

# **DIPLOMADOLGOZAT**

**NÉV: Szalai Gergely**  
**szak: Létesítménymérnök**

**Gödöllő**  
**2023**



**Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem**

**Szent István Campus**

**Létesítménymérnök Szak**

**Fázisváltó anyaggal töltött tároló alkalmazásának  
energiamegtakarítási lehetőségei egy szerverterem hűtési  
rendszerében**

**Belső konzulens:** Név: Dr. Hermanucz Péter

beosztás: egyetemi tanársegéd

**Külső konzulens:** Név: Oláh Péter

beosztás: Üzemfenntartási és  
Energetikai főosztályvezető

**Készítette:**

Név: Szalai Gergely

Neptun kód: CJ1YHI

Tagozat: Levelező

**Intézet/Tanszék:**

Épületgépészeti és

energetikai tanszék

**Gödöllő  
2023**

**MŰSZAKI INTÉZET LÉTESÍTMÉNYMÉRNÖK MESTERSZAK**  
**Létesítményüzemeltető-energetika specializáció**

**DIPLOMADOLGOZAT**

feladatlap

*Szalai Gergely (CJ1YHI)*

részére

**A diplomadolgozat címe:**

**Fázisváltó anyaggal töltött tároló alkalmazásának energiamegtakarítási lehetőségei egy szerverterem hűtési rendszerében**

**Feladatkiírás:**

Meglévő szerverterem hűtési rendszer mérési adatainak feldolgozása. Fázisváltó anyaggal töltött hűtési energiatároló szabályozási módjának kialakítása kétféle megközelítés (hőmérséklet és HUPX DA egységarak) alapján. A kialakított szabályozási módozatokkal a tárolóval elérhető energiamegtakarítás lehetőségeinek vizsgálata az eredeti állapothoz képest.

**Közreműködő tanszék:** Épületgépészeti és energetikai tanszék

**Külső konzulens:** Oláh Péter, Egis Gyógyszergyár Zrt. Üzemfenntartási és energetikai főosztályvezető

**Belső konzulens:** Dr. Hermanucz Péter, egyetemi tanársegéd, MATE Műszaki Intézet

**Beadási határidő:** 2022. május 2.

Gödöllő, 2023. 04. hó 22. nap

**Jóváhagyom**

(tanszékvezető)

(szakfelelős)

**Átvettem**

(hallgató)

A dolgozat készítőjének külső konzulense nyilatkozom arról, hogy a hallgató az előre egyeztetett konzultációkon megjelent.

Gödöllő, 2023. 04. hó 22. nap

(külső konzulens)

## Tartalomjegyzék

|        |                                                                                            |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | Bevezetés.....                                                                             | 1  |
| 1.1.   | Téma időszerűsége, jelentősége .....                                                       | 1  |
| 1.2.   | Célkitűzés .....                                                                           | 1  |
| 2.     | Szakirodalmi áttekintés .....                                                              | 2  |
| 2.1.   | Hőenergia tárolás jelentősége és célja .....                                               | 2  |
| 2.2.   | Hőtároló rendszerek.....                                                                   | 3  |
| 2.2.1. | Rövid-és hosszútávú hőtárolás .....                                                        | 3  |
| 2.2.2. | Statikus és mobilis hőtárolási megoldások.....                                             | 7  |
| 2.2.3. | Passzív és aktív hőtárolási megoldások .....                                               | 8  |
| 2.2.4. | Különböző üzemi hőmérsékleten működő hőtárolások .....                                     | 10 |
| 2.3.   | Főbb hőtároló anyagok .....                                                                | 13 |
| 2.3.1. | Érzékelhető hőtárolást hasznosító anyagok.....                                             | 14 |
| 2.3.2. | Látens hőtárolást hasznosító anyagok .....                                                 | 16 |
| 2.3.3. | Kémiai hőtárolás .....                                                                     | 18 |
| 2.4.   | Fázisváltó anyagok hűtési tároló rendszerekben .....                                       | 19 |
| 2.4.1. | Fázisváltó anyagok legfontosabb anyagtulajdonságai hideg hőtárolás tekintetében<br>19      |    |
| 2.4.2. | Fázisváltó anyaggal töltött hőtárolók épületgépészeti rendszerbe való<br>illeszkedése..... | 21 |
| 2.5.   | Hűtési tároló töltésének és kisütésének szabályozása .....                                 | 22 |
| 2.6.   | Hőenergia tárolás jelentősége a villamos energia piacon.....                               | 25 |
| 3.     | Témakidolgozás .....                                                                       | 27 |
| 3.1.   | Rendszer leírás, kiindulási adatok .....                                                   | 27 |
| 3.1.1. | Választott létesítmény ismertetése .....                                                   | 27 |
| 3.1.2. | Kiindulási adatok.....                                                                     | 28 |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.3. Hűtőgépek EER értékei .....                                                          | 31 |
| 3.2. Napon belüli adatok elemzése, tárolási üzemmód és tároló méretének megválasztása<br>33 |    |
| 3.3. Hőmérsékleti adatok elemzése, jellemző hőmérsékleti profilok kialakítása .....         | 36 |
| 3.4. Tároló feltöltési és kisütési időpontjainak megválasztása .....                        | 38 |
| 3.5. Tároló üzemének vizsgálata .....                                                       | 40 |
| 3.5.1. Tároló üzemének vizsgálata – teljes csúcsigény lefedése .....                        | 40 |
| 3.5.2. Tároló üzemének vizsgálata – csúcsigény részleges lefedése.....                      | 43 |
| 3.5.3. Energiamegtakarítási eredmények a teljes év során.....                               | 45 |
| 3.5.4. Tároló szabályozása HUPX Day-Ahead egységárak alakulása alapján.....                 | 49 |
| 4. Összefoglalás.....                                                                       | 53 |
| 5. Summary .....                                                                            | 54 |
| 6. Mellékletek.....                                                                         | 56 |
| 6.1. 1. melléklet: ábrák, táblázatok .....                                                  | 56 |
| Irodalomjegyzék.....                                                                        | 63 |

# 1. Bevezetés

## 1.1. Téma időszerűsége, jelentősége

A globális klímaváltozás hatásának csökkentése érdekében az elmúlt és az elkövetkező évek egyik legnagyobb energetikai feladata a meglévő energiaellátó rendszerek korszerűsítése. Az Európai Unió által megállapított célkitűzések eléréséhez az energetikai rendszereink teljeskörű korszerűsítése szükséges, amely magába foglalja a megújuló energiákra való átállást, az energiaszállítás veszteségeinek minimalizálását és az energiahatékonyság növelését. A hatékonyságnövelés egyik eszköze az energia felhasználásának és előállításának szétválasztása, amely az energiaeelőállítás hatásfoka növelhető.

A dolgozatomban egy fázisváltó anyaggal töltött energiatároló szabályozási és energiamegtakarítási lehetőségeit vizsgálom, amely egy hűtési rendszerbe illesztve részt tud venni a hűtőgépek hatékonyságának növelésében, valamint a csúcsidőszakban felhasznált energia csökkentésében, amellyel a fogyasztó oldaláról költségcsökkenés, az ellátó oldaláról pedig a hálózat terheltségének csökkentése érhető el. A felhasználó számára az energiamegtakarításon túl további előnyt jelenthet a villamosenergia-tőzsde csúcs- és völgyidőszakaiban bekövetkező energia-egységár-változások kihasználása is. A

## 1.2. Célkitűzés

A dolgozat célja egy szerverterem hűtési rendszerébe illesztett fázisváltó anyaggal töltött energiatároló használatából eredő energiamegtakarítás vizsgálata. Az elemzést kétféle szabályozási mód (hőmérséklet-alapú és HUPX Day Ahead-egységár-alapú) alapján készítem el és elvégzem a két módszer összehasonlítását az energiamegtakarítás és a költségmegtakarítás szempontjából is.

## 2. Szakirodalmi áttekintés

### 2.1. Hőenergia tárolás jelentősége és célja

Az emberiség az egész történelme során felhasználta a hőtárolás lehetőségeit. Korai példaként említhetők a földbe vájt élőhelyek, amelyekben télen melegebbek, nyáron pedig hidegebbek voltak a környezeti hőmérsékletnél, ilyen módon kihasználva a föld energiatároló képességében rejlő lehetőségeket. Az idők során az energiatárolás módszerei tovább fejlődtek, a mindennapokban az évszakokon átívelő hőtárolási megoldások (pl. a hűtési energia tárolására szolgáló jégvermek) mellett megjelentek a rövidebb távú tárolásra szolgáló megoldások is. Kisebb igényeknél ilyen például a lakások, vagy családi házak esetében a használati melegvíz tárolása, nagyobb igények esetén pedig a távhő rendszerekben alkalmazott tartályok, amelyek a csúcsidezők igényeinek kiszolgálására szolgálnak (Nordell, 2000). A hőtárolás technológiája és a hőtároló anyagok is folyamatosan az emberiséggel együtt fejlődtek a történelmünk során, a Föld hőtároló tömegétől kezdve, a szilárd és folyékony hőtároló anyagokon át az olyan modern korunkban alkalmazott megoldásokig, mint a fázisváltó anyagok, vagy akár az évtizedek során a londoni metró levegőjében felgyülemlett hő, amelyet távfűtési célokra tudnak hasznosítani (celsiuscity.eu, 2020).

A fent említett néhány példán keresztül is jól látható, hogy a hőtárolási megoldások ugyan igényekben, méretekben és időben nagyon eltérőek, azonban minden esetben közös jellemzőjük, hogy az előállított hő nem olyan teljesítményben vagy nem abban az időben áll rendelkezésre, amikor azt felhasználnánk. Az időbeli korlátok nélküli energiaforrások jellemzően drágák és a környezetre károsak, az olcsó, illetve tiszta energiaforrások kihasználásához pedig elengedhetetlenek a hőtároló megoldások. (Andrássy, 2021). A hőtárolás célja tehát lehet az energia előállításának és felhasználásának időbeli elkülönítése és az egyenletlenségeik kiegyenlítése (Saeed, Schlegel, Castano, & Sawafta, 2018), azonban történhet a komfort vagy technológiai igények folyamatos és biztonságos kiegyenlítése céljából (Wang, 2019), vagy pusztán az energia előállítás hatásfok javítása érdekében is, hiszen a tárolás segítségével az energia a legjobb hatásfokú időszakokban és a leginkább környezetbarátabb módszerekkel állítható elő (Jacobson, Delucchi, Cameron, & Frew, 2015).

## 2.2. Hőtároló rendszerek

A hőtároló rendszerek három részből tevődnek össze: az érzékelhető, látens vagy kémiai hőtárolásra alkalmas hőtároló anyag, a tároló betárolására és kisütésére szolgáló hőcserélő, és a hőtároló anyag tárolására szolgáló tartály. A hőtároló anyag és a tárolás módjának kiválasztásához szükség van a kiszolgálni kívánt rendszer alapvető tulajdonságaira: az üzemi hőmérséklet tartományra, a rendszer üzemeltetési paramétereire, a hőteljesítmény igényekre és a rendszer kialakítására (Kuravi, Trahan, & Goswami, 2013).

A gyakorlatban használt hőtároló rendszerek többféle szempont szerint csoportosíthatók: (Alva, Lin, & Fang, 2018)

- A hőtárolás időtartama alapján beszélhetünk rövidtávú (a tárolás időtartama néhány óra, esetleg néhány nap) vagy hosszútávú (az időtartam hetek, hónapok, illetve akár teljes évszakok) tárolásról
- A tároló és a rendszer elhelyezkedése alapján beszélhetünk statikus (helyi vagy centralizált) és mobilis (mozgatható tárolók) rendszerekről.
- A betárolás és a kisütés módja alapján beszélhetünk aktív vagy passzív rendszerekről. Aktív rendszereknél egy hőátadó folyadék keringtetésével történik meg az energia betáplálása és kinyerése, míg a passzív rendszereknél nincs szükség plusz befektetett munkára – a hőátadás pl. természetes konvekció vagy a hőtehetetlenség segítségével jön létre.
- Az üzemi hőmérséklet alapján beszélhetünk hideg ( $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  alatt), alacsony ( $20\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$  közt), közepes ( $100\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$  közt) és magas ( $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) hőmérsékletű hőtárolásról.

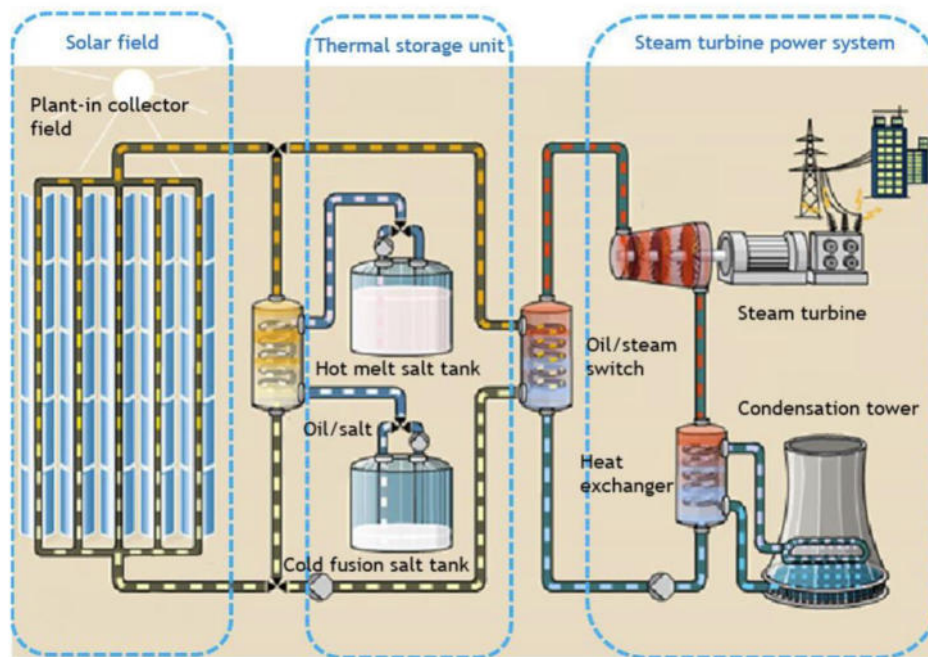
A dolgozatomban feldolgozott rendszer egy hideg hőmérsékletű, rövidtávú hőtárolást megvalósító, helyi, statikus, aktív rendszer, azonban gyakorlati megvalósításokkal a következőkben röviden ismertetem a hőtároló rendszerek többi módozatát is.

### 2.2.1. Rövid-és hosszútávú hőtárolás

A tároló feltöltése és kisütése közötti időt tekintve beszélhetünk rövidtávú (néhány óras, esetleg napos) vagy hosszútávú (hetek, hónapok, évszakok) hőtárolásról. A rövidtávú tárolás célja általában a komfortigények kielégítése, illetve a rendszer üzemeltetési körülményeinek javítása, a hosszútávú tárolás során pedig a legtöbbször a cél az időjárás változásából eredő hőmérséklet különbségek kihasználása. A teljesség igénye nélkül néhány gyakorlati alkalmazás:

- Koncentrált napenergiát hasznosító rendszerek (CSP – Concentrated Solar Power)

A napenergiával történő villamos energiatermelés az éjszakai órákban hőtárolás segítségével valósítható meg. A nappal megtermelt energiát olvadt sókkal vagy termikus olajokkal tárolják el, ezzel lehetővé téve az éjszakai áramtermelést és a naperőművek jobb menetrendtartását (Alva, Lin, & Fang, 2018). Egy CSP erőmű elvi sémáját az 1. ábrán helyeztem el. A hőtárolás és a tárolt hő felhasználása között néhány órányi különbség van, így rövidtávú hőtárolásról beszélhetünk.



**1. ÁBRA: OLVADT SÓVAL MŰKÖDŐ CSP ERŐMŰ ELVI SÉMÁJA (BAI, DING, WANG, & CHEN, 2019)**

- Használati melegvíz tárolás

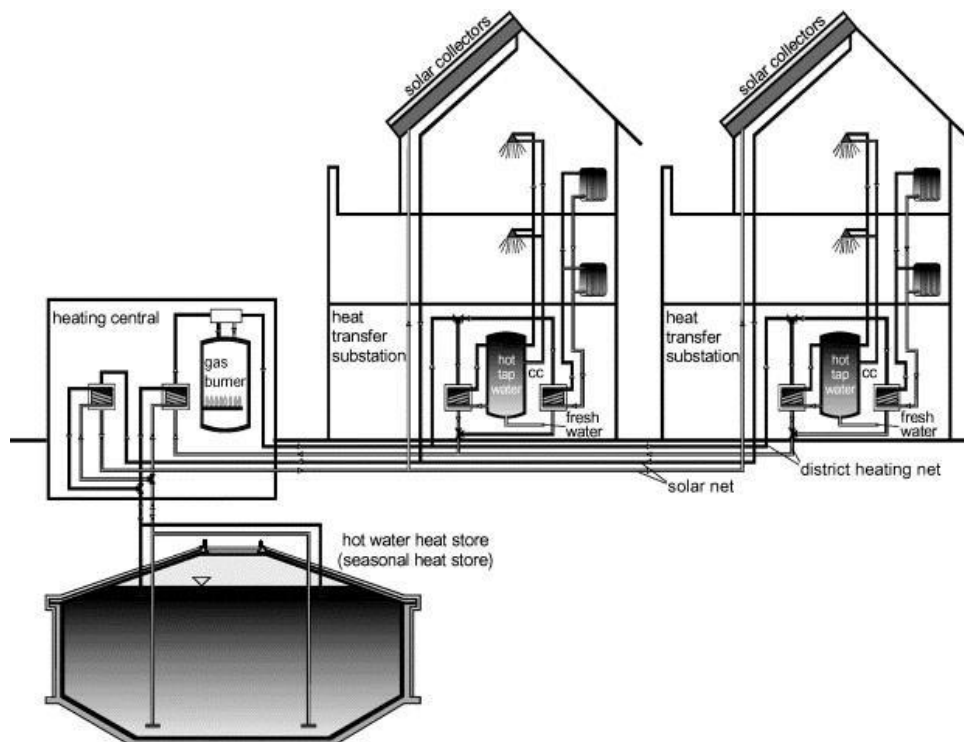
Egy másik rövidtávú hőtárolási megoldás, amely a melegvízigények megfelelő kielégítésére lakossági és ipari környezetben is használt módszer a HMV tárolás, amely a komfort szempontok mellett nagy számban alkalmazva az elektromos hálózat csúcsigényeinek csökkentésére is használható.

- Hibrid napelemes rendszerek

A napelemes rendszerek hatékonyságának javítása érdekében egy hőátadó közeggel (pl. levegő vagy víz) hűtik a napelem paneleket. A hőtároló anyagok alkalmazása az ilyen rendszerekben több aspektusból is előnyös lehet: a napelemek hátuljára ragasztott hőtároló anyagok segítheti a hűtés hatékonyságát, amennyiben pedig az eltárolt hő kinyerhető a rendszerből, további energiamegtakarítást eredményezhet (Huang, Eames, & Norton, 2004)

- Föld alatti tározók

A vízzel vagy egyéb anyaggal (pl. szilár anyagok – kavics, homok stb.) töltött hőszigetelt föld alatti tárolók alkalmazása jó megoldást nyújt a hosszútávú hőtárolásra akár távfűtési, akár lakossági rendszerekben. A megfelelő vastagságú szigeteléssel a nyáron megtermelt energia alacsony hőfokú tárolás esetében akár a téli időszakban is felhasználható marad. Bár a múltban vizsgált hasonló rendszereknél a beruházások megtérülése rendkívül lassú volt, az energiaárak növekedésével megnövekedhet az ilyen típusú tárolórendszerek használata is. (Xu, Wang, & Li, 2014) Egy Hamburgban használt rendszer sémáját a 2. ábrán helyeztem el.

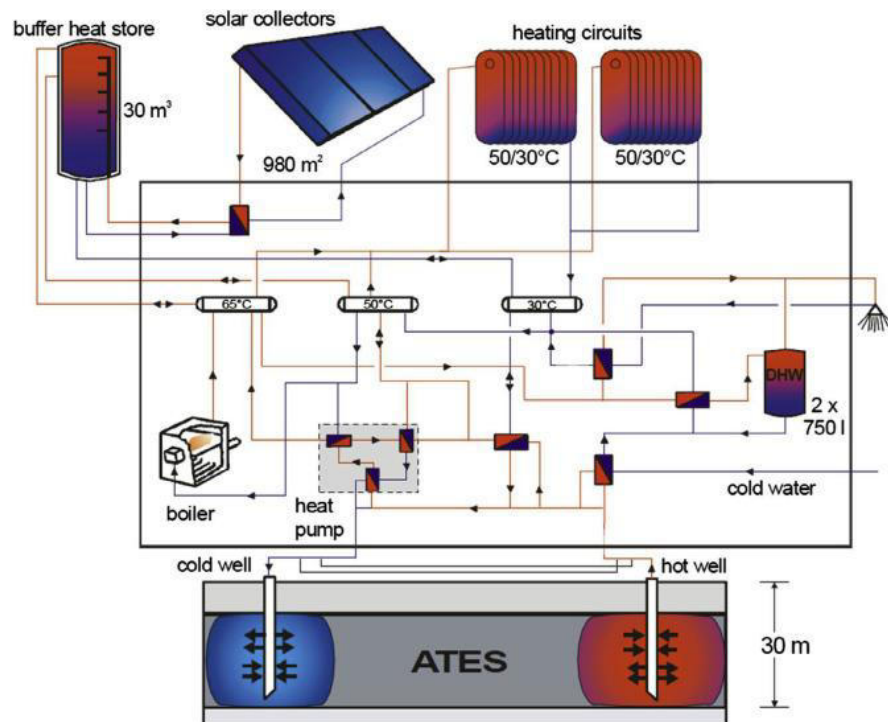


**2. ÁBRA: EGY HAMBURGBAN ALKALMAZOTT SZEZONÁLIS FÖLDALATTI HŐTÁROLÓ (SCHMIDT, MANGOLD, & MÜLLER-STEINHAGEN, CENTRAL SOLAR HEATING PLANTS WITH SEASONAL STORAGE IN GERMANY, 2004)**

- Vízartó rétegekben megvalósított hőenergia tároló

A vízartó rétegek vízartó és vízáteresztő porózus kőzetekből, kőzetpedésekből álló réteg, amelyekben talajvíz található. Ezekben a vízartó rétegekben a talajvíz nyomása magasabb az atmoszferikus nyomásnál, így kutak segítségével a víz kinyerhető (Xu, Wang, & Li, 2014) Ahhoz, hogy ezek a természetesen létrejövő képződmények felhasználhatók legyenek energia tárolásra, az alábbi paramétereknek kell teljesülniük: (Alva, Lin, & Fang, 2018)

- a víztartó réteg aljának és tetejének alacsony hőátadási tényezőjű közet rétegeknek kell állnia
- a víztartó rétegben sűrű, porózus közetre van szükség, amely szűrőként szolgál
- a víztartó rétegben jelenlévő talajvíznek alacsony természetes talajáramlással kell rendelkeznie



**3. ÁBRA: TÁVHŐRENDSZERBE ILLESZTETT, VÍZTÁROZÓ RÉTEGBEN MEGVALÓSÍTOTT HŐENERGIA TÁROLÁS SÉMÁJA NÉMETORSZÁGBAN (SCHMIDT & MUELLER-STEINHAGEN, 2004)**

Németországban több helyen is régóta működő víztározó rétegben megvalósított hőtároló megoldás megtalálható. A 3. ábrán látható megoldás egy 1.000 m<sup>2</sup> napkollektoros rendszerrel kiegészített tároló, amely egy 108 lakást kiszolgáló távhő rendszerhez kapcsolódik. A nyáron eltárolt hőenergia a téli időszakban kihasználásra kerül, amivel a teljes távhűtő rendszerben a napenergia részaránya éves szinten tekintve meghaladja a 60 %-ot. A megoldás hátránya, hogy jó hatásfokkal legfőképp alacsony hőmérsékletű fűtési rendszerekben valósítható meg (Schmidt & Mueller-Steinhagen, 2004).

#### ○ Napelemes tavak

A napon belüli és szezonális hőtárolásra is használható napelemes tavak lakossági és ipari felhasználásra is képesek hőenergia eltárolására. Ezek a mesterségesen létrehozott sós vízi tavak, amelyekben a sókoncentráció gradiensét használják ki a természetes konvekció

meggátolására és ezzel a nap által felmelegített víztömeget a tó alsó rétegeiben tudják tartani. A tavak hőmérséklete nyáron elérheti a 90 °C-ot, télen pedig, habár a tó felszíne befagyhat, az alsó rétegek 20 °C-os hőmérséklet körül tud maradni (Karakilcik & Dincer, 2008).

### 2.2.2. Statikus és mobilis hőtárolási megoldások

#### ○ Statikus tárolás

A statikus tárolási megoldások közül a centralizált hőtárolás szerepe elsősorban távfűtési és távhűtési, valamint az erőművi környezetben jelentkezik. A tárolás az előzőekben bemutatott módszerekkel történhet hosszú- és rövidtávon is. A közműhálózat termelői oldalán megvalósuló hőtárolás elsődleges célja elsősorban az energiatermelés biztonságának és folyamatosságának biztosítása. Ezzel szemben a fogyasztói oldali hőtárolás a komfort igények kiszolgálása mellett használható (elsősorban hűtési rendszereknél) a csúcsidőszaki villamos energia fogyasztás csökkentésére is, ezzel a csúcsidőszakon kívüli, olcsóbb energiaárak kihasználására. (Alva, Lin, & Fang, 2018) A csúcsidőszak levágására három féle üzemeltetési módszerről beszélhetünk (Dincer, 2001), amelyeket a dolgozat további részeiben részleteiben is vizsgálom:

- Teljes tárolás: amely során a tároló a csúcsidőszaki energiafelhasználást 100 %-ban lefedi
- Részleges tárolás a részterhelés kiegyenlítésével: amely során a cél az energiatermelő berendezés részterhelésének hatásfok szempontjából legoptimálisabb szinten tartása
- Részleges tárolás a csúcsidőszaki igény csökkentésével: amely során a csúcsidőszakban az energiatermelő berendezés részterhelése tovább csökkenthető, de a tároló nem fedi le teljes egészében az energiaigényt.

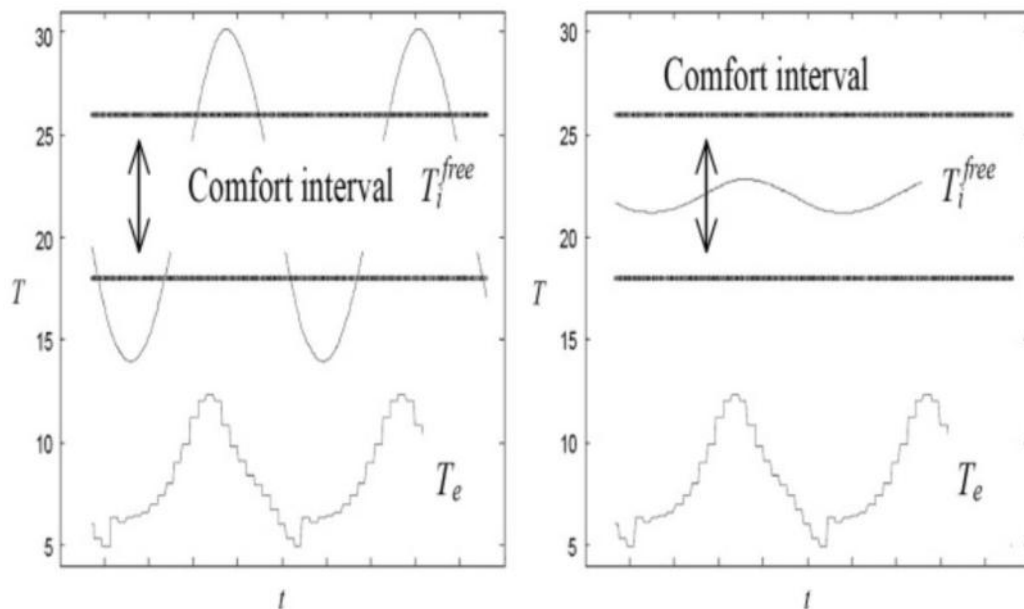
#### ○ Mobilis tárolás

Abban az esetben, ha a tárolórendszer és a felhasználó közt csővezeték kiépítése nem lehetséges, vagy gazdaságilag nem indokolható, a mobilis tárolók megfelelő megoldást nyújthatnak. A mobilis megoldások fontos szerepet játszanak az élelmiszer és gyógyszer szállítások esetében (Alva, Lin, & Fang, 2018).

### 2.2.3. Passzív és aktív hőtárolási megoldások

#### ○ Passzív tárolás

A passzív hőtárolási rendszerek nem igényelnek mesterségesen befektetett munkát az energia betárolásához és kinyeréséhez, a megoldások olyan természetes folyamatok alapján működnek, mint a hőtehetetlenség vagy a természetes konvekció. A passzív tárolási megoldások alkalmazhatók épületekben, járművekben, ruházatokban stb. A passzív hőtárolás működése a 4. ábrán látható. A bal oldali grafikon a tárolás nélküli állapotot mutatja, amely során a külső környezeti hőmérséklet változását csak az épületgépészeti rendszereknek kell kiegyenlítenie, a jobb oldali grafikonon viszont egy fázisváltó anyaggal megnövelt hőtároló képesség kisimítja a hőmérsékleti ingásokat, így csökkentve az épületgépészeti rendszer teljesítményigényét (Heier, Bales, & Martin, 2012).



**4. ÁBRA: EGY ÉPÜLET BELSŐ HŐMÉRSÉKLETÉNEK VÁLTOZÁSA HŐTÁROLÓ ANYAG NÉLKÜL (JOBB OLDAL) ÉS HŐTÁROLÓ ANYAGGAL (BAL OLDAL) A KÜLSŐ HŐMÉRSÉKLET VÁLTOZÁSÁNAK HATÁSÁRA (HEIER, BALES, & MARTIN, 2012)**

A passzív hőtárolás fő csapásvonala, vagyis az épületekben és építőanyagokban használt tárolás mellett izgalmas és egyelőre kevésbé kutatott terület a járművekben használt megoldások. Egy napsütésnek kitett autóban készített vizsgálatban hőtároló anyag nélkül az utastér hőmérséklete délután 2 óra körül 70 °C körüli értéket mutatott és éjszakára sem csökkent le 30 °C alá. A kutatásban a tető belső oldalára szerelt, 750 g fázisváltó anyag (32 °C olvadásponttal) segítségével a maximális délutáni hőmérsékletet is sikerült mindössze

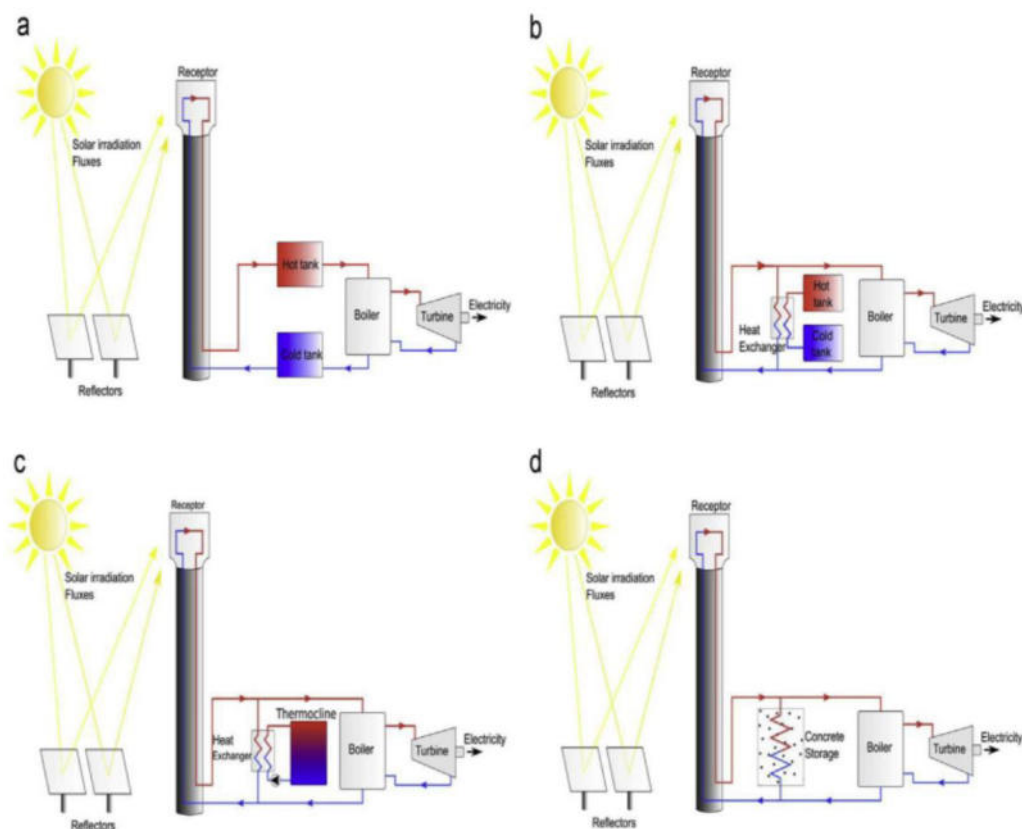
35 °C-ra csökkenteni (Jamekhorshid & Sadrameli, 2012). Egy további kutatási terület a ruházatokba telepített fázisváltó anyagok, amelyek hideg környezetben segítséget nyújtanak a komfortos hőmérséklet elérésében.

- Aktív hőtárolás

Az aktív hőtárolási rendszerekben a hő tárolására és kinyerésére plusz befektetett munka és egy hőátadó közeg keringtetése szükséges.

- Tartályos rendszerek

A tartályos rendszerekben hőátadó folyadékok keringtetésével egy vagy több tartályban tárolják el az energiát azokban az időszakokban, amikor többlet áll rendelkezésre és ezekből a tartályokból nyerik ki a szükséges időszakokban. (Pelay, Luo, Fan, Stitou, & Rood, 2017) A napenergiát hasznosító tartályos rendszerekre néhány példát az 5. ábrán helyeztem el.



**5. ÁBRA: NAPENERGIÁT HASZNOSÍTÓ TARTÁLYOS HŐTÁROLÓ RENDSZEREK A) KÉT TARTÁLYOS DIREKT RENDSZER B) KÉT TARTÁLYOS INDIREKT RENDSZER C) TERMOKLIN RENDSZER D) BETONTÖMBÖS RENDSZER (PELAY, LUO, FAN, STITOU, & ROOD, 2017)**

A két tartályos direkt rendszerrel nappal a turbina oldali igények kielégítése mellett megmaradt hőenergiát a meleg tartályban tárolják el, amelyet éjszaka fel tudnak használni. A két tartályos indirekt rendszer működése során két különböző hőátadó közeget használnak, amelyből az egyik a hőtároló közegként is funkcionál. Nappal a többlet energiát a közbelső hőcserélőn keresztül a hőtároló közeg meleg tartályba való átszivattyúzásával tárolják el, éjszaka pedig megfordítva az áramlást a közeget vissza szivattyúzzák a hideg tartályba, ezzel melegítve a napkollektor körüli folyadékot. A termoklin rétegződésre alapuló rendszereknél egyetlen tartályra van szükség, amelyben a termikus felhajtóerő kihasználásával képesek hőt tárolni vagy vételezni, a betontömbös tárolás esetén pedig egy betontömbben lévő hőcserélőn keresztül használják ki a hőtároló tömegben rejlő lehetőségeket. (Alva, Lin, & Fang, 2018)

#### 2.2.4. Különböző üzemi hőmérsékleten működő hőtárolások

Az alacsony, közepes és magas hőmérsékleten történő hőtárolás megoldásai az előző pontokban részleteztem, így a továbbiakban elsősorban a hideg hőtárolási megoldásokat vizsgálom, a dolgozat témájába leginkább fontos fázisváltó anyaggal történő hűtési energia tárolást pedig a későbbiekben egy külön fejezetben részletezem.

##### ○ Hideg hőtárolás

Hideg hőtárolásról a  $\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  alatti üzemi hőmérsékletek esetében beszélhetünk. A hűtési rendszerekben az energiatárolás nagy előnye, hogy a hűtési energia előállítása energetikailag optimálisabb az alacsonyabb éjszakai külső környezeti hőmérséklet mellett megtermelni, a kompresszor működtetéséhez szükséges villamos energiát pedig gazdaságilag kedvezőbb az éjszakai órákban felhasználni (Fang, Tang, & Cao, 2015). A hideg hőtárolás vagy szenzibilis (pl. hűtött víz vagy más folyadék segítségével), vagy látens (pl. jég, fázisváltó anyagok) hőtároláson alapul. (Alva, Lin, & Fang, 2018)

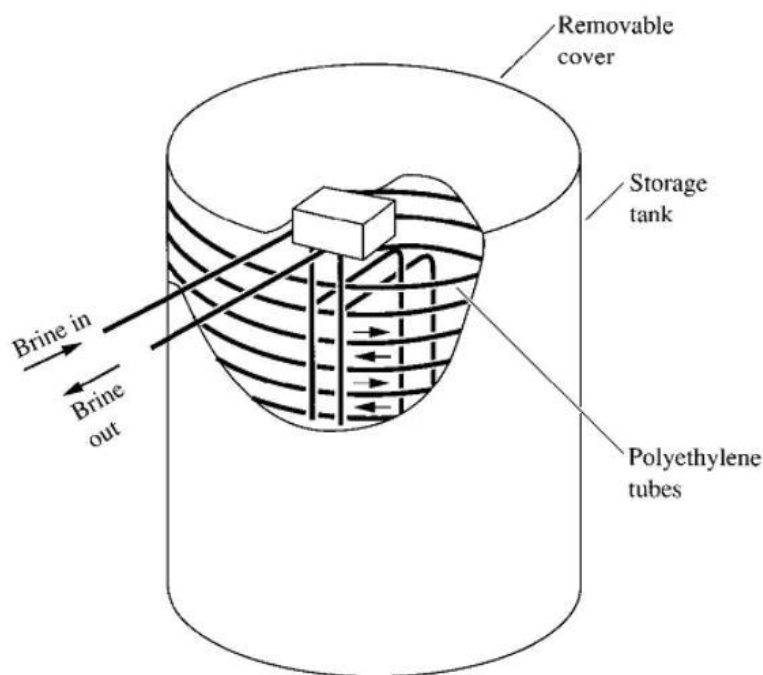
##### • Hűtött vizes hőtárolás

A hűtött vizes hőtárolás leginkább egy tartályos termoklin rétegződés kihasználásával, érezhető hőtárolás alapján működnek. A víz (amely a hőtároló és hőátadó közegként is funkcionál). Éjszaka a kedvezőbb környezeti hőmérsékletek mellett a víztartályba megtörténik az energia betárolása, majd nappal a csúcsideőszakban a tároló kisütése. A hűtött vizes tárolás hatékonyságának egyik fontos paramétere a

termikus rétegződés mértéke, amely a tartály magasság/átmérő arányával javítható. (Nelson, Valakrishnan, & Srinivas Murthy, 1999).

- Hőcserélős tárolás

A hőcserélős hőtárolás esetében a hőátadó közeget egy tartályban lévő tekercses, spirálsöves vagy egyéb nagy felületű hőcserélőn keresztül keringtetjük, miközben a tartályban lévő hőtároló anyag (általában látens hőtárolásra alkalmas anyag, pl. jég, vagy egyéb fázisváltó anyagok). A feltöltés közben a hűtőgép elpárologtatójától kilépő hőátadó közeg, a hőtároló közeg olvadáspontja alatt  $\sim 3-5$  °C-os hőmérséklettel, a hőcserélőn áthaladva lehűti és megszilárdítja a fázisváltó közeget. A kitárolás a fogyasztóktól visszatérő hőtároló közeg, amelynek hőmérséklete magasabb, mint a fázisváltó anyag hőmérséklete, a hőcserélőn áthaladva megolvasztja a tárolóanyagot, ezzel hőt kinyerve a rendszerből. (Nelson, Valakrishnan, & Srinivas Murthy, 1999). A megoldás egy módját a 6. ábrán helyeztem el.

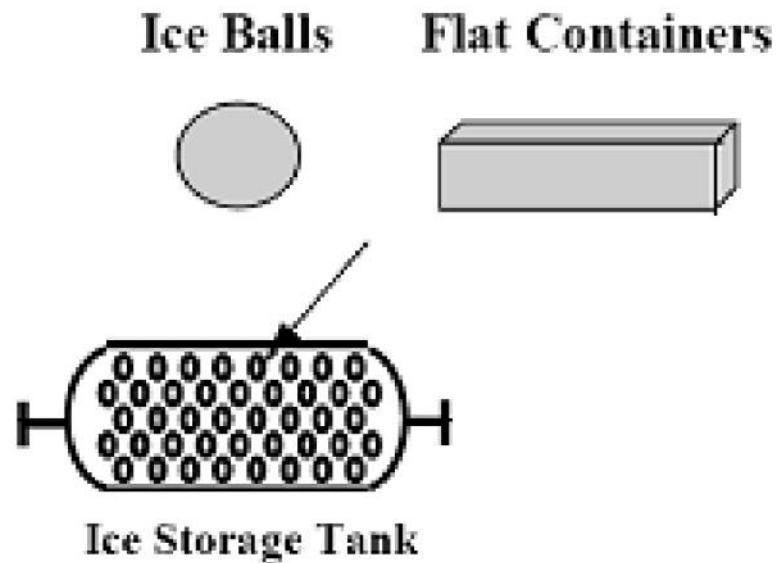


**6. ÁBRA: HŐCSERÉLŐS JEGES TÁROLÓ (JEKEL, 1991)**

- Kapszulázott tárolás

Ebben az esetben a víz, vagy egyéb fázisváltó anyagot műanyag vagy fém kapszulákban helyezik el, amely körül hőátadó közeget áramoltatnak. A kapszulák ilyen módon közvetlen kapcsolatban vannak a hőátadó közeggel, így hőátadás nagyobb felületen tud lezajlani. A tároló feltöltése és kisütése a hőcserélős megoldással

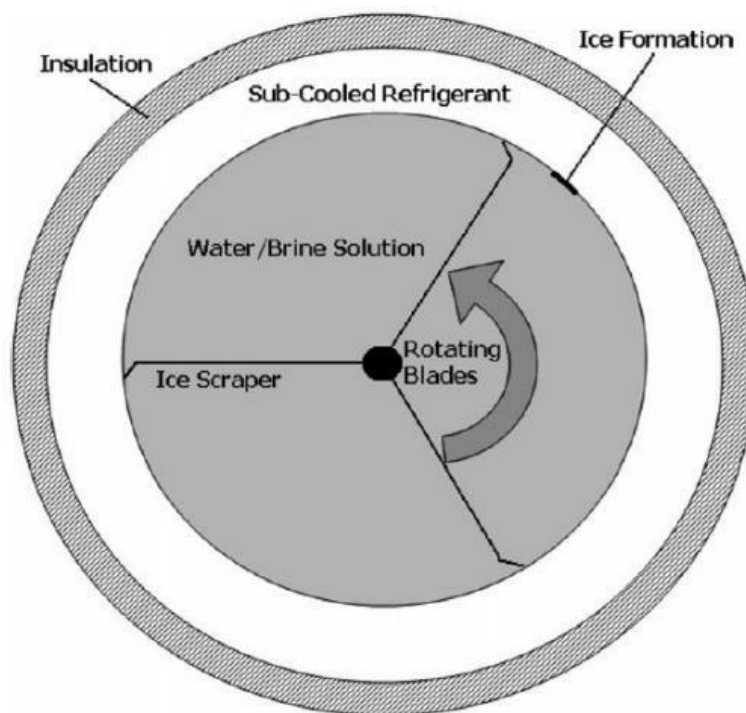
megegyező módon történik. (Alva, Lin, & Fang, 2018) A kapszulázott tárolás elvi rajzát a 7. ábrán helyeztem el.



7. ÁBRA: KAPSZULÁZOTT TÁROLÓ (JEKEL, 1991)

- Jégkásás tárolás

A jégkásás tárolás esetében a két fázisban (folyadék és szilárd) lévő tárolóanyag (pl. víz és fagyálló keverék) egyben a hűtendő közegként és funkcionál. A jégkását keverékes vagy kaparásos módszerrel folyamatosan apró kristályokra törik, így speciális szivattyú segítségével szállíthatóvá válik. A megoldás elvi rajzát a 8. ábrán helyeztem el.

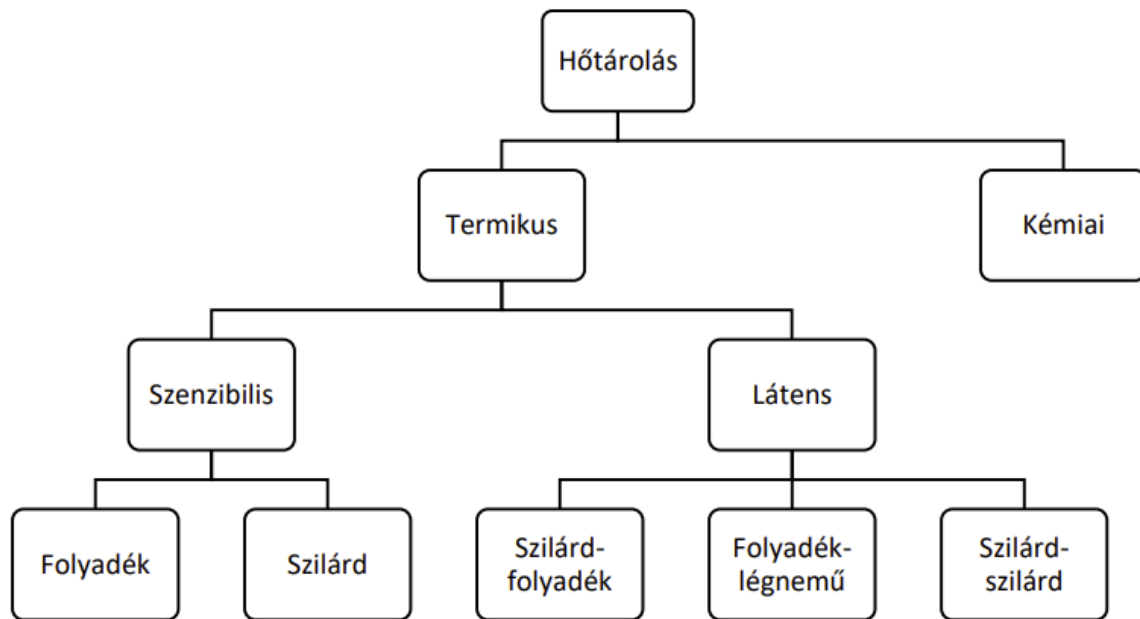


**8. ÁBRA: JÉGKÁSÁS HŐTÁROLÁS (JEKEL, 1991)**

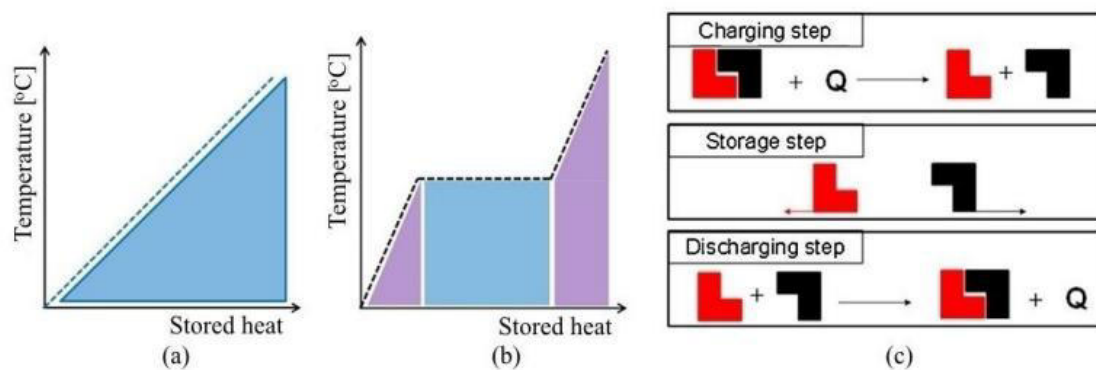
### 2.3. Főbb hőtároló anyagok

Az anyagok széles skálája használható hőtárolásra, azonban a jó hatásfokú és környezetbarát hőtároláshoz az anyagoknak meg kell felelniük néhány alapvető tulajdonságnak. Ilyen fizikai tulajdonságok pl. a magas hőkapacitás, magas látens hő, magas hővezetési tényező, alacsony hőtágulási együttható, a felhasználáshoz megfelelő olvadáspont stb. A fizikai tulajdonságokon kívül fontos figyelembe venni az anyagok egyéb tulajdonságait is, pl. megfelelő kémiai stabilitás, gyulladákonyság, mérgezőség, hozzáférhetőség stb. (Alva, Liu, Huang, & Fang, 2017).

A hőtároló anyagok csoportosításának legcélravezetőbben módja alapján megkülönböztetünk érzékelhető hőtároláson, látens hőtároláson és kémiai hőtároláson alapuló tárolókat (Alva, Lin, & Fang, 2018). A hőtárolási módok összefoglalását az 9. ábrán, az egyszerűsített folyamatukat pedig a 10. ábrán helyeztem el.



9. ÁBRA: LEGJELENTŐSEBB HŐTÁROLÁSI FAJTÁK (ANDRÁSSY, 2021)



10. ÁBRA: HŐTÁROLÁSI MEGOLDÁSOK FOLYAMATA (A) - ÉRZÉKELHETŐ HŐTÁROLÁS (B) - LÁTENS HŐTÁROLÁS (C) - KÉMIAI HŐTÁROLÁS (SARBU & SEBARCHIEVICI, 2017)

### 2.3.1. Érzékelhető hőtárolást hasznosító anyagok

Az érzékelhető hőtárolás esetén az anyag legfontosabb tulajdonsága a hőkapacitás. A hőtárolás során az a hőtároló anyag hőmérséklete fázisváltás nélkül megnövekszik. Az eltárolt hő mennyisége az alábbi képlet segítségével számítható: (Sarbu & Sebarchievici, 2017)

$$Q = \int_{t_k}^{t_v} m * c * dt \text{ [J]}$$

ahol:  $m$  – hőtároló anyag tömege [kg]

$c$  – hőtároló anyag fajlagos hőkapacitása [ $\text{kJ} * \text{kg}^{-1} * \text{K}^{-1}$ ]

$t_k$  – a hőtároló anyag kezdeti hőmérséklete [K]

$t_v$  - a hőtároló anyag végső hőmérséklete [K]

Az érzékelhető hőtároláson alapuló főbb tároló anyagok az alábbiak:

- Víz

A víz hőtároló anyagként való használatának előnye a magas fajlagos hőkapacitás, könnyű hozzáférhetőség, ezen kívül nem mérgező és nem gyúlékony tulajdonságai, azonban hátránya a korrozív tulajdonsága a viszonylagosan alacsony párolgási hőmérséklete pedig korlátozza a felhasználhatóságát (Alva, Liu, Huang, & Fang, 2017). Lakossági területen gyakran alkalmazzák fűtési és használati melegvíz rendszerekben (Alva, Lin, & Fang, 2018), ipari területen pedig felhasználható például magas hőmérsékletű, nagy nyomású telített gőz tárolására (Gonzalez-Roubaud, Pérez-Osorio, & Prieto, 2017) vagy napenergia tárolásra kialakított sós vizű tavakban (Alva, Liu, Huang, & Fang, 2017).

- Termikus olaj

A termikus olaj használatát az elmúlt években elsősorban az olvadt sókhoz képest alacsony olvadáspontja miatt az ipari és erőművi méretű, koncentrált napenergiát hasznosító rendszerekben esetében vizsgálták és találták előnyösnek (Benoit, Spreafico, Gauthier, & Flamant, 2015). A vízzel szemben nagy előnye, hogy atmoszférikus nyomáson  $\sim 250\text{ °C}$  a forráspontja, hátránya a rosszabb hőátadási tényezője és fajlagos kapacitása, a magas beszerzési ára, valamint a gyúlékonysága (Alva, Lin, & Fang, 2018)

- Olvadt sók

Amennyiben a hőtároló anyag hőmérséklete folyamatosan magas marad, a termikus olajjal szemben a CSP rendszerekben a jelentősen könnyebben és olcsóbban beszerezhető olvadt sókat használják. Előnyük a többi folyékony hőtároló anyaghoz képest a magas sűrűségük, rendkívül magas forráspontjuk és remek termikus stabilitásuk miatt, hátrányuk viszont a magas ( $200\text{ °C}$  körüli) olvadáspontjuk (Alva, Liu, Huang, & Fang, 2017).

- Folyékony fémek és ötvözetek

Az alacsony olvadásponttal és magas forrásponttal rendelkező fémek (pl. nátrium-kálium ötvözetek, különböző ólom ötvözetek) jó hőátadási tulajdonságaik és széles hőmérsékleti tartományuk (akár  $600\text{--}700\text{ °C}$  tartomány) jól használhatók hőtárolási célokra (Alva, Lin, & Fang, 2018).

- Zúzott kőzetek és homok

A zúzott közetek hőtároló anyagként való használata elsősorban ipari és erőművi környezetben elterjedt. Az alkalmazásuk során a hőt szállító anyag hőcserélővel vagy közvetlen érintkezéssel (pl. levegő vagy füstgáz esetében) adja át hőenergiáját a kőzetnek. Előnyük, hogy gázokkal (pl. magas hőmérsékletű füstgázzal) és egyéb légnemű anyagokkal is jól használhatók. A hőátadás felülete ilyen módon nagyobb, mint ha hőcserélőre lenne szükség és mivel a kőzet darabok kis felületen érintkeznek, minimális a tárolás vesztesége (Alva, Liu, Huang, & Fang, 2017). Magas olvadáshőjük, és az atmoszférikus nyomáson történő üzemeltetés lehetősége lehetővé teszi mind az erőművi, mind az ipari alkalmazást. Legfőbb hátrányuk az alacsony hőátadási tényezőjük és rossz hőkapacitásuk (Hanchen, Brückner, & Steinfeld, 2011). A zúzott kőzetekhez hasonlóan a homokot magas olvadáshője (700-1000 °C) és kompakt felhasználása miatt gyakran használják CSP rendszerekben és ipari területeken gőz előállítására (Alva, Liu, Huang, & Fang, 2017).

### 2.3.2. Látens hőtárolást hasznosító anyagok

A látens hőt hasznosító hőtárolás esetén a betárolt hőenergia a fázisváltó anyagban (PCM – phase changing material) elindítja a fázisváltozást, a betárolható energia mennyisége pedig ilyen módon egyenesen arányos a tároló anyag specifikus látens hőjével. A technológia előnye, hogy a fázisváltás közelítőleg izoterm állapotváltozásként valósul meg, így a tároló anyag felhevítése nélkül is nagy mennyiségű energia táplálható be. A látens hőtárolás egy szilárd-folyékony fázisváltás során az alábbiak szerint írható le: (Sarbu & Sebarchievici, 2017)

$$Q = \int_{t_k}^{t_o} m * c_{p,szilárd} * dt + m * dq + \int_{t_o}^{t_v} m * c_{p,folyadék} * dt$$

ahol:

Q – eltárolt hőmennyiség [J]

m – tároló anyag tömege [kg]

$c_{p,szilárd}$  – fajlagos hőkapacitás szilárd fázisban [J/kgK]

$c_{p,folyadék}$  – fajlagos hőkapacitás folyadék fázisban [J/kgK]

$dq$  – specifikus látens hő [J/kgK]

$t_o$  – olvadáspont [K]

$t_k$  – kezdeti hőmérséklet [K]

$t_v$  – végső hőmérséklet [K]

Hőtárolás céljából a legcélravezetőbb fázisváltozás a szilárd-folyadék átmenet, mivel ebben az esetben történik a legkisebb térfogatváltozás (általában kisebb mint 10%) és az olvadási rejtett hő viszonylagosan magas (Alva, Liu, Huang, & Fang, 2017). A fajlagos hőtároló képesség a szilárd-folyadék PCM anyagok alkalmazásakor 100 kWh/m<sup>3</sup> (víz) körüli értéket vesz fel, szemben az érzékelhető hőtároló anyagok átlagos 25 kWh/m<sup>3</sup> értékével (Sarbu & Sebarchievici, 2017).

A fázisváltó anyagok tulajdonságai széleskörű felhasználást tesznek lehetővé, többek között használhatók:

- falazatokban és egyéb építőanyagokban az épület hőtároló képességének növelésére (Kenisarin & Mahkamov, 2016)
- épületgépészeti és napenergiát hasznosító rendszerekben meleg energia tárolására (Basecq, Michaux, Inard, & Blondeau, 2013)
- hűtési rendszerekben hűtési energia tárolásra (Basecq, Michaux, Inard, & Blondeau, 2013)

A fázisváltó anyagok közül a legelterjedtebbek a parafinok, a hidratált sók és a zsírsavak. Az anyagok kémiai tulajdonságaik alapján szerves és szervetlen kategóriákba sorolhatók be.

○ Szerves fázisváltó anyagok

A fázisváltó anyagok közül a legelterjedtebbek a parafinok, a sók és a zsírsavak. Az anyagok kémiai tulajdonságaik alapján szerves és szervetlen kategóriákba sorolhatók be.

A szerves fázisváltó anyagok állapotváltozása sok cikluson keresztül fázis szegregáció és a túlhűtés jelensége nélkül megy végbe így jól használható lakossági és ipari környezetben is (Sarbu & Sebarchievici, 2017)

• Paraffinok

A paraffinok a leggyakrabban használt szerves PCM anyagok. A paraffinok a nyílt láncú telített szénhidrogének (alkánok) csoportját képezik, amelyek olvadáspontja a szénlánc hosszától függően változik. A rövidebb szénláncú paraffinok (pl. metán, oktán) szobahőmérsékleten gáz, míg a hosszabb (20 szénatom felett) szilárd halmazállapotban fordulnak elő (Sharma & Ganesan, 2015). A tiszta paraffin viasz rendkívül drága, így hőtárolásra technikai minőségű (általában különböző szénatomszámú paraffinok keverékeként) paraffinokat használnak, amelyek az olajfinomítás melléktermékeként is keletkeznek és olvadáspontjuk széles skálán mozog (-5 °C és 100 °C között) (Alva, Lin, & Fang, 2018).

- Zsírsavak

A természetes olajok kinyerésével is előállítható zsírsavak a tiszta paraffinokhoz képest olcsóbb alternatívát nyújthatnak a hőtárolásra, mivel tulajdonságaikban nagyban megegyeznek a paraffinokkal. Előnyük a természetes előfordulásuk, a túlhűtésre való alacsony hajlamuk, viszont a paraffinokhoz hasonlóan alacsony a hőátbocsátási képességük és viszonylag nagy (10 % körül) van a fázisváltás során végbemenő térfogatváltozásuk (Alva, Liu, Huang, & Fang, 2017). A paraffinokhoz hasonlóan a zsírsavak esetében is a szénlánc hossza határozza meg az olvadáspontot, amely nagyságrendileg 10 °C és 70 °C között mozog (Alva, Lin, & Fang, 2018)

- Sók

A sók és só hidrátok magas olvadáspontjuknak (200-550 °C) köszönhetően ipari környezetben rendkívül elterjedtek hőtároló anyagként. Hátrányuk a rossz hőátadó képességük, előnyük a stabilitásuk és a magas látens hőjük. Az olvadt sók használata már az észlelhető hőtárolás témakörénél is felmerült, azonban a szükséges olvadáspont jó meghatározásával fázisváltó anyagként is használhatók, így még jobb fajlagos hőtároló képesség érhető el (Alva, Liu, Huang, & Fang, 2017).

### 2.3.3. Kémiai hőtárolás

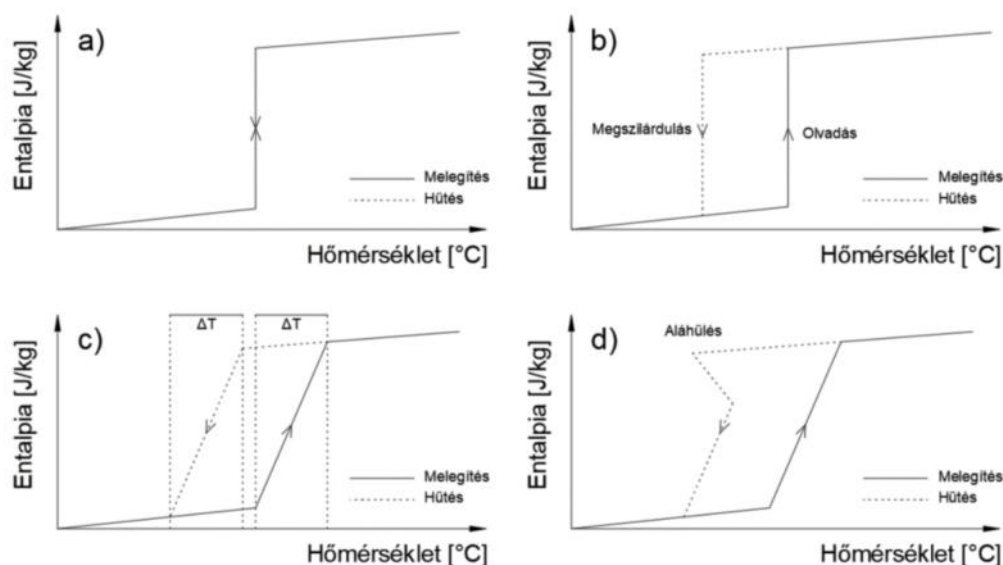
A kémiai hőtárolás során reverzibilis kémiai reakciók során tároljuk el és használjuk fel az energiát. Általánosságban közepes és magas hőmérsékletű (200-400 °C) tárolás valósítható meg kémiai úton. A termokémiai tárolás során hő befektetésével választunk szét vegyületeket komponenseire, amikor pedig a vegyületek újra egyesülnek, hő szabadul fel. A gyakorlatban ez valamilyen porózus anyag hevítése, amelyből a dehidráció során vízgőz szabadul fel, a rehidráció során pedig újra felveszi azt. A megoldás előnye, hogy a tárolás gyakorlatilag hőveszteség nélkül valósítható meg hosszútávon is, de a tárolás sűrűsége is 8-10-szer magasabb lehet, mint a víz esetében. A megoldás technikai hátránya, hogy a dehidráció során szinterezés (szemcsék összeállása) vagy akár szemcsenövekedés is előfordulhat, amely rontja a rehidráció hatásfokát (Alva, Lin, & Fang, 2018).

## 2.4. Fázisváltó anyagok hűtési tároló rendszerekben

### 2.4.1. Fázisváltó anyagok legfontosabb anyagtulajdonságai hideg hőtárolás tekintetében

A fázisváltó anyagok látens hőtárolást hasznosító, aktív hőtároló rendszerekben használhatók fel, a fázisváltozás hőmérsékletének megfelelő megválasztásával pedig lehetőség nyílik a hűtési energia tárolására is. A fázisváltó anyagokat a fázisváltozás ténye miatt valamilyen módon el kell különíteni a környezetétől, ami történhet az előző fejezetekben bemutatott tároló vagy akár kapszulák segítségével is. Emiatt amellet, hogy mindkét fázis hőtechnikai tulajdonságait (elsősorban fajhő, hővezetési tényező) külön-külön is vizsgálni kell, fontos szempont a fázisváltozás során bekövetkező sűrűségváltozás és az ezzel járó térfogatváltozás. Zárt tárolás esetén az anyagban bekövetkező térfogatváltozás hatására a tároló mechanikus igénybevétel alá kerül, így megsérülhet (Andrássy, 2021).

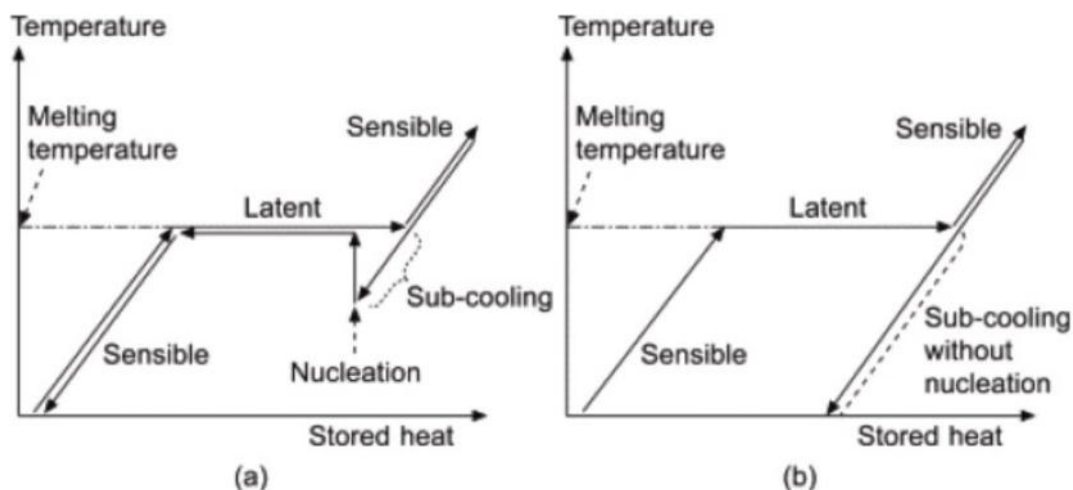
Egy másik fontos tényező, hogy bár a víz-jég halmazállapot változás esetén az olvadás és megszilárdulás is egyazon hőmérsékleten történik, más PCM-ek esetében ez nem minden esetben teljesül, a fázisváltás irányától függően az anyagban két különböző hőmérsékleten vagy egy hőmérséklettartományon valósulhat meg az állapotváltozás. A gyakorlatban ez a modellezés megnehezítése mellett az üzemeltetést is megnehezíti, mivel egy termikus hiszterézis esetében a fázisváltozás adott esetben kieshet a rendszer működési tartományából, így kisebb energiatárolás valósul meg (11. ábra). (Andrássy, 2021)



11. ÁBRA: FÁZISVÁLTÓ ANYAGOK HALMAZÁLLAPOT-VÁLTOZÁSA

(A) VÍZ-JÉG HALMAZÁLLAPOT-VÁLTOZÁS (B) IDEÁLIS PCM HISZTERÉZIS (C) VALÓS PCM HISZTERÉZIS (D) PCM TÚLHÚTÉS

Ehhez kapcsolódóan az egyik legfontosabb feladat a túlűtés jelenségének elkerülése, amely során az anyag folyadék-szilárd halmazállapot változása közben a kristályok képződése vagy a kristályok növekedése túl lassú, az anyag hőmérséklete az olvadáspontja alá kerül, ami instabil állapotot és hosszabb dermedési időt (így pedig rosszabb tárolási hatékonyságot) okoz. A folyamat a 12. ábra szerint zajlik le, a b ábrán látható, hogy a lassú kristályképződés miatt a tárolható energia mennyisége csökken. (Nie, és mtsai., 2020)



12. ÁBRA: TÚLHÚTÉS FOLYAMATA (A) - KRISTÁLYOSODÁS BEINDULÁSÁVAL (B) - KRISTÁLYOSODÁS BEINDULÁSA NÉLKÜL (NIE, ÉS MTSAL., 2020)

A túlhűtés jelenségének elkerülésére a fázisváltó anyagokba az anyag kristályszerkezetéhez hasonló, kristályképződést elősegítő anyagokat adagolnak. (Bruno, Belusko, Liu, & Tay, 2015)

#### 2.4.2. Fázisváltó anyaggal töltött hőtárolók épületgépészeti rendszerbe való illeszkedése

A fázisváltó anyagok hűtési rendszerekbe való illesztésének nagy előnye, hogy pl. a vizes tárolóhoz képest a PCM-ek képesek a hűtési rendszerekre jellemző szűk hőmérséklettartományokban (pl. 6/12 °C, 15/20 °C stb.) működni (Andrássy, 2021). A tároló rendszerbe való illeszkedése szempontjából fontos vizsgálni a hozzá kapcsolódó hűtési energiát előállító gép hatékonyságát is. A hőtárolók több típusú hűtőgéphez is megfelelően illeszthetők, azonban a továbbiakban a tartalmi keretek figyelembevételére miatt csak a dolgozatomban témájához kapcsolódó scroll kompresszoros folyadékhűtőkhöz való illeszkedést vizsgálom.

##### ○ Folyadékhűtők hatékonysága (EER)

Az energiatároló rendszerbe illeszkedése és a lehető legjobb energiamegtakarítás miatt szükséges a folyadékhűtő hatékonyságának vizsgálata, amely az alábbi módon kalkulálható:

$$EER = \frac{\text{hűtési igény [kW]}}{\text{hűtésre fordított villamos energia felhasználás [kW]}}$$

A gyártók a gép katalógusokban általában egy adott külső hőmérsékleten adják meg a folyadékhűtők EER értékét és a megadott érték sokszor csak a kompresszor által felvett villamos energiafelhasználást tartalmazza (a szivattyúk, ventilátorok fogyasztását elhanyagolva). A gyakorlatban a folyadékhűtők hatékonysága több különböző paramétertől függ (Andrássy, 2021):

- külső hőmérséklet
- részterhelés (RT)
- szabályozás

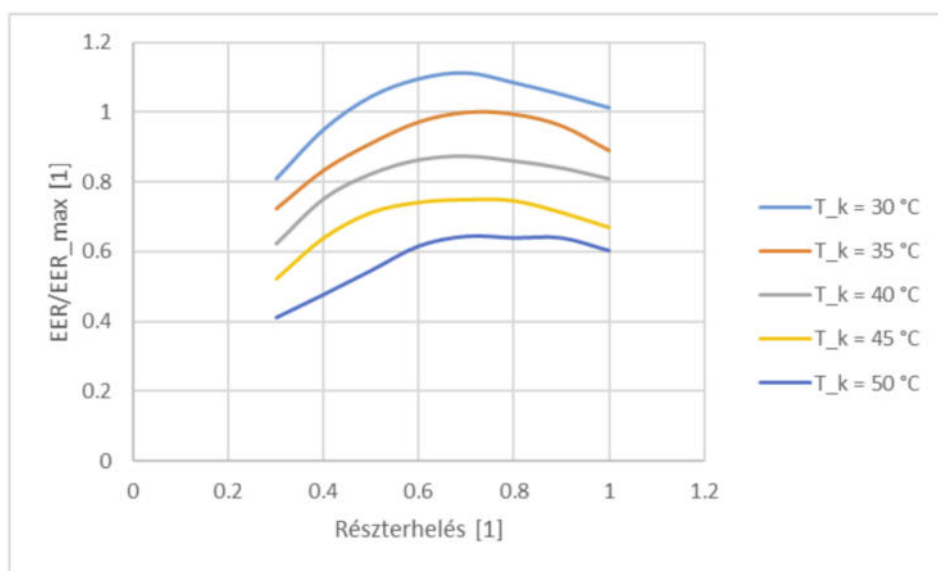
A gyártók elsősorban az EER érték külső hőmérséklettől való függését szokták megadni a katalógusokban, azonban mérési eredményeket több szakirodalmi forrás is közöl a részterhelésbeli függőségről, amely az alábbi képlet alapján számítható:

A részterhelés az alábbi képlet alapján kerül meghatározásra:

$$RT = \frac{\dot{Q}_{pillanatnyi\ igény [kW]}}{\dot{Q}_{névleges [kW]}}$$

Alacsonyabb részterhelésen a scroll kompresszoros, frekvencia szabályozású folyadékhűtők esetében a kompresszor alacsonyabb forgási sebességéből adódóan a kompresszor volumetrikus hatásfoka romlik, a hőcserélés hatásfoka a hűtőközeg áramlási sebességének csökkenése miatt viszont növekszik. A két különböző folyamat egymást kiegyensúlyozó hatása alapján a scroll kompresszoros folyadékhűtők hatékonysága 60-70 %-os részterhelés mellett bizonyul a legmagasabbnak (Cecchinato, 2010).

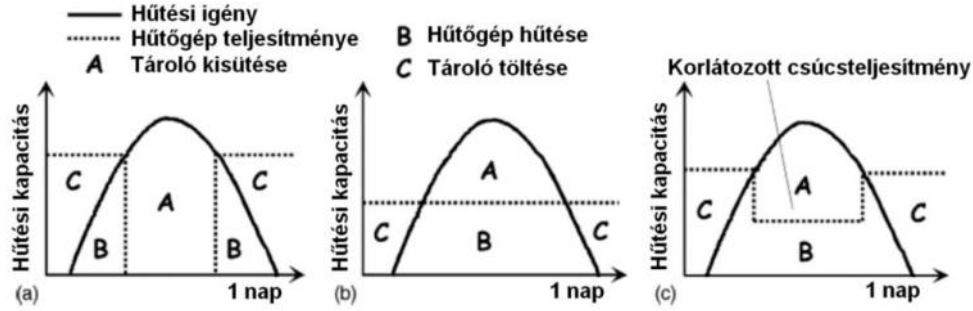
A 13. ábrán helyeztem el a scroll kompresszoros folyadékhűtők EER értékének változását a részterhelés és a külső hőmérséklet függvényében. 30 % alatti részterhelések esetén a gépek már nem frekvencia szabályozással, hanem ki-be kapcsolási üzemben működtek (Andrássy, 2021)



**13. ÁBRA: FOLYADÉKHŰTŐK EER ÉRTÉKE A RÉSZTERHELÉS ÉS A KÜLSŐ HŐMÉRSÉKLET FÜGGVÉNYÉBEN (ANDRÁSSY, 2021)**

## 2.5. Hűtési tároló töltésének és kisütésének szabályozása

A hűtési tárolók szabályozásának két fő megközelítési módja lehet: az energiamegtakarítás priorizálása, amely során az elsődleges szempont a külső környezeti hőmérséklet és a hűtőgép részterhelések optimális szinten tartása, illetve a költségmegtakarítás priorizálása, amely esetében a fő szempont a villamos energia spot piacának negyedórás eladási árai (Sun, Wang, Xiao, & Gao, 2013). Az energiatároló üzemmódja és a rendszerbe illesztése alapvetően határozza meg a szabályozási rendszert. A tároló töltése és kisütése többféle üzemmód szerint is történhet, amelyeket előzőleg a statikus energiatárolás fejezetnél felsoroltam és összefoglalva a 14. ábrán helyeztem el.



14. ÁBRA: TÖLTÉSI ÉS KISÜTÉSI ÜZEMMÓDOK (ANDRÁSSY, 2021)

A prioritások szempontjából a szabályozás szintén három részre bontható: hűtőgép prioritás, konstans arányú szabályozás és tároló prioritás.

○ Hűtőgép prioritás:

A hűtőgép prioritáson alapuló szabályozás a legegyszerűbb a három mód közül. Ebben az esetben a hűtőgép a szokásos szabályozása mellett látja el a feladatát, a tároló töltése a csúcsidőszakon kívül valósul meg, a kisütése pedig csak abban az esetben, ha a hűtési igény meghaladja a hűtőgép optimális részterhelésnél meghatározott hűtési teljesítmény korlátját. Az elv matematikai megfogalmazása az alábbiak szerint történhet: (Sun, Wang, Xiao, & Gao, 2013)

$$u_k = \begin{cases} u_{max,k} & \text{ha } k \text{ csúcsidőszakon kívüli} \\ 0 & \text{ha } k \text{ csúcsidőszakon belüli és } Q_k < CAP_{ch} \\ -(Q_k - CAP_{ch}) & \text{ha } k \text{ csúcsidőszakon belüli és } CAP_{ch} < Q_k \end{cases}$$

ahol:

$u$  – töltési és kisütési teljesítmény (amelynél a pozitív érték a tároló töltése, a negatív érték a tároló kisütése) [kW]

$Q$  – hűtési teljesítmény igény [kW]

$CAP_{ch}$  – a hűtőgép által szolgáltatott hűtési teljesítmény [kW]

$k$  – a nap vizsgált órája [-]

○ Konstans arányú szabályozás

A konstans arányú szabályozás esetén a tároló töltése mindig csúcsidőszakon kívül történik, a tároló kisütése pedig csúcsidőszakon belül egy konstans arány alapján: (Sun, Wang, Xiao, & Gao, 2013)

$$u_k = \begin{cases} u_{max,k} & \text{ha } k \text{ csúcsidőszakon kívüli} \\ \max(-f_Q * Q_k, u_{min,k}) & \text{ha } k \text{ csúcsidőszakon belüli} \end{cases}$$

ahol:

$f_Q$  – a hűtési teljesítményből a tároló töltésére használt konstans arányszám

- Tároló prioritás

A hűtőgép prioritással ellentétben ebben az esetben a csúcsidőszakban minél nagyobb teljesítményben próbáljuk kisütni a tárolót. Az ilyen típusú szabályozás esetén általánosan elmondható, hogy a csúcsidőszakon kívüli feltöltés után a tárolót a következő csúcsidőszakban teljes mértékben kisütjük (így a tároló teljes feltöltése és kisütése megvalósul egy időszakon belül). A szabályozási mód matematikai leírása: (Sun, Wang, Xiao, & Gao, 2013)

$$u_k = \begin{cases} u_{max,k} & \text{ha } k \text{ csúcsidőszakon kívüli} \\ Q_k & \text{ha } k \text{ csúcsidőszakon belüli és } Q_k < -u_{min,k} \\ u_{min,k} & \text{ha } k \text{ csúcsidőszakon belüli és } -u_{min,k} < Q_k \end{cases}$$

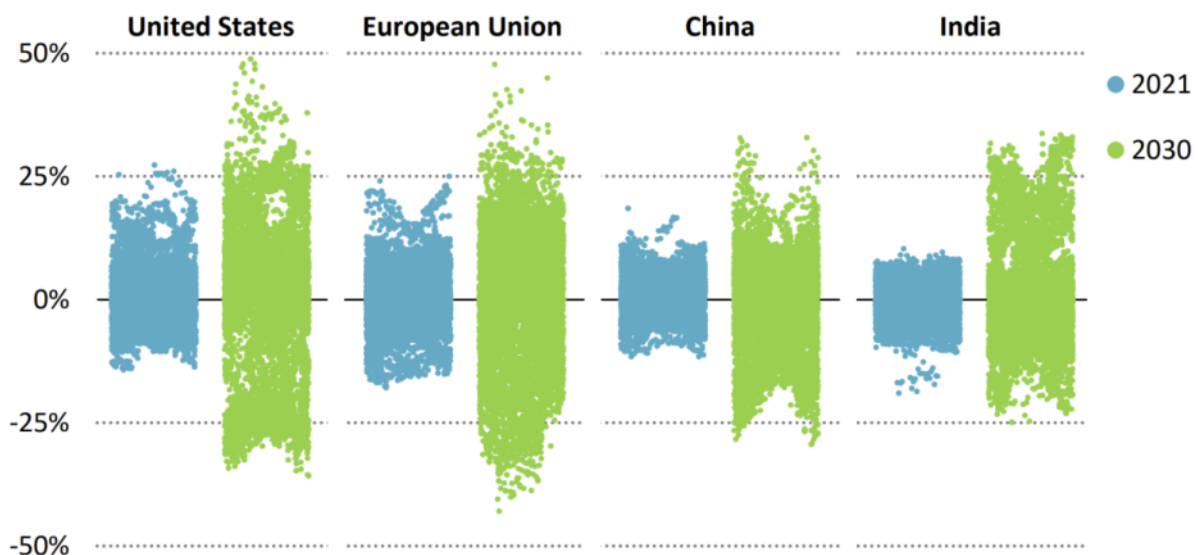
A szabályozási módozatok közül változó villamos energia tarifa mellett (pl. spot piacon vásárolt villamos energia esetében) tároló prioritási móddal érhető el a legjelentősebb energiafelhasználásban és energiaköltségben mért csökkenés (Neto & Krarti, 1997). A szabályozás hátránya, hogy az energia költség csökkenése mellett (pl. trópusi éghajlaton) adott külső hőmérsékleti körülménye esetén az energiafelhasználás a hűtőgép magasabb üzemideje miatt összesítve nőhet is (Yau & Lee, 2010). A másik két szabályozási móddal szemben a tároló prioritás energiafelhasználásban annál hatékonyabbnak bizonyul, mindél markánsabb a különbség a csúcsidőszakon kívüli és csúcsidőszaki külső hőmérsékletek között (Henze & Krarti, 1998).

Mind az energiahatékonyság mind a költséghatékonyság tekintetében további javulás érhető el egy egyszerű külső környezeti hőmérséklet és hűtési igény predikcióval (Sun, Wang, Xiao, & Gao, 2013). A predikció hibája ebben az esetben fontos befolyásoló tényező, azonban az épület hőtároló tömegét is figyelembe véve, a predikció hibája elhanyagolhatónak bizonyult (Henze, Kalz, Felsmann, & Knabe, 2004).

Bár a jelen diplomadolgozat tartalmi keretein túlmutatnak, de a mesterséges intelligenciával és egyéb dinamikus programozási módszerekkel támogatott szabályozási megoldások további energiahatékonysági és költségcsökkentési potenciált rejtenek magukban (Sun, Wang, Xiao, & Gao, 2013), így fontos további kutatási területet nyújtanak.

## 2.6. Hőenergia tárolás jelentősége a villamos energia piacon

Napjainkban a világ az 1970-es évek olajválsága óta a legjelentősebb energiaválságát éli. 2022-ben a világ primer energia szükségletét 23 %-ban biztosító földgáz ára, és a szállítási láncban tapasztalható zavarok a felhasználói és a törvényhozói oldalról is a megújuló energiaforrásokra való áttérés törekvésének példátlan lendületbe jövetelét okozták. A Nemzetközi Energia Ügynökség (IEA) 2022-es, megújuló energiákról szóló jelentésében a megújuló energia kapacitás növekedését 2027-ig 2.400 GW-ra változtatta, ami 30%-kal magasabb, mint a 2021-es jelentésükben szereplő előrejelzés és 85%-kal magasabb az öt évvel ezelőtti előrejelzéshez képest. A jelentés alapján 2027-re a megújuló energiaforrások által termelt villamos energia adja majd a villamos energia mix legnagyobb arányát, közel 40%-os részesedéssel (International Energy Agency, 2022). A megújuló energiát hasznosító technológiák (elsősorban a nap-és szélenergiák) villamos energiatermelésben betöltött szerepének ilyen mértékű növekedésével egyre nagyobb problémát jelent a menetrendtartás és a hálózati flexibilitás kérdése. Mivel a nap-és szélenergiák energiatermelése erősen kitett a környezeti hatásoknak, a termelésük előre nehezen tervezhető és a hálózat egyensúlyának fenntartásáért felelős rendszerirányítónak (Transmission system operator – TSO) gyakran kell a pozitív vagy negatív irányú menetrendi eltérést kiegyenlítő szabályozás útján ellensúlyoznia. (International Energy Agency, 2022) Az órák kiegyenlítő energia szükséglet növekedésének előrejelzését az 15. ábrán helyeztem el.



**15. ÁBRA: ELŐREJELZÉS AZ ÓRÁS KIEGYENLÍTŐ ENERGIA SZÜKSÉGLET VÁLTOZÁSÁRÓL**  
(INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022)

A kiegyenlítő energia piacnak alapvetően négy fő szereplője van:

- Hőerőművek: elsősorban a pozitív irányú (a mérlegkör túlfogyasztása esetén) felszabályozásér felelnek, a flexibilitás tekintetében jellemzően a gyors reagálású, szén, gáz és olajtüzelésű erőművekről van szó, melyek termelése környezetszennyező és erősen kitett a gázárak emelkedésének
- Villamos hálózat: a villamos hálózat összeköttetése országhatárokon belül és országokon átívelően, a pozitív és negatív szabályozások esetén is segítséget nyújtanak a kiegyenlítésben.
- Felhasználó oldali szabályozás: a felhasználók a csökkenteni tudják a kiegyenlítő energiaigényt a flexibilisen használható villamos fogyasztói berendezéseik teljesítményének szabályozásával, valamint a villamos energia igényük és a villamos energia felhasználásuk szétválasztásával (pl. hőenergia tárolás).
- Energiatárolás: elsősorban a villamos energia tárolásával (vagy mechanikai energia tárolással, amelyet villamos energia termelésére használnak fel) csökkenthető a kiegyenlítő igény és egyszerre növelhető a hálózat redundanciája is

Az előrejelzések alapján 2050-re a kiegyenlítő energia szabályozás negyedét a felhasználói oldali szabályozás fogja adni, amelynek nagy előnye a villamos energiatárolókkal szemben, hogy nem szükségeltetik külön akkumulátor telepeket telepíteni. A növekvő villamos energia igények mellett különösen fontos az effajta szabályozásban rejlő potenciál teljes kihasználása, amelyhez elengedhetetlen a digitális infrastruktúra és a hőtárolási rendszerek jelentős fejlesztése. (International Energy Agency, 2022)

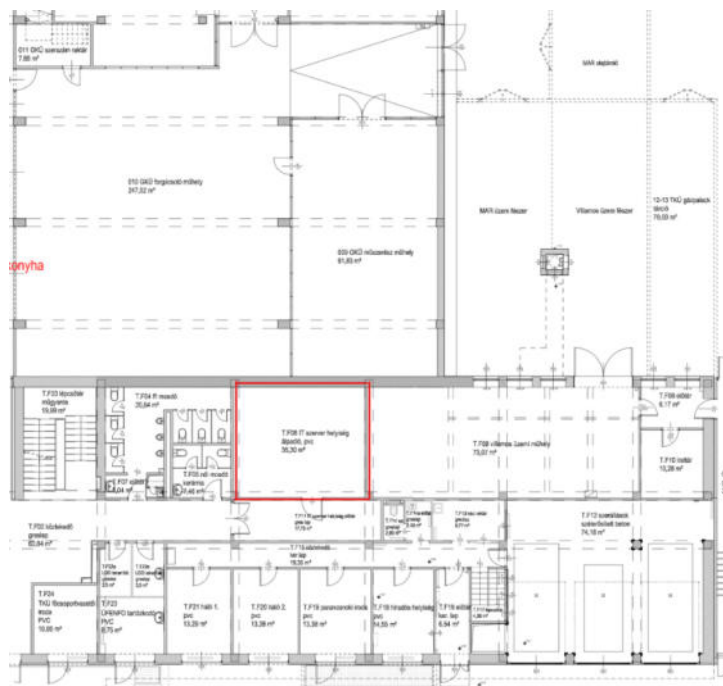
### 3. Témakidolgozás

#### 3.1. Rendszer leírás, kiindulási adatok

A választott feladatomban historikus adatok feldolgozásával elemzem egy egész évben üzemelő szerverterem hűtési rendszerét. A megrendelő részéről energiahatékonysági ötletként felmerült egy fázisváltó anyaggal töltött energiatároló rendszerhez való csatlakoztatása. A feladatomban a rendszer 2022-es évre vonatkozó adatainak felhasználásával vizsgálom az energiatároló energia-és költségmegtakarítási lehetőségeit. A tároló töltésének és kisütésének módját az energiamegtakarítás maximalizálására dolgozom ki.

##### 3.1.1. Választott létesítmény ismertetése

A feladathoz választott létesítmény egy Budapest 10. kerületében található gyógyszergyár szerverterme. A szerverterem a gyógyszergyár IT rendszereihez kapcsolódó szolgáltatási feladatokat lát el. A szerverteremben a számítástechnikai berendezések napi átlagos 30-40 kWh villamos energia fogyasztása mellett a helyiségben stabilan  $20 \pm 2$  °C hőmérsékletet kell tartani. A hűtési energiát 2 db 50 kW-os léghűtéses folyadékhűtő berendezés szolgáltatja, a szerver hűtését pedig dezinált szerver rack hűtők végzik. A folyadékhűtők a környezeti hőmérséklet függvényében képesek free-cooling üzemmódban működni, ami télen és az átmeneti időszakokban nagymértékben segíti az energiahatékony működést. A helyiség elhelyezkedését az épületen belül 16. ábrán helyeztem el. A szerverterem az épület belsejében, karbantartó műhelyek és közös helyiségek közt helyezkedik el, amelyek mindegyike fűtött.



**16. ÁBRA: A SZERVERTEREM ELHELYEZKEDÉSE AZ ÉPÜLETEN BELÜL**

### 3.1.2. Kiindulási adatok

A feladat elvégzéséhez az alábbi kiindulási adatok állnak rendelkezésre:

- Hűtőgépek és beltéri egységek típusa, teljesítménye, száma, hűtési rendszer alapadatai

A hűtőgépek a tetőn elhelyezett scroll kompresszoros, léghűtéses folyadékhűtők free-cooling opcióval, R410a hűtőközeggel. A víz-glikol keverékű hűtőfolyadék hőfoklépcsője 6/12 °C. A beltéri egységek 4 db APC típusú, 8 ventilátoros szerver rack hűtők, egyenként max. 25 kW hűtési kapacitással. A használt szerver hűtő az 2. ábrán, a hűtőgépek főbb adatai pedig az 1. táblázatban láthatók.



**17. ÁBRA: APC TÍPUSÚ SZERVER RACK HŰTŐ**

**1. TÁBLÁZAT: HŰTŐGÉPEK FŐBB ADATAI**

| Típus | Darab | Kompresszor típusa  | Névleges teljesítmény | Névleges EER (35°C) |
|-------|-------|---------------------|-----------------------|---------------------|
| ACM   | 2 db  | Scroll (inverteres) | 50 kW/db              | 2,98                |

- Mérési adatok az 2. táblázatban foglaltak szerint

**2. TÁBLÁZAT: KIINDULÁSI MÉRÉSI ADATOK ÖSSZEFOGLALÁSA**

| Megnevezés                                         | Mért.egység          | Mérőeszköz                                            | Adat granularitás |
|----------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------|-------------------|
| Hűtőgépek villamos teljesítménye                   | kW <sub>vill</sub>   | Schneider Electric PowerLogic PM5100 teljesítménymérő | 15 perc           |
| Szerverterem teljes felvett villamos teljesítménye | kW <sub>vill</sub>   | Schneider Electric PowerLogic PM5100 teljesítménymérő | 15 perc           |
| Beltéri egységek hűtési teljesítményigénye         | kW <sub>hűtési</sub> | Siemens hőmennyiségmérő                               | 15 perc           |
| Külső környezeti hőmérséklet                       | °C                   | Rádiójeles hőmérséklet érzékelő                       | 1 perc            |

A megfelelő kezelhetősége érdekében az adatokat órás átlagokká konvertáltam. A hűtőgép által felvett villamos teljesítményéből és a szolgáltatott hűtési teljesítményből az alábbi képlet segítségével meghatároztam a gépek óránkénti EER értékeit:

$$EER = \frac{P_{hűtési} [kW]}{P_{villamos} [kW]}$$

A meglévő rendszer 2022-re vonatkozó mérési adatainak összefoglalását a 3. táblázatban helyeztem el. A feladat során a két gép adatait közösen kezeltem, a különböző üzemállapotok miatt pedig évszakonkénti bontást alkalmaztam (a téli adatok a 2021. dec - 2022. feb. időszak adatait tartalmazzák).

### 3. TÁBLÁZAT: FŐBB MÉRÉSI ADATOK ÖSSZEFOGLALÁSA

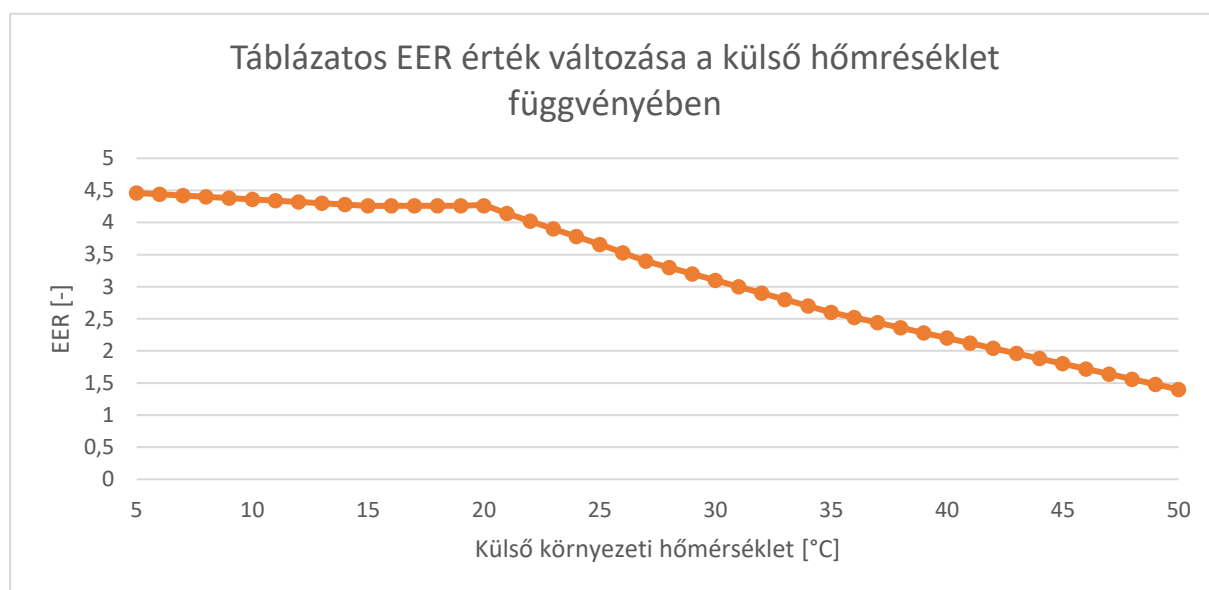
|                                            | Tél    | Tavaszi | Nyár   | Ősz    |
|--------------------------------------------|--------|---------|--------|--------|
| Hűtési energiaigény [kWh]                  | 80.174 | 91.321  | 96.914 | 63.082 |
| Átlagos hűtőteljesítmény [kW]              | 37,12  | 41,36   | 43,89  | 28,88  |
| Hűtőgép villamosenergia-fogyasztása [kWh]  | 15.429 | 20.196  | 27.908 | 16.316 |
| Átlagos felvett villamos teljesítmény [kW] | 7,14   | 9,15    | 12,64  | 7.47   |
| Átlagos hűtőgép részterhelés               | 0,37   | 0,41    | 0,44   | 0,29   |
| Órás EER értékek átlaga                    | 5,59   | 4,75    | 3,5    | 3,81   |

Az adatok feldolgozása után a rendszer üzemállapotára vonatkozóan megállapítható, hogy a szerverterem körüli fűtött helyiségek (a műhelyekben átlagosan 19-21 °C, míg a közös helyiségekben 21-23 °C az operatív hőmérséklet) miatt a hűtési igény a téli időszakban sem csökken jelentősen. Ezt igazolja az a tény is, hogy a januári hétvégi napokat vizsgálva, amikor a fűtés csökkentett üzemmódban üzemel az épületben, a hűtési igényben csaknem 20%-os csökkenés tapasztalható a téli átlaghoz képest. Érdekes továbbá az alacsony őszi és a viszonylagosan alacsony nyári hűtési igény is. Amellett, hogy a karbantartó műhelyek is rendelkeznek split klímával megvalósított hűtéssel, a vállalatnál július közepétől augusztus végéig tart a termelés leállása, amely során sor kerül a rendszerek tervezett karbantartási munkáira, ekkor a szerverek is kisebb terheltséggel működnek, a teremben tartott belső hőmérséklet pedig a 20 ±2 °C egészen 22 ±2 engedik, így csökkentve a rendszer nyári energiafelhasználását. Az őszi alacsony hűtési igény a 2022 őszén tapasztalható enyhe külső hőmérsékletből, valamint a vállalatnál megvalósított gázfogyasztás csökkentését célzó akciók megvalósításából eredhet (fűtés későbbi indítása, csökkentett fűtési üzemmód kibővítése a pénteki napra is, belső tartott hőmérséklet csökkentése). A hűtőgép részterhelési adatokból látszik, hogy a gépek a hűtési igényhez képest nagymértékben túlméretezettek. Ennek oka, hogy

eredetileg a két rendszer két elkülönített szerverhelyiség hűtését volt hivatott ellátni, a jelenleg meglévő közös terem csak egy későbbi átalakítás során jött létre. A hűtési körök előremenő ágai jelenleg egy motoros szeleppel össze vannak kötve, így az egyik gép meghibásodása esetén a másik gép át tudja venni a teljes hűtési igény kiszolgálását.

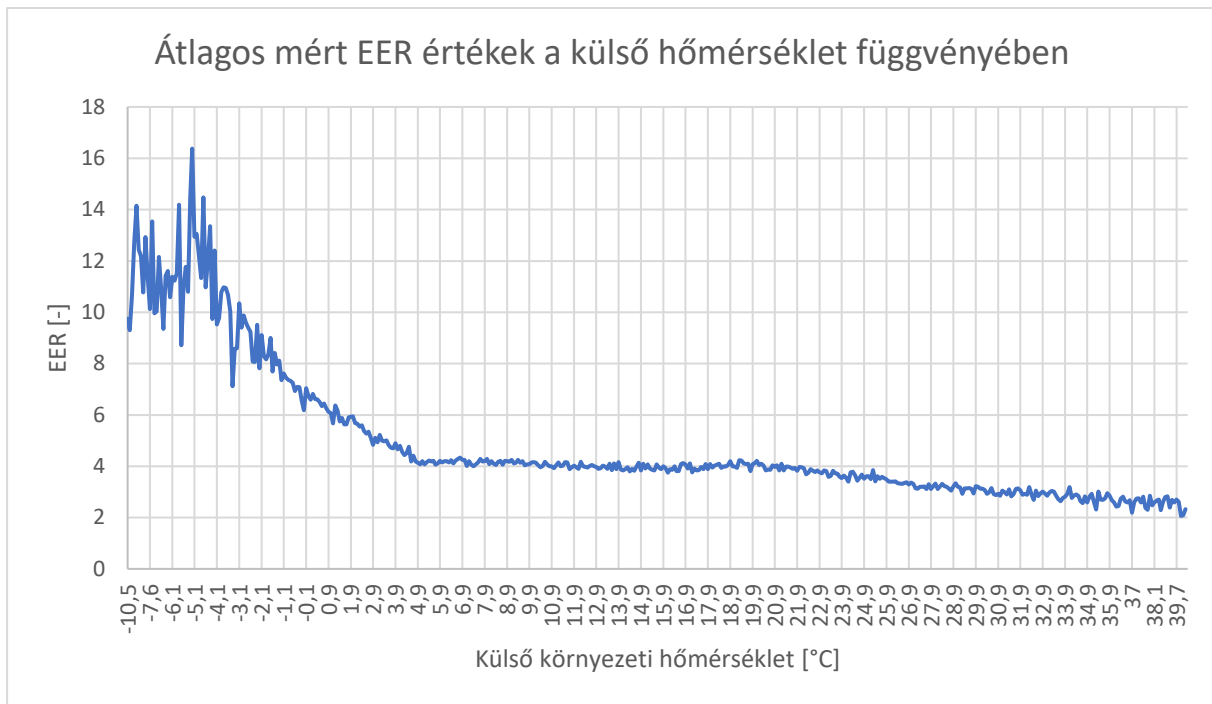
### 3.1.3. Hűtőgépek EER értékei

A gyártótól kapott információk alapján rendelkezésre áll a hűtőgépek táblázatos EER értékei a külső hőmérséklet függvényében. A táblázatos EER értékek diagramját a 18. ábrán helyeztem el.



**18. ÁBRA: EER VÁLTOZÁSA A KÜLSŐ KÖRNYEZETI HŐMÉRSÉKLET FÜGGVÉNYÉBEN**

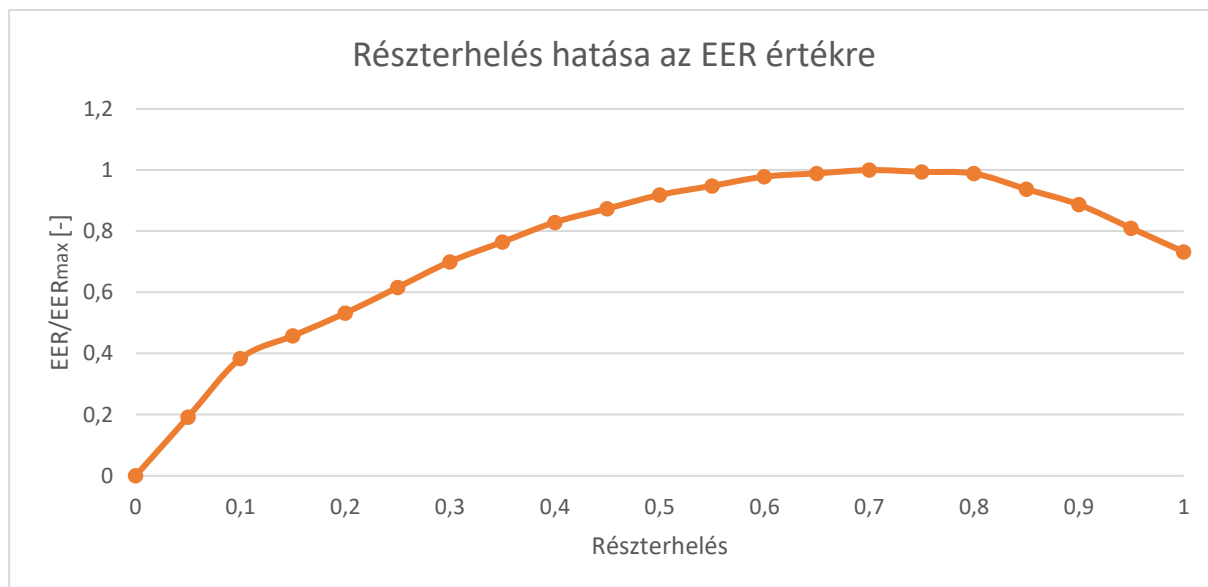
A vizsgált 6/12 °C hőfoklépcsőjű rendszer esetében a gyártó katalógus alapján 5 °C-os külső hőmérsékletnél indul el a free-cooling rendszer, ami -5 °C-nál és ennél alacsonyabb hőmérsékleteknél 100%-ban fedezi a hűtési igényt. A mérési adatok alapján rendelkezésre állnak a valós EER értékek is, amelyek átlagos értékeit a hőmérséklet függvényében a 19. ábrán helyeztem el.



**19. ÁBRA: MÉRT EER ÉRTÉKEK A KÜLSŐ KÖRNYEZETI HŐMÉRSÉKLET FÜGGVÉNYÉBEN**

A mért adatok alapján látható, hogy az EER érték 4 °C alatt a free-cooling üzemből fakadóan rohamosan növekszik, azonban a free-cooling nélküli időszakokban a mért értékek alatta maradnak a táblázatos adatoknak.

A gyártótól kapott információkból rendelkezésre áll a részterhelés hatékonyságra gyakorolt hatása is. Ez a diagram fontos lesz a későbbiekben a tárolóval kiegészített üzem villamosenergia felhasználásának számításakor, hiszen a tároló töltését a leginkább energiahatékony módon a hűtőgép optimális részterhelésénél lehet megtenni. A részterhelés EER értékre gyakorolt hatását a 20. ábrán helyeztem el.

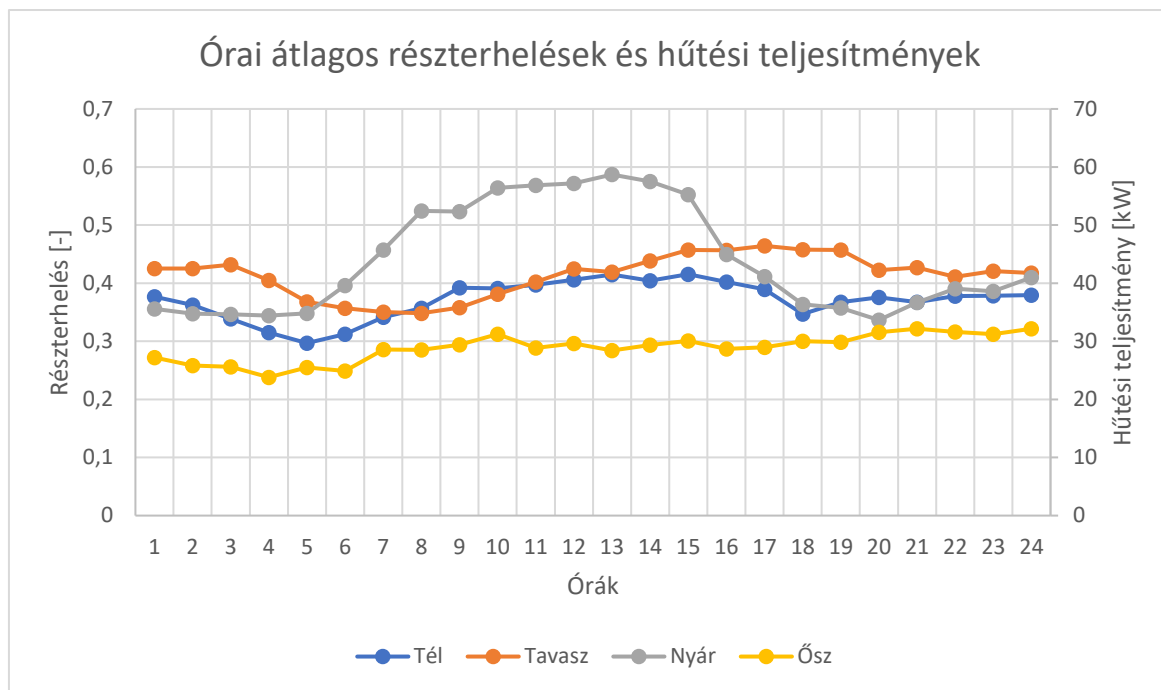


**20. ÁBRA: RÉSZTERHELÉS HATÁSA AZ EER ÉRTÉKRE**

A hűtőgép optimális részterhelése a megadott diagram alapján 70%-os terheltség esetén alakul ki, így a tároló töltése is ezen a terhelésen végezhető el a leginkább energiahatékony módon.

### 3.2. Napon belüli adatok elemzése, tárolási üzemmód és tároló méretének megválasztása

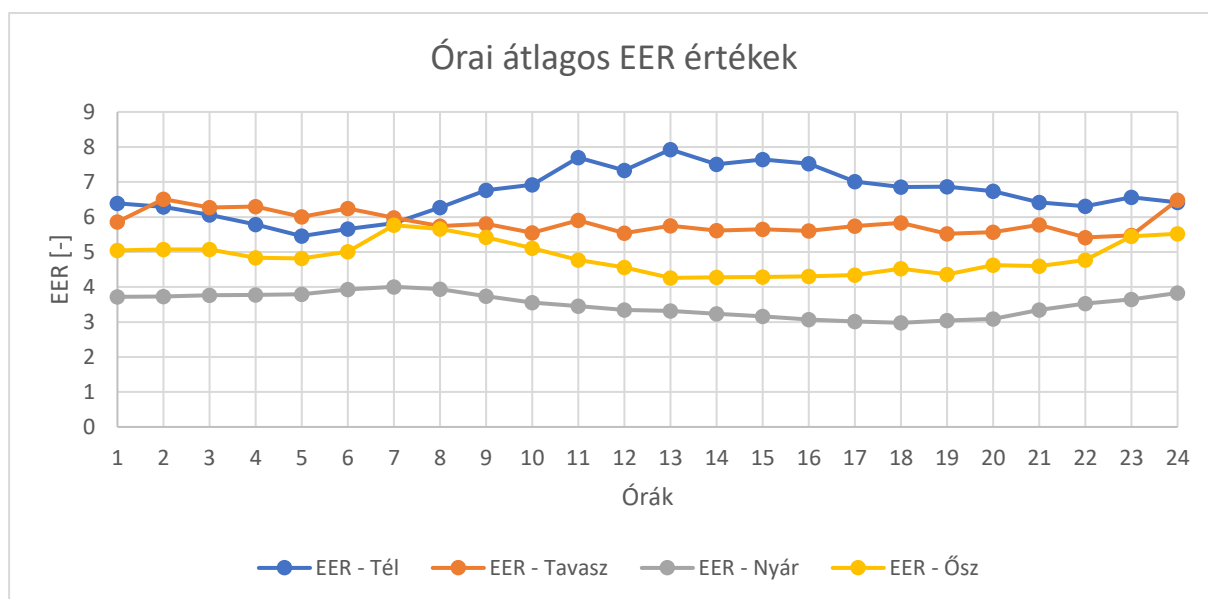
A szakirodalom feldolgozásban ismertetett tároló üzemmódok megválasztásához (14. ábra) megvizsgáltam a rendszer napon belüli hűtési teljesítmény igényét, valamint a hűtőgépek részterhelését. A kapott eredményeket évszakonkénti bontásban a 21. ábrán helyeztem el.



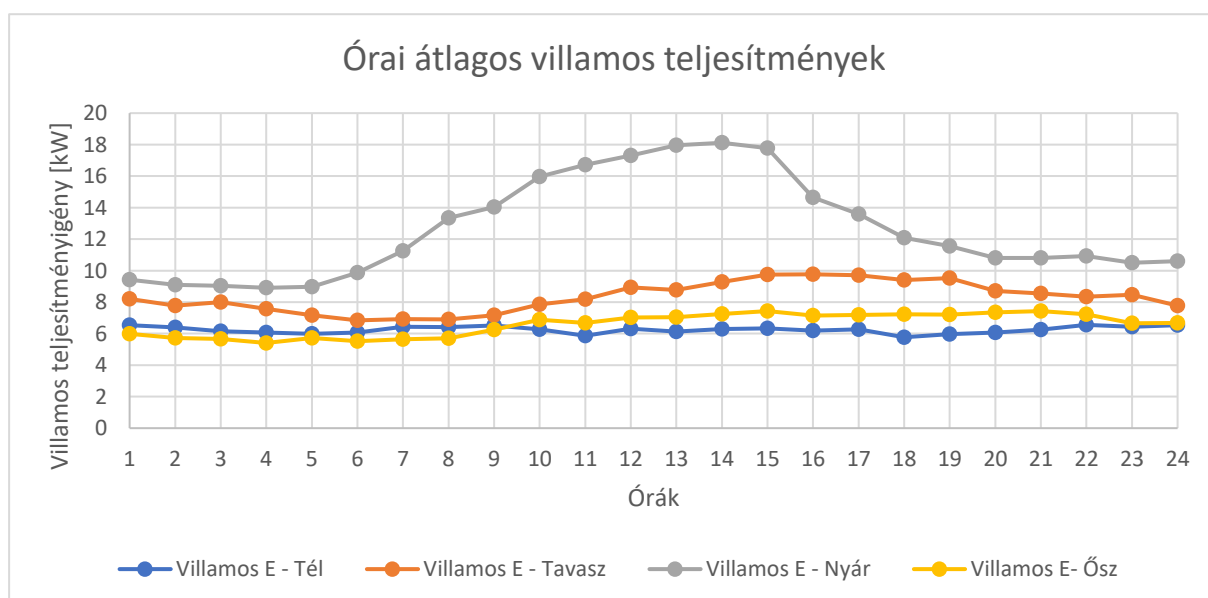
**21. ÁBRA: ÁTLAGOS ÓRAI RÉSZTERHELÉSEK ÉS HŰTÉSI TELJESÍTMÉNYEK**

Az átlagos részterhelés a nyári időszak csúcsidőszakában sem megy 0,6 fölé. Mivel a folyadékhűtő optimális üzeme 0,7-es részterhelésnél valósul meg, így a rendszerhez a legmegfelelőbb kisütési üzemmód a csúcsidőszak teljes lefedése, ami a szakirodalmi kutatás alapján a legnagyobb energiamegtakarítást is eredményezi (hátránya, hogy ilyen módon a legnagyobb a szükséges tároló méret is).

A meglévő rendszer energiafelhasználásának elemzéséhez és a későbbi összehasonlítások elvégzéséhez jó támpontot adnak a napon belüli EER értékek és az átlagos villamos energia fogyasztások vizsgálata. A napon belüli EER értékeket évszakonkénti bontásban a 22. ábrán, a napon belüli átlagos villamos energia fogyasztásokat pedig a 23. ábrán helyeztem el.



**22. ÁBRA: ÁTLAGOS ÓRAI EER ÉRTÉKEK**



**23. ÁBRA: ÁTLAGOS ÓRAI VILLAMOS ENERGIA FOGYASZTÁSOK**

A napon belüli adatok elemzése után kiválasztottam az energiatároló szükséges tárolási kapacitását. Mivel a 23. ábrán szereplő villamos energia fogyasztásokból kiindulva a nyári fogyasztás reggel 5 és este 8 óra közt van a csúcson, így a tároló méretét úgy kell megválasztani, hogy teljes betároltság mellett ezt az időszakot a legnagyobb hűtési igény esetén is le tudja fedni. Az teljesítményadatok alapján a legnagyobb 5-20 óra közötti hűtési energiaigény 1038 kWh-val 2022. aug. 9-én merült fel, így a tároló méretét is erre az értékre választottam meg.

### 3.3. Hőmérsékleti adatok elemzése, jellemző hőmérsékleti profilok kialakítása

A rendszer tárolóval kiegészített üzemének elemzéséhez évszakonként különböző jellemző hőmérsékleti profilokat alakítottam ki, amelyek alapján napi szinten meg lehet határozni a tároló optimális feltöltési és kisütési időpontjait.

Mivel a tároló a leginkább a nagy hőmérséklet ingadozású napokon használható ki, a profilokat a napi órai hőmérsékletek szórása alapján alakítottam ki. A csoportosításhoz kiszámítottam az adott nap óránkénti hőmérsékleteinek szórását:

$$\sigma_{napi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \overline{t_{nap}})^2}{n}}$$

ahol:

i – az órák száma 1-24-ig

$t_i$  – adott órához tartozó átlaghőmérséklet [°C]

$\overline{t_{nap}}$  – napi átlaghőmérséklet [°C]

Majd elosztottam a teljes időszak (évszak) szórás értékeinek átlagával:

$$\text{csoport segédérték} = \frac{\sigma_{napi_j}}{\frac{\sum_{j=1}^m \sigma_{napi_j}}{m}}$$

ahol:

m – adott évszak napjainak száma

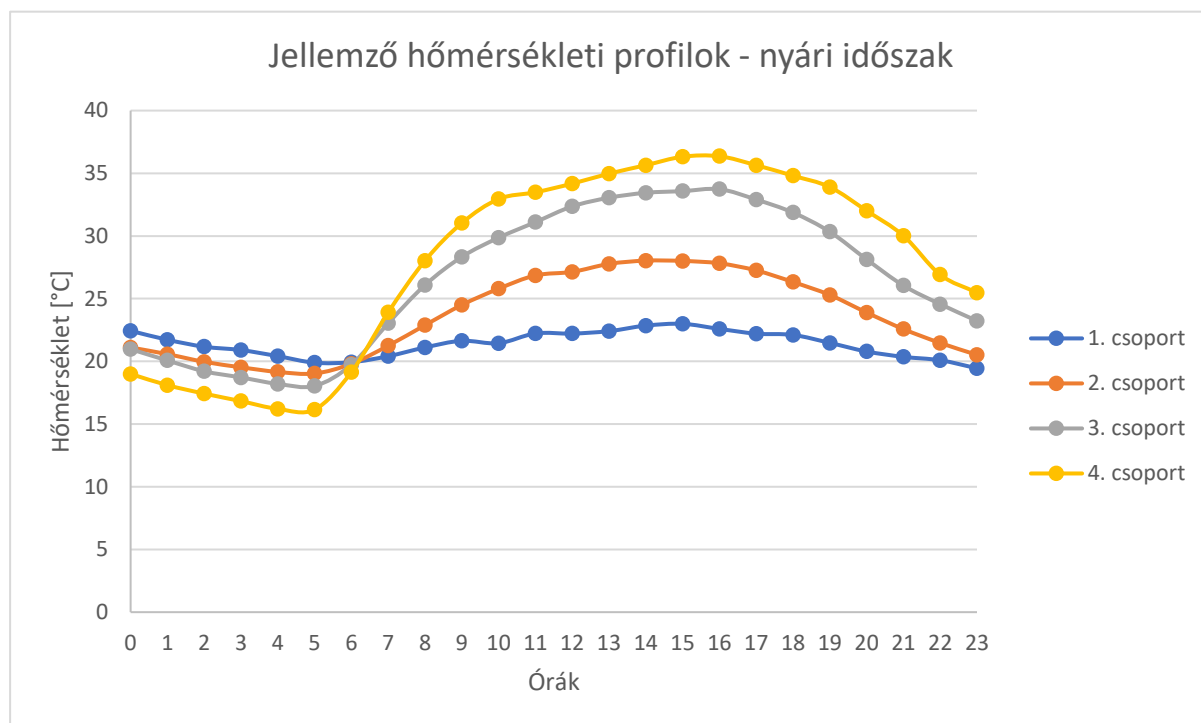
A napokat a kapott eredményekkel minden évszakban 4-4 csoportba soroltam be, a 2. táblázatban foglaltak alapján.

#### 4. TÁBLÁZAT: NAPI HŐMÉRSÉKLETEK CSOPORTOSÍTÁSA

| Csoport segédérték | Csoport |
|--------------------|---------|
| 0-0,25             | 1       |
| 0,25-0,5           | 2       |
| 0,5-0,75           | 3       |
| 0,75-1             | 4       |

Ezzel a módszerrel az 1-es csoportba kerülnek a legkisebb, a 4-es csoportba pedig a legnagyobb napi hőingással rendelkező napok. Mivel a folyadékhűtő EER értékét nagymértékben befolyásolja a külső hőmérséklet és a hűtési tároló kihasználhatóságát

nagymértékben befolyásolja a napi hőingás, így a modell kialakításához megfelelő eredményt kapunk. Az ilyen módon kapott csoportok napon belüli átlagos hőmérsékleteit a nyári időszak esetében a 24. ábrán, a többi évszak esetében pedig az 1. melléklet 1-3. ábráin helyeztem el.



**24. ÁBRA: NYÁRI IDŐSZAK JELLEMZŐ HŐMÉRSÉKLETI CSOPORTOSÍTÁSA**

A hőmérsékleti csoportok kialakítása után minden nap esetében megvizsgáltam a kialakított csoportok órás értékeinek korrelációját a csoportba tartozó napok órás értékeivel. A korrelációs együtthatók átlagát, maximum és minimum értékét, valamint az adott csoportba tartozó napok számát az 5. táblázatban helyeztem el.

**5. TÁBLÁZAT: NAPI ÁTLAGOS SZÓRÁSOK KORRELÁCIÓI A TELJES ÉVSZAK ÁTLAGAIVAL**

| Évszak  | Csoport | Átlagos korr. együttható | Max. korr. együttható | Min. korr. együttható | Csoportba tartozó napok száma |
|---------|---------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Tél     | 1       | 0,66                     | 0,94                  | 0,1                   | 15                            |
|         | 2       | 0,78                     | 0,96                  | 0,36                  | 36                            |
|         | 3       | 0,86                     | 0,98                  | 0,6                   | 28                            |
|         | 4       | 0,9                      | 0,96                  | 0,65                  | 11                            |
| Tavaszi | 1       | 0,7                      | 0,91                  | 0,11                  | 12                            |
|         | 2       | 0,89                     | 0,99                  | 0,64                  | 37                            |
|         | 3       | 0,96                     | 0,99                  | 0,89                  | 28                            |
|         | 4       | 0,98                     | 0,94                  | 0,94                  | 15                            |
| Nyár    | 1       | 0,68                     | 0,97                  | 0,44                  | 5                             |
|         | 2       | 0,87                     | 0,99                  | 0,34                  | 40                            |

|     |   |      |      |      |    |
|-----|---|------|------|------|----|
|     | 3 | 0,95 | 1    | 0,43 | 43 |
|     | 4 | 0,98 | 0,95 | 0,95 | 4  |
| Ősz | 1 | 0,74 | 0,92 | 0,44 | 22 |
|     | 2 | 0,83 | 0,97 | 0,38 | 26 |
|     | 3 | 0,92 | 0,99 | 0,73 | 22 |
|     | 4 | 0,97 | 0,94 | 0,94 | 21 |

A napi adatok jó korrelációt mutatnak a csoportok átlagaival, egyedül az 1-es csoportok (legkisebb hőingású napok) esetében tapasztalható 0,7-nél alacsonyabb korreláció, azonban kevés számú nap tartozik ezekbe a csoportokba és a tároló üzeme tekintetében is ezek a legkevésbé meghatározó napok. Ezek alapján a létrehozott hőmérsékleti profilok jó alapot adnak a tároló töltési és kisütési időpontjainak meghatározásához.

### 3.4. Tároló feltöltési és kisütési időpontjainak megválasztása

Az energiamegtakarítás a tárolóval kiegészített rendszernél elsősorban abból a tényből adódik, hogy az éjszakai/hajnali órákban a tároló feltöltését alacsonyabb külső környezeti hőmérséklet mellett jobb EER érték mellett lehet elvégezni, mint a csúcsideszakban. Töltéskor a tároló a rendszerben fogyasztóként vesz részt, kisütéskor pedig egy másodlagos energiaforrásként, így a folyadékhűtő szabályozásába nem történik beavatkozás, az továbbra is történhet az előremenő-visszatérő hőmérsékletek alapján, csak a tároló ideális töltési és kisütési időpontjait kell meghatározni. A napi energiamegtakarítás a szakirodalom alapján az alábbi célfüggvény segítségével határozható meg: (Andrássy, 2021)

$$\sum_{nap} E_h = \sum_{nap} \left( F_{t,nélkül} * \frac{Q_h}{EER_{t,nélkül}} + F_{t,tölt} * \frac{Q_h + Q_t}{EER_{t,tölt}} + F_{t,kisüt} * \frac{Q_h - Q_k}{EER_{t,kisüt}} \right)$$

ahol:

$Q_h$  - a rendszer órás hűtési teljesítményigénye [kW]

$Q_t$  - a tároló töltésére fordított órás hűtési teljesítmény [kW]

$Q_k$  - a tároló kisütéséből nyert órás hűtési teljesítmény [kW]

$EER_{t,nélkül}$ ;  $EER_{t,tölt}$ ;  $EER_{t,kisüt}$  - a tároló nélküli, tároló töltése és tároló kisütése közben meghatározott EER értékek [-]

$F_{t,nélkül}$ ;  $F_{t,tölt}$ ;  $F_{t,kisüt}$  - a tároló nélküli, tároló töltési és tároló kisütési üzemi segédmatrixai, amelyek a vizsgált időintervallumokon belül 1 értéket vesznek fel, ha az adott üzemi megvalósul és 0 értéket, ha másik üzemi valósul meg

A vizsgált rendszerben a segédmatrixok értékeit a kialakított hőmérsékleti profilok alapján állapítottam meg, az alábbiak szerint:

$$F_{t,tölt} = \begin{cases} 1, ha: \frac{\widetilde{t_{i,nap}}}{t_{csoport,nap}} < 1 \\ 0, ha: \frac{\widetilde{t_{i,nap}}}{t_{csoport,nap}} > 1 \\ 0, ha: E_{t,i-1} = E_{t,max} \end{cases}$$

$$F_{t,kisüt} = \begin{cases} 1, ha: \frac{\widetilde{t_{i,nap}}}{t_{csoport,nap}} > 1 \\ 0, ha: \frac{\widetilde{t_{i,nap}}}{t_{csoport,nap}} < 1 \\ 0, ha: E_{t,i-1} = 0 \end{cases}$$

ahol:

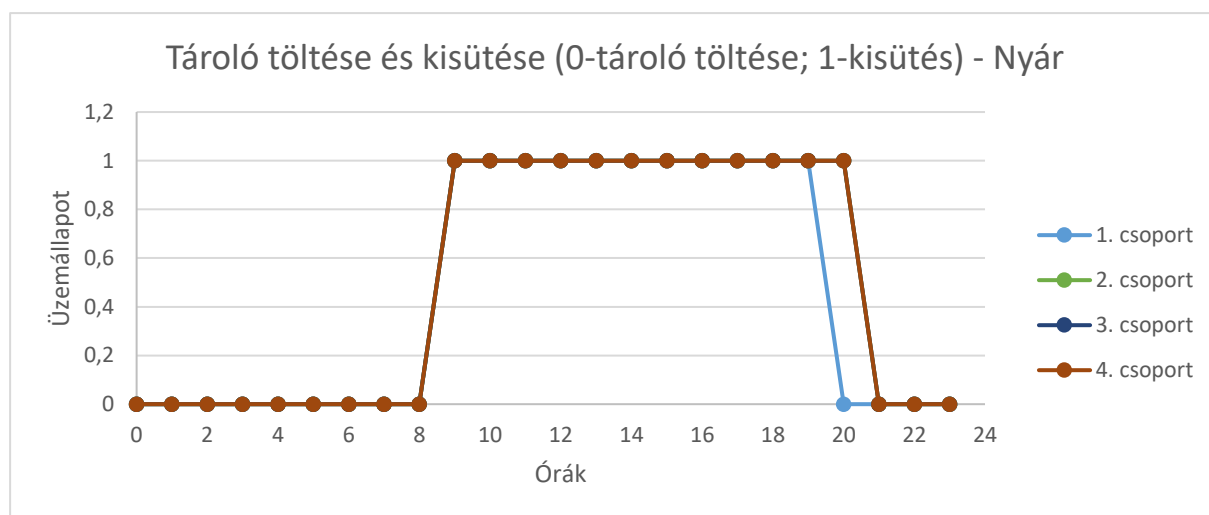
$t_{i,nap}$  – a vizsgált napon az i-ik óra átlaghőmérséklete

$\widetilde{t_{csoport,nap}}$  – a vizsgált nap csoportjában a csoport órás hőmérsékleti értékeinek mediánja

$E_{t,i}$  – az tárolóban tárolt energia az i-ik órában [kWh]

$E_{t,max}$  – a tárolóban eltárolható maximális energia [kWh]

Az ilyen módon kialakított töltési/kisütési üzemállapotokat a nyári időszakra vonatkozóan a 25. ábrán foglaltam össze, a többi évszakét pedig az 1. melléklet 4-6. ábráin.



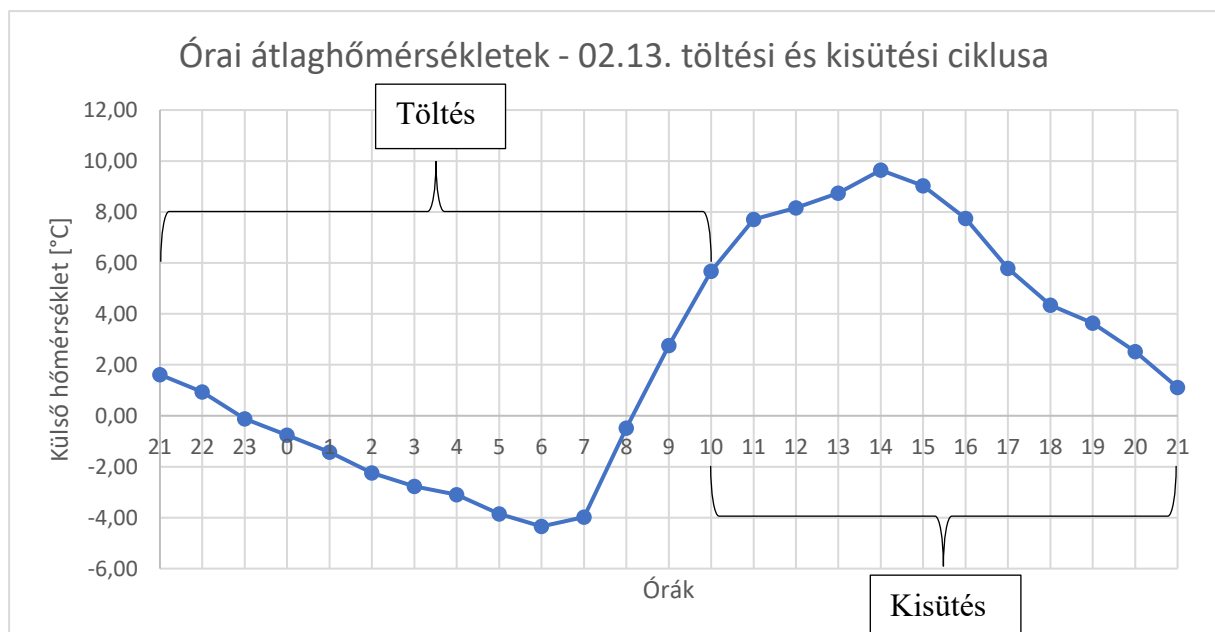
**25. ÁBRA: TÁROLÓ TÖLTÉSÉNEK IS KISÜTÉSÉNEK IDŐPONTJAI A NYÁRI IDŐSZAK HŐMÉRSÉKLETI CSOPORTJAINAK ESETÉBEN**

### 3.5. Tároló üzemének vizsgálata

#### 3.5.1. Tároló üzemének vizsgálata – teljes csúcsigény lefedése

A tároló napon belüli működésének részletes vizsgálatát egy jellemző téli napon (az adott nap órai átlaghőmérsékletének, a teljes téli átlaggal jól korreláló nap) esetében ismertetem, amikor a csúcsideszakban a hűtési igényt teljes egészében fedezni tudja a tároló. A választott nap február 13-a, amely órai átlaghőmérsékleteinek korrelációja a teljes nyári időszak átlagaival 0,99.

A nap órai átlaghőmérsékleteit a 26. ábrán helyeztem el. A töltési és kisütési ciklusok működéséből adódóan a nap elemzését az azt megelőző nap töltési időszakával együtt végzem el.



**26. ÁBRA: ÓRAI ÁTLAGHŐMÉRSÉKLETEK - 02.13. TÖLTÉSI ÉS KISÜTÉSI CIKLUS**

A 3.3. fejezetben taglalt hőmérsékleti csoportok alapján a 02.12-i nap a 3-as, a 12.13-i nap pedig a 4-es csoportba tartozik, így a tároló töltése 21 órától másnap délelőtt 10-ig, a kisütés pedig 10-22 óra közt valósul meg. A tároló kisütésével a választott napon a teljes hűtési csúcsigény lefedhető.

A tároló töltési módjának meghatározása során abból indultam ki, hogy a hűtőgépek 0,7-es részterhelés mellett működnek a leghatékonyabban, így a tároló töltése is ilyen üzemállapot mellett a leghatékonyabb (az alap hűtési igény kiszolgálása mellett). A kisütés során az energiamegtakarítás maximalizálása abban az esetben lehetséges, ha a kisütést a

legnagyobb arányban a legmelegebb órákban végezzük el. Mivel a cél a keretfeltételek mellett a maximális energiahatékonyság elérése, így determinisztikus módon feltételeztem az adott napra vonatkozó hűtési igény és hőmérsékleti értékek pontos ismeretét, az előrejelzés hibájával pedig jelen dolgozat keretében nem kalkuláltam.

Amennyiben a tároló teljes egészében lefedi a csúcsidőszaki hűtési igényt, a töltés és kisütés matematikai megfogalmazása az előzőek alapján a következőképp történhet:

Töltés:

$$Q_{t,i} = \begin{cases} (0,7 * Q_{max}) - Q_{h,i}, & ha: Q_{h,i} < 0,7 * Q_{max} \\ E_{t,max} - E_{t,i}, & ha: (0,7 * Q_{max}) - Q_{h,i} + E_{t,i} > E_{t,max} \\ 0, & ha: Q_{h,i} > 0,7 * Q_{max} \end{cases}$$

Kisütés:

$$Q_{k,i} = \begin{cases} Q_{h,i}, & ha: Q_{h,i} < E_{t,i} \\ E_{t,i}, & ha: Q_{h,i} > E_{t,i} \end{cases}$$

ahol:

$Q_{t,i}$  - a tároló átlagos töltési teljesítménye az i-ik órában [kW]

$Q_{k,i}$  - a tároló átlagos kisütési teljesítménye az i-ik órában [kW]

$Q_{h,i}$  - a rendszer i-ik órai átlagos hűtési teljesítményigénye [kW]

$Q_{max}$  - a hűtőgépek maximális hűtési teljesítménye (100 kW) [kW]

$E_{t,i}$  - a tárolóban tárolt energia az i-ik órában [kWh]

$E_{t,max}$  - a tárolóban eltárolható maximális energia [kWh]

A vizsgált nap számítási eredményeit a fenti összefüggések alapján a 6. táblázatban helyeztem el.

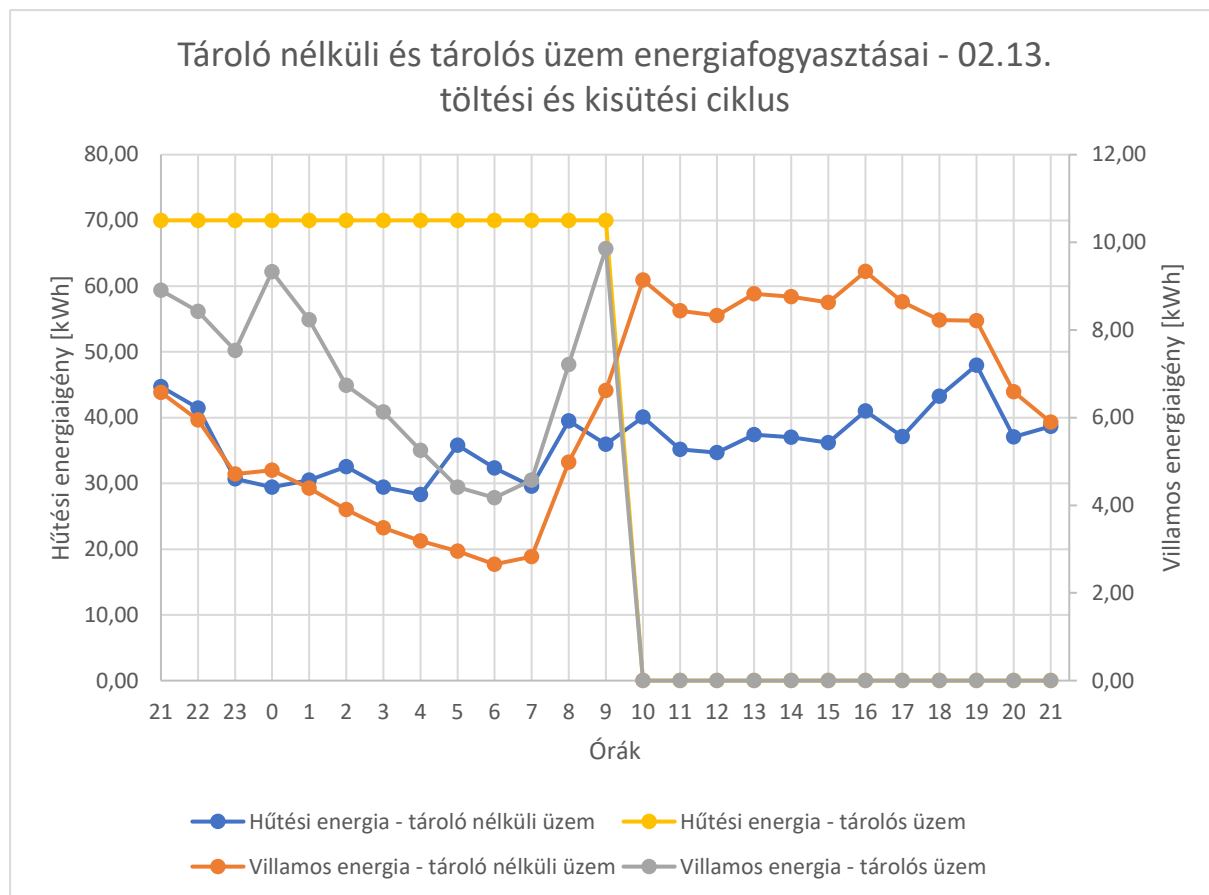
**6. TÁBLÁZAT: TÁROLÓS ÉS TÁROLÓ NÉLKÜLI ÜZEMÁLLAPOTOK – 02.12.-02.13.**

|     |                          |                                   | Tároló nélküli üzem                |     |     |                     | Tárolós üzem                       |     |     |                     |
|-----|--------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----|-----|---------------------|------------------------------------|-----|-----|---------------------|
| Óra | Tárolás/kisütés<br>(0;1) | $T_{k\ddot{u}ls\ddot{o}}$<br>[°C] | $E_{h\ddot{u}t\ddot{e}s}$<br>[kWh] | RT  | EER | $E_{vill}$<br>[kWh] | $E_{h\ddot{u}t\ddot{e}s}$<br>[kWh] | RT  | EER | $E_{vill}$<br>[kWh] |
| 21  | 0                        | 1,62                              | 44,71                              | 0,4 | 6,8 | 6,58                | 70,00                              | 0,7 | 7,9 | 8,91                |
| 22  | 0                        | 0,94                              | 41,44                              | 0,4 | 7,0 | 5,95                | 70,00                              | 0,7 | 8,3 | 8,42                |
| 23  | 0                        | -0,12                             | 30,68                              | 0,3 | 6,5 | 4,71                | 70,00                              | 0,7 | 9,3 | 7,53                |

|      |   |       |       |     |      |       |       |     |      |      |
|------|---|-------|-------|-----|------|-------|-------|-----|------|------|
| 0    | 0 | -0,76 | 29,40 | 0,4 | 6,1  | 4,80  | 70,00 | 0,7 | 7,5  | 9,33 |
| 1    | 0 | -1,43 | 30,50 | 0,4 | 6,9  | 4,39  | 70,00 | 0,7 | 8,5  | 8,23 |
| 2    | 0 | -2,25 | 32,55 | 0,4 | 8,3  | 3,90  | 70,00 | 0,7 | 10,4 | 6,74 |
| 3    | 0 | -2,78 | 29,44 | 0,3 | 8,4  | 3,49  | 70,00 | 0,7 | 11,4 | 6,13 |
| 4    | 0 | -3,10 | 28,30 | 0,3 | 8,9  | 3,19  | 70,00 | 0,7 | 13,3 | 5,26 |
| 5    | 0 | -3,85 | 35,80 | 0,4 | 12,1 | 2,95  | 70,00 | 0,7 | 15,9 | 4,41 |
| 6    | 0 | -4,34 | 32,33 | 0,3 | 12,2 | 2,65  | 70,00 | 0,7 | 16,8 | 4,17 |
| 7    | 0 | -3,98 | 29,56 | 0,3 | 10,5 | 2,83  | 70,00 | 0,7 | 15,3 | 4,58 |
| 8    | 0 | -0,49 | 39,49 | 0,4 | 7,9  | 4,98  | 70,00 | 0,7 | 9,7  | 7,21 |
| 9    | 0 | 2,75  | 35,96 | 0,4 | 5,4  | 6,62  | 70,00 | 0,7 | 7,1  | 9,86 |
| 10   | 1 | 5,67  | 40,07 | 0,4 | 4,4  | 9,14  | 0,00  | 0   | 0,0  | 0,00 |
| 11   | 1 | 7,71  | 35,19 | 0,4 | 4,2  | 8,44  | 0,00  | 0   | 0,0  | 0,00 |
| 12   | 1 | 8,16  | 34,68 | 0,3 | 4,2  | 8,33  | 0,00  | 0   | 0,0  | 0,00 |
| 13   | 1 | 8,74  | 37,43 | 0,4 | 4,2  | 8,82  | 0,00  | 0   | 0,0  | 0,00 |
| 14   | 1 | 9,64  | 37,02 | 0,4 | 4,2  | 8,76  | 0,00  | 0   | 0,0  | 0,00 |
| 15   | 1 | 9,02  | 36,18 | 0,4 | 4,2  | 8,63  | 0,00  | 0   | 0,0  | 0,00 |
| 16   | 1 | 7,74  | 41,00 | 0,4 | 4,4  | 9,33  | 0,00  | 0   | 0,0  | 0,00 |
| 17   | 1 | 5,79  | 37,12 | 0,4 | 4,3  | 8,65  | 0,00  | 0   | 0,0  | 0,00 |
| 18   | 1 | 4,33  | 43,25 | 0,4 | 5,3  | 8,23  | 0,00  | 0   | 0,0  | 0,00 |
| 19   | 1 | 3,64  | 47,99 | 0,5 | 5,8  | 8,21  | 0,00  | 0   | 0,0  | 0,00 |
| 20   | 1 | 2,52  | 37,08 | 0,4 | 5,6  | 6,59  | 0,00  | 0   | 0,0  | 0,00 |
| 21   | 1 | 1,11  | 38,69 | 0,4 | 6,6  | 5,90  | 0,00  | 0   | 0,0  | 0,00 |
| Sum: | - | -     | 905,9 | -   | -    | 156,1 | 910   | -   | -    | 90,8 |

A töltési/kisütési ciklus óráinak villamosenergia-fogyasztását vizsgálva a free-cooling időszak teljes kihasználása miatt a tároló alkalmazásával jelentős, 42 %-os javulás

tapasztalható. A tároló és tároló nélküli üzemek működésére vonatkozó főbb paramétereket a 27. ábrán helyeztem el.



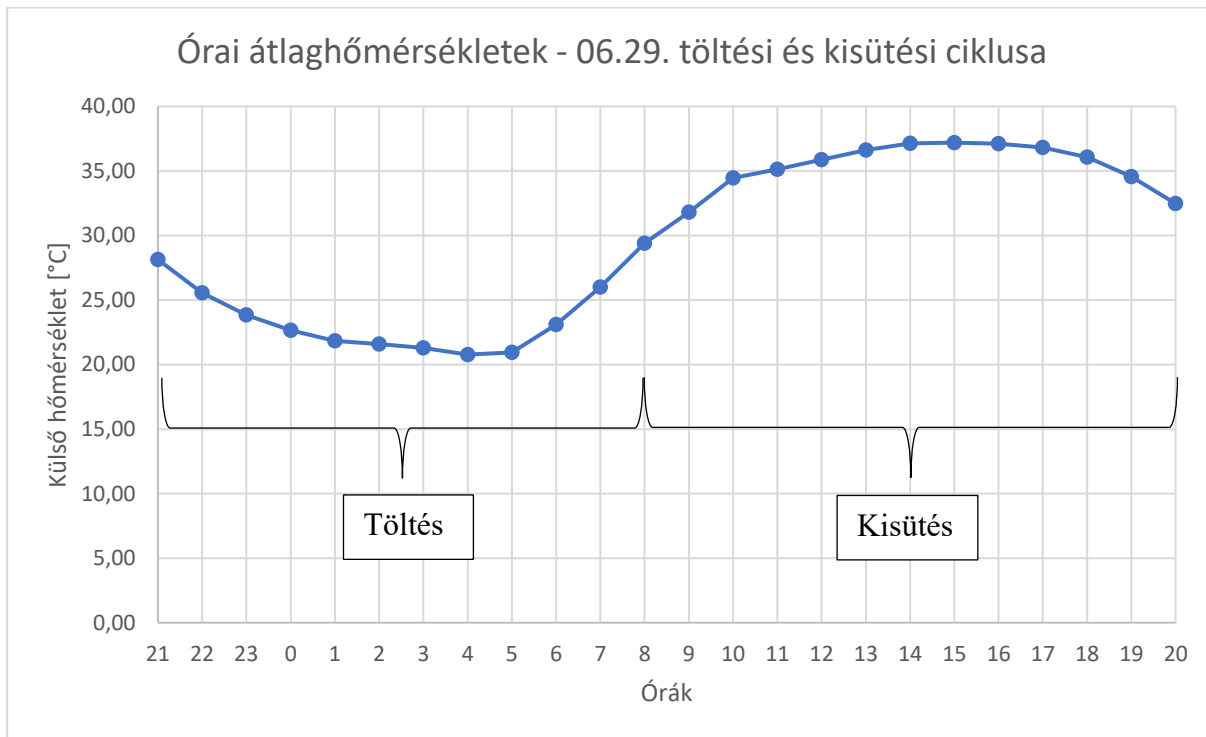
**27. ÁBRA: HŰTÉSI ENERGIAIGÉNYEK ÉS VILLAMOS ENERGIAIGÉNYEK TÁROLÓ NÉLKÜLI ÉS TÁROLÓS ÜZEMBEN – 02.13.**

### 3.5.2. Tároló üzemének vizsgálata – csúcsgény részleges lefedése

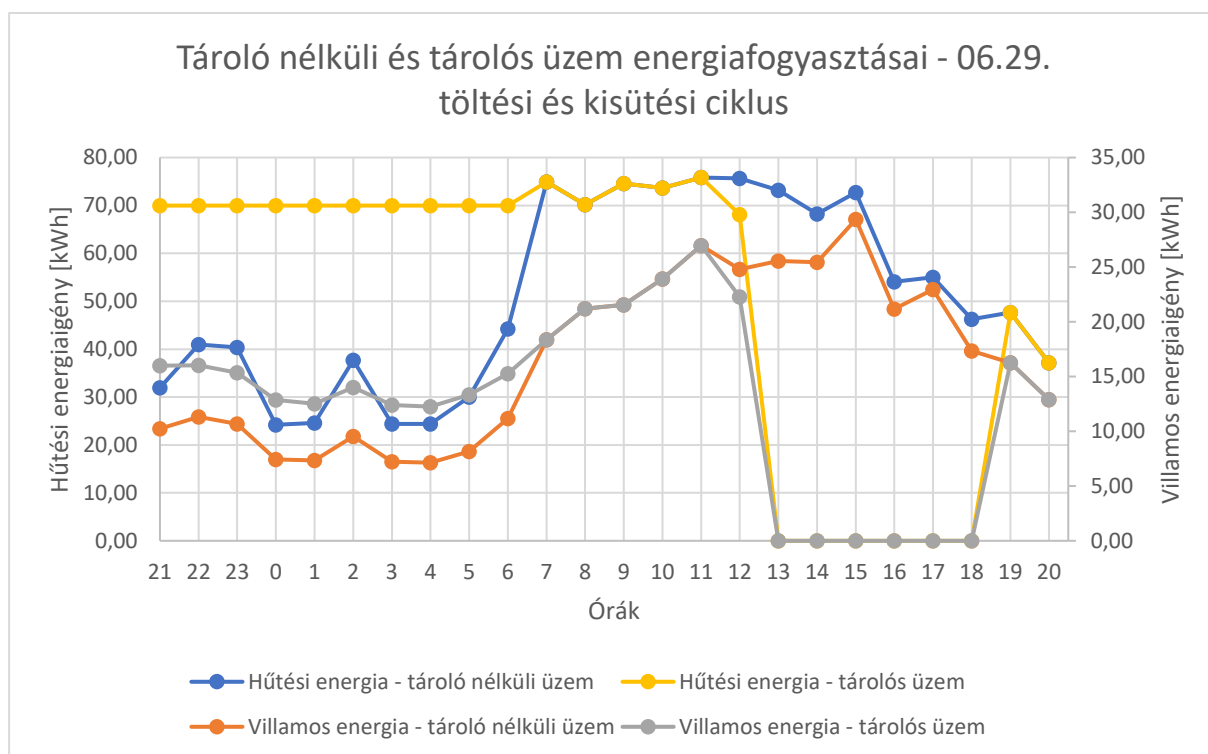
A csúcsgény részleges lefedésekor a tárolóban lévő energiát a hőmérséklet és a hűtési igény predikciója segítségével lehet a leghatékonyabban felhasználni. Mivel a cél az energiahatékonyság maximalizálása, a kisütést először a legmelegebb hőmérsékletű órában, majd sorban a többi óra során kell elvégezni. Ennek megfelelően a számítások során a csúcsidezőszak részleges lefedésekor a hőmérséklet és a hűtési igény determinisztikus predikcióját figyelembevéve (amely során a predikció hibájával nem számoltam), a hőmérséklet alapján prioritizáltam a kisütés időpontjait.

A részleges csúcsgény fedezésének bemutatására egy jellemző nyári napot, június 29-t választottam, amelynek az órás átlagos hőmérsékleti értékeinek és a teljes nyári időszak értékeinek korrelációja 0,98. A naphoz kapcsolódó töltési és kisütési ciklus hőmérsékleti

lefutását a 28. ábrán, a hűtési-és villamos energiaigények alakulását a 29. ábrán, míg a napra vonatkozó pontos számítási értékeket az 1. melléklet 1. táblázatában helyeztem el. A hőmérsékleti profilok alapján mind a két nap a 3. csoportba tartozik, amely alapján a töltés 21-8 óra közt, a kisütés pedig 8-21 óra közt történik.



**28. ÁBRA: ÓRAI ÁTLAGHŐMÉRSÉKLETEK - 06.29. TÖLTÉS ÉS KISÜTÉSI CIKLUS**



**29. ÁBRA: HŰTÉSI ENERGIAIGÉNYEK ÉS VILLAMOS ENERGIAIGÉNYEK TÁROLÓ NÉLKÜLI ÉS TÁROLÓS ÜZEMEN – 06.29.**

A tároló működésében látható, hogy annak ellenére, hogy a kisütési időszak már reggel 8 órakor elindul, a tárolóban lévő energia a hőmérsékleti és a hűtési igény predikció segítségével csak a legmelegebb hőmérsékletű órákban kerül felhasználásra, ezzel maximalizálva az energiahatékonyságot. Ennek megfelelően a tároló nélküli és a tárolós üzem energiafelhasználásai a kisütési időszakban 8-11 és 19-20 óra közt megegyeznek.

### 3.5.3. Energiamegtakarítási eredmények a teljes év során

- Téli időszak

Az időszak tárolós és tároló nélküli főbb paramétereit a 7. táblázatban helyeztem el.

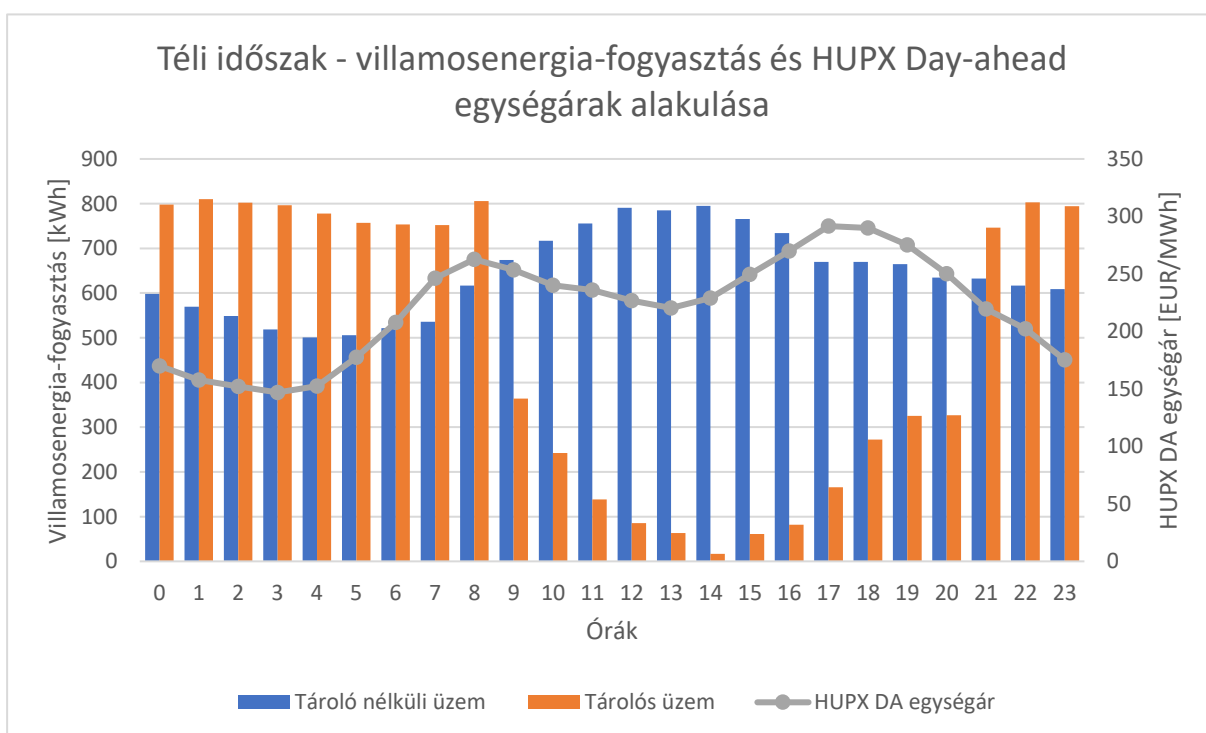
**7. TÁBLÁZAT: TÉLI IDŐSZAK FŐBB PARAMÉTEREI**

|                                            | Tároló nélküli üzem | Tárolós üzem |
|--------------------------------------------|---------------------|--------------|
| Hűtési energiaigény [kWh]                  | 80.174              | 80.240       |
| Hűtőgép villamosenergia-fogyasztása [kWh]  | 15.429              | 11.539       |
| Átlagos részterhelés (álló üzemmód nélkül) | 0,37                | 0.61         |
| Átlagos EER                                | 5,59                | 7,64         |

|                                                                   |           |         |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
| Villamosenergia-költség (HUPX Day-Ahead egységárak alapján) [HUF] | 1 527 932 | 798 106 |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|---------|

Az időszak nagy előnye, hogy az éjszakai órákban a tárolós üzemmél a hűtőgépek free-cooling üzemmódja nagyobb mértékben használható ki. Az éjszakai és a hajnali órákban tárolós üzem mellett az átlagos EER eléri a 8-9-es értékeket is, míg tároló nélküli üzemből ez a szám 5-6 körül alakul. Ennek megfelelően az időszak alatt jelentős, 25 %-os villamosenergia megtakarítás érhető el.

Az időszak órás villamosenergia-fogyasztásait a HUPX Day-Ahead villamosenergia-egységárakkal együtt a 30. ábrán helyeztem el. Az ábrán látható, hogy a tárolós üzemből nagyobb mértékben kerülnek kihasználásra az éjszakai és hajnali órákban jelentkező alacsonyabb HUPX egységárak, így a tároló használatával az időszak során a villamosenergia-költség 48 %-ban csökkenthető. A tároló használata a vizsgált rendszerrel a téli időszakban a viszonylagosan magas és állandó hűtési igény, illetve a free-cooling kihasználásából fakadóan különösen előnyösnek bizonyulhat.



**30. ÁBRA: TÉLI IDŐSZAK VILLAMOSENERGIA-FOGYASZTÁSA ÉS HUPX DA EGYSÉGÁRAK ALAKULÁSA**

- Tavaszi időszak

## 8. TÁBLÁZAT: TAVASZI IDŐSZAK FŐBB PARAMÉTEREI

|                                                                      | Tároló nélküli<br>üzem | Tárolós üzem |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------|
| Hűtési energiaigény [kWh]                                            | 91.321                 | 91.537       |
| Hűtőgép villamosenergia-fogyasztása [kWh]                            | 20.196                 | 16.200       |
| Átlagos részterhelés (álló üzemmód nélkül)                           | 0,41                   | 0,62         |
| Átlagos EER                                                          | 4,75                   | 5,97         |
| Villamosenergia-költség (HUPX Day-Ahead<br>egységárak alapján) [HUF] | 1.854.932              | 1.386.930    |

A tavaszi időszakban 20 %-os villamos energia és 25 %-os költségmegtakarítás lenne elérhető a tárolós üzemmóddal. Az átmeneti időszak során elsősorban azokon a napokon lehet jól kihasználni a tároló lehetőségeit, amelyeknél éjszaka és a hajnali órákban részleges free-cooling üzemmód mellett feltölthető a tároló, napközben pedig a magasabb (8-10 °C körüli) hőmérsékletek esetén kisüthető. Az órai villamosenergia fogyasztások és a HUPX Day-Ahead egységárak alakulását az 1. melléklet 7. ábráján helyeztem el.

- Nyári időszak

## 9. TÁBLÁZAT: NYÁRI IDŐSZAK FŐBB PARAMÉTEREI

|                                                                      | Tároló nélküli<br>üzem | Tárolós üzem |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------|
| Hűtési energiaigény [kWh]                                            | 96.914                 | 96.936       |
| Hűtőgép villamosenergia-fogyasztása [kWh]                            | 27.908                 | 22.033       |
| Átlagos részterhelés (álló üzemmód nélkül)                           | 0,44                   | 0,65         |
| Átlagos EER                                                          | 3,5                    | 4,5          |
| Villamosenergia-költség (HUPX Day-Ahead<br>egységárak alapján) [HUF] | 4.231.863              | 3.338.671    |

A nyári időszak során a hűtőgépek egyáltalán nem működtek free-cooling üzemmódban, így az EER javulás kizárólag a hőmérséklet és a részterhelés hatásából ered. Ebből kifolyólag, bár az energiamegtakarítás (21 %) és a költségmegtakarítás (21 %) százalékos mértéke elmarad a téli időszaktól, a megtakarítás értékét figyelembe véve a legnagyobb költségcsökkenés ekkorra

tehető. Az órai villamosenergia fogyasztások és a HUPX Day-Ahead egységárak alakulását az 1. melléklet 8. ábráján helyeztem el.

- Őszi időszak

**10. TÁBLÁZAT: ŐSZI IDŐSZAK FŐBB PARAMÉTEREI**

|                                                                   | Tároló nélküli<br>üzem | Tárolós üzem |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------|
| Hűtési energiaigény [kWh]                                         | 63.082                 | 63.651       |
| Hűtőgép villamosenergia-fogyasztása [kWh]                         | 16.316                 | 11.499       |
| Átlagos részterhelés (álló üzemmód nélkül)                        | 0,29                   | 0,57         |
| Átlagos EER                                                       | 3,81                   | 5,4          |
| Villamosenergia-költség (HUPX Day-Ahead egységárak alapján) [HUF] | 1.759.030              | 1.096.161    |

Az őszi időszak hasonló tendenciát mutatott a tavaszival, azzal a különbséggel, hogy a vállalatnál foganasított energiamegtakarítási intézkedések (fűtés csökkentett üzemmódjának kiterjesztése, fűtési hőfokok csökkentése) és a szokatlanul meleg október időjárás miatt a hűtési igény lényegesen alacsonyabbnak bizonyult. Az időszak alatt 30%-os energiamegtakarítás és 38 %-os költségmegtakarítás lenne lehetséges a tároló használatával, ami annak köszönhető, hogy a viszonylagosan alacsony hűtési igények miatt a csúcsidőszaki fogyasztás szinte teljes egészében ellátható a tároló kisütésével. Az órai villamosenergia fogyasztások és a HUPX Day-Ahead egységárak alakulását az 1. melléklet 8. ábráján helyeztem el.

- Teljes év

A teljes év vonatkozásában a főbb paramétereket a 11. táblázatban foglaltam össze.

**11. TÁBLÁZAT: TELJES ÉV FŐBB PARAMÉTEREI**

|                                            | Tároló nélküli<br>üzem | Tárolós üzem |
|--------------------------------------------|------------------------|--------------|
| Hűtési energiaigény [kWh]                  | 331.492                | 332.364      |
| Hűtőgép villamosenergia-fogyasztása [kWh]  | 79.849                 | 61.272       |
| Átlagos részterhelés (álló üzemmód nélkül) | 0,4                    | 0,6          |
| Átlagos EER                                | 4,4                    | 5,9          |

|                                                                   |           |           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|
| Villamosenergia-költség (HUPX Day-Ahead egységárai alapján) [HUF] | 9.373.757 | 6.619.867 |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|

Összességében a teljes év tekintetében a tároló használatával 26 % energiafogyasztás csökkenés és a HUPX Day Ahead egységárai alapján vételezett energia esetén 29 %-os költségcsökkenés érhető el.

### 3.5.4. Tároló szabályozása HUPX Day-Ahead egységárai alakulása alapján

A beruházó részéről az energiamegtakarítás mellett felmerülhet igényként a minél nagyobb költségmegtakarítás elérése is. A kidolgozott módszert módosítva egy egyszerűsített módszertan alapján elvégeztem a tároló működésének elemzését abban az esetben is, ha a betárolási és kisütési időpontokat, valamint a kisütési órák prioritizálását (abban az esetben, ha nem fedhető le a teljes csúcsidőszak a tárolóval) nem a hőmérséklet, hanem a HUPX Day-Ahead termék egységárai határozzák meg.

Ebben az esetben az előző fejezetekben ismertetett, tárolás és kisütés óráinak meghatározására vonatkozó leírás az alábbiak szerint módosul:

$$F_{t,tölt} = \begin{cases} 1, & ha: HUPXDA_i < \widetilde{HUPXDA}_{nap} \\ 0, & ha: HUPXDA_i > \widetilde{HUPXDA}_{nap} \\ 0, & ha: E_{t,i-1} = E_{t,max} \end{cases}$$

$$F_{t,kisüt} = \begin{cases} 1, & ha: HUPXDA_i > \widetilde{HUPXDA}_{nap} \\ 0, & ha: HUPXDA_i < \widetilde{HUPXDA}_{nap} \\ 0, & ha: E_{t,i-1} = 0 \end{cases}$$

ahol:

$HUPXDA_i$  – a vizsgált napon az i-ik óra HUPX DA egységára

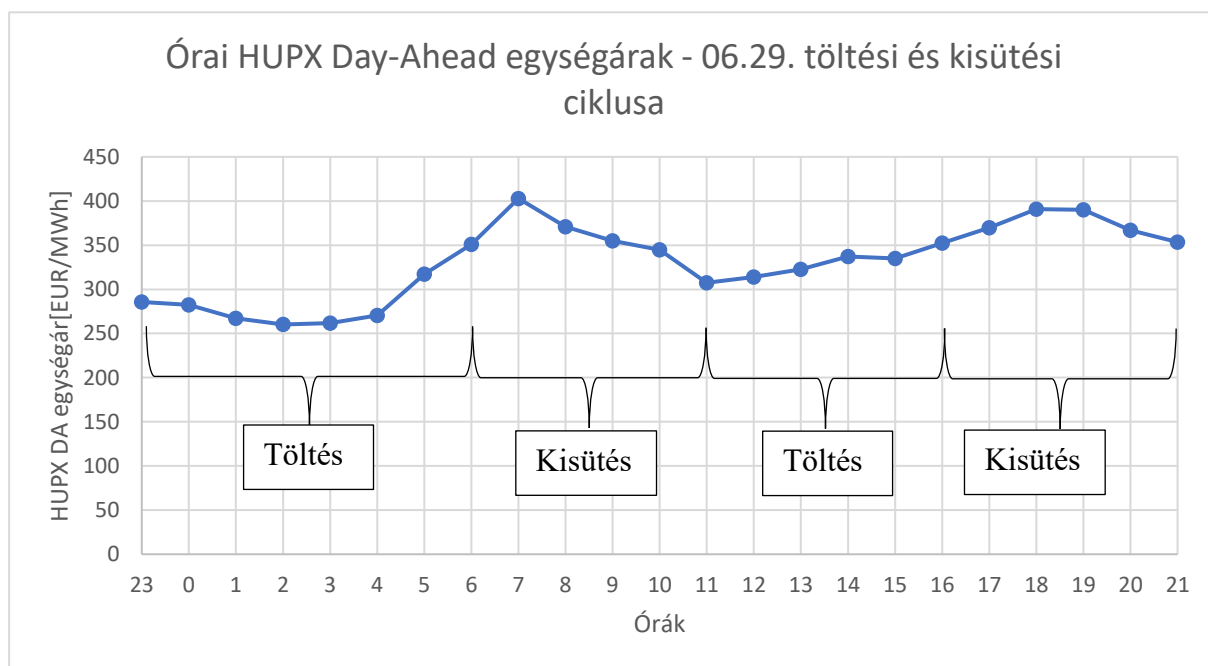
$\widetilde{HUPXDA}_{nap}$  – a vizsgált nap HUPX DA egységárai mediánja

$E_{t,i}$  – az tárolóban tárolt energia az i-ik órában [kWh]

$E_{t,max}$  – a tárolóban eltárolható maximális energia [kWh]

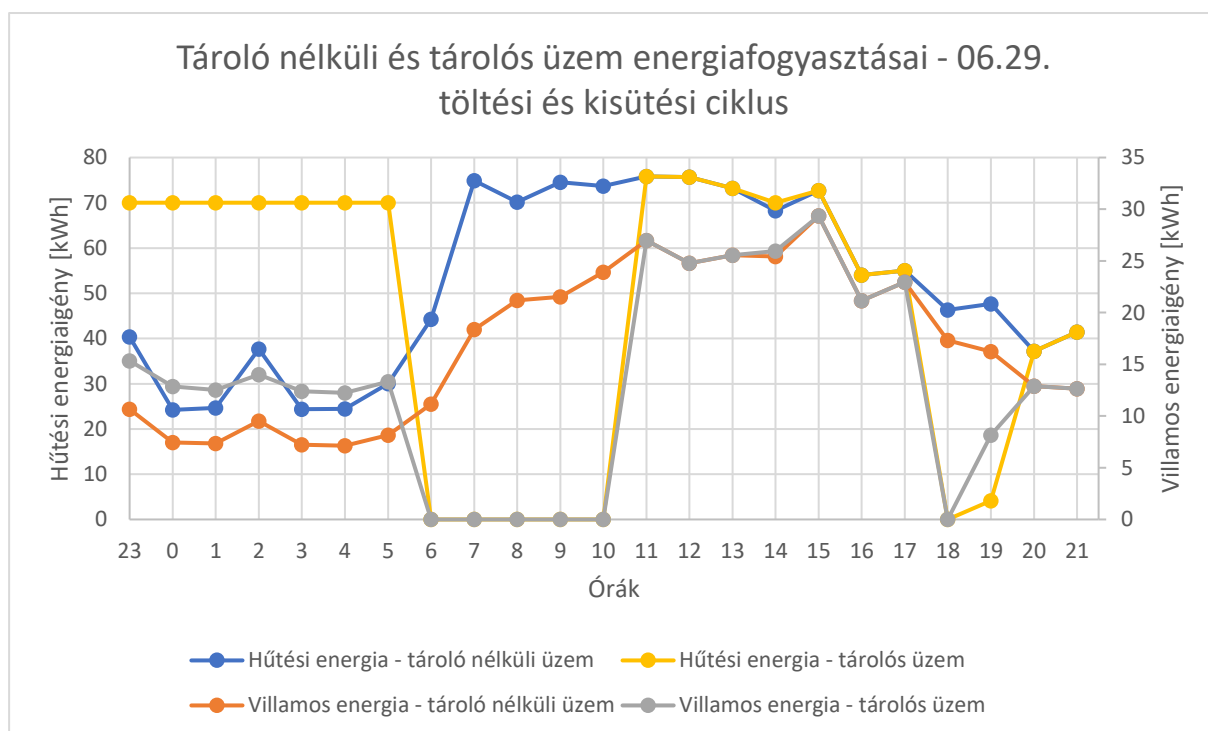
A tárolás és kisütés módja abban az esetben nem változik, ha a tárolóval a teljes csúcsidőszak lefedésre kerül. A csúcsidőszak részleges ellátás esetén viszont ebben az esetben a 3.5.2. fejezetben leírtakkal ellentétben a kisütést azokban az órákban kell elvégezni, amikor az energia egységárai a legmagasabbak (nem pedig a legmagasabb átlaghőmérséklet esetén).

A napon belüli vizsgálatot az összehasonlíthatóság érdekében a 3.5.2. fejezetben taglalt 06.29-i napra végeztem el. A töltési és kisütési ciklusra vonatkozó HUPX DA egységárakat a 31. ábrán helyeztem el



**31. ÁBRA: HUPX DAY-AHEAD EGYSÉGÁRAK ALAKULÁSA - 06.29. TÖLTÉSI ÉS KISÜTÉSI CIKLUS**

Az ábrán látható módon az egységárak reggeli emelkedése miatt a reggeli órákban elindul a kisütés, majd 11-16 óra közt az árak csökkenésével újra töltés kezdődik (bár a hűtési teljesítményigény fedezés miatt minimális töltés történik). A hűtési és villamos energiaigények alakulását a 32. ábrán helyeztem el.



**32. ÁBRA: TÁROLÓ NÉLKÜLI ÉS TÁROLÓS ÜZEM - 06.29.**

A napra vonatkozó pontos számítási értékeket az 1. melléklet 2. táblázatában helyeztem el, a két modell közti főbb különbségeket pedig a 12. táblázat szerint alakultak.

**12. TÁBLÁZAT: 06.29. - KAPOTT EREDMÉNYEK A KÉT TÖLTÉSI/KISÜTÉSI MÓD ALAPJÁN**

|                                    | Hőmérséklet alapján | HUPX DA alapján |
|------------------------------------|---------------------|-----------------|
| Villamosenergia-megtakarítás [kWh] | 94,5                | 85,9            |
| Villamos költségmegtakarítás [HUF] | 13.439              | 13.448          |

A HUPX DA alapján történő töltés/kisütés a vizsgált napon alacsonyabb energiamegtakarítás mellett csak minimálisan okozott magasabb költségmegtakarítást.

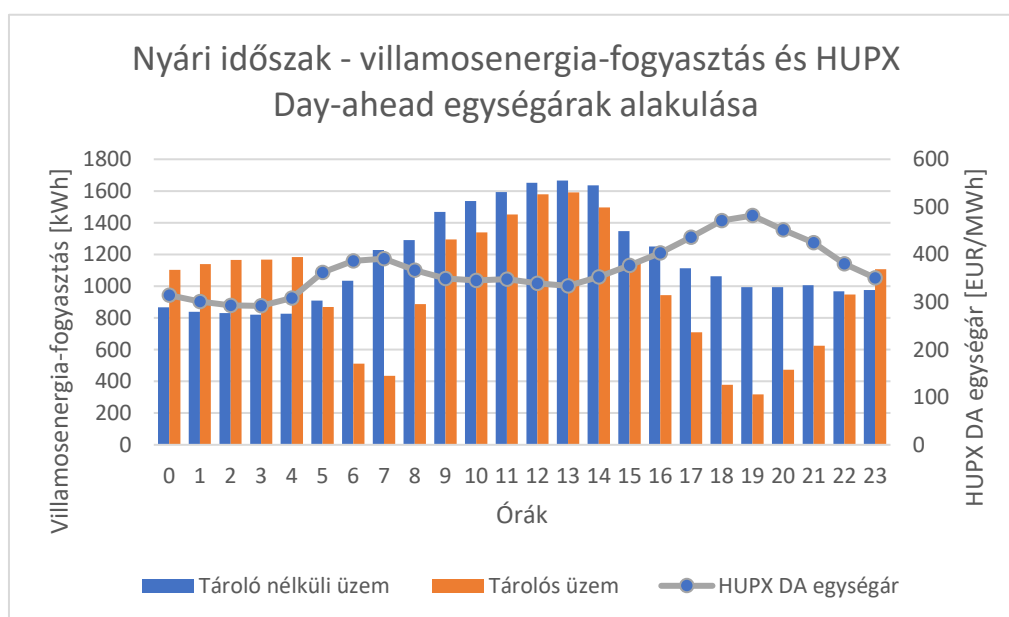
A teljes év tekintetében a kapott eredményeket a 13. táblázatban helyeztem el.

**13. TÁBLÁZAT: TELJES ÉVES EREDMÉNYEK A HUPX DA ALAPJÁN TÖRTÉNŐ TÖLTÉS/KISÜTÉS ESETÉN**

|                           | Tároló nélküli üzem | Tárolós üzem |
|---------------------------|---------------------|--------------|
| Hűtési energiaigény [kWh] | 331.492             | 331.931      |

|                                                                   |           |           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|
| Hűtőgép villamosenergia-fogyasztása [kWh]                         | 79.849    | 65.311    |
| Átlagos részterhelés (álló üzemmód nélkül)                        | 0,4       | 0,6       |
| Átlagos EER                                                       | 4,4       | 5,5       |
| Villamosenergia-költség (HUPX Day-Ahead egységárak alapján) [HUF] | 9.373.757 | 6.416.845 |

A kapott alapján a töltési/kisütési mód változtatásával a hőmérséklet alapján történő szabályozáshoz képest az energiamegtakarítás jelentős mértékben csökken (26 %--> 18 %), a költségmentesítés viszont arányaiban csak kis mértékben, 2,5 %-al növekszik. Ha a villamos energia költségébe figyelembe vesszük a rendszerhasználattal és egyéb adótételekkel kapcsolatos díjakat is, amelyek egy része függ az elhasznált energia mennyiségétől, akkor egyértelműen megállapítható, hogy a töltést és a kisütés prioritizálásának a hőmérséklet alapján kell történnie. A kapott eredmények okára jól látható magyarázatot ad a 33. ábra, amelyen a nyári időszakban a HUPX alapú prioritizálás esetén látható a villamosenergia-fogyasztás, valamint a HUPX egységár órai átlagai.



**33. ÁBRA: NYÁRI IDŐSZAK TÁROLÓS ÉS TÁROLÓ NÉLKÜLI VILLAMOSENERGIA-FOGYASZTÁSA A HUPX DA ALAPÚ PRIORITIZÁLÁS ESETÉN**

Az ábra alapján jól látható, hogy a HUPX DA egységár az időjárásfüggő erőművek (elsősorban naperőművek) termelése miatt pont a legmagasabb hőmérsékletű órákban esik vissza a reggeli és esti csúcsokhoz képest, így az energiamegtakarítás lehetősége olyan

mértékben csökken, amivel összességében minden szempontból kedvezőtlenebb eredmények születnek.

#### 4. Összefoglalás, javaslattevél

A dolgozatomban egy meglévő szerverterem hűtési rendszeréhez kapcsolódóan vizsgáltam meg egy fázisváltó energiatároló használatával járó energiamegtakarítási lehetőségeket. A dolgozat elkészítéséhez elvégeztem a hazai és a nemzetközi szakirodalom elemzését, a hőtárolási rendszerektől kezdve a fázisváltó anyagok tulajdonságain át, a hűtési rendszerekbe illesztett hőtárolók szabályozásáig és a tárolós villamos energia piaci vonzatáig. A 2022-es év mérési adatait feldolgozva pontos képet kaptam a meglévő rendszer üzemállapotáról, majd a hőmérsékleti adatokat feldolgozva meghatároztam tároló energiamegtakarítás szempontjából optimális töltési és kisütési óráit. A tároló méretét a csúcsidőszak teljes lefedésére választottam, és kidolgoztam a töltési időszakban a tárolóba töltött, a kisütési időszakban pedig a tárolóból kinyert hűtési teljesítmények meghatározását. Azokban az időszakokban, amikor a csúcsidőszak lefedése az üzemi paraméterek miatt mégsem volt lehetséges, a tároló kisütését a hőmérséklet és a hűtési igény determinisztikus predikciója alapján olyan módon számítottam, hogy a magasabb hőmérsékletű órák prioritást élvezzenek a tároló kisütésekor. A módszer segítségével a teljes évre vonatkozóan elvégeztem a tárolós üzem működésének elemzését. A kapott adatok alapján a tárolóval az év során 26 %-os energiamegtakarítás és 29 %-os költségmegtakarítás érhető el. Elvégeztem a tároló töltési és kisütési elvének egy másik fajta meghatározását, amely során a szabályozás alapja nem a hőmérséklet, hanem a HUPX Day-Ahead egységárak. A kapott eredményekből kitűnik, hogy bár ilyen módon a költségmegtakarításban kis mértékben javulás érhető el, az energiamegtakarításban tapasztalható nagymértékű csökkenés miatt a módszer összességében kedvezőtlenebb, mint hőmérséklet alapú megoldás.

## 5. Summary

In my thesis, I examined the energy-saving possibilities associated with the use of a phase change energy storage system in connection with the cooling system of an existing server room. To prepare the thesis, I analyzed domestic and international literature, from heat storage systems to the properties of phase change materials, the regulation of heat storage devices integrated into cooling systems, and the electricity market impact of the storage. By processing the measurement data from 2022, I obtained an accurate picture of the operating state of the existing system, and by processing temperature data, I determined the optimal charging and discharging times for energy storage. I chose the size of the storage system to cover the entire peak period, and worked out the determination of cooling performance charged into the storage system during the charging period and discharged from the storage system during the discharging period. In periods when peak coverage was not possible due to operating parameters, I calculated the discharging of the storage system based on deterministic prediction of temperature and cooling demand, giving priority to higher temperature hours during discharging. Using this method, I analyzed the operation of the storage system for the entire year. Based on the data obtained, the storage system can achieve a 26% energy saving and 29% cost savings throughout the year. I carried out a different determination of the charging and discharging principles of the storage system, in which the regulation is not based on temperature, but on HUPX Day-Ahead energy prices. The results show that although there is a slight improvement in cost savings in this way, due to the significant decrease in energy savings, the method is generally less favorable than the temperature-based solution.

## NYILATKOZAT

### a diplomadolgozat<sup>1</sup> nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Szalai Gergely  
A Hallgató Neptun kódja: CJ1YHI  
A dolgozat címe: Fázisváltó anyaggal töltött tároló alkalmazásának energiamegtakarítási lehetőségei egy szerverterem hűtési rendszerében  
A megjelenés éve: 2023  
A konzulens tanszék neve: Épületgépészeti és energetikai tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott diplomadolgozat<sup>2</sup> egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, s az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a Záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkor szellemi tulajdonkezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitori rendszerébe.

Kelt: 2023. év április hó 22. nap



Hallgató aláírása

<sup>1</sup> A megfelelő dolgozattípus meghagyása mellett a többi típus törlendő.

<sup>2</sup> A megfelelő dolgozattípus meghagyása mellett a többi típus törlendő.

4. sz. függelék – Hallgatói és konzulensi nyilatkozat minta

**NYILATKOZAT**

Alulírott Szalai Gergely, a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Szent István Campus, Létesítménymérnök MSc szak nappali/levelező\* tagozat végzős hallgatója nyilatkozom, hogy a dolgozat saját munkám, melynek elkészítése során a felhasznált irodalmat korrekt módon, a jogi és etikai szabályok betartásával kezeltem. Hozzájárulok ahhoz, hogy Záródolgozatom/Szakdolgozatom/Diplomadolgozatom egyoldalas összefoglalója felkerüljön az Egyetem honlapjára és hogy a digitális verzióban (pdf formátumban) leadott dolgozatom elérhető legyen a témát vezető Tanszéken/Intézetben, illetve az Egyetem központi nyilvántartásában, a jogi és etikai szabályok teljes körű betartása mellett.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem\*

Kelt: Budapest év 2023.04. hó 22. nap

  
Hallgató

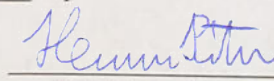
**NYILATKOZAT**

A dolgozat készítőjének konzulense nyilatkozom arról, hogy a Záródolgozatot/Szakdolgozatot/Diplomadolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A Záródolgozatot/Szakdolgozatot/Diplomadolgozatot záróvizsgán történő védelemre javaslok nem javaslok\*.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem\*

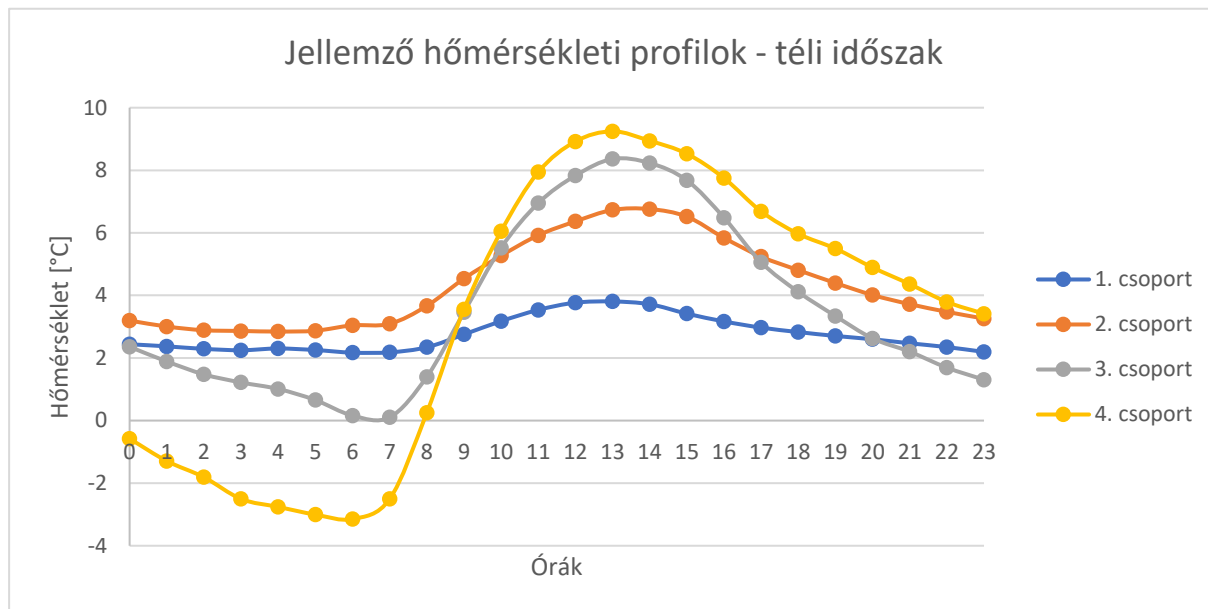
Kelt: 2023 év április hó 22. nap

  
Belső konzulens

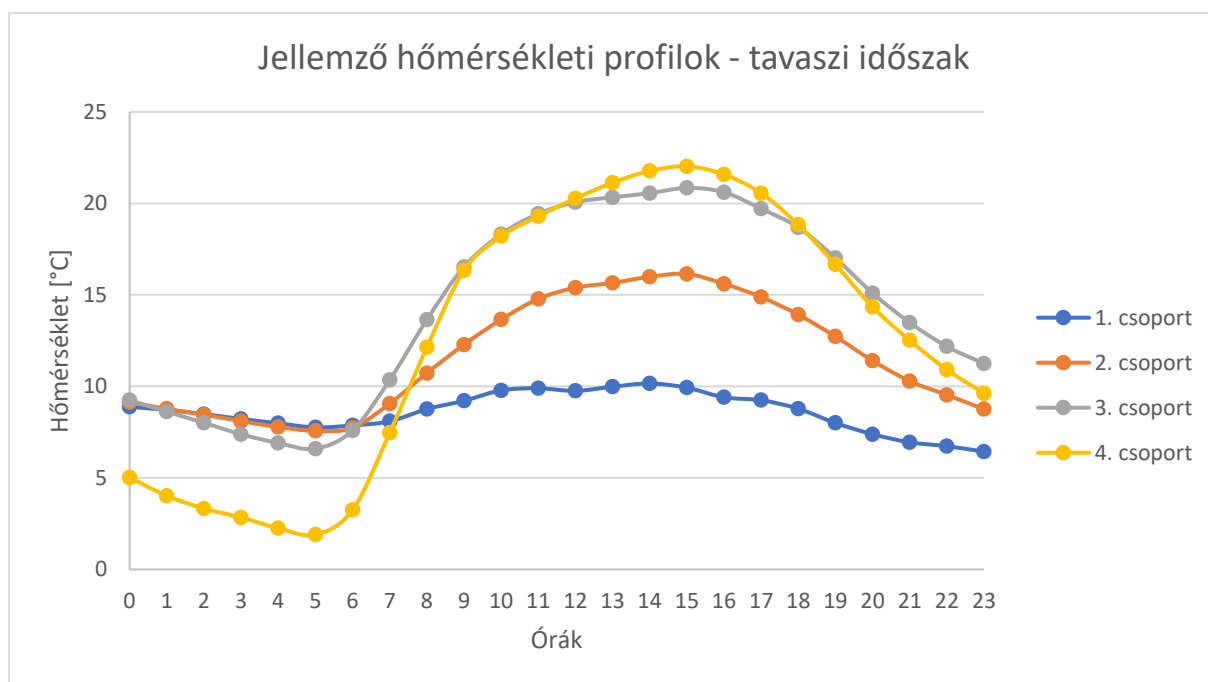
\*Kérjük a megfelelőt aláhúzni!

## 6. Mellékletek

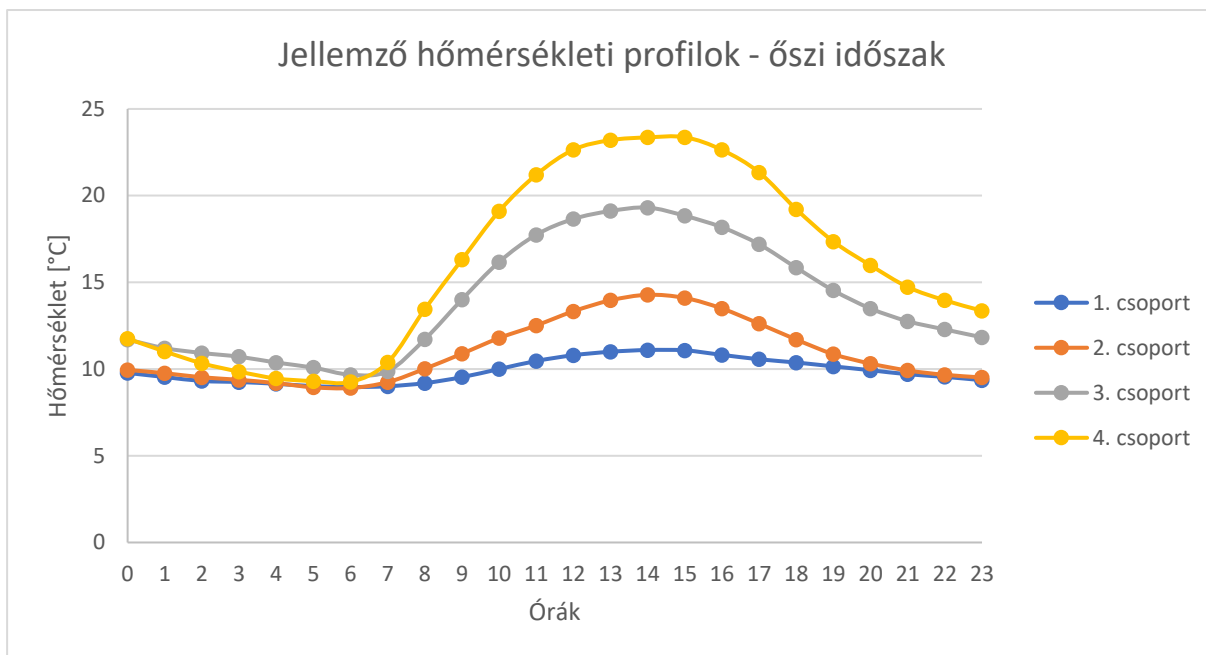
### 6.1. 1. melléklet: ábrák, táblázatok



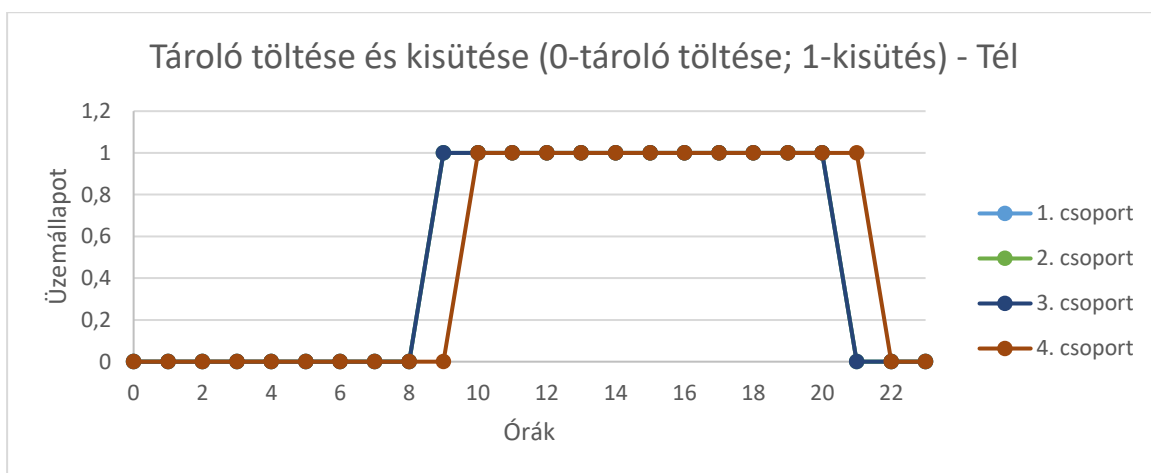
**1. MELLÉKLET 1. ÁBRA: TÉLI IDŐSZAK JELLEMZŐ HŐMÉRSÉKLETI PROFILJAI**



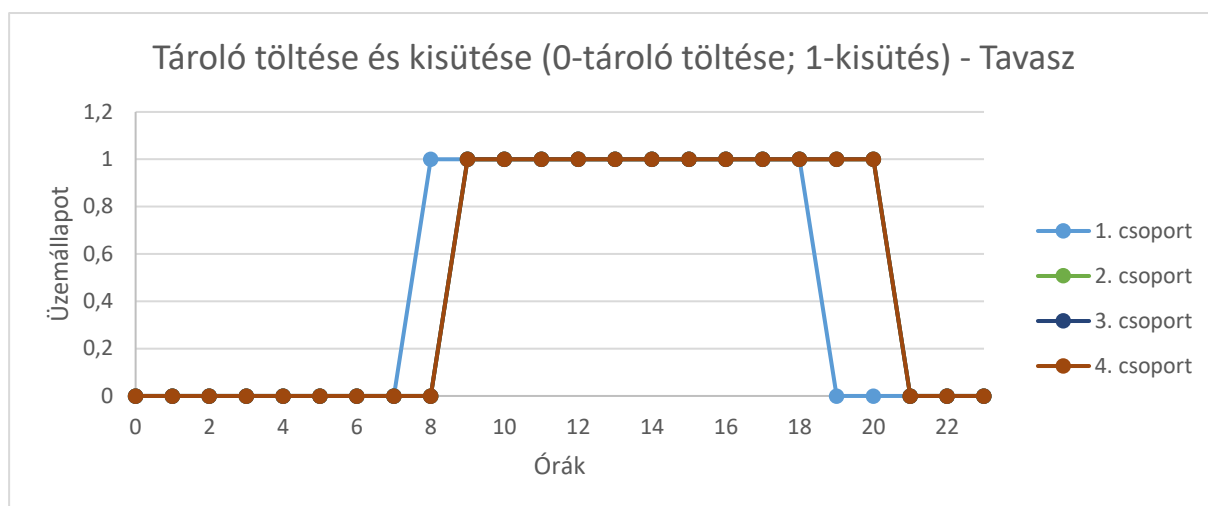
**1. MELLÉKLET 2. ÁBRA: TAVASZI IDŐSZAK JELLEMZŐ HŐMÉRSÉKLETI PROFILJAI**



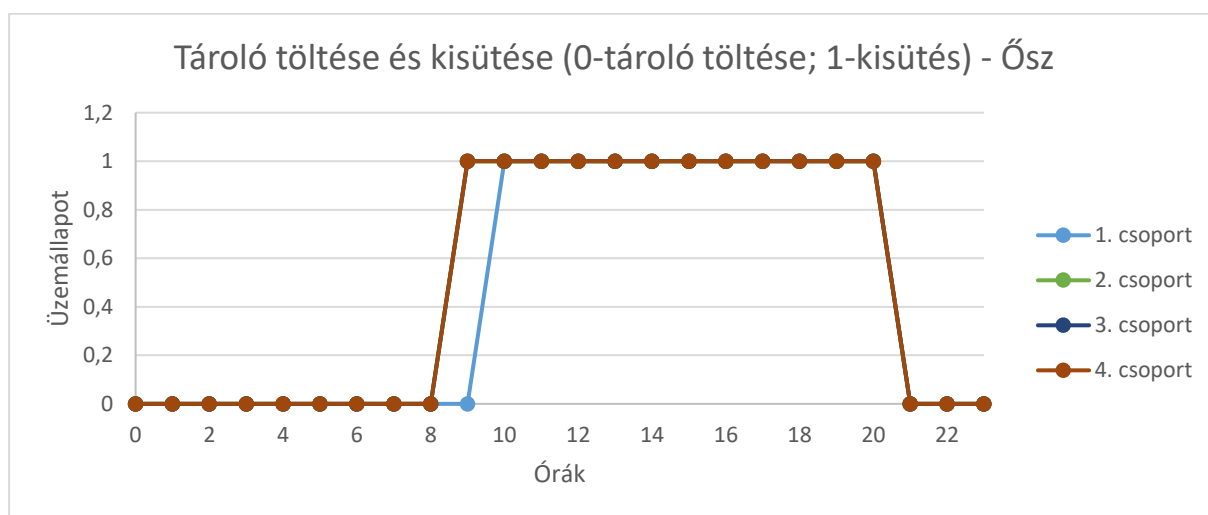
**1. MELLÉKLET 3. ÁBRA: ŐSZI IDŐSZAK JELLEMZŐ HŐMÉRSÉKLETI PROFILJAI**



**1. MELLÉKLET 4. ÁBRA: TÁROLÓ TÖLTÉSÉNEK IS KISÜTÉSÉNEK IDŐPONTJAI A TÉLI IDŐSZAK HŐMÉRSÉKLETI CSOPORTJAINAK ESETÉBEN**



**1. MELLÉKLET 5. ÁBRA: TÁROLÓ TÖLTÉSÉNEK IS KISÜTÉSÉNEK IDŐPONTJAI A TAVASZI IDŐSZAK HŐMÉRSÉKLETI CSOPORTJAINAK ESETÉBEN**

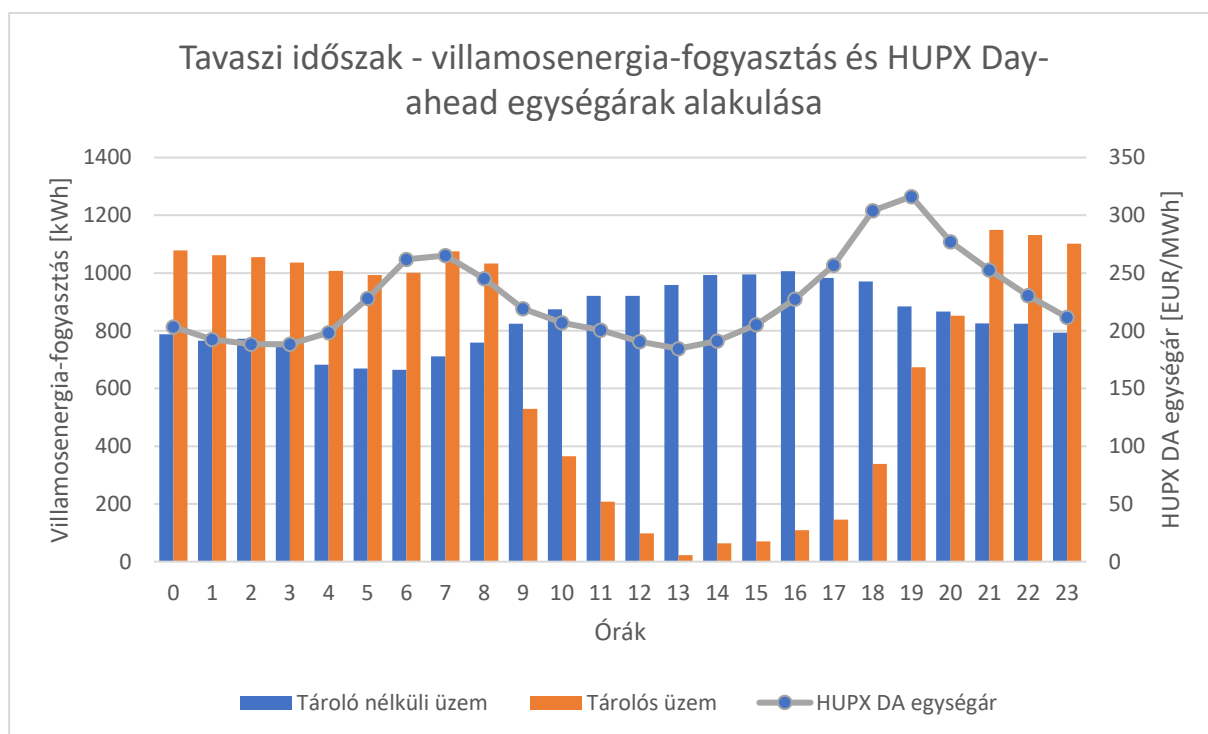


**1. MELLÉKLET 6. ÁBRA: TÁROLÓ TÖLTÉSÉNEK IS KISÜTÉSÉNEK IDŐPONTJAI AZ ŐSZI IDŐSZAK HŐMÉRSÉKLETI CSOPORTJAINAK ESETÉBEN**

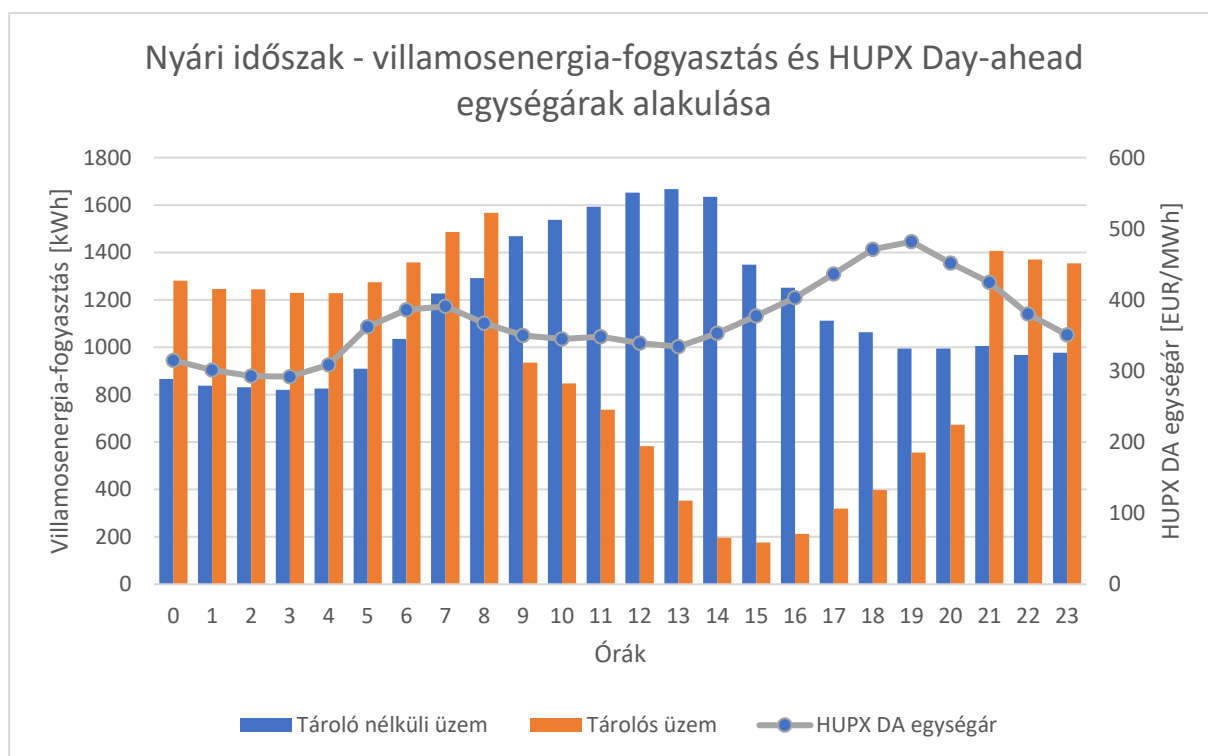
**1. MELLÉKLET 1. TÁBLÁZAT: TÁROLÓS ÉS TÁROLÓ NÉLKÜLI ÜZEMÁLLAPOTOK – 06.28.-06.29.**

| Óra | Tárolás/kisütés (0;1) | $T_{\text{külső}}$ [°C] | Tároló nélküli üzem      |     |     |                         | Tárolós üzem             |     |     |                          |
|-----|-----------------------|-------------------------|--------------------------|-----|-----|-------------------------|--------------------------|-----|-----|--------------------------|
|     |                       |                         | $E_{\text{hűtés}}$ [kWh] | RT  | EER | $E_{\text{vill}}$ [kWh] | $E_{\text{hűtés}}$ [kWh] | RT  | EER | $E_{\text{vill.}}$ [kWh] |
| 21  | 0                     | 28,15                   | 31,95                    | 0,3 | 3,1 | 10,24                   | 70,00                    | 0,7 | 4,4 | 16,01                    |
| 22  | 0                     | 25,57                   | 40,97                    | 0,4 | 3,6 | 11,31                   | 70,00                    | 0,7 | 4,4 | 16,03                    |
| 23  | 0                     | 23,85                   | 40,35                    | 0,4 | 3,8 | 10,66                   | 70,00                    | 0,7 | 4,6 | 15,34                    |

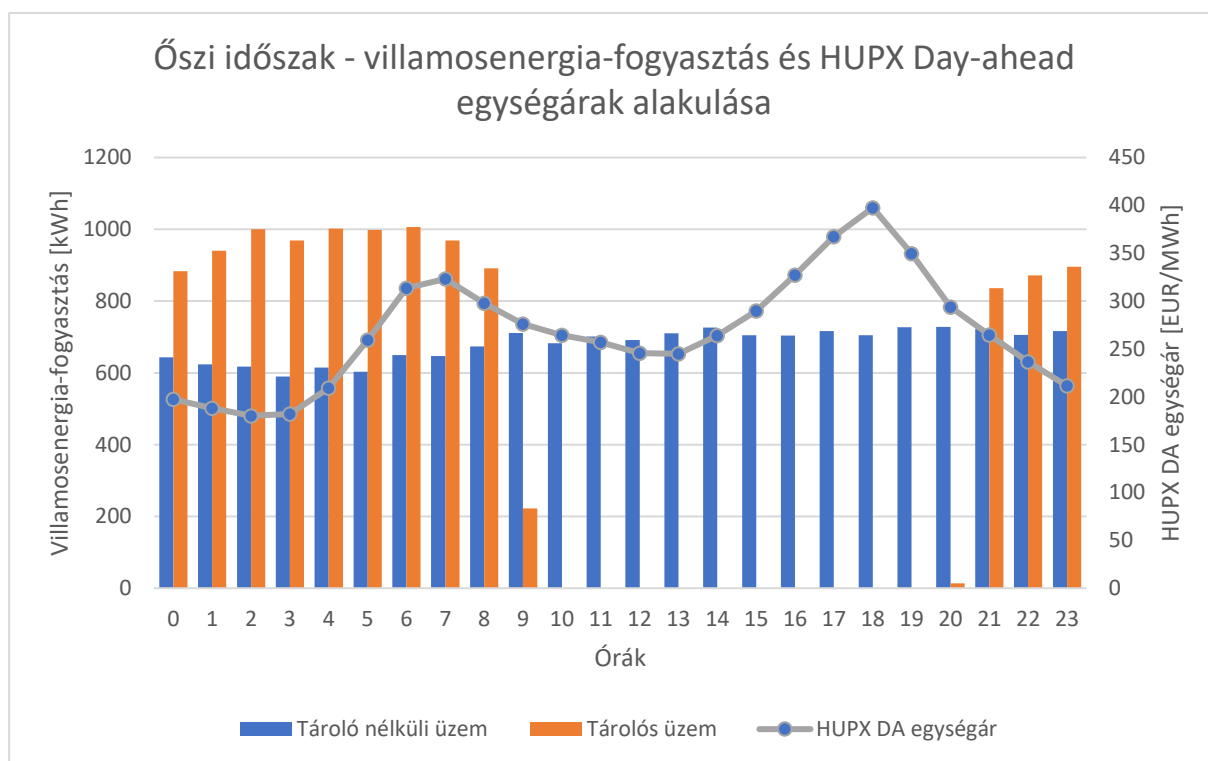
|      |   |       |       |     |     |       |       |     |     |       |
|------|---|-------|-------|-----|-----|-------|-------|-----|-----|-------|
| 0    | 0 | 22,65 | 24,22 | 0,2 | 3,3 | 7,43  | 70,00 | 0,7 | 5,4 | 12,88 |
| 1    | 0 | 21,84 | 24,62 | 0,2 | 3,3 | 7,35  | 70,00 | 0,7 | 5,6 | 12,52 |
| 2    | 0 | 21,58 | 37,68 | 0,4 | 4,0 | 9,53  | 70,00 | 0,7 | 5,0 | 13,99 |
| 3    | 0 | 21,30 | 24,40 | 0,2 | 3,4 | 7,22  | 70,00 | 0,7 | 5,6 | 12,41 |
| 4    | 0 | 20,77 | 24,43 | 0,2 | 3,4 | 7,13  | 70,00 | 0,7 | 5,7 | 12,25 |
| 5    | 0 | 20,95 | 30,02 | 0,3 | 3,7 | 8,16  | 70,00 | 0,7 | 5,3 | 13,33 |
| 6    | 0 | 23,11 | 44,28 | 0,4 | 4,0 | 11,17 | 70,00 | 0,7 | 4,6 | 15,27 |
| 7    | 0 | 26,00 | 74,89 | 0,7 | 4,1 | 18,37 | 74,89 | 0,7 | 4,1 | 18,37 |
| 8    | 0 | 29,40 | 70,17 | 0,7 | 3,3 | 21,21 | 70,17 | 0,7 | 3,3 | 21,21 |
| 9    | 1 | 31,82 | 74,56 | 0,7 | 3,5 | 21,54 | 74,56 | 0,7 | 3,5 | 21,54 |
| 10   | 1 | 34,46 | 73,68 | 0,7 | 3,1 | 23,92 | 73,68 | 0,7 | 3,1 | 23,92 |
| 11   | 1 | 35,14 | 75,83 | 0,8 | 2,8 | 26,97 | 75,83 | 0,8 | 2,8 | 26,97 |
| 12   | 1 | 35,89 | 75,68 | 0,8 | 3,1 | 24,79 | 68,09 | 0,7 | 3,1 | 22,27 |
| 13   | 1 | 36,63 | 73,19 | 0,7 | 2,9 | 25,56 | 0,00  | 0,0 | 0,0 | 0,00  |
| 14   | 1 | 37,14 | 68,26 | 0,7 | 2,7 | 25,43 | 0,00  | 0,0 | 0,0 | 0,00  |
| 15   | 1 | 37,20 | 72,70 | 0,7 | 2,5 | 29,35 | 0,00  | 0,0 | 0,0 | 0,00  |
| 16   | 1 | 37,12 | 54,04 | 0,5 | 2,6 | 21,16 | 0,00  | 0,0 | 0,0 | 0,00  |
| 17   | 1 | 36,81 | 55,02 | 0,6 | 2,4 | 22,96 | 0,00  | 0,0 | 0,0 | 0,00  |
| 18   | 1 | 36,08 | 46,28 | 0,5 | 2,7 | 17,33 | 0,00  | 0,0 | 0,0 | 0,00  |
| 19   | 1 | 34,56 | 47,68 | 0,5 | 2,9 | 16,25 | 47,68 | 0,5 | 2,9 | 16,25 |
| 20   | 1 | 32,48 | 37,19 | 0,4 | 2,9 | 12,89 | 37,19 | 0,4 | 2,9 | 12,89 |
| Sum: | - | -     | 1 222 | -   | -   | 397,9 | 1 222 | -   | -   | 303,4 |



**1. MELLÉKLET 8. ÁBRA: TAVASZI IDŐSZAK VILLAMOSENERGIA-FOGYASZTÁSA ÉS HUPX DA EGYSÉGÁRAK ALAKULÁSA**



**1. MELLÉKLET 9. ÁBRA: NYÁRI IDŐSZAK VILLAMOSENERGIA-FOGYASZTÁSA ÉS HUPX DA EGYSÉGÁRAK ALAKULÁSA**



**1. MELLÉKLET 10. ÁBRA: ŐSZI IDŐSZAK VILLAMOSENERGIA-FOGYASZTÁSA ÉS HUPX DA EGYSÉGÁRAK ALAKULÁSA**

| Óra | Tárolás/kisütés (0;1) | T <sub>külső</sub> [°C] | Tároló nélküli üzem      |     |     |                         | Tárolós üzem             |     |     |                          |
|-----|-----------------------|-------------------------|--------------------------|-----|-----|-------------------------|--------------------------|-----|-----|--------------------------|
|     |                       |                         | E <sub>hűtés</sub> [kWh] | RT  | EER | E <sub>vill</sub> [kWh] | E <sub>hűtés</sub> [kWh] | RT  | EER | E <sub>vill.</sub> [kWh] |
| 23  | 0                     | 23,85                   | 40,35                    | 0,4 | 3,8 | 10,66                   | 70,00                    | 0,7 | 4,6 | 15,34                    |
| 0   | 0                     | 22,65                   | 24,22                    | 0,2 | 3,3 | 7,43                    | 70,00                    | 0,7 | 5,4 | 12,88                    |
| 1   | 0                     | 21,84                   | 24,62                    | 0,2 | 3,3 | 7,35                    | 70,00                    | 0,7 | 5,6 | 12,52                    |
| 2   | 0                     | 21,58                   | 37,68                    | 0,4 | 4,0 | 9,53                    | 70,00                    | 0,7 | 5,0 | 13,99                    |
| 3   | 0                     | 21,30                   | 24,40                    | 0,2 | 3,4 | 7,22                    | 70,00                    | 0,7 | 5,6 | 12,41                    |
| 4   | 0                     | 20,77                   | 24,43                    | 0,2 | 3,4 | 7,13                    | 70,00                    | 0,7 | 5,7 | 12,25                    |
| 5   | 0                     | 20,95                   | 30,02                    | 0,3 | 3,7 | 8,16                    | 70,00                    | 0,7 | 5,3 | 13,33                    |
| 6   | 1                     | 23,11                   | 44,28                    | 0,4 | 4,0 | 11,17                   | 0,00                     | 0,0 | 0,0 | 0,00                     |
| 7   | 1                     | 26,00                   | 74,89                    | 0,7 | 4,1 | 18,37                   | 0,00                     | 0,0 | 0,0 | 0,00                     |
| 8   | 1                     | 29,40                   | 70,17                    | 0,7 | 3,3 | 21,21                   | 0,00                     | 0,0 | 0,0 | 0,00                     |
| 9   | 1                     | 31,82                   | 74,56                    | 0,7 | 3,5 | 21,54                   | 0,00                     | 0,0 | 0,0 | 0,00                     |

|      |   |       |       |     |     |       |         |     |     |        |
|------|---|-------|-------|-----|-----|-------|---------|-----|-----|--------|
| 10   | 1 | 34,46 | 73,68 | 0,7 | 3,1 | 23,92 | 0,00    | 0,0 | 0,0 | 0,00   |
| 11   | 0 | 35,14 | 75,83 | 0,8 | 2,8 | 26,97 | 75,83   | 0,8 | 2,8 | 26,97  |
| 12   | 0 | 35,89 | 75,68 | 0,8 | 3,1 | 24,79 | 75,68   | 0,8 | 3,1 | 24,79  |
| 13   | 0 | 36,63 | 73,19 | 0,7 | 2,9 | 25,56 | 73,19   | 0,7 | 2,9 | 25,56  |
| 14   | 0 | 37,14 | 68,26 | 0,7 | 2,7 | 25,43 | 70,00   | 0,7 | 2,7 | 25,97  |
| 15   | 0 | 37,20 | 72,70 | 0,7 | 2,5 | 29,35 | 72,70   | 0,7 | 2,5 | 29,35  |
| 16   | 1 | 37,12 | 54,04 | 0,5 | 2,6 | 21,16 | 54,04   | 0,5 | 2,6 | 21,16  |
| 17   | 1 | 36,81 | 55,02 | 0,6 | 2,4 | 22,96 | 55,02   | 0,6 | 2,4 | 22,96  |
| 18   | 1 | 36,08 | 46,28 | 0,5 | 2,7 | 17,33 | 0,00    | 0,0 | 0,0 | 0,00   |
| 19   | 1 | 34,56 | 47,68 | 0,5 | 2,9 | 16,25 | 4,11    | 0,0 | 0,5 | 8,14   |
| 20   | 1 | 32,48 | 37,19 | 0,4 | 2,9 | 12,89 | 37,19   | 0,4 | 2,9 | 12,89  |
| 21   | 1 | 29,29 | 41,41 | 0,4 | 3,3 | 12,64 | 41,41   | 0,4 | 3,3 | 12,64  |
| Sum: | - | -     | 1 191 | -   | -   | 389   | 1 049,2 | -   | -   | 303,14 |

## Irodalomjegyzék

- Alva, G., Lin, Y., & Fang, G. (2018). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 144, 341-378. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037>
- Alva, G., Liu, L., Huang, X., & Fang, G. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.021>
- Andrássy, Z. (2021). *Fázisváltó anyaggal töltött hőtároló modellezése, optimalizálása és épületgépészeti rendszerekbe illesztése.*
- Aneke, M., & Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied Energy*, 179. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>
- Bai, J., Ding, T., Wang, Z., & Chen, J. (2019). Day-Ahead Robust Economic Dispatch Considering Renewable Energy and Concentrated Solar Power Plants. *Energies*, 12. doi:<https://doi.org/10.3390/en12203832>
- Basecq, V., Michaux, G., Inard, C., & Blondeau, P. (2013). Short-term storage systems of thermal energy for buildings: a review. *Advances in Building Energy Research*, 7. doi:<https://doi.org/10.1080/17512549.2013.809271>
- Benoit, H., Spreafico, L., Gauthier, D., & Flamant, G. (2015). Review of heat transfer fluids in tube-receivers used in concentrating solar thermal systems: Properties and heat transfer coefficients. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.059>
- Bruno, F., Belusko, M., Liu, M., & Tay, N. (2015). Using solid-liquid phase change materials (PCMs) in thermal energy storage systems. *Advances in Thermal Energy Storage Systems*. doi:<https://doi.org/10.1533/9781782420965.2.201>
- Cecchinato, L. (2010). Part load efficiency of packaged air-cooled water chillers with inverter driven scroll compressors. *Energy Conversion and Management*, 51. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.02.008>
- celsiuscity.eu. (2020). Heat recovery from the London Underground in Islington, United Kingdom. Letöltés dátuma: 2023. 02. 26., forrás: <https://celsiuscity.eu/heat-recovery-from-the-london-underground-in-islington-united-kingdom/>

- Dincer, I. (2001). On thermal energy storage systems and applications in buildings. *Energy and Buildings*.
- Fang, G., Tang, F., & Cao, L. (2015). Dynamic characteristics of cool thermal energy storage systems—a review. *International Journal of Green Energy*, 13. doi:<https://doi.org/10.1080/15435075.2014.895739>
- Gonzalez-Roubaud, E., Pérez-Osorio, D., & Prieto, C. (2017). Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.084>
- Hanchen, M., Brückner, S., & Steinfeld, A. (2011). High-temperature thermal storage using a packed bed of rocks e Heat transfer analysis and experimental validation. *Applied Thermal Engineering*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.10.034>
- Heier, J., Bales, C., & Martin, V. (2012). Combining thermal energy storage with buildings – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.031>
- Henze, G., & Krarti, M. (1998). Ice Storage System Controls for the Reduction of Operating Cost and Energy Use. *Journal of solar energy engineering*, 120. doi:<https://doi.org/10.1115/1.2888131>
- Henze, G., Kalz, D., Felsmann, C., & Knabe, G. (2004). Impact of Forecasting Accuracy on Predictive Optimal Control of Active and Passive Building Thermal Storage Inventory. *HVAC&R Research*.
- Huang, M., Eames, P., & Norton, B. (2004). Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.11.015>
- International Energy Agency. (2022). *Renewables 2022*. Forrás: <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>
- International Energy Agency. (2022). *World energy outlook 2022*. Forrás: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Cameron, M. A., & Frew, B. A. (2015). Low-cost solution to the grid reliability problem with 100% penetration of intermittent wind, water, and solar for all purposes. doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.1510028112>

- Jamekhorshid, A., & Sadrameli, S. (2012). Application of Phase Change Materials (PCMs) in Maintaining Comfort Temperature inside an Automobile. *Engineering and Technology*, 61.
- Jekel, T. B. (1991). *Modelling of ice storage systems*. University of Wisconsin.
- Karakilcik, M., & Dincer, I. (2008). Exergetic performance analysis of a solar pond. *International Journal of Thermal Sciences*. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.01.012
- Kenisarin, M., & Mahkamov, K. (2016). Passive thermal control in residential buildings using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.128
- Koohi-Fayegh, S., & Rosen, M. A. (2020.. 02.). A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, 27. doi:https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047
- Kuravi, S., Trahan, J., & Goswami, Y. D. (2013). Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39. doi:https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.02.001
- Nelson, J., Valakrishnan, A., & Srinivas Murthy, S. (1999). Parametric studies on thermally stratified chilled water storage systems. *Applied Thermal Engineering*, 19. doi:https://doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00014-3
- Neto, J., & Krarti, M. (1997). Deterministic Model for an Internal Melt Ice-on-Coil Thermal Storage Tank. *ASHRAE Transactions*, 103.
- Nie, B., Palacios, A., Zou, B., Liu, J., Zhang, T., & Li, Y. (2020). Review on phase change materials for cold thermal energy storage applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110340
- Nordell, B. (2000). Large-scale thermal energy storage. *Energy and Environment*.
- Pelay, U., Luo, L., Fan, Y., Stitou, D., & Rood, M. (2017). Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.139
- Saeed, R., Schlegel, J., Castano, C., & Sawafta, R. (2018). Preparation and enhanced thermal performance of novel (solid to gel) form-stable eutectic PCM modified by nano-

- graphene platelets. *Journal of Energy Storage*, 15., 91-102.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.003>.
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2017). A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. *Sustainability*, 191.
- Schmidt, T., & Mueller-Steinhagen, H. (2004). The central solar heating plant with aquifer thermal energy store in Rostock - results after four years of operation.
- Schmidt, T., Mangold, D., & Müller-Steinhagen, H. (2004). Central solar heating plants with seasonal storage in Germany. *Solar Energy*, 76.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.025>
- Sharma, R. K., & Ganesan, P. (2015). Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 95. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.084>
- Sun, Y., Wang, S., Xiao, F., & Gao, D. (2013). Peak load shifting control using different cold thermal energy storage facilities in commercial buildings: A review. *Energy Conversion and Management*, 71.
- Wang, Z. (2019). *Design of solar thermal power plants*.
- Xu, J., Wang, R., & Li, Y. (2014). A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. *Solar Energy*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.006>
- Yau, Y., & Lee, S. (2010). Feasibility study of an ice slurry-cooling coil for HVAC and R systems in a tropical building. *Applied Energy*, 87.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.02.025>

1. sz. függelék – Témaválasztási lap

**ZÁRÓDOLGOZAT / SZAKDOLGOZAT / DIPLOMADOLGOZAT\***

**TÉMAVÁLASZTÁSI LAP**

Leadási határidő: május 15., november 15.

**Hallgató tölti ki!**

Hallgató neve: Szalai Gergely

Neptun kódja: CJ1YHI

Szak: Létesítménymérnök

Képzési szint: FOSZK/BA/BSc / MA/MSc/SZTK Évfolyam: 2021.

Tagozat: Nappali / Levelező / Távoktatás\*

Szakirány(ok) / Specializáció(k)\*: Létesítményüzemeltető-energetika

Hallgató e-mail címe: g.szalai96@yahoo.com

**A témát kiadó Intézet / Tanszék neve:** Műszaki Intézet, Épületgépészeti és energetikai tanszék

Belső konzulens neve és beosztása: Dr. Hermanucz Péter, egyetemi tanársegéd

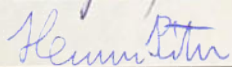
Külső konzulens neve, beosztása és munkahelye: Oláh Péter, Egis Gyógyszergyár Zrt.

Üzemfenntartási és energetikai főosztályvezető

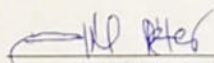
Diploma-, Szak- vagy Záródolgozat témája:

Fázisváltó anyaggal töltött tároló alkalmazásának energiamegtakarítási lehetőségei egy szerverterem hűtési rendszerében

Kelt: Budapest, 2023 év 09 hó 22 nap



Belső konzulens



Külső konzulens



Hallgató

**Intézetigazgató / Tanszékvezető/ Szakfelelős tölti ki!** – aláírást követően a témaválasztási lap elektronikusan megküldendő a tanulmányi ügyintézőnek és a befogadó intézet adminisztrációjának.

**Témaválasztással egyetértek/nem értek egyet\***

Kelt: \_\_\_\_\_ év \_\_\_\_\_ hó \_\_\_\_\_ nap

\_\_\_\_\_  
Szakfelelős/Szakkoordinátor

**A dolgozat témát befogadom/nem fogadom be\***

Kelt: \_\_\_\_\_ év \_\_\_\_\_ hó \_\_\_\_\_ nap

\_\_\_\_\_  
Intézetigazgató/Tanszékvezető\*\*

\*Kérjük a megfelelőt aláhúzni!

\*\*Amennyiben az érintett szak és a témát kiadó intézet vezetője nem a hallgató képzési helye szerint illetékes campuson dolgozik, akkor az intézet adott campuson illetékes tanszékének vezetője – (ennek hiányában az intézetigazgató), ill. a szak campus koordinátora (ennek hiányában a szakfelelős) írja alá.