegkörfelelős az így megkapott menetrendek alapján egy aggregált mérlegkör-menetrendet állít össze, amelyet a szállítás előtti napon az átviteli rendszerirányítónak továbbít. Ezek alapján tudja elvégezni a rendszerirányító a másnapi üzemelőkészítést.

Egy mérlegkör így a VET értelmében „a kiegyenlítő energia igénybevételének okozathelyes megállapítására és elszámolására [...] létrehozott [...] elszámolás szerveződés” [3].

Dolgozatomban a pontos elszámolhatóság érdekében a töltőállomást üzemeltető szereplőre egy egyszemélyes mérlegkörként tekintek, aki ellátja a kereskedői feladatokat is, azaz beszerzi a töltésekhez szükséges villamos energiát (ez a felállás egyébként jellemző, a Kereskedelmi Szabályzatnak is megfelelő gyakorlat).

Szintén a VET definíciója értelmében a kiegyenlítő energia így „az átviteli rendszerirányító által a pozitív, vagy negatív irányú menetrendi eltérést kiegyenlítő szabályozás során a mérlegkörfelelősökkel elszámolt villamos energia” [3]. Ezt

követően a mérlegkörfelelős feladata, hogy a kiegyenlítő szabályozás során fellépő szabályozási energiát a tagokkal elszámolja. Ilyen módon minden szereplő a menetrendjétől való eltérés mértéke alapján fizeti meg a kiegyenlítő szabályozás díját. A kiegyenlítő energia díjának meghatározása ennek megfelelően az aktuális üzemállapotra vonatkozóan utólagosan történik, minden elszámolási időintervallumra, külön fel- és leszályozási árként. A kiegyenlítő energia díjának mértékegysége [HUF/kWh].

2.4 A dolgozat tárgyát képező probléma felvázolása

A 2.1-es fejezetben bemutatottaknak megfelelően a villamos gépjárművek terjedésének üteme világszinten évről-évre növekszik. Bár az e-mobilitás implementálásában Kína a legtöbb tekintetben túlszárnyalja a világ többi részét – és ezzel a szektor driverévé vált – ezzel párhuzamosan Európa és az Európai Unió is vezető szerepet vállal a kérdéskörének gyakorlatba történő átültetésében. Az előrejelzésekből megtudhattuk, hogy a realista forgatókönyvek szerint is a gépjárművek számának rohamos növekedése várható a közeljövőben. Bár a töltések túlnyomó többsége a becslések szerint a jövőben is privát töltőállomásokon történik, a publikus töltőállomások elterjedése elengedhetetlen feltétele az átjárhatóság biztosításának és ezzel a villamos autózás elterjedésének. Ennek következtében a közcélú töltőállomások részaránya a jövőben várhatóan a növekedni fog. A töltőállomásokon vételezett villamosenergia-mennyiség mindezek együttes hatásaként jelentősen nőni fog, annak beszerzése a liberalizált villamosenergia-piacon kihívások elé állíthatja a kereskedőket.

Annak érdekében, hogy betekintést nyerjek a beszerzési folyamat mikéntjéről és a felelősségi viszonyokról, a 2.2. fejezetben rövid áttekintést nyújtottam az Európai Unióban és hazánkban napjainkban érvényes regulációs környezet feltételeibe. Ezekből megtudhattuk, hogy az EU-n belüli irányelvek elvárják a töltőoszlopok létesítését és üzemeltetését, sőt az előírásokban szerepel, hogy mindezeket a szolgáltatásokat a tagországok versenypiacként szükségesek kialakítani. A töltőállomás-üzemeltetője szabadon választhat villamosenergia-kereskedőt. Nem elhanyagolható szempontként jelenik meg továbbá, hogy a felhasználó a saját meglévő villamosenergia-kereskedőjétől eltérő kereskedőt is választhat a töltéseinek kiszolgálására.

Betekintést adtam továbbá a kiegyenlítő energia, mint szabályozási energia megjelenésébe és elszámolásába, valamint az ezt lehetővé tevő mérlegköri rendszerbe.

Ezzel egy olyan lényeges költségfajta megjelenését vetítettem elő, amelyik jelentősen befolyásolhatja az üzemeltető változó költségeit.

A villamos autók töltését érintő különböző aspektusok bemutatását követően körvonalazódik a problémakör, ami egy töltőállomás-üzemeltető és beszerzési lánc szereplői számára égető kérdéseket vethet fel.

Az autók megnövekedett számával, így az adott töltési ponton megnövekedett villamosenergia-igénnyel együtt az előre beszerzendő villamosenergia-mennyiség menetredezése és ütemezése, illetve a helyes villamosenergia-beszerzés stratégiájának megválasztása elengedhetetlen a rentábilis üzemeltetéshez. A töltőállomás üzemeltetője amennyiben nem megfelelően jelzi előre a töltőállomásán vételezett villamosenergia-mennyiséget, úgy az eltérés mértékével arányos kiegyenlítőenergia-díjat fog fizetni. Azonban az autók eltérő töltési szokásai, illetve az eltérő beérkezési és töltési idők hatására a töltőállomásokon kialakuló volatilis terhelési állapotok mellett felmerül a kérdés, hogy miként becsülhető a töltőállomás menetrendje, sőt ennyire kiszámíthatatlan töltési folyamatok mellett érdemes-e előre becsülni a töltőállomás fogyasztását.

A kérdéskör vizsgálatához – a villamos autók és töltőállomások jelenleg még relatíve alacsony száma miatt – valós adatsorok hiányában szimulációs keretrendszer kidolgozását választottam. Egy ilyen keretrendszer lehetővé teszi a töltőállomásra jellemző terhelési görbék előállítását és a töltőállomásra vonatkozó eltérő paraméterek hatásainak vizsgálatát. Ezt követően a paraméterek módosításával megfigyelhető a modell viselkedésének változása. A kapott eredmények ilyen formán lehetővé teszik egy elszámolási modell felállítását, melynek segítségével becsülhetővé válnak a töltőállomást üzemeltető szereplők fajlagos költségei. Az általam kidolgozott modell szimulációi által kapott adatok segítségével megállapításokat teszek a kiegyenlítő energia mértékének és díjának az energia díjakra gyakorolt fajlagos hatásáról.

3 A modellek bemutatása

Ahogy az a 2.4. fejezetben felvázoltam, a munka célja annak szimulációk útján történő vizsgálata, hogy az elektromos autók töltése során az egy töltőállomásra jellemző paraméterek hogyan és milyen mértékben befolyásolják a fogyasztó által viselt költségeket. Munkám során ennek megfelelően lépésről-lépésre haladva igyekeztem megalkotni egy olyan modellt, amely alkalmas lehet különböző költségtényezők hatásait meghatározni a fogyasztó által kifizetett végösszegre. Először egy olyan szimulációs modell megalkotása volt a célom, amely lehetővé teszi a vizsgálatokhoz szükséges negyedórás terhelésgörbék előállítását, amelyek így bemeneti adatokat szolgáltathatnak az elszámolási modell részére. A munka eddigi szakaszában elsősorban az energia díjak, illetve a kiegyenlítőenergia-díj kapcsolatát helyeztem előtérbe, tekintve, hogy utóbbi jelentős költséget képvisel az energiadíjakhoz mérten [6][7].

A program megírásához, továbbá a kimeneti eredményeket tartalmazó adatsorok megjelenítéséhez MATLAB-ot használtam. A tesztelés folyamán Nissan Leaf típusú gépjármű töltési karakterisztikájának felhasználásával, a töltőállomásra beérkező gépjárművek szimulált töltöttségi állapotának figyelembevételével állítottam elő adott töltőállomásra vonatkozó negyedórás felbontású napi terhelési görbét. Vizsgálataimat 1 napos időtartamokra végeztem másodperces felbontással, különböző futtatási szám mellett. Statisztikai alapú közelítést adtam az autók töltőállomásra való beérkezésének időpontjára, illetve a beérkezett autó töltöttségi szintjére és a töltési időtartam végén jellemző töltöttségi szintre vonatkozóan – a [8]-ban ismertetett módszernek megfelelően. Emellett figyelembe vettem a töltőfejek számától függő, több párhuzamos beérkezés esetén jellemző várakozási időszakot, és a kódban megoldást adtam az így bekövetkező sorban állási problémák kezelésére.

3.1 Töltőállomás terhelésére vonatkozó szimulációs modell bemutatása

3.1.1 Bemeneti paraméterek bemutatása

A töltőállomás modellezése során az alábbi modellparaméterek változtathatók:

- *A futási idő hossza:* ezzel az értékkel határozható meg egy töltőállomás szimulációjának időtartama. A szimulációk jellegéből adódóan – tekintve, hogy a beérkező autók száma is napi eloszlással jellemezhető – ez az érték jellemzően 1 nap, másodperces felbontásban.
- *A futtatások száma:* a futtatások számával határozható meg, hogy hány egymást követő futási időt szeretnénk szimulálni. A paraméter változtatásával egy naptól kezdődően akár több, egymást követő, egy évig tartó időszak is modellezhető azonos paraméterezés mellett. Szimulációim során jellemzően 365 napos intervallumokat vizsgáltam.
- *A futtatások ismétlésének száma:* az elszámolási modell-paraméterek érzékenységének vizsgálatához nagyszámú statisztikai mintára van szükség. Ezek előállításához modellemben paraméterezhető, hogy egymás után hányszor fusson le egy adott, meghatározott futási hosszal és futtatással rendelkező szimuláció.
- *A maximális várakozási idő hossza:* a modell pontosításához szükség volt egy maximális várakozás idő beállítására, amely segítségével meghatározható egy olyan időkorlát, amelyen felül a beérkező autók már „nem várják meg”, hogy töltésre kerüljenek, hanem tovább haladnak.
- *A töltőállomás töltőfejeinek száma:* a paraméter segítségével meghatározható, hogy egy töltőállomás hány párhuzamos töltést képes kezelni.
- *A töltőállomás típusának beállítása:* több különböző töltőállomástípus jellemezhető a modellen belül a váltakozó áram értékének megadásával.
- *A töltőállomásra beérkező autók számának napi eloszlását mutató jelleggörbe:* amelynek megfelelően az autók átlagos beérkezése megoszlik a nap folyamán.
- *A beérkező autók töltési karakterisztikája:* amely a be- és kimenő töltöttségi állapot között adja meg a kapcsolatot.

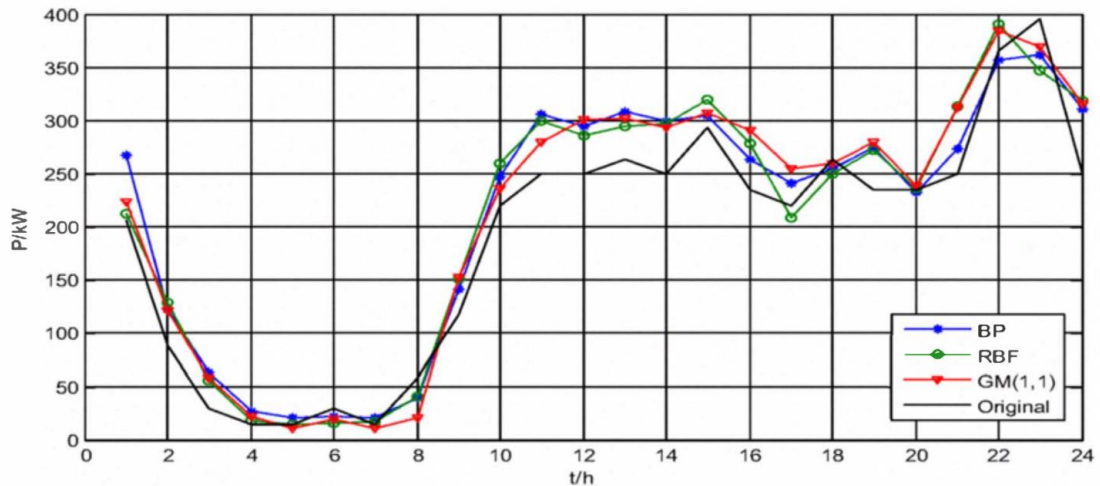
3.1.2 A szimulációs modell felépítése

A töltőállomáson vételezett energiamennyiség jellemzéséhez szükségem van a *beérkező autók napi eloszlásának jellemzésére*. Mind a beérkezések, mind magának a töltési folyamat meghatározásához nincs egységesen elfogadott megoldás a

szakirodalomban. Hasonló típusú szimulációkhoz alkalmaznak például Markov-lánccokat, ahogy [9] tette a töltési folyamat meghatározásához, vagy Monte Carlo szimulációt [10], esetleg a kettő kombinációját [11]. A beérkező autók napi eloszlásához az egy időegységben érkező autók számát a modellezés során Poisson eloszlással közelítettem, amely eloszlás λ várhatóértéke függ a megválasztott időegységtől és a vizsgált időegység időpontjától.

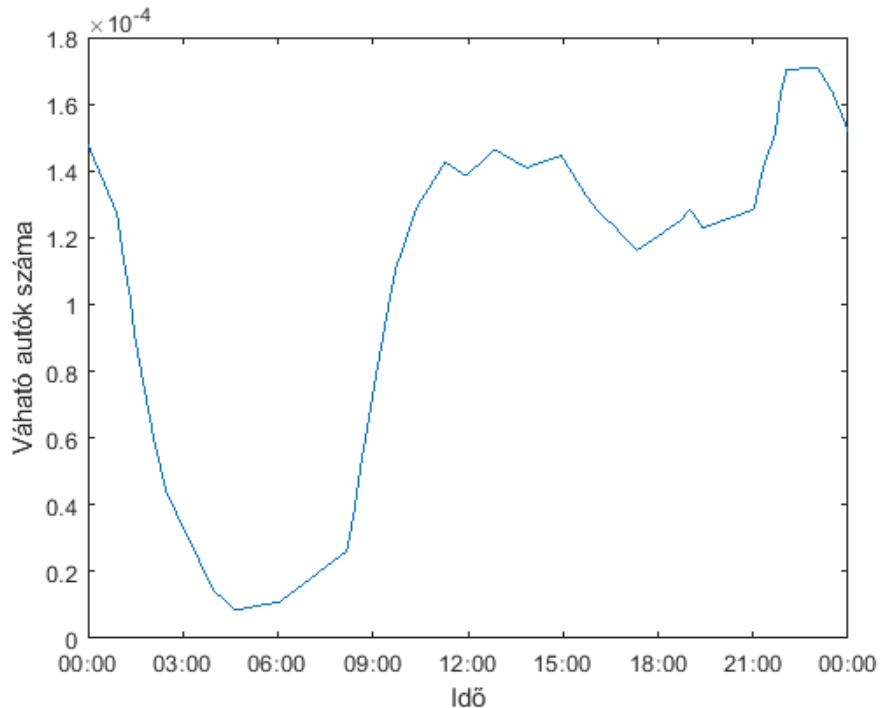
Az általam alkalmazott megközelítés során különböző töltőállomások terhelési görbéit megvizsgálva feltűnővé válik, hogy egyes napszakokban azonos módon változik a villamosenergia-felvétel mértéke. És bár egy adott görbealaktól jelentősen eltérhet egy más típusú, egyedi környezetben fellelhető – például egy otthoni, vagy egy autópálya mellett elhelyezkedő – töltőállomás terhelési görbéje, feltételezhető, hogy a töltőállomás terhelési görbéjének eltérő alakja a felhasználás módjához kötődő, eltérő töltési szokásokat tükrözi. Munkám során köztereken elhelyezkedő, publikus töltőállomások teljesítményfelvételére vonatkozóan végeztem vizsgálatokat.

Dolgozatomban és számításaim során a [12]-ben bemutatott különböző gépi tanulással becsült, villamos gépjárművek jellemző napi terhelési görbéit veszem alapul. Mivel ezekhez hasonló terhelési görbéket sok napra vett átlagos teljesítményfelvétel mérései alapján állapítják meg, abból a feltevésből indultam ki, hogy a terhelésváltozás mértéke leköveti a beérkező autók számának változását. Ennek értelmében a megnövekedett terhelési értékeket a töltőállomáshoz beérkező autók számának növekedése és azok töltésének megnövekedett villamosenergia-igénye okozza. Ezt a feltevést szem előtt tartva lehetőség nyílik a terhelési jelleggörbe felvételére, amelynek segítségével előállítható egy sűrűségfüggvény. Egy ilyen függvény minden pillanatban megadja az autók beérkezésének valószínűségét. Az így előállt függvényt ezt követően felszorozhatjuk az egy napon beérkező várható autók számával, így minden pillanatban ezzel arányosan nő a beérkezés valószínűsége.



7. ábra: Különböző gépi tanúlással becsült, jellemző villamos gépjármű terhelési görbék [12]

Ennek megfelelően 7. ábrán látható kék görbe alapján előállítottam a szükséges sűrűségfüggvényt. Ehhez egy MATLAB script [13] segítségével meghatároztam a vizsgált görbe értelmezési tartományát az x és az y tengely kezdeti és végpontjának helye és értéke alapján. Ezt követően szabálytalan lépésköz mellett, tetszőleges számú pont kiválasztásával leolvashatóvá váltak a görbe függvényértékei. Mivel a terhelési görbét a későbbiekben a beérkező autók számának változására, pontosabban a változás jellegének lekövetésére használom, ezért az így nyert adatsor ilyen mértékű közelítéssel történő megadása megengedhető. Mindezek mellett egy eltérő terhelési jellegű görbével rendelkező töltőállomás esetén a módszer a fentieknek megfelelően egyszerűen megismételhető és használható, így más jellegű terheléssel rendelkező töltőállomások is modellezhetőek. Az így kapott pontthalmazt ezt követően lineárisan interpoláltam a napi másodperces felbontás értékeire, majd a kapott értékeket normáltam (8. ábra).

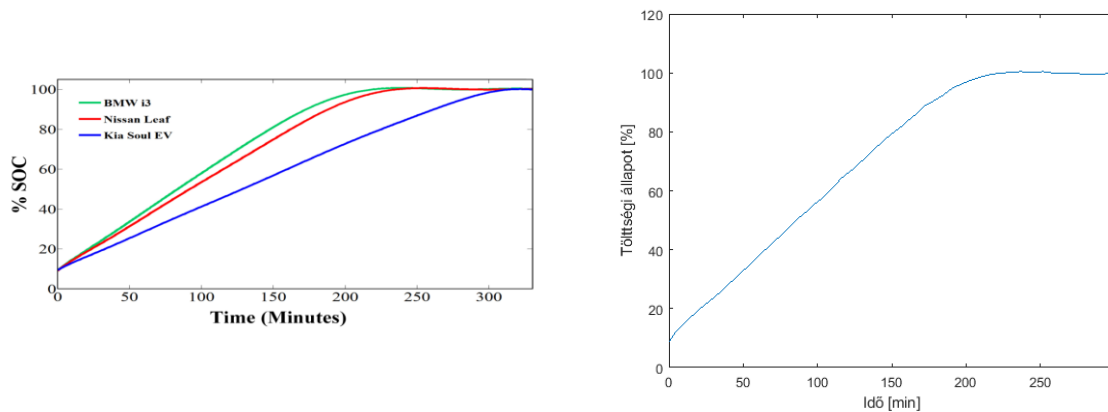


8. ábra: Normalizálást (ekkor az egy nap alatt az állomásra érkező autók várható értéke 1) követően az autók napi eloszlásaként kapott sűrűségfüggvény másodpercenkénti felbontásban

A kapott adatsor alapján történik *a töltőállomásra beérkező autók szimulációja*. A töltőállomásra való beérkezéseket másodpercenkénti felbontásban vizsgáltam, vagyis minden másodpercre nézve megállapítottam, hogy az egységnyi időtartam alatt történt-e beérkezés. Ennek meghatározásához rendelkezésemre állt az adott másodpercben várhatóan beérkező autók száma (a súlyozott sűrűségfüggvény alapján). Feltételeztem, hogy minden egyes vizsgált másodpercenkénti időintervallumban egymástól függetlenül történhet beérkezés. Ez alatt az egységnyi időtartam alatt az autók várható száma nem változik, és adott másodpercen belül is kis valószínűséggel, egymástól függetlenül történhetnek beérkezések. A töltőállomás körül keringő autók száma ugyanakkor nagyoknak tekinthető. Ezen feltételek teljesülése mellett a folyamatot közelíthetjük Poisson-eloszlással. Ennek megfelelően minden másodpercben egy λ várható értékű Poisson-eloszlásnak megfelelően sorsolom ki a beérkezések számát, amelyben a λ értékeket a súlyozott sűrűségfüggvény vektora tartalmazza. A sorsolást követően megállapítható, hogy amennyiben 0-tól eltérő értéket kapok az adott másodpercben, úgy történt beérkezés.

A töltőállomásra beérkező autók beérkezésének szimulációjához szükséges továbbá a *töltésre fordított idő meghatározása*. Ahhoz, hogy a villamos autó beérkezésénél, illetve a töltőállomás elhagyásánál jellemző töltöttségi állapot (state of charge, SOC) értékét meghatározzam, a [8] szerinti, statisztikailag alátámasztott normális eloszlást használtam. Ennek megfelelően a kód normális eloszlás mellett határozta meg egy beérkező autó a beérkezés pillanatában várható töltöttségi szintjét, valamint a töltőállomás elhagyásánál várható töltöttségi értékét. A normális eloszlás előállításához szükséges paraméterek (várhatóérték és szórás) a [15]-ben megtalálható nagyszámú mintából vett értékekből származnak. Az így előállított eloszlásfüggvényeknek megfelelő valószínűségi változóra vonatkozóan kerül meghatározásra egy véletlen érték, amely megfelel a beérkezési és kimeneti SOC-nak.

A beérkezési és kimeneti SOC közötti töltési idő meghatározásához egy hazai viszonylatban is népszerű Nissan Leaf típusú gépjármű töltési karakterisztikáját [14] használtam fel (9. ábra).



9. ábra: Különböző gépjárművek – köztük a Nissan Leaf – töltési karakterisztikái [14] (baloldalt) és az ez alapján előállított töltési karakterisztika görbe (jobbaldalt)

A töltési karakterisztika köztes pontjainak megállapításához – azonos módon a sűrűségfüggvény értékeinek meghatározásához – a görbéről felvett pontokat interpoláltam. Az eddigi adatokból előállnak azok a vektorok, amelyek alapján meghatározhatók a töltési folyamatok másodperces felbontással. A töltési folyamat állapotát (0: nincs töltés, 1: van töltés) egy foglaltsági mátrixban regisztrálom, melynek sorai a töltőfejek számának, míg oszlopai egy napnak felelnek meg másodperces felbontásban. A szimuláció ezen szakaszában rendelkezésemre állt minden járműre egy

értékpár, amely tartalmazza a jármű beérkezési idejét, illetve a töltési időtartam végpontját. Ezek az értékpárok csak a legkritkább esetben oszlanak el egy kiszolgáló egységnél átfedés nélkül. Amennyiben a beérkezések sűrűbb időszakokban átfedéssel történnek, viszont több kiszolgáló egység is rendelkezésre áll, úgy a beérkezések átirányításra kerülnek egy másik, szabad kiszolgálóhoz. Előfordul azonban, hogy egy beérkező gépjármű nem talál egy szabad töltőfejet sem, ekkor várakozni kényszerül, egészen addig, amíg fel nem szabadul egy kiszolgáló egység. Ennek a problémának a feloldásához a beérkezések sorrendjében *az alábbi sorbaállási megoldást alkalmaztam.*

Egy autó beérkezésekor logikai vizsgálattal meghatározható, hogy a beérkezés időpontjában a megfelelő töltőfejen zajlik-e töltés. A beérkező jármű, amennyiben szabad az első kiszolgáló, ahhoz a töltőfejhez áll be tölteni. Ekkor a töltések regisztrálására szolgáló foglaltsági mátrixnak az első kiszolgáló egységre vonatkozó sorát a töltési időtartamra, vagyis a járműhöz tartozó beérkezési időponttól kezdve annak kimenő időpontjáig másodpercenként feltöltöm 1-esekkel. Amennyiben a kiszolgáló foglalt, akkor a logikai vizsgálat elvégzését megismétlem a második, majd a harmadik kiszolgáló egységre és így tovább, egészen addig, amíg meg nem vizsgáltam az összes kiszolgálót, hogy van-e szabad töltőkapacitása. Ezzel analóg módon végzem el a vizsgálatot a következő beérkező gépjárművekre is. Amennyiben az új beérkező nem talál szabad kiszolgálót a beérkezés időpontjában, úgy elkezdem megvizsgálni, hogy a beérkezés időpontjától kezdve melyik lesz az első szabad időpont, amikor leghamarabb felszabadul egy kiszolgáló. Ezt követően megkeresem, hogy hányadik számú kiszolgáló egység tartalmazza az első szabad helyet. Az így meghatározott kiszolgáló felszabadulását követő másodpercre (jelen esetben nem számoltam a töltőfejre való csatlakoztatással, az autók ki- és beállításával stb. járó holtidővel) állítottam be a várakozó autó töltési periódus kezdőpontját. Ettől a töltési időponttól kezdődően a beérkező jármű várható töltési időtartamát fogja eltölteni az állomáson.

3.1.3 A szimulációs modellel kimeneti adatai

A szimuláció futtatását követően egy, a töltőfejszámnak és a futtatás hosszának megfelelő nagyságú mátrix áll elő, amely megmutatja, hogy melyek azok a másodpercek, amikor töltés történik, vagyis amely másodpercekben fellép a töltőoszlop típusának megfelelő teljesítményfelvétel. Ebből a mátrixból kerül átlagolásra minden

egymást követő 900 másodperc, így előáll az a negyedórás terhelési görbe, amely már felhasználható az elszámolási modell megalkotásához.

3.2 Az elszámolási modell bemutatása

A kiegyenlítőenergia-költségek és a beszerzési energiaköltségek vizsgálatához az alábbi megállapításokkal éltem. A 2.3. fejezetben bemutatott módon a kiegyenlítő energia abban az esetben jelenik meg a rendszerben, ha a valós fogyasztási érték nem egyezik meg a menetrendben foglaltakkal. Az így megjelenő kiegyenlítő szabályozással járó energiamennyiséget a rendszerirányító a mérlegkörfelelősökkel számolja el. A 2.3. fejezetben leírtaknak megfelelően a töltőállomást üzemeltető szereplőre egy egyszemélyes mérlegkörként tekintek, aki egyben a kereskedői szerepkört is betölti. Így a kiegyenlítő energia, az általa szabott menetrendtől való eltéréseként fog megjelenni, majd a végső energiaköltségekben az eltérés mértékétől függő többletköltséget fog jelenteni. Ennek megfelelően vizsgálataim során egy korábbi időszakra (2017-es év) vonatkozó, ismert kiegyenlítőenergia-díjakkal és energiaárakkal számoltam [6][7]. A szimulációkat a töltőállomás terhelésére vonatkozó szimulációs modellhez hasonlóan MATLAB-ban végeztem.

3.2.1 A bemeneti paraméterek meghatározása

- *A töltési folyamatok adatsorai:* az adatsorok egy évnyi, 365 napra vonatkoztatott, szimulált negyedórás terhelési adatokat tartalmaznak egy adott töltőállomásra vonatkozóan. A 3.1. fejezetben bemutatott szimuláció eredményeként, az ott előállított 365x96-os mátrix még teljesítmény-adatokat tartalmaz [W] mértékegységben, amelyekből ebben a szakaszban kerülnek megállapításra a fogyasztott energiaértékek [kWh].
- *A töltőállomáshoz tartozó menetrend adatsora:* az itt megadott negyedórás-felbontású menetrend úgy került megállapításra, hogy a szimulációk során egy nagyszámú, 1000 napra vett futtatás eredményeként kapott napi negyedórás terhelési görbéket átlagoltam. Az átlagolás eredményeként kapott 1x96-os mátrix fogja tartalmazni azokat a becsült terhelési adatokat, amelyek a vizsgált egy éves időszak minden napjára vonatkoznak.

- *A vizsgált időszakra vonatkozó kiegyenlítőenergia-díjak:* a vizsgált időszakra vonatkozó kiegyenlítőenergia-díjak meghatározáshoz minden negyedórára havi átlagértékekkel számoltam, mind a pozitív, mind a negatív irányú eltérések esetén. A vizsgált időszakra nézve a MAVIR 2017-re számolt kiegyenlítőenergia-díjait használtam fel [6].
- *A vizsgált időszakra vonatkozó energiadíjak:* Az előre beszerzett energiamennyiség díjait a HUPX DAM 2017-es hónapokra vett átlagos energiaárak [7] szerint határoztam meg a zsinór-, illetve csúcsidőszakokra.

3.2.2 Az elszámolási modell felépítése

A kiegyenlítő energia mértékének meghatározására a menetrendtől való pozitív és negatív irányú eltérés mértékét vizsgáltam meg. Ehhez a 3.2.1. fejezetben bemutatott menetrendet alapul véve, a töltőállomás egy éves terhelési adatainak minden negyedórájára előjelhelyesen megállapítottam, hogy milyen irányban és mértékben tér el az előre becsült menetrend megfelelő negyedórás értékeitől. Pozitív eltérésnek számítva azokat az eseteket, amikor a menetrendben szereplő fogyasztás elmarad a valós fogyasztástól, negatív eltérésnek számítva, amikor meghaladja azt. A számolás során a 3.2.1. fejezetben részletezetteknek megfelelően éltem azzal az egyszerűsítéssel, hogy a kiegyenlítőenergia-díjak havi átlagával számoltam, amelynek megfelelően a számolt energiamennyiségeket is aggregáltam a megfelelő hónapokra. A havi átlagos árak használatával megtartható a díjakra jellemző szezonális tulajdonsága, de elkerülhetők azok az rövid idejű anomáliák, amelyek torzítanák a vizsgálatok végeredményeit. A költségek értékei a számolt energiamennyiségek [kWh], illetve a hozzá tartozó energiaköltségek [HUF/kWh] szorzatából adódnak [HUF] mértékegységben.

Az energiadíjak számítása során kétféle beszerzési portfóliót feltételeztem, illetve a kiegyenlítő energia mértékének meghatározásánál bemutatott számolási módhoz hasonlóan itt is az energiadíjak havi átlagával számoltam. Az energiadíjakat továbbá az adott havi átlag árfolyamnak megfelelően átváltottam [EUR/kWh] mértékegységről, [HUF/kWh] mértékegységre.

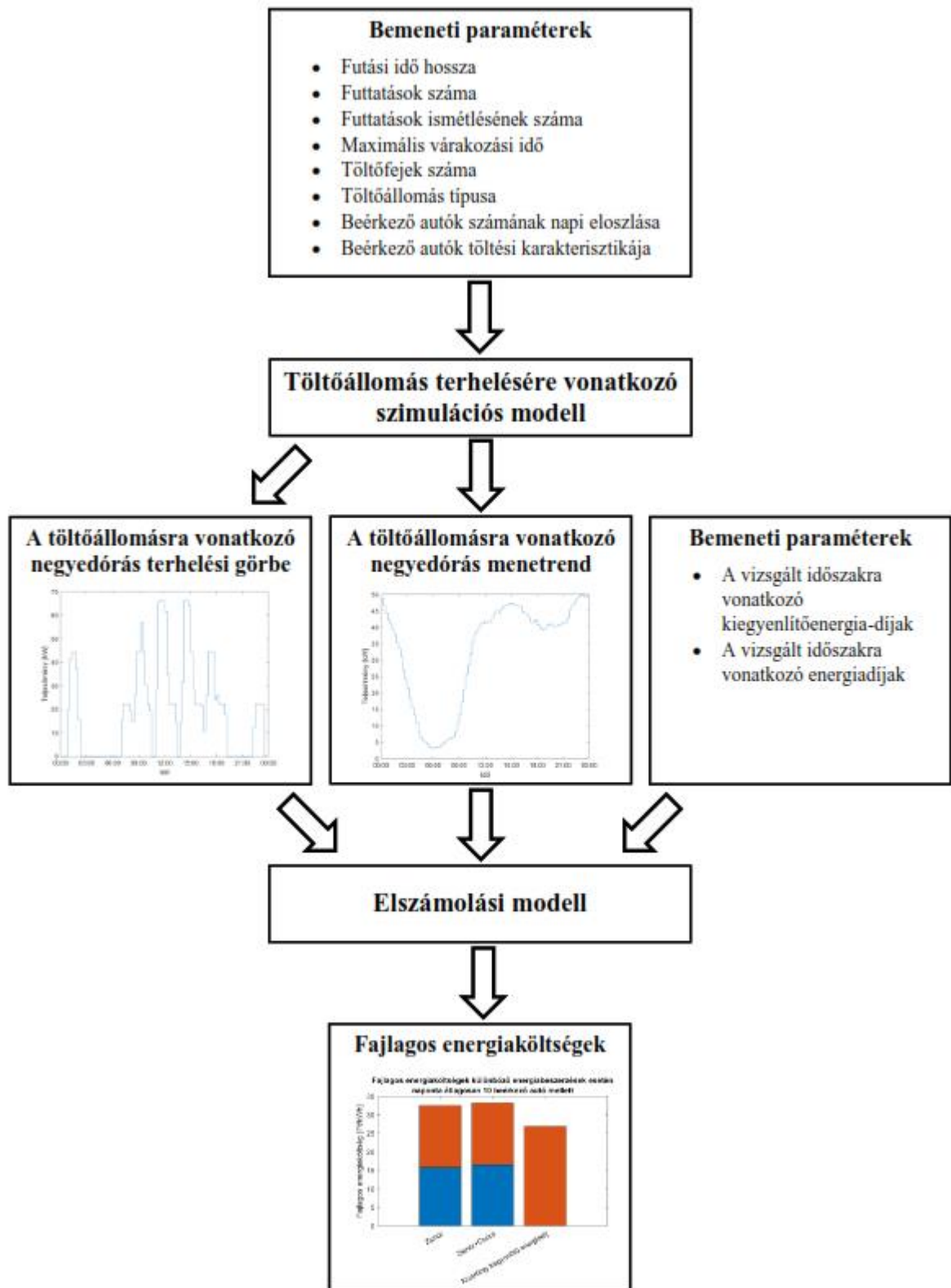
Első esetben a fogyasztó kizárólag zsinór-termékből fedezi a villamosenergia-igényét, ebben az esetben minden negyedórában egyenletesen elosztva veszi fel a

terhelését a nap folyamán. A beszerzéshez szükséges energiamennyiség negyedórás értékeit a napi értékek átlagaként határoztam meg.

A második esetben zsinór- és csúcstermék beszerzését feltételeztem, ennek megfelelően külön átlagoltam a csúcsidőszakra vonatkozó (HUPX DAM [7] szerint hétköznaponként 9:00 – 20:00) időszakot, illetve az azon kívül eső időszakot. Az így kapott zsinór- és csúcserőértékeket a megfelelő időszakokban (zsinór esetén a nap minden negyedórájában jellemző érték, csúcs esetén a kijelölt negyedórákban a csúcsidőszakra vett átlag- és a zsinórterhelés különbségeként előállt érték) egyenletesen elosztottam.

Vizsgáltam ezen felül egy harmadik esetet is, amely során nem kerül előzetes beszerzésre a menetrendnek megfelelő energiamennyiség. Ebben az esetben az energiaköltség kizárólag pozitív irányú kiegyenlítő energia eltérésből, és az ennek megfelelően előzőleg meghatározott módon a kiegyenlítőenergia-díjból lett fedezve.

Annak érdekében, hogy a különböző napi terhelések és ezáltal az eltérő beszerzett és kiegyenlítőenergia-költségek összehasonlíthatóvá váljanak, *fajlagosítottam* a költségeket a fogyasztott energia függvényében. A szükséges energia- és kiegyenlítőenergia-mennyiségek meghatározását, majd a költség számítását követően, havi energia költségeim adódtak [HUF] mértékegységben. Ezeket a kiegyenlítőenergia- és energiaköltségeket osztottam a megfelelő hónapokban fogyasztott összes energiamennyiséggel. Ennek megfelelően egy olyan [HUF/kWh] fajlagos mérőszámot kaptam, amely segítségével összehasonlíthatóvá válnak az eltérő bemeneti paraméterek mellett előállított elszámolási módok is. Azaz különböző energiabeszerzési módokkal és terheléssel rendelkező töltőállomások érzékenysége is vizsgálható a változóköltések által okozott hatásokra.



10. ábra: Folyamatábra az elszámolási modell szimulációs környezetére vonatkozóan

4 Eredmények

4.1 Töltőállomásra vonatkozó eredmények

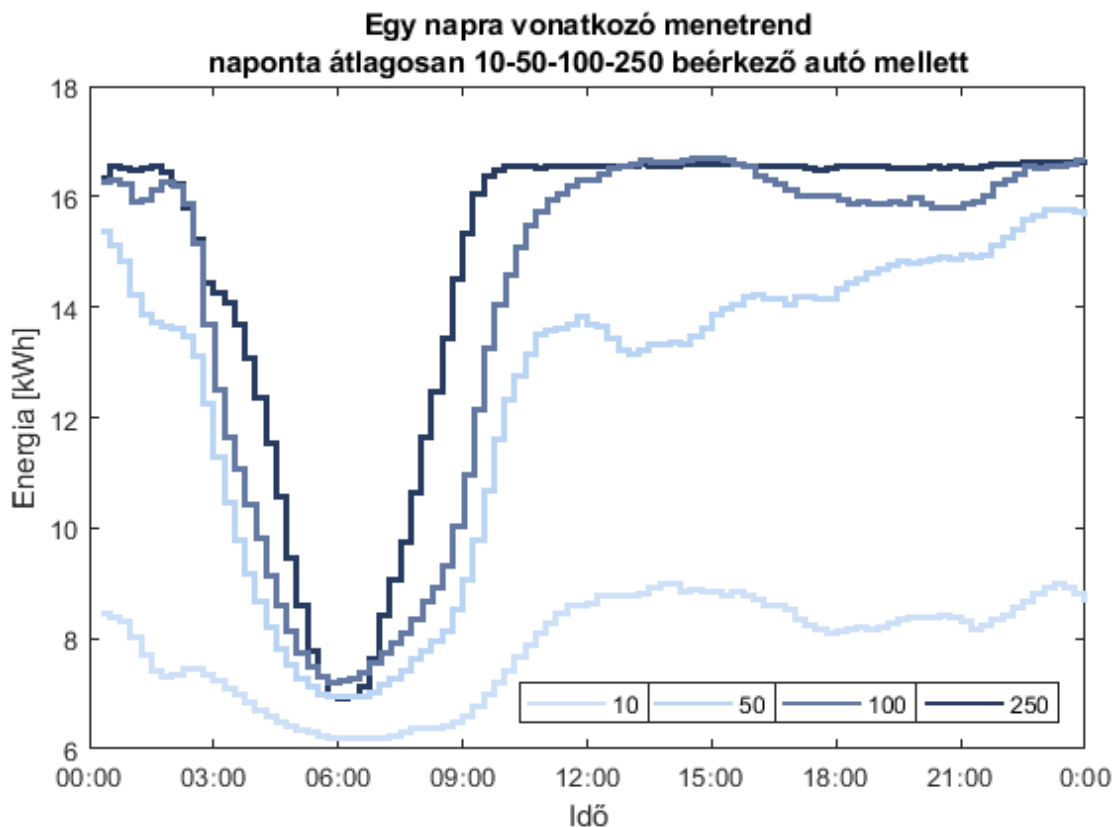
A töltőállomás terhelésére vonatkozó szimulációk részeként a beérkező autók számának változtatásával vizsgáltam, hogy a paraméter változása milyen formában befolyásolja a töltőállomás által szolgáltatott menetrendet, illetve a napi terhelési görbe lefutását. A továbbiakban bemutatom a szimuláció eredményeként előállt, a beérkező autók számának változása melletti terhelésváltozásokat reprezentáló ábrákat.

A szimulációkat az alábbi paraméterekkel futtattam:

- *A naponta beérkező autók átlagos száma: 10 – 500,*
- *Töltőfejek száma: 3,*
- *Töltési teljesítmény: 3 fázis, 32A, 400V AC,*
- *Futtatott napok száma: 365,*
- *Futási idő hossza: 1 nap = 86400 sec,*
- *Maximális várakozási idő: 600 sec,*
- *Átlagolás (elszámolási időtartam): 15 min,*
- *Gépjármű típusa (töltési karakterisztikája): Nissan Leaf,*
- *Menetrend: 1000 napra futtatott átlagértékből.*

4.1.1 Terhelésváltozás a beérkező autók számának függvényében – nagyszámú minta átlagolása, azaz a menetrend alakulása a beérkező gépjárművek függvényében

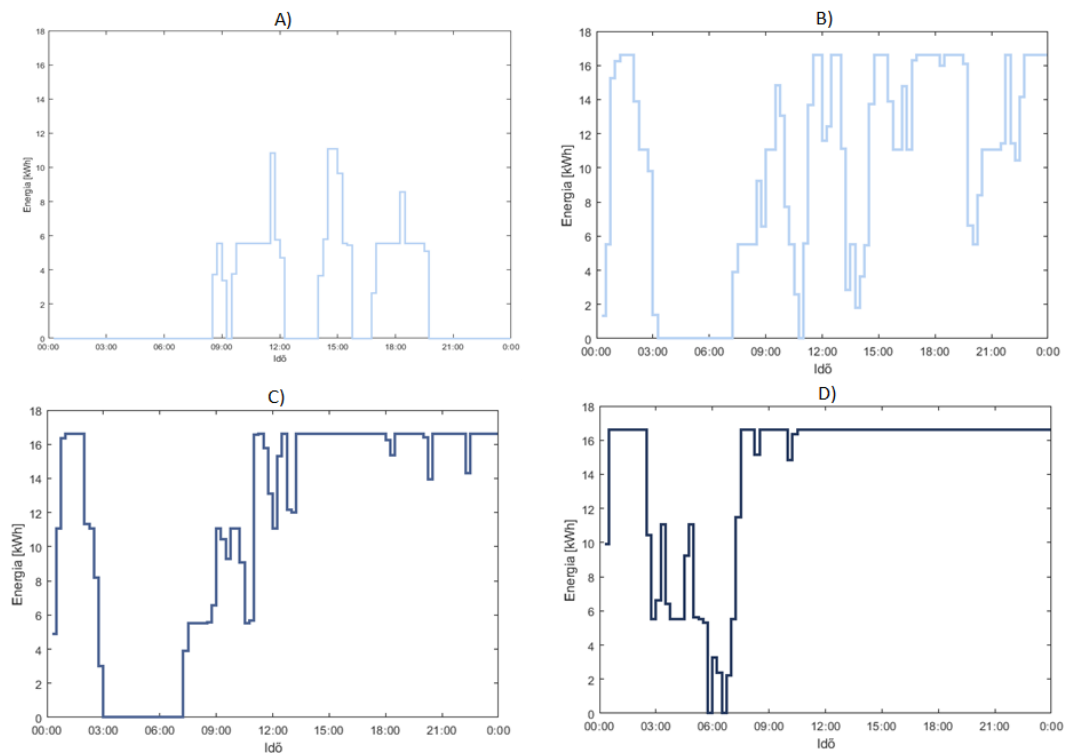
A 11. ábra mutatja, hogy a naponta beérkező autók átlagos számának növekedésével folyamatosan növekszik a töltőállomás alapterhelése. Észrevehető, hogy a töltőfejek maximális kihasználtságáig a csúcsidőszakok napközben elkezdnek „kisimulni”, fokozatosan megszűnnek a völgyek, leszámítva a hajnali időszakot. Ez a jelentős mélyvölgy annak köszönhető, hogy – a 8. ábra szerinti sűrűségfüggvény értelmében – ebben az időszakban csak rendkívüli ritkán érkeznek be gépkocsik, illetve a korábbi időszakban beérkező autók a maximum 10 perces várakozási időnek köszönhetően nem „várják meg”, amíg sorra kerülnek. Így ez az időszak kihasználatlan marad, azonban azoknál a szimulációknál, amelyek még a várakozási idő paramétere nélkül kerültek futtatásra (azaz a járművek végtelen hosszú időtartamig hajlandóak voltak várakozni, hogy sorra kerüljenek) ez a mélyvölgy is eltűnt.



11. ábra: Napi menetrendek eltérő átlagos gépjárműszámok (10-50-100-200) mellett

4.1.2 Terhelésváltozás beérkezőautók számának függvényében – egy napra vonatkozólag

A 12. ábra mutatja a napi terhelés változását a beérkező autók átlagos számának hatására. A 365 napos időtartamra vonatkozó futtatások első napjait választottam ki példaként az előzőleg is bemutatott napi 10, 50, 100, és 250 beérkező autószám mellett. Hasonlóan a 11. ábrához, a 12. ábrán is megfigyelhető a mélyvölgyek fokozatos eltűnése és feltöltődése, mindamellett, hogy a hajnali mélyvölgy ezekben az esetekben is megmarad. Továbbá észrevehető, hogy míg az első ábrán kis járműszám mellett az eltérés jelentős az utóbbin látható megfelelő görbékhez képest, addig nagy járműszám mellett szemmel látható hasonlóság kezd kialakulni, ahogy a mélyvölgyek feltöltődése is végbemegy.

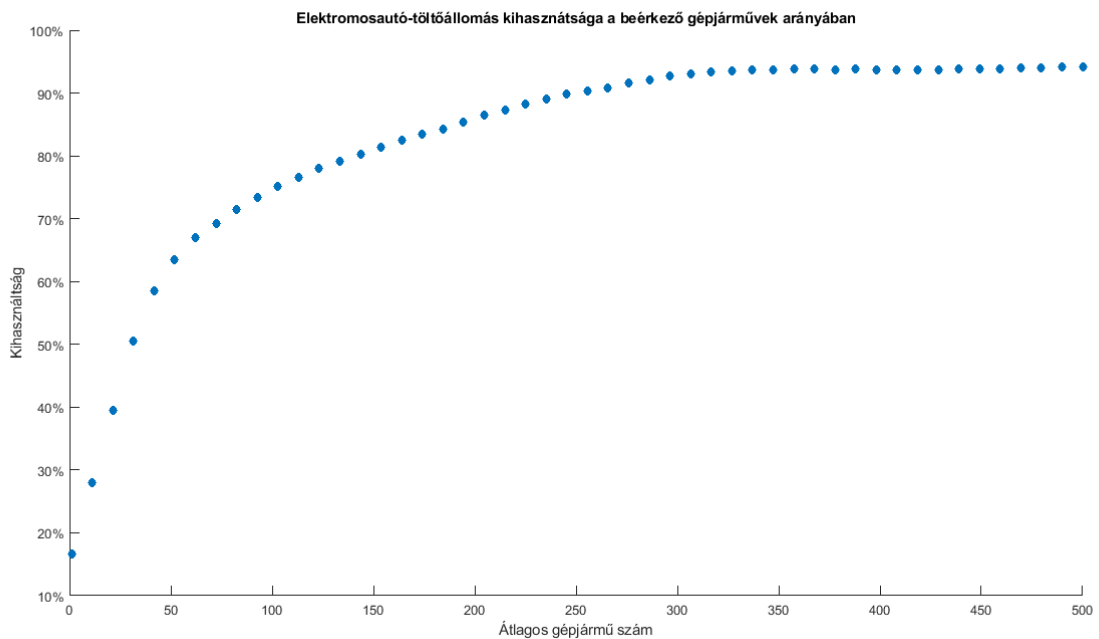


12. ábra: Példa a napi terhelés változására az autók átlagos számának változásával.

A) 10 autó/nap, B) 50 autó/nap, C) 100 autó/nap, D) 250 autó/nap

A 13. ábra a töltőállomás kihasználtsági adatait mutatja az átlagos gépjárműszám növekedése mellett. A vizsgálat során a gépjárművek számának folyamatos növelésével vizsgáltam a töltőfejek foglaltsági állapotát. A 4.1. fejezetben bemutatott futtatási paraméterek mellett az alábbi következtetések vonhatók le. A kezdeti kihasználtság az

autók számának növekedésével arányosan növekszik, majd a növekedés mértéke 65%-os kihasználtságtól kezdve fokozatosan csökken. Magas gépjárműszámnál értelemszerűen már nem növekszik tovább, hiszen a töltőfejek kihasználtsága maximalizálódik. Észrevehető, hogy töltőfejenként nagyjából 20 autó felett (a töltőállomásra vonatkozóan összesen 60-70 autó felett) kezd a kihasználtság meredeksége jelentősen csökkenni. Azonban a gépjárműszám függvényében vett kihasználtság jelentősen függhet a töltési idő hosszától, amely paramétert tovább befolyásolhatja többek között a töltőállomás elhelyezkedése, típusa, a beérkező gépjármű típusa és ezzel töltési karakterisztikája, illetve maga a napszak is. Ennek megfelelően a jövőben érdemes lehet vizsgálni, hogy a kihasználtsági függvény az előbb említett paraméterek változtatásával is megtartja-e a fenti jellegét, hiszen ennek ismeretében következtetések vonhatók majd le akár egy esetleges bővítéssel kapcsolatban is.



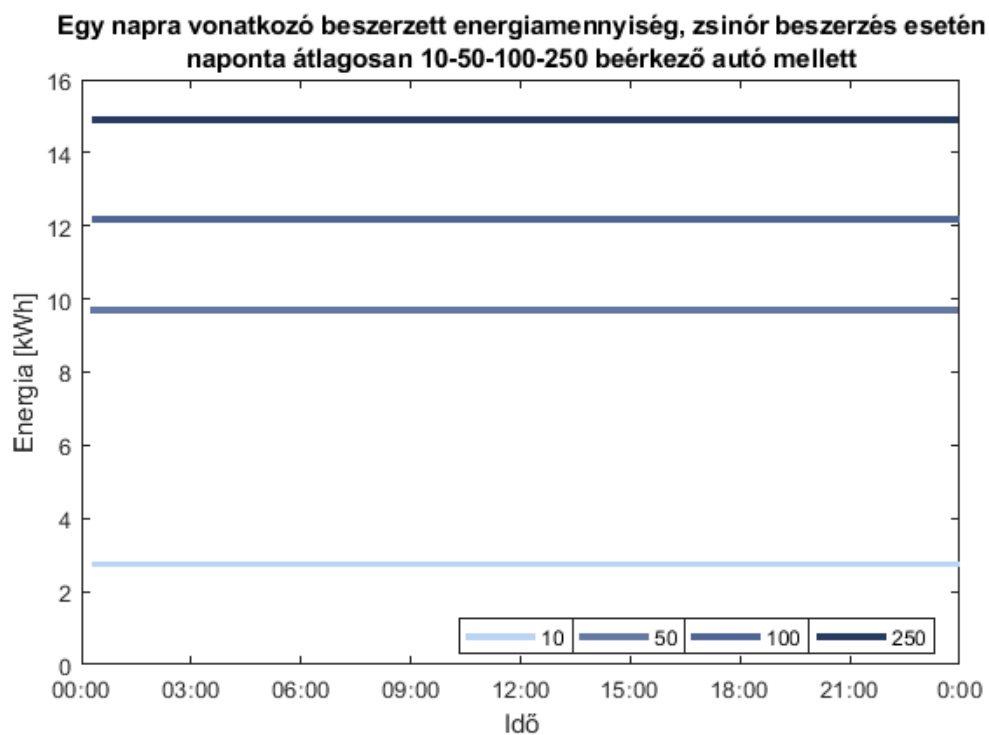
13. ábra: A töltőállomás kihasználtságának mértéke az átlagos beérkező gépjármű szám függvényében, három töltőfej esetén

4.2 Az elszámolási modellre vonatkozó eredmények

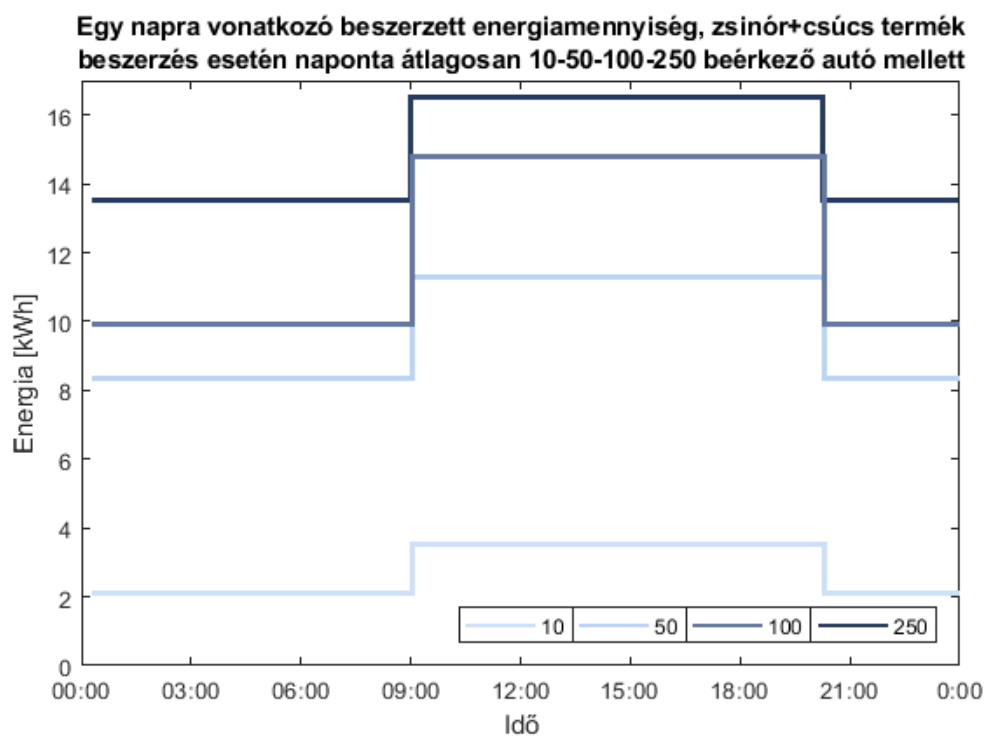
A következőkben ismertetem, hogy a 4.1. fejezetben bemutatott bemeneti paraméterek hogyan képesek befolyásolni az elszámolási modell kimenetét. Ennek megfelelően a következőkben bemutatom, hogy milyen típusú energiabeszerezéseket feltételeztem, majd ezek függvényében hogyan módosult a kiegyenlítő energia mértéke a vizsgált időszakokra vonatkozóan. Végül összegzem, hogyan befolyásolja a változó költségeket, illetve a teljes energiaköltségeket az eddig bemutatott paraméterek változtatása.

4.2.1 A beszerzett energiamennyiségre vonatkozó adatok

A 14. ábra és 15. ábra a különböző típusú termékekből beszerzett energiamennyiségek mutatja. Az átlagos autószám növelésével a töltőállomás terhelése is várhatóan növekszik, amelyhez megfelelően igazítható a beszerzésre vonatkozó tervezett portfólió is. A két eltérő energiabeszerezés számítási módját a 3.2.2. fejezetben ismertetem.

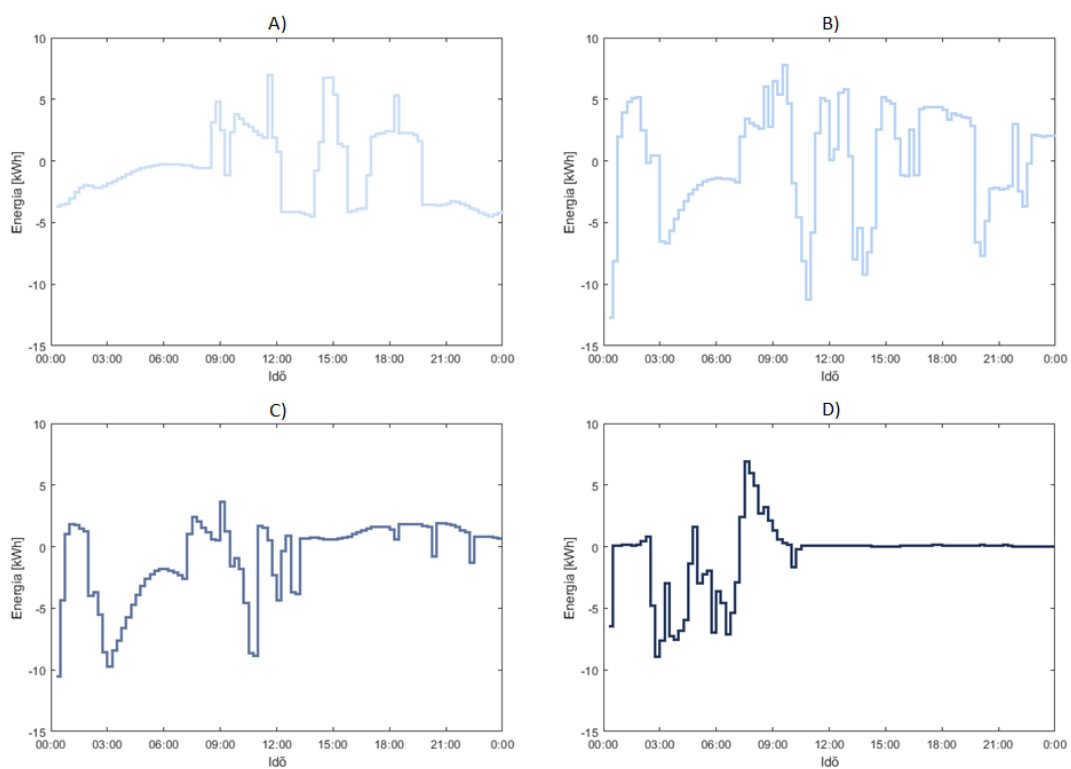


14. ábra: A napi beszerzett villamos energia zsinórtermék beszerzését feltételezve, eltérő beérkező gépjármű számok (10-50-100-200) mellett



15. ábra: A napi beszerzett villamos energia zsinór-, illetve csúcstermék beszerzését feltételezve, eltérő beérkező gépjármű számok (10-50-100-200) mellett

A kiegyenlítő energia mennyiségének változását szintén 10, 50, 100 és 250 átlagosan beérkező autózámra vonatkozóan ábrázoltam, ahogy a 4.1.2. fejezetben is a 365 napra generált terhelési adatsorok 1. napjai esetében. Megfigyelhető, hogy például az A) esetben (10 autó/nap), ahol a terhelés az éjfélét követő időszakban 0, hogyan veszi fel a menetrend inverzét a görbe, és ezzel hogyan jelenik meg a negatív irányú szabályozási igény. Latható továbbá, hogy az autózám növekedésével egyre kevesebb lesz a 0 értéktől való eltérés is. A kiegyenlítő energia napi mennyisége csökken az autózám növekedésével, azaz a menetrendtartás is egyre pontosabb és jobban becsülhető.



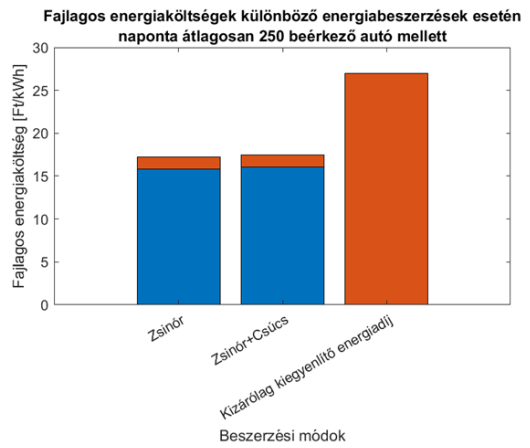
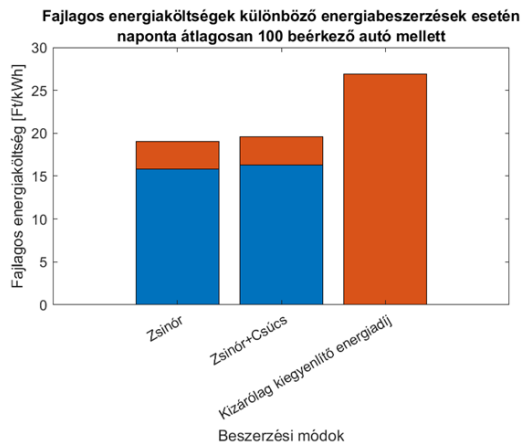
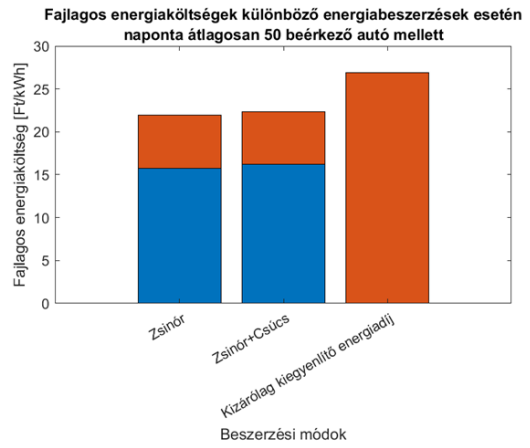
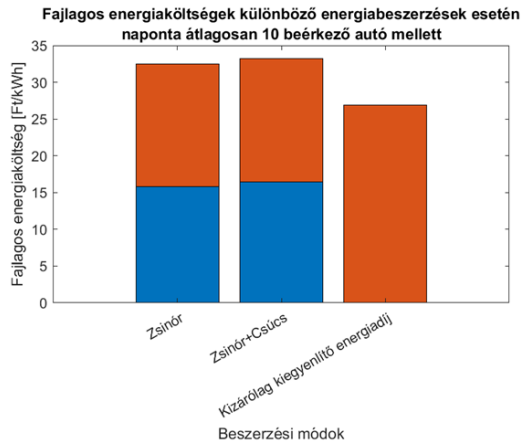
16. ábra: Példa a kiegyenlítő energia alakulására az autózám függvényében

A) 10 autó/nap B) 50 autó/nap C) 100 autó/nap D) 250 autó/nap

4.2.2 Fajlagos kiegyenlítőenergia-költségek a beszerzett energiamennyiséghez viszonyítva

A munka ezen szakaszában, ahogy ezt a 3.2.2. fejezetben is jeleztem, háromfajta, egymástól eltérő beszerzési módot vizsgáltam a fajlagos költségek megállapításához. Első esetben kizárólag a HUPX DAM zsinórtermékének beszerzését feltételeztem, a második esetben csúcs- és zsinórtermék beszerzését vettem alapul, míg vizsgáltam egy harmadik esetet is, amikor a töltőoszlop üzemeltetője kizárólag kiegyenlítőenergia-díjból „fedezi” a töltéseket. A 3.2.1 fejezetben bemutatott paramétereknek megfelelően, havi átlagos árakat használtam, így megtartható a díjakra jellemző szezonális tulajdonsága, de elkerülhetők azok az rövid idejű anomáliák, amelyek torzítanák a vizsgálatok végeredményeit. A 10. ábrán látható grafikonokból a legszembeütőbb az első, 10 autóra vonatkoztatott eredmény. E szerint kis kihasználtság, illetve alacsony beérkező autózám esetén jobban megéri, ha a kereskedő nem foglalkozik előre az energiabeszerzéssel, egyszerűen kifizeti a szabályozáshoz tartozó „ösztönzőt” kiegyenlítőenergia-díj formájában. Ez a különbség azonban gyorsan elmúlik az autózám növekedésével. Észrevehető, hogy az autózám és így a kihasználtság növelésével egyre jobban becsülhetővé válik a tényleges fogyasztás, azaz egyre jobban megközelíthető a menetrend. Ezzel arányosan fog csökkenni a menetrendtől való eltérés mértéke, azaz a fogyasztónak jobban megéri előre beszerezni az energiát és kifizetni a menetrendtartásra ösztönző díjat.

Hasonló eredményekre jutottam abban az esetben is, ha a járműszám növelése helyett több, különböző töltőállomáshoz tartozó adatsort összegeztem. A menetrendtartás ebben az esetben is jóval pontosabb, így a kiegyenlítő energia mértéke is csökken.



17. ábra: Fajlagos energiaköltségek változása a beérkező autók számának függvényében

5 Összegzés

Dolgozatomban ismertettem a villamos autózás jelenkori helyzetét és jövőbeli várható állapotait. Rávilágítottam, hogy az e-mobilitás térnyerésével a töltőállomásokon vételezett villamos energia kereskedelme egyre nagyobb léptékű, így várhatóan egyre hangsúlyosabb szerepe lesz az eltérő beszerzési stratégiák vizsgálatának.

A szabályozási környezet áttekintésekor bemutattam azokat a regulációs irányelveket, amelyek ismerete elengedhetetlen a töltőállomásokon keresztül történő villamosenergia-beszerzés vizsgálatához. Ezeknek a korlátoknak a megfelelő ismeretével állíthatók fel azok a scenáriók, amelyek szerint a későbbi szimulációk futtathatók.

Bemutattam továbbá a kiegyenlítő energia szerepét az elszámolásban, illetve azokat a folyamatokat és szereplőket, akiken keresztül a kiegyenlítő szabályozással járó többletköltségek majd a végfelhasználót terhelik.

Ismertettem, hogy a szimulációs modellem milyen bemeneti paraméterek mellett és hogyan képes egy villamos autó töltőállomás terhelésének szimulálására. Bemutattam, hogy melyek azok a számítási módok, amiket az energiabeszerzés és a kiegyenlítő energia mértékének meghatározására használtam. Ezt követően összegeztem azokat az eredményeket, amelyeket a szimuláció végrehajtásával kaptam, illetve megvizsgáltam, hogy ezekre milyen hatással van a töltőállomásra beérkező autók számának fokozatos növelése. Végül megvizsgáltam, hogyan alakulnak az energiabeszerzés fajlagos költségei a növekvő járműszám mellett.

Ennek megfelelően:

- Bemutattam a töltőállomásra vonatkozó napi sűrűségfüggvényt, amely alapján a szimulációkat végeztem.
- Ismertettem a nagy szimulációs minta átlagolásával kapott menetrend változását a gépjárműszám növekedése mellett. A szimulált adatsorokon kitűnt, hogy a növekvő gépjárműszám a görbe fokozatos kisimulását eredményezte.
- Példákat mutattam a napi terhelés változására a járműszám növekedése mellett. Rámutattam, hogy hasonló módon a menetrend kialakításánál kapott

eredményekhez, a növekvő gépjárműszám mellett a napi terhelési görbe lefutása is egyre egyenletesebb, így becslése is könnyebb.

- Bemutattam, hogyan változik a töltőállomás kihasználtsága a járműszám növelésével, illetve rámutattam, hogy adott paraméterezés mellett melyek azok a főbb értékek, amelyek jelentőséggel bírhatnak.
- Bemutattam, hogy a járműszám növelésével, hogyan alakulnak a felhasznált energiabeszerezési módok, illetve milyen mértékű azok növekedése.
- Példát mutattam arra, hogyan viselkedik a menetrendtől való eltérés a beérkező autózám növelésének függvényében. Láthatóvá vált, hogy a növekvő gépjárműszám, azaz megnövekedett kihasználtság mellett, a kiegyenlítő energia mértéke csökken, így a menetrend pontosabban becsülhető.
- Végül a töltőállomás szimulációja során kapott eredmények segítségével demonstráltam, hogy hogyan és milyen mértékben befolyásolja a kiegyenlítő energia a töltés során felhasznált energia fajlagos árát. A modell ilyenformán rámutatott, hogy alacsony kihasználtság mellett nem éri meg a kereskedőnek előzetesen beszerezni a töltőállomáson elfogyasztott energiamennyiséget.

6 A munka következő szakasza

Az általam alkotott modell alkalmas eltérő energiabeszerzési portfóliók, illetve egy töltőállomás teljesítményfelvételének szimulálására. Ennek megfelelően – bár a kiegyenlítő energia díja az egyik legjelentősebb – érdemes lehet figyelembe venni egyéb változó költségek mértékét, illetve tovább vizsgálni a modell érzékenységét egyes paraméterekre.

Továbbá mindamelllett, hogy érdemes lehet eltérő paraméterezéseket is vizsgálni, a munka következő szakaszával kapcsolatban elsősorban a 2.2 fejezetben részletezett szabályozási környezethez térnek vissza. Az itt bemutatott direktívák ugyanis felállítják annak a lehetőségét, hogy a felhasználó eltérő kereskedőtől szerezze be a töltőállomáson vételezett villamos energiát, mint a saját „szokványos” energiakereskedője. A szabad kereskedőválasztás joga azonban további elszámolási kérdéseket vet fel ebben az esetben. Egy azon ponton vételezett villamos energia ugyanis a két eltérő mérlegkörhöz tartozó kereskedő esetében kiegyenlítő energiaként jelenne meg, amelynek elszámolása a jelenlegi piaci struktúra esetén nem egyértelmű. Bizonyos megközelítések ennek a problémakörnek a feloldására vezetnék be az aggregátor szerepkörét, aki többek között – erre az eshetőségre nézve – képes lenne a mérlegkörök közötti kiegyenlítő energia elszámolását is biztosítani. Ezen felül az aggregátor bizonyos scenáriók szerint felléphetne, mint a villamos gépjárművek által nyújtott flexibilitási, vagy fogyasztói befolyásolási képességek aggregátora. Mindezek a potenciális piaci termékek részét képezhetik a jövőbeni elszámolási modelleknek, illetve érdemes vizsgálni eltérő szereplők – akár az aggregátor – szerepkörét ezekben a modellekben.

Irodalomjegyzék

- [1] International Energy Agency: *Global EV Outlook 2018 – Towards cross-modal electrification*, OECD/IEA, 2018, <https://webstore.iea.org/global-ev-outlook-2018> (utolsó megtekintés időpontja: 2018 október)
- [2] *Directive 2014/94/EU*: <https://publications.europa.eu/hu/publication-detail/-/publication/d414289b-5e6b-11e4-9cbe-01aa75ed71a1/language-en> (utolsó megtekintés időpontja: 2018 október)
- [3] *2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiáról (VET)*, <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A0700086.TV> (utolsó megtekintés időpontja: 2018 október)
- [4] *170/2017. (VI. 29.) Korm. rendelet az elektromos gépjárműtöltési szolgáltatás egyes kérdéseiről*, <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A1700170.KOR×hift=ffffff4&xtreferer=00000001.TXT> (utolsó megtekintés időpontja: 2018 október)
- [5] *A Magyar Villamosenergia-rendszer Kereskedelmi Szabályzata*, https://www.mavir.hu/documents/10258/227897707/KSZ_2018-09-01_tiszta.pdf/95ea391a-416f-b749-b4d0-00e62ca245b7 (utolsó megtekintés időpontja: 2018 október)
- [6] MAVIR – kiegyenlítő energia egységek havi bontásban, https://www.mavir.hu/web/riportok/kiegyenlito-energia-egysegarak/-/document_library_display/WZm3BkmLWT8s/view/210890537?_110_INSTANCE_WZm3BkmLWT8s_topLink=home&_110_INSTANCE_WZm3BkmLWT8s_delta1=12&_110_INSTANCE_WZm3BkmLWT8s_keywords=&_110_INSTANCE_WZm3BkmLWT8s_advancedSearch=false&_110_INSTANCE_WZm3BkmLWT8s_andOperator=true&p_r_p_564233524_resetCur=false&_110_INSTANCE_WZm3BkmLWT8s_cur1=2 (utolsó megtekintés időpontja: 2018 október)
- [7] HUPX – DAM – egységek, https://hupx.hu/uploads/Piaci%20adatok/DAM/%C3%A9ves/HUPX_DAM_ANNUAL_REPORT_2017_PUBLIC.pdf (utolsó megtekintés időpontja: 2018 október)
- [8] Dr. Farkas Csaba: *Villamos autók töltésére szolgáló akkumulátortöltők egyes kérdései a villamosenergia-rendszerben*, doktori disszertáció, 2016
- [9] E. Iversen, J. Morales, H. Madsen: *Optimal charging of an electric vehicle using a Markov decision process*, Applied Energy 123, 1–12, 2014
- [10] F. Koyanagi, T. Inuzuka, Y. Uriu, R. Yokoyama: *Monte Carlo simulation on the demand impact by quick chargers for electric vehicles*, Power Engineering Society Summer Meeting, 1999

- [11] 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, 2011
- [12] XIE F., HUANG M., ZHANG W., LI J.: *Research on Electric Vehicle Charging Station Load Forecasting*, The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, 2011
- [13] Grabit, <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/7173-grabit>
(utolsó megtekintés időpontja: 2018 október)
- [14] K. Chaudhari, A. Ukil: *TOU Pricing Based Energy Management Of Public EV Charging Stations Using Energy Storage System*, 16th IEEE International Conf. on Industrial Technology-ICIT, 2016
- [15] *EV Project Electric Vehicle Charging Infrastructure Summary Report*, 2014, https://energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/evproj_infrastructure_q22013_0.pdf
(utolsó megtekintés időpontja: 2018 október)