

KISS GYULA RICHÁRD
TDK DOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ÉPÜLETGÉPÉSZETI ÉS GÉPÉSZETI ELJÁRÁSTECHNIKA TANSZÉK



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ÉPÜLETGÉPÉSZETI ÉS GÉPÉSZETI ELJÁRÁSTECHNIKA TANSZÉK

KISS GYULA RICHÁRD
TDK DOLGOZAT
Villamosenergia fogyasztási profilokon alapuló
napelemesrendszer-méretezés

Témavezető:

Dr. Horváth Miklós
egyetemi docens

Budapest, 2023

Szerzői jog © Kiss Gyula Richárd, 2023.

NYILATKOZAT AZ ÖNÁLLÓ MUNKÁRÓL

Alulírott, *Kiss Gyula Richárd* (L54SPT), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2023. november 5.

Kiss Gyula Richárd

TARTALOMJEGYZÉK

1. Szakirodalmi áttekintés	2
1.1. Napelemes rendszer értékelésének indikátorai	2
1.2. Önfogyasztás optimalizációja	3
1.3. A fogyasztási adatok felbontásának hatása a napelemes termelésre és az önfogyasztásra	5
1.4. Okos menetredek alkalmazása	6
2. Módszertan.....	8
2.1. Villamosenergia profilok	8
2.2. Villamosenergia fogyasztási adatok	8
2.3. A napelemes termelés szimulációja	9
2.4. A termelési adatok és fogyasztási adatok összefésülése.....	10
3. Eredmények	11
3.1. A napelemes rendszer termelésének vizsgálata.....	11
3.2. A szaldó (KR) elszámolásra optimalizált rendszerek értékelése.....	12
3.3. Az öntermelésre (SP) optimalizált rendszerek értékelése	17
3.4. A hálózathasználatra (GL) optimalizált rendszerek értékelése	19
3.5. Fogyasztási profilok vizsgálata	21
3.6. Napelemes rendszerek megtérülése	25
4. Összefoglalás.....	30
5. Summary.....	32
6. Irodalomjegyzék.....	34

1. Szakirodalmi áttekintés

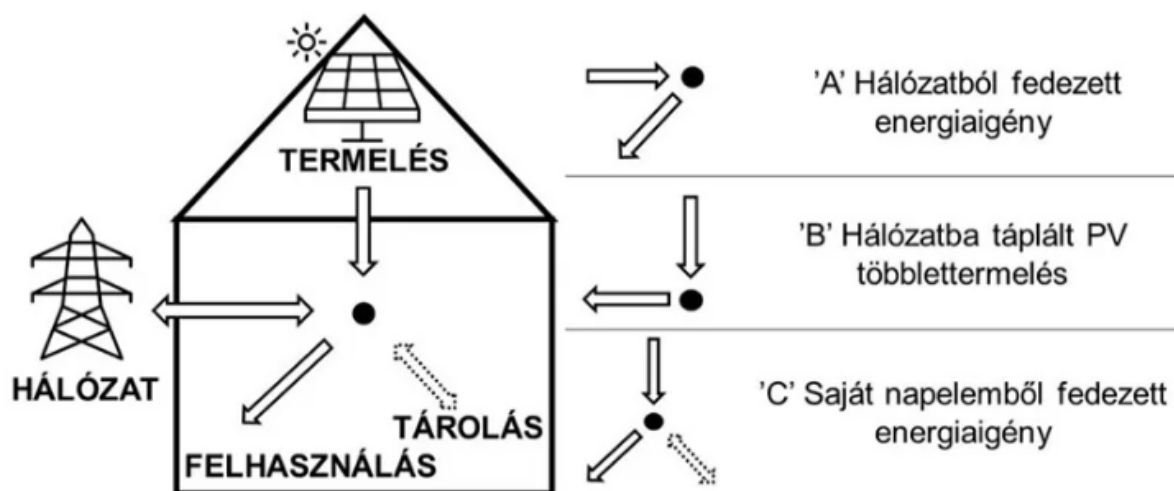
Az elmúlt években jelentős mértékben nőtt a hazai napelemes rendszerek beépített teljesítménye, ez köszönhető volt a többféle támogatási lehetőségeknek és a kedvező szaldós elszámolásnak is. A robbanásszerű terjedés miatt a jelenlegi villamos elosztóhálózat már nem tudta kezelni a megnövekedett igényeket, mivel a fogyasztásnál több lett a napelemes termelés, ezért a visszatáplálás következtében elkezdett nőni a villamoshálózat feszültsége, ez a villamos fogyasztók számára kedvezőtlen változás, mivel a névleges tartományon kívülre kerülhet a feszültség ez pedig a berendezések károsodásához vezethet. Többek között ezért, az elmúlt évben ideiglenes betiltották a hálózatba tápláló rendszerek kiépítését, amely erőteljesen visszafogta a napelemes rendszerek további terjedését.

A jövőre nézve várhatóan havi szaldó vagy bruttó elszámolás fog életbe lépni, ám ezek az eddigi szaldós elszámoláshoz képest várhatóan jelentősen megnövelik majd a beruházások megtérülésének idejét. Már körvonalazódik egy új állami támogatási forma, amely a hibrid napelemes rendszereket támogatja, azaz akkumulátor beépítésével próbálja megoldani a többlettermelés lekötését és a helybeli felhasználás növelését.

A dolgozatom során megvizsgálom a különböző fogyasztási profilok hatásait a helyben felhasznált villamosenergia mennyiségére és a szaldó- bruttó elszámolás gyakorlati jelentőségét. A napelemes rendszerteljesítmények meghatározásakor vizsgálom a szolgáltató számára optimális rendszerméretet is.

1.1. Napelemes rendszer értékelésének indikátorai

Gergely és munkatársai a napelemes rendszerek értékelésének indikátorait vizsgálták. Ezek rendre az önfogyasztás (SC), az önellátás (SS), az öntermelés (SP) és a hálózathasználat (GL). Ezen mutatók egyszerű vizsgálatához szükséges tagokat és értelmezésüket mutatja az 1. ábra.



1. ábra, Az indikátorokhoz szükséges tagok definiálása [1]

Az önfogyasztás megmutatja a saját napelemes termelésből mennyi a helyben felhasznált energia mennyisége.

$$SC = \frac{C}{B + C} \quad (1)$$

Az önellátás azt mutatja meg, hogy az összes villamosenergia igényünk mekkora hányadát fedezzük a helyben felhasznált villamosenergiából.

$$SS = \frac{C}{A + C} \quad (2)$$

Az öntermelés megmutatja, hogy a megtermelt villamosenergiából mekkora rész fordítódik a helyben felhasznált villamosenergiára.

$$SP = \frac{C}{A + B + C} \quad (3)$$

A hálózathasználat a villamosenergia-hálózat használatát kifejező mutatószám, ami figyelembe veszi a vételezett és az átadott energiaforgalmat is.

$$GL = \frac{A + B}{A + C} - 1 \quad (4)$$

Az mutatók százalékban értelmezhetőek, az SC optimuma 1, amely 0 kWp-nél van, az SS optimuma 1, amely végtelen kWp-nél van, az SP optimuma 1, amely termelés és fogyasztás függő helyen van, a GL optimuma -1, amely szintén termelés és fogyasztás függő. A tanulmányok során arra a megállapításra jutottak, hogy jelentős problémát okoz a felhasználás és termelés időben és teljesítményben való eltolódása, amely kihat mind a lakossági felhasználóra, mind az egyetemes szolgáltatóra. [1]

Egy másik cikkben, amelyet Gjorgievski és társai írtak [2], szó esik a különböző teljesítményű napelemes rendszerek összehasonlíthatóságáról, ezt dimenziótlanítással érték el, amelyet Generation To Demand Rationak (GTDR) neveztek és képlete a következő:

$$GTDR = \frac{B + C}{A + C} \quad (5)$$

A cikkek alapján a dolgozatomban vizsgálom az SC, SS, SP és GL paramétereket a különböző fogyasztási profilokkal és napelemes rendszerekkel, ezeknek az egymással való kölcsönhatását a csúcsteljesítmény és a GTDR függvényében.

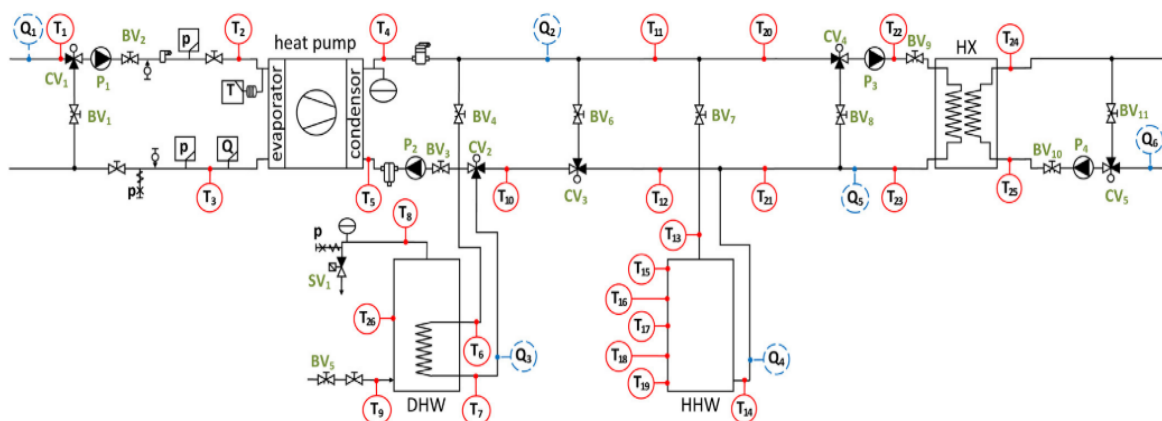
1.2. Önfogyasztás optimalizációja

A helyben felhasznált napenergia mértékének növelését vizsgálták Amabile és munkatársai. Vizsgálatuk során megfigyelték, hogy a villamosenergia fogyasztás mértéke nincs összhangban a napelemes villamosenergia termeléssel és a fel nem használt villamosenergiára végeztek optimalizációt. A többlet villamosenergia

felhasználására a melegvízellátás menetrendjét módosították, azaz eltolták a felfűtés idejét a termelés időszakába. Az általuk vizsgált napelemes rendszer csúcsteljesítménye 3 kWp, a melegvízkészítő villamos fűtőpatron teljesítménye 3 kW, a melegvíz tartály térfogata 200 l és a heti HMV fogyasztás 960 liter 60 °C-os víz volt. [3]

Barone és munkatársai a megújuló energia önfogyasztás növelő lehetőségeit vizsgálták. Kutatásukban micro-energiaközösséget vizsgáltak, amely egy fő épületet, két kisebb épületet és 3 elektromos autót jelentett. A vizsgálatokat TRNSYS szimulációs szoftverben végezték, az épületek teteje napelemmel volt borítva és az elektromos autókat használták puffer tárolónak az épületek energiafelhasználása során. Szimulációjuk során azt állapították meg, hogy az általuk vizsgált épületekben a fűtési igény jelentősen magasabb volt, mint a hűtési igény, ezek kielégítésére klímát használtak, amely elektromos áramot használt fel az igények kielégítéséhez, ezzel jelentősen terhelve az elektromos hálózatot. A micro-energiaközösség kialakításával közel 10%-kal tudták csökkenteni a hálózatból felvett energiát, azaz ennyivel tudták növelni az önfogyasztást. [4]

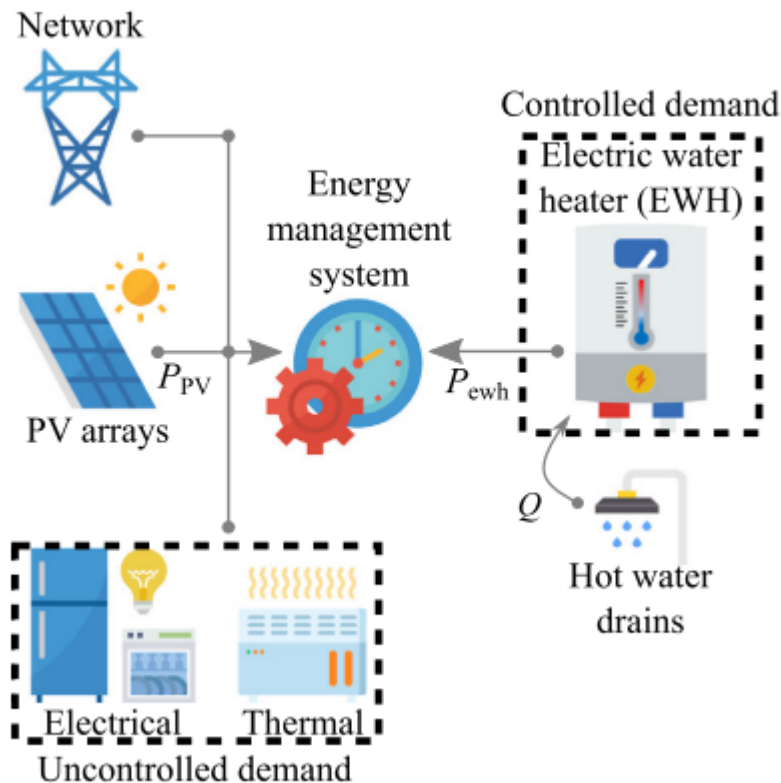
Vanhoudt és társai cikkükben a helyben fel nem használt villamosenergia termelés hőszivattyúval való lefedését vizsgálta, ennek kapcsolási rajzát a 2. ábra mutatja. Kutatásuk során két valós házát vizsgáltak, egy referenciát és egy másikat, ahol a beavatkozásokat végezték. Mindkét házban mérték a belső levegő minőséget befolyásoló tényezőket, valamint a villamosenergia fogyasztást. A kutatásuk során a hőszivattyú menetrendjét módosították és a napelemes termeléshez igazították, ezzel összeségében 8-10%-kal csökkentették a hálózatba visszatöltött villamosenergia mennyiségét, azaz ennyivel növelték a helyben felhasznált mennyiséget. [5]



2. ábra, Vanhoudt és társai által vizsgált hőszivattyú kapcsolási rajza [5]

Amabile és munkatársai a melegvíz termelés optimalizációját végezték, hogy az önfelhasználás mutatója javuljon. Kutatásukban algoritmusokat alkottak, amelyeket Pythonban programoztak le, ennek alapját a 3. ábra mutatja sematikusán. Cikkükben a napelemes termelést klaszterezték a napi termelés szerint, a könnyebb

feldolgozhatóság és összehasonlíthatóság érdekében. Az optimalizálás eredménye képen közel 10%-os önfelhasználás javulást tapasztaltak[6]



3. ábra, Amabile és munkatársai által vizsgált energia menedzsment sematikus ábrája [6]

Gjorgievski és munkatársai a virtuális számlázás hatásait vizsgálták a megosztott önfogyasztásra. Munkájuk során elemezték, hogy mennyire igazságos és skálázható a jelenleg hatályos energiatarifák működése a világon, a lakossági felhasználók körében. A tanulmányuk eredménye rámutatott, hogy a kis energiaközösségekben, a felhasználó nem motivált az energia megosztására, amely a vizsgált feltételekkel kétségbe vonhatja az energiaközösségek létjogosultságát. [7]

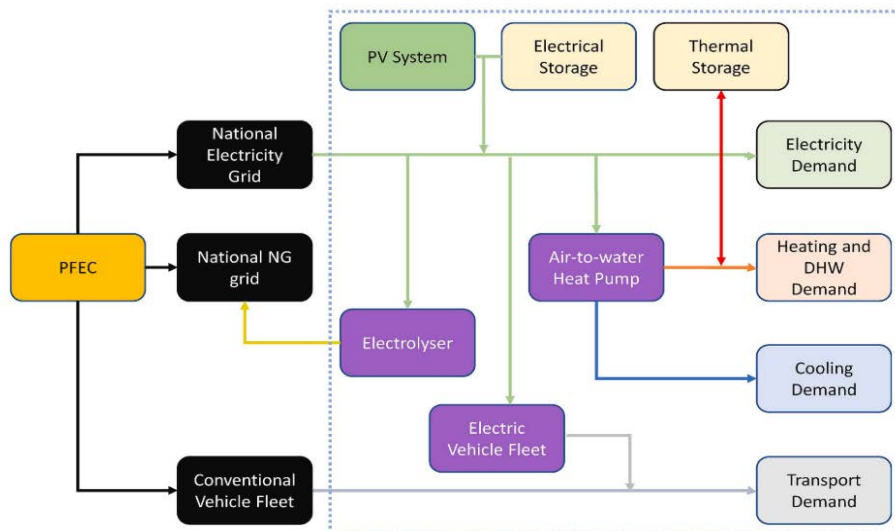
Ezen cikkek alapján várhatóan növekszik majd a helybeli felhasználás mennyisége, ha a melegvíz termelés napközben történik, vagy a fűtési és hűtési igények kielégítésére fordított villamos teljesítmény a napsütöses órákban jelenik meg, nem pedig az éjszakaiakban, amikor nem süt a nap, így nincsen napelemes termelés sem.

1.3. A fogyasztási adatok felbontásának hatása a napelemes termelésre és az önfogyasztásra

Jaszczur és munkatársai a fogyasztási adatok felbontásának hatását vizsgálta a napelemes rendszerre és az önfogyasztásra. Cikkükben vizsgálták a különbségeket az

1, 5, 15, 30, 45, 60 perces felbontások között. A havi fogyasztásban csupán 10% eltérést tapasztaltak, azonban a csúcspontokban már 500%-os különbséget is felfedeztek. A kutatásuk eredményeképpen azt tapasztalták, hogy amennyiben nem fluktuál nagy mértékben a felvett csúcs villamosenergia fogyasztás, úgy a 15 és 60 perces felbontás is elegendő. Éves szinten a 15-60 perces fogyasztási adatoknak 6-12%-os hatása van az önfogyasztásra. Továbbá, a négyszeres beépített napelemes teljesítmény csupán pár százalék önfogyasztás növekedést eredményezett. [8]

Pastore és társai munkájukban összetett energiaközösségeket vizsgáltak, ezt a 4. ábra mutatja, a vizsgált energiaközösségekben lehetőség volt mind villamosenergia mind a hőenergia tárolására is. A szimulációikhoz 1 éves órai mérési adatokat használtak, ezek eredményeképpen azt kapták, hogy a villamos energia eltárolása hő formájában a leggazdaságosabb, figyelembe véve az akkumulátorok árát és élettartamát. Ezek mellett további költségként merül fel a villamoshálózat használati díja is. [9]



4. ábra, Elektromos áram és hőtároló energiaközösség blokk diagramja [9]

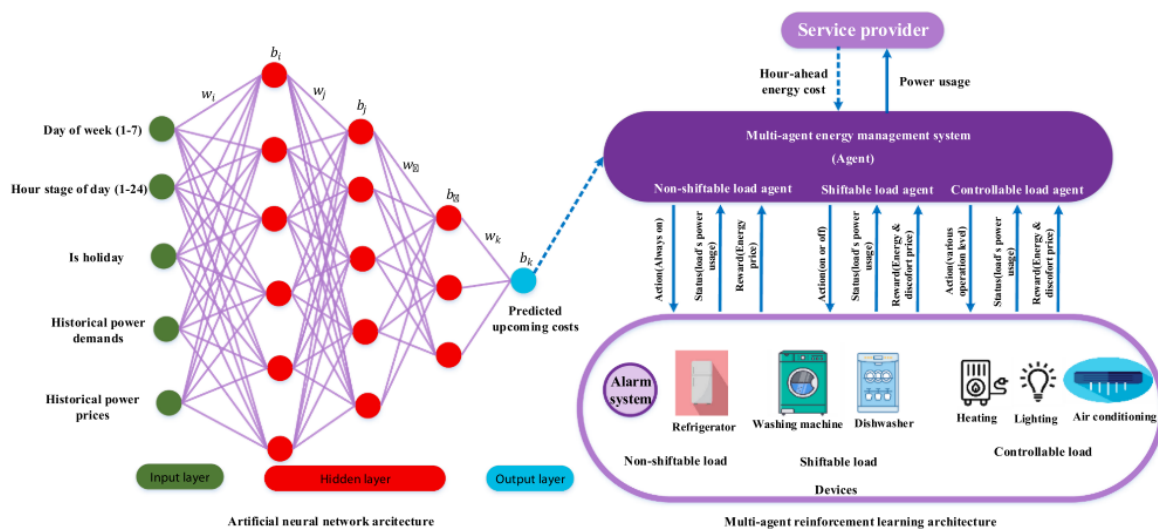
A cikkek alapján elegendő lehet a 15 perces felbontással vizsgált fogyasztási és napelemes termelési adatokkal történő munka, ha kismértékben fluktuál a felvett csúcsteljesítmény, dolgozatom során én is ezekkel fogok dolgozni.

1.4. Okos menetrendek alkalmazása

Liang és társai Internet of Things (IoT)-alapú eszközökkel optimalizálták az épületgépészeti menetrendet, hogy csökkentsék a hálózathasználatot. Munkájuk során többféle klasztrerezési módszert is vizsgáltak, ezek közül a k-means bizonyult a legjobbnak. Az optimalizáció eredményeképpen a felhasználó komfort érzete nem,

vagy csak kis mértékben változott, viszont a programjuk nagy biztonsággal tudta megbecsülni az időjárást és az épület várható villamosenergia fogyasztását az elkövetkezendő időszakokban. A pontos fogyasztási adatokhoz minden gépet felszereltek egy fogyasztásmérővel, amelyeket modbus kommunikációs protokolon keresztül kötöttek össze. [10]

Huang és munkatársai gépi tanulással ellátott rendszert vizsgáltak Digital Twinen alapulva, amelyet a 5. ábra mutat. A Digital Twin általában egy meglévő szerkezeten vagy épületen alapuló digitális modell, ennek előnye, hogy a valós épület digitális másán lehet szimulálni a különböző menetrendeket, beavatkozási lehetőségeket, működési folyamatokat, a kapott eredményeket felhasználva pedig lehetőség nyílik az optimalizációra. A szoftver dinamikusan figyeli a felhasználói igényeket, az energiatarifák aktuális árát, a hálózat leterheltségét, valamint ismeri az épület sajátosságait pl.: hőveszteség, hőtároló tömeg, sugárzási nyereségek, jelenlétérzékelés. Ezen paraméterek mentén mindig az optimális rendszer karakterisztikát állítja be úgy, hogy a komfort paraméterek se sérüljenek. A Digital Twin segít ennek a módszernek a megalkotásában, mivel felvehető számos statikus adat, amelyeket utána dinamikus adatokkal tudunk kiegészíteni, továbbá életciklus elemzésre is alkalmassá teszi az épületet. [11]



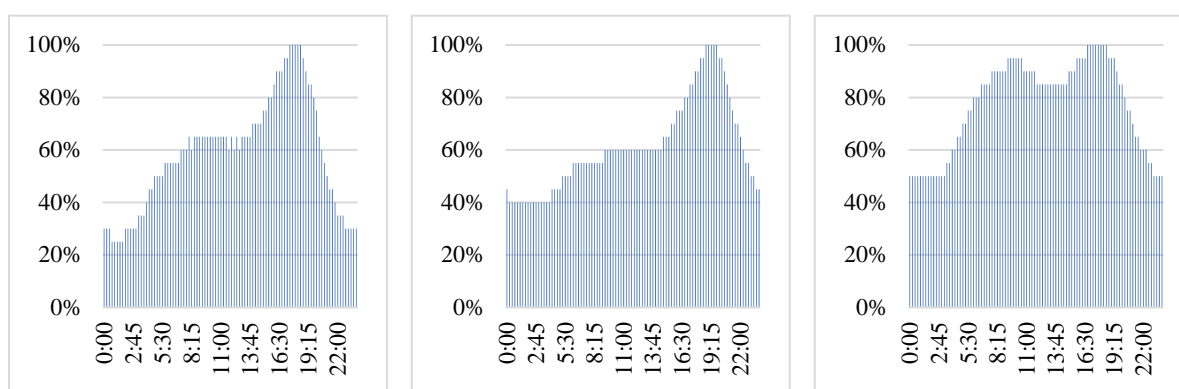
5. ábra A géptanulás modellje [11]

A cikkek alapján kijelenthető, hogy a modern gépészet további energia csökkentésének elengedhetetlen feltétele a fűtési, hűtési, melegvíz ellátási stb. menetrendek optimalizációja a jelen kor igényeihez, azaz szükséges figyelembe venni a felhasználók napi rutinját, az igények időbeliségét. Ennek eredménye várhatóan egy időben egymáshoz képest eltolt termelés és felhasználás lesz, amelyhez új épületgépészeti méretezési eljárások bevezetése szükséges lehet.

2. Módszertan

2.1. Villamosenergia profilok

A vizsgálataink során, számos, korábbi, 2018-as mérésből származó villamosenergia fogyasztási adatokkal dolgoztunk. Ezen adatok alapján korábban meghatározásra került három éves villamosenergia profil: A, B, C, valamint három napi villamosenergia profil: I, II, III. A profilba sorolásról Czétány L. és munkatársai által publikált cikkben esik szó részletesen [12]. A fő villamos profilok az éves lefutást szemléltetik, az A profil nyári csúccsal, a B profil téli csúccsal rendelkezik, a C profil kiegyenlített éves lefutású. Az alprofilok a napi lefutást mutatják, az -I, -II profil esti csúccsal a -III profil napi két csúccsal rendelkezik, ezt szemlélteti a C profilra a 6. ábra



6. ábra, C-I profil (bal), C-II profil (közép), C-III profil (jobb)

2.2. Villamosenergia fogyasztási adatok

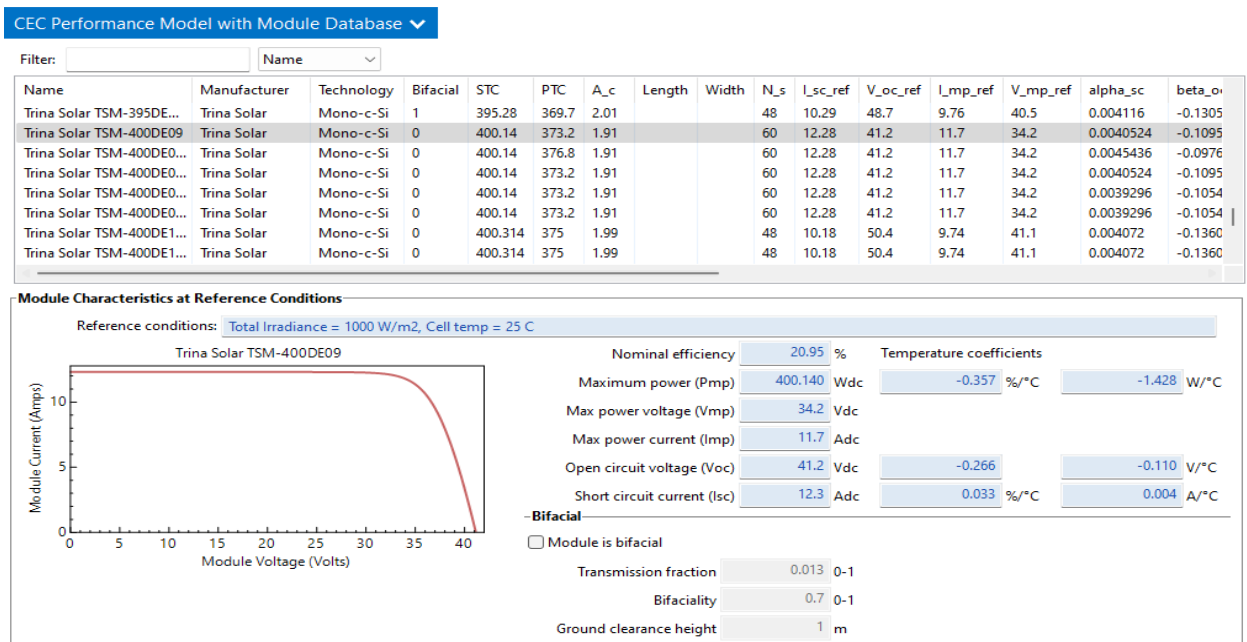
Az dolgozatomban 335 valós fogyasztásmérőből származó adatsorral dolgoztam, amelyek 15 perces felbontásban egy éven keresztül lettek rögzítve. A mérőórákból származó fogyasztási adatokat profilokba soroltam, ezt az 1. táblázat foglalja össze. Jól megfigyelhető, hogy a C profilokból vett elemszám jelentősen több az A és B profilokhoz képest, a legkevesebb elemszám a B profilból került ki.

1. táblázat, A villamos profilok szerinti felhasznált fogyasztási adatok

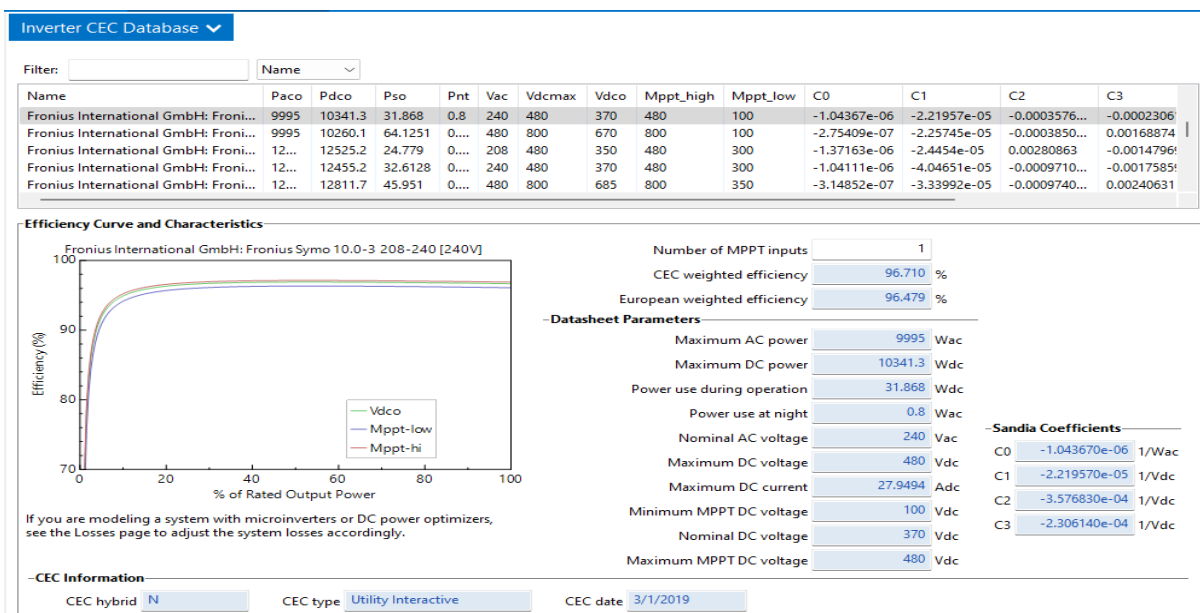
A-I	A-II	A-III	B-I	B-II	B-III	C-I	C-II	C-III	Átlagok
16 db	17 db	49 db	8 db	11 db	20 db	63 db	67 db	66 db	18 db

2.3. A napelemes termelés szimulációja

A vizsgálathoz szükséges volt a napelemes termelés szimulációjához. A vizsgálatot System Advisor Model (SAM) 2022.11.21 verziószámú szoftverben szimuláltam. Ehhez a 2018-es időjárás adatokat használtam 15 perces felbontásban. A szoftverben lehetőség van gyártói paraméterekkel felvenni a napelem paneleket, valamint az invertert, ezeket a 7. ábra és a 8. ábra szemlélteti. A karakterisztikák miatt a szoftver képes kezelni a feszültségekből, valamint a hőmérsékletekből származó veszteségeket, megadható a panel árnyékolás mértéke és a csatlakozó kábelek vesztesége is.



7. ábra, SAM szoftverben a napelem panel karakterisztikája



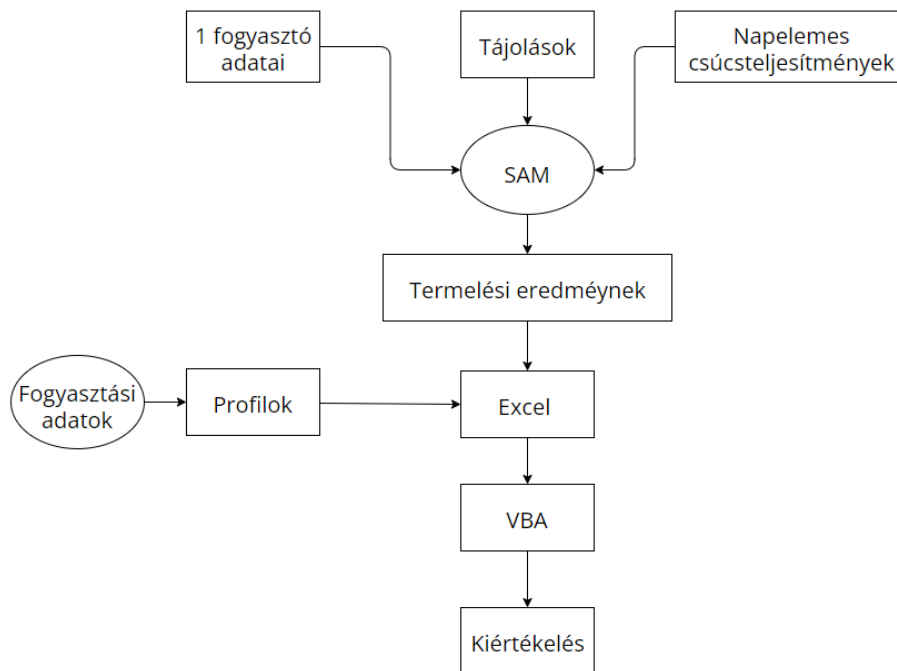
8. ábra, SAM szoftverben az inverter karakterisztikája

A szimulációm során az árnyékolást nem feltételeztem, a csatlakozó kábelek veszteségét a szoftver által előre beállított értéken hagytam. A panelek hajlásszöge 35° volt. Vizsgáltam az ÉK, K, DK, D, DNY, NY, ÉNY tájolásokat. A beépített csúcsteljesítményt az 1,2 – 10 kWp-es tartományban vizsgáltam 0,4 kWp-es felbontásban, az 1,2 kWp alatti tartományt nem vizsgáltam, mivel itt nem lenne meg az inverterhez szükséges indító feszültség, 10 kWp fölé pedig a hazai családiházás beépített napelem csúcsteljesítmények miatt nem mentem.

A szimulációhoz bevitettem egy fogyasztási profilt 15 perces felbontásban. A szimulációt elvégezve egyenlettel felvettem a helyben felhasznált, a visszatáplált és a hálózatból vételezett villamosenergiák mennyiségét, így a továbbiakban ezzel az egyenlettel számoltam az eltérő fogyasztások ezen paramétereit. Ezzel a szimulációt 154 alkalommal futtattam le, valamint extrapoláltam a 0 – 1,2 kWp-es tartományon (elméleti csúcsteljesítmények), így összesen 175 termelési adatsor lett.

2.4. A termelési adatok és fogyasztási adatok összefésülése

A termelési és a fogyasztási adatokat Excel-ben értékeltem ki, VBA programozás segítségével, mivel összesen közel 3 000 000 000 adatpontot kellett feldolgoznom. A 335 fogyasztásra, 7 tájolás szerint és 25 napelemes csúcsteljesítmény alapján kaptam 58 625 eredményt. A kapott eredményeket szűrő alkalmazásával tudtam rendszerezni és kiértékelni. A folyamatot a 9. ábra szemlélteti.

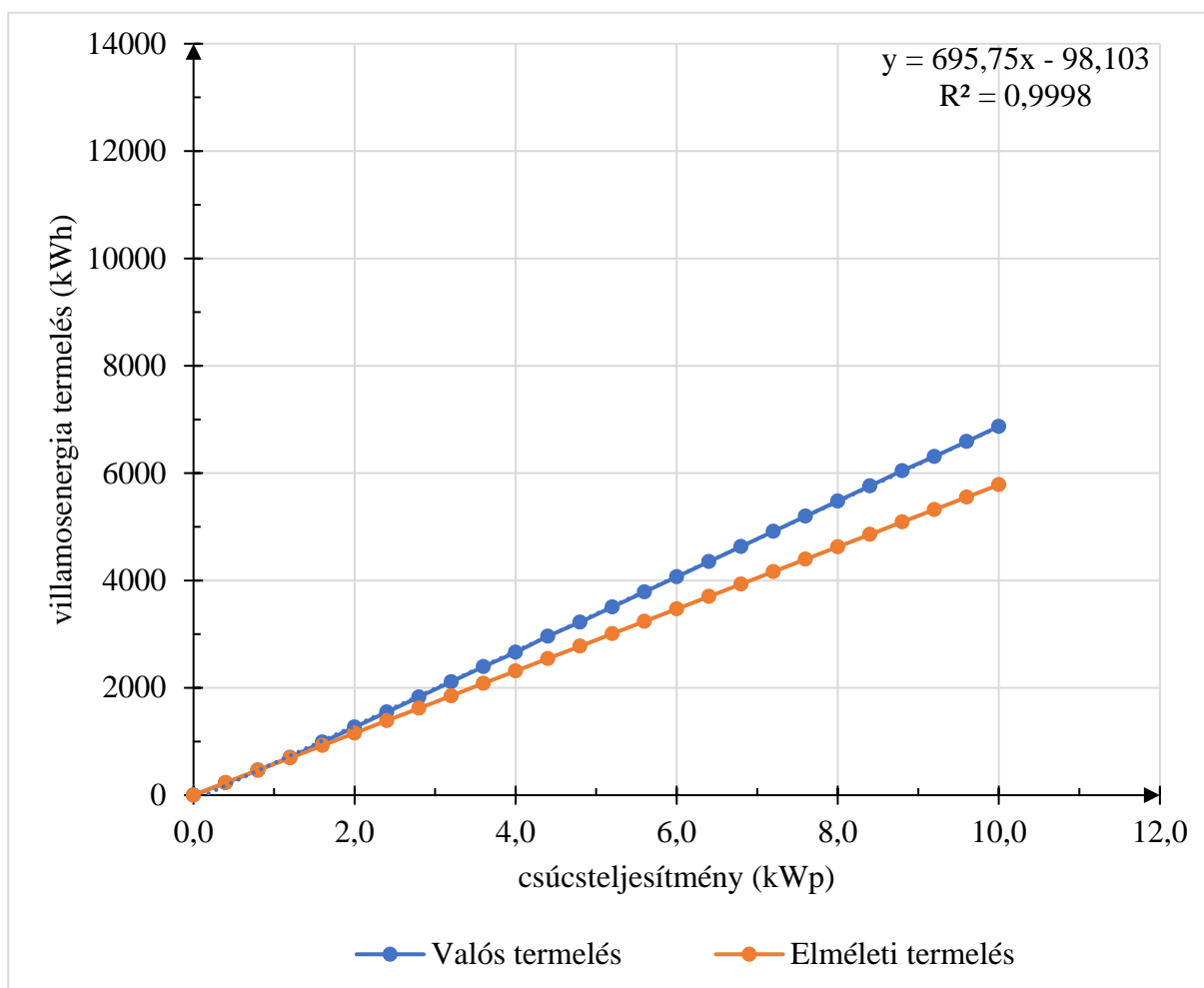


9. ábra, Az adatok feldolgozásának blokk diagramja

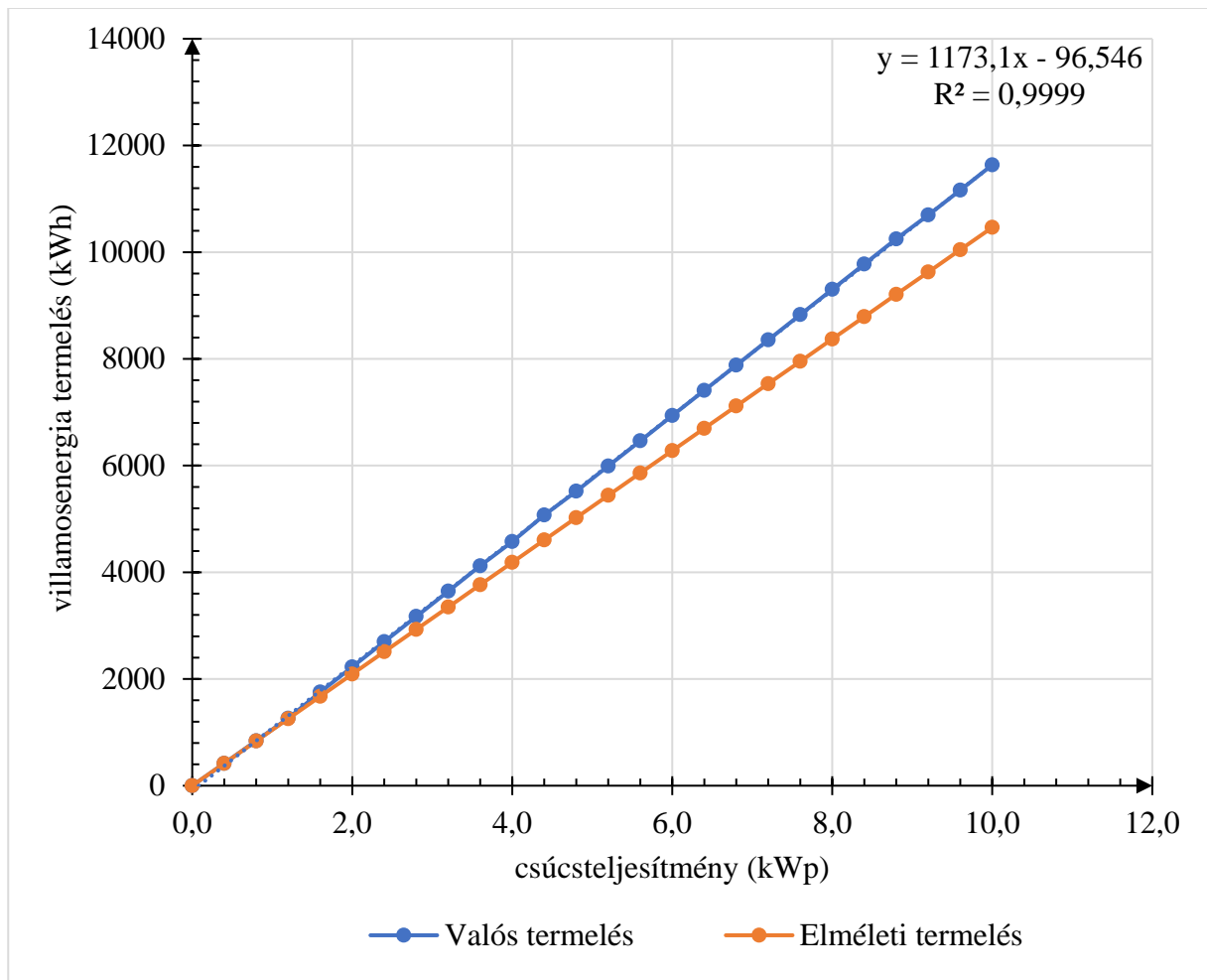
3. Eredmények

3.1. A napelemes rendszer termelésének vizsgálata

A szimulációim elvégzése során azt tapasztaltam, hogy a beépített csúcsteljesítménnyel egyre jobban nő az éves napenergia termelés, ezt mutatja be a 10. ábra és a 11. ábra. Ennek oka a napelemes rendszer sajátosságában keresendő, azaz a paneleket sorba kapcsolva az eredő feszültség szint nő. Amikor télen alacsony a napsütéses órák száma, nagyobb felületen éri a napsugárzás, a napelemet, szemben a kis rendszerekkel (panel szám), így az inverter indulásához szükséges feszültség szint korábban elérésre kerül, azaz hamarabb és tovább termel a napelemes rendszer. A 10. ábra az ÉK-i tájolású napelemet mutatja be, míg a 11. ábra a D-i tájolásút. Jól látható, hogy a déli tájolású rendszer közel kétszer annyi villamosenergiát termel, szemben az észak-keleti tájolásúval.



10. ábra, Valós és elméleti villamosenergia termelés ÉK-is tájolású napelemnél



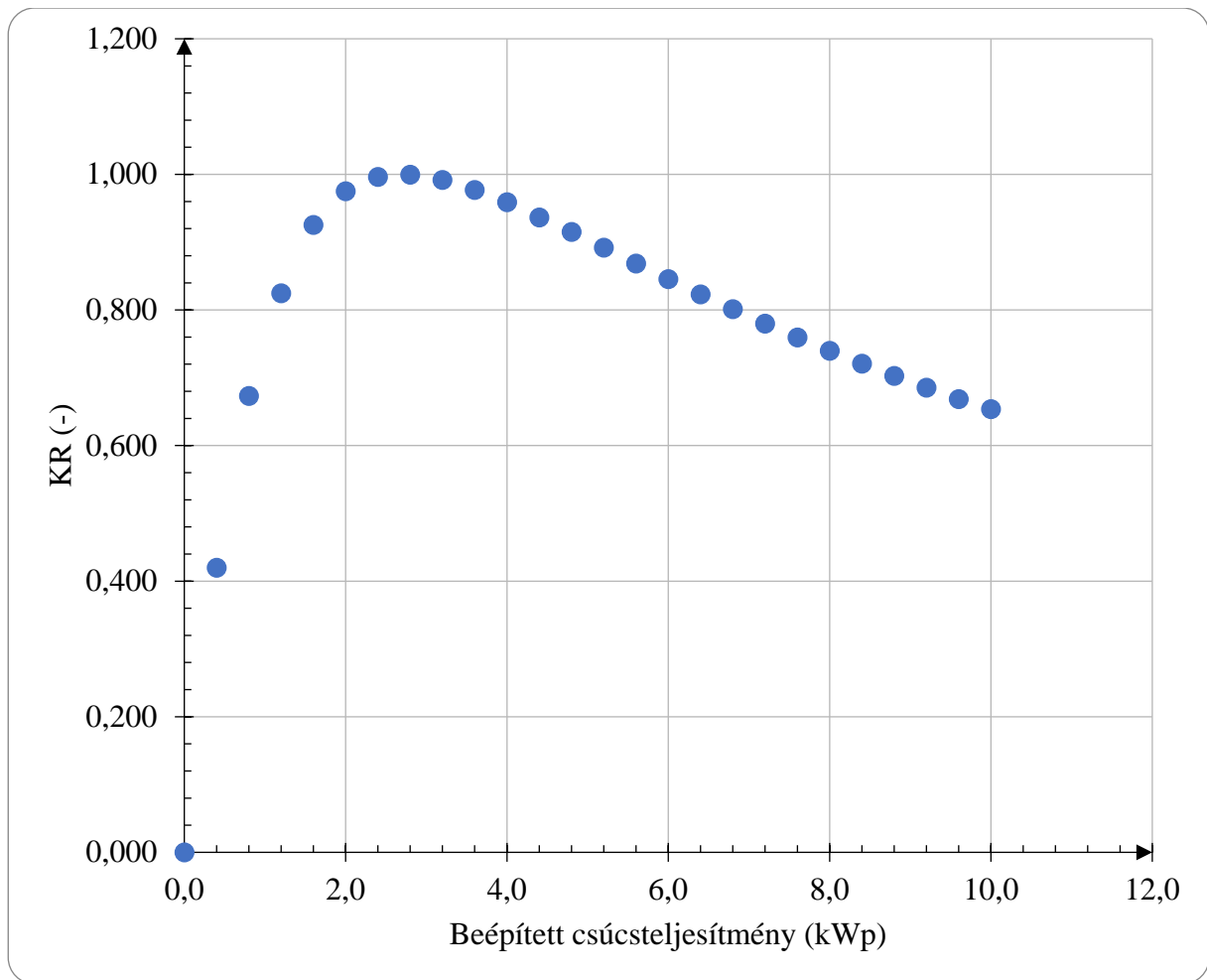
11. ábra, Valós és elméleti villamosenergia termelés D-i tájolású napelemlél

3.2. A szaldó (KR) elszámolásra optimalizált rendszerek értékelése

Mivel rengeteg adatot dolgoztam fel, így ezek szaldó szerinti kiértékeléséhez szükségem volt egy függvényre, amelyre az alábbi határoztam meg:

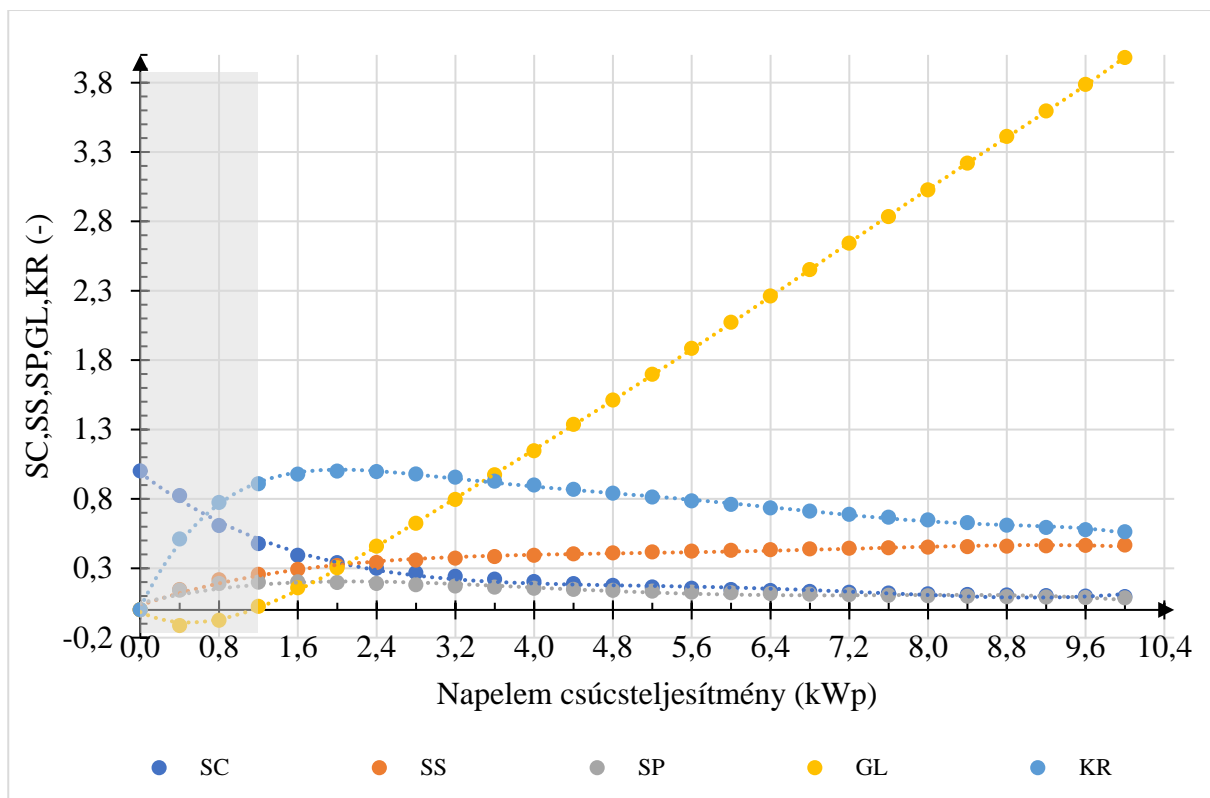
$$KR = - \left(\left(\frac{(B + C) - (A + C)}{(B + C) + (A + C)} \right)^2 - 1 \right) = - \left(\left(\frac{B - A}{B + A} \right)^2 - 1 \right) \quad (6)$$

Ennek maximális értéke 1, minimális értéke 0. Szaldóra optimalizált a rendszer, ha a KR mutatója 1, ekkor a villamosenergiatermelés és -fogyasztás éppen kiegyenlíti egymást, ezt mutatja be a 12. ábra. Az optimális rendszer méret (KR maximum) 2 kWp-nél található.



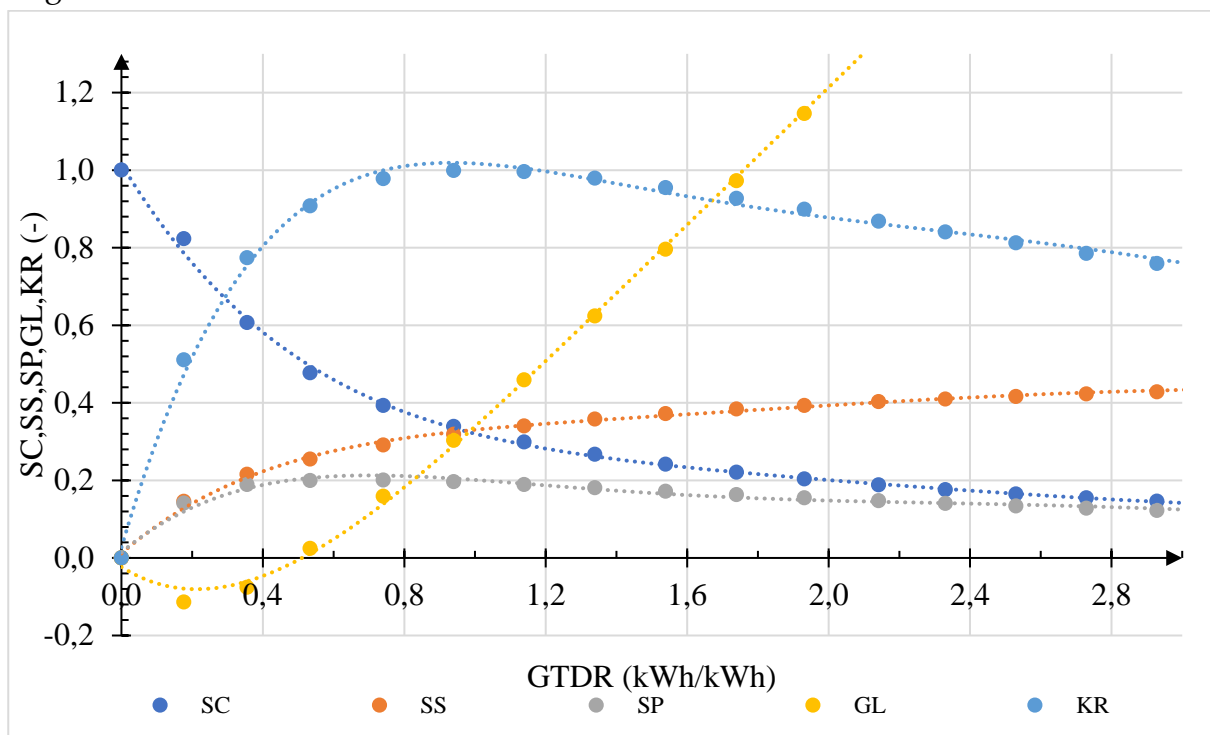
12. ábra, A KR szaldó indikátor alkalmazása

A 13. ábra valós fogyasztásokon alapulva mutatja be az értékelő indikátorok alakulását, az ábrán a szürkével jelölt terület az elméleti teljesítmények mellett mutatja az indikátorok alakulását. A KR indikátor maximuma 2 kWp napelem csúcsteljesítménynél van, így a vizsgált fogyasztónál ez lesz az optimális napelemes rendszer csúcsteljesítménye. Ekkor az A-I példa profil éves villamosenergia fogyasztása 2368 kWh, amelyhez 2225 kWh villamosenergia termelés társul. Az optimális pontban az önfogyasztás (SC) 33,9%, az önellátás (SS) 31,8%, az öntermelés (SP) 19,6%, a hálózat használati tényező (GL) 30,3%. Az SC paraméter alapján az összes napelemes termelésnek a 33,9%-t használtuk fel helyben. Az SS mutatja, hogy milyen arányban fedte le a termelés a fogyasztás időbeli lefutását. A jelen rendszerrel az összesen elfogyasztott energiának 31,8%-a lett helyben elhasználva, a maradék energiát a hálózattól kellett vételezni. Az SP jellemzi a helyben felhasznált és a teljes villamosenergia forgalom arányát, a vizsgált fogyasztónál ez most 19,6%, azaz a teljes energiaforgalom 19,6% tudja helyben felhasználni. A GL indikátor a hálózat használatot mutatja meg, amely a szolgáltató számára fontos indikátor, a vizsgált esetben ez 30,3% volt. Összességében elmondható az indikátorok alapján, hogy a termelés és a fogyasztás kismértékben fedi le egymást.



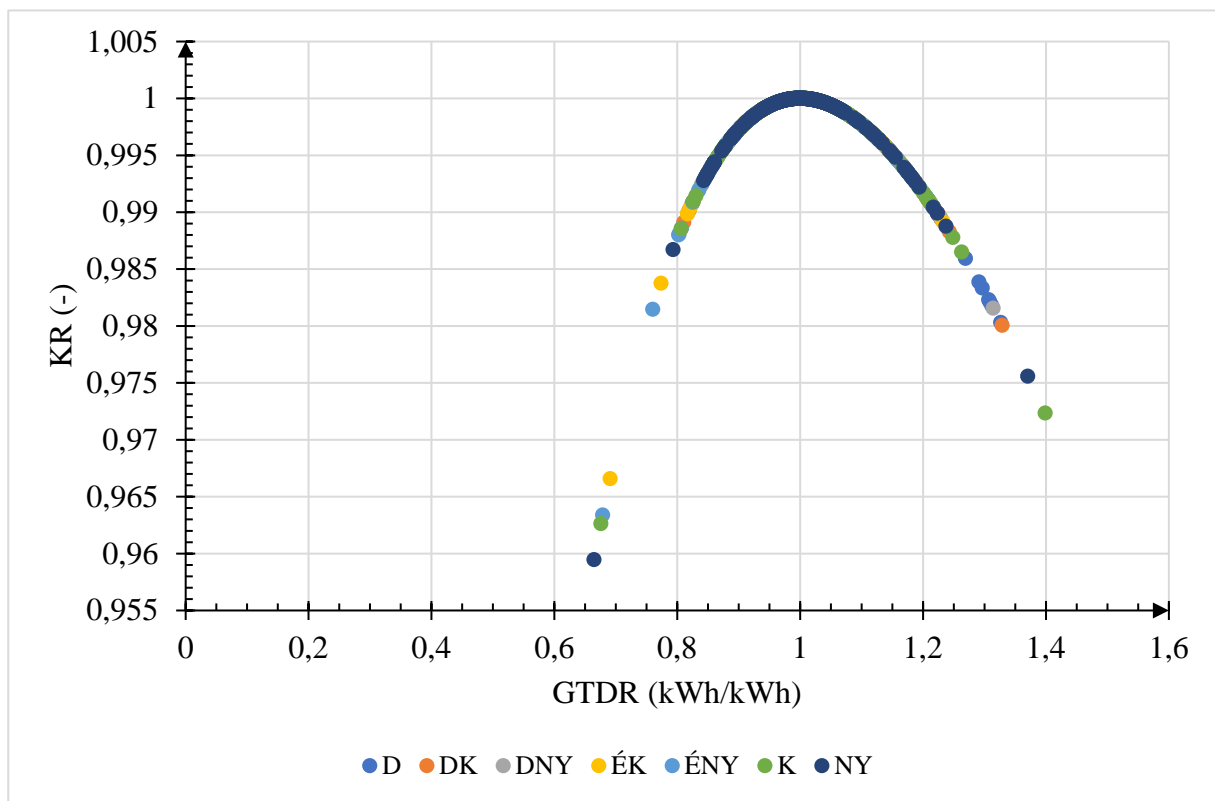
13. ábra, A szaldóra optimalizált rendszer indikátorai

A különböző fogyasztók és termelések összehasonlíthatósága érdekében a vízszintes tengelyen érdemes a termelés és fogyasztás arányának (GTDR) mutatóját használni, ezt a mutatót a 14. ábra, ahol a GTDR értelmezési tartományát a (0 ; 2,8)-ra rögzítettem.



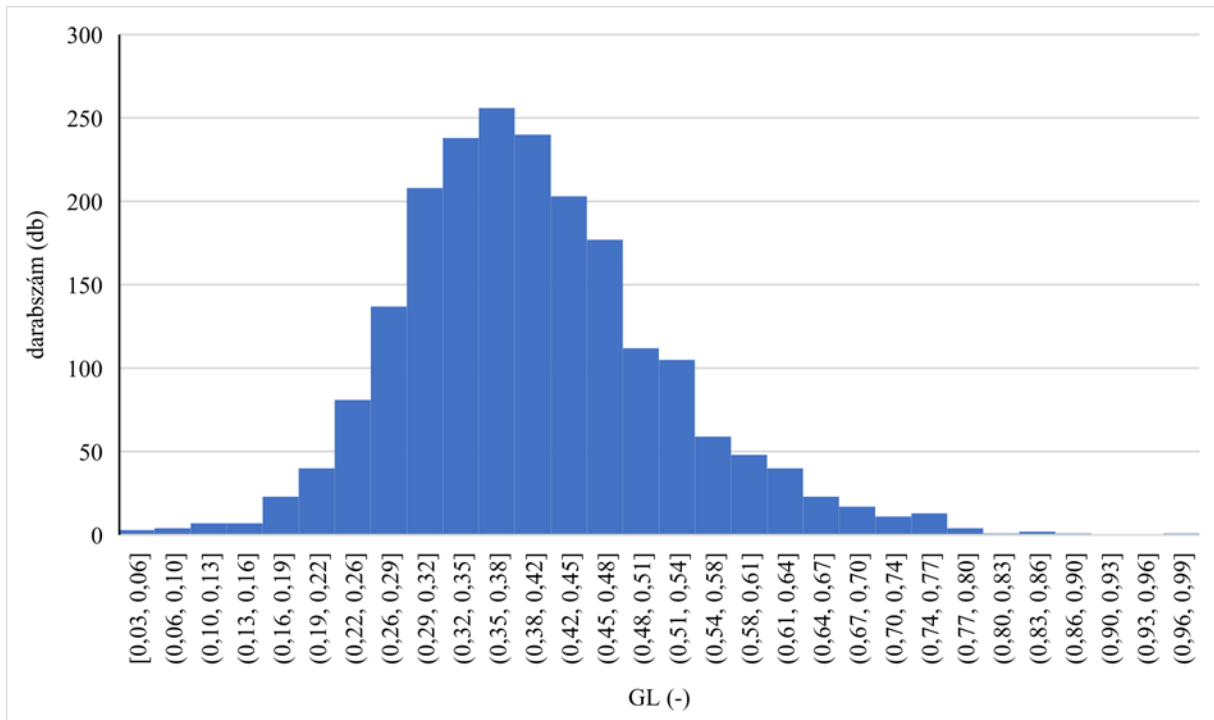
14. ábra, Az értékelő indikátorok a termelés és kereslet arányában (GTDR)

A 15. ábra mutatja a rendszereket egységében vizsgálva a különböző fogyasztási profilok és tájolások alapján. Az ábra alapján jól elkülönülő határokat nem látunk a különböző tájolások esetén, azonban az megfigyelhető, hogy a GTDR tengelyen mekkora a szórás. Az alacsony GTDR mutató azt jelenti, hogy a termelés nem fedi le a fogyasztást, míg a magas GTDR mutató azt jelenti, hogy túl termelés van. Ezek alapján az adatokat visszanezve, azt tapasztaltam, hogy számos kis fogyasztó (1200 kWh alatti) található az adatok között, ezen fogyasztóknál alakult a GTDR mutató 1 felettinek, mivel a napelemes teljesítmény felbontása túl nagy ebben a tartományban. Az 1 alatti GTDR értékeknél pedig épp ellenkezőleg túl nagy 5000 kWh feletti fogyasztókról beszélhetünk, ahol nem megfelelő tájolás esetén a 10kWp maximális csúcsteljesítmény limitál, azaz nem tud eleget termelni. Az (1 ; 1) pont körül jelentős a sűrűsödés, ami alapján megállapítható, hogy az esetek döntő többségében megtalálható az ideális napelemes rendszer teljesítmény különböző tájolások esetén is.



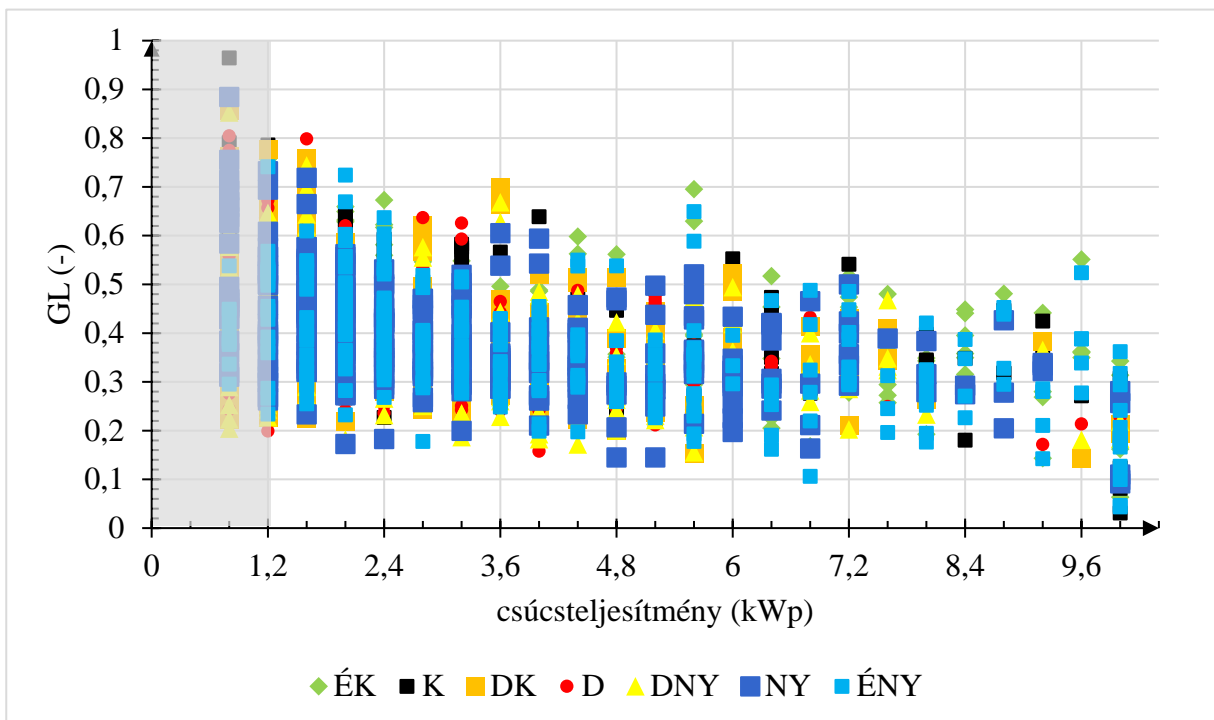
15. ábra, A KR mutató szórása a GTDR függvényében, különböző tájolások esetén

A 16. ábra mutatja a szaldó szerint méretezett rendszerek GL eloszlását. Az ábra alapján megfigyelhető hogy a leggyakrabban előforduló GL érték (0,35 ; 0,38) tartományba esik, azonban a szórás igen nagy.



16. ábra, A szaldóra optimalizált rendszerek GL szerinti eloszlása

A 17. ábra mutatja a szaldóra optimalizált rendszerek esetén a GL indikátort a beépített csúcsteljesítmény függvényében, különböző tájolások esetén. Megfigyelhető, hogy a tájolások között nincs szignifikáns különbség, azonban jól látható, hogy a nagyobb csúcsteljesítményű rendszerek esetén akár 50%-kal kisebb hálózathasználat is elérhető. A legnagyobb hálózati terhelés az 1,6 kWp alatti rendszereknél van.

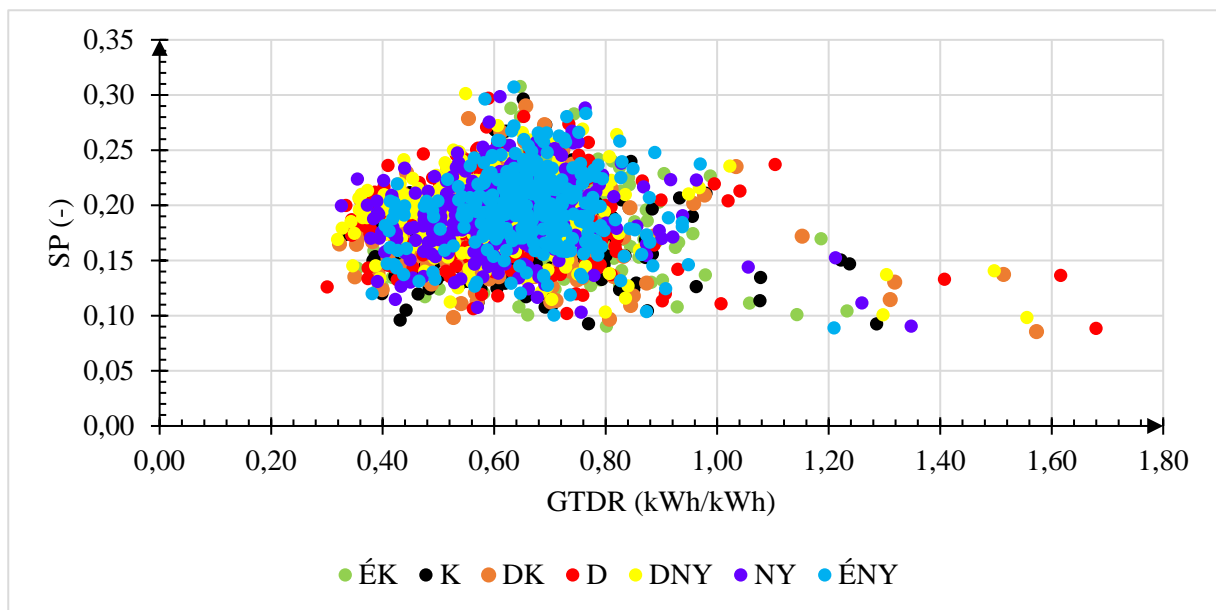


17. ábra, A GL indikátor a csúcsteljesítmény függvényében szaldóra optimalizált rendszernél

3.3. Az öntermelésre (SP) optimalizált rendszerek értékelése

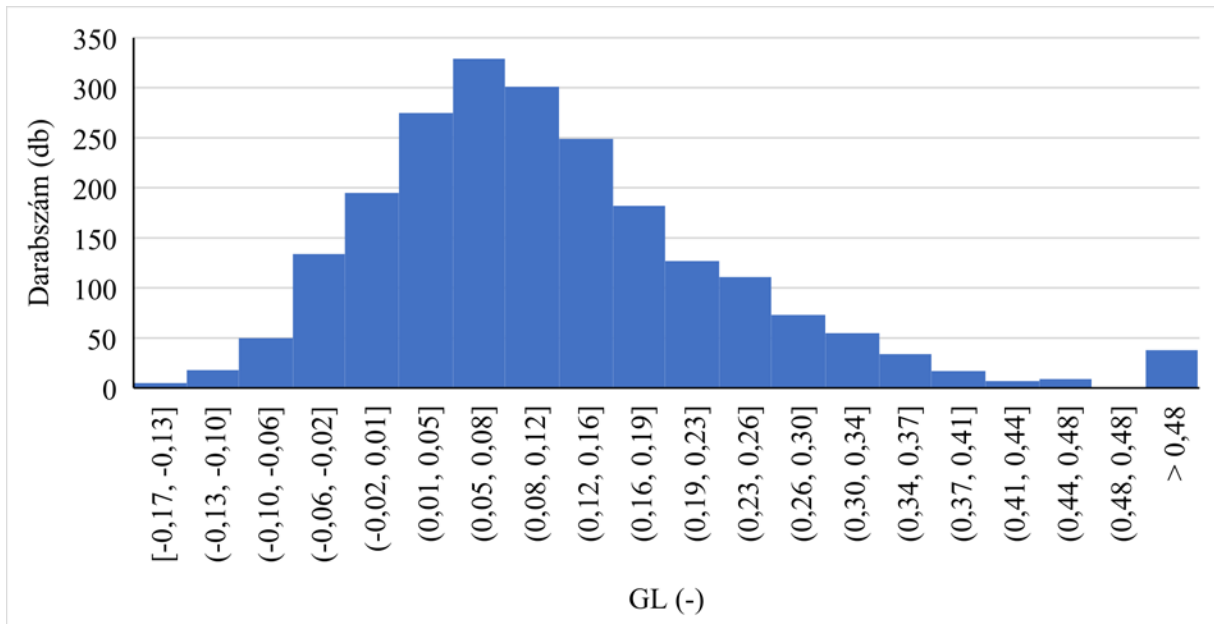
Az öntermelés optimalizációja (maximumra törekedése) azért fontos, mert ez a felhasználó szempontjából értékeli a napelemes rendszert, hogy a termelés milyen mértékben fedei le a fogyasztást. A bruttó elszámolás során várhatóan ez a mutató lesz a méretezés alapja.

A 18. ábra mutatja az öntermelés indikátor szórását a vizsgált esetekre a GTDR függvényében. Az ábrán látható, hogy a tájolás nincs jelentős hatással az SP optimum értékére és optimum szórása igen nagy, a középértéke SP 0,2 és GTDR 0,65 pontjába tehető.



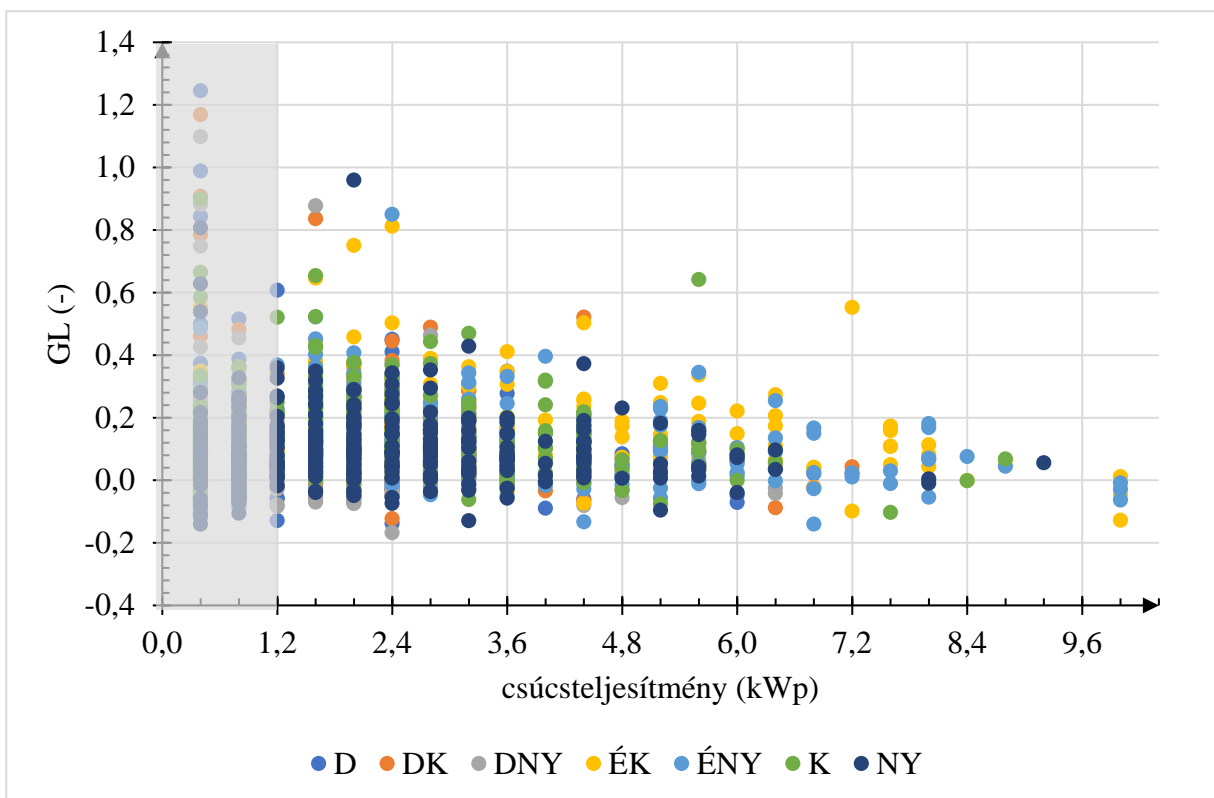
18. ábra, Az öntermelésre optimalizált rendszer esetén az optimum értékének alakulása

A 19. ábra mutatja az öntermelésre optimalizált rendszerek esetén a hálózathasználati tényező eloszlását. Megfigyelhető hogy a leggyakrabban előforduló GL indikátor a (0,5 ; 0,08) tartományba esik, azaz a hálózat használat majdnem ugyan olyan mértékű, mintha nem is lenne napelem.



19. ábra Az öntermelésre optimalizált rendszerek GL szerinti eloszlása

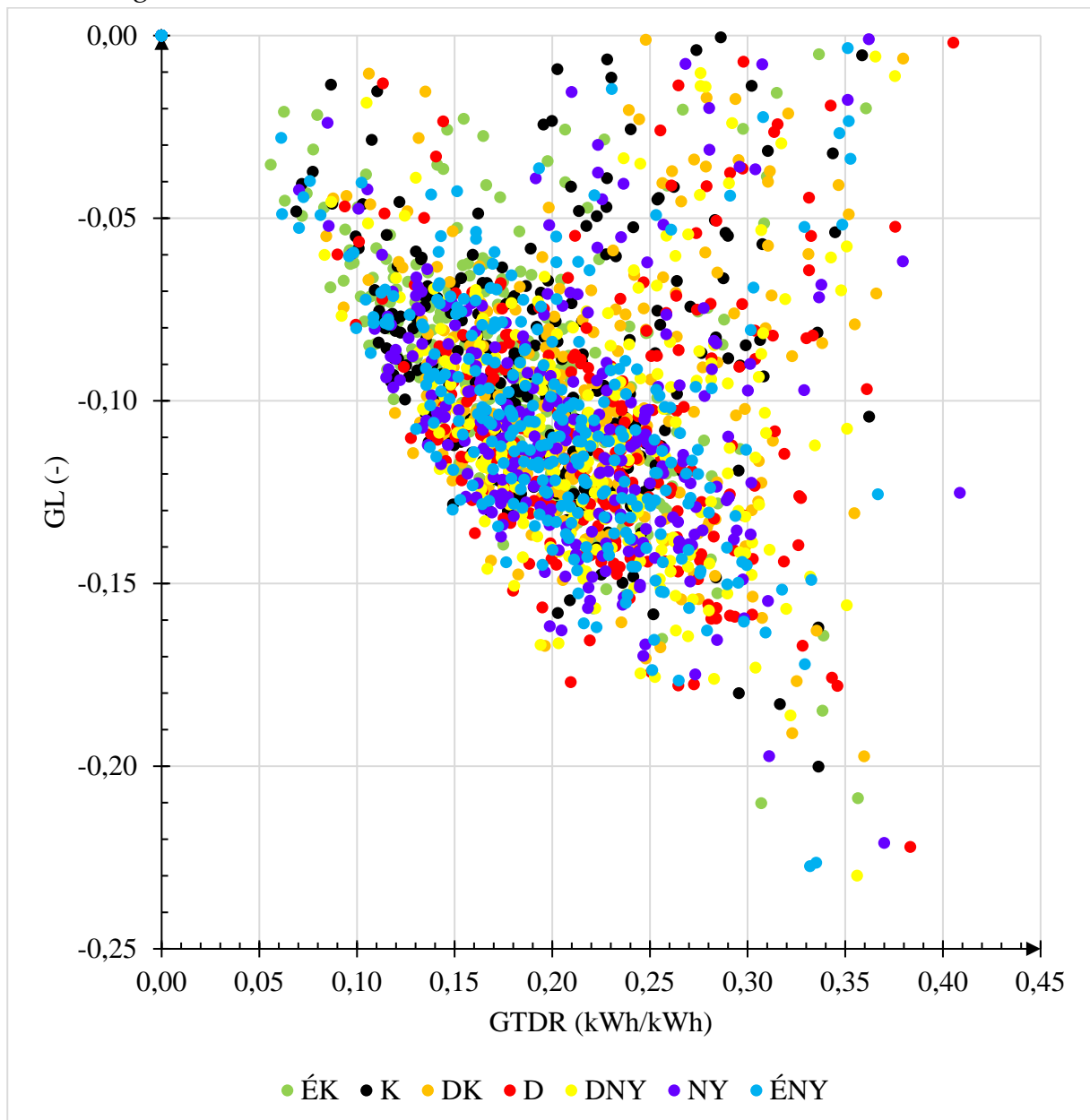
A 20. ábra mutatja az öntermelésre optimalizált rendszereknél a hálózathasználati tényező alakulását a beépített csúcsteljesítmény függvényében. A szaldós méretezésnél látottak szerint itt is, a teljesítmények növekedésével fordítottan arányosan változik a GL maximális értéke. Azonban látható, hogy ebben az esetben már negatív GL értékek is megjelennek, amely azt jelenti, hogy kevesebbet használjuk a hálózatot, mint napelem nélküli esetben.



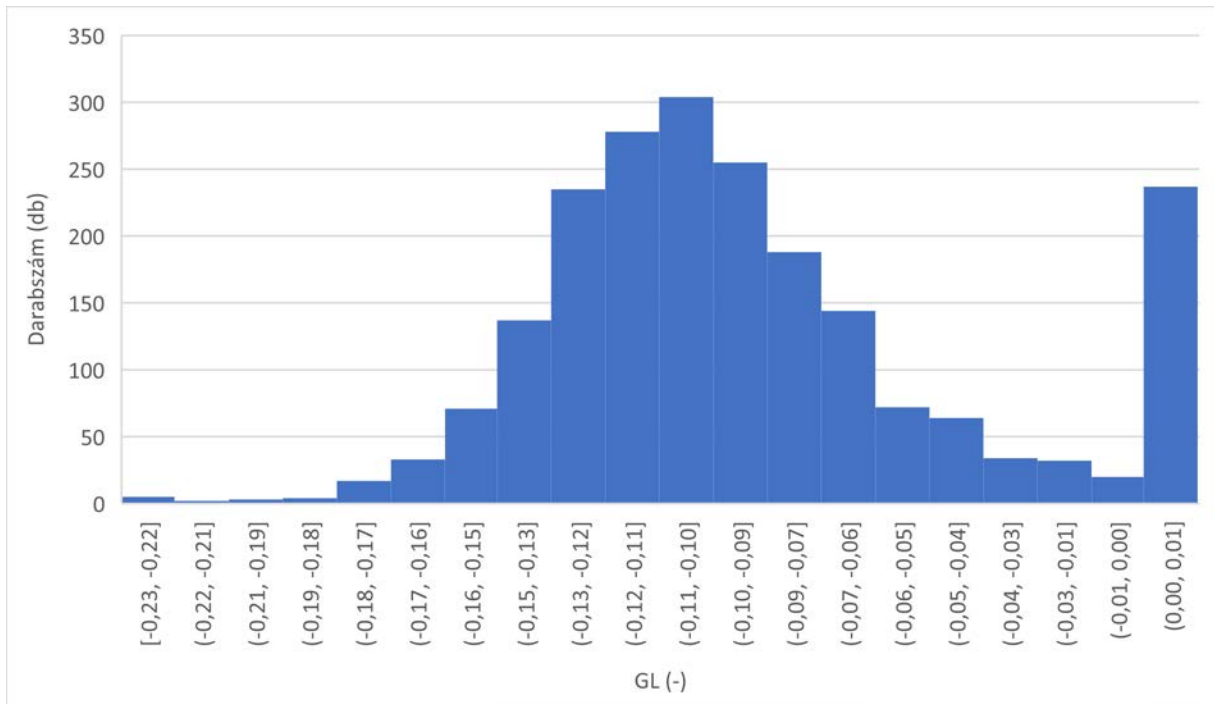
20. ábra, A GL indikátor a csúcsteljesítmény függvényében az öntermelésre optimalizált rendszereknél

3.4. A hálózathasználatra (GL) optimalizált rendszerek értékelése

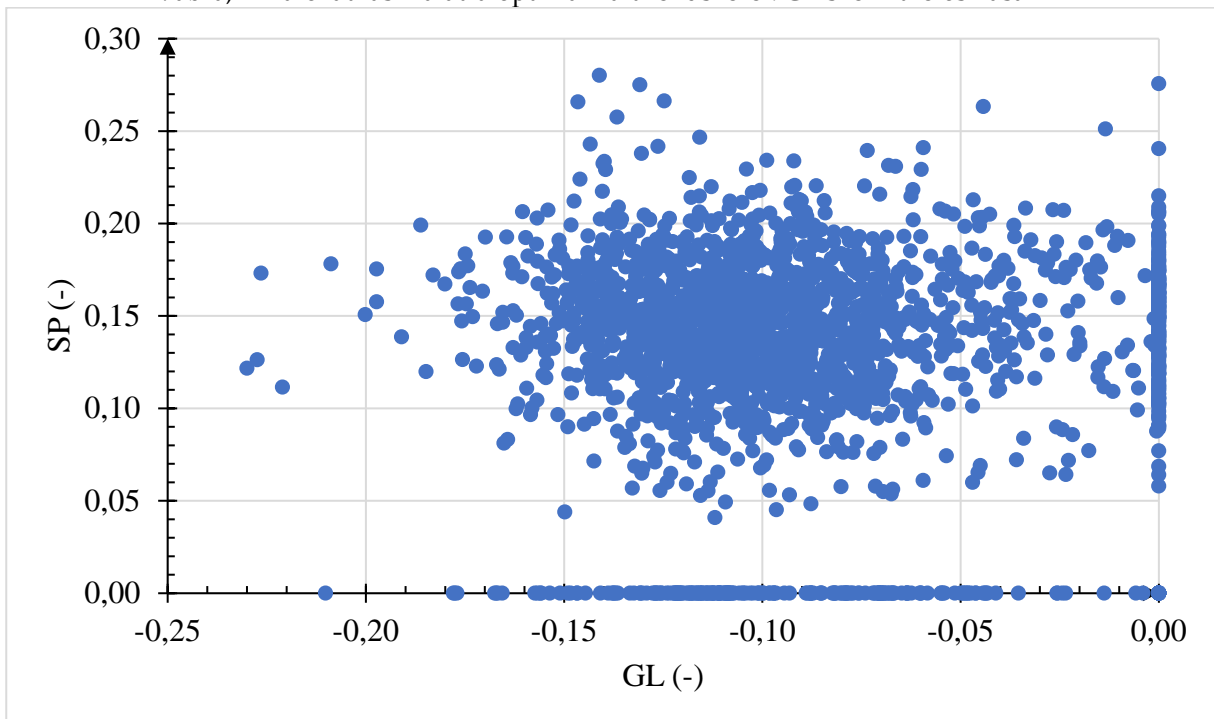
A 21. ábra mutatja a hálózathasználatra optimalizált rendszer esetén a hálózathasználati tényező szórását a GTDR függvényében. A vizsgált adatok alapján ennek középértéke GL -0,125 és GTDR 0,2 metszéspontja. Az ábra alapján megállapítható, hogy ilyen optimalizáció esetén sincs jelentős hatása az optimumra a tájolásnak. A 22. ábra mutatja a GL szerinti eloszlást a vizsgált rendszereknél, amelynek középértéke (-0,11 ; -0,10) tartományba esik. Az ábrán szemet szúr a GL 0 értékhez tartozó elemek darabszáma. A 23. ábra alapján számos rendszerhez nulla napelemes termelés tartozik, az adatok vizsgálata során azt tapasztaltam, hogy ezek mind kis fogyasztók, így számukra nincs értelme napelemes rendszert használni az általam vizsgált feltételek mellett.



21. ábra, A hálózathasználatra optimalizált rendszer esetén az optimum értékének alakulása

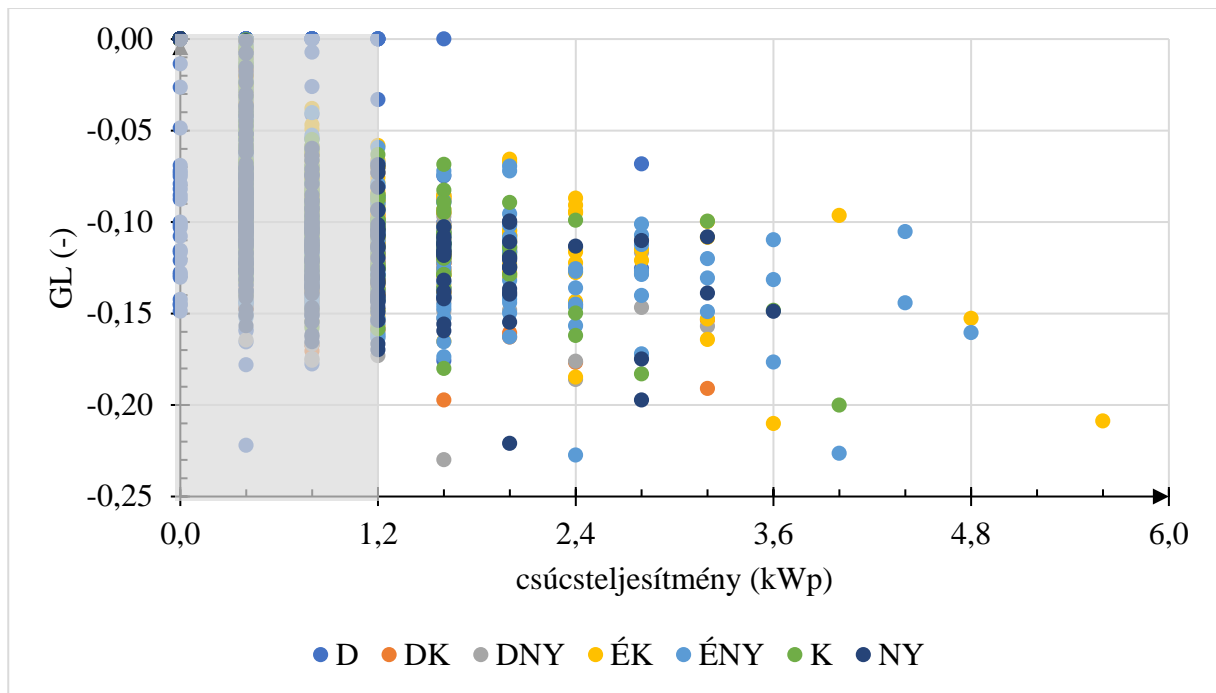


22. ábra, A hálózathasználatra optimalizált rendszerek GL szerinti eloszlása



23. ábra, Az öntermelés a hálózathasználat függvényében

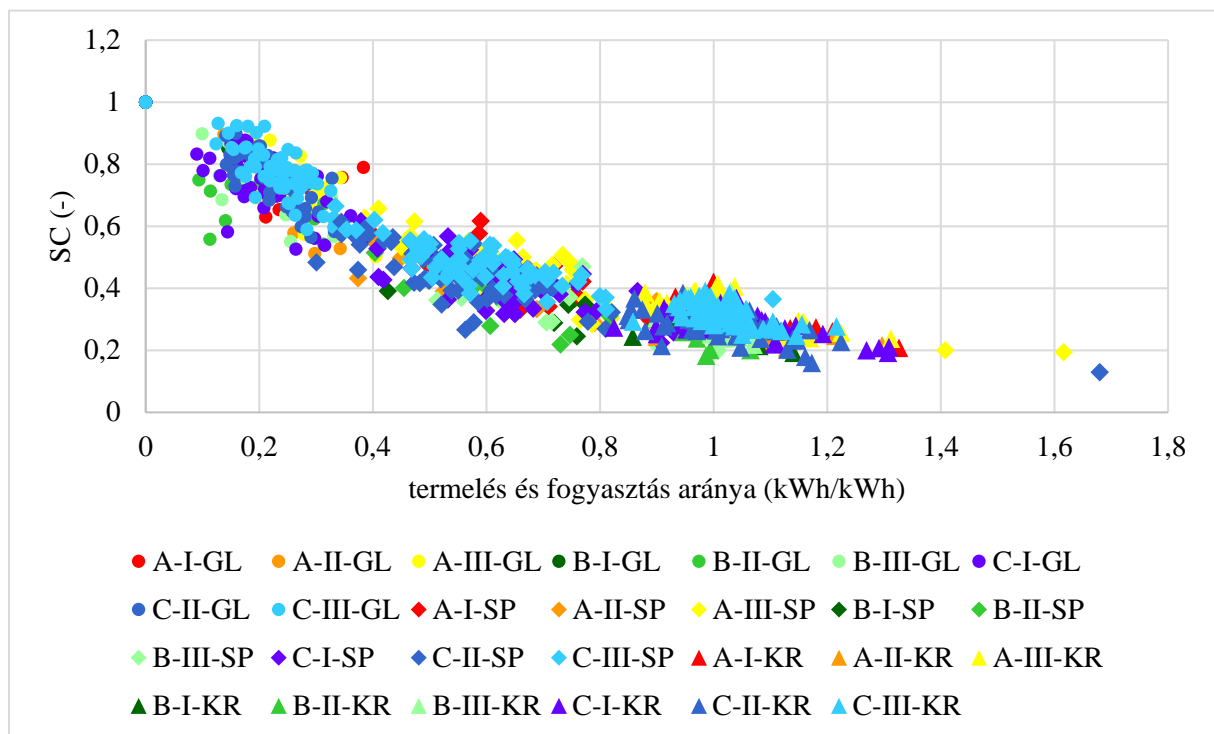
A 24. ábra mutatja a hálózathasználatra optimalizált rendszerek esetén a GL értékét a különböző beépített napelemes csúcsteljesítmények függvényében. Az előzőkkel azonosan itt is, ahogy nő a napelemes csúcsteljesítmény úgy csökken a GL maximális értéke és szórása.



24. ábra, A GL indikátor a csúcsteljesítmény függvényében a hálózathasználatra optimalizált rendszereknél

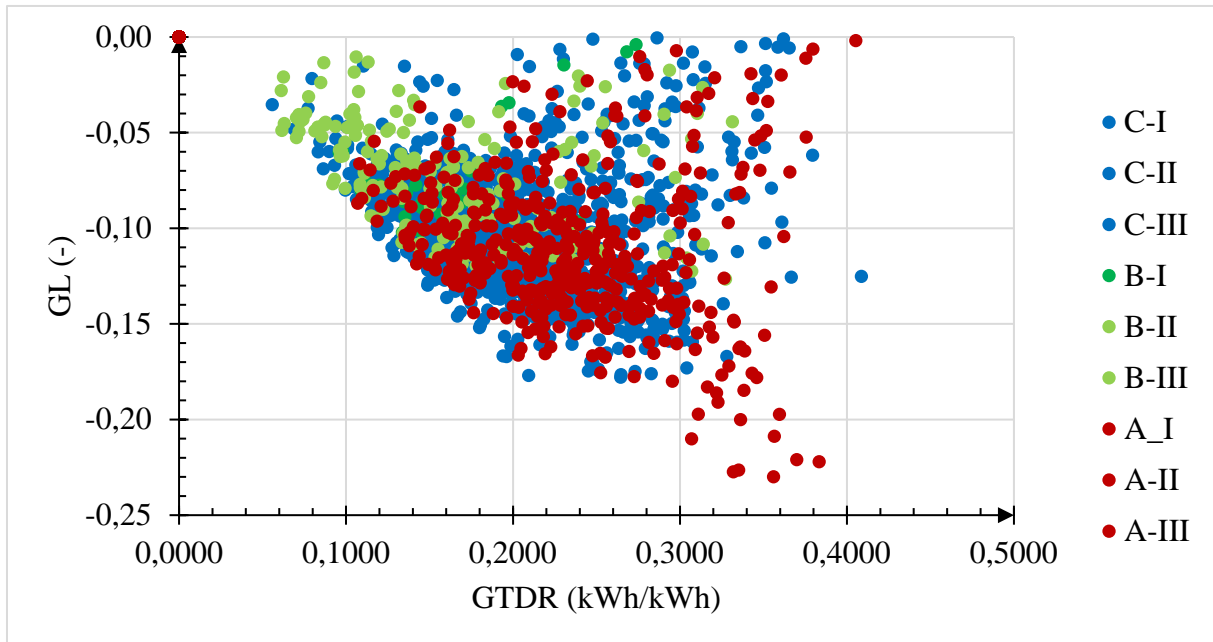
3.5. Fogyasztási profilok vizsgálata

A 25. ábra mutatja az önfogyasztást a kilenc féle fogyasztási klaszterrel és a három féle rendszer optimalizációval. Az ábra alapján a profilok nincsenek jelentős hatással az önfogyasztásra. A három féle optimalizáció nehezen elkülöníthető góccokat alkot.



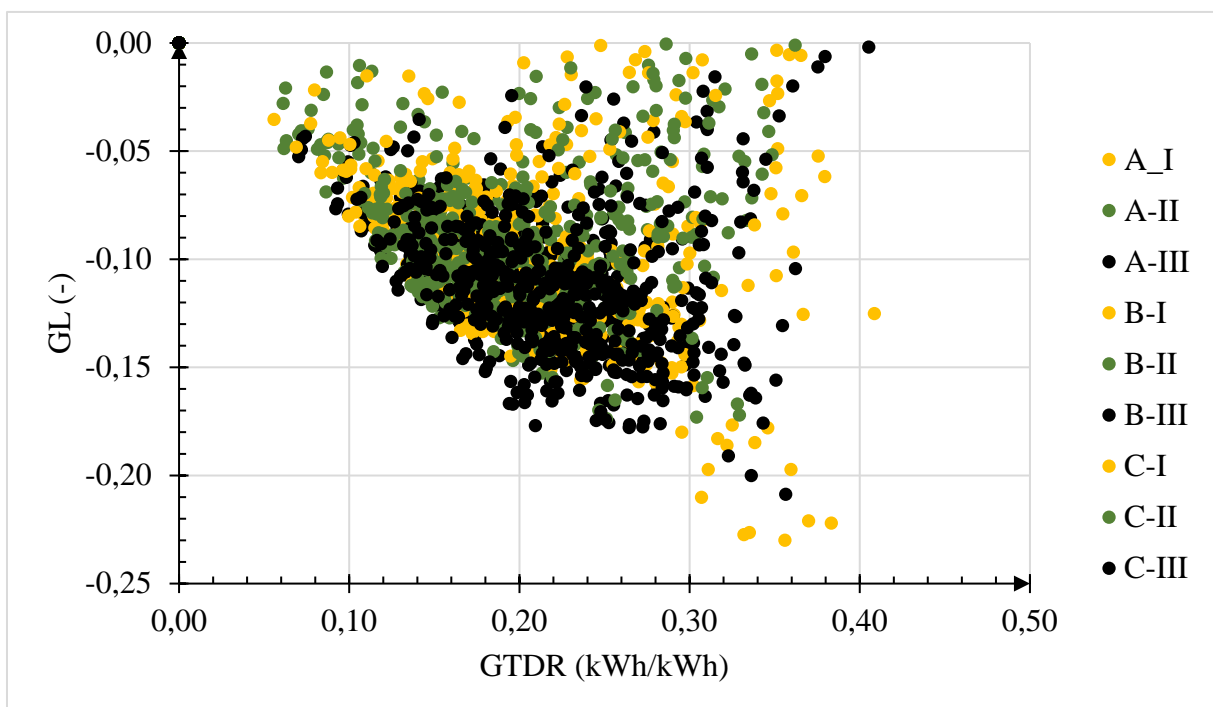
25. ábra, Az önfogyasztás különböző profilokkal és optimalizációkkal

A 26. ábra mutatja a hálózathasználatra optimalizált rendszereknél a profil szerinti bontás alapján a GL értékét, itt elkülöníthetően látszódik az A profil nyári hűtési igénye így ez a profil rendelkezik a legalacsonyabb GL értékekkel, míg a B profilnál megfigyelhető a téli fűtési igény, így itt a pontfelhő fölfelé tolódik el, a C kiegyenlített profil a két szélső profil között foglal helyet egy jól elhatárolható területen.



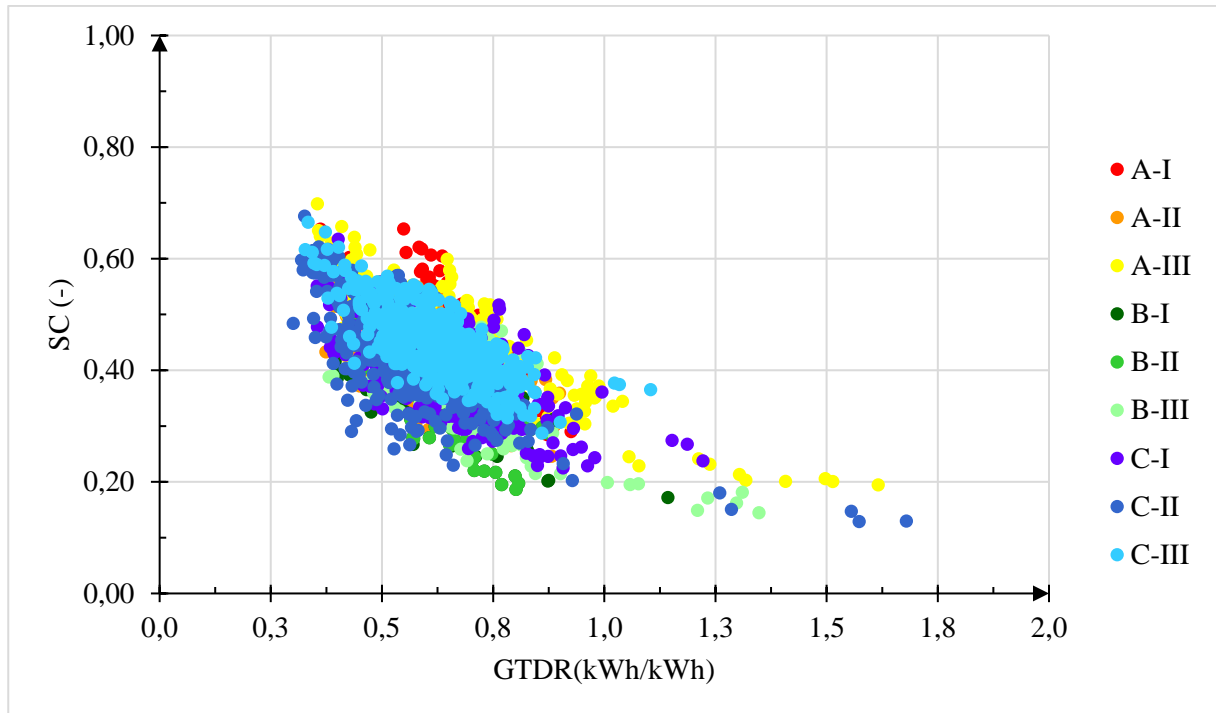
26. ábra, A hálózathasználatra optimalizált rendszerek éves fogyasztási profilszerinti bontása

A 27. ábra a napi profilszerinti bontás alapján mutatja a hálózathasználatot, itt jelentősebb elkülönülést nem látunk a különböző napi profilok között.



27. ábra, A hálózatra optimalizált rendszerek napi fogyasztási profilok szerinti bontása

A 28. ábra az öntermelésre optimalizált rendszerek esetében mutatja be az önfogyasztást különböző profilok alapján. Az ábra szerint a különböző villamos profilok nincsenek jelentős hatással az önfogyasztásra.



28. ábra, Az önfogyasztás az öntermelésre optimalizált rendszereknél különböző profilokkal

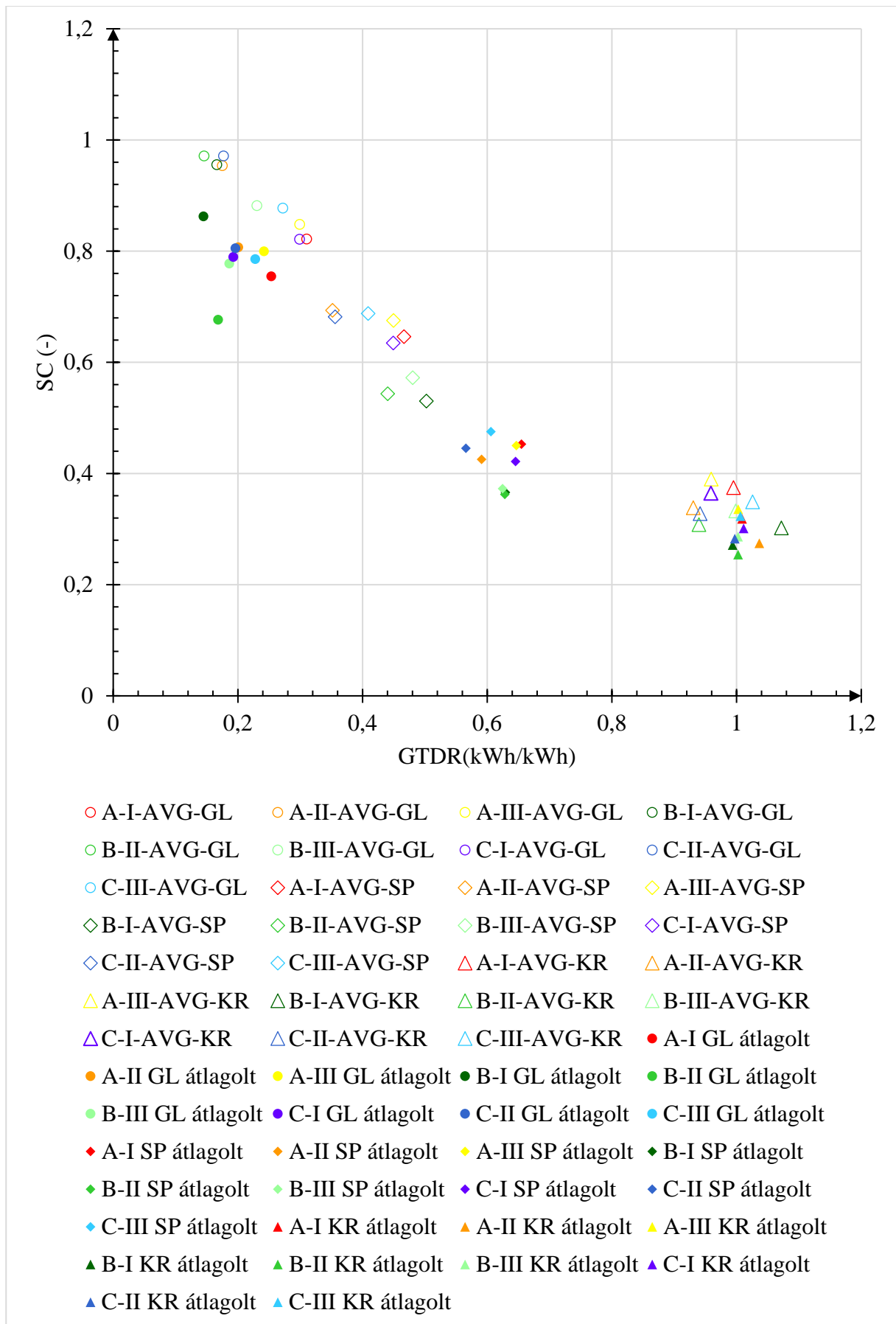
Az átlag profilok összehasonlítását a 29. ábra mutatja, kitöltetlen jelölökkel az átlag profilok láthatóak, míg kitöltött jelölővel a profilok átlagai. A kör alakú jelölők a GL-re optimalizált rendszerek önfogyasztását mutatja, a rombusz az SP-re optimalizált rendszerekét, amíg a háromszög a szaldóra optimalizált rendszerek önfogyasztását ábrázolja.

Szaldós esetben a profilok átlagai jóval kisebb szórást mutatnak, mint az átlag profilok önfogyasztása, azonban kisebb önfogyasztást értek el.

Az öntermelésre optimalizált rendszerek esetén a profilok átlaga jelentősen eltér az átlag profilok önfogyasztás értékétől, ugyan akkor kisebb szórást is mutatnak, összeségében alacsonyabb az önfogyasztás értékük.

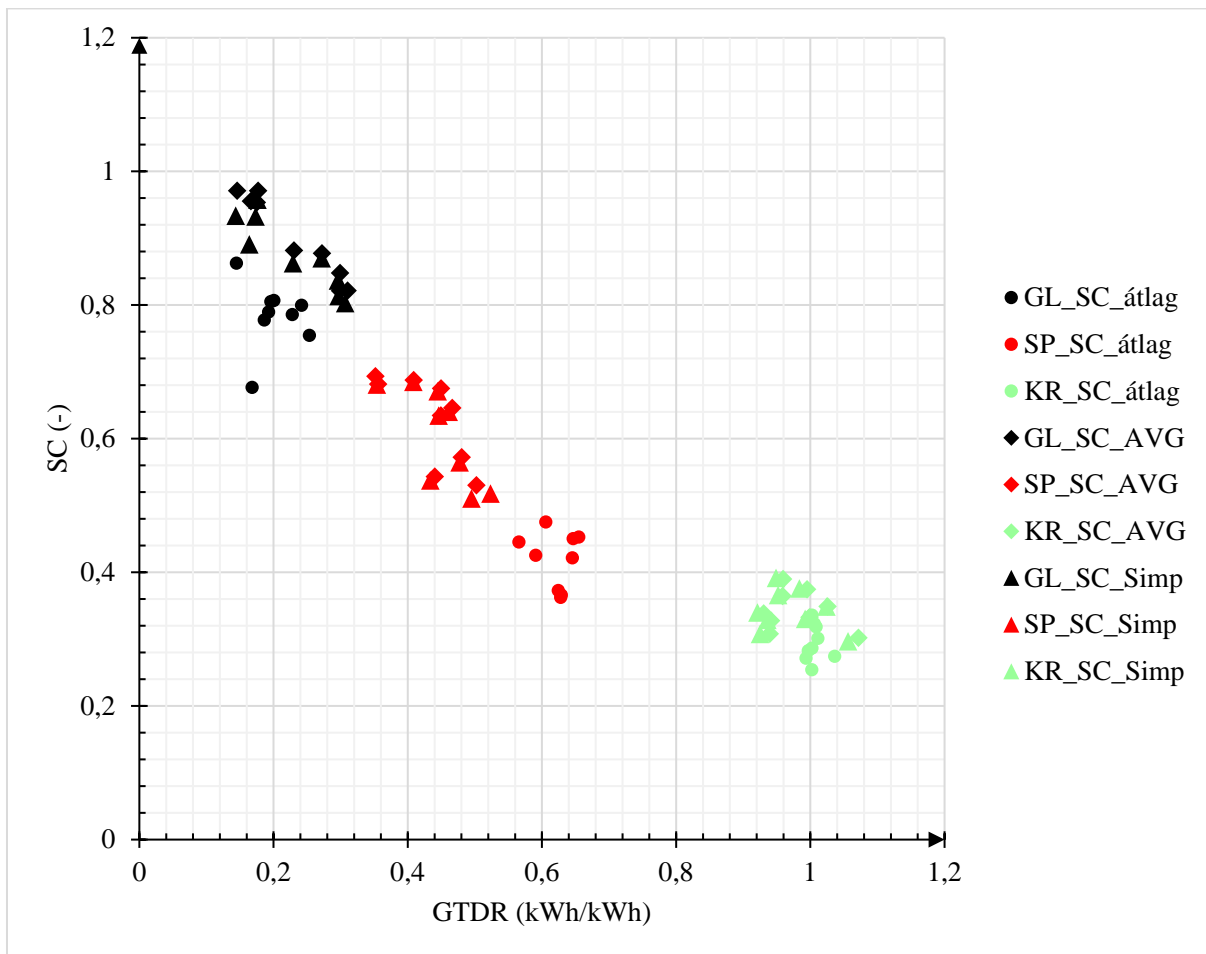
A hálózathasználatra optimalizált rendszerek esetén is látszódik egy gócpont, azonban van néhány profil a gócponttól távol is, ennél a mutatónál is elmondható, hogy a profilok átlaga kisebb önfogyasztást ért el, mint az átlag profilok.

Összeségében elmondható, hogy a KR és GL optimált esetben a GTDR értékek közel azonosak az átlagprofiloknál és a profilok átlagánál is, azonban az átlagprofilok SC értéke közel 20%-kal magasabb. SP optimum esetében magasabb GTDR értékek adódnak, amelyek alacsonyabb SC értéket eredményeznek.



29. ábra, Az átlag profilok összehasonlítása

A sima átlagolt profil (AVG) a profilok átlaga, tehát minden 15 percre a profilátlagokat tartalmazza. A simplified átlag a profilonként meghatározott átlagos napi profil ismétlése, korrigálva a havi fajlagos fogyasztással. Az átlag profil az összes profil átlagából lett képezve. Ezen átlagokat a 30. ábra mutatja, amely alapján megállapítható, hogy a Simplified profil jól közelíti az átlagolt profilt. A szaldós esetben mind három profil közel azonos GTDR és SC értéket mutat, amíg a GL optimum esetén a GTDR értékek közel azonosak, azonban az SC értékeknél már jelentősebb a különbség a profilok átlagához képest, mind AVG mind Simplified esetén. SP optimum esetén az AVG és Simplified profil szinte megegyezik, azonban mind kettő jelentősen eltér az SC és GTDR értékében a profilok átlagának SC és GTDR értékétől.



30. ábra, A különböző átlag profilok összehasonlítása

3.6. Napelemes rendszerek megtérülése

Napjainkban sok embert foglalkoztat, hogy bruttó elszámolás esetén, hogy alakulnak az egyszerű megtérülés mutatók. A következőkben elvégeztem egy konkrét rendszerre az egyszerű megtérülés számítását, a különböző beépített napelemes csúcsteljesítmények és az átadott/vételezett villamosenergia függvényében, ezzel az aránypárral a tényleges villamosenergia-ártól függetlenül vizsgálható a megtérülés.

Ennek számítására a következő képletet alkalmaztam:

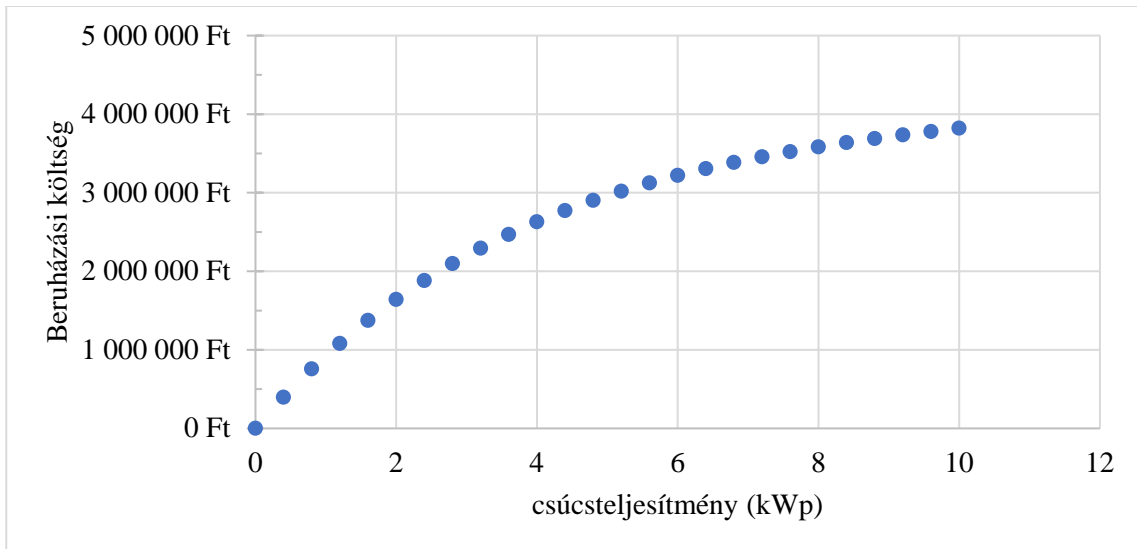
$$\begin{aligned} \tau_{\text{egyszerű,év}} &= \frac{P_{\text{ráfordítás}}}{P_{\text{nyereség}}} = \\ &= P_{\text{beruházás}} \left(\text{HA}(A > E_{\text{határ}}; C p_{p,vét}; \text{HA}((A + C) \right. \\ &> E_{\text{határ}}; C p_{rh,vét}; (C - (E_{\text{határ}} - A)) p_{p,vét} + (E_{\text{határ}} - A) p_{rh,vét})) \\ &\left. + \min(A; B) \frac{p_{e,át}}{p_{rh,vét}} p_{rh,vét} \right)^{-1} \end{aligned}$$

Ahol:

$p_{rh,vét}$	(HUF) a szolgáltatótól vételezett energia összege rezsihatár alatt
$p_{p,vét}$	(HUF) a szolgáltatótól vételezett energia összege rezsihatár felett
$p_{e,át}$	(HUF) a szolgáltatónak átadott többlet termelés összege
$E_{\text{határ}}$	(kWh) a rezsicsökkentett villamosenergia határa (2523 kWh)
A	(kWh) a hálózatról vételezett energia mennyiség
B	(kWh) a szolgáltatónak átadott villamosenergia termelés
C	(kWh) a helyben felhasznált villamosenergia
$P_{\text{beruházás}}$	(HUF) a napelemes rendszer beruházási költsége
$P_{\text{nyereség}}$	(HUF) a nyereség

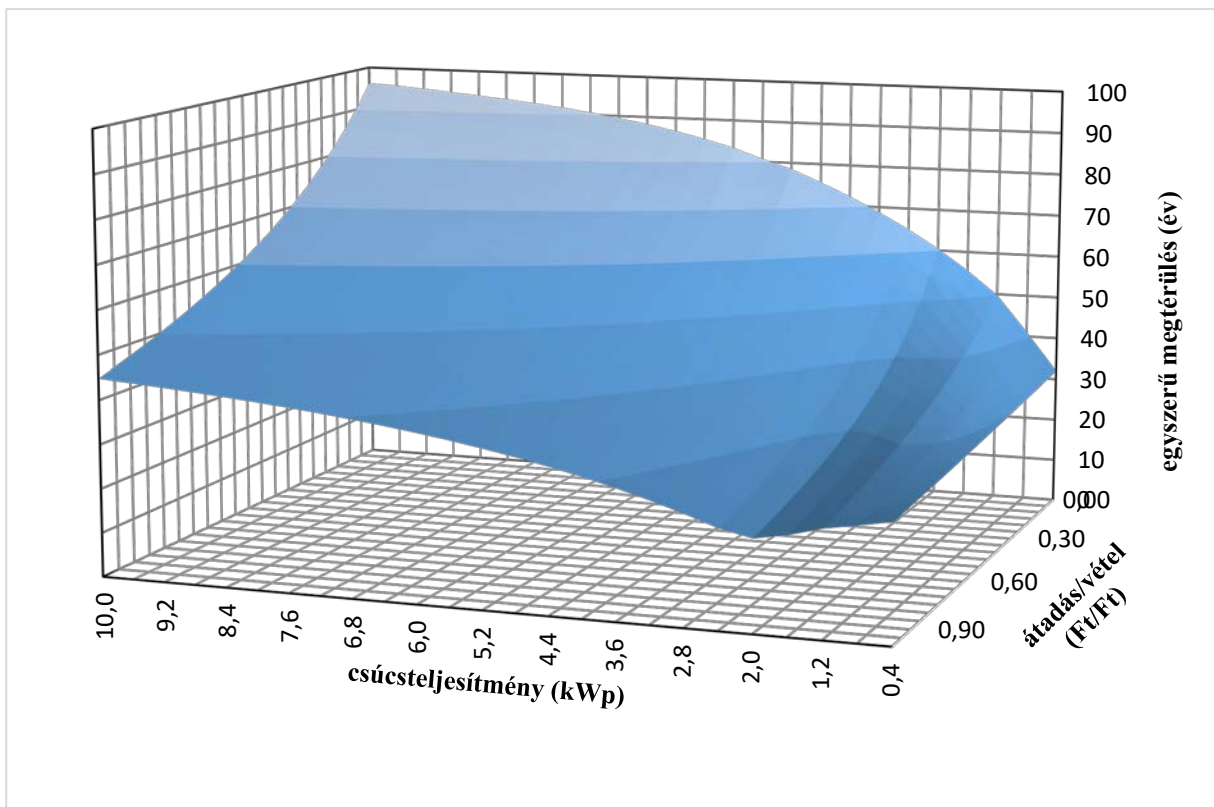
A jelenleg hatályos lakossági villamosenergia tarifa esetén kb. 5 Ft/kWh-ért veszi át a többlet termelést a szolgáltató, amíg rezszi határ alatt 36 Ft/kWh összeget számláz ki, a meghatározott fogyasztás (2523 kWh) felett pedig megközelítőleg 70 Ft/kWh az összköltség. A vizsgálataim során azt feltételeztem, hogy a felhasználók, szaldó esetén, maximum a hálózatról vételezett villamosenergia mennyiségig tölthetnek vissza a hálózatra, így ez jelentősen módosította a megtérülési időket a nagyobb teljesítményű napelemes rendszerek esetében.

A napelemes rendszer beruházási költségét a 31. ábra mutatja, amelyet különböző árajánlatok alapján létrehozott egyenletekkel vettem fel. A napelem panelek ára nem függ a beépített csúcsteljesítménytől, azonban a további rendszerelemek ára függ ettől, emiatt a nagyobb rendszerek fajlagosan olcsóbbak, amíg az alacsony teljesítményű rendszerek esetén az inverter költsége miatt kapunk fajlagosan magasabb árat.



31. ábra, Napelemes rendszerek beruházási költsége

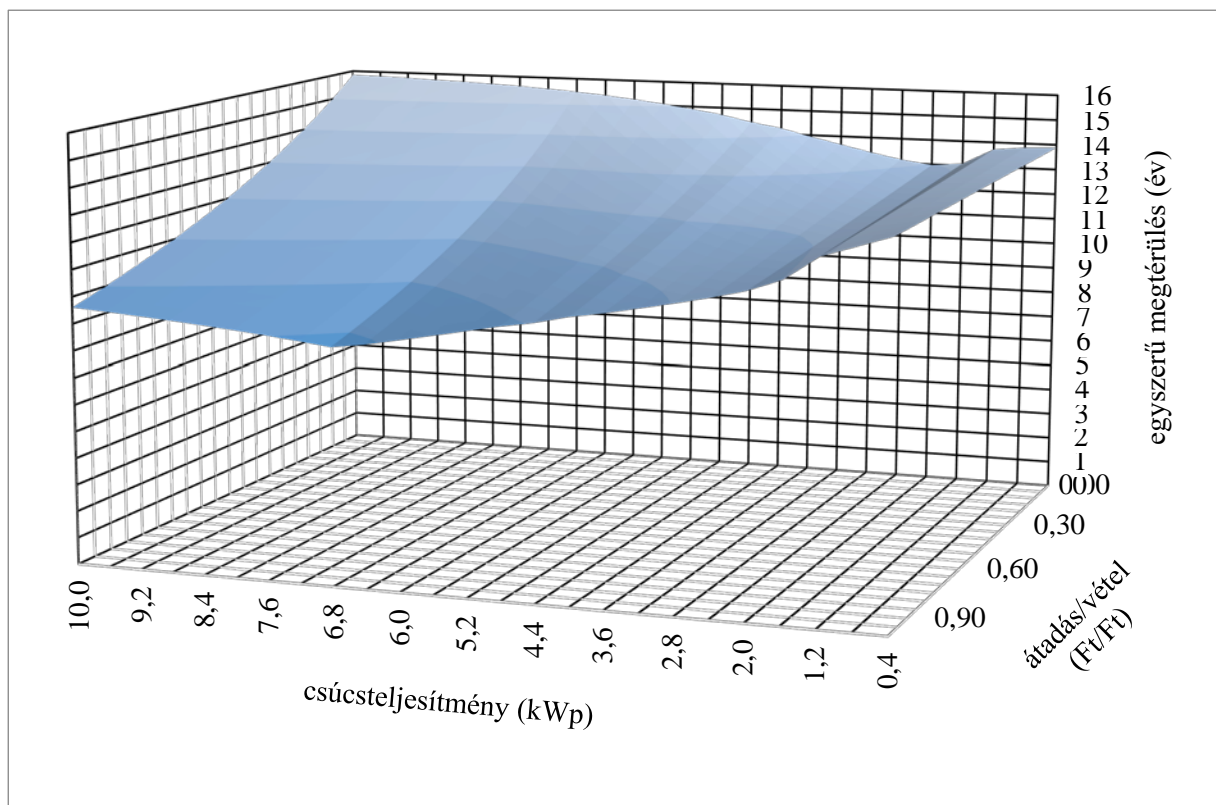
Jelen példában A-I fogyasztási profillal rendelkező mérőhely adatai alapján az éves villamosenergia fogyasztás 2368 kWh, amelyhez a 32. ábra déli tájolással és szaldó elszámolás esetén 2 kWp napelemes rendszert ajánl 20 év megtérüléssel, azonban bruttó elszámolás esetén már 0,4 kWp-es rendszert tanácsol, aminek az egyszerű megtérülése 31 év lenne. Keleti tájolással, bruttó elszámolás esetén azonban már közel 42 éves megtérüléssel lehetne számolni, amihez 0,4 kWp beépített csúcsteljesítmény párosul. A kedvezményes rezsihatár eltörlése jelentősen módosítaná ezen eredményeket.



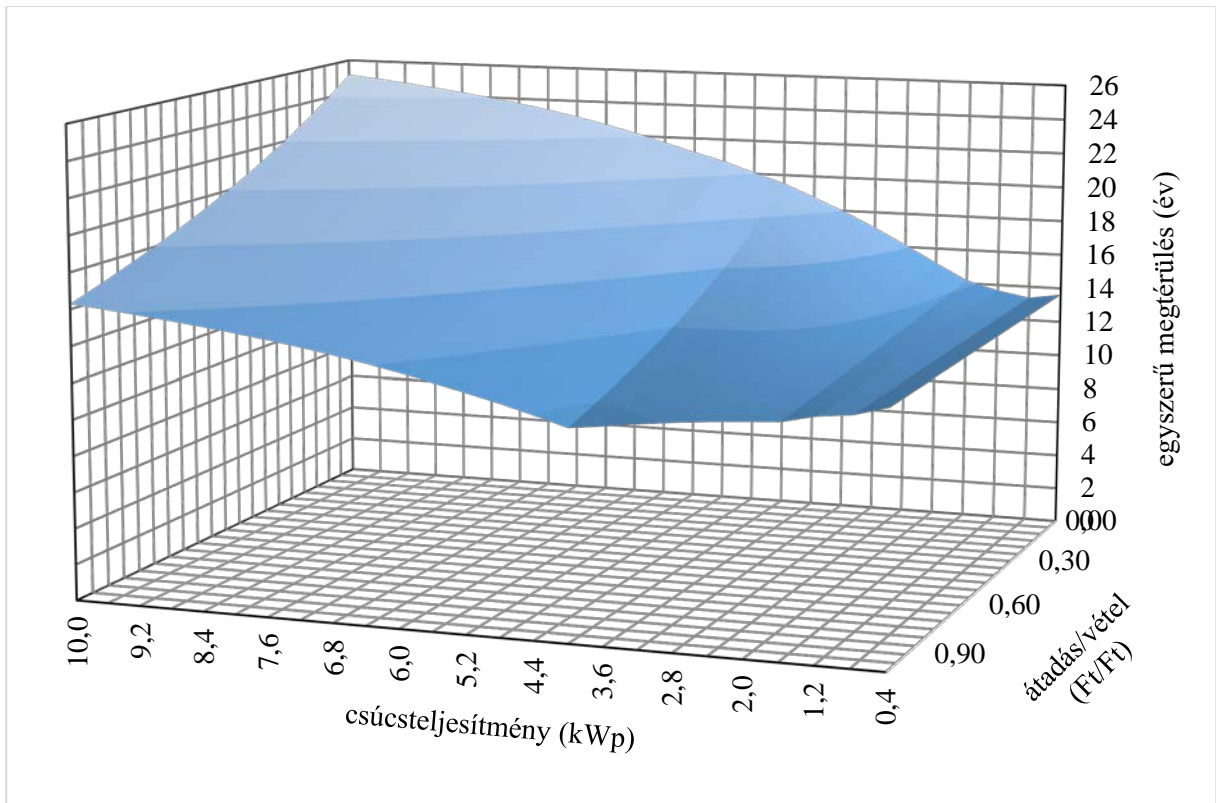
32. ábra, Napelemes rendszer megtérülésének vizsgálata, 2368 kWh éves fogyasztás, déli tájolás

Ezzel szemben a 33. ábra egy A-I fogyasztási profilú, éves 7798 kWh fogyasztású déli tájolású napelemes rendszer esetén adja meg az optimális napelemes csúcsteljesítményeket. Szaldó elszámolás alapján a 6,8 kWp-es rendszer rendelkezik a leggyorsabb megtérülési idővel, ami 9 év. Ugyan ezen rendszer bruttóelszámolás szerint már 3,2 kWp-vel lenne optimális és ehhez 13 év megtérülési idő társul.

A 34. ábra hasonló körülmények között mutat be egy 4575 kWh éves fogyasztású felhasználó esetében az egyszerű megtérülési időket. A rendszer itt is déli tájolású, szaldós esetben 4 kWp az optimum, amihez 12 év megtérülés tartozik, bruttó elszámolás szerint 1,6 kWp az optimum, de ez esetben a megtérülési idő majdnem 14 év.



33. ábra, Napelemes rendszer megtérülésének vizsgálata, 7798 kWh éves fogyasztás, déli tájolás



34. ábra, Napelemes rendszer megtérülésének vizsgálata, 4575 kWh éves fogyasztás, déli tájolás

4. Összefoglalás

A kutatásból egyértelművé vált, hogy a nagyobb beépített csúcsteljesítmény fajlagosan több villamosenergiát termel, mint az elméleti, 45°-os egyeneshez tartozó villamosenergia termelés. Valamint az észak-keleti és észak-nyugati tájolás teljesítménye is figyelemre méltó, azonban ezeknél a beépíthető felület korlátozhatja a szükséges kapacitást az optimális működéshez.

A vizsgálataim során egyértelművé vált, hogy a szaldó, az öntermelés és a hálózathasználati optimalizáció során is a beépített napelemes csúcsteljesítménnyel csökken a hálózathasználat mértéke, azonban a csökkenés mértéke nem egyenesen arányos a beépített teljesítménnyel, ez az eredmény megfelel a szakirodalomban olvasottaknak. A szaldó és öntermelés optimalizáció során a hálózathasználati indikátor normális eloszlás jelleget mutat. Hálózathasználatra történő optimalizáció során a kis fogyasztóknak azt ajánlja az indikátor, hogy ne is építsenek be napelemet a vizsgált paraméterekkel. A GL és SP optimum értékek igen nagy szórást mutatnak a GTDR függvényében. A GL optimum kiértékelése során megfigyelhető volt a 3 fő profil kismértékű elkülönülése, megjelent az A profil hűtési igénye miatti alacsonyabb GL érték, míg a B profil esetén, a téli fűtés miatti arányaiban magasabb GL érték, a kiegyensúlyozott C profil az előbb említett két profil között foglal helyet, jól körbe határolhatóan.

A különböző profilokat vizsgálva megállapítható, hogy az önfogyasztásra nincsenek jelentős hatással. Közös diagrammon ábrázolva a háromféle rendszer optimalizációkat az önfogyasztás és GTDR függvényében, nehezen elkülöníthető góccokat véltem felfedezni. Az öntermelésre optimalizált rendszerek esetében sincs szignifikáns ráhatásuk a különböző villamos profiloknak, az önfogyasztásra. Az átlagprofilok általánosan jobb önfogyasztást mutatnak, mint a profilok átlagából számolt értékek, utóbbiak szórása jelentősen kisebb is, azonban a Simplified profilok jól közelítik az AVG profilokat, ezek alapján az átlagprofilok meghatározása további módosításokat igényel. A vizsgálatom kezdetekor teljesen másfajta eredményeket vártam a különböző profilok hatásaiban, ezek a várakozások azonban sajnos elmaradtak. Ennek okának alapos vizsgálata több időt igényelne.

A napelemes rendszerek megtérülésének kiértékelése alapján elmondható, hogy a bruttóelszámolással megduplázódhat az egyszerű megtérülés a szaldós elszámoláshoz képest a rezsihatárhoz közel eső fogyasztók számára, ez években azt jelenti, hogy egy 2500 kWh éves villamosenergia fogyasztással rendelkező felhasználónak 20 év helyett 33-45 év lehet a várható megtérülés a jelenlegi feltételekkel, azonban egy 8000 kWh fogyasztással rendelkező felhasználóé szaldós elszámolás szerint 9 év, bruttó elszámolás szerint pedig közel 13 év. Ezek alapján a napelemes beruházás a nagyfogyasztók számára továbbra is kedvező. Amennyiben a következő években növekednek az energiaárak ennek az időnek a további csökkenése várható, így akár az alacsonyabb fogyasztással rendelkezők számára is megérheti a beruházás még bruttó elszámolás esetén is. Viszont az elmondható, hogy bruttó elszámolás szerint eltérőek az optimális napelemes rendszerméreték a szaldós

elszámoláshoz képest. Az előzetes feltevésünk alapján nem találtunk alkalmas paramétert az optimális bruttó elszámolás szerinti méretezéshez.

A dolgozat alapján az előfeltételezésünkkel sokszor ellentétes eredményeket kaptunk, főként a villamos profilok indikátorokra mért hatása esetén, ennek okának kutatása nagyobb elmélyülést követel meg az adatok feldolgozásában.

További kutatási terület lehet, a profilok szórásának és a bruttó elszámolás mélyreható vizsgálata a különböző indikátorok alapján. A villamosenergia fogyasztási adatok eloszlásának statisztikai vizsgálata, várható érték és szórás számítása meghatározott szignifikancia szint mellett, esetlegesen ezek alapján újra gondolni a klaszterezést. A napelemes rendszer megtérülésének vizsgálatához használt egyenlet általánosítása a széles körű alkalmazhatóság miatt.

5. Summary

In this thesis, it is clear that the higher installed peak power produces more electricity in specific terms than the theoretical electricity production associated with a 45° straight line. Also, the performance of the north-east and north-west orientations is noteworthy, but for these the installed surface area may limit the capacity required for optimal operation.

It is clear from my studies that the peak installed solar capacity decreases with the peak installed solar capacity during balancing, self-production and grid optimization, but the rate of decrease is not directly proportional to the installed capacity, a result consistent with the literature. In the case of balancing and self production optimization, the grid utilization indicator shows a normal distribution. In case of grid utilization optimization, the indicator recommends small consumers not to install solar panels with the parameters under consideration. The GL and SP optimum values show a very large variance as a function of GTDR. In the evaluation of the GL optimum, a slight separation of the 3 main profiles was observed, with a lower GL value due to the cooling demand of profile A, while for profile B, with a proportionally higher GL value due to winter heating, the balanced profile C is located between the two profiles mentioned above, well circumscribed.

When looking at the different profiles, it can be concluded that they do not have a significant impact on self-consumption. By plotting the three types of system optimizations as a function of self-consumption and GTDR on a common graph, I found difficult to distinguish them. Even for the systems optimized for self-generation, there is no significant effect of the different electrical profiles on self-consumption. The average profiles generally show better self-consumption than the values calculated from the average of the profiles, the latter also have a significantly smaller standard deviation, but the Simplified profiles are a good approximation of the AVG profiles, which implies that the determination of the average profiles requires further modifications. When I started my investigation I expected completely different results for the effects of the different profiles, but unfortunately these expectations were not met. A thorough investigation of the reason for this would require more time.

Based on the evaluation of the payback of solar PV systems, it can be said that gross accounting can double the simple payback compared to net accounting for consumers close to the cost limit, which means that in years a user with an annual electricity consumption of approx. 2500 kWh can expect a payback of 33-45 years instead of 20 years under current conditions, but a user with an annual consumption of 8000 kWh can expect a payback of 9 years under net accounting and almost 13 years under gross accounting. On this basis, the investment in solar PV remains attractive for large consumers. If energy prices increase in the coming years, this time is expected to decrease further, so that even for lower consumers the investment could be worthwhile even on a gross basis. However, it can be said that the optimal solar system sizes for gross metering are different from those for net metering. Based on our

preliminary assumption, we did not find a suitable parameter for optimal gross settlement sizing.

Based on this thesis, we have obtained results that are often contrary to our assumption, especially for the measured effect of the electrical profiles on indicators, and the investigation of the reason for this requires more in-depth data processing.

A further area of research could be an in-depth investigation of the variance of the profiles and the gross settlement based on different indicators. Statistical analysis of the distribution of electricity consumption data, calculation of expected value and standard deviation at a defined level of significance, possibly to rethink clustering on this basis. Generalisation of the equation used to study the return on investment of a solar PV system due to its wide applicability.

6. Irodalomjegyzék

- [1] L. Z. Gergely, T. Csoknyai, and M. Horváth, “Novel load matching indicators for photovoltaic system sizing and evaluation,” *Appl Energy*, vol. 327, p. 120123, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.APENERGY.2022.120123.
- [2] V. Z. Gjorgievski, N. G. Chatzigeorgiou, V. Venizelou, G. C. Christoforidis, G. E. Georghiou, and G. K. Papagiannis, “Evaluation of Load Matching Indicators in Residential PV Systems-the Case of Cyprus,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 8, p. 1934, Apr. 2020, doi: 10.3390/en13081934.
- [3] L. Amabile, D. Bresch-Pietri, G. El Hajje, S. Labbe, and N. Petit, “An optimization methodology for self-consumption of residential photovoltaic energy,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 13196–13203, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.IFACOL.2020.12.145.
- [4] G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, G. F. Giuzio, and A. Palombo, “Increasing self-consumption of renewable energy through the Building to Vehicle to Building approach applied to multiple users connected in a virtual micro-grid,” *Renew Energy*, vol. 159, pp. 1165–1176, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2020.05.101.
- [5] D. Vanhoudt, D. Geysen, B. Claessens, F. Leemans, L. Jespers, and J. Van Bael, “An actively controlled residential heat pump: Potential on peak shaving and maximization of self-consumption of renewable energy,” *Renew Energy*, vol. 63, pp. 531–543, Mar. 2014, doi: 10.1016/J.RENENE.2013.10.021.
- [6] L. Amabile, D. Bresch-Pietri, G. El Hajje, S. Labbé, and N. Petit, “Optimizing the self-consumption of residential photovoltaic energy and quantification of the impact of production forecast uncertainties,” *Advances in Applied Energy*, vol. 2, p. 100020, May 2021, doi: 10.1016/J.ADAPEN.2021.100020.
- [7] V. Z. Gjorgievski, S. Cundeva, N. Markovska, and G. E. Georghiou, “Virtual net-billing: A fair energy sharing method for collective self-consumption,” *Energy*, vol. 254, p. 124246, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.ENERGY.2022.124246.
- [8] M. Jaszczur, Q. Hassan, A. M. Abdulateef, and J. Abdulateef, “Assessing the temporal load resolution effect on the photovoltaic energy flows and self-consumption,” *Renew Energy*, vol. 169, pp. 1077–1090, May 2021, doi: 10.1016/J.RENENE.2021.01.076.
- [9] L. M. Pastore, G. Lo Basso, G. Ricciardi, and L. de Santoli, “Smart energy systems for renewable energy communities: A comparative analysis of power-to-X strategies for improving energy self-consumption,” *Energy*, vol. 280, p. 128205, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.ENERGY.2023.128205.
- [10] X. Liang, K. Chen, S. Chen, X. Zhu, X. Jin, and Z. Du, “IoT-based intelligent energy management system for optimal planning of HVAC devices in net-zero emissions PV-battery building considering demand compliance,” *Energy Convers Manag*, vol. 292, p. 117369, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2023.117369.

- [11] J. Huang, D. D. Koroteev, and M. Rynkovskaya, "Machine learning-based demand response in PV-based smart home considering energy management in digital twin," *Solar Energy*, vol. 252, pp. 8–19, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.SOLENER.2023.01.044.
- [12] L. Czétány *et al.*, "Development of electricity consumption profiles of residential buildings based on smart meter data clustering," *Energy Build*, vol. 252, p. 111376, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2021.111376.