



A HOSSZÚ TÁVÚ ÉS A SZEZONÁLIS ENERGIATÁROLÁSI MEGOLDÁSOK VIZSGÁLATA

Írta: Vital Force Kft.

Budapest, 2024.

Tartalomjegyzék

1. Energiapiaci kitekintés és az energiatárolás szerepe	8
1.1. Globális kitekintő	8
1.2. Európai trendek.....	10
1.3. Az energiatárolás szerepe	14
2. A hosszú távú energiatárolás jelentősége	17
3. A hosszú távú és a szezonális energiatárolás jelenlegi technológiai – összehasonlító elemzés	20
3.1. Mechanikus energiatárolás	25
3.2. Termikus energiatárolás	31
3.3. Kémiai energiatárolás	39
3.4. Elektrokémiai energiatároló rendszerek	44
3.5. Kombinált energiatárolási megoldások	52
4. A hosszú távú és a szezonális energiatárolás sajátosságai	55
4.1. Várható technológiai trendek és hatások az ipari dekarbonizációra.....	55
4.2. A hosszú távú és a szezonális energiatárolás létjogosultsága és felhasználási esetei	63
4.3. Jelenlegi szabályozási háttér.....	76
4.4. Előnyök és hátrányok bemutatása	82
5. A hosszú távú és a szezonális energiatárolás gazdaságtana	85
5.1. Gazdasági szempontok	85
5.2. Az energiatárolás kiegyenlített költsége („LCOS”)	87
5.3. Ígéretes üzleti és finanszírozási modellek, megtérülés.....	90
5.4. . A CO ₂ kvótaár hatása a megtérülésre	93
5.5. Az LDES ösztönzésének lehetséges pénzügyi és támogatási instrumentumai....	95
6. Az energiatárolási megoldások magyarországi megvalósíthatóságának vizsgálata....	97
6.1. Hazai kutatás-fejlesztési projektek	97
6.2. Várható további lehetőségek	101
7. Összegzés.....	104
Források	106

Ábrajegyzék

1 ábra: A tiszta energiába és a fosszilis tüzelőanyagokba történő globális energetikai beruházások, 2015-2023 [1]	8
2 ábra: Fosszilis tüzelőanyag-fogyasztás tüzelőanyagonként, 2000-2050 [1]	10
3 ábra: Az energiaválság csökkentette a villamosenergia-keresletet az EU-ban - A kereslet változása 2023 vs. 2021 (%) [5]	11
4 ábra: A villamosenergia-rendszer főbb tendenciái, saját szerkesztés [9]	13
5 ábra: Az amerikai villamosenergia-hálózat 85%-os megújuló részarány mellett [12]... 18	
6 ábra: A hosszú távú energiatárolás működési profiljai [12]	19
7 ábra Új energiatárolók kapacitásának alakulása (átlag) [10].....	20
8 ábra: Kalifornia havi energiaegyenlege teljes dekarbonizáció esetén [10]	22
9 ábra: LDES technológiák különböző vizsgálati szempontjai [14]	23
10 ábra: Hő tárolók alkalmazási lehetőségei	33
11 ábra: Siemens Gamesa - ETES	38
12. Ábra: Hidrogén energiatárolás sematikus ábrázolása [24].....	40
13. Ábra: Hidrogén energiatárolás tervezési lehetőségei [24]	42
14 ábra: Nagyméretű, 4 órás AC energiatároló rendszer tökeköltsége az élelciklus kezdetén [26].....	47
15 ábra: Globális akkumulátorcellák iránti kereslet, GWh [27].....	47
16 ábra: A technológiák által biztosított globális rugalmasság az éves átlagos kereslet töredékében kifejezve [32]	56
17 ábra: Hosszú távú energiatárolási kategóriák, saját szerkesztés [33]	57
18 ábra: A világ földalatti gáztároló kapacitása [32].....	60
19 ábra: Az ipari hő igények szektoronkénti alakulása [33]	61
20 ábra: Energiatárolási technológiák névleges teljesítménye és kisütési ideje [47]	65
21 ábra: A jelenlegi LDES-technológiák LCOS-értékei [EUR/MWh] és belső megtérülési rátája ("IRR") [%] [11]	89
22 ábra: Az LDES-technológiák LCOS [EUR/MWh] és IRR [%] értékei az érettségi szakaszban [11].....	90
23 ábra: LDES technológia az aFRR piacon, saját szerkesztés.....	92

Táblázatok jegyzéke

1 táblázat: Kereskedelmileg elérhető LDES technológiák [16]	24
2. Táblázat: Hidrogénes energiatárolás főbb műszaki paraméterei [24]	41
3 táblázat: Az LDES és a szezonális tárolók szerepe - felhasználási esetek vizsgálata, saját szerkesztés	65
4 táblázat: A tárolási időtartam szerinti felhasználási esetek hőenergia-tárolási technológiáinként*, saját szerkesztés [50].....	72
5 táblázat: LDES és a szezonális energiatárolók felhasználási esetei, saját szerkesztés	74
6 táblázat: Piaci előfeltételek, saját szerkesztés.....	75
7 táblázat: A népszerű LDES technológiákkal kapcsolatos teljesítmény, költségek és kihívások, saját szerkesztés [64].....	86
8 táblázat: Technológiai paraméterek, saját szerkesztés [51].....	88

Rövidítések jegyzéke

IEA	Nemzetközi Energiaügynökség (International Energy Agency)
SMR	Kis moduláris reaktor (small modular reactor)
EU	Európai Unió
Off-grid	Hálózaton kívüli
EV	Elektromos járművek
NREL	Nemzeti Megújuló Energia Laboratórium (National Renewable Energy Laboratory)
EPRI	Villamosenergia-kutató Intézet (Electric Power Research Institute)
LDES	Long duration energy storage
DOE	Az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma (Department of Energy)

ARPA-E	Fejlett Kutatási Projektek Energetikai Ügynöksége (Advanced Research Projects Agency-Energy)
RTE	Oda-vissza hatásfok (round-trip efficiency)
PHS	Szivattyús tározós erőmű
LAES	Folyékony levegős energiatárolás (liquid air energy storage)
LCOE	Kiegyenlített energiaköltség
CAES	Sűrített levegős energiatárolás (compressed air energy storage)
CAPEX	Tőkebefektetés (capital expenditure)
FES	Lendkerék (flywheel energy storage)
TES	Termikus energiatárolás (thermal energy storage)
SHS	Érzékelhető vagy szenzibilis hőtárolás (sensible heat storage)
LTS	Látens hőtárolás (latent heat storage)
TCES	Termokémiai energiatárolás (thermochemical energy storage)
CSP	Koncentrált napenergia (concentrated solar power)
SGRE	Siemens Gamesa Renewable Energy
ETES	Elektromos hőenergia-tároló
PEM	Protoncserélő membrán (proton exchange membrane)
SNG	Szintetikus földgáz (synthetic natural gas)
EES	Elektrokémiai energiatárolás (electrochemical energy storage)
li-ion	Lítium-ion
DOD	Kisütési mélység (depth of discharge)
LFP	Lítiumvas-foszfát (lithium ferro-phosphate)

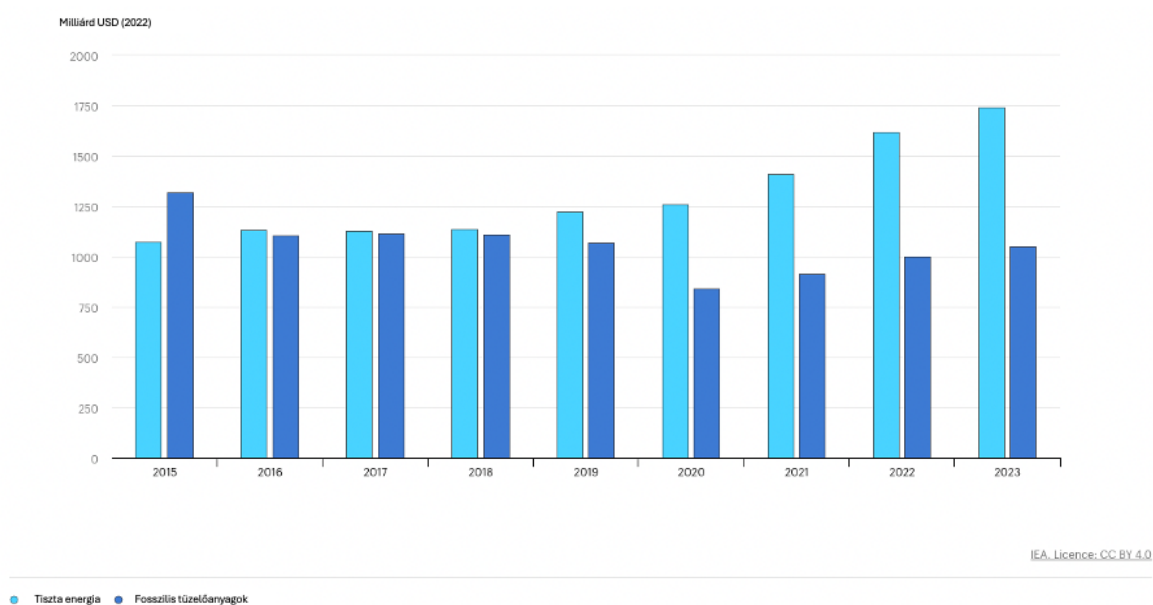
ESG	Környezeti, társadalmi, irányítási (environmental, social, governance)
SOC	A töltés állapota (state of charge)
VRFB	vanádium-redox áramlásos akkumulátor (vanadium redox flow battery)
VRB	vanádium-redox akkumulátor (vanadium- redox battery)
CAGR	Átlagos növekedési ütem (compound annual growth rate)
TRL	Technológiai fejlettségi szint (technology readiness level)
RFB	Redox-áramlásos akkumulátor (redox-flow battery)
Sector coupling	Ágazatok összekapcsolása
aFRR	Automatikus frekvencia tartalék (automatic Frequency Restoration Reserve)
RES	Megújuló energiaforrások
TCO	Teljes tulajdonosi költség (total cost of ownership)
CCUS	szén-dioxid-leválasztás, - hasznosítás és - tárolás (carbon capture, utilisation and storage)
Hard-to-abate sectors	Nehezen mérsékelhető ágazatok
European Green Deal	Európai Zöld Megállapodás
VET	2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiatáról
NEKT	Magyarország Nemzeti Energia- és Klímaterve
OCED	A DOE Tiszta Energia Demonstrációk Hivatala (Office of Clean Energy Demonstrations)

DESNZ	Egyesült Királyság kormányának Energiabiztonsági és Nettó Nulla Energiaügyi Minisztériuma (Department for Energy Security and Net Zero)
CfD	Különbözeti szerződések (Contracts for Difference)
LCOS	Az energiatárolás kiegyenlített költsége (levelized cost of storage)
OPEX	Működési költség (operational expenditure)
IRR	Belső megtérülési ráta (internal rate of return)
PPA	Áramvásárlási megállapodás (power purchase agreement)
ETS	Kibocsátáskereskedelmi rendszer (emissions trading system)
MRS	Piaci Stabilitási Tartalék (Market Stability Reserve)
K+F	Kutatás-fejlesztés
GIE	Gáz Infrastruktúra Európa (Gas Infrastructure Europe)

1. Energiapiaci kitekintés és az energiatárolás szerepe

1.1. Globális kitekintő

A 1,5 °C-os globális hőmérsékletet biztosító nettó zéró kibocsátási cél elérése 2050-ig nem egyszerű feladat. A globális trendeket követve megállapítható, hogy **az energetikai átmenet bár felgyorsult**, azonban a technológiai trendeket, a geopolitikai kockázatokat, valamint a fogyasztói szokásokat tekintve, **rengeteg a bizonytalansági tényező, ami megnehezíti a döntéshozók helyzetét** a rugalmas befektetési stratégiák kialakításában. A döntéshozók számára ugyanis, egyre nagyobb kihívást jelent a szén-dioxid-mentesítéssel kapcsolatos hosszú távú célok, valamint a gazdasági megtérülésre vonatkozó rövid távú elvárások teljesítése. **A globális energiaválság okozta nyomás egyes területeken enyhült**, de az energiapiacok és a világgazdaság összességében továbbra is labilisnak mondhatók többek között a több mint egy éve húzódó ukrajnai orosz invázió, valamint a közel-keleti konfliktusok következtében. Ugyanakkor elmondható, hogy **a Covid-19 világjárványból való kilábalás és a globális energiaválságra adott válaszlépések jelentős lendületet adtak a globális tiszta energiába történő beruházásoknak**, amelyek ebben a komplex helyzetben 2020 óta ~ 40%-kal emelkedtek [1].

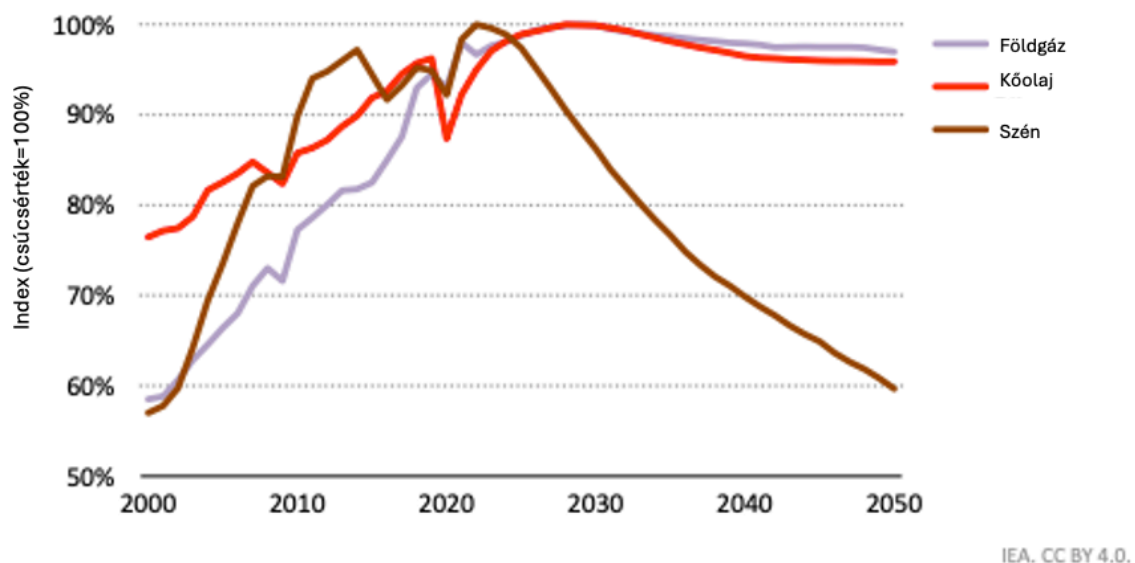


1 ábra: A tiszta energiába és a fosszilis tüzelőanyagokba történő globális energetikai beruházások, 2015-2023 [1]

Számos ország és egyre több vállalkozás kötelezte el magát a nettó nulla kibocsátás elérése mellett. A kormányok világszerte, különösen a fejlett gazdaságokban, reagálva a világjárvány és a globális energiaválság okozta kihívásokra, új intézkedéseket terjesztettek elő, amelyek a megújuló energiaforrások, az elektromos járművek, az energiahatékonyság, és általánosságban a tiszta energiát hasznosító technológiák támogatására irányulnak.

A Nemzetközi Energiaügynökség („IEA”) elemzése szerint **2023-ban globális szinten több mint 500 gigawattal (GW) bővültek a megújulóenergia-termelő kapacitások.** A megújulók várhatóan továbbra is gyorsan fognak növekedni, **az előrejelzések szerint 2030-ig az új villamosenergia-kapacitások 80%-át, valamint a globális energiatermelés 45-50%-át megújulók fogják biztosítani, amelynek több mint felét a napelemek fogják nyújtani** [1] [2]. A megújuló energiaforrások térnyerésének következtében az energiatermelésből származó szén-dioxid-kibocsátás a 2050-re a jelenlegi szinthez képest 17-71%-kal csökkenhet, amellett, hogy a kereslet várhatóan a kétszeresére vagy akár a háromszorosára fog növekedni. A megújulók bővítése ugyanakkor sok esetben nem egyszerű és számos akadályba ütköznek a projektek, az ellátási lánc problémáitól kezdve, az engedélyezésen át a hálózat kiépítéséig [2].

Az elemzések szerint **a fosszilis tüzelőanyagok iránti kereslet 2030-ra fog tetőzni.** Mivel a kormányzatok egyre inkább a tiszta energiát hasznosító technológiákat támogatják, a fosszilis üzemanyaggal működő technológiák az elmúlt években számos ágazatban veszítettek a piaci részesedésükből. A három fosszilis tüzelőanyag-kategóriából a szén iránti kereslet minden forgatókönyv szerint erőteljesen vissza fog esni, míg a földgáz és a kőolaj iránti kereslet a következő néhány évben várhatóan tovább fog növekedni. A földgáz kiegyensúlyozó szerepet fog betölteni a megújuló energiaforrásokon alapuló energiatermelésben, különösen addig, ameddig az energiatárolási megoldások nem tudnak széleskörben elterjedni. Ennek következtében a gázkereslet várhatóan 2040-ig növekedni fog, a 2050-ig tartó előrejelzések viszont már nagy mértékben eltérőek, így ezt az időszakot jelenleg még nehéz megjósolni. A kőolaj esetében a kereslet 2030-ig várhatóan növekedni fog, majd 2030 után csökkenés várható, azonban a csökkenés mértéke itt is jelentősen eltér az egyes forgatókönyvek szerint, amit nagyban befolyásol a közlekedési szektor villamosítása és az alternatív üzemanyagok elterjedésének mértéke [1] [2].



2 ábra: Fosszilis tüzelőanyag-fogyasztás tüzelőanyagonként, 2000-2050 [1]

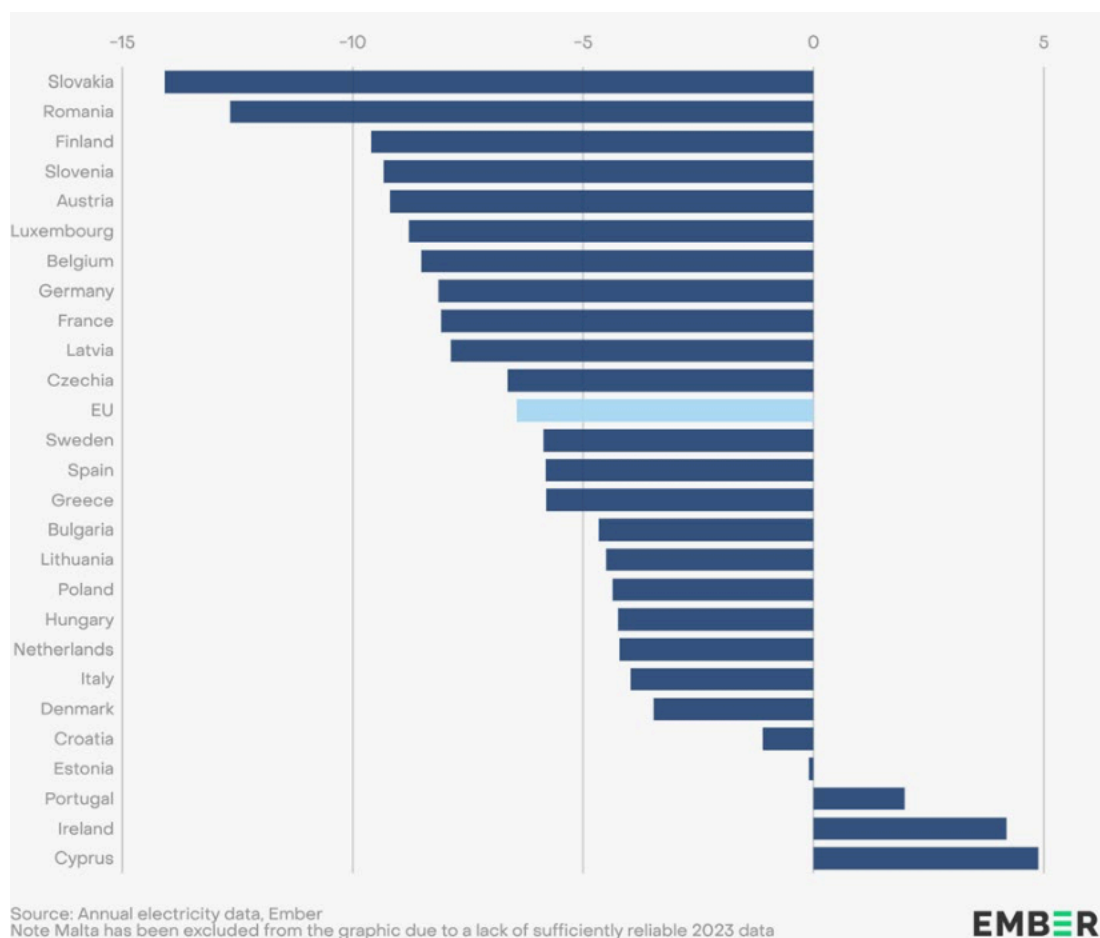
Az előrejelzések szerint **2025-re a globális nukleáris energiatermelés is új rekordot fog elérni**. Az atomenergia helyzete ellentmondásos, ugyanis egyes országok fokozatosan kivonják az atomenergiát az energiamixükből, míg mások a nukleáris energiatermelést az energiastratégiájuk fontos részének tekintik. 2023 decemberében a COP28 éghajlatvédelmi konferencián több mint 20 ország közös nyilatkozatot írt alá arról, hogy 2050-ig megháromszorozzák az atomenergia-kapacitásukat. Ennek elérése érdekében a következő években meghatározó fontosságú lesz a nukleáris ágazatban jellemző építési és finanszírozási kockázatok csökkentése, valamint a kutatás-fejlesztési projektek növelése és felgyorsítása, különösen a kis moduláris reaktorok („SMR”) terén [3].

1.2. Európai trendek

Az európai villamosenergia-rendszer – a globális trendeket követve – jelentős változásokon megy keresztül, amit leginkább az éghajlat-politikai törekvések és a megújuló energiaforrásokkal kapcsolatos fejlesztések vezérelnek. Ezek a változások egyrészt tovább bonyolítják a villamosenergia-piacok működését, másrészt számos új lehetőséget is kínálnak.

Az Európai Unióban („EU”) 2023-ban felgyorsult a fosszilis tüzelőanyagoktól való

elszakadás, ugyanis a fosszilis felhasználás terén rekordszintű 19%-os csökkenést sikerült elérni, amelle, hogy a megújulók részaránya először haladta meg a 40%-ot az EU villamosenergia-termelésében. A szén- és a gáztermelés egyaránt példátlan mértékben esett vissza 2023-ban (a széntermelés 26%-kal, a gáztermelés pedig 15%-kal), ami az európai energiaszektorban meghatározó mértékű CO₂-kibocsátás csökkentést eredményezett. A széntermelés csökkentése azért is számít kiemelkedőnek, mert az energiaválság közepette 2021-2023 között több széntermelő bezárását is elhalasztották, és több helyen véstartalékként újra üzembe helyeztek egyes blokkokat. Ez azonban hamarosan megváltozik, ugyanis az EU széntermelőinek mintegy egyötödét (21 GW) 2024-ben és 2025-ben tervezik bezárni. A fentiekén túl, a csökkenő villamosenergia-kereslet is hozzájárult a fosszilis tüzelőanyag-termelés visszaeséséhez. **A villamosenergia-kereslet 2023-ban 3,4%-kal (-94 TWh) csökkent 2022-hez képest, és 6,4%-kal (186 TWh) a 2021-es szinthez képest.** Mindezt nagyban befolyásolta az energiaárak növekedése, ami különösen negatíván érintette az európai energiaigényes iparágakat [4].



3 ábra: Az energiaválság csökkentette a villamosenergia-keresletet az EU-ban - A kereslet

változása 2023 vs. 2021 (%) [5]

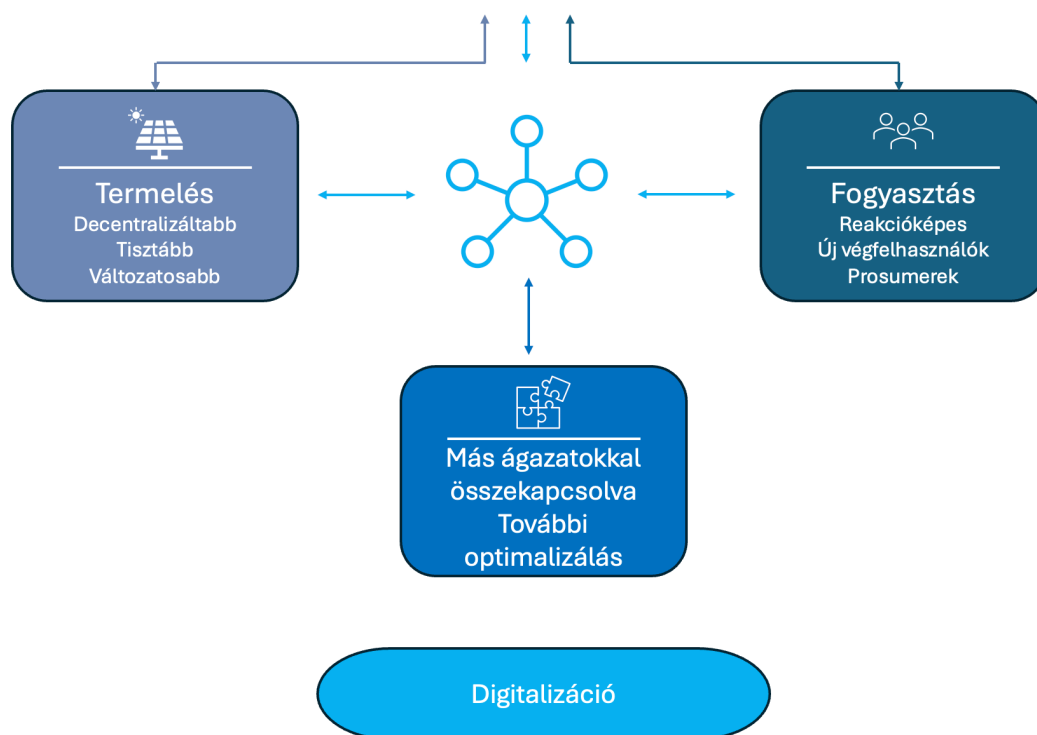
Ez a trend ugyanakkor a következő években várhatóan nem fog folytatódni a villamosítás fokozódásával. Az IEA előrejelzése szerint az EU villamosenergia-fogyasztása ~ 2026 körül vissza fog térni a 2021-es szintre, feltételezve, hogy az ipari ágazat fokozatosan helyreáll az energiaárak mérséklődésével, amellet, hogy az elektromos járművek, a hőszivattyúk és az adatközpontok szintén jelentősen hozzájárulnak a villamosenergia-fogyasztás növekedéséhez [3]. Mindez azt is eredményezi, hogy a megújuló energiaforrásoknak lépést kell tartaniuk a kereslet növekedésével, ahhoz, hogy az EU éghajlat-politikai céljai elérhetők legyenek.

Ha a célokat vizsgáljuk, a REPowerEU-terv szerint 2030-ra az EU energiatermelésének 72%-át megújuló energiaforrásokból kellene előállítani [6]. Az EMBER által kiadott elemzés szerint a megújuló alapú energiatermelés 44% volt 2023-ban, amelynek fő mozgatórugója a nap- és a szélenergia volt 27%-kal. Ezeknek az adatoknak így közel a dupláját szükséges elérni 2030-ra, ahhoz, hogy a REPowerEU által előírtak megvalósuljanak. Az EU tagállamai tavaly felülvizsgálták a nemzeti energia- és éghajlatváltozási terveiket, amely szerint a nemzeti célértékeket átlagosan 45%-kal növelték a szélerőművek beépített kapacitására vonatkozóan, és 70%-kal a napenergia esetében. Ugyanakkor egyes elemzések szerint további eredményekre lenne szükség az EU által kitűzött célok eléréséhez [7].

A szélerőművek kiépítését az elmúlt években több kockázati tényező is negatívan érintette. A költségek emelkedése mellett, az egyik leggyakrabban felmerülő probléma a hosszú engedélyezési idő, amely szárazföldi szélerőművek esetén többnyire meghaladja a 4 évet, a tengeri szélerőművek esetében pedig ennek akár a kétszeresét vagy még több időt is jelenthet. A napenergia telepítésével kapcsolatban az utóbbi időben a villamosenergia-rendszerben megjelenő korlátozások, a hálózati csatlakozási várakozások, valamint a panelek felhalmozódása merült fel leginkább aggályként, azonban a 2023-as adatok szerint a napenergia-kapacitások jelentős növekedés alatt állnak, és a tavalyi telepített kapacitásnövekedés (+56 GW) révén az EU megfelel a SolarPower Europe által prognosztizált 2023-2027-es forgatókönyvnek [5] [8].

Az EU-s tervek és éghajlatvédelmi célok eléréséhez foglalkozni kell a villamosenergia-rendszer egyedi igényeivel, amihez a rendszer infrastruktúráját és a rugalmassági

mechanizmusokat fejleszteni szükséges. A megújuló energiaforrások elterjedésével és a magasfokú villamosítással egyre inkább egy decentralizált energiarendszer felé haladunk. A lakossági fogyasztók aktívabbá válnak a piacon, és egyre több helyen helyi energiaközösségek jönnek létre. A megfelelő hálózati infrastruktúra ezért kulcsfontosságú lesz annak biztosításához, hogy a növekvő mennyiségű megújuló energiaforrások integrálhatóak legyenek az energiarendszerbe, és az előállított tiszta energia szállítható legyen, minimalizálva a teljesítményingadozásokat és a rendszerkorlátozásokat. Ennek következtében 2023-ban az olyan rugalmassági eszközök, mint az energiatárolási megoldások, a keresletoldali válasz, és általánosságban a digitalizáció kiemelt figyelmet kaptak. A végfelhasználói ágazatok és az energiahálózatok ágazati összekapcsolása a villamos energia más energiahordozókba történő átalakításán keresztül és fordítva szintén nagyfokú rugalmasságot biztosíthat a villamosenergia-hálózat számára [5] [9].



4 ábra: A villamosenergia-rendszer főbb tendenciái, saját szerkesztés [9]

Ahogy a fenti ábra is mutatja, a szükséges rendszerrugalmasság biztosításának több egymással összefüggő eleme van, amely iránt az igény 2030-ra várhatóan megduplázódik. Természetesen ehhez beruházásokra is szükség lesz. **Az Európai Bizottság becslései**

szerint 2030-ig 584 milliárd eurós beruházásra lesz szükség a hálózati fejlesztések terén, beleértve az elosztóhálózati fejlesztéseket, a határokon átnyúló összeköttetések kialakítását, valamint a tárolásba történő beruházásokat [5].

1.3. Az energiatárolás szerepe

Az energiapiaci áttekintésben bemutatott trendek mentén, a globális energia szektor hatalmas átalakulás alatt van a 2030-ra és a 2050-re kitűzött klímasemlegességi céloknak köszönhetően, amelynek sikeres kezelésében meghatározó szerepet játszik az energiatárolás és a flexibilitás. A nap- és a szélenergia-technológiák rohamosan csökkenő költségeinek következtében egyre nagyobb mértékben lehet számítani a változékony és időszakos megújuló energiaforrások növekvő részarányára, a közlekedési ágazat szén-dioxid-mentesítését pedig az elektromos járművek elterjedése dominálja. Mivel az energiatároló rendszerek lehetővé teszik az energiafogyasztás és a termelés időbeli szétválasztását, ezek a technológiák jelentős potenciállal rendelkeznek a megújulók integrálásában és a villamosenergia-ágazat zavartalan működésének biztosításában. Az energiatárolási technológiák képesek energiát tárolni és később leadni a villamosenergia-hálózatba (vagy a végfelhasználó telephelyén belül) mechanikus, elektrokémiai vagy kémiai megoldások alkalmazásával. **Az energiatárolók ezért kiemelten fontosak a következő területeken:**

- **A megújuló energiaforrások egyik legnagyobb kihívása, hogy rendkívül változékonyak**, hiszen a napfény vagy a széljárás erőssége időszakonként és területenként is változó. Ennek következtében energiatárolás nélkül, a csúcsidőszakokban termelt többletenergia elvész, valamint az alacsony termelési időszakokban nem áll rendelkezésre elegendő energia a kereslet kielégítésére. **Hatékony energiatároló rendszerekkel azonban a felesleges energia eltárolható és később felhasználható** az alacsony termelési időszakokban, biztosítva a folyamatos energiaellátást.
- **A nagyméretű megújulóenergia-létesítmények villamosenergia-hálózatba történő integrálása stabilitási és üzembiztonsági kihívásokat jelenthet. Az energiatárolók segítenek enyhíteni ezeket a nehézségeket** azáltal, hogy kiegyenlítik a megújulók időszakos jellegét, hozzájárulva a hálózat stabilitásához és

csökkentve az áramkimaradások vagy az üzemzavarok valószínűségét. Ezzel biztosítható a megbízható áramellátás, még akkor is, amikor a megújulók nem képesek kielégíteni a keresletet.

- **Az energiatárolók segítenek az energiatermelés és -fogyasztás optimalizálásában.** A tárolási technológiák a csúcsidőn kívüli órákban tárolják a „felesleges” energiát, és a magas kereslet idején kiadják azt, segítve ezzel a terheléskezelést és a rugalmasságot. Mindez lehetővé teszi a fogyasztók számára, hogy a legköltséghatékonyabb módon használják a villamos energiát, csökkentve ezzel a hálózattól való függőségüket.
- **Az energiatárolók támogatják a decentralizált energiatermelést.** A megújuló energiarendszerek hozzájárulnak az energiatermelés decentralizálásához, azonban időszakos jellegükből adódóan a hatékonyságuk korlátozott lehet az energiatárolási megoldások nélkül. Az energiatárolók elősegítik a háztartások és a közösségek energiafüggetlenségét, és ellenállóvá teszik őket a hálózati kiesésekkel szemben.
- **Az energiatárolás segítséget nyújthat azokon a távoli területeken és a fejlődő régiókban, ahol nem, vagy csak korlátozottan áll rendelkezésre az összeköttetés a villamosenergia-hálózatokkal.** A megújuló energiaforrások és a tárolási technológiák kombinációja megbízható és fenntartható áramellátást tud biztosítani a hálózaton kívüli („off grid”) közösségeknek.
- **Az energiatárolás kulcsfontosságú szerepet játszik az energiaátállás felgyorsításában.** Az energiatárolók elősegítik a megújulók magasabb szintű integrálását az energiarendszerbe, ami hozzájárul a fosszilis tüzelőanyagoktól való függőség, valamint az energiaszektor szénlábnomának csökkentéséhez.
- **Az energiatárolás lehetővé teszi a földrajzi korlátok leküzdését.** A megújuló energiaforrások földrajzilag nem egyenletesen oszlanak el – egyes régiók szelesebbek vagy naposabbak, míg más területeken kevésbé szerencsés a megújulótermelő-technológiák telepítése. Az energiatároló technológiákkal lehetőség van a rendelkezésre álló energiát felvenni és eltárolni, majd továbbadni és eljuttatni oda, ahol éppen szükség van rá. Ezzel a rugalmassággal optimalizálni lehet a megújulók felhasználását különböző helyszíneken, maximalizálva a megújuló energiatermelés hatékonyságát.
- **Az energiatárolás támogatja a zöld technológiák integrációját.** Például az energiatárolók elősegíthetik az elektromos járművek („EV”) elterjedését, valamint

támogathatják a töltőinfrastruktúrák működését, azáltal, hogy a csúcsidőn kívüli órákban tárolják a többletenergiát, és akkor engedik azt ki, amikor az EV-töltésre magas a kereslet.

- **Az energiatárolás hozzájárul az energiarendszerek ellenálló képességének fokozásához.** Energiaellátási zavarok esetén az energiatárolók tartalékként működhetnek és biztosíthatják az áramellátást, valamint támogatják a kritikus infrastruktúrákat, csökkenve ezzel az egyes zavarok hatását.

2. A hosszú távú energiatárolás jelentősége

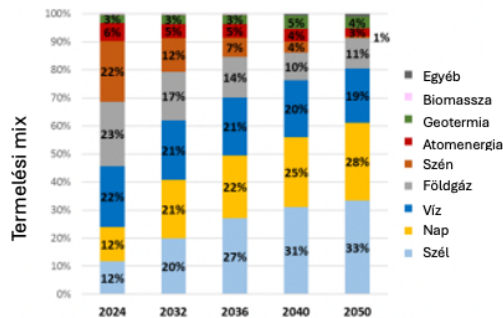
A hosszú távú – és szezonális – energiatárolási megoldások lehetővé teszik a megújuló energiaforrásokból származó villamos energia tárolását hosszabb időn, napokon, hónapokon vagy akár éveken keresztül lehetővé téve, hogy az energiát akkor használják fel, amikor arra a legnagyobb szükség van. Ezek a technológiák ma még nem túl elterjedtek, de a jövőben meghatározó szerepük lesz az energiakínálat és -kereslet időbeli egyensúlyának megteremtéséhez. A net-zéró energiarendszer elérése érdekében az országok egyre több villamos energiát fognak felhasználni. Az egyre nagyobb fokú villamosítással számos ágazatban – többek között a fűtés és közlekedés terén - kivezetik a fosszilis tüzelőanyagokat, amelyet villamos energiával helyettesítenek. Ennek nagy része megújuló energiaforrásokból (főként nap- és szélenergiából) származik majd, ami nagyban függ az időjárási viszonyoktól, következésképpen a villamosenergia-kínálat sokkal változékonyabb lesz.

Bár a megújuló energiaforrások növelésével csökkenthető az importfüggőség és növelhető az energiabiztonság, de **a villamosenergia-ellátás folyamatos fenntartásához szükség lesz az olyan megoldásokra, mint az energiatárolás,** amely rugalmas eszközként segíteni tud a megújulók integrálásában. Egyes kutatások szerint viszont a jelenleg rendelkezésre álló eszközök nem lesznek elegendőek az energiahálózat szén-dioxid-mentesítési céljainak eléréséhez, ugyanis a villamosenergia-termelés és -fogyasztás időpontjai közötti eltérések mértéke és kiterjedtsége egyszerűen túl nagy lesz ahhoz, hogy a hosszú távú energiatárolási technológiák nélkül ezt kezelni lehessen [10]. Bár manapság megfigyelhető a lítium-ionos energiatárolók dominanciája, az elemzők szerint a jövőben ezek az energiatárolási megoldások inkább rövid távú tárolóeszközként fognak funkcionálni, a degradáció, az önkisütés, és a gazdaságossági szempontok következtében. A jövőbeli piacokon ezért új technológiákra van szükség a hosszú távú energiatárolás biztosítása érdekében [11].

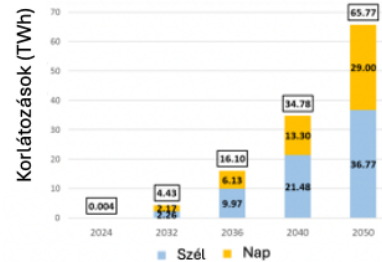
A hosszú távú energiatárolás előnyei és értéke fokozatosan növekedni fog a megújuló energiaforrások nagyobb arányú felhasználása esetén.

Az amerikai Nemzeti Megújuló Energia Laboratórium („NREL”) és a Villamosenergia-kutató Intézet („EPRI”) munkatársai kutatást végeztek arra vonatkozóan, hogy hogyan fog kinézni a hálózat a megújulók nagyfokú elterjedése mellett, és egy olyan scenáriót vizsgáltak, ahol 2050-re az amerikai villamosenergia-termelés 85%-a megújulókból származik. A következő ábrákon szemléltetjük az eredményeket.

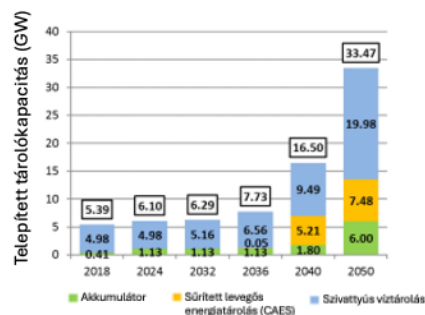
Termelési mix (a szél- és a napenergia növekszik, némi földgáz marad)



A korlátozások (curtailment) száma 2036-tól drámai mértékben (74%) növekszik.

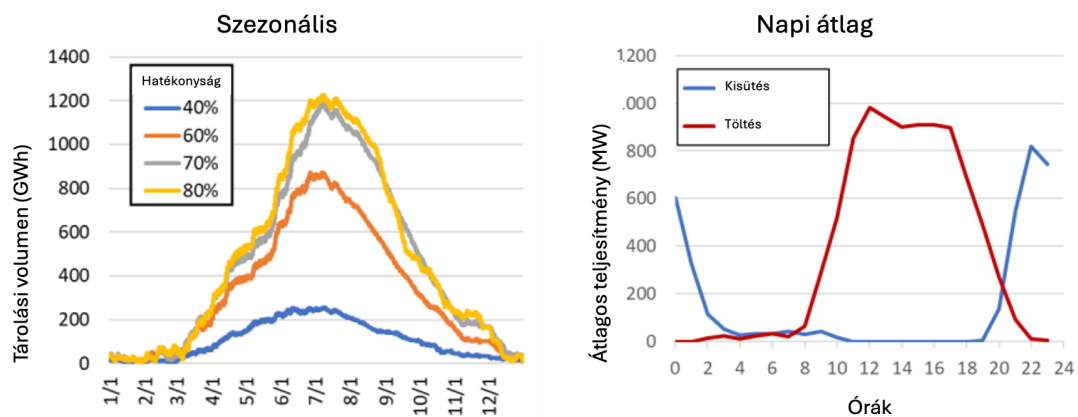


A hálózati tárolás 2036-tól drámai mértékben növekszik (74%).



5 ábra: Az amerikai villamosenergia-hálózat 85%-os megújuló részarány mellett [12]

Az elemzés szerint a hosszú távú energiatárolásnál fontos lesz meghatározni azokat a potenciális rendszerköltségeket vagy inkább elkerülhető költségeket, amelyek a hosszú távú energiatárolás előnyeit, valamint gazdasági versenyképességét növelik a megújuló energiaforrások nagyfokú elterjedésével. Az NREL és az EPRI, valamint más elemzések is kiemelik, hogy a hálózatnak kétféle módon is szüksége lehet a hosszú távú vagy éppen szezonális energiatárolásra: 1.) napi ciklusok kezelése és ~ 20-24 órás tárolás biztosítása, 2.) szezonális ciklusok kezelése és a napokban vagy hetekben mért tárolás biztosítása [12] [10].



6 ábra: A hosszú távú energiatárolás működési profiljai [12]

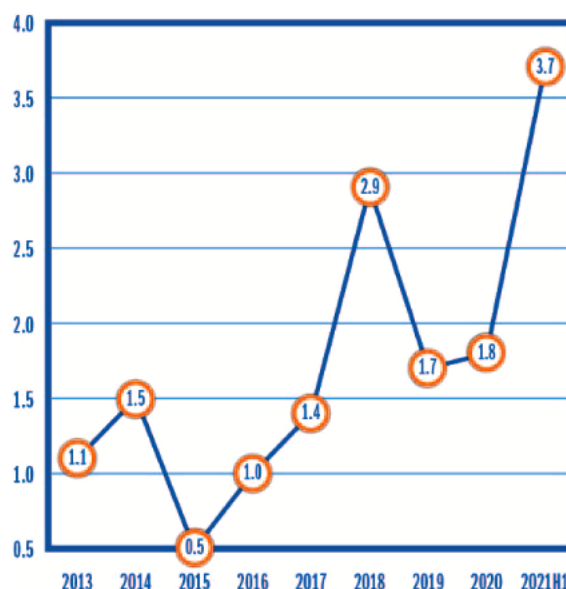
Az energiafogyasztás jellemzően a reggeli órákban (~5-8 óra között), este pedig 17 óra után a legmagasabb. Napközben a naperőművek termelése kiegyenlíti a fogyasztói igényeket, viszont a keresletet, ami 18:00 óra körül ismét magasba kúszik, a napenergiával termelt villamos energia már nehezen tudja kielégíteni, ami drasztikusan csökken délután 17:00 és 20:00 óra között. Bár a szélenergia valamelyest ellensúlyozza az esti és az éjszakai órákban keletkező hiányt, de az éjszakai hiányos időszakok akár 12-19 óra között is lehetnek. Ez pedig megmutatja az igényt a hosszú távú energiatárolási technológiák iránt, amelyek képesek kezelni ezeket a napi ciklusokat. A szezonális tárolási igény pedig leginkább az évszakok között jelenik meg: a jellemzően napos tavaszi-nyári hónapokban, amikor többlettermelés van, és az energiatárolók képesek a felvenni a többletenergiát, amit aztán átcsoportosítanak a kevésbé napos, őszi-téli hónapokra [10].

A hosszú távú energiatárolási megoldások megfelelő elterjedéséhez természetesen erős politikai ösztönzőkre lesz szükség. A technológiák elterjedése és hozzájárulása a széndioxid-mentesítéshez nagyban függ attól, hogy az ipari vállalatok mennyire hajlandóak átvenni az új technológiákat és mennyi demonstrációs projektet indítanak, amelyek növelik az elfogadást. A kormányzatok által nyújtott támogatások a pilot projektekre és a széndioxid-adó kivetése a késlekedő cégekre ösztönző hatással lehet a hosszú távú energiatárolási technológiák bevezetésére.

3. A hosszú távú és a szezonális energiatárolás jelenlegi technológiái – összehasonlító elemzés

A megújuló energiatermelési technológiák költségei folyamatosan csökkennek, de a megújuló energiaforrások növekvő arányú felhasználásának költségei egyre nőnek a kiegyenlítő szolgáltatások, a hálózatbővítés és a megújuló energiaforrásokból származó többlettermelés korlátozásának szükségessége miatt. Ráadásul az energiakereslet szezonális mintázatot követ. Európában a téli hónapokban ez kiemelten látszik a fűtési energiaigény miatt. Az évszakok közötti energiatárolás ezért olyan kihívást jelent, amellyel foglalkozni kell. A meglévő gázinfrastruktúra felhasználható a megújuló gáz (metán vagy hidrogén) szezonális tárolására, amelyet elektrolízis útján megújuló villamos energiából lehet előállítani.

A hosszú távú energiatárolás („LDES”) műszaki definíciója tekintetében nincs egységesen elfogadott fogalom. Részben azért van ez, mert az energiatároló rendszerek tárolási képessége rendkívül gyorsan fejlődik. Ezt jól mutatja, hogy az új energiatároló rendszerek átlagos élettartama 2013 óta jelentősen nőtt. Míg 2013-ban az új rendszerek átlagos időtartama körülbelül egy óra volt, addig a 2021 első felében üzembe helyezett új rendszerek átlagos időtartama körülbelül 3,7 óra [10]:



7 ábra Új energiatárolók kapacitásának alakulása (átlag) [10]

Álláspontunk szerint az LDES körébe azok az energiatárolási műszaki megoldások

tartoznak, amelyek 10 és 100 óra között tudnak villamos vagy hőenergiát eltárolni és azt ezen időtartam alatt *gazdaságosan* kiadni. Ez azt is jelenti, hogy a szezonális energiatároló rendszerek csoportja is természetesen – műszaki értelemben – „tudja” a 10 és 100 óra közötti energiatárolást, de a szezonális energiatároló rendszerek 10-100 óra közötti alkalmazása a legtöbb esetben nem gazdaságos. Tehát a műszaki definíció mellett megjelenik a közgazdasági szempont is: a tárolót gazdaságosan kell tudni üzemeltetni az említett tartományban. Emiatt LDES-re műszakilag a li-ionos energiatárolók is alkalmasak, de a jelenlegi árszint mellett nem alkalmazzák azokat 4-5 óránál több időtartamra.

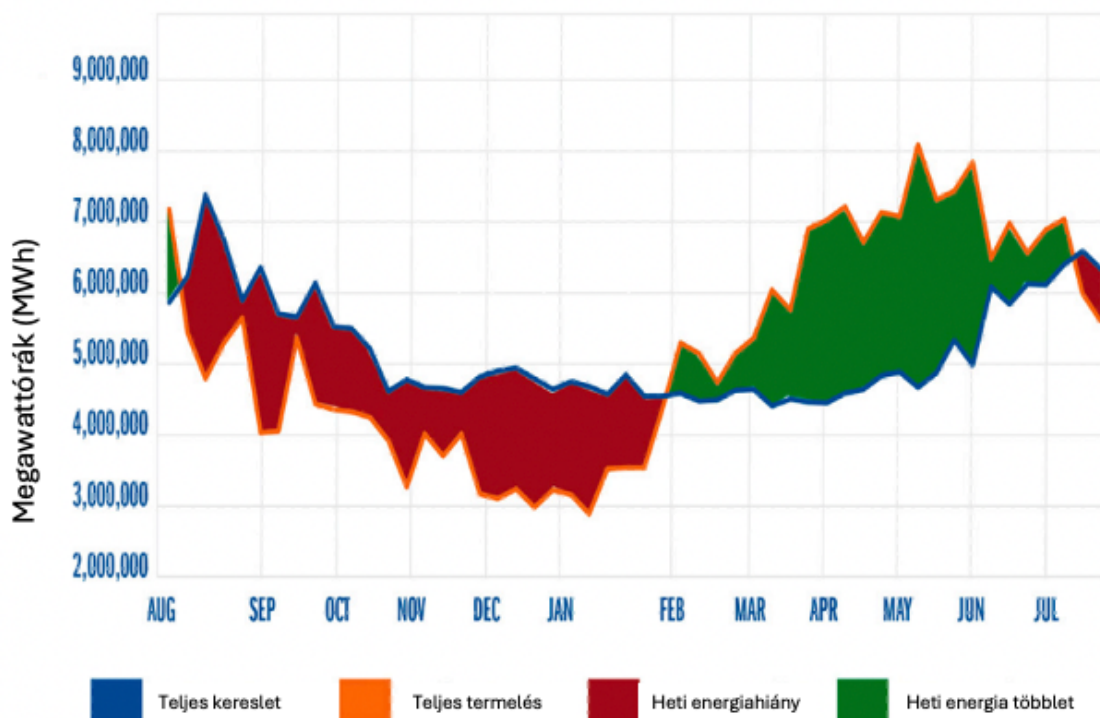
Az LDES 10-100 óra közötti alkalmazása azt jelenti, hogy a névleges teljesítményt (MW), ami az egy adott időpontban leadható maximális villamos vagy hőteljesítmény, 10-100 óra közötti időtartamban tudja leadni (MWh). Például, ha egy LDES 100 óra időtartamban tudja leadni a maximális teljesítményét, akkor egy 1 MW teljesítményű energiatároló 100 MWh energiát képes eltárolni. Ha azonban 0,5 MW-os teljesítménnyel lehet az LDES-t hatékonyan lemeríteni, akkor a teljes lemerülés körülbelül 200 órát venne igénybe.

Az alábbiakban bemutatjuk az LDES különböző, nem egységes definíció változatait: [10]

- 1.) Az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma („DOE”) LDES alatt olyan energiatároló berendezéseket ért, amelyek 10 óránál hosszabb ideig képesek csúcsteljesítményük leadására,
- 2.) A Kaliforniai Energiaszolgáltató Tanács LDES alatt 8 és 12 óra közötti energiatároló műszaki megoldásokat ért,
- 3.) A Kaliforniai Energiaügyi Tanács definíciója szerint a 10 órát meghaladó műszaki megoldások tartoznak az LDES közé,
- 4.) Az Fejlett Kutatási Projektek Energetikai Ügynöksége („ARPA-E”) a kutatás finanszírozásai során a 10 és 100 óra közötti energiatároló berendezéseket sorolja az LDES közé,
- 5.) A Hosszú Távú Energiatároló Tanács (globális szervezet) az LDES-t kettő kategóriába osztja:
 - a. 8-24 óra közötti energiatároló,
 - b. 24 óránál többet áthidalni képes energiatároló

A szezonális energiatárolás műszaki definíciója:

Az időjárásfüggő megújuló energiatermelés napon belüli, illetve szezonális kiegyenlítetlenséget okoz az energiarendszerben, amely nagyon jelentős problémákat fog okozni. A változó jellegű megújuló energiaforrások (nap-, szélenergia) teljes termelése gyakran már tavasszal eléri a csúcspontját, viszont az őszi és a téli hónapokban a megújulók termelése általában lecsökken. Emellett, vannak olyan megújuló energiaforrások (geotermikus energia, bioenergia) is, amelyek egész évben rendelkezésre állnak egyes helyeken. Annak érdekében, hogy a megújuló energiaforrásokat egész évben fel lehessen használni, szükség van a gazdaságilag életképes szezonális energiatárolási megoldásokra, amelyek képesek az egyik évszokról a másikra áthelyezni a villamos energiát. A napon belüli kiegyenlítetlenséget, illetve a megújulók kiszámíthatóságát az LDES technológiák képesek kezelni. A „nagyobb” problémát a szezonális termelési és felhasználási különbségek jelentik, hiszen azokat csak szezonális energiatárolással lehet áthidalni [13].

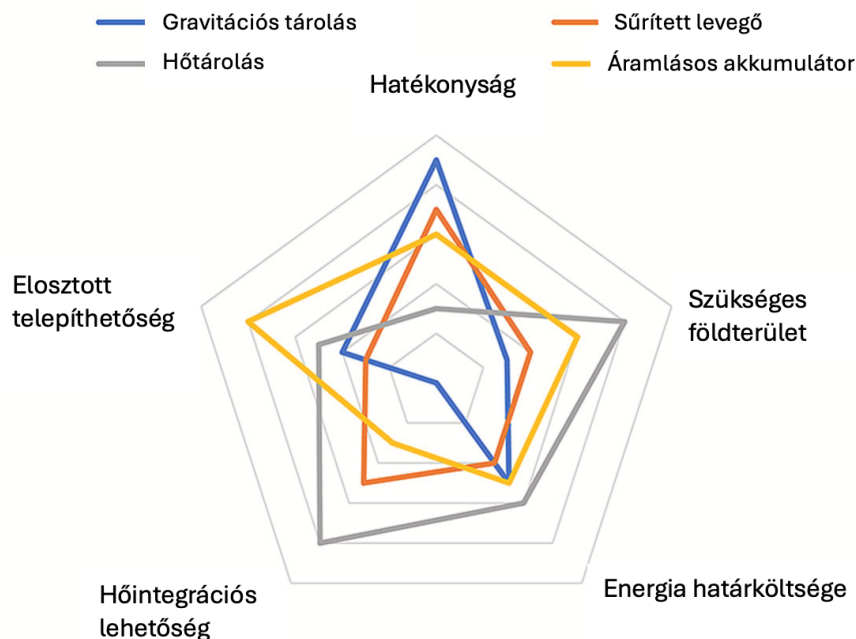


8 ábra: Kalifornia havi energiaegyenlege teljes dekarbonizáció esetén [10]

Az LDES technológiák csoportosítása:

Az LDES technológiákat az alábbi műszaki és gazdasági szempontok szerint

„csoportosíthatjuk” [14]:



9 ábra: LDES technológiák különböző vizsgálati szempontjai [14]

Műszaki szempontból ezeket a szempontokat érdemes részletes meghatározni, hiszen az LDES technológiák legfontosabb karakterisztikáit tartalmazzák:

- **Hatékonyság/ oda-vissza hatásfok** („RTE): Az energiatároló hatékonysága a teljes kiadott energia és a teljes betárolt energia aránya. Az RTE nagyon változó a különböző LDES-ek esetében, 40%-tól 90%-ig terjedő skálán mozog [15].
- **Elosztott telepíthetőség:** Az energiatároló rendszereknek igazodni kell az energiarendszerben megfigyelhető decentralizálódásra: a termelőeszközök széttagoltan helyezkednek el az eddigi centralizált termelés és elosztási rendszer helyett.
- **Szektorintegráció (hő):** Az Európai Bizottság (Energiaügyi Főigazgatóság) az ágazati összekapcsolást "stratégiának" tekinti, mert nagyobb rugalmasságot biztosít az energiarendszerben, emiatt a szén-dioxid-mentesítés megvalósítása költséghatékonyabb módon.
- **A telepítés helyigénye – a tároló energiasűrűsége:** A telepítés helyigénye -ugyan nem teljes egészében-de az energiatároló energiasűrűségét mutatja.

Az alábbiakban bemutatjuk a kereskedelmileg elérhető LDES technológiák jelenlegi jellemző kapacitását és tárolási képességét:

1 táblázat: Kereskedelmileg elérhető LDES technológiák [16]

Az energiatárolás formája	LDES technológia	Tároló kapacitás (MW)	Névleges időtartam (órák)	Átlagos RTE
Mechanikus	Földalatti szivattyús vízerőmű	10-100	0-15	50-80%
	Folyékony levegős energiatároló	50-100	10-25	40-70%
	Földfelszíni szivattyús vízerőmű	20-400	0-15	70-80%
	Sűrített levegős energiatároló	200-500	6-24	40-70%
	Gravitációs energiatároló	20-1000	0-15	70-90%
Termikus	Érzékelhető hő	10-500	200	55-90%
Kémiai	Áram – gáz - áram	10-100	500-1000	40-70%
Elektrokémiai	Vizes elektrolit áramlásos akkumulátor	10-100	25-100	50-80%
	Fém anód akkumulátor	10-100	50-200	40-70%
	Hibrid áramlásos akkumulátor	>100	8-50	55-75%

Az alábbiakban a táblázatban szereplő energiatárolási formák szerint, csoportosítva bemutatjuk a hosszú távú energiatárolási megoldásokat. A táblázatban szereplő kereskedelmi forgalomban elérhető technológiák mellett, röviden szemléltetünk olyan technológiákat is, amelyek még nem érték el a kereskedelmi szintet.

3.1. Mechanikus energiatárolás

A mechanikus energiatároló rendszerek a klasszikus newtoni mechanikán alapulnak. Az energiát kinetikus vagy potens energiaként, illetve nyomási energiaként tárolják. A hőtárolás mellett vélhetően ez az egyik legrégebbi energiatárolási megoldás. A mechanikus tárolás egyszerű alapkoncepciója vonzóvá teszi a különböző típusú energiatárolási megoldásokat ezen a területen. A technológiák fejlesztése során a kihívást gyakran a korlátozott tárolási sűrűség adja, ami alacsonyabb, mint a legtöbb más energiatárolási koncepció esetében. A mechanikus energiatároló rendszerek alkalmasak az erőművi méretű villamos energia több órán keresztül történő tárolására, ugyanakkor ezek a rendszerek nagy tárolási térfogatot igényelnek, ezért fontos, hogy a tárolóanyagok alacsony költségűek legyenek, illetve, hogy a közbenső veszteségeket minimalizálni lehessen.

1. Szivattyús vízerőművek (földalatti és földfelszíni)

A szivattyús tározós erőmű („PHS”) az elektromos energia tárolása a víz potenciális energiájának felhasználásával, a víz szivattyúzásával és tárolásával történik egy felső tározóban/tavakban. A szivattyús víztárolás a legkiforrottabb tárolási koncepció a telepített kapacitás és a tárolási mennyiség tekintetében: a globális tárolási teljesítménykapacitás 96%-át és a globális tárolási energiamennyiség 99%-át teszi ki. Az építés alatt álló mintegy 44 GW és a jelenleg a tervezés különböző előrehaladott fázisaiban lévő több mint 70 GW-os kapacitással a következő évtizedben megduplázódhat a globális szivattyús tárolási kapacitás mértéke. Az utóbbi időben a szivattyús víztárolás iránt megújult az érdeklődés, számos projekt van fejlesztés alatt Ausztráliában, Kínában, Indiában, Európában és az Egyesült Államokban.

A szivattyús vízerőművek fő előnyei a következők:

- magas RTE,
- megbízható és bevált technológia,
- képes rendszerszintű szolgáltatások nyújtására, beleértve a blackstart-ot is,
- gyors a reakcióidő.

A szivattyús víztárolás technológiai megoldásai az alábbiak lehetnek:

- aszinkronmotor-generátorral kapcsolt, változó fordulatszámú gépek,
- felhagyott földalatti bányák vagy meglévő tározók kiaknázása (mint felső vagy alsó tározó),
- felhagyott bányákban vagy szándékosan feltárt föld alatti szivattyús víztározók,
- tengervizes szivattyús víztárolás (földalatti vagy föld feletti).

A szivattyús víztárolásnak azonban számos hátránya van, amelyek korlátozzák versenyképességét, többek között:

- erős telephely-függőség,
- jelentős környezeti hatás,
- alacsony energiasűrűség a víztározók kiterjedése miatt,
- hosszú átfutási idő az engedélyezéstől a kereskedelmi üzemig.

A vízerőművek gátjait különböző módon építik földből, sziklából és betonból, tartalmazzak egy vízhatlan réteget, például betont, aszfaltot, agyagot, műanyagot vagy acélt. A meglévő szivattyús vízerőművek szinte mindegyike folyami alapú. A közelmúltban a folyón kívüli szivattyús víztárolós-rendszerek kerültek előtérbe, ahol egy pár, egymástól több kilométer távolságra lévő, különböző magasságban elhelyezkedő mesterséges víztározót vízvezetékek, csövek és alagutak kombinációjával kötnek össze. A szivattyús víztárolós rendszereket lehet újonnan építeni ("zöldmezős"), vagy régi bányatelepeket vagy meglévő víztározókat felhasználni ("barnamezős"). A folyón kívüli helyszínek sokkal nagyobb száma a folyón belüli helyszínekhez képest sokkal szélesebb körű helyszínválasztást tesz lehetővé környezeti, társadalmi, geológiai, hidrológiai, logisztikai és egyéb szempontokból.

A szivattyús víztárolás számos előnye ellenére a megfelelő helyszínek továbbra is a jelentős magasságkülönbséggel rendelkező területekre korlátozódnak. Ezen túlmenően a szivattyús víztárolás fenntarthatósága aggodalomra ad okot a víz rendelkezésre állását illetően az aszályos években, amikor a víz számos más ágazatban létfontosságú erőforrássá válik, és a gátak nem tudnak feltöltődni teljes szezonális kapacitásukat.

A vízvisszavezetés a folyón kívüli üzemekben is releváns éves fogyasztást jelenthet, tekintettel az adott telephely elhelyezkedésére. Például a nevadai White Pine Pumped Hydro folyón kívüli projekt éves vízfogyasztása 750 hektoliter/év, ami nagyjából az államban

szivattyúzott összes felszín alatti víz 1%-át teszi ki. Ez az érték hasonló lenne a CO₂-akkumulátor teljes élettartama alatt szükséges vízmennyiséghez, az energiatárolási kapacitás alapján összehasonlítva, nem számítva a szivattyús víztározók kezdeti feltöltését.

A vízenergia-rendszer költsége és fejlesztési ideje a következőkből tevődik össze:

- tervezés, jóváhagyások és engedélyezés,
- víztározók építése,
- vízszállítás (alagutak, csövek, vízvezetékek),
- erőmű (szivattyú/turbina, generátor, kapcsolóház és vezérlés),
- hozzáférés (utak, villamosenergia-átvitel és víz),
- üzemeltetés és karbantartás a rendszer élettartama alatt.

Az energiaköltségek minimalizálhatók a nagy vízhozamokkal, a felső és alsó tározók kialakításához szükséges hasznos vízmennyiség és a közetmennyiség nagy arányával, míg az energiaköltségek minimalizálhatók a nagy vízhozamokkal és a nyomócső vagy alagút nagy átlagos meredekségével. Az éves üzemeltetési és karbantartási költségek, valamint a 20 és 40 év utáni nagyobb felújítások évente a kezdeti tőkeköltség kb. 1%-ába kerülnek. Hasonlóan a nap- vagy szélerőművekhez, a szivattyús vízerőművek költségei szinte teljes egészében előre fizetendők.

2. Folyékony levegős energiatárolás („LAES”)

A folyékony levegős energiatároló rendszer egy töltőrendszerből, egy energiatárolóból és egy lemerítő rendszerből áll. A töltőrendszer egy ipari levegő cseppfolyósító üzem, ahol a villamos energiát a környezetből származó környezeti levegő hőjének elvezetésére használják, folyékony levegőt ("kriogént") termelve. A folyékony levegőt alacsony nyomáson egy szigetelt tartályban tárolják, amely energiatárolóként működik. Amikor energiára van szükség, a folyékony levegőt kivonják a tartályból, magas nyomásra szivattyúzzák és elpárologtatják. Ezáltal gáznemű levegő keletkezik, amely dugattyús motor vagy turbina meghajtására használható, hogy hasznos munkát végezzen, amely villamos energia előállítására használható. A LAES nagy térfogati energiasűrűséget kínál, és meghaladja azokat a földrajzi korlátokat, amelyek a jelenlegi kiforrott energiatárolási technológiákat akadályozzák. A LAES-technológiáknak különböző kategóriái vannak,

amelyeket az alkalmazott termodinamikai folyamat alapján különböztetnek meg. A LAES-technológiák gyártásában a vezető szerepet Európa tölti be, ugyanis ezt a típusú technológiát főként négy, európai országban (Egyesült Királyságban, Németországban és Olaszországban) található vállalatok – nevezetesen a Highview Power Storage a GE Nuovo Pignone-val és a Mitsubishi Hitachi Power Systems a Linde Csoporttal együttműködve – fejlesztik. A LAES-rendszerek ideálisak lehetnek fogyasztási központok közelében. További jellemzője, hogy kifejezetten alacsony kiegyenlített energiaköltséggel („LCOE”) rendelkezik, valamint a berendezések és a LAES-erőművek építéséhez szükséges munkaanyag nagy része beszerezhető a helyi ellátási láncokból. [17] [18].

További előnyök:

- Magas eltárolt energiamennyiség,
- Nagy teljesítmény (10 és 100 MWe között),
- Moduláris felépítés és méretezhetőség,
- Meglévő technológián alapul, kivéve a hűtőtárolást,
- Hulladékhő-visszanyerési lehetőség az RTE javítására,
- Kompakt: kb. 0,5 hektár 20 MWe (100 MWh) esetén - 40 kWh/m².

A CO₂-akkumulátorral összehasonlítva:

- sokkal alacsonyabb RTE: 50-55%,
- Magasabb költségek a kriogén eljárás miatt (-190°C): 360 €/kWh a CO₂-akkumulátor 60-200 €/kWh-jával szemben,
- Nehéz részterheléses üzemmód,
- Összetett a hideg hőenergia-tárolás miatt.

3. Sűrített levegős energiatárolás

A sűrített levegős energiatárolás („CAES”) technológiai koncepciója több mint 40 éves. A CAES-t az 1970-es években kezdték komolyan vizsgálni, mint a terheléskövetés és a csúcsgény kielégítésének eszközét, és az 1970-es évek végén hozták kereskedelmi forgalomba. A CAES-rendszer a hagyományos gázturbinák háromfázisú modelljét követi, amely magában foglalja a töltést, a tárolást és a kisütést. A töltési fázisban a CAES a

csúcsidőn kívüli és költséghatékony villamos energiát használja fel a környezeti levegő sűrítésére. A sűrített levegőt ezután egy külön erre a célra kialakított, nyomás alatt álló tartályban tárolják, amely lehet földalatti barlang vagy föld feletti tartály, amelyet jellemzően 40-80 bar nyomáson tartanak. A kisütési fázisban a sűrített levegőben tárolt rugalmas környezeti energiát hasznosítják. A sűrített levegőt a tartályból szívják ki, felmelegítik, majd egy turbinahajtóműben magas nyomáson és hőmérsékleten kitágítják. Ez a tágulási folyamat villamos energiát termel, amely visszatáplálható a hálózatba. Példák:

- **HIDROSZTOR (A-CAES):** A hidrosztor kifejlesztett egy technológiát, amely a földalatti sűrített levegős energiatárolást kombinálja a szivattyús vízerőművel. Földalatti üregeket használnak a sűrített levegő tárolására egy vízfejjel kombinálva, hogy a nyomás a föld alatt állandó maradjon a töltési és ürítési fázisok hatékonyságának növelése érdekében.

A Hydrostor technológiának jelentős előnyei vannak, többek között:

- magas RTE 75% potenciálisan lehetséges,
- hosszú időtartam,
- nagy teljesítmény (100 MWe),
- nagy léptékben potenciálisan versenyképes beruházási költség („CAPEX”);(xGWh),
- hosszú időtartam és nagy kapacitás.

A technológia műszaki hátrányai:

- helyfüggő, mivel a CAES kitermeléséhez speciális földalatti körülményeknek kell rendelkezésre állniuk (több százezer köbméter).
- földtani kockázat,
- jelentős környezeti hatás,
- hosszú fejlesztési idő (évek) és költség,
- a beruházási költségek csak nagyon nagy léptékben versenyképesek, és ha a földalatti infrastruktúra már létezik.

- **Földalatti sűrített levegős energiatárolás:** A technológiát három amerikai vállalat fejlesztette ki, a Sustain X, a General Compression és a Lightsail. Mindannyian olyan sűrített levegős energiatárolást próbáltak kifejleszteni, amely föld feletti nyomástartó edényekben tárolja az energiát. Ezek a vállalatok, bár sok finanszírozást tudtak szerezni, a fent említett probléma miatt tönkrementek.

4. Gravitációs energiatárolás

A gravitációs energiatárolás a gravitációs energiát egy tárolóeszközben hasznosítja. A gravitációs energia például egymásra rakott betontömböket vagy más nehéz anyagokat használ, és a felesleges energiát a villamos hálózathoz vonja el. Az Energy Vault egy kiemelt gyártó ezen a területen, amelynek a kifejlesztett rendszere ugyanazokat az alapelveket – fizika és a mozgási energia – használja, mint a szivattyús vízenergia, de a vizet egyedi készítésű kompozit blokkokkal helyettesíti.

A módszer - betontéglák daruval történő emelése, amely során a rendszer képes energiát tárolni. Működése a következő:

- 35 tonnás kompozittéglákat emelnek fel egy torony vagy egy masszív épületszerkezet létrehozásához; az energia a daru emelkedése során kerül eltárolásra,
- a téglák ezután visszakerülnek a földre, és a leeső téglából keletkező mozgási energia ismét elektromossággá alakul,
- a speciálisan kifejlesztett vezérlőszoftver biztosítja, hogy a téglák minden alkalommal pontosan a megfelelő helyre kerüljenek,
- moduláris és rugalmas, 20-35-80 MWh tárolókapacitással és 4-8 MW 8-16 órán át tartó folyamatos teljesítményleadással. Ideális a hosszú távú tárolásra,

A technológia hátrányai:

- az RTE magasabb, ha az érték $> 80\%$,
- a CAPEX sokkal magasabb, mivel a költségek a beton piaci árához idomulnak. Az Energy Vault olyan költségekkel számol, mely szerint a betontömbök a beton tényleges költségének 1/10-ed részébe kellene kerülniük,

- a betontömbök mozgását befolyásoló, kiszámíthatatlan időjárási viszonyok miatt a működés bonyolult,
- nagy szükség van földterületre, építőanyagra az épület tárolásához (lásd az alábbi képet).
- korlátozott maximális teljesítmény minden egyes téglatoronyban,
- összehasonlítható tárolási idő.

5. Lendkerék

A mechanikus energiatárolás terén érdemes megemlíteni a lendkerekeket is, amelyek elektromos motorokat használnak a lendkerék nagy sebességgel történő forgatására, hogy a villamos energia mechanikai energiává alakuljon át és tárolható legyen. Szükség esetén a lendkerekek generátorokat hajtanak meg az áramtermeléshez. A lendkerekes energiatárolási technológia („FES”) előnyei a gyors indítási kapacitás, az alacsony karbantartási költségek, a magas élettartam, a szennyezésmentesség, a nagy mennyiségű energiatárolás, a gyors töltés és a végtelen töltési/kisütési idő. Ugyanakkor van néhány hiányossága is, mint például az alacsony energiasűrűség és a rendszerbiztonság biztosításával járó magas költségek. Előnyei kis léptékben nem mutathatók ki. Jelenleg elsősorban az akkumulátoros rendszer kiegészítésére használják. A technológia gyártója az Amber Kinetics.

3.2. Termikus energiatárolás

Nagyon egyszerűen megfogalmazva hőtárolók a hőmérsékletet, illetve annak különbségeit használják az energia tárolására. A hőtároló rendszerek („TES”) magukban foglalnak minden olyan technológiát, amely lehetővé teszi a **hőenergia megkötését és tárolását későbbi felhasználás céljából**. A hőenergia-tároló rendszerek három típusa lehetővé teszi, hogy az alacsony igénybevételű időszakokban termelt felesleges hő (vagy hűtési energiát) tárolják, hogy azt később, a magas igénybevételű időszakokban felhasználhassák. Így a hőtermelő rendszerek olyan csúcsidőszakokban, amikor a rendszer a pillanatnyi kereslet kielégítésével küszködik, további energiaforrást biztosíthatnak. Ez a terhelésáthelyezés segít kiegyensúlyozni a fűtés és hűtés kínálatát és keresletét, biztosítva a folyamatos ellátást. A TES-rendszerek másik kulcsfontosságú felhasználási területe az, hogy lehetővé teszik az időszakos megújuló energiaforrások integrálását azáltal, hogy a felesleges energiát tárolják,

és akkor használják fel, amikor a megújuló energia nem áll rendelkezésre. A hőtárolók alkalmazása viszonylag új, folyamatosan fejlődő és alakuló technológiának számít. A szakértők egyöntetű véleménye szerint a folyamatos kutatási és fejlesztési feladatok elengedhetetlenek, mivel a TES technológia rengeteg egyedi lehetőséget nyújt [19]:

- **Fogyasztói szabályozás**

A TES biztosíthatja a hő és a hideg rugalmas szállítását, a fogyasztó és ellátói oldal szétválasztásával

- **Változó ellátás integrációja**

A megújulók által termelt villamosenergia csúcsidején termelt hő/hideg a fogyasztó oldali kereslethez tud igazodni azokban az időszakokban, amikor a megújulók nem termelnek (nem süt a nap, nem fúj a szél).

- **Szektorok integrációja**

A TES az egész rendszerre kiterjedő előnyöket biztosít a fokozott szektor (ágazati) integráció révén, lehetővé téve, hogy a megújulókból származó villamos energia megbízhatóbban tudják kielégíteni a fogyasztó oldali keresletet.

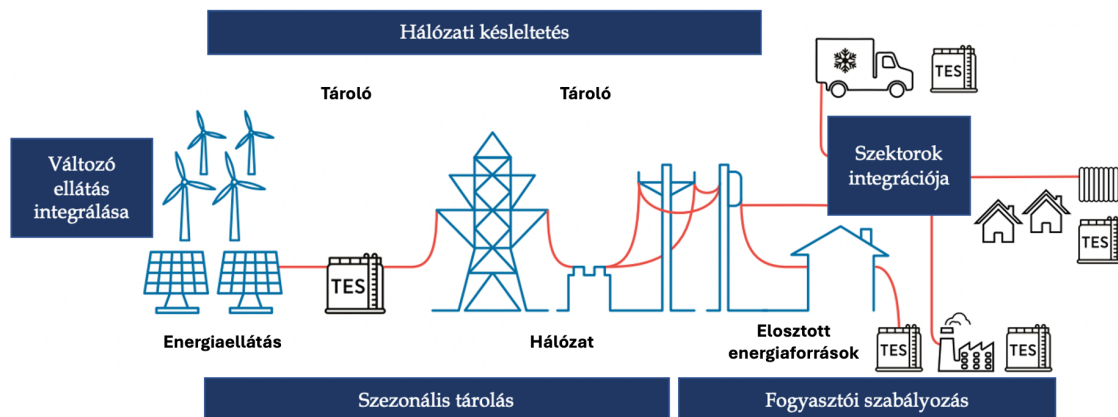
- **Hálózatmenedzsment**

A fokozott rugalmasság enyhíti a villamosenergia-hálózatokra háruló terheket, ezáltal csökkenti /eltolja a hálózati fejlesztési költségek felmerülését.

- **Szezonális tárolás**

A TES technológia lehetővé teszi a téli fűtési igények kielégítését a nyáron termelt villamos energia hőként történő eltárolásával, továbbá a nyári hűtési igényeket a téli hideg eltárolásával (bizonyos technológiák esetén).

A fenti előnyöket rendszerbe foglalva az alábbi ábra mutatja be:



10 ábra: Hőtárolók alkalmazási lehetőségei

A „TES technológiák” kifejezés valójában több, alapl működésben eltérő megoldást foglal magába. A fő különbséget- akár csak egyéb energiatárolók esetén- a közeg, felhasznált anyagok, továbbá a fizikai- kémiai jelenségek felhasználásának különbségei adják. Ennek mentén az alábbi kategóriákat különböztetjük meg:

- érzékelhető hő,
- látens hő, és
- termokémiai hőtárolás.

Mindegyiknek különböző előnyei és hátrányai vannak, amelyek meghatározzák alkalmazásukat.

Az **érzékelhető vagy szenzibilis hőtárolás** („SHS”) a leghagyományosabb, legkiforrottabb és legszélesebb körben alkalmazott TES-megoldás egyszerű működése és kedvező költsége miatt. A másik két TES-változathoz képest azonban alacsony energiatárolási sűrűséggel rendelkezik. Az érzékelhető hőtároló rendszerek a tárolóanyag (folyékony vagy szilárd anyagok, például: víz, olaj, tégl, kőzet, homok stb.) hőkapacitását és hőmérsékletének változását használják ki a töltés vagy kisütés során - a tárolóanyag hőmérséklete emelkedik, amikor energiát vesz fel, és csökken, amikor energiát von el. Ennek a módszernek az egyik előnye, hogy a felhalmozott hő tárolása és leadása (töltési és kisütési ciklusok) gond nélkül megismételhető, miközben nagy térfogatú, az igényeknek megfelelő mennyiségű hő

tárolására képesek. Az energiatárolás hőmérséklete $<0^{\circ}\text{C}$ - 2400°C között mozog, és időtartama perctől akár hónapokig is terjedhet.

A **látens hőtárolók** („LTS”) egy fázisváltó anyagot használnak, amely a csúcsidőn kívüli időszakban olvadás révén állandó hőmérsékleten hőenergiát vesz fel és tárol, majd a csúcsidőben a tárolt hőenergiát megszilárdulva felszabadítja. Ezek a fázisváltó anyagok képesek nagy mennyiségű hőt elnyelni vagy leadni a fázisátalakulás során (pl. szilárdból folyadékká vagy folyadékból gázzá), lehetővé téve a hatékony energiatárolást és -leadást. Néhány gyakori fázisváltó anyag közé tartozik a paraffinviasz, a sóhidrátok és bizonyos szerves vegyületek. Ez a módszer $<0^{\circ}\text{C}$ - 1600°C közötti hőmérsékleten képes tárolni a hőt órák és napok közötti időtartamra. A látens hőtárolás néhány gyakori alkalmazása közé tartoznak a jégtároló rendszerek, amelyekben a víz alacsony energiaigényű időszakokban megfagy, és a csúcsidőszakokban a hűtés felszabadítása érdekében megolvad.

A látens hőtárolókban tárolt energia jellemzően nagyobb, mint az érzékelhető hőtároló rendszereké. Például a víz esetében az olvadás körülbelül 80-szor több energiát biztosíthat, mint a hőmérséklet 1-2 fokkal történő emelése. Ugyanakkor ezek a rendszerek még kevésbé fejlettek.

A **termokémiai energiatárolás** („TCES”) reverzibilis kémiai reakciót használ, és az erős kémiai kötések előnyeit kihasználva kémiai kapacitás formájában tárolja az energiát. Az érzékelhető hőtároláshoz és a látens hőtároláshoz képest elméletileg nagyobb energiasűrűséget kínál, a hosszú távú tárolás során minimális energiavesztéssel, mivel a tárolás hőmérséklettől független módon történik. A módszer előnyei és ígéretes lehetőségei az elmúlt évtizedben egyre több kutatás-fejlesztést ösztönöztek. A TCES-technológiákat főként két csoportra osztják, a **termokémiai szorpciós tárolórendszerekre és a kémiai reakciótároló rendszerekre** (termokémiai szorpció nélküli termokémiai tárolórendszerek). A termokémiai szorpciós tárolás általában az alacsony hőfokon történő tárolásra összpontosít, míg a termokémiai, szorpció nélküli tárolást inkább viszonylag magasabb hőmérsékletű alkalmazásokhoz alkalmazzák.

A következőkben bemutatunk néhány meghatározó, kereskedelmi forgalomban vagy demonstrációs fázisban lévő TES technológiát.

1. Szenzibilis hő technológiák

a. Olvasztott só energiatárolás

A sók szervesetlen kémiai vegyületek. A hőtárolásra használt sók, amelyek normál esetben környezeti hőmérsékleten szilárd halmazállapotúak lennének, olvadáspontjuk feletti hőmérsékleten maradnak, így folyékony formában vannak. Az olvadt sókat magas hőmérsékletű hő tárolására használják. Hajlamosak azonban megszilárdulni, ami jelentős károkat okozhat a segédberendezésekben. Ezért használatuk szigorúan ellenőrzött környezetekre korlátozódik, ahol magas hőmérsékletre van szükség, például az energiaágazatban. Itt az olvadt sókat legtöbb esetben szinte kizárólag a koncentrált napenergia („CSP”) integrációjának elősegítésére használják, ahol a hőt napközben tárolják, éjszaka pedig leadják, hogy turbinát működtessenek és folyamatos villamosenergia-termelést biztosítsanak. [19] Ugyanakkor az olvasztott só típusú hőtárolás a CSP-n kívül is megállja a helyét. Példák:

Kyoto Norway: A Kyoto Group 2016-ban alakult és a központja a norvégiai Lysakerben található. A vállalatcsoport célja a változó megújuló forrásokból, például a nap- és szélenergiából származó energia összegyűjtése és kezelése, valamint alkalmazása az ipari hőterhelések CO₂-lábnymának csökkentésére. A Kyoto Group a Heatcube nevű termikus akkumulátorán keresztül a megújuló energia ipari méretű tárolására összpontosít hosszú távú tárolás és fogyasztás céljából. Az olvasztott sóból készült hőakkumulátoruk testre szabható, hogy megfeleljen a különböző szegmensek energiaigényeinek. A Kyoto Heatcube™ 8 MWh-tól több mint 100 MWh-ig terjedő kapacitással és akár 5 MW-os kisütési terheléssel is konfigurálható. Kyoto Heatcube lehetővé teszi a rugalmasságot, hogy ezt a hőt kifejezetten akkor állítsák elő, amikor az energiaárak alacsonyak, hő formájában tárolják, amíg szükség van rá, és "igény szerint" forró vizet, gőzt vagy hőt szolgáltatassanak, amikor a szükséglet és az energiaköltség magas. A Heatcube teherelosztásra is használható, és segíthet a hálózat kiegyensúlyozásában és stabilizálásában az ingadozásokkal szemben. Az akár 90%-os oda-vissza hatásfokkal a Heatcube néhány óra alatt teljesen feltölthető, akár folyamatos hőszolgáltatás mellett is, és a beépített kapacitástól függően akár 24 órán keresztül is képes ezt megtenni, mielőtt újra fel kellene tölteni. A Heatcube szinte azonnal képes feltölteni, lehetővé téve a felhasználó számára, hogy hozzáférjen az azonnali energiapiachoz.

A vállalatnak 2020-ban volt az első demó projektje, és tavaly megkezdte egy 4 MW teljesítményű, olvadt só alapú, hőerőművi rendszer üzemi tesztelését Dániában. A rendszer,

18 MWh energiatárolási kapacitással rendelkezik és az észak-dániai Aalborg településen található Nordjylland erőműben, egy széntüzelésű kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő (CHP) erőműben helyezték üzembe [20].

b. Közvet alapú hőtárolás

Brenmiller Energy [21]

A Brenmiller Energy, mint forgalmazó, olyan energiatárolási technológiát mutat be, amely a gázturbina füstgázából származó hő, a felesleges gőz és a hálózathoz származó elektromos áram felhasználásával nyújt megoldást. A szabadalmaztatott technológia egy zúzott kőzeteken alapuló, magas hőmérsékletű energiatároló, amely természeténél fogva három elemet egyesít: (1) hőcserélő (2) hőtároló (3) gőzfejlesztő. A Brenmiller Energy-t 2012-ben alapította Avi Brenmiller, a Siemens CSP és a Solel korábbi vezérigazgatója, valamint a megújuló energiák területén dolgozó szakértőkből álló csapat azzal a céllal, hogy fenntartható energiamegoldásokat kínáljon az áram- és a technológiai hőtermelés piacán. A Brenmiller Energy szakértői az 1980-as évek óta Spanyolországban és az Egyesült Államokban működő, több mint 500 MW teljesítményű erőművek tervezésében, építésében és üzemeltetésében szerzett többéves helyszíni tapasztalaton alapul. A vállalat által kifejlesztett bGenTM rendszer egy hőenergia-tároló rendszer, amely bGenTM alapra épül, és bCubokból áll, amelyek hőenergia-tároló egységek. A rendszert a gőzturbinát megkerülő és a bGenTM-be belépő gőz töltene fel. További hőenergiát a bGenTM belsejébe beépített elektromos fűtőberendezésekkel lehet biztosítani. A bGenTM rendszerből történő kiürítés olyan feltételek mellett szolgáltat túlhevített gőzt, amelyek lehetővé teszik a gőzturbina működését vagy a távfűtési rendszerek igény szerinti hőellátását. A bGenTM egy több forrásból származó energiatároló rendszer, amely a rendelkezésre álló források széles köréből gyűjti a hőenergiát, az összegyűjtött energiát hosszabb ideig tárolja, és a tárolt energiát igény esetén magas hőmérsékletű technológiai hő formájában leadja az igénylő alkalmazásba. A bGenTM rendszer a ma elérhető más energiatároló rendszerekkel, például a kémiai akkumulátorokkal szemben jelentős előnyökkel rendelkezik, többek között a következőkkel:

- A hőtároló, a hőcserélő és a gőzfejlesztő egy egységbe történő integrálása csökkenti a költségeket, mivel nincs szükség hőcserélők/gőzfejlesztők hozzáadására, és egyszerűsíti az integrációs folyamatot;

- Tömeges energiatároló rendszer, amelyet elsősorban nagy mennyiségű energia tárolására és átcsoportosítására terveztek;
- A bGenTM rendszer lényegében egy passzív tárolóegység, amelynek belsejében nincsenek mozgó alkatrészek, ami növeli a megbízhatóságát;
- A tárolóanyag környezetbarát. Tárolóközegként nem használnak veszélyes anyagokat és vegyszereket. Ezért a bGenTM "zöld mérnöki" terméknek minősül, és a tervezésénél is ez a cél volt a fő szempont.

Siemens Gamesa [22]

2019 júniusában a Siemens Gamesa Renewable Energy („SGRE”) sikeresen megkezdte a 130 MWh teljesítményű, hamburgi demonstrációs elektromos hőenergia-tároló („ETES”) létesítményének megépítését. Ez a projekt kulcsfontosságúnak tekinthető diszruptív jellege miatt a nagyméretű (>100MW) és hosszú időtartamú (több napos) energiatárolási térben.

Az SGRE már 2011-ben megkezdte a K+F tevékenységhez kapcsolódó munkát, előre látva, hogy a projekt szükséges lesz a hosszú távú és nagy kapacitású energiatároló megoldásokat szállító technológiák iránti igény kielégítéséhez. 2014-ben a tesztüzemet felavatták, továbbá a magas hőmérsékletű energiatároláshoz szükséges 700 kW teljesítményű és 5 MWh tárolókapacitással rendelkező proof of concept elfogadásra került. A helyi közműszolgáltatóval, a Hamburg Energie-vel és a Hamburgi Műszaki Egyetemmel közös konzorciumban az ETES demonstrációs üzemét fejlesztették ki. Ezt a projektet a német szövetségi Gazdasági és Energiaügyi Minisztérium finanszírozza.

A tesztüzemben 5,4MW töltési és 1,2 MW kisütési teljesítmény érhető el, továbbá 24 órás tárolási kapacitással rendelkezik.

Rezisztív fűtőberendezéssel a levegőt több mint 600°C-ra hevítik fel és 1000 tonna vulkanikus kőzetben tárolják, majd 480°C/65 bar gőz keletkezik, továbbá a gőzturbinában villamos áram.

Értékteremtés és költséghatékonyság

- A technológia 80%-a már kész, „leemelhető a polcról”, 90-100 EUR/kWh-os, alacsonynak számító költségszinten.
- A nagyméretű (>100MW) és hosszú távú (akár napokig tartó) energiatárolásban az ETES lehet a leghatékonyabb és legköltséghatékonyság megoldás a konkurens tárolási technológiákhoz képest.
- Barnamezős megközelítéssel a régi gőzerőművek ETES-létesítménnyé történő átalakítása valósulhatott meg ("ETES: Switch"), ahol a gőzciklus a működési folyamatok megmaradnak, így a kapacitás-specifikus teljes költségek 40 EUR/kWh-ra csökkenthetők.

Technológia: Electric Thermal Energy Storage (ETES)

Demonstrációs site (2019)

Státusz: Működési töltés/ Kisütési idő:

5.4/1.2 MW

Tárolási kapacitás: 130MWh

Költség: 27 USD MM

Finanszírozás: állami finanszírozás(6. Német Energia Kutatási Program)

Pilot Project 2020+

Töltési/Kisütési Energia: 85/30MW

Tárolási kapacitás: 1GWh

Kereskedelmi Platform (2025+):

- Töltési/Kisütési Energia: >100MW
- Tárolási kapacitás: >1GWh
- Hatékonyság: 45%
- Kapacitás-specifikus teljes költségek (~90-100 EUR/ kWh (zöldmezős))

11 ábra: Siemens Gamesa - ETES

Megismételhetőség és piaci megjelenés

- Jelenleg számos villamosenergia-piacon 4-6 órás kapacitáskritériumot alkalmaznak. Az ETES hosszútávú lehetőségeinek kihasználása és a méretgazdaságosság a kapacitás piac kialakításának megváltoztatásától függ- fontos megjegyezni, hogy a BESS technológia felülmúlhatja ezt a teljesítményt.
- Versenyképes nagykereskedelmi villamosenergia-piacok hiányában az ETES nagymértékben megismételhetővé válhat a hálózaton kívüli, elszigetelt alkalmazásokban a dekarbonizációs célok elérhetővé tétele érdekében.

c. Betonalapú hőtárolás

A norvégiai székhelyű EnergyNest egy betonalapú hőenergia-tároló rendszert fejlesztett ki, amely betonnal és acélcsővekkel töltött moduláris csövekből áll. A csövek hőátadó folyadékot szállítanak, amely töltéskor felmelegíti a betont, és ürítéskor hőt von el a betonból, hogy turbinát/generátort működtessen vagy folyamatfűtést biztosítson. A technológiát először a Masdar Intézet alkalmazta kísérleti jelleggel 2016-ban, azóta pedig további 3 demonstrációs projektben is részt vett az EnergyNest ThermalBattery™ technológiája [23].

3.3. Kémiai energiatárolás

A kémiai energiatárolás során a villamosenergia folyékony, szilárd és gáz halmazállapotú kémiai anyagként kerül tárolásra, míg a kitárolás folyamata kémiai reakciók során történik.

A kémiai energiatárolás előnyei:

- Nagy tárolási kapacitások is lehetségesek,
- Hosszú kisütési időtartamok (napok, hetek, hónapok),
- Számos termelési, tárolási és végfelhasználási lehetőség,
- Hosszú élettartam,
- A villamosenergia-értékesítésen kívüli alternatív bevételi források lehetősége,
- Egyes vegyi anyagok esetében kiterjedt szállítási és kezelési infrastruktúra áll rendelkezésre,
- A folyékony vegyi anyagok (mint például a metanol) könnyebben tárolhatók és szállíthatók.

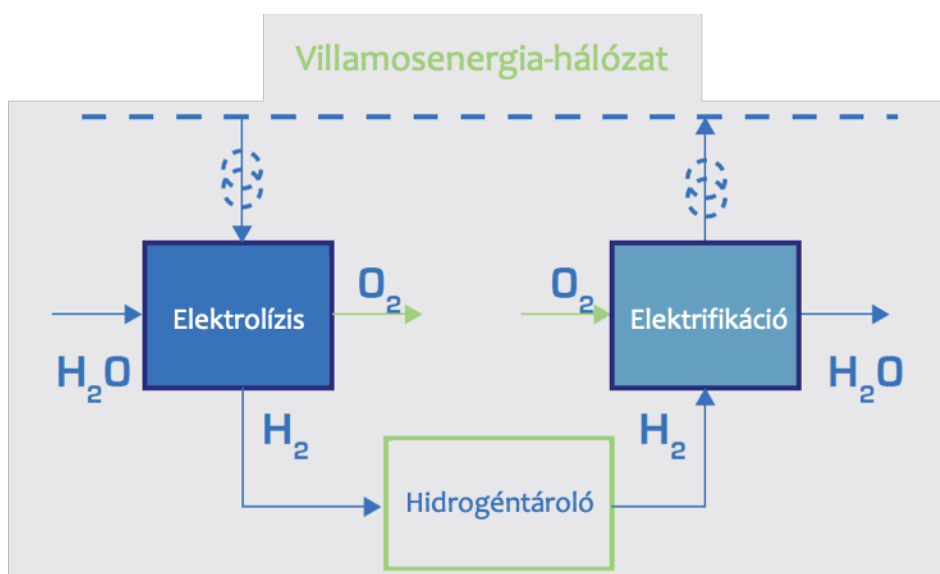
A kémiai energiatárolás hátrányai/kihívásai:

- Egyes tárolási módszerek regionális geológiai szempontoktól függenek (pl. földalatti tárolás), és nagy területigényűek lehetnek,
- A kémiai-fizikai tulajdonságokkal kapcsolatos biztonsági kockázatok,
- Az alacsony térfogati energiasűrűségű vegyi anyagok nagyobb tárolási térfogatot igényelnek, ami költséges lehet,

- A villamos energia tárolásának és visszanyerésének alacsonyabb hatásfoka az akkumulátoros tároláshoz képest.

a. Hidrogénes energiatárolás

A hidrogénes energiatároló rendszerek elektrolízist végző berendezésből, illetve egy üzemanyagcellából állnak. Így az energiatárolás során az elektrolízist végző berendezés az összetevőire, oxigénre és hidrogénre bontja a vizet és a villamosenergiát hidrogén-hidrogén kötésen keresztül lehet tárolni. A vízbontás után az üzemanyagcellát egy gázturbinához, gázmotorhoz vagy kombinált ciklusú gáz- és gőzturbinához kapcsolják, így a két gáz halmazállapotú elem (hidrogén és oxigén) keveredésekor keletkező hőenergia alakítható át elektromos árammá.



12. Ábra: Hidrogénes energiatárolás sematikus ábrázolása [24]

A rendszer 3 fő paramétere:

1. Elektrolízist végző berendezés típusai

- Alkáli berendezés
- Protoncserélő membrán („PEM”) technológia
- Szilárdoxid elektrolizátor

2. Hidrogén tárolása

- Folyékony halmazállapotú hidrogén hőmérséklete: -253 °C
- A sűrített gáz tároló tartályokban, illetve sóbarlangokban kerül tárolásra.

- Kémiai úton ammóniává vagy metanollá alakítható (folyékony halmazállapot).
- Ugyancsak kémiai úton szintetikus földgázzá („SNG”) is alakítható, így a meglévő földgáz hálózatban kerülhet tárolásra.

3. Villamosenergia termelés az alábbi berendezéseken keresztül

- Gázturbina,
- Motorok,
- Üzemanyagcella segítségével.

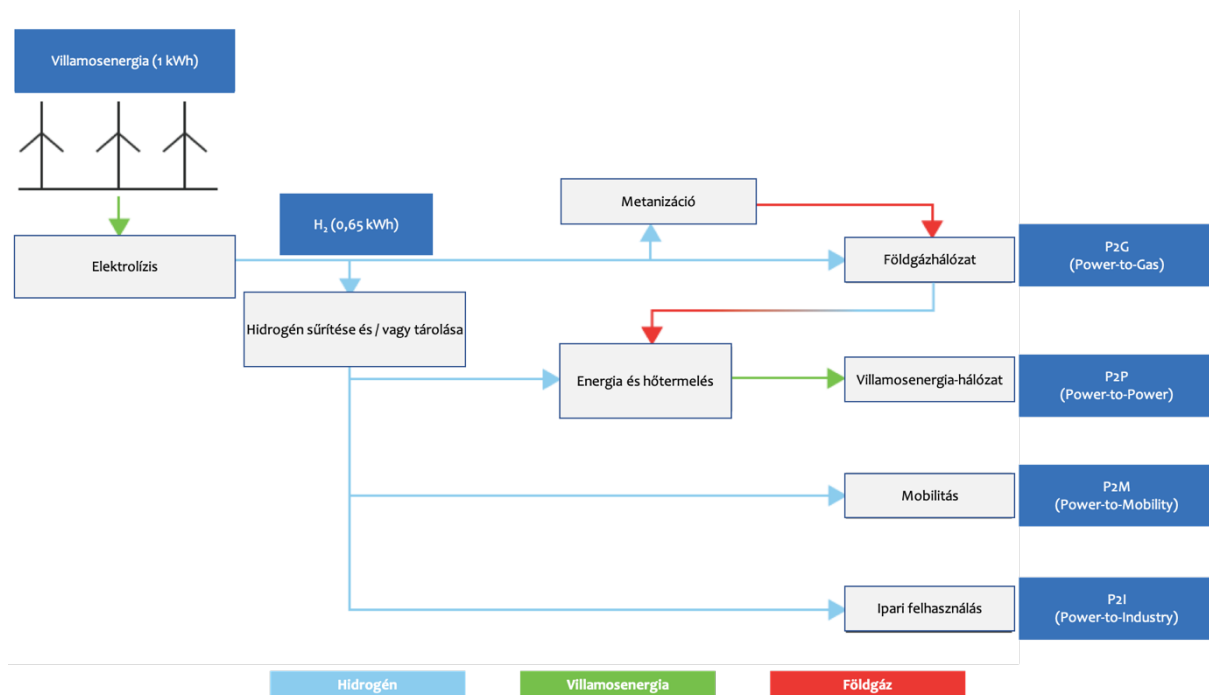
Műszaki specifikáció

2. Táblázat: Hidrogénes energiatárolás főbb műszaki paraméterei [24]

MŰSZAKI PARAMÉTEREK	ÉRTÉKEK
Teljesítmény	1 kW – 1 GW
Tárolt villamosenergia	10 kWh – néhány GWh
Kisütési idő	Néhány óra – néhány hétig
Élettartam	5 – 30 év
Reakcióidő	Néhány másodperc - néhány perc
Hatékonyság	20-40%
Energiasűrűség	30 kWh/m ³ - 2,550kWh/m ³ (hidrogén tartály tároló)

Főbb tervezési változatok

A technológia hasznosítása során különböző tervezési változatokat lehet megkülönböztetni, amelyeket a következő ábra segítségével mutatunk be:



13. Ábra: Hidrogénes energiatárolás tervezési lehetőségei [24]

Hő hasznosításával a hidrogénes energiatároló rendszerek hatékonysága meghaladhatja akár a 80%-ot is.

Főbb alkalmazási lehetőségek

1. Mérlegkörkiegyenlítési feladatok ellátása – rendszerszintű szolgáltatások.
2. Hálózatmenedzsment: hálózatbővítési alternatíva, hálózat erősítése.
3. Hidrogéntermelés támogatása, illetve töltőállomások a hidrogén üzemanyagcellás járművek számára.

b. Ammónia alapú energiatárolás

Az ammónia, kémiaiilag NH_3 , olyan alapvető vegyület, amelyben egy nitrogénatom három hidrogénatomhoz kapcsolódik. Az ammónia a Haber-Bosch-folyamat segítségével állítható elő, amely a levegőből származó nitrogént és a vízből vagy földgázból származó hidrogént egyesíti. Ez a folyamat energiát igényel, amelyet gyakran megújuló forrásokból szereznek be, hogy a teljes folyamat környezetbarát legyen. Ez a molekulaszervezet, bár látszólag egyszerűnek tűnik, alkalmazások széles skáláját alapozza meg, amelyek jelentős hatással vannak a különböző iparágakra és a globális fenntarthatósági erőfeszítésekre.

Az ammónia üzemanyagként vagy energiahordozóként való felhasználása az elmúlt

évtizedben egyre nagyobb figyelmet kapott. Az ammónia nagy energiasűrűséggel rendelkezik, ami alkalmassá teszi az energiatárolásra. Folyadékként, viszonylag alacsony nyomáson tárolható, ami más energiatárolási lehetőségekhez, például a hidrogénhez képest egyszerűsíti a tárolást és a szállítást. Az ammónia könnyen cseppfolyósítható szobahőmérsékleten, körülbelül 8 bar nyomáson vagy -33°C -on környezeti nyomáson. Az ammónia, mint energiatároló közeg ígéretes technológia a csúcsterhelés csökkentésére, mivel szén-dioxid-mentes és kiforrott tömeggyártási és elosztási technológiákkal rendelkezik. Szükség esetén az ammóniát vissza lehet alakítani villamos energiává vagy más energiaformává üzemanyagcellákban vagy turbinákon keresztül égetéssel. Ezáltal a tárolt energia hő formájában felszabadul, amely villamos energiává alakítható.

Az ammónia előnyei:

- **Nagy energiasűrűség:** Az ammónia nagyobb energiasűrűséggel rendelkezik tömegre vetítve, mint más energiatárolási lehetőségek, például az akkumulátorok.
- **Meglévő infrastruktúra:** Az ammónia előállítására, tárolására és szállítására már most is jelentős infrastruktúra áll rendelkezésre, különösen az olyan iparágakban, mint a mezőgazdaság és a vegyipar. Ezt az infrastruktúrát energiatárolási célokra is hasznosítani lehet.
- **Megújuló energiaforrások integrálása:** Az ammónia előállítható megújuló energiaforrások – például szél- vagy napenergia – felhasználásával, és ezáltal a megújuló energia tárolására és felhasználására is szolgálhat.

Az ammónia hátrányai:

- **Toxicitás:** Az ammónia mérgező, és a biztonság érdekében gondos kezelést igényel mind a gyártás, mind a tárolás során. A véletlen szivárgás vagy kiömlés kockázatot jelenthet az emberi egészségre és a környezetre.
- **Infrastrukturális kihívások:** Bár az ammónia számára már létezik infrastruktúra, az nem biztos, hogy energiatárolási célokra optimalizált. A kifejezetten az energiatároláshoz szükséges infrastruktúra átalakítása vagy új infrastruktúra kiépítése költséges és időigényes lehet.

- **Hatékonyság:** Az ammónia energiává történő visszaalakítása többnyire nem a kívánt hatékonysággal történik, ami a tárolási és kinyerési folyamat során energiaveszteségekhez vezet.
- **Kibocsátás:** Maga az ammónia égéskor nem bocsát ki szén-dioxidot, a gyártási folyamat azonban gyakran fosszilis tüzelőanyagokra támaszkodik, ami szén-dioxid-kibocsátáshoz vezet (hacsak nem használnak kizárólag megújuló energiaforrásokat).

Bár az ammónia alapú tárolási megoldások még fejlődés alatt állnak, már vannak olyan vállalatok, amelyek kiemelten foglalkoznak ezzel a módszerrel, mint például a McDermott, a Linde, vagy a Tarsco.

3.4. Elektrokémiai energiatároló rendszerek

Az energiatároló rendszerek közül a legradicionálisabb eszközök az elektrokémiai energiatárolók („EES”), amelyek három kategóriába sorolhatók: elsődleges akkumulátorok, másodlagos akkumulátorok és üzemanyagcellák. Az elektrokémiai energiatároló rendszerek a villamos energiát kémiai energiává alakítják és fordítva. Széles körben alkalmazzák őket különböző alkalmazásokban, többek között hordozható elektronikai eszközökben, elektromos járművekben és hálózati méretű energiatárolásban. Az elsődleges és másodlagos akkumulátorok a bennük lévő kémiai komponenseket hasznosítják, míg az üzemanyagcellák a kívülről, szintetikus üzemanyag (hidrogén, metanol vagy hidrazin) formájában szolgáltatott kémiaiilag kötött energiával rendelkeznek. A másodlagos akkumulátorokkal ellentétben az elsődleges akkumulátorokat nem lehet újratölteni, ha a beépített aktív vegyi anyagok elfogytak, ezért szigorúan véve nem tekinthetők valódi energiatárolónak. Az egyik gyakori primer akkumulátor a szárazelem, amely egy cink-szén akkumulátor. A másodlagos akkumulátorok ezért erősebb és tartósabb alternatívái az elsődlegesnek. Emellett megkülönböztethetjük a hagyományos és az áramlásos akkumulátorokat, amelyek között a különbség, hogy a hagyományos akkumulátorokban az energia az elektróda anyagában, míg az áramlásos akkumulátorokban az elektrolitban tárolódik.

Az alábbiakban bemutatjuk a különböző típusú másodlagos akkumulátorokat, amelyek relevánsak lehetnek a hosszú távú energiatárolási szempontból:

a. Lítium-ionos akkumulátor

Az elektrokémiai akkumulátorok között megemlítjük a lítium-ionos („li-ion”) akkumulátorokat is, részben azért, mert ezek az akkumulátorok dominálják az energiatárolási piacot, másrészt pedig ezek az akkumulátorok **műszaki értelemben képesek a 10 órát meghaladó áthidalásra**. Ugyanakkor a lítium-ionos energiatárolók a jelenlegi árszinten nem gazdaságosak. Az energiatároló piacot jelenleg ez a megoldás uralja, amely a BloombergNEF jelentése szerint világszerte az új energiatároló berendezések mintegy 98%-át teszi ki [25].

A li-ion akkumulátorok fő előnyei a következőkben foglalhatók össze:

- moduláris kialakításúak – a helyszíni adottságokra és felhasználásra méretezhetők,
- magas RTE-vel rendelkeznek (80% feletti)
- Kis helyigényű, bárhova telepíthető,
- nagy teljesítményű és energiasűrűségű,
- megbízható és bevált technológia, amely az elektronikai piacról származik,
- bankképes technológia.

A li-ionos technológiának azonban számos hátránya van, amelyek korlátozzák versenyképességüket, többek között:

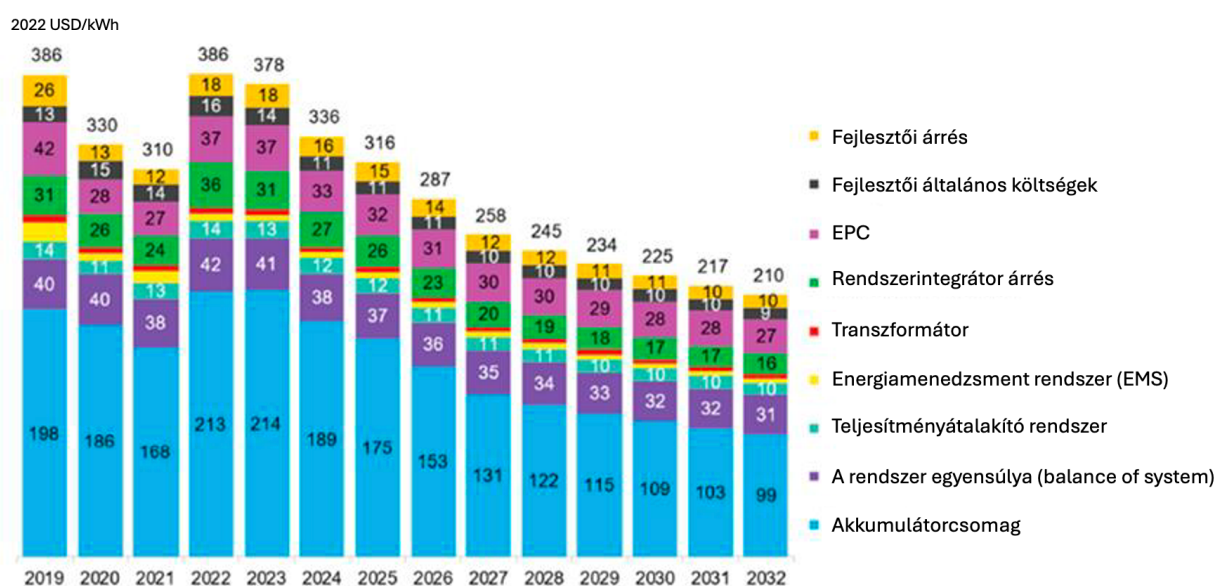
- magas beruházási költségű (>350 USD/kWh),
- jelenleg nem versenyképes hosszútávú tárolásra (> 2-3 óra tárolási időtartamon túl),
- a teljes beépített kapacitásnak csak 70-80%-a használható energiatárolásra („DoD”, azaz kisütés mélysége kisebb, mint 80%) az üzemidő megőrzése érdekében.
- Jelentős kapacitáscsökkenés, jellemzően 5-15% az első 3-5 évben, a teljes kapacitás megőrzéséhez bővített telepítésre van szükség
- az idő múlásával degradálódik az RTE is,
- az akkumulátorok rövid élettartama (10 évnél alacsonyabb) növeli a működtetési költségeket és korlátozza a gazdaságosan megvalósítható felhasználási eseteket.

- Pontos hőszabályozást igényel az élettartam megőrzése (nem mindegy, hogy a li-ionos energiatárolót milyen környezeti hőmérsékletben működtetjük), valamint a termikusság megtartása és a tűzveszély elkerülése érdekében,
- ritka anyagokat tartalmaz, emiatt jelentős árcsökkenés nem várható a közeljövőben,
- magasak az élettartam végi rekultivációs költségek,
- az élettartam végén lévő akkumulátorokat jelenleg nehéz újrahasznosítani.

A li-ionos akkumulátorok számos tényezőtől, többek között a cellák üzemi hőmérsékletétől, a kisütés mélységétől és a c-értékektől függően erősen degradálódnak, amint az a fenti képeken is látható. Mindezek a tényezők sok bizonytalanságot okoznak a technológiával kapcsolatban, mivel nehéz előre jelezni a technológia degradációját a hosszú élettartamú, helyhez kötött alkalmazásokban.

Míg a lítium-ion akkumulátorok bizonyos alkalmazásokhoz, például rövid időtartamú hálózati energiatárolási projektekhez (<2-4 óra), elektronikai vagy elektromos járművekhez a legmegfelelőbb technológia, addig a hosszabb időtartamú és hosszú távú tárolási alkalmazásokhoz kevésbé versenyképesek. Az alábbi táblázat a li-ion akkumulátorok várható költségtendenciáit mutatja a hálózati méretű alkalmazásokban a 4 órás tárolási időtartamra.

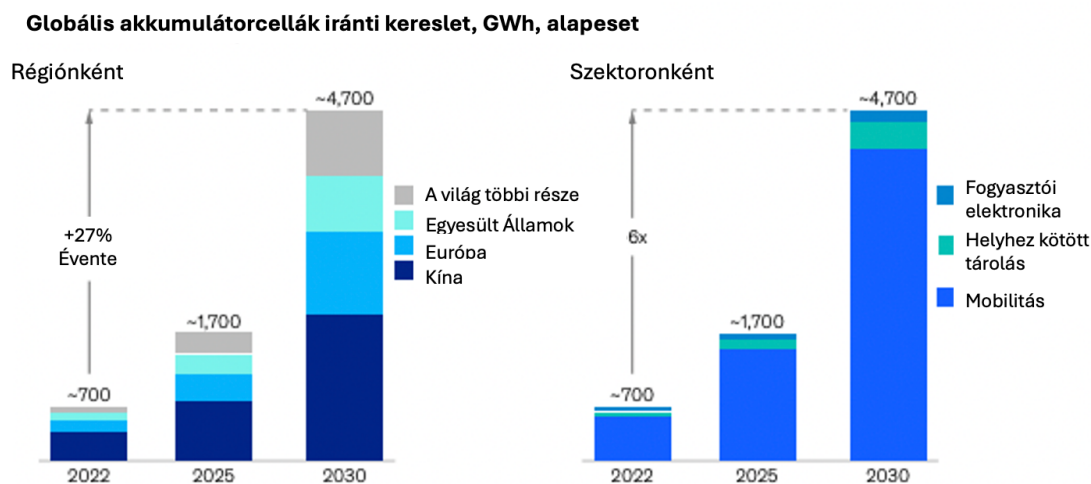
Ezek a költségek nem különböznek jelentősen a hosszabb távú tárolási alkalmazások esetében, mivel a li-ion tárolás fő költségei a tárolt energiához kapcsolódnak.



14 ábra: Nagyméretű, 4 órás AC energiatároló rendszer tőkekölsége az életciklus kezdetén [26]

Több mint egy évtizedes csökkenés után a li-ionos akkumulátorok mennyiséggel súlyozott átlagárai 2022-ben minden ágazatban emelkedtek. Az akkumulátorokra nehezedő felfelé irányuló költségnyomás megelőzte az alacsonyabb költségű vegyületek, például a lítiumvas-foszfát („LFP”) nagyobb mértékű elterjedését. Azonban még az olyan alacsony költségű vegyületek is, mint a lítiumvas-foszfát, amely különösen ki van téve a lítium-karbonát árának, az ellátási lánc egészében szenvednek az emelkedő költségektől. A nyersanyag- és alkatrész árak emelkedése járult hozzá leginkább a 2022-ben megfigyelhető magasabb cellák árának emelkedéséhez. A lítiumárak továbbra is magasak a tartós ellátási láncbeli korlátok és az új termelési kapacitások lassú felfutása miatt.

Bár az akkumulátorok növekedése számos környezeti és társadalmi előnnyel jár, a hiány elkerülése érdekében az akkumulátorgyártóknak biztosítaniuk kell a nyersanyagok és a szükséges berendezések folyamatos ellátását.



15 ábra: Globális akkumulátorcellák iránti kereslet, GWh [27]

A gyártóberendezések, az építőanyagok és a termelés felfuttatásához szükséges szakképzett munkaerő hiánya csak néhány ok, ami miatt sok akkumulátorcella gyárban jelentős elmaradások tapasztalhatók.

Az akkumulátorok globális értéklánca jelentős környezeti, társadalmi és irányítási („ESG”)

kihívásokkal néz szembe, mint például:

- A nagy lítiumtartalmú lelőhelyek főként Argentínára, Ausztráliára, Chilére és Kínára korlátozódnak, és súlyos környezeti hatásokkal járnak, mint például a talajromlás és vízfogyás. A lítiumot úgy lehet jellemezni, mint egy nem megújuló ásványt, amely lehetővé teszi a megújuló energiát.
- A nikkeltartalmúak különböző országokban, többek között Ausztráliában, Kanadában, Indonéziában és Oroszországban találhatók.
- A ma bányászott kobalt mintegy 75%-a a Kongói Demokratikus Köztársaságból származik.

b. Áramlásos („flow”) akkumulátorok

A flow akkumulátorok esetében újratölthető („rechargeable”) technológiáról beszélhetünk. A folyékony (pozitív és negatív töltésű) elektrolitokat egymástól elkülönített tartályokban tárolják, a kisütés és töltés során pedig a folyadékot átáramoltatják az elektrokémiai reaktor közegen, ahol a redukciós és oxidációs folyamatok lezajlása közben töltésáramlás jön létre. Az áramlásos akkumulátorok teljesítményét a cellák tervezése (elválasztó membrán aktív felszíne), az energiáját pedig a tartályok mérete határozza meg, amelyekben a tárolt elektrolitot könnyen ki lehet cserélni. A technológia az energiát egy folyékony elektrolitban, általában vanádiumban tárolja. Mivel az elektrolit folyékony fázisban van, ez a technológia a lítiummal összehasonlítva alkalmasabb a hosszabb ideig tartó energiatárolásra. A lítium kiváltása jelentős előnyökkel jár, többek között:

- alacsonyabb degradáció a li-ion akkumulátorokhoz képest,
- a teljesítmény- és energia-leválasztás nagyobb mennyiségű tárolt energiát tesz lehetővé,
- alacsonyabb gyúlékonysági kockázat,
- nem helyfüggő,
- teljes kisütési képesség (100% DoD).

Az áramlásos akkumulátorok a következő hátrányokkal rendelkeznek a CO₂-akkumulátorokkal szemben:

- Alacsonyabb RTE: 65-70%,
- új és ismeretlen technológia, amely még széles körű technológiai fejlesztést és K+F-et igényel,
- magas tőkekötségek a felhasznált folyadékok magas költségei miatt (nehéz jelentős méretgazdaságosságot elérni),
- a felhasznált folyadékok korrozivitása és toxicitása,
- Hosszú a piacra jutási idő.

Vas flow akkumulátorok

A vasáramú akkumulátor-technológia, elsősorban sóból, vasból és vízből álló elektrolitot használ. A vasáramú akkumulátorok az elektromos energiát kémiai energiává alakítva tárolják az energiát. A pozitív és negatív elektrolitot külön tárolják az akkumulátoron kívüli tartályokban, és ezt az elektrolitot működés közben folyamatosan be- és kipumpálják az akkumulátorból. A kémiai energia elektromos energiává történő visszaalakításához a reakciót meg kell fordítani.

Az előnyök közé tartozik:

- újrahasznosítható anyagok,
- konténeres megoldás és moduláris megközelítés,
- teljesítménycsökkenés a Proton szivattyú miatt,
- akár 5000 ciklusos élettartam,
- 100%-os kisülési mélység,
- alacsonyabb RTE 70%
- a Proton szivattyút úgy tervezték, hogy elkerülje a hidroxidok képződését, platinát igényel,
- korlátozott ellátási lánc, amely fennakadások és szűk keresztmetszetek kockázatának van kitéve,
- a névleges kisütési teljesítmény a töltés állapotának („SOC”) 80%-a felett elérhető,
- negyedéves karbantartás, beleértve a hidrogén utánpótlását.

Vanádium-redox flow akkumulátorok

A vanádium-redox áramlásos akkumulátorok („VRFB”) másnéven vanádium-redox akkumulátorok („VRB”) nagyméretű helyhez kötött villamosenergia-tároló rendszerek, amelyek számos alkalmazási lehetőséget kínálnak a liberalizált és decentralizált hálózatokban. A vanádium-redox áramlásos akkumulátorok vanádiumionokat használnak töltéshordozóként és kihasználják a vanádium azon képességét, hogy négy különböző oxidációs állapotban képes létezni. Ezek az akkumulátor-rendszerek a legfejlettebbek az áramlásos akkumulátorok között, mivel aktív vegyületeik a töltési/kisütési ciklusok során mindig oldatban maradnak, nagyfokú reverzibilitásuk és viszonylag nagy teljesítményük van. Vanádiumot főként Kínában termelnek, ezt követi Oroszország, India, Dél-Afrika és Brazília. Bár a technológia hosszú távú energiatároló rendszerekben való felhasználása egyre növekszik, ez még mindig csak töredékét teszi ki a vanádium iránti globális keresletnek.

A technológia ígéretes megoldásként jelentek meg a hálózati szolgáltatások számára hosszú élettartamuk és nagy energiakapacitásuk miatt, amelyek hosszabb kisütési időt biztosítanak. Tekintettel arra, hogy a rendszer teljesítménye és energiája önállóan skálázható, a VRFB-technológia hosszú távú megoldást kínál a hálózaton kívüli energiarendszerek és a mikrohálózatok számára. Ezek a rendszerek felhasználhatók lakossági, közösségi és kereskedelmi végfelhasználók támogatására, valamint hálózattól elzártabb területek energiához való hozzáférési igényeinek kielégítésére. A VRFB korlátlan tárolókapacitása, hosszú akkumulátor-élettartama, alacsony karbantartási igénye, alkalmazkodóképessége és szinte nem létező környezeti lábnyoma miatt napjainkban az energia hatékony tárolására és hozzáférésére nyújt megoldást.

A vanádiumot azért használják, mert képes a különböző pozitív töltéseket hordozó különböző állapotaiból oda-vissza átalakulni. Ez azt jelenti, hogy az akkumulátorok biztonságosak és megbízhatóak, és idővel nem következik be káros korrózió vagy degradáció. A keresztszennyeződés kockázata megszűnik, mivel csak egy anyagot használnak, ami biztonságosabbá teszi a VRFB-ket, mivel a két folyadék nem keveredik össze, ami hirtelen energiefelszabadulást okoz.

Jelenleg világszerte több mint 200 VRFB van telepítve. A Guidehouse Insights 2022-es fehér könyve szerint a VRFB-piac az elkövetkező években meredekebb növekedésre számíthat, mivel a hosszú távú energiatárolási képességek iránti kereslet is növekszik. A VRFB-k energiatárolási képességei lehetővé teszik a megújuló energiatermelés, például a szél- és

napenergia szélesebb körű alkalmazását [28].

c. Cink akkumulátor

Az EOS Energy kifejlesztett egy elektrokémiai energiatároló rendszert, amely cinket használ elektrolitként. A cink alapú energiatároló rendszer alkalmas lesz akár 24-100 óra közötti energiatárolásra is.

Az EOS nagy figyelmet kapott a pénzügyi világtól, mivel rengeteg finanszírozást kapott és az Amerika Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma is támogatta a társaságot [29]. A cink alapú elektrolitok használatával a következő jellemzőkkel rendelkező tároló alakítható ki:

- nem gyúlékony,
- fenntartható anyagból van,
- alacsony a teljesítmény romlása,
- akár 5000 ciklusos élettartam (kb. 14 év napi 1 ciklusnál),
- 100%-os DOD,
- 80%-os RTE.
- alacsonyabb RTE 70%,
- 1,5% éves kapacitáscsökkenés,

A cink alapú energiatárolás még mindig jelentős kihívásokkal küzd, technológiai érettsége messze elmarad a li-ionos energiatárolótól. Első körben a technológiának bizonyítania szükséges a működőképességét.

d. Vas-levegő akkumulátor

A Form Energy kifejlesztett egy vas-levegő akkumulátor technológiát. Az akkumulátortechnológia egy szabályozott, reverzibilis rozsdásodási cikluson alapul: kisütés közben az akkumulátor oxigént „lélegzik be” a környezetből, és a vasat rozsdává alakítja. Másrészt az akkumulátor töltés közben oxigént bocsát ki, és a rozsdá visszaalakul vasakká. Minden egyes akkumulátort vízalapú, nem gyúlékony elektrolittal töltenek fel, és a modulok (egyenként egy mosógép méretűek) összekapcsolhatók, így az erőmű megawattos méretre

méretezhető. A megcélzott üzemméret 1 MW, 150 MWh beépített kapacitással. A technológia előnyei a következők:

- a CAPEX 10x alacsonyabb, mint a hagyományos Li-ion alapú energiatároló üzemeké (a vállalat állítása szerint, bár egyértelmű számadatokat nem közöltek),
- nagy megbízhatóság,
- teljes modularitás és méretezhetőség,
- nincs telephely-függőség.

Belső biztonság kialakítása a termikus kockázat elkerülése érdekében, a nehézfémeknek és a kiváló újrahasznosíthatóságnak köszönhetően.

Nincs egyértelmű út a piacra jutáshoz, a technológia teljesítménye még nem került validálásra. Az első kísérleti erőmű, egy 1 MW/150 MWh-s kísérleti üzem a minnesotai Great River Energy közműszolgáltató számára, várhatóan 2024-ben (eredetileg 2023-ban). A Southern Company leányvállalata, a Georgia Power nemrégiben hozta nyilvánosságra, hogy egy újszerű vas-levegő akkumulátor telepítését tervezi. A részleteket nem hozták nyilvánosságra, de a projekt mérete elérheti a 15 MW/1500MWh-t is.

Jellemzői:

- alacsonyabb RTE 50%,
- a kísérleti üzem még nem készült el [30].

3.5. Kombinált energiatárolási megoldások

A CO₂-akkumulátor zárt termodinamikai átalakuláson alapul, és a CO₂ gáz- és folyadékfázis közötti manipulálásával lehetővé teszi a villamos energia hatékony és költséghatékony tárolását, a légkörbe történő kibocsátás nélkül. A töltési fázisban a rendszer elektromos energiát vesz fel az elektromos hálózatról, melyet egy motort táplál. A motor egy kompresszort hajt meg, amely CO₂-t vesz fel a kupolából (légköri gáznemű CO₂-tároló egység), és összenyomja azt, hőt termelve, amelyet visszanyer, és egy hőenergia-tároló (TES) eszközben tárol. A CO₂-t ezután nyomás alatt cseppfolyósítják, és a töltési ciklus befejezéséhez folyékony CO₂-tartályokban, környezeti hőmérsékleten tárolják. Kisütéskor a

ciklus megfordul a folyékony CO₂ elpárologatásával, a hőt a hőenergia-tároló rendszerből visszanyerve, és a forró CO₂-t egy turbinába juttatva, amely egy generátort hajt meg. Az elektromos áram ezután visszakerül a hálózatba, miközben a szén-dioxid, a legkörbe történő kibocsátás nélkül, újra felfűjja a kupolát, készen áll a következő töltési ciklusra. Ennél a technológiánál a 4 és 24 óra közötti napi ciklikusság az ideális, amely ahhoz hiányzik, hogy 90%-ban megújuló energiát lehessen betáplálni a hálózatba (ezen túlmenően ultra hosszú, egy napnál hosszabb időtartamra van szükség).

A már ismert összetevők integrálása egy új, hatékony és költséghatékony eljárásban, amely azt jelenti, hogy a CO₂ Battery gyors előrehaladást ért el, mivel az első versenyképes és hatékony hosszú távú energiatárolási technológiát igyekszik piacra dobni, amely ráadásul globális szinten nagyon gyorsan, szűk keresztmetszetek nélkül, széles körben skálázható.

Miután a szardíniai Ottanában 2022. májusában befejeződött a demó üzem telepítése és tesztelése (2,5MW, 4MWh), a következő lépés az első nagyüzemi méretű projekt (20MW, 200MWh, 10 órás időtartam) telepítése és beindítása 2024. júliusában. Az „Energia Kupola” a projekthez az ottani demó üzem mellett biztosította a helyszínt, ami csökkenti a nagyszabású projekt végrehajtási kockázatát, mivel az összes ipari igény és a hálózati csatlakozás lehetősége már adott, és a helyi feltételek jól ismertek.

A berendezések beszerzése befejeződött, a helyszíni munkálatok 2024. elején kezdődnek, és a blokk 2024. júliusában üzemel [31].

A javasolt tárolási technológia - Innovatív eljárás szabványos berendezésekkel

A CO₂-akkumulátor technológia a különböző beszállítók által gyártott és a piacon értékesített, könnyen elérhető alkatrészeket használja, lehetővé téve egy olyan piackész termék megvalósítását, amelynek működését és teljesítményét a demonstrációs céllal épített MW-méretű erőmű építése során bizonyítottak (és a Fichtner Engineering Consulting külön jelentésekkel igazolta).

A folyamat három szakaszból áll: töltés, tárolás és kisütés.

A töltési üzemmód kezdetén a CO₂-t környezeti hőmérsékleten és légköri nyomáson egy légköri tárolóban, a kupolában tárolják.

A CO₂-t a gázkompresszor a hálózatról származó villamos energia felhasználásával vonja ki a kupolából, és gőzkompressziós hűtőrendszerrel sűríti, majd egy vízhűtéses kondenzátorban kondenzálja. A folyékony állapotú CO₂-t ezután 45 bar nyomáson és 9°C-on a tárolótartályokba szivattyúzzák.

A sűrítés során keletkező hőt a hőenergia-tároló egységek (TES) tárolják: a tömörítési fázisban a hőt egy nyomás alatt álló, tárolórendszerben, a TES1-ben tárolják 400 °C körüli hőmérsékleten. A második szakaszban a hőt egy víztároló rendszerben, a TES2-ben tárolják. Amikor a rendszer ürítő üzemmódban működik, a folyékony CO₂ elpárolog és felmelegszik a TES2 és TES1 rendszerben korábban tárolt hőenergiával. A nyomás a 40 barg-os üzemi nyomásig csökken. A tárolótartályokból származó újra felmelegített CO₂-áram egy turbinába kerül, amely villamos energiát termel és visszatáplálja az energiát a hálózatba. A gázt szobahőmérsékletre hűtik, mielőtt a kupolába kerül, ahol a következő töltésig szobahőmérsékleten és légköri nyomáson marad. Így a teljes termodinamikai ciklus lezárul, és anélkül folytatódhat, hogy a környezetbe CO₂-, víz- vagy hőveszteséget okozna.

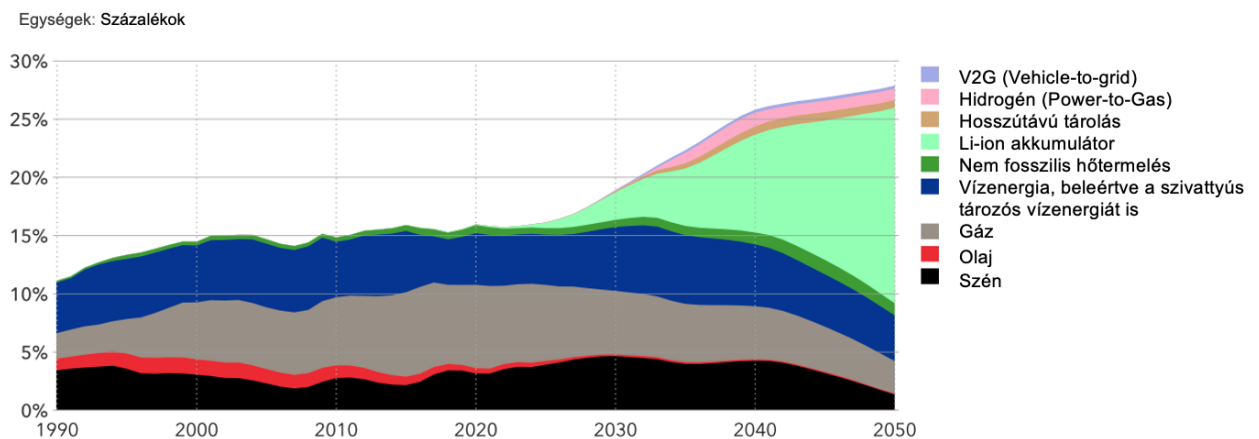
4. A hosszú távú és a szezonális energiatárolás sajátosságai

4.1. Várható technológiai trendek és hatások az ipari dekarbonizációra

A technológiai trendek vizsgálata előtt röviden bemutatjuk a jelenlegi energiatárolási piaci trendeket és a piac nagyságát. Bár még nincsenek meg az összesített 2023-as globális energiatárolási adatok, a BloombergNEF 2023 októberi adatai szerint **2023-ban várhatóan 34%-kal több energiatárolót telepítettek globálisan, mint 2022-ben, ami megközelítőleg 42 GW/99 GWh energiatárolási kapacitást jelent.** Az októberi elemzés szerint a 2023-as adatokat ~ 27%-os éves átlagos növekedési ütem („CAGR”) fogja követni, azok után, hogy 2023 márciusában „csak” 23%-os CAGR-t jósoltak. Mindez azt eredményezheti, hogy 2030-ra a várható éves telepítés 110 GW/372 GWh lesz, ami a 2023-as adatok 2,6-szorosának felel meg [25]. A BloombergNEF vizsgálata mellett 2023 októberében megjelent egy másik meghatározó energiatárolási elemzés is a DNV által, amely szintén ugrásszerű növekedést jósol az energiatároló telepítésekre vonatkozóan, olyannyira, hogy előrejelzésük szerint a lítium-ion akkumulátoros tárolás önmagában 1,6 TWh-t fog elérni 2030-ra.

Kereskedelmi méretekben, tömegesen és gazdaságilag életképes módon a szivattyús vízerőművek („PHS”) és a li-ion akkumulátorok működnek jelenleg. Sőt, ezen technológiák dominanciája a 2030-as évekig elejéig biztosított, 2050-ig várhatóan a li-ion teljes dominanciája valósul meg:

- 3 TWh körül (a jelenlegi szinten) marad a PHS beépített kapacitás,
- 22 TWh körül lesz a li-ionos energiatároló.



16 ábra: A technológiák által biztosított globális rugalmasság az éves átlagos kereslet töredékében kifejezve [32]

Ennek ellenére a PHS-nek és a li-ionos energiatároló technológiának jelentős korlátai vannak néhány alkalmazási esetben:

- (1) a PHS óriási hatással van a környezetre, földrajzilag korlátozott, és csak meghatározott helyekre korlátozódik, és nem tud globális megoldást nyújtani a hosszú távú tárolás iránti igényekre;
- (2) a lítium-ionos akkumulátorok fajlagos költsége drága, az élettartam alatt romlik a teljesítményük, és olyan ritka ásványi anyagokra támaszkodnak, amelyek miatt az ellátási lánc bizonytalanná és fenntarthatatlanná tesz.

Mindezek miatt a hosszú távú energiatárolás egyben alternatív (és nagyon diverzifikált technológiai) energiatárolási technológiákat is jelent – természetesen a technológiához illeszkedő, a hagyományos, jelenlegi felhasználási esetektől eltérő felhasználási esetekben. A DNV szerint egy elmozdulást lehet megfigyelni az akkumulátortárolók nagy piacain (Kína, Dél-Korea, Japán, Egyesült Államok), ugyanis ezeken a piacokon a fókusz az akkumulátorok általános, frekvenciaszabályozási szerepéről egyre inkább az energiatárolás szélesebb körű alkalmazási lehetőségei felé tolódik, mint például az arbitrázs vagy a kapacitás biztosítása. Ezek az alkalmazási módok ugyanakkor hosszabb átlagos tárolási időtartamot igényelnek. Az akkumulátorok térnyerése mellett ezért megjelent az igény az

alternatív, **hosszú távú energiatárolási** technológiák iránt [32]. Jelenleg számos LDES-technológia létezik, amelyek jellemzően eltérő fejlettségi szinten állnak. Egyes technológiákat már kereskedelmi forgalomba hoztak, míg mások csupán kísérleti fázisban vannak. Az LDES-technológiák lehetnek mechanikus, termikus, elektrokémiai, és kémiai tárolóeszközök is (részletes technológiai ismertető a 3. fejezetben).

A BloombergNEF elemzése szerint a hosszú távú energiatárolás piacának alakulása még bizonytalan, annak ellenére, hogy az USA-ban és Kínában számos új LDES projektet jelentettek be. A jelentés szerint a 2023-as LDES-telepítési adatok várhatóan 1,4 GW/8,2 GWh körül lesznek [25]. A DNV szerint az LDES-technológiák közül a vanádium-redox áramlásos akkumulátorok tűnnek a legígéretesebbnek, amelyek potenciálisan pénzügyi szempontból is előnyösebbek lehetnek a li-ion technológiákkal szemben. Ugyanakkor, az elemzők szerint e technológiák elterjedéséhez további pénzügyi és politikai ösztönzőkre lenne szükség, valamint az LDES-technológiákat értékelő bevételi modellekre, amelyek jelenleg még hiányoznak a globális energiapiacokról [32].

Hosszú távú energiatárolási kategóriák

	Elektrokémiai 	Termikus 	Kémiai 	Mechanikus 
Leírás	Kémiai reakciókból villamos energiát előállító energiatároló rendszerek.	Hőenergia tároló megoldások, amelyek egy tároló közeg fűtésével vagy hűtésével tárolják a hőenergiát.	A kémiai energiatároló rendszerek kémiai kötések létrehozásával tárolják a villamos energiát.	Olyan megoldások, amelyek kinetikus, gravitációs vagy kompressziós/nyomásos médiumként tárolják az energiát.
Típusok	- Áramlásos - Fém anód - Nem fém kémiai tárolás	- Szenzibilis hő - Látens hő - Termokémiai	- Zöld hidrogén - Metán - Ammónia - Metanol	- Sűrített levegős energiatárolás - Folyékony levegős energiatárolás - Szivattyús víztárolás - Gravitáció alapú energiatárolás - Folyékony CO₂
Előnyök	- Rugalmasság - Csökkenő hosszú távú költségek - Széles működési tartomány	- Nincs degradáció - Ciklikusság az egész nap folyamán - Moduláris	Nem igényel ritkaföldfémeket és drága anyagokat.	- Nincs degradáció - Bevált technológiák (szivattyús víztároló) - Biztonságos - Gazdasági szempontból kedvező

17 ábra: Hosszú távú energiatárolási kategóriák, saját szerkesztés [33]

4.1.1. A hosszú távú és a szezonális energiatárolás várható technológiai trendjei

Mechanikus energiatárolás

Az LDES technológiákat tekintve, a mechanikus energiatárolás terén a szivattyús víztárolás

(„PHS”) számít a legelterjedtebbnek, amely a világ összes energiatárolási kapacitásának 95%-át teszi ki [34]. Bár a technológia kiforrott, az építési költségei magasak, valamint földrajzilag is korlátozott, hogy hová telepíthető ez a típusú tároló, így a DNV szerint viszonylag kevés új telepítésre lehet számítani, és a PHS kapacitás várhatóan a jelenlegi 3 TWh körüli szinten fog maradni [32]. Más jól ismert mechanikus energiatárolási technológiák közé tartoznak a lendkerekek, a gravitációs alapú energiatárolás, a sűrített levegős energiatárolás („CAES”), a folyékony levegős energiatárolás („LAES”) és a folyékony CO₂-tárolás. A PHS technológiák mellett a CAES is viszonylag régebbi és kereskedelmileg kiforrott technológiának tekinthető, ugyanakkor ennél a technológiánál is számos újításnak lehetünk a szemtanúi. A CAES technológiák működése különösen hasznos lehet a szélerőműparkok mellett, ugyanis a CAES képes rövid időn belül reagálni a szélenergia ingadozásaira és kiegyenlíteni azt a villamosenergia-hálózatban. A szakértők szerint a sűrített levegős energiatárolás piaci potenciálja jelentős, amely 2022 és 2031 között 23,6% CAGR-t jelent [35].

Termikus energiatárolás („TES”)

Ha a termikus energiatárolási megoldásokat vizsgáljuk, az érzékelhető hő kategóriában lévő technológiák többsége már elérte a 7-9-es technológiai fejlettségi szintet („TRL”), ami azt jelenti, hogy a legtöbb technológia már kereskedelmi forgalomban van és már rendelkeznek kísérleti projektekkel és felhasználási esetekkel. A TRL egy olyan módszer, amellyel osztályozni lehet az egyes technológiák műszaki érettségét 1-9-ig, ahol a 9 a legfejlettebb szint (operatív környezetben bizonyított valós rendszer). A látens hő kategóriába tartozó technológiák a műszaki fejlettséget tekintve széles skálán mozognak, egyes technológiák már kereskedelmi forgalomban vannak, míg mások még csak a K+F szakaszban tartanak. A termokémiai megoldásoknál a legtöbb technológia a K+F vagy kísérleti szakaszban van, így ez a terület még viszonylag új keletű.

A globális hőtárolási piacot tekintve, a TES-alkalmazásokba történő beruházások mértéke elérheti a 28 milliárd USD-t 2030-ra. A különböző hőtárolási megoldások közül az érzékelhető hő kategóriába tartozó olvasztott só energiatároló számít a legelterjedtebbnek, amely összekapcsolható a koncentrált naperőművekkel is. A technológia fejlettségi szintje magas, ennek köszönhetően 2030-ra 491-631 GWh közötti olvadt só kapacitás üzembe helyezése várható [36].

Elektrokémiai energiatárolás

Az elektrokémiai tárolás terén az áramlásos akkumulátorok a legnépszerűbbek, amelyek jól alkalmazhatóak a nagyméretű, hálózati helyhez kötött energiatárolásban. A redox-áramlásos akkumulátorok („RFB”) egyedi előnyei többek között a hosszú élettartam és az egyszerű szerkezet, ugyanakkor az elmúlt évtizedben telepítésük elenyésző volt az egyre növekvő lítium-ion akkumulátor telepítésekhez képest. Az RFB-technológiákon belül a vanádiumos akkumulátorok a legelterjedtebbek, amelyeket már kereskedelmi forgalomba hoztak. Az elemzések szerint a vanádium-redox áramlásos akkumulátorok („VRFB”) ipara az elkövetkező években jelentős növekedésre számíthat, ami 2031-ig évente ~ 33 GWh telepítést jelent, valamint a VRFB projektekből származó bevételek várhatóan ~ 7,76 milliárd USD-re emelkedhetnek. A régiókat tekintve az elemzők szerint Ázsia és a csendes-óceáni térség fogja vezetni a telepítési számokat, de Nyugat-Európában és Észak-Amerikában is meghatározó számú telepítések lesznek [37]. A VRFB mellett a fém-levegő akkumulátorokat is fontos technológiának tartják az alacsony előállítási költségeinek, valamint a skálázhatósági lehetőségeknek köszönhetően, azonban a technológia még újnak mondható, így hosszú út áll előtte a kereskedelmi forgalomba hozatalig.

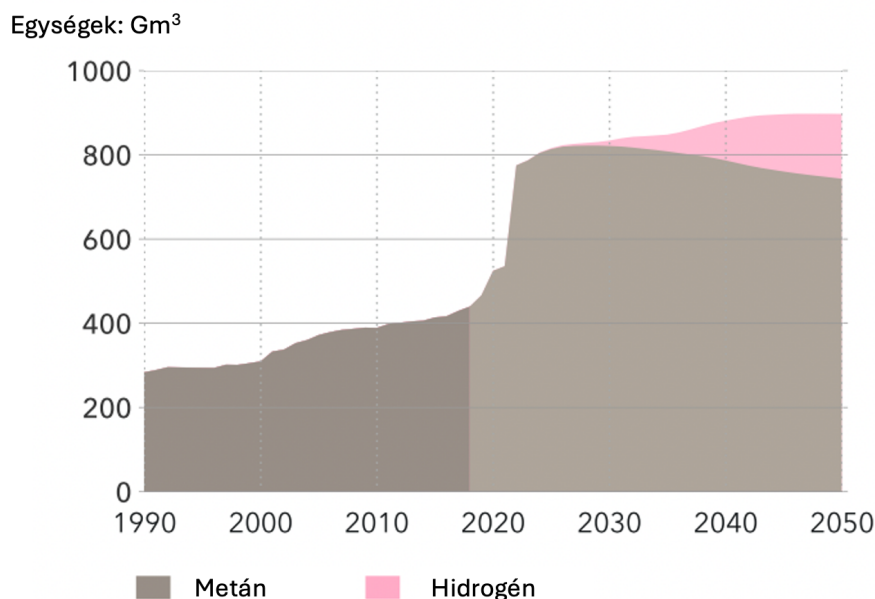
Kémiai energiatárolás

A kémiai energiatároló rendszereknél elsősorban két power-to-gas koncepción alapuló technológia vált ismertté, a villamos energia-hidrogén-villamos energia és a villamos energia-szintetikus gáz-villamos energia. A hidrogénből metánt is elő lehet állítani egy második lépésben, ha CO₂-vel kombinálják, de ehhez hasonlóan a hidrogén átalakítható ammóniává is közvetlen égetés céljából. A power-to-gas technológiák a meglévő földgázinfrastruktúrát és/vagy földalatti barlangokat is használhatják a hidrogén szezonális tárolására. Erre már vannak kialakult kísérleti projektek, de a rendszer összességében költségesnek és összetettnek mondható, így még nem alkalmazható széles körben [34]. Minden kihívása ellenére a villamos energia gázzá alakítása rendkívül ígéretes lehetőségnek mutatkozik a megújuló energia szezonális ingadozásának méretarányos kezelésére. A fejlett országok – például Németország vagy Dél-Korea – már élen járnak a demonstrációs projektek megvalósításában, ugyanakkor a power-to-gas projektek a fejlődő országokban is meghatározóak lehetnek [38].

Itt érdemes szót ejtenünk a hosszú távú energiatárolás és a szezonális energiatárolás közötti különbségről. Míg az LDES-technológiák alatt jellemzően a 8-10 órát meghaladó

energiatárolási formákat értjük, a **szezonális tárolás** az energiatárolás olyan formája, amely jellemzően a villamosenergia-igény és a megújulóenergia-termelés éves ciklusait veszi figyelembe. A szezonális energiatárolási megoldások egy adott szezonális időszakban – jellemzően télen vagy nyáron – tárolják az energiát, majd egy másik szezonális időszakban a terhelési igénytől függően leürítik a tárolót. Mindkét tároló típus a megújulók ingadozásának kezelésére szolgál, azonban különböző funkciókat töltenek be, és különböző időskálán működnek. Ettől függetlenül vannak olyan technológiák, amelyek mindkét kategóriába beleeshetnek, mint például a szivattyús víztárolás vagy a hidrogén.

A szezonális energiatárolási megoldásokat tekintve leginkább a kémiai energiatárolási formákat szokták kiemelni. A DNV elemzése szerint a sóbarlangokban vagy egykori szénhidrogénmezőkön történő sűrített hidrogén tárolás különösen ígéretes és költséghatékony módszernek tűnik. Az előrejelzések szerint 2050-re mintegy 70 milliárd m³ hidrogéntároló fejlesztésére lehet számítani, amelynek mintegy 40%-át újrahasznosított metántárolók fogják kitenni [32].

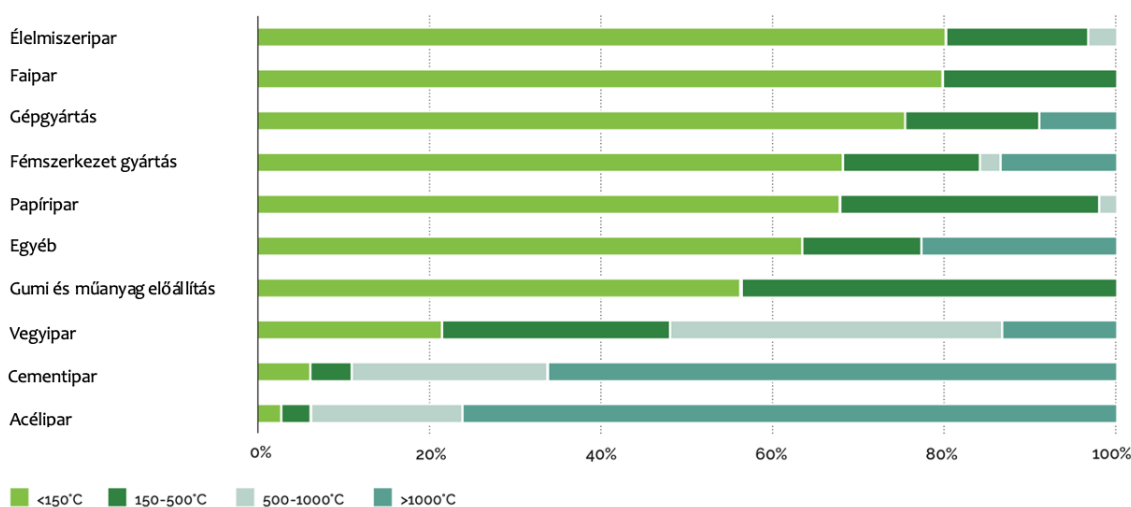


18 ábra: A világ földalatti gáztároló kapacitása [32]

4.1.2. A hosszú távú és a szezonális energiatárolás hatásai az ipari dekarbonizációra

Az Európai Bizottság 2024. februárjában javaslatot tett arra vonatkozóan, hogy az EU 2040-

ig 90%-kal csökkentse az üvegházhatású gázok nettó kibocsátását az 1990-es szinthez képest [39]. Mindez azt is jelenti, hogy az energia, az ipari és a mezőgazdasági ágazatoknak még inkább rá kell kapcsolniuk a szén-dioxid-mentesítési erőfeszítéseik terén, annak érdekében, hogy elősegítsék a fenntartható és globálisan versenyképes európai gazdaság megteremtését. 2022-es adatok szerint az ipari folyamatokból származó kibocsátások a globális CO₂ kibocsátások mintegy negyedét teszik ki, és még mindig a fosszilis tüzelőanyagok dominálják az ipari energiaforrásokat, miközben az elektrifikáció a tervezettnél lassabban halad. Az ipari kibocsátások mintegy felét a hő okozza, mert a hőigény túlnyomó részét fosszilis tüzelőanyagok elégetésével fedezik. Az ipari folyamatok bár különböző szinteken – alacsony, közepes, magas hőmérsékletű hő, - de jellemzően sok hőt igényelnek. Az ipari hő iránti kereslet egyes felmérések szerint várhatóan tovább fog növekedni, megközelítőleg 34%-kal a 2019-2040 közötti időszakban. A világ gazdaság és a népesség növekedésével párhuzamosan az áruk és anyagok iránti kereslet is növekszik, ami egyre inkább fontossá teszi annak megértését, hogy mely technológiák támogathatják az ipari dekarbonizációt [33] [40].



19 ábra: Az ipari hő igények szektoronkénti alakulása [33]

Ez alapján az LDES-nek számos hőenergia intenzív szektor dekarbonizálásában szerepe lehet. Az ipar energiaforrásainak és termelési folyamatainak dekarbonizálása pedig nemcsak az adott ágazatra, hanem a gazdaság egészére kedvező hatással van. Az ipari termékek és folyamatok szén-dioxid-kibocsátásának csökkentése hatással van a környező ökoszisztémákra és a közeli közösségekre is. Másodlagosan természetesen az LDES

ezekben az esetekben a villamosenergia rendszer rugalmasságának biztosításában is részt vehet. Erre vonatkozóan szükséges lesz a jövőben a rugalmassági piacok oly módon történő kialakítása, hogy az ipari hőellátást biztosító eszközök a rugalmassági piacokon is részt tudjanak venni. A villamosenergia- és hőágazat integrációja döntő fontosságú lehet a tiszta rugalmasság lehetővé tételében. A jövőben a villamosenergia- és a hőtermelés várhatóan még inkább integrálódni fog az olyan áram-hő technológiákon keresztül, mint a hőszivattyú vagy az elektromos kazánok, vagy az olyan megújuló energia segítségével előállított hővel működő technológiák által, mint a koncentrált naperőművek. Az ágazatok nagyobb fokú összekapcsolódása („sector coupling”) így támogatni tudja a szén-dioxid-mentesítést és a megújulók integrációját [41].

A hosszú távú energiatárolásnak kétségtelenül központi szerepe lesz az 50-60% feletti megújuló energia arány elérésekor:

- (1) Lehetővé teszi megújuló energiatermelő-rendszerek nagyobb arányú integrálását a közcélú villamosenergia rendszerbe azáltal, hogy
 - a. A megújuló energiatermelő rendszerek működési idejét villamos energia (ki)szabályozási események kevésbé korlátozzák (ún. negatív curtailment események számának csökkenése),
 - b. A villamos energia termelési többlet események alacsonyabb száma miatt a villamosenergia árak csökkenése és az esetlegesen kialakuló negatív árakkal érintett események száma alacsonyabb lesz (villamosenergia piaci tendenciák) – a megújuló energia átütetése lehetővé válik, ezáltal a völgyidőszaki árak kevésbé csökkennek).
- (2) A villamosenergia rendszer stabilitását elősegíti azáltal, hogy negatív időjárási események esetén tudja pótolni a hirtelen kieső termelést. Az LDES versenyképesen alkalmazható az energia hosszabb ideig történő tárolására és az energiaellátás több órán, napon, vagy héten át történő fenntartására. Az ilyen hosszú távú rugalmasság várhatóan a megújuló energiaforrások részarányának növekedésével létfontosságúvá válik a biztos ellátás szempontjából. Az LDES a műszaki és gazdasági megfontolásoktól függően különböző időtartamokat fedhet le, valamint egyes

technológiák olyan rendszerelőnyöket biztosíthatnak, mint a tehetetlenségi vagy frekvenciaszabályozás.

- (3) A villamosenergia kínálati piacot diverzifikálja (import helyett és mellett hosszútávú be/és kitarolás).
- (4) Az LDES az egész villamosenergia-hálózatban alkalmazható és hozzájárul a megújuló energiaforrások fejlesztésének felgyorsításához, azáltal, hogy a kínálati és a keresleti oldali energiatárolás révén javítja a hálózat általános kihasználtságát és csökkenti a hálózatra nehezedő terhelést [41].

4.2. A hosszú távú és a szezonális energiatárolás létjogosultsága és felhasználási esetei

4.2.1. A hosszú távú és a szezonális energiatárolás létjogosultsága

Az éghajlatváltozás fokozódó hatásainak következtében a kormányzatok, közműszolgáltatók és a vállalatok egyre jelentősebb intézkedéseket hoznak a megújuló energiaforrások telepítésének növelése érdekében. A változékony megújulóenergia-termelés növekedésével viszont egyre nagyobb kihívással néznek szembe a hálózatüzemeltetők, hogy valós időben összehangolják a villamos energia iránti keresletet és a termelést. Mindezt tovább nehezítik a változó fogyasztói igények és az egyre súlyosabb időjárási események. Ennek kezelésében nyújthat segítséget a hosszú távú és a szezonális energiatárolás is – más technológiák és megoldások mellett – az energiaellátás biztosítása, a változékony energiatermelés és a bizonytalan fogyasztói igények összehangolása, valamint az időjárási eseményekkel szemben megerősített elektromos hálózat terén.

A kormányok, közműszolgáltatók és az átviteli rendszerüzemeltetők kiemelt érdeklődést mutatnak az LDES technológiák és az ágazatba történő befektetések iránt. Ennek oka, hogy a rendelkezésre álló akkumulátor technológiákhoz képest a skálázhatóságnak köszönhetően az LDES alacsonyabb költséget ígér hosszabb távon. Az LDES technológiák anyagai nagyon olcsók (só, homok, vas, cink, víz, levegő stb.), így a nagyobb mennyiségű anyag

felhasználása a hosszabb időtartamú energiatároláshoz gazdaságosabb lehet. Néhány példát említve, tavaly az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma 325 millió dolláros támogatást biztosított 15 hosszú távú energiatárolási projekt támogatására [42], 2023 decemberében Olaszországban is bejelentettek egy 60 millió eurós befektetést – az EIB-Breakthrough Energy partnerség keretében – egy hosszú távú CO₂ akkumulátor projektbe [43], valamint idén januárban az Egyesült Királyság kormánya indított egy konzultációt az LDES beruházások beindításáról [44].

Felismerve az LDES technológiák iránti igényt, a berendezésgyártók számos olyan technológiát terveznek, amelyek modulárisak, méretezhetőek és hosszabb időtartamra alacsonyabb költséggel járnak. Ugyanakkor ebből adódóan számos technológia még fejlesztési vagy kísérleti fázisban van, így ezért az LDES technológiák még nem versenyképesek más, fejlettebb, kereskedelmi forgalomban lévő energiatárolókhoz képest. A kereskedelmi forgalomba hozatal érdekében a technológiáknak műszakilag bizonyítottnak kell lenniük és alacsony határköltséggel kell rendelkezniük. A szivattyús vízerőműveken kívül még egyik feltörekvő LDES technológia sem bizonyította, hogy a hálózati megbízhatóságához elegendő (50 MW) méretben tudna működni, ugyanakkor ehhez egyértelműen több tapasztalatra és több LDES projektre van szükség, amihez még hiányoznak a megfelelő támogatási mechanizmusok.

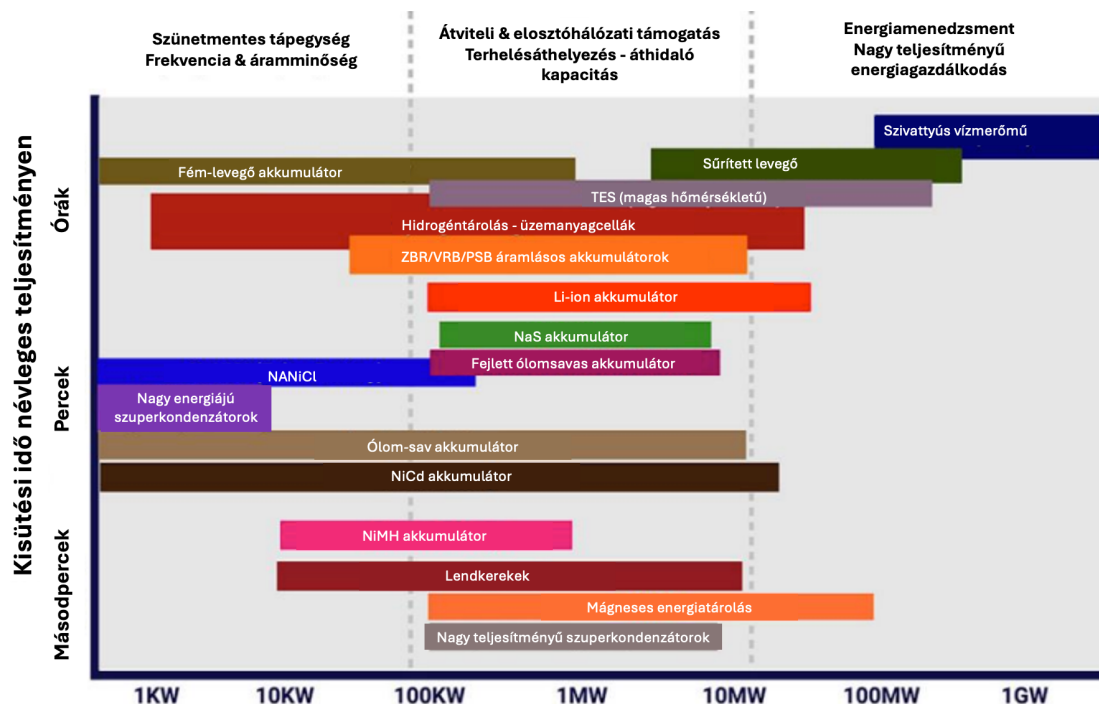
Az energiatároló piacot jelenleg a li-ion akkumulátoros energiatárolók dominálják. Ezek az akkumulátorok jellemzően 4-6 órán át működnek megfelelően, amennyiben ennél több órányi működésre van szükség, jellemzően több akkumulátort telepítenek, viszont ezzel a költségek is jelentősen növekednek. Itt jöhet képbe az LDES szerepe, hiszen ezek a technológiák képesek a teljes 24 órás ellátási ciklust lefedni. A lítium-ionos akkumulátorok és az LDES ugyanakkor megférhet egymás mellett és jól működhetnek együtt olyan lokalizált megújuló mikrohálózatokban vagy hibrid rendszerekben, ahol a technológiák meghatározott keretek között működnek. Jellemzően az akkumulátorok gyors indítási képességet biztosíthatnak, az LDES pedig megnövelt tárolási időtartamot.

Ennek ellenére az LDES technológiákat sok esetben szembe állítják a li-ion akkumulátoros energiatárolók fejlődésével. Az elmúlt években a li-ion akkumulátorok árai a napelemekhez hasonlóan hatalmasat estek, és az elemzők szerint 2030-ig akár további 47%-kal csökkenhetnek [45]. Éppen ezért az LDES technológiáknak a következő évtizedben nehéz lesz versenyezni a lítium-ionos technológiákkal szemben, ugyanis a li-ion technológiák költségei potenciálisan versenykéesebbek lesznek a hosszabb időtartamú, akár 24 órás

tárolási időre is [46].

4.2.2. A hosszú távú és a szezonális energiatárolás felhasználási esetei

Mivel minden energiatárolási technológia meglehetősen különböző karakterisztikával rendelkezik, így elmondható, hogy egyik technológia sem tud lefedni minden energiatárolási igényt. A következő ábra alapján láthatjuk, hogy egyes technológiák bizonyos szolgáltatásokra alkalmasabbak más energiatárolókhoz képest. Az ábra a technológiákat a kisütési idő és a rendszer teljesítménye alapján hasonlítja össze.



20 ábra: Energiatárolási technológiák névleges teljesítménye és kisütési ideje [47]

Érdeemes az energiatárolás jelenlegi főbb applikációs eseteit áttekinteni és megvizsgálni azt, hogy a hosszú távú és a szezonális energiatárolás mely felhasználási esetekben tudnak részt venni.

3 táblázat: Az LDES és a szezonális tárolók szerepe - felhasználási esetek vizsgálata, saját szerkesztés

Felhasználási eset neve	Definíció	LDES és a szezonális tárolók szerepe
Automatikus Frekvencia tartalék („aFRR”) +/- piacok	Rendszerszintű szolgáltatások piaca: fel/leszabályozási szolgáltatások nyújtása szabályozott piacokra: az energiatároló önállóan vagy egy nagyobb rendszer részeként, aggregátoron keresztül nyújtja a szolgáltatást.	Az LDES-nek és a szezonális energiatárolóknak nincsen szerepe.
Villamosenergia értékesítés	Az aFRR leszabályozásból származó, menetrendezett villamosenergia értékesítése.	Az LDES-nek és a szezonális energiatárolóknak nincsen szerepe.
Megújuló energia átütőtemezése napon belül	A RES kimeneti teljesítménye időben eltolásra kerül az energiatároló segítségével. A napenergia időeltolódása a megújuló energiaforrásokból származó villamos energia későbbi felhasználásra történő tárolásának folyamatát jelenti. Ez a technológia lehetővé teszi, hogy a megújuló energiaforrásokból származó energiát a napfényszegény időszakokban, vagy amikor a villamosenergia-igény magas, de a napenergia-termelés alacsony.	Az LDES és a szezonális energiatárolók képesek a naperőmű által megtermelt villamos energia átütőtemezésére.
RES menetrendtartás támogatása	A menetrendet a RES-eszköz tárolási szolgáltatások segítségével tartja.	Csak a megújuló energia átütőtemezésével együttesen értelmezhető

Felhasználási eset neve	Definíció	LDES és a szezonális tárolók szerepe
		felhasználási eset LDES és szezonális energiatárolók alkalmazása esetén.
Energiaközösség teljesítmény görbe menedzsmentje	Az energiatároló rendszer külső energiaforrásból származó teljesítmény felvételét energiatároló segítségével menedzseljük.	Az LDES-nek és a szezonális energiatárolóknak nincsen szerepe.
Áramminőség javítás	A villamosenergia minőségi paramétereinek javítása energiatárolóval.	Az LDES-nek és a szezonális energiatárolóknak nincsen szerepe.
Tartalék áramforrás kritikus infrastruktúra elemek számára	Az energiatároló feladata szünetmentes tápellátás biztosítása kritikus infrastruktúra elemek számára.	Az LDES és a szezonális tárolók CAPEX költségeik miatt nem alkalmasak szünetmentes tápellátásra.
Energia arbitrázs	A villamosenergia napon belüli kereskedelmi ár ingadozásainak felhasználásával arbitrázs tevékenység megvalósítása.	Az LDES és a szezonális energiatárolók alkalmasak lehetnek két 10 órás ciklus napon belüli

Felhasználási eset neve	Definíció	LDES és a szezonális tárolók szerepe
		megvalósítására.

A fenti felhasználási esetek közül a **hosszú távú és a szezonális energiatárolók kizárólag az energia arbitrázs és a napon belüli naperőmű által megtermelt villamosenergia átütemezési (ami szintén arbitrázs) tevékenységekben tudnak részt venni.** Ezen felül elméletileg lehetséges, hogy az LDES és a szezonális energiatárolók részt vegyenek az aFRR leszállítási funkciók megvalósításában: az aFRR leszállítást akár 24 órán keresztül is képes maximális teljesítménnyel végezni, hiszen akár 10-100 órányi energia eltárolására is alkalmas. De ez a felhasználási eset inkább elméleti, mert a lítium-ionos energiatároló alkalmasabb az aFRR feladatok ellátására.

Az LDES-nek és a szezonális energiatárolóknak teljesen más felhasználási eseteik vannak, az energiatárolás fenti funkcióit jelenleg kevésbé tudják elvégezni. Az energia arbitrázshoz

- (1) a napon belüli villamosenergia ár ingadozásnak (azért, hogy lehessen hosszú távú üzleti modellt építeni rá) tartósnak kellene lenni,
- (2) a napon belüli árkülönbségnek fedeznie kell a tároló teljes tulajdonosi („TCO”) /kWh költségét.

Az LDES-nek és a szezonális energiatárolóknak teljesen más felhasználási esetei lehetnek, a jelenleg alkalmazott energiatárolási alkalmazásokon felül. A jelenlegi LDES és szezonális energiatárolási megoldások egyaránt alkalmasak lehetnek a hálózaton belüli és hálózaton kívüli („off-grid”) területeken, valamint az elektromos- és a hőalapú alkalmazásokban. A Long Duration Energy Storage Council ez alapján a következő három kategóriába osztotta be a hosszú távú energiatárolási technológiákat [33]:

- (1) **Villamos energia felhasználó hálózaton kívüli („off-grid”) villamos energia ellátása megújuló + LDES/ szezonális energiatároló integrációval:** Jellemzően olyan távoli közösségek vagy bányatelepek hálózaton kívüli villamosenergia-ellátása, amelyeknek jelentős energiaigényük van, de távoli fekvésüknek köszönhetően nincsenek csatlakoztatva vagy nem lehetséges a csatlakozásuk a fő villamosenergia-hálózathoz. Gyakran ezeket a lokációkat dízel generátorok segítségével látták el energiával, viszont az üzemanyag szállítási költségei a távolságok miatt meglehetősen magasak. **Az off-grid villamos energia ellátásra a különböző típusú hidrogéntárolók különösen alkalmasak lehetnek.** Borm et. al. elemzése során különböző lokációkat vizsgált – hálózaton kívüli bányatelepek, alpesi menedékházak, hálózaton kívüli fogyasztói alkalmazások, távoli közösségek – amelyeknél megállapításra került, hogy a különálló elektrolízis- és üzemanyagcella-egységek ideálisabbak, mint ha a két funkció egy egységbe lenne integrálva, mert az utóbbinál az elektrolízis és az üzemanyagcella kapacitásának aránya rögzített, így kevésbé lehet a rendszert a helyi követelményeknek megfelelően optimalizálni [48].
- (2) **„Könnyen villamosítható” hő** – olyan ipari ágazatok, amelyek hőigénye könnyen villamosítható a meglévő technológiákkal (elektromos kazán, hőszivattyú). A globális ipari hőtermelés ~ 50%-a ebbe a kategóriába esik, ahol a folyamatok jellemzően gőz vagy forró levegő formájában igényelnek **alacsony vagy közepes hőmérsékletű (100° és 500° közötti) hőt.** Néhány példa erre a felhasználási esetre:
- A TES technológiák és az elektromos kazán kombinációja kiválthatja a gázkazán használatát a vegyipari, finomítói és petrokémiai ágazatokban a közepes nyomású gőzellátás érdekében. Ezzel kiváltható a fosszilis üzemanyag használata, csökkenthető a CO₂ kibocsátás és a TES a napi ciklusaival segíthet profitálni a napközbeni áramár-ingadozásokból.
 - A TES kiválthatja a gázkazán használatát a távfűtési hálózatban a melegvíz-ellátás érdekében, amivel a távfűtőerőműveket szén-dioxid-mentesíteni lehet. A TES, – mint rugalmas eszköz – segítségével optimalizálhatók a töltési idők és kihasználható a megújuló villamos energia többlettermékesből származó alacsony villamosenergia-árak.

c. Az LDES technológiák támogatják az élelmiszeripari üzemek villamosítását és dekarbonizációját. Az élelmiszeripari üzemekben alacsony nyomású a gőzigény és alacsony hőmérsékletű villamos energia- és hőigénnyel rendelkeznek. Ebben az esetben a földgázkazán kiváltható, azáltal, hogy villamosítják a gőztermelést e-bojler és TES segítségével. Az e-bojleren keresztül hővel villamosított létesítmények esetében a hő tárolása (termikus energiatárolási megoldásokon keresztül) jelentős megtakarítást eredményezhet [41] [33].

(3) **„Nehezen villamosítható” hő** – olyan ágazatok, amelyek magas hőmérsékleti igénnyel ($>1000^{\circ}$) rendelkeznek és a folyamatintegrációs követelmények következtében nehezen villamosíthatóak. Az LDES technológiák hozzájárulhatnak az acél- és a cementgyártás nagyfokú szén-dioxid-mentesítéséhez. A TES technológiák itt is fontos szerepet játszhatnak, ugyanis a termikus energiatárolók képesek a hulladékhő visszanyerésére, ami meghatározó lehet az acélgyártásnál, ahol a folyamatok rendkívül sok és magas hőmérsékletű hőt igényelnek, és a folyamat során akár a bemenő hőenergia 50%-a is elveszhet. Az LDES technológiák képesek a hulladékhő visszanyerésére, amit aztán eltárolnak, majd ez a hő felhasználható további alacsonyabb hőigénnyel rendelkező alkalmazásokhoz.

Ebben a szegmensben további, innovatív szén-dioxid-mentesítési technológiák is léteznek, például a szén-dioxid-leválasztás, -hasznosítás és -tárolás („CCUS”), vagy a hidrogén. A megújuló energiaforrásokból előállított („zöld”) hidrogén egyedülálló képessége, hogy hosszú ideig képes energiát tárolni, és közvetítő energiahordozóként szolgálhat, lehetővé téve a megújuló energia hatékony felhasználását a különböző alkalmazásokban. A szén-dioxid-kibocsátás szempontjából nehezen mérsékelhető ágazatokban („hard-to-abate sectors”) számos területen segíthet a hidrogén, néhány példát említve, 1.) a cementágazatban a hidrogén energiatárolási megoldásként való használatával és ezáltal a megújuló energiaforrásoknak a gyártási folyamatba való integrálásával, vagy 2.) az acélágazatban vegyes tüzelés révén – a hidrogén földgázzal történő keverésével csökkenthető az égési folyamat szén-dioxid-intenzitása. Fontos megemlíteni ugyanakkor, hogy a legtöbb megoldás ezen a területen még nem elég kifejlett, azonban jelentős potenciált rejtenek [33] [49].

Mivel a termikus energiatárolási megoldások számos esetben megjelentek a felhasználási esetekben, így a következő táblázatban bemutatjuk a különböző TES technológiák tárolási időtartam szerinti felhasználási eseteit.

4 táblázat: A tárolási időtartam szerinti felhasználási esetek hőenergia-tárolási technológiáinként*, saját szerkesztés [50]

TES technológiák típusaik szerint	Tárolási Időtartam szerinti felhasználású esetek			Jelenlegi forgalomban lévő teljesítmény
	Órák	Napok	Hét	MW
<i>A legtöbb technológia képes a napközbeni és a többnapos időszakok kiszolgálására, több technológia pedig akár hónapokig is képes (pl. víz):</i>				
Érzékelhető hő				
Grafit kerámia				
Szilícium-dioxid és homok				1-200
Olvasztott só				1-300
Beton				400
Közetek				>20
Acél				
Felszín alatti víz				
Víz				>100
<i>A legtöbb technológia a napközbeni és a többnapos időtartamokat szolgálja ki:</i>				
Látens hő				
Mikrokapszulázott fémek				
Szervetlen sók és eutektikus keverékek				
Nátrium				

TES technológiák típusaik szerint	Tárolási Időtartam szerinti felhasználású esetek			Jelenlegi forgalomban lévő teljesítmény
	Órák	Napok	Hét	MW
Egyéb folyékony fémek				
Olvasztott alumíniumötvözet				0,1-300
Paraffinviaszok, zsírsavak				
Sóhidrátok				
Só-víz keverékek				
Jég				
Folyékony levegő				>100
<i>Potenciálisan akár hónapokig is képes kiszolgálni a napon belüli („intra-day”) időszakokat:</i>				
Termokémiai hő				
Kémiai reakció tárolása				
Abszorpció				

* A táblázatban szereplő adatok előzetes kutatáson alapulnak.

(+1) Nem tartozik a fenti kategóriákba, de **az LDES technológiák meghatározóak lehetnek a már villamosított, hálózatra kapcsolt létesítmények esetében is, ilyenek például az adatközpontok.** Az LDES által biztosítható a szén-dioxid-mentes villamosenergia-ellátás, a megújuló alapú termelés időbeli átcsoportosításával, aminek segítségével akár 24/7 szén-dioxid-mentes energiaellátás is biztosítható. Az adatközpontok telepítése és a hozzájuk tartozó villamosenergia-terhelés a következő években várhatóan egyre inkább növekedni fog. Jelenleg az adatközpontok többségénél dízelgenerátorok segítségével garantálják a megbízhatóságot, viszont az LDES technológiák a megújuló energia tárolásával és szükség esetén kisütésével hozzájárulhatnak az adatközpontok megbízható energiaellátásához, valamint dekarbonizálásához [33].

Az LDES szerepe egyre növekedni fog, a megújuló energia energiatermelők növekedésével arányosan. Modellezések szerint alacsony karbontartalmú energiatermelők, illetve LDES nélkül a zéró emissziós állapot eléréséhez szignifikánsan több beépített kapacításra lenne szükség: a teljes szükséges beépített termelési és tárolási kapacitás a rendszer csúcsgényének öt-nyolcszorosa lenne, szemben a csúcsgény 1,3-2,6-szorosával, ha rendelkezésre állnak a biztos erőforrások [51].

Ezek a felhasználási esetek nem a villamos energia hálózat stabilitását szolgálják, hanem **villamos energia végfelhasználók számára jelentenek dekarbonizációs megoldást.**

5 táblázat: LDES és a szezonális energiatárolók felhasználási esetei, saját szerkesztés

Felhasználási eset megnevezése	Cél	LDES és a szezonális energiatárolók szerepe
Off-grid villamos energia ellátás	Hálózat nélküli megújuló energia alapú villamosenergia-ellátás.	8-12 órás energiatárolás.
Dekarbonizált ipari hőellátás	Fosszilis hőelőállítás helyett megújuló energia alapú hőenergia előállítás.	Villamos energia alapú hőelőállítás és 8-12 órás hőenergia tárolás.

Adatközpont dekarbonizáció	Az adatközpont teljes dekarbonizációja és az üzemelés kontinuitásának biztosítása.	8-12 órás energiatárolás – hálózati megújuló energia tárolása és felhasználása napon belül.
-----------------------------------	--	---

4.2.3. A hosszú távú energiatárolás piaci előfeltételei

A fent említett LDES releváns felhasználási esetek piaci előfeltétele az alábbi tényezők megléte. Mindezek mellett azt is meg kell említeni, hogy a hálózati villamosenergia ellátás általában alapnak vesszük, de ez várhatóan romlani fog, különösen a 2030-as évek végére. Ez a tényező önmagában is szerepet adhat az LDES-nek, a piaci ártól függetlenül [33].

6 táblázat: Piaci előfeltételek, saját szerkesztés

Felhasználási eset megnevezése	Piaci előfeltételek
Energia arbitrázs	Az energiatároló TCOS költsége és a legalacsonyabb 8-10 órás átlag villamosenergia ár költsége alacsonyabb, mint a peak időszakban értékesíthető villamos energia piaci ára.
Off-grid energiaellátás	Az RES és az energiatároló TCO-ja a hálózat kiépítés költségeivel + a hálózatról vételezett megújuló energia árával paritásban van.
RES alapú hőtárolás	A hőtároló TCOS-e versenyképes hőenergia árat biztosít a fosszilis alapú hőellátással szemben.
Adatközpont dekarbonizáció	Elsősorban dekarbonizációs igényekről szól a felhasználási eset.
Stratégiai napon belüli energiatárolás	Ellátásbiztonsági céllal országon belüli stratégiai villamosenergia tárolásra van szakpolitikai „igény”.

4.3. Jelenlegi szabályozási háttér

A hosszú távú- és a szezonális energiatárolásra vonatkozóan dedikált jogalkotás nincsen. Ugyanakkor számos jogszabály hat az LDES és szezonális technológiák felértékelődésére és fejlődésére: a 80%-nál nagyobb mértékű villamosenergia-ipari dekarbonizáció elképzelhetetlen erős LDES szerepvállalás nélkül.

A szezonális energiatárolás a jelenlegi dekarbonizációs szinten még nem jelent azonnali igényt. Emiatt jogi szabályozása sincsen a szezonális energiatárolásnak, kizárólag tudományos cikkekben jelenik meg az, hogy a későbbiekben szükség lesz a szezonális energiatárolásra [52]. A karbonmentes villamosenergia mellett a karbonmentes hőenergia biztosítása együttesen már nemcsak a keresleti oldalt alakítja át, hanem a teljesítmény görbét is. A több évszakkal rendelkező, nagy hőmérséklet különbségű országokban különösen jelentős lesz a villamosenergia termelés és felhasználás deficitje. Ez pedig azt is jelenti, hogy a rendszerszintű szolgáltatásokat majd úgy kell kialakítani, hogy a szezonális energiatárolás, mint hálózat támogató funkció is megjelenjen a szabályozásban. Különösen fontos ez ahhoz, hogy a kiszámítható jogi környezet megteremtse a lehetőséget a szükséges befektetések bevonzásához.

4.3.1. Az Európai Unió jogi környezet

Ha az indirekt jogszabályokat vizsgáljuk, az LDES és szezonális energiatárolási piacra ható szabályozás az Európai Unióban az **Európai Zöld Megállapodás** („European Green Deal”), illetve a **REPowerEU-terv**, amelyek biztosítani fogják, hogy az EU-ban 2050-re nullára csökkenjen az üvegházhatású gázok nettó kibocsátása.

Ezek a szakpolitikai anyagok több helyen is foglalkoznak ez energiatárolással:

- a.) A REPowerEU kiemeli, hogy az energiatárolás jelentős szerepet játszik a rugalmasság és az ellátás biztonságának biztosításában azáltal, hogy megkönnyíti a megújuló energiatermelés integrációját, támogatja a hálózatot és az energia átcsoportosítását arra az időpontra, amikor arra a legnagyobb szükség van. Végül soron az energiatárolás csökkenti a gázérőművek használatát az energiarendszerben [6].

- b.) Az Európai Zöld Megállapodás kiemeli, hogy a klímasemlegességre való átálláshoz intelligens infrastruktúrára is szükség van. A határokon átnyúló és a regionális együttműködés fokozása hozzá fog járulni a tiszta és megfizethető energiára való átállás előnyeinek megvalósításához. A klímasemlegességi célkitűzéssel való összhang biztosítása érdekében felül kell vizsgálni az energetikai infrastruktúrára vonatkozó szabályozási keretet, beleértve a transzeurópai energetikai infrastruktúráról szóló rendeletet is. E keretnek elő kell mozdítania az olyan innovatív technológiák és infrastruktúrák bevezetését, mint az intelligens energiahálózatok, a hidrogénhálózatok vagy a szén-dioxid-leválasztás, -tárolás és -hasznosítás, valamint az energiatárolás, emellett lehetővé kell tennie az ágazati integrációt is [53].
- c.) A Zöld Megállapodás Ipari Tervének részeként 2023-ban megjelent egy tervezet a **Nettó Zéró Ipari Jogszabályra** vonatkozóan, amelynek célja a nettó nulla energiafelhasználású technológiák ipari bázisának és azok versenyképességének támogatása, amely a fenntartható tiszta energiarendszer gerincét fogja alkotni. A rendelet támogatja a nettó zéró technológiák fejlesztését és gyártását, és kiterjed az ehhez szükséges termékekre, alkatrészekre és berendezésekre is. A jogszabály külön kiemeli a stratégiailag fontos nettó zéró technológiákat, amelyek jelentősen hozzájárulnak a 2030-ig történő szén-dioxid-mentesítéshez, és amelyek kereskedelmi forgalomban kaphatók vagy hamarosan piacra kerülnek. Ezek a projektek elsőbbségi státuszt kaphatnak, így rövidebb határidőkhöz juthatnak. Kiválasztásuk a következő három kritérium alapján történik:

- 1) technológiai fejlettségi szint
- 2) a szén-dioxid-mentesítéshez és a versenyképességhez való hozzájárulás
- 3) az energiarendszer rugalmassága

A jogszabály a következő technológiákat támogatja:

- Fotovoltaikus- és naphőtechnológiák
- Szárazföldi és tengeri megújuló technológiák
- Akkumulátoros/tároló technológiák
- Hőszivattyúk és geotermikus energetikai technológiák
- Elektrolízátorok és üzemanyagcellák

- Fenntartható biogáz/biometán technológiák
- Szén-dioxid-leválasztási és -tárolási (CCUS) technológiák
- Hálózati technológiák [54]

A fentiekén túl az EU konkrét útmutatást és ajánlásokat is megfogalmazott az energiatárolás kapcsán:

- 2016-ban a Bizottság közzétette az energiatárolás definíciójáról és alapelveiről szóló első iránymutatását, majd 2017-ben további munkacsomagot tett közzé a villamos energia energiatárolásban betöltött szerepéről. Ezek a dokumentumok és iránymutatások végül a 2019-ben elfogadott Tiszta Energiát Minden Európának Csomagban is helyet kaptak.
- 2020 óta a Bizottság évente előrehaladási jelentéseket tesz közzé a tiszta energiát hasznosító technológiák versenyképességéről, amelyek bemutatják a különböző tiszta és alacsony szén-dioxid-kibocsátású energiatechnológiák és megoldások jelenlegi és várható helyzetét. A 2022-es jelentés külön fejezetet szentel többek között az akkumulátoroknak is, amelyek alapvető fontosságúak az energia- és a közlekedési ágazat szén-dioxid-mentesítésének sikeréhez.
- 2023-ban elfogadták az *„Energiatárolás – a szén-dioxid-mentes és biztonságos uniós energiarendszer megalapozása”* című bizottsági ajánlást. Az ajánlás felhívja a figyelmet az energiatárolás szerepére a rugalmasság tekintetében, és az energiatárolás szélesebb körű elterjedéséhez hozzájáruló legfontosabb kérdésekkel foglalkozik. **Ami a hosszú távú és szezonális energiatárolás szempontjából kiemelten fontos, hogy az ajánlás arra kéri a tagállamokat, hogy**
 - Határozzák meg energiarendszereik **rövid-, közép- és hosszú távú rugalmassági igényeit**, és a nemzeti energia- és éghajlat-változási tervek aktualizálásában erősítsék meg azokat a célkitűzéseket és kapcsolódó szakpolitikákat és intézkedéseket, amelyek célja az energiatárolás - mind a közüzemi méretű, mind a mérőóra mögötti tárolás, a keresletre való reagálás és a rugalmasság - költséghatékony előmozdítása.
 - biztosítsák, hogy az átviteli és elosztóhálózatok tervezésekor az energiarendszer-üzemeltetők tovább vizsgálják az energiarendszereik rugalmassági igényeit, beleértve az **energiatárolásban rejlő lehetőségeket**

(rövid és hosszú távú), valamint azt, hogy az energiatárolás költséghatékonyabb alternatívája lehet-e a hálózati beruházásoknak.

- határozzák meg a **rövid, közép- és hosszú távú energiatárolás potenciális finanszírozási hiányosságait**, beleértve a mérőóra mögötti **(termikus és villamos energiát felhasználó) és egyéb rugalmassági eszközöket**, és amennyiben az ellátásbiztonság és a környezetvédelmi célkitűzések elérése érdekében további rugalmas erőforrásokra van szükség, mérlegeljék a bevételek átláthatóságát és kiszámíthatóságát biztosító finanszírozási eszközök potenciális szükségességét.
- **támogassák az energiatárolással kapcsolatos kutatást és innovációt, különösen a hosszú távú energiatárolást és a villamos energiát más energiahordozókkal összekapcsoló tárolási megoldásokat, valamint a meglévő megoldások optimalizálását** (pl. hatékonyság, kapacitás, időtartam, minimális éghajlati és környezeti lábnyom). A javaslat kitér arra is, hogy érdemes lehet megfontolni a technológiai gyorsító programok és az innovatív energiatárolási technológiákat a kereskedelmi hasznosításig vezető speciális támogatási rendszerek bevezetését [55].

4.3.2. A hazai szabályozás

Magyarországon az energiatárolás fogalma a „2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiatárolásról („VET”)” című jogszabályban kapott helyet, azonban a hosszú távú vagy szezonális energiatárolásra vonatkozóan jelenleg még nincs elkülönített definíció. Ugyanakkor Magyarországon nemzeti, továbbá szakpolitikai intézkedési tervként több stratégiai dokumentum is szolgál, amelyek említést tesznek az energiatárolás fontosságáról. A 2020-ban az Innovációs és Technológiai Minisztérium által kiadott a „**Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040**” dokumentum foglalkozik az innovatív megoldások piaci alkalmazását segítő szabályozási környezet kialakításával, amely a stratégia szerint kiemelt jelentőségű a villamosenergia-piac átalakulásával járó kihívások kezelésében. Az alfejezet külön foglalkozik az rendszeregyensúlyt támogató lehetőségekkel és az energiatárolással és **megemlíti a szezonális villamos energia- és hőtárolási megoldások** ösztönzését is. A **stratégia kitér a hidrogén szerepére** is, amely a megújuló energiaforrások használatának bővülésével **kritikussá válhat a villamos energia** –

akkumulátoros technológiákkal nem megoldható – **napi, heti vagy akár szezonális tárolása szempontjából**. A dokumentum továbbá a következőket említi meg az innovatív szezonális villamos energia- és hőtárolási megoldások ösztönzésére, mint potenciális projektek:

- Power-to-gas technológia fejlesztése.
- A felesleges villamos energia hővé alakítása és tárolása villanykazánt is alkalmazó távhő rendszerekben. A távhő- és a villamosenergia-rendszer integrációjával elérhető lehetőségek vizsgálata.
- A megújuló alapon termelt villamos energiával előállított hidrogén optimális tárolási és felhasználási üzemének kialakítása (a hidrogén heti időszakon belüli tárolása).
- A hidegenergia- és hőtárolási megoldások kereskedelmi alkalmazásának tesztelése [56].

Magyarország Nemzeti Energia- és Klímaterve („NEKT”) 2023-ban lett felülvizsgálva. A felülvizsgált dokumentum több ízben foglalkozik az energiatárolás kérdésével, mint az üvegházhatásúgáz-kibocsátás csökkentésének eszközével és a megújulók integrációját támogató infrastruktúrával. A dokumentum szerint a Kormány szándéka **2026-ig mintegy 500-600 MW összteljesítményű energiatárolói létesítmények kiépítése, amely kapacitás 2030-ig akár 1 GW-ra is növekedhet.** Az energetikai innováció tekintetében a Nemzeti Energiastratégiához hasonlóan, a NEKT is kiemelt feladatként kezeli az innovatív szezonális villamosenergia- és hőtárolási megoldások ösztönzését, valamint a hidrogén alkalmazását energiatároló közegként.

4.3.3. További nemzetközi példák (Egyesült Államok, Egyesült Királyság)

Az Egyesült Államokban ugyan csak tagállami szinten, de kilenc államnak van 100% megújuló energiát követelő jogszabálya [10] eddig kilenc állam, a Columbia körzet és Puerto Rico fogadott el kötelező érvényű célokat a 100 százalékos tiszta energiatermelés elérésére. További két állam (Massachusetts és Észak-Karolina) kötelező előírásokat fogadott el a nettó nulla kibocsátás elérésére az elektromos ágazatban. További kilenc állam nem kötelező érvényű, 100 százalékos tiszta energia-célkitűzéseket vezetett be, és 23 állam (köztük néhány önkéntes 100 százalékos tiszta energia-célkitűzéssel rendelkező állam) különböző szintű, kötelező érvényű úgynevezett renewable portfolio standard célkitűzésekkel rendelkezik. De az Egyesült Államokban kifejezetten LDES támogatására is elérhetőek programok. Az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériumának („DOE”) Energy

Earthshots kezdeményezése célja, hogy az évtizeden belül felgyorsítsa a tiszta energiamegoldások áttörését. E kezdeményezés keretében a DOE már 2021-ben aktívan foglalkozott az LDES technológiákkal, és célja, hogy 2030-ra 90%-kal csökkentse az LDES technológiák költségét. 2022-ben a DOE Tiszta Energia Demonstrációk Hivatala („OCED”) finanszírozási lehetőséget hirdetett meg legfeljebb 350 millió dollár értékben olyan új, hosszú távú energiatárolási demonstrációs projektekre, amelyek képesek 10-24 órán keresztül vagy hosszabb ideig áramot szolgáltatni. A nyertes projekteket 2023-ban hirdették ki. A program különböző technológiai típusokat finanszíroz, amelyek célja az LDES rendszerek teljes körű bevezetésének technikai és intézményi akadályainak leküzdése különböző földrajzi és éghajlati területeken. A kiválasztott projektek a napközbeni (10-36 óra) és a többnapos (36-160+ óra) tárolási megoldások széles skáláját tartalmazzák, amelyek minimalizálhatják az olyan események által okozott áramkimaradások gyakoriságát és hosszát, mint például a súlyos időjárás vagy a hálózatot ért kibertámadások [57] [58].

Az Egyesült Királyság is évek óta foglalkozik a hosszú távú energiatárolás témájával. A tervek szerint 2024 végére kialakítják a megfelelő LDES-t támogató mechanizmusokat. Az Egyesült Királyság kormányának Energiabiztonsági és Nettó Nulla Energiaügyi Minisztériuma („DESNZ”) 2024 januárjában konzultációt indított a hosszú távú energiatárolásba történő beruházások beindítására vonatkozó javaslatairól, amelyek egy úgynevezett „cap-and-floor” mechanizmust és a lítium-ion kizárását tartalmazzák a támogathatóságból. A DESNZ által javasolt mechanizmus az LDES-technológiák árára egy felső és alsó határt javasol, hogy leküzdje az LDES bevezetésének jelenleg fennálló akadályait, amelyek közül a legfontosabb, hogy az LDES-alkalmazások számára nem állnak rendelkezésre olyan bevételi források, amelyek fedeznék a szükséges magas beruházásokat. A 2014 októberében történt bevezetése óta a meglévő, különbözeti szerződések („CfD”) elnevezésű rendszer nagyrészt sikeresen támogatja a tengeri szél- és napenergia telepítését, ehhez hasonló lenne az LDES-t támogató mechanizmus is. A konzultáció emellett öt fő célkitűzést fogalmazott meg:

- **A szakpolitikák összehangolása** - A szakpolitikai keretnek együtt kell működnie a szélesebb értelemben vett energiapolitikával, és ki kell egészítenie azt, hogy a jövő rugalmas, változatos, nettó nulla energiaellátási rendszerét a fogyasztók számára a lehető legkevesebb költséggel valósítsa meg.
- **A rendszerköltségek csökkentése** - A szakpolitikai keretnek biztosítania kell, hogy

a fogyasztókat a projekt teljes élettartama alatt megóvják a magas működési költségekből eredő szükségtelen rendszerköltségektől.

- **Lehetővé kell tenni a beruházásokat** - A szakpolitikai keretnek lehetővé kell tennie a nagyméretű, hosszú távú villamosenergia-tárolási technológiákba történő beruházásokat a bevételi előrejelzések bizonytalanságának csökkentése révén.
- **Rendszerszintű előnyök** - A tárolási projekteket ösztönözni kell arra, hogy reagáljanak a piaci jelzésekre, és rugalmasan viselkedjenek, hogy a rendszer egésze számára a lehető legnagyobb hasznot hozzák.
- **Megvalósítás** - A szakpolitikai keretnek olyan időkeretben kell megvalósítania a projekteket, amely a rendszer számára a legnagyobb hasznot nyújtja, teljesíti a közsféra kötelezettségvállalásait, és segíti a rendszert a nettó nullára vonatkozó célok elérésében [44] [59].

4.4. Előnyök és hátrányok bemutatása

4.4.1. A hosszú távú energiatárolás előnyei

A legtöbb jelenlegi energiatárolási technológia 24 óránál kevesebb ideig képes energiát tárolni. A telepített akkumulátorok tárolók többsége ~ 4 órán keresztül képesek működni, ami alapvetően elég lehet a rövid távú villamosenergia-rendszerigények kielégítésére (pl.: csúcsigény esetén) és a rendszer megbízhatóságát fenntartó hálózati szolgáltatások nyújtására (pl.: frekvenciaszabályozás). A hosszú távú energiatárolás segíthet a villamosenergia-ágazat **mélyreható szén-dioxid-mentesítésében**. A megújulók egyre nagyobb fokú térnyerésével, az energiatárolási megoldások nagyobb szerepet játszhatnak a mindenkori kereslet kielégítéséhez szükséges kapacitás és energia biztosításában. A nettó-zéró és a mélyreható szén-dioxid-mentesítési forgatókönyvek szerint **a hosszú távú energiatárolási technológiák segíthetnek a jövőbeli hálózati igények kielégítésében**, amikor a viharos események napokra csökkentik a megújuló energiaforrásokból származó termelést, és amikor a megújuló energiaforrásokból származó kínálat szezonális ingadozása hetekre is kiterjedhet. Számos tanulmány azt mutatja, hogy egyre nagyobb szükség van e problémák megoldására, különösen, amikor a szél- és napenergia meghaladja a villamosenergia-termelés 50-60 százalékát, így szükség lesz a 8-12 órás vagy akár hosszabb

időtartamú energiatárolásra. Ez fontos piacot jelent az LDES-technológiák számára. A lítium akkumulátorokhoz képest az LDES a következő előnyökkel rendelkezik:

- Alacsonyabb határkötség nagy mennyiségű elektromos energia tárolásakor.
- Az energia és a teljesítmény szétválasztása, ami rugalmasabb rendszertervezést és -üzemeltetést tesz lehetővé.
- Moduláris és skálázható kialakítás, kevesebb telephelyi követelménnyel és fokozott biztonsággal.
- A technológia nem függ a ritka elemektől, ami alacsonyabb gazdasági költségeket eredményez.
- Az átviteli és elosztóhálózatok korszerűsítéséhez és bővítéséhez képest rövidebb építési ciklus, ami gyorsabb megvalósítást és az elektromos hálózatba való integrációt tesz lehetővé.
- Napközbeni tárolás: 4-24 órás ciklusok, ami a napon belüli energiaellátás és -kereslet egyensúlyhiányát kezeli.
- Napokon és heteken átívelő tárolás: Időjárási anomáliák kezelése, amelyek közép- és hosszú távú energiaegyensúlyhiányhoz vezetnek.
- Évszakokon átívelő tárolás: Kezeli a téli csúcs-energiaigényt és segít az energiarendszerben lévő éghajlatváltozás okozta bizonytalanságok kezelésében.
- Az LDES többféle technológiai útvonalon keresztül valósítható meg [60].

4.4.2. A hosszú távú energiatárolás hátrányai

Ha a hosszú távú energiatárolási technológiákat vizsgáljuk, jelenleg még számos kérdés felmerülhet bennünk a technológiai fejlettséggel, a beruházási és üzemeltetési költségekkel, a piaci igényekkel vagy akár a szakpolitikai háttérrel kapcsolatban. Alapvetően még a hosszú távú energiatárolás pontos **definíciója sem tisztázott**, hiszen eltérő értelmezések vannak a tudományos és szakpolitikai körökben azzal kapcsolatban, hogy mit értünk hosszú időtartam alatt. Bár vannak olyan LDES technológiák (pl.: PHS, CAES, hidrogén), amelyek már kereskedelmi forgalomban vannak, a szélesebb körű elterjedésüket több esetben **földrajzi akadályok**, valamint **magas beruházási költségek** hátráltatják. Az LDES technológiák jelenleg még **nem versenyképesek**, és a **megfelelő szabályozási keretek, valamint a piaci struktúrák hiányában** nehéz lesz ezeknek a technológiáknak előre törniük.

Bár van néhány szakpolitika és ösztönző program, ami kifejezetten az LDES-re irányul, de a legtöbb országban az energiatárolást támogató szakpolitikák jelenleg még nem tesznek különbséget a rövid és a hosszú távú tárolás között. Mindez egyértelműen hátrányt jelent az LDES gyártók és fejlesztők számára, akik próbálják megvetni a lábukat a meglehetősen nyüzsgő tárolási piacon.

Ha a költségcsökkentési kezdeményezéseket vizsgáljuk, korábban említettük a DOE Energy Earthshots nevű kezdeményezését, amelynek célja, hogy ösztönözze és felgyorsítsa az LDES piaci beruházásokat, valamint, hogy az LDES-technológiák költségeit 90%-kal – 10-35 USD/kWh-ra – csökkentsék 2030-ig. A Stanford Egyetem kutatása szerint az LDES költségeknek még tovább, 5 USD/kWh-ra kell csökkenniük ahhoz, hogy hosszú távon életképesek legyenek.

Összegezve, az egyértelmű, hogy egyre nagyobb figyelem övezi az LDES-technológiákat és egyre nagyobb az egyetértés abban, hogy az LDES kulcsfontosságú lesz a villamosenergia-termelés mély dekarbonizációjához, ugyanakkor sokkal több ösztönzőre és világosabb szakpolitikai iránymutatásokra lenne szükség, valamint arra, hogy az LDES-technológiák vásárlói célcsoportjainak megfelelően találják az LDES által nyújtott előnyöket [61].

5. A hosszú távú és a szezonális energiatárolás gazdaságtana

5.1. Gazdasági szempontok

A különböző tárolási technológiák eltérő költség- és teljesítménymutatókkal rendelkeznek, s mivel a technológiákkal szemben is gyakran eltérő elvárásokat állítanak fel, így az egyes megoldások megfelelő költségbecslése gyakran kihívást jelent. Pont a hosszú távú energiatárolási projekteknél is jellemző, hogy a technológiák mérete és a projektek fejlesztési ütemezése nagymértékben eltérhetnek egymástól, ami hatással van az előzetes költségekre. Egyes tanulmányok a jövőbeli költségeket illetően csak a beruházási költségekre koncentrálnak, aminek következtében az energiatárolási megoldások jövőbeli szerepe nehezen értékelhető, annak ellenére, hogy a különböző technológiák elterjedése jelentősen növekszik.

Bár az akkumulátoros projektek gyorsabban és alacsonyabb kezdeti költségekkel telepíthetők, ezek a projektek gyakran kisebb méretűek ~ 5-50 MW kapacitással. Ellenben a PHS- és CAES-létesítmények jellemzően nagy méretűek, ~ 100 MW vagy annál nagyobb kapacitással, valamint magas kezdeti beruházási költségekkel rendelkeznek és a projektek hosszabb átfutási időt igényelnek. **A projektek skálázása is jelentősen eltér a technológiák között.** A li-ion akkumulátoros projekteknél, ha hosszabb tárolási időt szeretnénk elérni, akkor több akkumulátorcsomagot kell beépíteni, ami a projekt egészére nézve a legjelentősebb költségelemet jelenti. Ehhez képest a nagyobb volumenű technológiáknál, mint a PHS, az építési költségek nagy része fix költség, ami jellemzően a területfejlesztésből és az építkezésből tevődik össze. Ezeknek az erőműveknek a hosszabb időtartamra történő méretezése viszonylag kis hatással van a rendszer teljes költségére, ugyanis csak a használt tározók térfogatát szükséges növelni [62].

A hosszú távú energiatárolási technológiák telepítési költségei széles skálán mozognak, amit elsősorban az energiatárolási kapacitás költségei (\$/kWh) adnak meg. A lítium-ion akkumulátorok költségei az utóbbi években hatalmasat csökkentek, így vonzó alkalmazásoknak számítanak egyes hálózati alkalmazások számára [63]. Fontos megjegyezni ugyanakkor, hogy a li-ion akkumulátorok élettartama rövidebb a legtöbb LDES technológia élettartamához képest. A li-ion akkumulátorok átlagos élettartama 3-15 év a használat módjától és az alkalmazott kémiai összetételtől függően, amelyek idővel jelentősen degradálódnak, ami a gyakorlatban meghosszabbítja a projektek élettartamának

költségeit [62].

Az elemzések alapján a hosszú távú energiatárolási technológiák költségei a projektek száma és méretének skálázódása szerinti tanulási görbékkel összhangban csökkenni fognak. A költségcsökkenések legnagyobb mozgatórugói a méretnövelésben és a technológiai fejlesztésekben rejlenek. **Az előre jelzett tőkebefektetési tanulási ráta 12-18% között van, ami összhangban van a hasonló áttörést jelentő technológiák (akkumulátorok, tengeri szélérőművek) tanulási rátájával.** Az LDES versenyképességét nagyrészt az energiatárolási kapacitás költségei határozzák meg, ami várhatóan jelentősen, ~ 60%-kal csökkenni fog, a technológiák oda-vissza hatásfoka („RTE”) pedig szintén ~10-15%-kal javulni fog [34].

7 táblázat: A népszerű LDES technológiákkal kapcsolatos teljesítmény, költségek és kihívások, saját szerkesztés [64]

Kategória	Technológia	Tárolási időtartam (órák)	Technológia fejlettségi szintje	Energiakapacitás költsége 2021-ben (\$/kWh)	Kihívások
Mechanikus	Gravitációs	2-24	Prototípus	190-731	Infrastrukturális kihívások
	Folyékony CO ₂	4-24	Prototípus	~200	Nem bizonyított, biztonsági kihívások
	Folyékony levegő	4-4 hét	Korai kereskedelmi	400-500	Komplexitás, magas CAPEX
	Lendkerék	<4	Korai kereskedelmi	200-250	Csak alacsony időtartamra lett kereskedelmi forgalomba hozva
	Sűrített levegő	6-12+	Kereskedelmi	16-295	Alacsony RTE
	Szivattyús vízerőmű	6-20+	Kereskedelmi	220-511	Földrajzi, területi kihívások

Kategória	Technológia	Tárolási időtartam (órák)	Technológia fejlettségi szintje	Energiakapacitás költsége 2021-ben (\$/kWh)	Kihívások
Termikus	Érzékelhető hő	4-18	Korai kereskedelmi	130-600	Gyenge elektromos hatásfok
Elektrokémiai	Fém-levegő	8-100	Prototípus	~20	Nem bizonyított, nagy méret
	Áramlásos	2-15	Korai kereskedelmi	356-835	Nagy lábnyom, magas CAPEX

5.2. Az energiatárolás kiegyenlített költsége („LCOS”)

Az energiatárolás kiegyenlített költségének számításának segítségével pontosabban értékelhetők a különböző technológiák élettartam-költségei. Az LCOS úgy írható le, mint az energiatárolási technológiába történő beruházás teljes élettartamra vetített teljes költsége osztva az általa szállított villamos energia kumulatív értékével [65].

$$LCOS = \frac{\sum (Capital_t + O\&M_t + Fuel_t) * (1+r)^{-t}}{\sum MWh_t * (1+r)^{-1}} \quad (1)$$

Magyarázat:

$Capital_t$ = A t évben felmerülő összes tőkeköltségek összege („CAPEX”)

$O\&M_t$ = állandó üzemeltetési és karbantartási költségek a t évben („OPEX”)

$Fuel_t$ = töltési költség a t évben

MWh_t = A t évben MWh-ban leadott villamos energia mennyisége, a kapacitástényező mérőszáma.

$(1+r)^{-t}$ = A diszkontfaktor a t. évre vonatkozóan

A mérőszám figyelembe veszi a tárolt villamos energia kibocsátásának élettartamra vonatkozó költségét befolyásoló műszaki és gazdasági paramétereket, aminek segítségével összehasonlíthatók a különböző energiatárolási technológiák kiegyenlített költségei,

valamint az LCOS-érték közvetlenül összehasonlítható az energiatermelési technológiák LCOE-értékével is [66].

Mivel az LDES technológiáknak számos altípusa van és a technológiai fejlődéssel kapcsolatban még nagy a bizonytalanság, így vélhetően a különböző felhasználási esetek szerint több technológia elterjedésére lehet majd számítani, ennek megfelelően pedig kialakul majd az LDES-technológiák portfóliója. Johannes Grimm és társai 2023-as elemzésükben megvizsgálták a hosszú távú – adott esetben szezonális – energiatárolási technológiák jelenlegi és jövőbeli megvalósíthatóságát. Tanulmányuk a következő technológiák vizsgálatára terjedt ki: szivattyús vízerőmű („PHS”), vas-redox áramlású akkumulátor („IRFB”), vanádium-redox áramlású akkumulátor („VRFB”), folyékony levegős energiatárolás („LAES”), gravitációs tárolás („GRAV”), hidrogén („H₂”). A következő táblázatban és ábrákon elemzésük alapján különböző scénáriókat mutatunk be ezekre a technológiákra vonatkozóan, ami kiterjed a jelenlegi és a várható jövőbeli LCOS adatokra is.

8 táblázat: Technológiai paraméterek, saját szerkesztés [11]

Technológia	Tárolási időtartam (óra)	Oda-vissza hatásfok	Jelenlegi CAPEX (mill. EUR)	Jövőbeli CAPEX (mill. EUR)	Jelenlegi OPEX (mill. EUR)	Jövőbeli OPEX (mill. EUR)	Élettartam (évek)
PHS	10	0.74	55.0	57.6	0.5	0.5	60
PHS	100	0.74	145.0	151.9	0.5	0.5	60
LAES	10	0.60	69.9	69.9	1.4	1.4	40
LAES	100	0.60	250.1	250.1	5.0	5.0	40
GRAV	10	0.85	141.2	104.5	0.7	0.6	40
GRAV	100	0.85	471.5	104.5	1.7	0.6	40
IRFB	10	0.76	130.2	20.0	1.1	1.1	20
IRFB	100	0.76	320.3	74.0	1.1	1.1	20
VRFB	10	0.76	172.0	79.9	0.7	0.7	20
VRFB	100	0.76	712.0	330.9	0.7	0.7	20
H ₂	10	0.39	190.3	74.7	2.9	1.1	15
H ₂	100	0.39	340.3	164.7	5.1	2.5	15

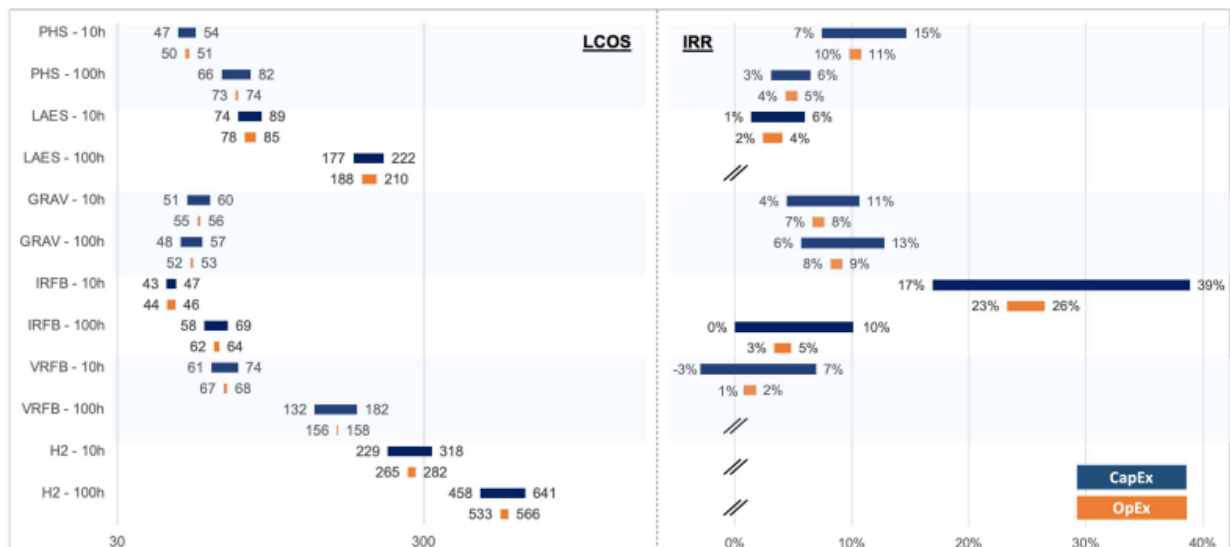
A táblázatban két szélsőséges időtartamú eset van bemutatva: 1.) a tárolók 10 óráig

működnek, és amikor 2.) a tárolók 100 órán keresztül üzemelnek. Az adatok szakirodalmi gyűjtésekből és a technológiákat gyártó vállalatok weboldalai alapján lettek összeállítva [11].



21 ábra: A jelenlegi LDES-technológiák LCOS-értékei [EUR/MWh] és belső megtérülési rátája ("IRR") [%] [11]

A két ábrán a jelenlegi és a fejlett LDES technológiák LCOS és IRR értékeit láthatjuk, ahol a táblázathoz hasonlóan technológia változatokként a két szélsőséges tárolási időtartam (10 óra – 100 óra) szerint vannak bemutatva az esetek. A felső és alsó sávokban egy alapesethez mérten érzékenységi vizsgálatot láthatunk arra vonatkozóan, ha a CAPEX és OPEX értékek az alapesethez képest 20%-kal alacsonyabbak vagy magasabbak.



22 ábra: Az LDES-technológiák LCOS [EUR/MWh] és IRR [%] értékei az érettségi szakaszban [11]

A két ábra alapján megállapítható, hogy a jelenlegi LDES technológiák közül a PHS, mint érett technológia éri el a legalacsonyabb LCOS értéket. Ha az IRR-t is vizsgáljuk a jelenlegi technológiáknál a PHS-en kívül egyetlen technológia sem érné el a saját tőkeköltését. A két időtartamot összehasonlítva azt is láthatjuk, hogy a 100 órás rendszerek LCOS értéke általában sokkal magasabb, mivel a magasabb teljes terhelésű órákból származó többletbevétellel sem tudják ellensúlyozni a magasabb CAPEX és OPEX költségeket és a 100 órás rendszerek az érett technológiáknál is alul teljesítenek a 10 óráshoz képest. Ugyanakkor a 2. ábra alapján láthatjuk, hogy a már kiforrott LDES technológiáknál több technológia is versenyképessé válhat a PHS mellett [11].

5.3. Ígéretes üzleti és finanszírozási modellek, megtérülés

Az LDES alkalmazási esetei jelenleg még nagyon szűk szegmenset fednek le az energiatárolás felhasználási esetek közül. Ahogy a fentiekben említettük, az LDES felhasználási esetei:

- 1.) Energia arbitrázs
- 2.) Napon belüli villamosenergia átütemezés (RES)
- 3.) aFRR piacon történő részvétel

A magyarországi alkalmazási eseteket tekintve, a felhasználási esetek alkalmazását

megvizsgáltuk és a következőkre jutottunk:

- **Energia arbitrázs:**

Energia arbitrázs esetén az energiatároló a villamosenergiát azzal a céllal tárolja el, hogy azt egy magasabb energiadíjjal rendelkező időszakban adja el. Ebben az esetben a 'total cost of storage'-nak kisebbnek kell lennie, mint a napon belüli maximum és minimum villamosenergia ár. Jelenleg ezek a feltételek nem állnak fenn, a napon belüli árkülönbség nem fedezi a tárolási költségeket.

- **Napon belüli villamosenergia átütemezés:**

Ebben az esetben az energiatároló megújuló energiát ütemez át (co-located energiatárolóként) egy megújuló energiatermelő rendszerből. Az LDES megtérülését az alábbi tényezők befolyásolják:

- 1.) a RES eszköz a rendszerirányító által visszaszabályozással érintett eseteinek száma és időtartama,
- 2.) az áramvásárlási megállapodásban („PPA”) rögzített villamosenergia adásvételi szerződés részletei (menetrendtől történő eltérés szankcionálása).

Ez a felhasználási eset sem működik még Magyarországon, mert -ugyan a megújuló energiatermelő eszközöknek aFRR képességgel kell rendelkeznie- a visszaszabályozások száma még nem jelent olyan veszteséget a RES értékteremtő képességében, hogy érdemes lenne LDES-t telepíteni. Ezen felül a rövidebb 1-2 órás energiatárolók kiválóan oldják meg a piaci szükségleteket.

- **aFRR piacon történő részvétel:**

Ebben az esetben az LDES a rendszerszintű szolgáltatások aFRR piacán vesz részt. Ez a felhasználási eset elméletben (gyakorlatban még megvalósítás nem történt) „működik”: az energiatároló a rendszerszintű szolgáltatások aFRR- piacán vesz részt.

Egy 25 MW/250 MWh-s energiatárolót feltételezve (a számítások során egy LDES piaci árát vettük figyelembe), a számítások szerint az energiatároló egyszerű megtérülési ideje (nem diszkontált) 4,72 év:

Beruházási költségek	47,052	M EUR
Állami támogatás		M EUR
Éves működési költségek	2,024	M EUR
Éves villamosenergia töltés	80 206,250	M EUR
Éves bevétel	11,985	M EUR
Kapacitásdíj	5,656	M EUR
Energiadíj	1,184	M EUR
Villamosenergia értékesítés	5,145	M EUR
Egyszerű megtérülési idő	4,72	Év/Years

23 ábra: LDES technológia az aFRR piacon, saját szerkesztés

A vizsgált LDES degradációja minimális, élettartama 30 év. Emiatt a befektetés megtérülése után is még évtizedekig működik. Az LDES ebben a felhasználási esetben versenyképes a lítium-ionos energiatárolókkal.

Elhelyezését tekintve az LDES lehet:

- 1.) Egyedülálló LDES – a hálózati csatlakozási pontra kizárólag az LDES csatlakozik
- 2.) RES-el integrált - RES-el egy csatlakozási ponton hálózatra csatlakozó LDES

Véleményünk szerint az LDES-t RES-el integráltan érdemes megvalósítani. Erre jó példa az NV Energy projektje az Egyesült Államokban: Az NV Energy három, összesen 1200 MW kapacitású napenergia-projektet jelentett be 590 MW akkumulátorral; a 4-5 órás időtartamú akkumulátor rendszerek 30%-ról 65%-ra növelik az energia rendelkezésre állását.

Bár a 4-5 órás tárolás megduplázza e napenergia-berendezés rendelkezésre állását, ez még mindig messze van egy hagyományos fosszilis tüzelőanyaggal működő vagy atomerőmű rendelkezésre állásától. A helyszíntől (irradiáció), az eszköz típusától (napenergia, szél vagy vegyesen) és a kívánt teljesítményformától (csúcsteljesítmény vagy alapterhelés) függően a tíz órától körülbelül 100 óráig tartó tárolórendszerek sok esetben az órák több mint 90%-ában képesek biztosítani a kívánt teljesítményt.

Az LDES projekt (megfelelő technológia választása esetén) aFRR felhasználási esetre optimalizáltan kialakítva piaci alapon is finanszírozható. Ugyanakkor megállapítandó, hogy számos ország (köztük Magyarország is) dedikált támogatási programokat hirdet meg az LDES projektek támogatására. Ennek „célja” az, hogy a mély dekarbonizációs időszakokra

legyen tapasztalat LDES-re vonatkozóan.

5.4. A CO₂ kvótaár hatása a megtérülésre

Az Európai Unió ambiciózus kibocsátás csökkentési céljainak egyik szakpolitikai eszköze, a kibocsátáskereskedelmi rendszer („EU ETS”). A rendszer 2005 óta működik az EU valamennyi tagállamában, valamint az EEA-EFTA államokban. Az EU ETS mára már az energiaigényes iparágak mellett egyéb ágazatokra, és mintegy 10 000 létesítmény kibocsátására terjed ki.

Az EU ETS lényegében egy szén-dioxid piacként működik, a kibocsátáskorlátozás érdekében. A rendszer a „cap and trade” elvén működik, melynek keretében megállapítanak egy korlátot a teljes kibocsátásra vonatkozóan, és az érintett vállalatoknak a kibocsátásukkal megegyező mennyiségű engedéllyel kell rendelkezniük. A kibocsátáskereskedelmi rendszer ezeknek az engedélyeknek a piaca. A vállalatok a kibocsátásuknak megfelelően adnak vagy vesznek engedélyeket. A piacon lévő engedélyek mennyisége idővel csökken, ezáltal a kibocsátás csökkentésére is szükség lesz, ezzel támogatja a „cap and trade” elv az EU kibocsátás csökkentési céljait. Az EU ETS rendszer működése kereskedési szakaszokra osztható, napjainkban a negyedik szakasz (2021-2030) zajlik.

A Piaci Stabilitási Tartalék („MRS”) az EU ETS rendszer piaci mechanizmusa, melyet 2019-ben vezettek be. Célja a piac stabilitásának biztosítása, ugyanis kibocsátási egységfeleslegek felhalmozódása a CO₂ árak csökkenését eredményezi, ami pedig nem hat ösztönzően a kibocsátás csökkentési célokra. Az MRS fő célja tehát a kibocsátási kvóták piaci kereslete és kínálata közötti egyensúlyi viszony fenntartása. A működésének alapja az adott évi kibocsátási egységek száma. Amennyiben ez a szám meghaladja a felső értéket, akkor a következő évben árverésre bocsátott kibocsátási egységek száma csökken, s ugyanezen mechanizmus alapján amennyiben az adott évi kibocsátási egységek száma nem éri el a minimum határt, akkor a következő évben a felhalmozott tartalékból bevezetnek néhányat. Az MRS ilyen módon piaci stabilitási tartalékként funkcionál.

Cail, Mantulet és Peffen elemezték az EU ETS rendszer hosszú távú hatásait a CO₂ kibocsátás árára vonatkozóan. Eredményeik azt mutatják, hogy 2030-ig a kibocsátás ára várhatóan stabilan alakul (70-75 EUR/ t CO₂), azonban 2030 után emelkedni fog ez az ár, és 2040-re várhatóan eléri a 130 EUR/t CO₂-t. Az elemzések azt mutatják, hogy a piaci

stabilitási tartalék 2035-ig tudja garantálni az árstabilitást, ezután azonban, ha csak az EU ETS rendszer aktualizálására nem kerül sor a kibocsátás ára magasra ugrik, és 2044-re meghaladhatja akár az 500 EUR/ tCO₂-t is. A szerzők javasolják a rendszer hosszabb távú működésének felülvizsgálatát [67].

Az LDES álláspontunk szerint elsősorban a nem időjárásfüggő alacsony vagy zero karbon energiatermelő rendszerekkel versenyez a teljes tulajdonosi költséget tekintve. Ezek a nukleáris energia (elsősorban kis moduláris atomreaktorok), a geotermális energiatermelés, a biomassza erőművek, továbbá a fosszilis alapú energiatermelés CCS-el. Modellszámítások szerint a [51] még azokban a földrajzi régiókban is szerepe lesz a mély dekarbonizáció elérésekor az alacsony karbontartalmú energiatermelőknek, ahol a megújuló energiatermelési potenciál magas. Ezzel kizárólag az LDES, mint technológia versenyez.

Az alacsony karbontartalmú technológiák skálázása és technológiai fejlesztése ugyanúgy kihívásokkal terhelt, mint az LDES technológiáé. Mindkettő technológiai irány szakpolitikai támogatásra szorul a tovább fejlődéshez. Valószínűleg az LDES és az alacsony karbontartalmú energiatermelés költséghatékony mix-e lesz az irány, amely megvalósulhat. Ezt kiválóan összefoglalja Sepulveda és társai által [51] készített modell összefoglalása: Mivel az alacsony szén-dioxid-kibocsátású villamosenergia-termelők legalacsonyabb költségű összetételét bizonytalan technológiai költség- és performancia fejlődési irányok határozzák meg, valamint a legkevesbé költséges termelő portfólió összetételének nagymértékű és potenciálisan nem monoton változásai miatt a kibocsátási határérték szigorításával a politikáknak internalizálniuk kell a hosszú távú karbonmentesítési célokat, és lehetővé kell tenniük a flexibilis és alacsony karbontartalmú termelők alacsony költségű kombinációinak alkalmazását.

Az ilyen szakpolitikák közé tartozhatna egy hosszú távú kibocsátási határérték-pálya, egy folyamatosan emelkedő szén-dioxid-ár vagy egy technológiasemleges, alacsony szén-dioxid-kibocsátású erőforrás-beszerzési követelmény. Alternatív megoldásként a technológia-specifikus politikák olyan kibővített kombinációja, amely magában foglalja az alacsony szén-dioxid-kibocsátású szilárd erőforrások kutatásába, demonstrációjába és telepítésébe történő beruházások jelentős támogatását, biztosíthatná, hogy ezek az erőforrások továbbra is életképes részét képezzék az éghajlatváltozás mérséklésére szolgáló portfóliónak.

Jól bizonyítja ez a megállapítás a jövő fejlődési útjának kiszámíthatatlanságát. A CO₂ kvótaár hatása -a fenti bizonytalanságoknak megfelelően- meglehetősen nehezen becsülhető meg.

Az LDES – általában az energiatárolási technológiák is – meglehetősen tőkeintenzív beruházások. A beruházási költségek körülbelül 2-5%-a az üzemeltetési költség. Ennek megfelelően az üzleti modellre a beruházások és a bevételek hatnak a leginkább, a többi költségvetési aránya „elhanyagolható”. A CO₂ kvótaár direkt módon a fosszilis energiatermelőkre hat, de indirekt módon az LDES technológiák megtérülésére is hatással van: a CO₂ kvótaár növekedése javítja az LDES versenyképességét az „energia arbitrázs” felhasználási esetben.

5.5. Az LDES ösztönzésének lehetséges pénzügyi és támogatási instrumentumai

A hálózati villamosenergia-tárolókat ma a szivattyús energiatároló erőművek (kumulatív beépített teljesítmény) és a lítium-ionos akkumulátorok (a jelenlegi éves létesítmények arányát tekintve) uralják. A koncentrált fotovoltaiikus erőművek olvadt só tárolása és kisebb mértékben a helyszíni hőtárolás is jelentős.

A PHS, amely jellemzően 6-10 órás névleges teljesítményen üzemel, csúskapacitást biztosít, és napi time-shifting alkalmazásokat teljesít. Az engedélyezési és a nagyprojektek finanszírozási nehézségei azonban korlátozzák a PHS projekteket. A lítium-ion akkumulátorok technikailag alkalmasak a legkülönbözőbb méretű (pl. kW-tól GW-ig és kWh-tól GWh-ig terjedő) és lényegében bármilyen időtartamú projektekhez, de a gazdaságilag életképes alkalmazások közé tartozik a frekvenciaszabályozás (másodpercnyi töltési és kisütési időtartamokkal), a tartalékpiacon (több tíz perc), az átviteli és elosztóhálózati korszerűsítések elhalasztása (8 óra) és egyéb, 10 órás időtartamú tárolási projektek.

Az LDES-ek jelentősége a mély dekarbonizáció időszakában értékelődik fel. 70-80%-os villamosenergia dekarbonizációs szint esetén már szükséges lesz LDES. Ebben az időszakban az LDES-ek szerepe az energiarendszer stabilitása is lesz. Emiatt várhatóan lesznek olyan támogatási formák, amelyek az LDES-ek létesítését és üzemeltetését hivatottak szolgálni.

Az LDES-ek támogatási formái:

- 1.) CAPEX támogatás: általában egy maximalizált Ft/MW nagyságú támogatás, amely fokozza az LDES versenyképességét.

- 2.) OPEX támogatás: CfD megállapodás, amely garantált megtérülést ad a projektnek, illetve a piac „kilengése” esetén a megnövekedett bevétel egy részét a támogató elvonja.
- 3.) Pilot projektek támogatása: általában magas támogatási intenzitású projekt, célja a technológia működésének demonstrálása.

6. Az energiatárolási megoldások magyarországi megvalósíthatóságának vizsgálata

6.1. Hazai kutatás-fejlesztési projektek

Az elmúlt években a Nemzeti Energiastratégiában és a Nemzeti Energia- és Klímatervben meghatározott célkitűzések mentén számos olyan kutatás-fejlesztési („K+F”) projektet hirdettek meg, amelyek innovatív energiatárolási megoldások támogatására irányulnak. Az alábbiakban bemutatjuk ezeket a támogatási lehetőségeket, valamint néhány támogatott projekteket.

1. Karbonmentes, többlet villamos energia innovatív technológia által gázenergiává (hidrogén, biometán) történő alakítását célzó fejlesztések megvalósítása (2020-3.1.2-ZFR-KVG)

A felhívás szerint *„a szezonális hatásának mérséklésére olyan technológiák lehetnek alkalmasak, amelyek a nyári időszakban, a naperőművekben termelt villamos energiát átalakítják oly módon, hogy az helyben felhasználható, vagy gáz formájában tárolható legyen, így csökkentve a téli földgázfogyasztási csúcsidőben az importigényt, illetve lehetővé válhat villamos energiává visszaalakítva a csúcsidei forrást biztosítása.”*

A Felhívás célja az volt, hogy megalapozza– a műszaki- és környezetvédelmi szempontok szerint is – **életképes power-to-gas (hidrogén vagy biometán) technológiák piaci megjelenését a következő szempontok szerint:**

- Az adott technológia segítse a megújulóenergia-termelők (elsősorban naperőművek) energia-rendszerbeli integrálását azáltal, hogy rugalmasan felhasználja a termelési többletet, átalakítva olyan energiává, amely helyben felhasználható, vagy visszaalakítva alkalmas a villamosenergia-fogyasztói csúcsigények, illetve egyéb energiaigények részbeni kielégítésére,
- A technológia gyorsan és rugalmasan, rövidtávon segítsen kezelni a karbonmentes többlettermelés okozta rendszer-szabályozási kihívásokat (pl.: villamos leszabályozási kapacitás létrehozásával együtt gázenergia előállítás, és annak villamos/hőenergetikai célú hasznosítása),
- A projekt legyen innovatív, alkalmazzon innovatív technológiát, módszereket és

eljárásokat,

- Az adott technológia mintaprojektbeli megvalósítása járuljon hozzá a hazai kutatási, oktatási és ipari megvalósítási potenciál kiaknázásához (nem kizárva ennek keretében külföldi technológia, know-how és/vagy berendezések beszerzését) a későbbi piaci bevezethetőség érdekében,
- A mintaprojekt méretéből és névleges teljesítményéből adódóan lehetővé teszi, hogy annak eredményeit kereskedelmi léptékű piaci bevezetésénél is alkalmazni lehessen [68].

Nyertes projektek:

- **Akvamarin:** Az Akvamarin pilot projekt keretében a Magyar Földgáztároló Zrt. (MVM leányvállalata) egy ~ 2,5 MW összteljesítményű PEM típusú elektrolizáló rendszert és a hozzá tartozó hidrogén gázelőkészítő technológiát létesített a Kardoskúti Földalatti Gáztárolónál. A projekt helyszíni építészeti, gépészeti, villamos és műszeres kivitelezési munkái tavaly befejeződtek, és a projekt átadásra került. A Kardoskúton előállított hidrogén jelenleg kétféle célra használható: az egyik, hogy a saját földgáztárolónál a betárazáshoz használt (földgázüzemű) kompresszorokban a földgázhoz keverik a hidrogént, vagyis „hagyományos módon”, üzemanyagként elégetik a hidrogént. A másik lehetőség, hogy külső felhasználó számára értékesítik az előállított, tiszta hidrogént palackokban és/vagy trélerrel történő elszállítással. A jövőben felmerülő, további lehetőség a hidrogén használatára – ami elvi, technikai szinten már jelenleg is adott lenne – a nagynyomású földgázszállító-vezetékbe történő betáplálás, de a jelenlegi jogi szabályozás ezt még nem teszi lehetővé [69].
- **Bükkábrányi naperőmű megújuló áramtermelését hasznosító innovatív energiatároló technológia fejlesztése:** A projekt célja egy innovatív PEM elektrolizáló technológia, majd pedig nagynyomású hidrogén-palacktöltő rendszer integrációja Magyarország egyik legnagyobb naperőművével. A projekt eredményeként két fő kutatás-fejlesztési kérdésre kíván választ adni: (1) mi az optimális villamossági integrációs módszer a naperőmű és az elektrolizáló között, amely biztosítani tudja a hatékony, stabil és gazdaságos működést, (2) miként kapcsolható ez a hidrogéntermelő rendszer egy nagynyomású tároló és palacktöltő felhasználáshoz, az értéklánc továbbvitele érdekében [70].

2. Karbonmentes, többlet villamos energia innovatív elektrokémiai tárolását elősegítő fejlesztések megvalósítása (2021-2.1.1-EK)

A Felhívás olyan mintaprojekteket volt hivatott támogatni, melyek

- elősegítik a Li-ion technológiától eltérő, ugyanakkor azt kiegészíteni képes, illetve azzal együttműködő elektrokémiai energiatárolási technológiák – piaci megjelenését és elterjedését,
- hosszú (legalább 6 órás) kitárolási időtartammal rendelkeznek, ami által hozzájárulnak a megújulóenergia-termelők (elsősorban naperőművek) a villamosenergia-rendszerbe történő integrálásához;
- képesek a megújuló többlettermelés okozta rendszer-szabályozási kihívásokat napon belül kezelni (pl.: több órás villamos szabályozási kapacitás létrehozásával)
- támogatni tudják az elektromos gépjárművek töltését (képesek a gyorsöltőkhöz szükséges legalább 6-8 órányi, elsősorban zöld villamos energia tárolására)
- Hazánkban eddig még nem alkalmazott innovatív technológiát, módszereket és eljárásokat használnak
- mintaprojektbeli alkalmazása hozzájárul a hazai kutatási, oktatási és ipari megvalósítási potenciál kiaknázásához (nem kizárva ennek keretében külföldi technológia, know-how és/vagy berendezések beszerzését) a későbbi piaci bevezethetőség érdekében
- méretüket, névleges teljesítményüket és kapacitásukat tekintve lehetővé teszik, hogy a mintaprojekt eredményeit kereskedelmi léptékű piaci bevezetésénél is alkalmazni lehessen [71].

A pályázat keretében több **vanádium-redox és nátrium-kén alapú energiatárolós projektet** is támogattak. Mivel a projektek futamideje még tart, így kevés információt lehet tudni a nyertes projektek kimeneteléről, azonban a **Tesseract Energiatároló** projektről épp a közel múltban jelentek meg a hírek, hogy a pilot keretében megérkezett hazánk első nátrium-kén akkumulátora. A rendszer 1,45 MWh villamos energia tárolását fogja lehetővé tenni és a demonstrációs energiatárolót különböző piaci szolgáltatásokkal fogják tesztelni, mint a frekvencia szabályozás vagy a csúcsterhelés [72].

3. Hulladékhő hasznosítását, tárolását, illetve piaci alapú felhasználását célzó fejlesztések megvalósítása innovatív hőtároló vagy átalakítási technológia által (2021-2.1.2-HŐ)

A Felhívás olyan mintaprojektek támogatását célozta meg, amelyek képesek megalapozni – műszaki- és környezetvédelmi szempontok szerint is – az **életképes hőtárolási, hőszállítási, „power-to-heat”, illetve „heat-to-power” technológiák piaci elterjedését,** a következő szempontok szerint:

1. A technológiák segítik a korábban fel nem használt **„hulladékhő” hasznosítását, tárolását,** majd az eltárolt hőenergia időben később, **piaci alapon (hő-, villamos energia) történő értékesítését** (FCR, aFRR, mFRR, mérlegköri kiegyenlítés, energia arbitrázs stb.) így többlet árbevétel generálását;
2. innovatív technológiát, módszereket és eljárásokat használnak a mintaprojektben;
3. mintaprojektbeli megvalósítása hozzájárul a hazai kutatási, oktatási és ipari megvalósítási potenciál kiaknázásához (nem kizárva ennek keretében külföldi technológia, know-how és/vagy berendezések beszerzését) a későbbi piaci bevezethetőség érdekében;
4. támogatják az ilyen technológiát alkalmazó Pályázók **több (villamos energia és hő) piacon való részvételét,** így segítik egyrészt a karbonmentes termelők által igényelt szabályozói potenciál növelését, másrészt elősegítik a költség-megtakarítás vagy többlet árbevétel generálásával a működési hatékonyság javulását, esetleges további, szükséges fejlesztések finanszírozásához;
5. a **power-to-heat megoldás alkalmazásával az adott időben nem felhasználható villamos energiát el tudják helyezni a távhőrendszerekben;**
6. a **hulladékhőt villamos energiává tudják alakítani,** és biztosítani tudják annak piaci értékesítését vagy helyben történő felhasználását;
7. méretüket és névleges teljesítményüket tekintve lehetővé teszik, hogy a támogatott projekt eredményeit kereskedelmi léptékű piaci bevezetésénél is alkalmazni lehessen;
8. hozzájárulnak a környezet hőszennyezésének csökkentéséhez, úgy, hogy közben máshol felhasználható „terméket” (hő- vagy villamos energia) állítanak elő.

A pályázat keretében 3 projektet támogattak, azonban az előző felhíváshoz hasonlóan, a projektek futamideje még itt is tart, így nem sok információ érhető el a nyertes projektekről és a jelenlegi fázisukról. Annyi biztos, hogy pályázat keretében különböző típusú hőtárolási megoldásokat támogattak, többek között az érzékelhető hő kategóriába tartozó zúzott kövön alapuló termikus energiatároló technológia alkalmazását [73].

4. Hálózati energiatárolók telepítése energiapiaci szereplőknél (RRF-6.5.1-23)

A felhívás a kiegyenlítő energia és kiegyenlítő kapacitás piacon potenciálisan rendelkezésre álló hálózati energiatárolásra képes beruházások ösztönzésére fókuszált. Az energiatároló létesítményekhez nyújtott támogatás az időjárásfüggő megújuló energiaforrások integrációját volt hivatott támogatni. A felhívás nem specifikálta, hogy milyen típusú energiatárolókat támogat, viszont az aFRR akkreditáció megszerzését kötelező elvárásként jelölte meg. A nyertes pályázatok kiválasztása három pályázati ablakban, szeparáltan történik:

1. pályázati ablak: várható műszaki élettartam kevesebb, mint 11 év
2. pályázati ablak: várható műszaki élettartam legalább 11 év és maximum 29 év
3. pályázati ablak: várható műszaki élettartam legalább 30 év [74]

A fentiek alapján ugyan indirekt módon, de ez a pályázat is alkalmas lehet hosszú távú energiatárolási megoldások támogatására. Mivel a pályázatok beadása 2024.02.05-én zárult le, így a nyertes projektekről még nincs információnk.

6.2. Várható további lehetőségek

A meghirdetett K+F támogatási lehetőségek alapján láthatjuk, hogy Magyarországon is megindult a hosszú távú és szezonális energiatárolási lehetőségek vizsgálata és támogatása, amellett, hogy a támogatási programok nem jelölnék ki konkrét támogatandó technológiákat, csupán irányvonalakat. **Kiemelt támogatási területeknek számítanak a hőtárolási megoldások, a li-ionos akkumulátoros energiatárolóktól eltérő elektrokémiai tárolási technológiák, valamint a power to gas és a hidrogén.** A hidrogénnel kapcsolatban fontos megemlíteni, hogy Magyarországnak van dedikált Nemzeti Hidrogénstratégiája, amely a szektorintegráció terén külön foglalkozik a villamosenergia- és földgáz-infrastruktúrával. A

földgáz-infrastruktúra kifejezetten érintett lehet a hazai hidrogéngazdaság fejlődésében. A stratégia konkrét intézkedéseket is definiált ezen a területen, amelyek a következők:

- Hidrogén földgáz-infrastruktúrába történő betáplálásának vizsgálata, pilot projekt megvalósítása.
- Európai Hidrogén Gerincvezetékhez való regionális kapcsolódás megtervezése.
- Földgázszállító, -tároló és -elosztóhálózat, illetve a felhasználói rendszerek fokozatos felkészítése a tiszta hidrogén befogadására és felhasználására.
- Felszín feletti hidrogéntárolási megoldások alkalmazásának elősegítése, ipari méretű tárolói technológiák biztonságos rendelkezésre állásának elősegítése [75].

A Magyar Földgáztároló Zrt. jelenleg négy földalatti gáztárolót üzemeltet, amelyek egyike a már említett kardoskúti létesítmény. Maga az Akvamarin projekt azért ott indult, mert a tároló mérete és a kiépített technológia illeszkedhet ahhoz a tervekhez, hogy a jövőben három, kisebb-nagyobb tároló réteg álljon rendelkezésre a földalatti hidrogén tárolására, amihez a távvezetési és elosztó vezetési kapcsolatok is megfelelőek a régióban [76]. A Gas Infrastructure Europe („GIE”) nevű uniós szervezet felmérést végzett a hidrogénszállító-vezeték és a földalatti tárolórendszerek infrastruktúráinak kiépítési lehetőségeiről a 2030 és 2050 közötti időszakra vonatkozóan. A GIE vizsgálta a hidrogén iránti várható keresletet annak érdekében, hogy meghatározható legyen a majdani szállító- és tárolókapacitások iránti igény. Magyarország esetében a kereslet 2030-ra 3,3 terrawattóra (TWh), 2050-re pedig 25,1 TWh-ra tehető. Az elemzés a hazai lehetséges tárolókapacitásokat pedig 16,8 TWh-ra becsülte, ami azt is jelenti, hogy Magyarország jól áll a földalatti gáztárolókkal és a kimerült, tárolásra alkalmas földtani szerkezetekkel. Az EU-n belül Magyarországot, csak Németország, Ausztria, Franciaország, Hollandia és Olaszország előzte meg a hidrogéntárolási kapacitások terén [77].

A hazai hidrogéntárolás szempontjából vizsgálandók a hidrogénvölgyek/hidrogénklaszterek is, amelyek a Nemzeti Hidrogénstratégia szerint támogathatják az ipari hidrogénfelhasználás dekarbonizációját. A hidrogénvölgyek egy teljes hidrogénökoszisztéma demonstrációját jelentik egy régióban, az összekapcsolódó projektek portfóliójaként. Magyarország két hidrogénvölgy kialakítását tervezi 2030-ig, a Dunántúli hidrogén ökoszisztémát és az Észak-keleti hidrogénvölgyet [75].

A fentiekén túl, a hazai törekvések szempontjából érdemes megemlíteni a szivattyús vízerőműveket is. Az európai országokban kevés kivétellel mindenütt működnek **szivattyús-**

tározós vízerőművek, amelyek telepítési lehetőségét Magyarország is régóta vizsgálja. Az utóbbi időszakban a téma kiemelt figyelmet kapott és a potenciális helyszínek vizsgálatáról várhatóan még 2024-ben egy megvalósítási tanulmányt is készítenek. A tervek szerint az energiatározó ~ 600 MW beépített kapacitással jöhetne létre és körülbelül 6 órás energiatermelésre lenne képes, valamint a tervek arra is kiterjednek, hogy a vízfelszín egy részét úszó napelemtáblákkal fednék le a párolgás mérséklése érdekében. Az engedélyek beszerzését követően 2024. áprilisában két helyszínen, a Borsod-Abaúj-Zemplén vármegyei Sajóivánka és a hevesi Markaz községek térségében megkezdődtek a talaj teherbíró-képességének felmérésére alkalmas próbafúrások. A folyamat egésze során, így az előkészítésnél is fontos szempont, hogy a műveletek a lehető legkisebb környezetterhelést eredményezzék. A fúrási pontokat meglévő (szükség esetén megerősítendő) erdei és mezőgazdasági utakon közelítik meg. A fúrások eredményeit laborban fogják elemezni, és a vizsgálatok eredményét a megvalósíthatósági tanulmányban is szemléltetik, ami alapot szolgáltat a döntéshozatalra [78].

7. Összegzés

Jelen dokumentum a hosszú távú és a szezonális energiatárolási megoldásokkal foglalkozik különféle szempontokból. Annak érdekében, hogy megfelelő keretek közé helyezzük a témát, első körben kitértünk a jelenlegi energiapiaci helyzetre, valamint általánosságban bemutattuk az energiatárolás szerepét. Elmondható, hogy a Covid-19 világjárványból való kilábalás és a globális energiaválságra adott válaszlépések jelentős lendületet adtak a globális tiszta energiába történő beruházásoknak, amelyek ebben a komplex helyzetben 2020 óta ~ 40%-kal emelkedtek. Az éghajlatvédelmi célok elérése érdekében foglalkozni kell a villamosenergia-rendszer egyedi igényeivel, amihez a rendszer infrastruktúráját és a rugalmassági mechanizmusokat – beleértve az energiatárolást is – fejleszteni szükséges.

Megvizsgálásra került a hosszú távú energiatárolás jelentősége, amely kétségtelenül egyre meghatározóbb lesz a megújuló energiaforrások nagyobb arányú felhasználása esetén. Bemutattuk a hosszú távú és a szezonális energiatárolás jelenlegi technológiáit a mechanikus, termikus, kémiai és elektrokémiai tárolási formák mentén. Kiemelt figyelmet kaptak a hosszú távú és a szezonális energiatárolás sajátosságai, a várható technológiai trendek és a technológiák ipari dekarbonizációra gyakorolt hatásai. Megállapításra került, hogy a hosszú távú energiatárolás piacának alakulása még bizonytalan, és e technológiák elterjedéséhez további pénzügyi és politikai ösztönzőkre lenne szükség, ugyanakkor, az LDES-nek számos hőenergia intenzív szektor dekarbonizálásában szerepe lehet, valamint a villamosenergia rendszer rugalmasságának biztosításában is részt vehet.

Tárgyaltuk a hosszú távú és a szezonális energiatárolás létjogosultságát és felhasználási eseteit, amely szerint a jelenlegi LDES és a szezonális energiatárolási megoldások egyaránt alkalmasak lehetnek a hálózaton belüli és hálózaton kívüli területeken.

A szabályozási háttér vizsgálata során megállapítottuk, hogy a hosszú távú- és a szezonális energiatárolásra vonatkozóan dedikált jogalkotás még nincsen, viszont számos jogszabály hat az LDES és szezonális technológiák felértékelődésére és fejlődésére. Az LDES technológiák egyértelmű előnye, hogy segíthetnek a mélyreható szén-dioxid-mentesítésben és a jövőbeli hálózati igények kielégítésében, viszont hátrányuk, hogy jelenleg még nem versenyképesek, és a megfelelő szabályozási keretek, valamint a piaci struktúrák hiányában nehéz lesz ezeknek a technológiáknak előre törniük.

Foglalkoztunk a hosszú távú és a szezonális energiatárolás gazdaságtanával, amely szerint a hosszú távú energiatárolási technológiák telepítési költségei széles skálán mozognak, amit

elsősorban az energiatárolási kapacitás költségei (\$/kWh) adnak meg. Az elemzések alapján a hosszú távú energiatárolási technológiák költségei a projektek száma és méretének skálázódása szerinti tanulási görbékkel összhangban csökkenni fognak.

Végezetül, kitértünk az energiatárolási megoldások magyarországi megvalósíthatóságának vizsgálatára, ahol bemutatásra kerültek a hazai K+F támogatási lehetőségek és projektek, valamint a további, várható technológiai irányvonalak.

Források

- [1] IEA, World Energy Outlook 2023, Executive summary, 2023.
- [2] McKinsey & Company, Global Energy Perspective 2023, Executive summary, 2023.
- [3] IEA, „Electricity 2024,” IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>, Licence: CC BY 4.0, 2024.
- [4] IEA, „Electricity Market Report - Update 2023,” IEA, Paris, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-update-2023>.
- [5] S. Brown, D. Jones, N. Fulghum, C. Bruce-Lockhart, A. Candlin, M. Ewen, P. Czyżak, K. Rangelova, L. Heberer, C. Rosslowe, R. Dizon, J. Murdoch, H. Broadbent, P. MacDonald, S. Hawkins és Black, „European Electricity Review 2024,” EMBER, 2024.
- [6] European Commission, „COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS REPowerEU Plan,” 18 05 2022. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483>.
- [7] C. Rosslowe és T. Harrison, „Draft NECPs show EU just falling short of REPowerEU,” EMBER, 30 November 2023. [Online]. Available: <https://ember-climate.org/insights/in-brief/draft-necps-show-eu-just-falling-short-of-repowereu/>.
- [8] SolarPower Europe, „EU Market Outlook for Solar Power 2023-2027,” SolarPower Europe, 2023. [Online]. Available: <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/eu-market-outlook-for-solar-power-2023-2027>.
- [9] European Network of Transmission Operators for Electricity (enstoe), „Vision on Market Design and System Operation towards 2030,” ENTSO-E, 2019.
- [10] J. Twitchell, K. DeSomber és D. Bhatnagar, „Defining long duration energy storage,” *Journal of Energy Storage*, 2023.
- [11] J. Grimm, M. Kenis és M. Schauf, „Current and Future Profitability of Long-Duration Energy Storage Technologies,” Research Square, 2023.
- [12] J. Eichman, J. Zhang, O. J. Guerra és M. Pellow, „Valuation of the benefits and costs of long duration storage,” NREL, 2020.
- [13] E. Justin Raade, „Seasonal Energy Storage: A Technical and Economic Framework,” United States Energy Association, Washington, 2022.
- [14] R. e. a. Shan, „Evaluating emerging long-duration energy storage technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112240> , 2022.
- [15] Grid PIQ, „Energy Storage System Efficiency,” [Online]. Available: <https://gridpiq.pnnl.gov/v2-beta/doc/technologies/es/es-efficiency/>.
- [16] Decarbonization Channel, „All Commercially Available Long Duration Energy Storage Technologies,” 2024. [Online]. Available: <https://decarbonization.visualcapitalist.com/all-commercially-available-long->

- duration-energy-storage-technologies-in-one-chart/.
- [17] A. M. Rabi, J. Radulovic és J. M. Buick, „Comprehensive Review of Liquid Air Energy Storage (LAES) Technologies,” *Energies*, 2023.
 - [18] E. A. f. S. o. Energy, „Liquid Air Energy Storage,” EASE.
 - [19] IRENA, „INNOVATION OUTLOOK THERMAL ENERGY STORAGE,” IRENA, Abu Dhabi, 2020.
 - [20] A. Cothorpe, „Kyoto Group begins tests at 4MW/18MWh power-to-heat energy storage project in Denmark,” *Energy Storage News*, 2023. [Online]. Available: <https://www.energy-storage.news/kyoto-group-begins-tests-at-4mw-18mwh-power-to-heat-energy-storage-project-in-denmark/>.
 - [21] Brenmiller, „bGen™ ZERO Sustainable Thermal Energy Storage,” [Online]. Available: <https://bren-energy.com/>.
 - [22] World Energy Council, „Five Steps to Energy Storage - Innovation Brief 2020,” World Energy Council, London, 2020.
 - [23] Energynest, „Decarbonize industrial heat with thermal storage,” [Online]. Available: <https://energy-nest.com/>.
 - [24] European Association for Storage of Energy, „Hydrogen - Chemical Energy Storage,” EASE.
 - [25] BloombergNEF, „2H 2023 Energy Storage Market Outlook,” 9 October 2023. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/blog/2h-2023-energy-storage-market-outlook/>.
 - [26] H. Kou, „2022 Energy Storage Cost Outlook,” BNEF.
 - [27] McKinsey & Company, „Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular,” McKinsey & Company, 2023. [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular?cid=eml-web#/>.
 - [28] Guidehouse Insights, „White Paper: Vanadium Redox Flow Batteries,” Guidehouse Insights, 2022.
 - [29] EOS, „Powering America's future,” [Online]. Available: <https://www.eose.com/>.
 - [30] Form Energy, „Technology,” [Online]. Available: <https://formenergy.com/technology/>.
 - [31] Energy Dome, „Energy Dome announces funding commitments from Breakthrough Energy Catalyst and the European Investment Bank to support construction of its first standard commercial-scale CO2 Battery,” [Online]. Available: <https://energydome.com/energy-dome-announces-funding-commitments-from-breakthrough-energy-catalyst-and-the-european-investment-bank-to-support-construction-of-its-first-standard-commercial-scale-co2-battery/>.
 - [32] DNV, „Energy Transition Outlook 2023,” 2023.
 - [33] Long Duration Energy Storage Council, Roland Berger, „Driving to Net Zero Industry Through Long Duration Energy Storage,” LDES Council, 2023.
 - [34] LDES Council, McKinsey & Company, „Net-zero power: Long duration energy storage for a renewable grid,” 2021.
 - [35] AZOM, „How does compressed air energy storage work?,” 19 07 2023. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=22859>.
 - [36] IRENA, „Innovation Outlook: Thermal Energy Storage,” International Renewable

- Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.
- [37] A. Colthorpe, „Rising flow battery demand ‘will drive global vanadium production to double by 2031’,” 2022.
 - [38] M. Thurber, „Power-to-gas for long-term energy storage,” 2020. [Online]. Available: <https://energyforgrowth.org/wp-content/uploads/2020/01/Power-to-gas-for-long-term-energy-storage-1-1.pdf>.
 - [39] European Commission, „Commission presents recommendation for 2040 emissions reduction target to set the path to climate neutrality in 2050,” 2024. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_588.
 - [40] IEA, „Industry,” 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/industry>.
 - [41] LDES Council & McKinsey & Company, „Net-zero heat - Long Duration Energy Storage to accelerate energy system decarbonization,” LDES Council, 2022.
 - [42] C. Murray, „Energy Dome, Invinity, Form, Redflow projects among DOE’s US\$325 million LDES winners,” Energy Storage News, 2023.
 - [43] A. Colthorpe, „EU-Breakthrough Energy partnership invests €60 million in long-duration CO2 Battery project in Italy,” Energy Storage News, 2023.
 - [44] C. Murray, „UK unveils LDES support plan: cap-and-floor, 6-hour-plus duration, and lithium-ion excluded,” Energy Storage News, 2024.
 - [45] C. Murray, „Li-ion BESS costs could fall 47% by 2030, NREL says in long-term forecast update,” Energy Storage News, 2023.
 - [46] C. Murray, „Alternative technologies ‘may struggle to compete with lithium-ion’ as duration grows,” Energy Storage News, 2022.
 - [47] M. C. Argyrou, P. Christodoulides és S. A. Kalogirou, „Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018.
 - [48] O. Borm és S. B. Harrison, „Reliable off-grid power supply utilizing green hydrogen,” *Clean Energy*, 2021.
 - [49] A. Franco és C. Giovannini, „Routes for Hydrogen Introduction in the Industrial Hard-to-Abate Sectors for Promoting Energy Transition,” *Energies*, 2023.
 - [50] European Association for Storage of Energy, „Thermal Energy Storage,” EASE, Brussels, 2023.
 - [51] N. A. Sepulveda, J. D. Jenkins, F. J. d. Sisternes és R. K. Kester, „The Role of Firm Low-Carbon Electricity Resources in Deep Decarbonization of Power Generation,” *Joule*, 2018.
 - [52] Y. W. P. N. M. D. Caroline Ganzer, „The role and value of inter-seasonal grid-scale energy storage in net zero electricity systems,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022.
 - [53] European Commission, „COMMUNICATION FROM THE COMMISSION The European Green Deal,” 2019. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>.
 - [54] European Commission, „The Net-Zero Industry Act: Accelerating the transition to climate neutrality,” European Commission, Brussels, 2023.
 - [55] European Commission, „Commission Recommendation of 14 March 2023 on Energy Storage – Underpinning a decarbonised and secure EU energy system 2023/C

- 103/01,” 2023. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023H0320%2801%29&qid=1679302898964>.
- [56] Innovációs és Technológiai Minisztérium, „Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig Tiszta, okos, megfizethető energia,” ITM, 2020.
- [57] US Department of Energy, „Biden-Harris Administration Announces \$325 Million For Long-Duration Energy Storage Projects to Increase Grid Resilience and Protect America’s Communities,” 22 09 2023. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/articles/biden-harris-administration-announces-325-million-long-duration-energy-storage-projects>.
- [58] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, „Long Duration Storage Shot,” 09 2021. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/long-duration-storage-shot>.
- [59] S. Guthrie, „A step in the right direction: Analysis of the UK government consultation on long-duration energy storage,” Energy Storage News, 02 2024. [Online]. Available: <https://www.energy-storage.news/a-step-in-the-right-direction-analysis-of-the-uk-government-consultation-on-long-duration-energy-storage/>.
- [60] H. Bishop, R. Robichaud, L. Bird és N. Hutchinson, „THE ROLE OF LONG-DURATION ENERGY STORAGE IN DEEP DECARBONIZATION: POLICY CONSIDERATIONS,” World Resources Institute, 2020.
- [61] DNV, „Is it finally time for long-duration storage?,” DNV, 2021.
- [62] A. Giovinetto és A. Eller, „Comparing the Costs of Long Duration Energy Storage Technologies,” Navigant Research, 2019.
- [63] Statista, „Lithium-ion battery price worldwide from 2013 to 202,” Statista, 2024. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/883118/global-lithium-ion-battery-pack-costs/>. [Hozzáférés dátuma: 2024].
- [64] Deloitte, „Long-duration energy storage, A decarbonization technology of growing importance,” Deloitte, 2023.
- [65] A. Belderbos, E. Delarue és W. D’haeseleer, „CALCULATING THE LEVELIZED COST OF ELECTRICITY STORAGE?,” KULeuven, Leuven.
- [66] O. Schmidt, S. Melchior, A. Hawkes és I. Staffell, „Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies,” Elsevier Inc., Joule, 2019.
- [67] S. Cail, G. Mantulet és A. Peffen, „Carbon price forecast under the EU ETS,” Enerdata, 2023.
- [68] Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal, „Karbonmentes, többlet villamos energia innovatív technológia által gázenergiává (hidrogén, biometán) történő alakítását célzó fejlesztések megvalósítása 2020-3.1.2-ZFR-KVG,” 2020.
- [69] Magyar Hidrogén és Tüzelőanyag-cella Egyesület, „Átadták Magyarország első, MW léptékű elektrolízis üzemét,” 2023.
- [70] Bükkábrányi Energiapark, „Bükkábrányi Energiapark Sajtóközlemény,” 2021. [Online]. Available: <https://bukkabranyienergiapark.hu/bukkabranyi-energiapark-sajtokozlemenye/>.
- [71] Nemzeti, Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal, „Karbonmentes, többlet villamos energia innovatív elektrokémiai tárolását elősegítő fejlesztések megvalósítása 2021-2.1.1-EK,” 2021. [Online]. Available: <https://nkfih.gov.hu/palyazoknak/aktualis-felhivasok/egyeb-tamogataskarbonmentes-tobbet-villamos-energia-elektrokemiai-tarolasa-2021-211-ek/palyazati-felhivas>.

- [72] MNNSZ, „Megérkezett az első nátrium-kén akkumulátor,” 2024. [Online]. Available: <https://www.mnnsz.hu/megerkezett-az-elso-natrium-ken-akkumulator/>.
- [73] Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal, „Hulladék hő hasznosítását, tárolását illetve piaci alapú felhasználását célzó fejlesztések megvalósítása innovatív hőtároló vagy átalakítási technológia által 2021-2.1.2-HŐ,” 2021. [Online]. Available: <https://nkfih.gov.hu/palyazoknak/aktualis-felhivasok/egyeb-tamogatas/hulladekho-hasznositasat-tarolasat-felhasznalasat-celzo-fejlesztések-2021-212-ho-palyazati-felhivas>.
- [74] Pályázati Portál, „Hálózati energiatárolók telepítése energiapiaci szereplőknél,” 2024. [Online]. Available: <https://www.palyazat.gov.hu/programok/helyreallitasi-es-ellenallokepessegi-terv/rrf/rrf-651-23/alapadatok>.
- [75] „MAGYARORSZÁG NEMZETI HIDROGÉNSTRATÉGIÁJA,” 2021.
- [76] Mérnök vagyok, „Hidrogéntermelő rendszert építenek ki a kardoskúti földalatti gáztárolónál,” 2021. [Online]. Available: <https://mernokvagyok.hu/blog/2021/09/08/hidrogentermelo-rendszert-epitenek-ki-a-kardoskuti-foldalatti-gaztarolonal/>.
- [77] Világgazdaság, „Hidrogén: jók a hazai adottságok,” 2021. [Online]. Available: <https://www.vg.hu/energia-vgplus/2021/08/hidrogen-jok-a-hazai-adottsagok>.
- [78] Magyarország Kormánya, „TAVASZI PRÓBAFÚRÁSOK KÉSZÍTIK ELŐ A DÖNTÉST AZ ELSŐ HAZAI SZIVATTYÚS ENERGIATÁROZÓ MEGÉPÍTÉSÉRŐL,” 2024. [Online]. Available: <https://kormany.hu/hirek/tavaszi-probafurasok-keszitik-elo-a-dontest-az-elso-hazai-szivattyus-energiatarozo-megepiteserol>.