

# Elektromos személygépkocsik központi töltésütemezési módszere

Csonka Bálint<sup>1</sup> - Dr. Csiszár Csaba<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME)  
Közlekedésmérnök és Járműmérnöki Kar (KJK)  
Közlekedésüzemi és Közlekedésgazdasági Tanszák (KUKG)  
telefon: 20/446 4682  
e-mail: csonka.balint@mail.bme.hu

<sup>2</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME)  
Közlekedésmérnök és Járműmérnöki Kar (KJK)  
Közlekedésüzemi és Közlekedésgazdasági Tanszák (KUKG)  
telefon: 20/446 4682  
e-mail: csiszar.csaba@mail.bme.hu

**Kivonat:** Az elektromos közúti gépjárművek töltése sztochasztikus terhelést okoz a villamos energia hálózaton, amit kezelni kell. Ugyanakkor, az akkumulátoros járművek egy-egy mozgó energiatárolónak is tekinthetők, amelyekkel a terhelésingadozás jelentősen csökkenthető. Emiatt egy olyan matematikai modellt dolgoztunk ki, amivel leképezhető az elektromos járművek töltésigénye és a villamos hálózat kapacitása. A modell alapján a központi töltésütemezést, mint lineáris programozási feladatot definiáltuk, melynek során figyelembe vettük az elektromos járműflotta jellemzőit. A kidolgozott töltésütemezési módszer támogatja az igények időbeli elosztását úgy, hogy a hálózat terhelése optimális legyen. Szimulációs vizsgálatot végeztünk, ami alapján töltésütemezéssel akár kétszeresére is növelhető a megújuló energiaforrások részaránya a töltési igények kiszolgálásában. A gazdaságosságot vizsgálva megállapítottuk, hogy éves szinten megújuló energiaforrásteljesítményre vetítve akár 72600 Ft/kW-tal csökkenthető a töltési költség.

**Kulcsszavak:** *elektromos jármű, töltésütemezés, lineáris programozás, központi irányítás, villamos energia rendszer*

## Bevezetés

A közúti közlekedés okozta környezetszennyezés csökkentése érdekében egyre nagyobb számban használnak tisztán elektromos személyautókat. A hajtástechnológia előnye a zéró lokális károsanyag-kibocsátás. Globális szinten megújuló energiaforrások alkalmazásával csökkenthető az emisszió. A megújuló energiaforrást használó nap- és szélenergiák teljesítménye jelentősen függ a külső hatásoktól (pl. időjárástól). Továbbá, az elektromos járművek energiaigénye is időben változó. Emiatt a közlekedési- és a villamosenergia-hálózat közötti újszerű összefüggések újszerű megoldásokat igényelnek. A cél, az energia kínálat és az elektromos járművek keresletének összerendelése térben és időben úgy, hogy a lehető legnagyobb legyen a megújuló energiaforrások felhasználási részaránya a közlekedésben. Az összerendelést támogatja, hogy az elektromos járművek a villamoshálózat szempontjából mozgó energiatárolók; így a megtermelt energia eltárolható, és később is felhasználható, akár egy másik járműben is. Az összerendelés alapja egy matematikai modell, amivel leképezhetők a töltési folyamatok, figyelembe véve a közlekedési- és villamosenergia-hálózati szempontokat. Ennek megfelelően, a kutatási kérdéseket a következőképp fogalmaztuk meg:

- Hogyan modellezhetők a töltési folyamatok?
- Milyen mértékben növelhető a megújuló energiaforrások részaránya központi töltésütemezés esetén?

A cikk további részének a felépítése a következő: az 1. fejezetben a témához kapcsolódó szakirodalmat foglaljuk össze és azonosítjuk a kutatási rést. A 2. fejezetben bemutatjuk az elektromos járművek töltési folyamatát leíró fizikai modellt, és az optimalizálás alapját jelentő matematikai modellt. A 3. fejezetben szimulációs vizsgálatban alkalmazzuk a modellt a megújuló energiaforrások teljesítményének optimalizálására. A 4. fejezetben az eredményeket mutatjuk be és elemezzük; végül a legfontosabb megállapításokat összegezzük és a kutatás folytatásának az irányát határozzuk meg.

## 1. Irodalmi áttekintés

A töltési folyamat időbeli optimalizálásával foglalkozó tanulmányok jellemzően két csoportra oszthatók:

- **Központi (centralizált) irányítás:** a teljes villamosenergia-hálózat terhelés ingadozás minimalizálása a cél. Egy központi vezérlőegység irányítja a hálózathoz csatlakozó elektromos járművek töltését és úgy befolyásolja azt, hogy az aggregált töltési igény a lehető legkisebb terhelésingadozást okozza a hálózaton.
- **Megosztott (decentralizált) irányítás:** az egyes járművek töltésének optimalizálása a cél. A célfüggvény lehet a költség vagy a töltési idő minimalizálása. A járművek egymástól független töltési terv alapján töltődnek.

A centralizált és decentralizált töltési stratégiák jellemzőit az 1. táblázatban foglaltuk össze. A centralizált irányítással megvalósítható az egyenletes terhelés a villamos hálózaton, így azonban az egyes járművek töltésében jelentkezhetnek csúcsidőszakok, amik jelentősen megnövelik a töltési költséget és csökkenthetik az akkumulátor élettartamát. Ezzel szemben a decentralizált irányítás a jármű számára biztosít egyenletes töltést, és nem garantálja az egyenletes terhelést a villamosenergia-hálózat számára.

1. táblázat: Központi és megosztott töltésütemezés jellemzői

Központi irányítás	Megosztott irányítás
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Villamos hálózati optimum</li> <li>• Az elektromos jármű használók igényeit részben veszi figyelembe</li> <li>• A villamos hálózat terhelés becslése központilag történik</li> <li>• A töltés ütemezés a becsült terhelés alapján központilag megy végbe, az ehhez szükséges alkalmazás a villamos hálózat üzemeltetőnél van</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Egyéni felhasználói optimum</li> <li>• A villamos hálózat jellemzőit részben veszi figyelembe</li> <li>• A villamos hálózat terhelés becslése központilag történik</li> <li>• A töltés ütemezés a becsült terhelés alapján megosztva megy végbe, az ehhez szükséges alkalmazás a felhasználónál van</li> </ul>

A [1] tanulmányban a két eltérő irányítási stratégiát hasonlították össze a jelenlegi helyzettel, amikor nem alkalmaznak töltés optimalizálást. Megállapították, hogy ha a járművek 30%-a elektromos hálózatról tölthető, akkor a villamos hálózat terhelése a csúcsidőszakban 26% és 30%-kal csökkenthető decentralizált és centralizált irányítás esetén. Egy másik tanulmányban kisebb hálózaton vizsgálták a töltés optimalizálás hatásait [2]. A 63 háztartást tartalmazó villamos hálózaton a terhelés csúcsidőszakban 29-70%-kal csökkenthető. A terheléstől függő változó díjtételt feltételezve vizsgálták az eltérő irányítási stratégiák hatását [3]. Megállapították, hogy a centralizált irányítással nagyobb mértékű terhelésingadozás csökkenés érhető el a hálózaton, de a különbség nem jelentős, illetve az elektromos járművek számának növekedésével még tovább csökken ez a különbség a decentralizált irányításhoz képest. A [4] tanulmányban a centrális irányítási stratégiához dolgoztak ki egy genetikus algoritmust. A módszer újdonsága, hogy támogatja a kétirányú energiaáramot a jármű és a hálózat között. Decentralizált irányítási stratégiát dolgoztak ki a [5] tanulmányban. Megállapították, hogy a változó díjtétel gyakori frissítése nélkül is elérhető egyenletes terhelés a hálózaton.

A kínálat és a kereslet egy háztartáson belül egyensúlyának vizsgálatához olyan algoritmust dolgoztak ki, amivel támogatható a megújuló (és sztochasztikus) energiaforrások alkalmazása (például napelem) [6]. Bár csak egy háztartást vettek figyelembe, ez az irányítási stratégia is centralizáltnak tekinthető. A [7] tanulmányban a csúcsidőszak terhelés csökkenés mértékét az elektromos járművek függvényében vizsgálták. Megállapították, hogy a csúcsidőszaki teljesítmény csökkenés 20%-os elektromos jármű penetráció esetén kétszer akkora, mint 10%-os penetráció esetén (17,9% és 35,8%), ami jelentősen nagyobb, mint a decentralizált és a centralizált stratégia közötti különbség. A kétirányú energiaáramnak egy város villamos hálózatára gyakorolt hatását vizsgálva megállapították, hogy a hálózat terhelését leíró paraméterek kedvezőbbek, de megnő a kommunikáció költsége és csökken a járművek akkumulátorának élettartama [8].

A megújuló energiaforrások alkalmazhatóságát vizsgálva megállapították, hogy az elektromos járművek töltésének optimális ütemezésével a megújuló energiaforrások részaránya 56,7%-ról 73%-ra növelhető [9]. Ennek oka, hogy a napközben megtermelt napenergiát az elektromos járművek el tudják tárolni. A [10] tanulmányban az intelligens töltés optimalizálással és a megújuló energiaforrások együttes alkalmazásával elérhető CO<sub>2</sub> csökkenést vizsgálták. Megállapították, hogy a kettő együttes használatával akár 55%-kal is csökkenthető az üvegház hatású gázok kibocsátása, ha az elektromos járművek töltése

szabályozható. A szélerőművek alkalmazhatóságát vizsgálta a [11] tanulmány egy villamos hálózaton, ahol centralizált irányítást feltételeztek. Megállapították, hogy az elektromos járművek jelentősen csökkenthetik a kereslet és a kínálat közötti különbségeket. Végül a smart grid irányításának technikai feltételeit vizsgálva megállapították, hogy az intelligens rendszereknek meghatározó szerepük van [12]. Ezek telepítése egyelőre kihívást jelent az üzemeltetőknek.

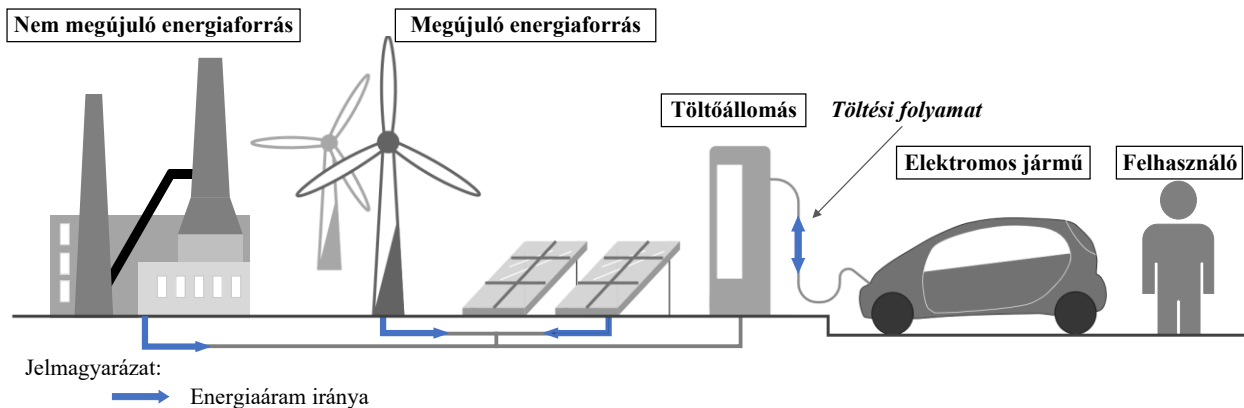
Az irodalomkutatás alapján megállapítottuk, hogy a centralizált irányítás tekinthető ideális, míg a decentralizált irányítás praktikus megoldásnak; ez utóbbinak kisebb a fejlesztési igénye. Továbbá megállapítottuk, hogy központi irányítás esetén nem modellezték és vizsgálták mezo szinten a megújuló energiaforrások alkalmazhatóságát a töltési igények kiszolgálására. Jellemzően teljes villamoshálózatot vizsgáltak és valószínűségi értékekkel vették figyelembe az elektromos járművek számát, vagy egy háztartást modellezték. Emiatt kutatási célul tűztük ki egy olyan központi töltésütemezési módszer kidolgozását, ami mezo szinten támogatja a megújuló energiaforrások alkalmazását és a megújuló energiaforrás teljesítményének optimalizálását.

## 2. Modell

A modellalkotás során az első lépés az összetevők, a töltésütemezéshez szükséges bemenő adatok és a lehatárolások meghatározása volt (fizikai modell). Ezt követte a matematikai modell kidolgozása, ahol az energiaáramokat képeztük le, figyelembe véve a kapacitás korlátokat.

### 2.1 Fizikai modell

Azonosítottuk a központi töltésütemezés összetevőit és meghatároztuk az összetevők közötti energiaáramok irányát (1. ábra).



1. ábra: A fizikai modell

A modellezett elektromos járművek teljes töltöttségét növelő energiaforrások között a megújuló- és nem megújuló energiaforrásokat különböztettük meg. Ennek oka, hogy az elektromos járművek környezetterhelése a megújuló energiaforrások részarányának növelésével enyhíthető. A villamosenergia keresleti oldalán csak az elektromos járműveket vettük figyelembe. Egyéb fogyasztókat nem modelleztünk (például háztartások). A kapacitás korlátok figyelembevételéhez rögzítettük a töltőállomás töltési- és visszatáplálási teljesítményét. Az akkumulátorkapacitás-korlát figyelembevételéhez és az ütemezéshez pedig az elektromos jármű akkumulátorkapacitását és a kezdeti töltöttségi állapotát, mint paraméterek vezettük be. A töltőberendezés és az elektromos jármű között kétirányú energiaáramot feltételeztünk. Mivel a modellben csak a járművek akkumulátorát vettük figyelembe, mint energiatároló, ezért a visszatáplált energiát egy másik járműnek kell felvennie. Továbbá figyelembe vettük a felhasználó közlekedési igényeit is. Vagyis, hogy egy-egy töltési folyamat végén mekkora hatótávra van szüksége. Így a központi töltésütemezési módszer alkalmazásával minden esetben kiszolgálhatók a mobilitási igények és a hozzátartozó töltési igények. A globális optimum a töltésütemezés során egyszerre több elektromos jármű és felhasználó jellemzőinek figyelembevételével érhető el.

A modell legfontosabb újszerűsége, hogy 3 féle energiaáramot különböztetünk meg, melyek az alábbiak:

1. nem megújuló energiaforrásból származó energiaáram,
2. megújuló energiaforrásból származó energiaáram,

3. a modellezett időtartam kezdetekor az elektromos járművek akkumulátorában tárolt energia visszatáplálásakor keletkező energiaáram.

Az energiaáramok közötti fő különbség, hogy a töltőberendezéshez való csatlakozás ideje alatt a nem megújuló és megújuló energiaforrásból származó energia (1. és 2.) összeredője nemnegatív, vagyis növeli a járművekben tárolt teljes energiamennyiséget. Ezzel szemben a modellezett időtartam kezdetekor az akkumulátorokban tárolt energia visszatáplálásakor keletkező energiaáram összeredője 0. Vagyis nem növeli és nem is csökkenti az elektromos járművek akkumulátorában tárolt összes energiamennyiséget.

Feltételeztük, hogy a töltésütemezés diszkrét időintervallumokra valósul meg. Vagyis, hogy egy adott időintervallumon belül nem változnak a kapacitáskorlátok. A jellemzők térbeli változását leegyszerűsítve járművenként vettük figyelembe. Például a töltőteljesítmény járművenként eltérő lehet.

Az energia fajlagos díja azonos töltés és visszatáplálás esetén. Vagyis nem vettük figyelembe például az energiatárolás költségét. Bár ez a megközelítés eltér a várható megvalósítástól, az energiaáramok optimalizálása globális szinten így is megvalósítható. A pontos díjszabás a felhasználókat ösztönzi, hogy a globális optimum eléréséhez szükséges módon ütemezzék a töltésüket. A díjszabás hatását jelen cikkben nem vizsgáltuk.

A modell a központi töltésütemezés optimalizálás alapja, amelynek célja lehet például:

- a megújuló energiaforrások részarányának maximalizálása,
- a rendszerbe beépíthető megújuló energiaforrást hasznosító energiatermelő alrendszerek teljesítményének maximalizálása,
- a keresletingadozás mértékének minimalizálása,
- a teljes töltési költség minimalizálása.

## 2.2 Matematikai modell

A matematikai modell a fizikai modell összetevőit és töltési folyamatot leíró paraméterek (bemenet) és a célfüggvény értéke (kimenet) közötti kapcsolatot írja le, mint lineáris programozási feladat. Az összetevőket leíró jellemzőket a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: Az összetevőket és a töltési folyamatot leíró paraméterek

Összetevő	Jelölés	Leírás
Nem megújuló energiaforrás	$C^{nr}$	A nem megújuló energia előállításának fajlagos költsége [Ft/kWh]
	$P^{nr}$	A nem megújuló energiaforrást hasznosító energiatermelő alrendszer legnagyobb teljesítménye [kW]
Megújuló energiaforrás	$C^r$	A megújuló energia előállításának fajlagos költsége [Ft/kWh]
	$P^r$	A megújuló energiaforrást hasznosító energiatermelő alrendszer legnagyobb teljesítménye [kW]
Töltőállomás	$p^{G2V}$	Elérhető legnagyobb töltési teljesítmény [kW]
	$p^{V2G}$	Elérhető legnagyobb visszatáplálási teljesítmény [kW]
Töltési folyamat	$\Delta t$	A diszkrét időintervallum nagysága [óra]
	$x$	Nem megújuló forrásból származó energiaáram előjelesen; +: töltés, -: visszatáplálás [kWh]
	$y$	Megújuló forrásból származó energiaáram előjelesen; +: töltés, -: visszatáplálás [kWh]
	$z$	A modellezett időintervallum kezdetekor az akkumulátorokban tárolt energia visszatáplálásakor keletkező energiaáram előjelesen; +: töltés, -: visszatáplálás [kWh]
Elektromos jármű	$BC$	Akkumulátorkapacitás [kWh]
	$SOC^0$	Jármű akkumulátorában tárolt energiamennyiség az optimalizálási időintervallum kezdetén [kWh]
Felhasználó	$d$	Mobilitási igényhez szükséges energiamennyiség a töltési intervallum végén [kWh]

Az előzetesen tárolt energia ( $SOC^0$ ) is áramolhat a járművek között ( $z$  energiaáram), azonban ehhez nem állítottunk be költségelemet, hiszen a modell a globális optimum elérését támogatja. Vagyis a töltési költség minimalizálása esetén a cél, hogy a rendszerbe betáplált energia ( $x$  és  $y$ ) teljes költsége a legalacsonyabb legyen. Mivel az akkumulátorokban tárolt energiát már előállították, annak a költségét a

továbbiakban nem vettük figyelembe. A modellezés során nem nevezünk meg változót. Az aktuális alkalmazás és célfüggvény határozza meg, hogy melyik paraméter a változó. Az időintervallum ( $\Delta t$ ) értéke konstans a modellezett időtartam során. Ezenkívül megkülönböztetünk egy- és kétdimenziós paramétereket. Az egydimenziós paraméterek értéke vagy az időben vagy járművenként térhet el. A kétdimenziós paraméterek értéke időben és járművenként is eltérhet. Az egydimenziós paramétereket sor- vagy oszlopvektorral vettük figyelembe, attól függően, hogy értéke időben vagy járművenként eltérő. A kétdimenziós paramétereket mátrixszal vettük figyelembe.

Egydimenziós, járművenként eltérő paraméterek a következők:

$$\mathbf{p}^{G2V} = \begin{bmatrix} p_l^{G2V} \\ p_i^{G2V} \\ p_m^{G2V} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{p}^{V2G} = \begin{bmatrix} p_l^{V2G} \\ p_i^{V2G} \\ p_m^{V2G} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{BC} = \begin{bmatrix} BC_l \\ BC_i \\ BC_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{SOC}^0 = \begin{bmatrix} SOC_l^0 \\ SOC_i^0 \\ SOC_m^0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Ahol:

- $\mathbf{p}^{G2V}$  töltési teljesítmény oszlopvektor,
- $p_i^{G2V}$  töltési teljesítmény az  $i$ -ik jármű esetén,
- $\mathbf{p}^{V2G}$  visszatáplálási teljesítmény oszlopvektor,
- $p_i^{V2G}$  töltési teljesítmény az  $i$ -ik jármű esetén,
- $\mathbf{BC}$  akkumulátorkapacitás oszlopvektor,
- $BC_i$  az  $i$ -ik jármű akkumulátor kapacitása,
- $\mathbf{SOC}^0$  töltöttségi szint oszlopvektor,
- $SOC_i^0$  töltöttségi szint érték az  $i$ -ik jármű esetén,
- $m$  járművek száma.

Egydimenziós, időben változó paraméterek a következők:

$$\mathbf{C}^{nr} = \begin{bmatrix} C_l^{nr} & C_j^{nr} & C_n^{nr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{P}^{nr} = \begin{bmatrix} P_l^{nr} & P_j^{nr} & P_n^{nr} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{C}^r = \begin{bmatrix} C_l^r & C_j^r & C_n^r \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{P}^r = \begin{bmatrix} P_l^r & P_j^r & P_n^r \end{bmatrix} \quad (8)$$

Ahol:

- $\mathbf{C}^{nr}$  nem megújuló energiaforrás fajlagos költség sorvektor,
- $C_j^{nr}$  nem megújuló energiaforrás fajlagos költsége a  $j$ -ik időintervallumban,

- $\mathbf{P}^{nr}$  nem megújuló energiaforrás teljesítménykapacitás sorvektor,  
 $P_j^{nr}$  nem megújuló energiaforrás teljesítménykapacitása a  $j$ -ik időintervallumban,  
 $\mathbf{C}^r$  megújuló energiaforrás fajlagos költség sorvektor,  
 $C_j^r$  megújuló energiaforrás fajlagos költsége a  $j$ -ik időintervallumban,  
 $\mathbf{P}^r$  megújuló energiaforrás teljesítménykapacitás sorvektor,  
 $P_j^r$  megújuló energiaforrás teljesítménykapacitása a  $j$ -ik időintervallumban,  
 $n$  diszkrét időintervallumok száma.

A kétdimenziós paraméterek a következők:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,n} \\ & x_{i,j} \\ x_{m,1} & x_{m,n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{1,n} \\ & y_{i,j} \\ y_{m,1} & y_{m,n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_{1,1} & z_{1,n} \\ & z_{i,j} \\ z_{m,1} & z_{m,n} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_{1,1} & d_{1,n} \\ & d_{i,j} \\ d_{m,1} & d_{m,n} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Ahol:

- $\mathbf{x}$  nem megújuló energiaáram mátrix,  
 $x_{i,j}$  nem megújuló energiaáram az  $i$ -ik jármű és a töltőinfrastruktúra között a  $j$ -ik időintervallumban,  
 $\mathbf{y}$  megújuló energiaáram mátrix,  
 $y_{i,j}$  megújuló energiaáram az  $i$ -ik jármű és a töltőinfrastruktúra között a  $j$ -ik időintervallumban,  
 $\mathbf{z}$  a modellezési időtartam kezdetekor az akkumulátorban tárolt energiaáram mátrix,  
 $z_{i,j}$  a modellezési időtartam kezdetekor az akkumulátorban tárolt energiaáram az  $i$ -ik jármű és a töltőinfrastruktúra között a  $j$ -ik időintervallumban  
 $\mathbf{d}$  mobilitási igény mátrix,  
 $d_{i,j}$  az  $i$ -ik járműben minimum tárolt energiamennyiség a  $j$ -ik időintervallum végén.

Ha a visszatáplálás nem engedélyezett, az  $x$  és  $y$  paraméterek értéke 0 vagy pozitív,  $z$  paraméter értéke pedig konstans 0. A felhasználó csak a töltési időintervallumok végére adhat meg mobilitási igény értéket. Egyéb időintervallumokban a paraméter értéke 0. A 0 értékek bevezetése a visszatáplálás engedélyezése miatt szükséges, hogy a töltési intervallum vége előtt az akkumulátor töltöttségi szintje az elvárt szint alá is csökkenhessen. A paraméterek alapján a következő töltési költségek számíthatók:

- teljes töltési költség egy időintervallumon belül (13),
- a modellezett időtartam alatt a teljes töltési költség (14).

$$\sum_{i=1}^m (C_j^{nr} x_{i,j} + C_j^r y_{i,j}) \quad \forall j = 1..n \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (C_j^{nr} x_{i,j} + C_j^r y_{i,j}) \quad (14)$$

A töltési költséget járművenként nem határoztuk meg, mert a cél a globális optimum elérése.

### 2.3 Korlátozó feltételek

Az optimalizálás eredménye akkor valós megoldás, ha a következő feltételek teljesülnek:

- Energiamegmaradás járművenként: az energiaáramok összereődje nem megújuló és megújuló energiaforrások esetén nemnegatív (15). Az akkumulátorban előzetesen tárolt energia összereődje és a kezdeti töltöttségi szint összege nemnegatív. (16). Vagyis, egy jármű nem táplálhat több energiát vissza, mint amennyit korábban felvett.
- Energiamegmaradás idő intervallumonként: az energiaáramok összereődje nem megújuló és megújuló energiaforrások esetén nemnegatív és kisebb vagy egyenlő, mint a betáplálható energiamennyiség (17). Az akkumulátorban előzetesen tárolt energia összereődje 0 (18).
- Töltési teljesítmény kapacitás: az energiaáramok teljesítménye nem lehet nagyobb, mint a töltőállomás teljesítménye (19).
- Akkumulátorkapacitás: a jármű akkumulátorában tárolt energiamennyiség nagyobb vagy egyenlő, mint 0 és nem haladhatja meg az akkumulátorkapacitás értékét (20).
- Mobilitási igény: a felhasználó adott időintervallum végére érvényes mobilitási igényének teljesülnie kell úgy, hogy az időintervallum végén az akkumulátorban tárolt energia mennyisége nagyobb vagy egyenlő, mint az elvárt energiamennyiség (21).

$$0 \leq \sum_{j=1}^k x_{i,j} \text{ és } 0 \leq \sum_{j=1}^k y_{i,j} \text{ ha } k \in \{1..n\} \forall i = 1..m \quad (15)$$

$$0 \leq \sum_{j=1}^k z_{i,j} + SOC^0 \text{ ha } k \in \{1..n\} \forall i = 1..m \quad (16)$$

$$0 \leq \sum_i x_{i,j} \leq \Delta t \cdot P_j^{nr} \text{ és } 0 \leq \sum_i y_{i,j} \leq \Delta t \cdot P_j^r \forall j = 1..n \quad (17)$$

$$\sum_i z_{i,j} = 0 \forall j = 1..n \quad (18)$$

$$-p_i^{v2G} \leq \frac{x_{i,j} + y_{i,j} + z_{i,j}}{\Delta t} \leq p_i^{G2V} \forall i = 1..m \text{ és } \forall j = 1..n \quad (19)$$

$$0 \leq SOC^0 + \sum_{j=1}^k (x_{i,j} + y_{i,j} + z_{i,j}) \leq BC_i \text{ ha } k \in \{1..n\} \forall i = 1..m \quad (20)$$

$$d_{i,k} \leq SOC^0 + \sum_{j=1}^k (x_{i,j} + y_{i,j} + z_{i,j}) \text{ ha } k \in \{1..n\} \forall i = 1..m \quad (21)$$

Mindhárom energiaáram esetén teljesül a feltétel, hogy azt az energiát, amit az egyik jármű visszatáplál, azt ugyanabban az időintervallumban kell felhasználni egy másik jármű töltésére.

### 3. Szimulációs vizsgálat

A modell alkalmazhatóságának a bemutatásához szimulációs vizsgálatot végeztünk. Egy logisztikai központot feltételeztünk, ahol az alkalmazottak tisztán elektromos személyautói munkaidőben a töltőállomáshoz csatlakoznak. A személyautók használói a munkaidő befejezésére vonatkozóan határoztak meg minimum elvárt töltöttségi szintet. A személyautók és a villamoshálózat között kétirányú energiaáramot feltételeztünk. Emellett a logisztikai központban tisztán elektromos kisáruszállítókat használnak az áruk mozgatásához. A kisáruszállítókat nagyteljesítményű villámtöltőkkel töltik napközben a telephelyen. A kisáruszállítók időalapjának magas kihasználtsága miatt a minél rövidebb töltési idő a cél. A logisztikai központban napelemek is megtalálhatók. A cél, hogy a napenergiával megtermelt energiát a személyautók és a kisáruszállítók energiaigényének kiszolgálására hasznosuljon. Ha túl

alacsony a napelemek teljesítménye, a villamos hálózatról is szükséges tölteni a járműveket. Ha túl magas a teljesítmény, a megtermelt energia egy részét a villamosenergia-hálózatba táplálják és nem a közlekedési igényeket elégíti ki. A szimulációs vizsgálat célja, hogy meghatározzuk mekkora az a legkisebb napelem teljesítmény, amivel a járművek teljes energiaigénye kiszolgálható.

A modellezett időtartam 8:00-tól 16:30-ig tart. A diszkrét időintervallum hossza 15 perc. Vagyis a modellezett időtartamot 34 időegységre osztottuk ( $m=1..34$ ). A személyautók a modellezett időtartam alatt végig töltőberendezéshez csatlakoznak, a kívánt töltöttségi szintet 16:30-ig kell elérniük. A szimulációs vizsgálatban 3 elektromos személyautó kategóriát és ezekhez tartozó használati jellemzőket különböztettünk meg (3. táblázat).

3. táblázat: Az elektromos személyautó kategóriák és a használati jellemzők paraméter értékei a szimulációs vizsgálat során

Kategória	Paraméter	Érték
I.	járművek száma	10 db
	$BC$	30 kWh
	$SOC^0$	5 kWh
	$d(t=16:30)$	15 kWh
II.	járművek száma	10 db
	$BC$	40 kWh
	$SOC^0$	4 kWh
	$d(t=16:30)$	12 kWh
III.	járművek száma	10 db
	$BC$	25 kWh
	$SOC^0$	3 kWh
	$d(t=16:30)$	10 kWh

Összesen 30 személyautót vizsgáltunk. Az akkumulátorkapacitás értékét a népszerű tisztán elektromos járművek értékei alapján határoztuk meg (például: Nissan Leaf, 40 kWh). A mobilitási igények meghatározásánál figyelembe vettük egy korábbi kérdőíves kutatásunk eredményét, miszerint az átlagos napi futásteljesítmény 40 km [13].

A telephelyen a személyautók 10 kW teljesítményű töltőberendezésekkel tölthetők. A villámtöltők maximális teljesítménye 50 kW, a gyakorlatban azonban nem egyenletes a töltési teljesítmény. Ezért a szimulációs vizsgálat során alacsonyabb, 40kW töltési teljesítménnyel számoltunk a kisáruszállítók esetében. Személyautók esetén a töltés és visszatáplálás teljesítménye megegyezik ( $p^{G2V}=p^{V2G}$ ). Kisáruszállítók esetében a visszatáplálás nem megengedett. A kisáruszállítók töltési igényét a következőképp határoztuk meg:

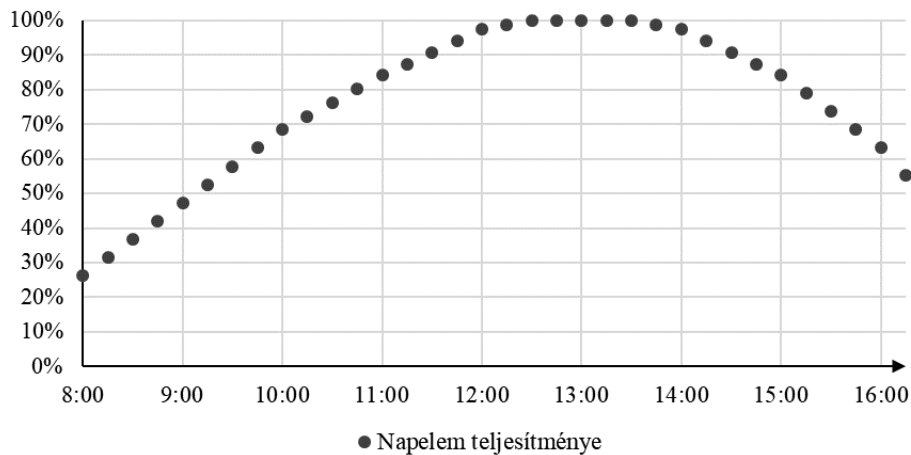
- 9:00-kor tölt az első kisáruszállító,
- minden töltés 30 percig tart, az energiaigény töltésenként 20kWh,
- a töltés befejezése és a következő töltés megkezdése között 30 perc telik el,
- az utolsó töltés 16:00-kor kezdődik.

Vagyis a kisáruszállítók és villámtöltők számát nem határoztuk meg, csak a villamoshálózaton jelentkező töltési igényüket. A szimulációs vizsgálatban az energia fajlagos költsége nem megújuló energiaforrás esetén  $C^{nr} = 99\text{Ft/kWh}$ , megújuló energiaforrás esetén  $C^r = 5\text{Ft/kWh}$ . A pontos költségértékeknek nincs jelentőségük a jelenlegi szimulációs vizsgálatban. Azért állítottunk be jelentős különbséget a két érték között, mert a megújuló energiaforrásokat részesítjük előnyben. A nem megújuló energiaforrás teljesítménykapacitását végtelennek tekintettük. Figyelembe vettük a napelemek napközbeni teljesítményingadozását a [14] alapján. A 2. ábra a teljesítmény változását mutatja be a modellezett időtartam alatt.

A szimulációs vizsgálatban az  $x$ ,  $y$  és  $z$  paramétereket tekintettük változónak. A célfüggvény a teljes töltési költség minimalizálása (14) volt. A megújuló energiaforrás maximális teljesítményértékét ( $P^r$ ) változtatva több szimulációs vizsgálatot végeztünk. A többi paraméter értékét nem változtattuk. A lineáris programozási feladat megoldásához a MATLAB beépített *linprog* függvényét és a Dual-Simplex



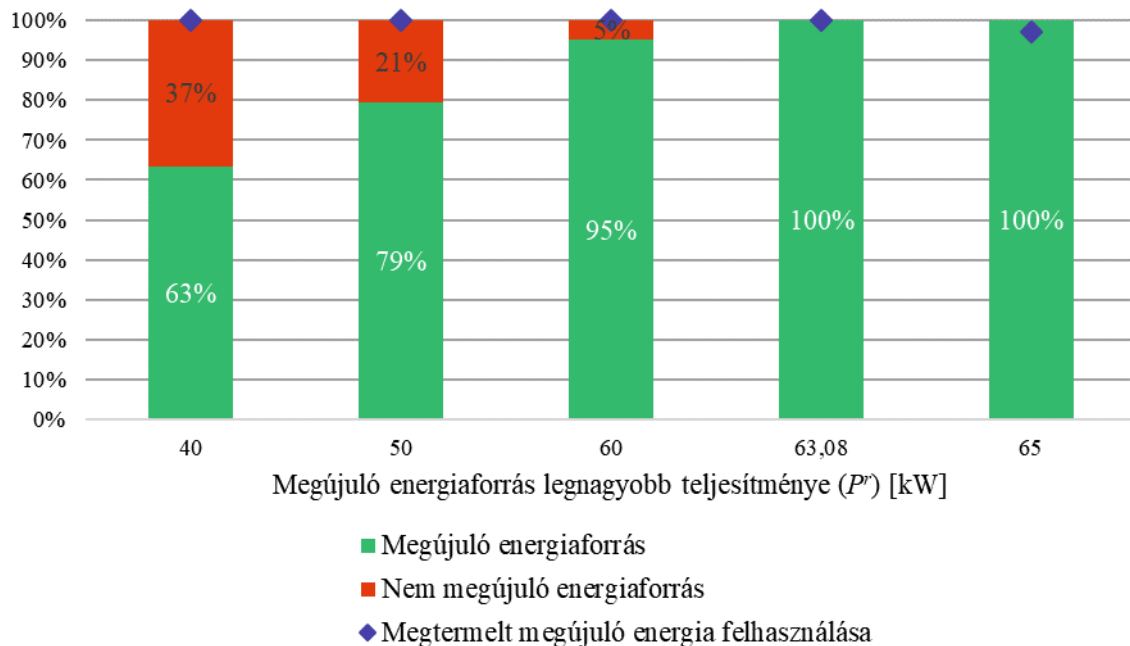
algoritmust alkalmaztuk. Mindegyik szimulációt ugyanazon a számítógépen futtattuk (Windows 10, Intel Core i5-6200U CPU dual-core, 2,4 GHz, 8 GB DDR4 RAM). A futási idő körülbelül 2 másodperc volt.



2. ábra: A napelem teljesítményének változása a modellezett időtartam alatt

#### 4. Eredmények kiértékelése

Megvizsgáltuk, hogy  $P^r$  értékének a függvényében hogyan változik a töltési igények kiszolgálására használt nem megújuló és megújuló energiaforrások részaránya, valamint a megtermelt megújuló energia felhasználása (3. ábra).



3. ábra: A nem megújuló és megújuló energiaforrások részaránya, és a megtermelt megújuló energia felhasználási aránya a megújuló energiaforrás teljesítményének ( $P^r$ ) függvényében

Az eredmények alapján megállapítottuk, hogy a megtermelt megújuló energia felhasználása 100% amíg az kisebb, mint a teljes energiaigény. Továbbá megállapítottuk, hogy a szimulált töltési igény esetén a 63,08kW legnagyobb megújuló energiaforrás teljesítmény az optimális. Ebben az esetben a teljes megtermelt megújuló energiafelhasználásra kerül az elektromos járművekben, és a teljes energiaigényt képes fedezni. Az elektromos személygépkocsik és az elektromos hálózat között kétirányú energiaáram miatt valósulhatott meg, hogy bár a megújuló energiaforrás teljesítménye nem volt elegendő minden napszakban a kisáruszállítók töltésére, a személygépkocsikban tárolt megújuló energiaforrásból származó energiával együtt már ki lehetett szolgálni azoknak a töltési igényét is.

Megvizsgáltuk, hogy  $P^r=63,08\text{kW}$  esetén intelligens töltésütemezés nélkül mekkora a megújuló energiaforrás részaránya a teljes energiafelhasználáson belül. Ebben az esetben feltételeztük, hogy minden jármű a legnagyobb megengedett töltési teljesítménnyel ( $p^{G2V}$ ) tölt amíg nem éri el a kívánt töltöttségi szintet. Megállapítottuk, hogy ebben az esetben a megújuló energia részaránya 43%. Vagyis töltésütemezéssel több, mint kétszeresére növelhető a megújuló energia részaránya.

Összehasonlítottuk a töltésütemezés és töltésütemezés nélküli esetet  $P^r=63,08\text{kW}$  esetén a gazdaságosság szempontjából. Az alábbi költségelemeket feltételeztük:

- Nem megújuló energia díja: 99Ft/kWh [15],
- Megújuló áram kötelező átvételi díja a villamos hálózatba táplálás esetén: 42Ft/kWh [16].

A megújuló energiaforrás teljesítménye mindkét esetben egyenlő, tehát a beruházási költség azonos. Töltésütemezés esetén a teljes 410 kWh energiaigény megújuló energiával szolgálható ki. Fennmaradó szabad kapacitás nincs, így az áramszolgáltató felé nem történik elszámolás. Töltésütemezés nélkül a nem megújuló energiaforrásból származó energia költsége 23163 Ft, míg a hálózatba táplálásból származó bevétel 9827 Ft. Így az áramszolgáltató felé a kiadás 18336 Ft. Éves szinten a különbség közel 4,5 millió Ft, ami megújuló energiaforrásteljesítményre vetítve 72600 Ft/kW.

## Konklúzió

Az elektromos járművek környezetre gyakorolt hatását jelentősen befolyásolja az energia előállításának módja. Ezért kidolgoztuk az elektromos járművek központi töltésütemezésének fizikai és matematikai modelljét, ami a kutatás legfontosabb eredménye. A töltési folyamatot, mint lineáris programozási feladat fogalmaztuk meg. A modell újszerűsége, hogy külön kezeli a nem megújuló, megújuló és az akkumulátorban előzetesen tárolt energiaáramokat. Továbbá támogatja a megújuló energiaforrások előnyben részesítését, valamint a kétirányú energiaáramot a jármű és a villamoshálózat között.

Szimulációs vizsgálatot végeztünk, ami alapján megállapítottuk, hogy a modell alkalmas az optimális megújuló energiaforrás teljesítmény meghatározására. Továbbá a modell alkalmazásával akár kétszeresére is növelhető a megújuló energiaforrások részaránya. Végül a gazdaságossági vizsgálat eredménye alapján a költség különbség intelligens töltésütemezés és töltésütemezés hiánya között megújuló energiaforrás teljesítményre vetítve évente 72600 Ft/kW.

A kutatás folytatásának irányaként a modell bővítését tűztük ki az energiatárolás díjának és a villamoshálózati statikus energiatárolóknak a figyelembevételével. Továbbá a töltőtöltésütemezésre vetített költség különbség, valamint a töltési igények jellemzői között kapcsolat pontos meghatározásához további vizsgálatok szükségesek.

## Köszönetnyilvánítás

Ez a projekt az Európai Unió Horizont 2020 kutatási és innovációs programja keretében finanszírozásban részesült, a Nemzetgazdasági Minisztériummal kötött NGM\_SZERZ/218/2018. számú támogatási szerződés alapján.

A tanulmány alapjául szolgáló kutatást a Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Mesterséges Intelligencia (BME FIKP-MI/FM) tématerületi programja keretében.

## Irodalomjegyzék

- [1] Mets K. - Verschueren T. - Haerick W. - Develder C. - Turck F. D.: Optimizing Smart Energy Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicle Charging, 2010 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium Workshops, Osaka 2010 június 17. <https://doi.org/10.1109/NOMSW.2010.5486561>
- [2] Mets K. - Hulst R. D. - Develder C.: Comparison of Intelligent Charging Algorithms for Electric Vehicles to Reduce Peak Load and Demand Variability in a Distribution Grid, Journal of Communications and Networks 2012/14(6) 672-681 <https://doi.org/10.1109/JCN.2012.00033>
- [3] Chen N. - Tan C. W. - Quek T. Q. S.: Electric Vehicle Charging in Smart Grid: Optimality and Valley-Filling Algorithms, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing 2014/8(6) 1073-1083 <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2014.2334275>

- [4] Alonso M. - Amaris H. - Germain J. G. - Galan J. M.: Optimal Charging Scheduling of Electric Vehicles in Smart Grids by Heuristic Algorithms, *Energies* 2014/7(4) 2449-2475  
<https://doi.org/10.3390/en7042449>
- [5] Gan L. - Topcu U. - Low S. H.: Optimal Decentralized Protocol for Electric Vehicle Charging, *IEEE Transactions on Power Systems* 2013/28(2) 910-951 <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2210288>
- [6] Wu X. - Hu X. - Teng Y. - Qian S. - Cheng R.: Optimal Integration of a Hybrid Solar-Battery Power Source Into Smart Home Nanogrid with Plug-In Electric Vehicle, *Journal of Power Sources* 2017/363 277-283 <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.07.086>
- [7] Qian K. - Zhou C. - Allan M. - Yuan Y.: Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems, *IEEE Transactions on Power Systems* 2011/26(2) 802-810  
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2057456>
- [8] Habib S. - Kamran M. - Rashid U.: Impact Analysis of Vehicle-to-Grid Technology and Charging Strategies of Electric Vehicles on Distribution Networks – A Review, *Journal of Power Resources* 2015/277 205-214 <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.12.020>
- [9] Forrest K. E. - Tarroja B. - Zhang L. - Shaffer B. - Samuelson S.: Charging a Renewable Future: The Impact of Electric Vehicle Charging Intelligence on Energy Storage Requirements to Meet Renewable Portfolio Standards, *Journal of Power Sources* 2016/336 63-74  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.10.048>
- [10] Tarroja B. - Shaffer B. - Samuelson S.: The Importance of Grid Integration for Achievable Greenhouse Gas Emissions Reductions from Alternative Vehicle Technologies, *Energy* 2015/87 504-519 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.012>
- [11] Druitt J. - Früh W.-G.: Simulation of Demand Management and Grid Balancing with Electric Vehicles, *Journal of Power Sources* 2012/216 104-116  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.05.033>
- [12] Sanchez-Hidalgo M.-A. - Cano M.-D.: A Survey on Visual Data Representation for Smart Grids Control and Monitoring, *Sustainable Energy, Grids and Networks* 2018/16 351-369  
<https://doi.org/10.1016/j.segan.2018.09.007>
- [13] Csonka B.- Csiszár Cs.: Elektromos járművek töltőinfrastruktúrájának kiépítéséhez a felhasználói elvárások feltárása, Közlekedéstudományi Konferencia, Győr 2017. március 30-31.
- [14] <https://www.transnetbw.de/de/presse/presseinformationen/presseinformation/sonnenfinsternis-transnetbw-hat-stresstest-bestanden> (2020.01.28)
- [15] <https://www.eon.hu/hu/uzleti/aram/arak-tarifadijak.html> (2020.01.29)
- [16] <http://www.mekh.hu/kotelezo-atveteli-rendszer-villamos-energia> (2020.01.29)