

Fenntartható napelemes-szivattyús vízenergia hasznosítás elterjedésének vizsgálata egy dombvidéki település példáján a Velencei-tó vízgyűjtőjén

Kálmán Attila¹, Bene Katalin²

¹ egyetemi tanársegéd, Víztudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Széchenyi István Egyetem, Közlekedésépítési és Vízmérnöki Tanszék / Vízgazdálkodási Kutatócsoport 9026 Győr, Egyetem tér 1., Magyarország (e-mail: kalmatlan.attila@sze.hu)

² egyetemi docens, Víztudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Széchenyi István Egyetem, Közlekedésépítési és Vízmérnöki Tanszék / Vízgazdálkodási Kutatócsoport 9026 Győr, Egyetem tér 1., Magyarország (e-mail: benekati@sze.hu)

DOI: 10.59258/hk.22211



Kivonat

A Magyarország szomszédjában zajló háború következtében emelkedtek az energiaárak és az ellátási kockázatok, miközben az éghajlatváltozás hatására az extrém aszályos, vízhiányos nyarak konfliktusokat és gazdasági károkat eredményeznek. A hagyományos, fosszilis villamosenergia-termelés hozzájárul az üvegházhatású gázok légköri kibocsátásához, amely tovább súlyosbítja az aszályos időszakokat. A Velencei-tó környéki népesség évtizedek óta dinamikus módon növekszik, amely változó területhasználatot eredményez. A vízgazdálkodási problémák megoldása akuttá vált, a vízgyűjtő szűkös vízkészlete negatívan hat az ökoszisztémákra, a turizmusra, a mezőgazdaságra és a gazdasági kilátásokra. A dombvidéki településeken növekszik a villámárvizek kockázata, miközben alacsony a víz visszatartás mértéke, de a telepített napelemes rendszerek aránya jelentősen meghaladja az országos átlagot. A kutatás a megújuló napenergia termelőkapacitások és a villámárvizek visszatartásának komplex vizsgálatát és integrált hasznosítási lehetőségét mutatja be egy dombvidéki település példáján keresztül. Megvizsgáltuk a napelemes kapacitások és a földrajzi adottságokat kiaknázó multifunkciós záportározók közös, többcélú hasznosítási lehetőségeit. Hidrodinamikai modellel vizsgáltuk a szivattyús energiatároló rendszer áramlási viszonyait, valamint azok multifunkciós használatát: csapadékvíz-gazdálkodás villámárvíz-mérsékléssel, évszakon átívelő zöldenergia tározás, mezőgazdasági, vadgazdálkodási, rekreációs és kék-zöld infrastruktúrák integrálása. A tározók tervezése figyelembe vette a földrajzi jellemzőket, a csapadékat adatokat és lefolyást, az energiaigényeket, a napelemek teljesítményét. Az integrált rendszer optimalizálása többcélú, fenntartható vízhasználatra és alacsony karbonlábnyomra történt. Egy dombvidéki település példáján bemutattuk az alacsony szén-dioxid-kibocsátású, költséghatékony, fenntartható vízgazdálkodás és energiatárolás kombinálási lehetőségével elérhető hasznokat. A módszertan elősegíti a fenntarthatósági célok - környezeti, társadalmi, gazdasági - térnyerését, továbbá a csapadékvíz visszatartással és többcélú felhasználásával csökkenti az éghajlatváltozás okozta negatív hatásokat, valamint elősegíti a helyi és regionális fejlődést. Ez az integrált megközelítés és módszertan mintaként szolgálhat más dombvidéki települések számára, valamint szomszédos önkormányzatok együttműködéséhez is.

Kulcsszavak

Vízgazdálkodás, természetalapú megoldások, vízenergia, fenntarthatóság, megújuló energia, többcélú tározók, érintettek, záportározó.

Examining the spread of sustainable solar-pumped hydropower utilization using the example of a hilly settlement in the Lake Velence watershed (Hungary)

Abstract

The war in Hungary's neighbourhood has increased energy prices and supply risks, while extreme droughts and water shortages due to climate change are causing conflicts and economic damage. Traditional fossil-based electricity generation contributes to greenhouse gas emissions, which further exacerbate droughts. The population around Lake Velence has been growing dynamically for decades, resulting in changing land use. The need to address water management issues has become acute, and the scarce water resources in the catchment area have a negative impact on ecosystems, tourism, agriculture and economic prospects. The risk of flash floods is increasing in hilly settlements, while the level of water retention is low, but the proportion of installed solar systems significantly exceeds the national average.

The research presents a complex examination of renewable solar energy production capacities and the integrated utilisation potential of flash flood retention through the example of a hilly settlement. We examined the joint, multi-purpose utilization opportunities of multifunctional stormwater reservoirs that exploit solar capacities and geographical features. We examined the flow conditions of the pumped energy storage system and their multifunctional use with a hydrodynamic model: rainwater management with flash flood mitigation, cross-seasonal green energy storage, integration of agricultural, wildlife management, recreation and blue-green infrastructures. The design of the reservoirs took into account geographical characteristics, rainfall data and runoff, energy requirements, and solar panel performance. The integrated system was optimized for multi-purpose, sustainable water use and a low carbon footprint.

Using the example of a hilly settlement, we demonstrated the benefits that can be achieved by combining low-carbon, cost-effective, sustainable water management and energy storage. The methodology promotes the advancement of sustainability goals - environmental, social, economic - and reduces the negative impacts of climate change through rainwater retention and multi-purpose use, as well as promotes local and regional development. This integrated approach and methodology can serve as a model for other hilly settlements, as well as for cooperation between neighboring municipalities.

Keywords

Water management, nature-based solutions, hydropower, sustainability, renewable energy, multipurpose reservoirs, stakeholders, stormwater reservoir.

BEVEZETÉS

Európa jelentős villamosenergia fogyasztó, 2022-ben az éves felhasználás 3 315 TWh volt, amely a globális fogyasztás mintegy 13%-a (URL15). Ezzel az egy főre jutó felhasználás majdnem másfélszerese a világszintű átlagnak. Az energiamix utóbbi években megfigyelhető dinamikus átalakulásának hatására a termelés közel 45%-a valamilyen megújuló energiából – szél, víz, nap, biomassza – származik, míg harmada még mindig fosszilis – kőolaj, földgáz, szén – alapú (URL2). A növekvő megújuló arány, valamint a korábban kialakult nagyfokú orosz kőolaj és földgáz függőség kettős kihívás elé állítja a jelenlegi villamosenergia rendszert. Egyfelől az orosz-ukrán háború hatására az európai szénhidrogén ellátás bizonytalanná vált, másfelől a dinamikus bővülő napelemes kapacitások – az ingadozó termelési jellemző okán – növelik a rendszer instabilitását. Mindezekén túl, az éghajlatváltozás hatására a kontinens súlyos kihívásokkal – szélsőséges aszályos nyarak – szembesült az elmúlt 3 évben (Pinke és társai 2024). A szárazság hatással volt a helyi és regionális vízkörfolyamatokra is, a nyári csapadékesemények intenzívebbé váltak és a villámárvizek gyakorisága is növekedett (Maetens és társai 2024). Ez a negatív változás nem csupán a közösségek életében, hanem számos kulcsfontosságú ágazat, mint például a növénytermesztés, az állattartás, az élelmiszerellátás, a vízgazdálkodás, a turizmus, vagy az erdő- és vadgazdálkodás működésében is érezhető volt (Lahlali és társai 2024).

A megújuló energiaforrások a villamosenergia-termelés folyamatosan növekvő arányát jelentik. Az utóbbi években különösen a napelem-kapacitások növekedtek jelentős mértékben, ugyanakkor a hagyományos fosszilis és nukleáris üzemanyag-alapú erőművek továbbra is meghatározó szereplői a rendszernek. Részből azért, mert a jelenlegi zöldenergia-kapacitások elmaradnak a teljes villamosenergia igénytől, részből azért, mert még megoldatlan probléma a megújuló energiatermelés és a fogyasztási igények időben eltérő áthidalása (Ashurov és társai 2019). Bár számos kutatás-fejlesztés zajlik energiatároló rendszerek terén és jelenleg is különféle rövid és hosszú távú tárolási megoldások léteznek a megújuló energia túlermelésére (Dimitriev és társai 2020), ezek nagyságrenddel elmaradnak a jelenlegi napelem-kapacitásoktól, továbbá a beüzemelésre kerülő tározókapacitások bővülési üteme sem követi a napelemek gyors telepítési ütemét (URL14). Az éghajlatváltozás negatív hatásainak enyhítése, az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése, az energiaellátás-biztonság és a versenyképesség javítása érdekében szükséges és előnyös a megújuló energiaforrások térnyerésének fokozása. Mivel a következő években várhatóan folytatódik a szél- és főként a napenergia-kapacitások további dinamikus bővülése, ezért - a termelés időbeni ingadozása és a fogyasztástól eltérő időben jelentkezése miatt - szükséges a rendszert terhelő kihívások hangsúlyosabb kezelése és a tározókapacitások bővítése (URL5).

A klímaváltozás mind a természetes, mind az épített környezetre hatással van, és gyakran negatívan befolyásolja a kialakult gazdasági rendszereket, társadalmi folyamatokat (Abbass és társai 2022). A vízgazdálkodást, a csapadékvízvezetést régóta kiszolgáló szürke infrastruktúrák egyre nehezebben kezelik a mai szélsőséges csúcs-

hozamokat, az évtizedekkel ezelőtt tervezett lefolyási hozamok elmaradnak az utóbbi években tapasztalt villámárvizek árhullám-csúcsaitól. Mindeközben az elmúlt évek extrém hosszan tartó aszályos időszakai hatására számos csatorna és folyómeder az év nagy részében száraz marad, a tápláló vízhozam és a talajvízszint drasztikusan csökkent (Haasnoot és társai 2020). A kiterjedt burkolt felületekkel rendelkező városi területek, valamint a dombvidéki területek egyre inkább ki vannak téve a villámárvizeknek és az ezek okozta kellemetlen előtéseknek (Feng és társai 2021). A települések előtt kialakított záportározók hatékonyan képesek csökkenteni a villámárvizek csúcsait, ezáltal enyhítve a települési vízelvezető rendszerek terhelését. Továbbá a visszatartott csapadékvizet az eseményt követően lassan be is lehet szivárogtatni, vagy másodlagosan lehet hasznosítani.

A jelenlegi energia- és aszálykihívások miatt az árvíz-csúcs-csökkentő tározókban visszatartott víz másodlagos hasznosítása számos környezeti, gazdasági és társadalmi előnnyel járhat (Kálmán és Bene 2023). A visszatartott csapadékvíz növelheti a biológiai sokféleséget és javíthatja a helyi mikroklimát, enyhítheti a városi hőszigetelést és növelheti a vízbiztonságot. Öntözés révén pedig mérsékelheti az aszálykárokat, ezáltal támogatva az élelmiszer-biztonságot. Az összegyűjtött és tározott csapadékvíz energiarendszerekbe történő integrálása lehetővé teszi a megújuló forrásból történő hosszú távú energiatárolást (URL12). Dombvidéki területeken a csapadékvíz-tározókban, tavakban való visszatartása közvetlen előnyökkel jár, és energiaforrásként szolgálhat. A tározók többcélú hasznosításával a víz másodlagos célokra is felhasználhatóvá válik, hasznossága kibővül (Papadakis és társai 2023).

A napelem-kapacitások gyors térnyerésével és a termelés nap sugárzásfüggő, szakaszos jellege miatt a kereslet-kínálat kiegyensúlyozása érdekében nagy kapacitású energiatároló rendszerekre van szükség (Chanda 2023). A meglévő, nagyteljesítményű megoldások közül a vízenergia-tárolás kiemelkedik, mind rövid, mind hosszú távú tárolás esetén. A módszer lényege, hogy a magasabb helyen tárolt vízben potenciális energiaként áll rendelkezésre az energia, amely az alacsonyabb szintre áramlással kinetikus energiává alakul és így villamos energiát termel. A rendszer három jelentős előnye: 1. gyors reakció ideje, mivel néhány perc alatt képes csúcstermelést leadni, 2. közel zéró szén-dioxid-kibocsátás mellett működik, 3. a termelt villamos energia egységköltsége szempontjából költséghatékony (Ansorena és társai 2022). A vízenergia kritikus szereplő a globális energiapiacra, hiszen míg a teljes energiatermelés körülbelül 3%-át adja, addig a villamosenergia-tárolási kapacitás több mint 96%-át biztosítja (Jurasz és társai 2022). A magas beruházási költségek gyorsabb megtérülése érdekében fontos olyan helyszíneket és másodlagos felhasználási módokat választani, amelyek csökkentik a megtérülési időt (Gutiérrez-Bahamondes és társai 2021).

A vízenergiái infrastruktúrák egyik speciális típusa a szivattyús-tározós vízerőmű, amely két, különböző magasságban lévő tározó közötti vízmozgatást foglal magában energiatárolás vagy villamos energia termelése céljából (Souček és társai 2023). A hagyományos vízerőművekkel összehasonlítva, a szivattyús tározó rendszerek elsősorban

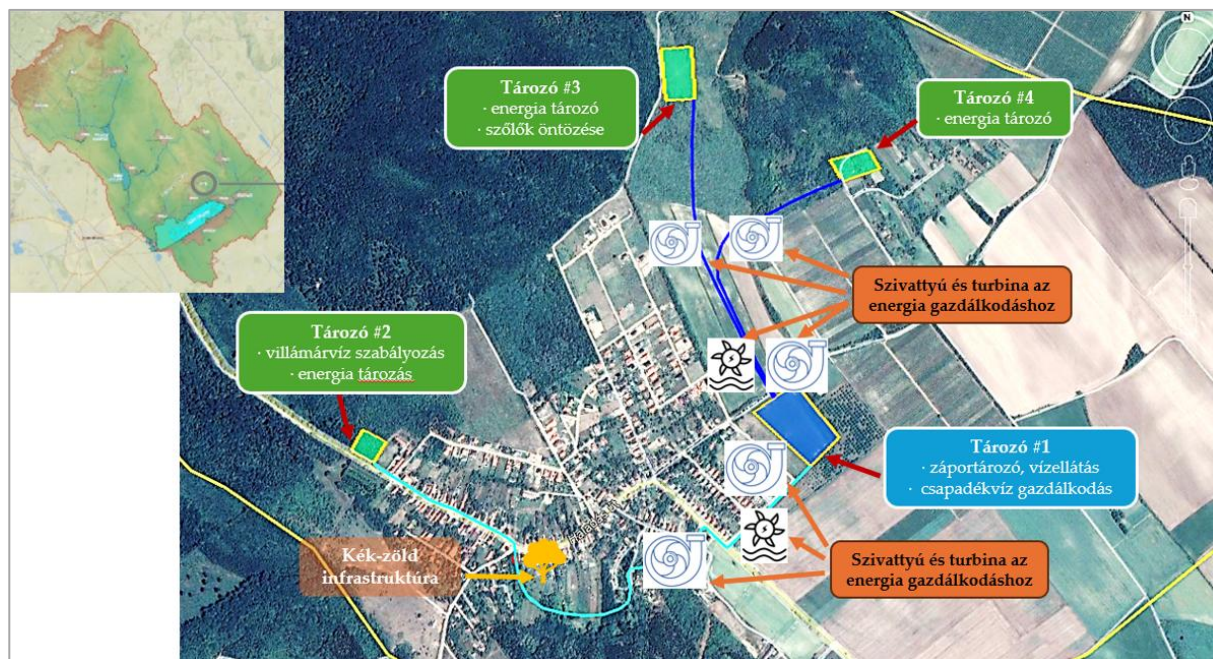
a szivattyúzási módjukban, méretükben, részleges terhelés alatti működési kapacitásukban és topológiai jellemzőikben különböznek, ezért alkalmasak az időben változékony megújuló energiaforrásokkal való együttműködésre (*Morabito és társai 2019*). Napsütésben energiát tárolnak, napsütésmentes időben pedig villamos energiát szolgáltatnak. A szivattyús víztározók sokféle területen létesíthetők, hiszen a víz, a két tározó között, kvázi zárt rendszerben áramlik. A kialakítás korláta így valójában a megfelelő domborzati viszonyok – az alsó és felső tározók közötti megfelelő szintkülönbség – megléte. A napelem-kapacitások gyors bővülésével – napos időben, a déli órákban – egyre gyakoribbá válnak a negatív villamosenergia-árak a spot villamosenergia-piacon, a pillanatnyi villamos energia keresletet meghaladó – túlermelést okozó - megújuló energiatermelés miatt. A termelés nagyfokú ingadozásával együtt jár az instabilitás kockázatának növekedése, a növekvő számú kiserőmű frekvencia aszinkronja következtében (*Mlilo és társai 2021*). Ennek kezelése az átviteli rendszer stabilitása miatt kiemelt jelentőségű, amelyre a szivattyús energiatározók – a villamos energia rugalmasabb irányíthatósága miatt – jótékony hatással vannak, miközben a negatív villamosenergia-árak ezen rendszerek megtérülési idejére pozitívan hat (*Bocca 2024*). A nagy teljesítményű szivattyús vízerőművek jellemzően 10 MW-ot meghaladó kapacitásúak, azonban egyre nagyobb az érdeklődés – a jelenleg kevésbé elterjedt – háztartási vagy közösségi használatra tervezett kisebb – 10-1 000 kW teljesítményű – rendszerekre (*Kishore és társai 2021*). A következő évtized ezen kisméretű szivattyús vízenergia-tároló rendszerek jelentős bővülését hozhatja, amelyek további járulékos előnyt hoznak a helyi környezet, helyi közösség számára (*Flaminio és Reynard 2023*). A többcélú víztározók elsődlegesen energiatárolásra, míg másodlagosan számtalan szolgáltatásra használhatók, mint például árvíz- és aszályvédelem, öntözés, villamosenergia-termelés, ökoszisztéma-támogatás, rekreáció, vadászat, halászat (*Woś és társai 2022*). A megfelelő módszertannal és az érintettek bevonásával ezek a célok - energiagazdálkodás, vízkészlet-gazdálkodás, ökoszisztéma-szolgáltatások és gazdasági növekedés - hatékonyan és fenntarthatóan egymást kiegészítik; a korlátozott erőforrások esetében csökken a verseny mértéke (*Gonzalez és társai 2020*).

Míg az éghajlatváltozás kiváltó okainak kezelése továbbra is létfontosságú, a változó körülményekhez való alkalmazkodás fenntartható, az éghajlatváltozáshoz rugalmas megoldásokkal ugyanolyan fontossá válik, amelyhez a kisléptékű szivattyús vízerőművek jelentősen hozzájárulhatnak (*Sharifi 2021*). Jelen kutatás egy gyakorlati módszertant kíván kidolgozni a villámárvizek kezelésére és hasznosítására, a Velencei-tó vízgyűjtő területén található, magas napelemes penetrációval rendelkező dombvidéki település példáján keresztül. A javasolt fejlesztés a villámárvizek kockázatát csökkentő csapadékvíz-gazdálkodásba integrálja az energiatárolást, az öntözést, a rekreációt és a kék-zöld infrastruktúrákat, csillagszerűen elhelyezett

többfunkciós tározós hálózat használatával. A tározók méretei és vízvisszatartó képessége a historikus csapadékadatokból számított lefolyás és a meglévő napelemek által termelt többletenergia alapján került meghatározásra, egy többlépcsős optimalizálási folyamat során. A tározók prioritását – elsődleges, másodlagos funkciók –, valamint a lekapcsolási sorrendeket a helyi sajátosságok és igények határozzák meg. Az optimalizálás célja az egész éves, település szintű energiafüggetlenség, a szigetüzemű működés elérése, amelyben minimalizálására kerültek a rendszer hidrodinamikai veszteségei. A működési hatékonyság mellett a környezeti és pénzügyi értékelés is megtörtént, a jelenleg, hagyományos villamosenergia-ellátás és a módosított energiamix egy közvetlen energia-audittal (DEA), valamint a kibocsátott CO₂ semlegesítés költségével került összehasonlításra. A változatok gazdasági elemzéséhez a teljes életciklus-költségelemzés (LCCA) került alkalmazásra, amely kombináltan értékeli a fenntartható fejlődés mindhárom pillérét: a környezeti, a társadalmi, és a gazdasági lábakat.

TERÜLET BEMUTATÁSA

A Közép-Dunántúlon, Székesfehérvár és Budapest vonzáskörzetében található a népszerű, szikes, viszonylag sekély átlagos vízmélységű, 24,2 km² területű Velencei-tó (*URL16*). Bár a tó vízgyűjtőjének területe viszonylag kicsi, mindössze 602,3 km², mégis változatos és gazdag vízi ökoszisztémával rendelkezik (*URL17*). Dombvidéki és síkvidéki területek egyaránt megtalálhatók, az északi részén fekvő Vértes-hegység karsztlejtőitől és a Zámolyi-medencétől kezdve a Mezőföld déli síkságain keresztül a Velencei-medencéig. A vízgyűjtő északi részein a karsztközet és a porózus talaj hatására a beszivárgás jelentős, ezáltal csökkentve a felszíni lefolyást, miközben az ökológiailag egyedülálló és gazdaságilag fontos Velencei-tó párolgási vesztesége jelentős (*URL7*). Az éghajlatváltozás hatására a nyári aszályos időszakok várhatóan súlyosbodni fognak az elkövetkező évtizedekben, ami fokozott párolgáshoz és ezáltal a tó vízszintjének, valamint erőforrásainak további kimerüléséhez vezetnek, amelynek hatásait a környező tóparti közösségek is megérzik (*URL8*). A Velencei-tótól kb. 2 km-re északkeleti irányban található a dombvidéki Nadap (*1. ábra*), ahol az Országos Szintezési Fő Alappon is található. A település központja a Velencei-tó vízszintje felett található mintegy 95 méterrel, kb. 195 méter tengerszint feletti magasságban. Kis lélekszáma és területe ellenére, Nadap legalacsonyabb és legmagasabb pontja között több mint 80 méteres – 149 - 232 m tszm – a szintkülönbség. Továbbá a közvetlen környező területeken a szintkülönbség megközelíti a 200 métert. Nadap nagy részére a lejtős terep jellemző, 5%-os vagy annál nagyobb meredekséggel, de sok helyen a 10%-nál, illetve néhol a 15%-ot is meghaladó lejtés is megfigyelhető. A dombvidéki jelleg mellett számos kisebb sík, illetve sík közeli terület is megtalálható, amelyek alkalmasak, illetve könnyen alkalmassá tehetők vízvisszatartási intézkedésekre és fenntartható víztározók létesítésére, ahogy azt az *1. ábra* mutatja.



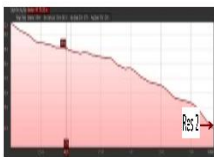
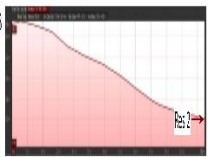
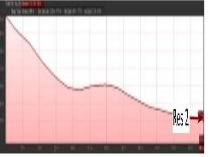
1. ábra. Nadap elhelyezkedése a Velencei-tó vízgyűjtőjén; a többcéli tározók bemutatása
Figure 1. Location of Nadap in the watershed of Lake Velence; presentation of the multipurpose reservoirs

A megjelölt tározók egymással csillagszerűen összekapcsolhatók, hogy egy integrált víz-, energia- és ökológiai hálózattá váljanak, amely képes kielégíteni a különböző vízhasználói igényeket. A négy tározó mellett kisebb tavak is találhatóak a rendszerben, amelyek célja elsősorban ökológiai, rekreációs, és a biodiverzitás növelése, kék-zöld folyosók létesítésével. Ezek vízmennyisége több nagyságrenddel kisebb – $10\text{--}100\text{ m}^3$ – a fő tározókéval. Az 1. ábrán 1. számmal jelölt tározó fekszik a legalacsonyabban, ez az úgynevezett alsó tározó, míg a 2., 3. és 4. tározók magasabban helyezkednek el, ezek a felső, szivattyús vízenergia tározók. A felső tározók együttes vízviasszatartó képessége megegyezik az alsó tározóéval, amely lehetővé teszi a rendszer zárt hurokban történő működtetését (*Stocks és társai 2021*). A tározók főbb jellemzőit és tervezett funkcióit az 1. táblázat foglalja össze. Az elsődleges záportározó funkciónak köszönhetően, a viasszatartott lefolyó csapadékvízből történő vízutánpótlás segít kompenzálni a tározók párolgási veszteségeit, miközben azok kiszolgálják az öntözési és egyéb vízzel kapcsolatos igényeket. A 2. számú felső tározó védeni képes a települést a hirtelen dombvidéki árhullámoktól zivatarok idején, míg az 1. számú alsó tározó összegyűjti a települési csapadékvíz-hálózaton keresztül gravitációsan lefolyó vizeket a későbbi hasznosítás érdekében. Ezen funkciók alapvető fontosságúak a tervezés során, ahogy az energiatárolás és hasznosítás is. A tározók közötti kétirányú kapcsolat létrehozása lehetővé teszi mind a szivattyúzási, mind a turbina üzemmódot. A tározók elhelyezése és azok másodlagos funkciói az érdekelt felek igényei alapján kerültek meghatározásra. A 2. számú víztározó egy tájvédelmi terület és egyben egy újonnan létrehozott vadász- és vadaspark szélén található, ahol a víztározó itatóként enyhítheti a nyári aszályok vadvilágra gyakorolt negatív hatásait (*Owusu és társai 2022*). Ez a terület egyedülálló oktatási és szabadidős látványosságként is szolgálhat, lehetővé téve a látogatók számára, hogy egy kilátópontról, akár éjszaka is megfigyeljék a vad-

világot. Ezzel szemben a 3. és 4. számú víztározók környezete növénytermesztésre és szőlészeti tevékenységre használt, amelyek alapján a tározók alapvetően öntözési és borászati funkciókat látnak el. Az alsó kifolyási szintek magasabban helyezkednek el, mint a környező öntözendő terület, amely lehetővé teszi a fenntartható vízkiszolgálást, a víz gravitációs úton áramlását az érintett területekre.

Nadap 2022-re a legnagyobb, ingatlanarányos napelem penetrációval rendelkező település lett Magyarországon, az ingatlanok 21%-a rendelkezik napelemmel, mint megújuló energiaforrás (*URL9*). A jövőben a telepített napelemek száma várhatóan tovább emelkedik, ezzel növelve a megújuló energiatermelési kapacitásokat. Az éves napenergia-termelés jelenleg megfelel a település éves villamosenergia-igényének, a fűtési energiát nem számítva (*Kálmán és Bene 2025*). A napenergia-termelés azonban napon belül és az évszakok között erősen ingadozik. A termeléshez szükséges napsugárzás és a fogyasztási szokások nincsenek összhangban, ezen időbeli eltérést energiatároló rendszerrel lehet kiegyensúlyozni. Az egy főre jutó magas napelemszám és a dombvidéki, jelentős szintkülönbségek miatt a szivattyús vízenergia-tároló rendszer egy lehetséges fenntartható alternatíva, akár a szigetüzemű működéshez is. Mindezeket túl, a vármegye Magyarország egyik legszelesebb területe, ahol az átlagos szélesség 2002 és 2022 között meghaladta a $3,5\text{ m/s}$ -ot. Ebben az időszakban a 2 m/s -nál nagyobb szélességű szeles napok átlagos száma évente 202 nap volt, míg a 3 m/s -nál nagyobb szélességű napok száma elérte a 107 napot (*URL10*). A kis, háztartási méretű szél-turbinák jellemzően $2,0\text{ m/s}$ bekapcsolási szélességet igényelnek (*Kishore és társai 2014*), míg a nagyobb turbinák bekapcsolási szélessége $3,0\text{ m/s}$ (*Ajayi és társai 2019*). A vízenergia mellett a szélenergia kiegészítő lehetőséget jelent a fenntartható, karbonsemleges energiamix fejlesztéséhez, de annak vizsgálata nem tárgya jelen kutatásnak.

1. táblázat. Tározók elhelyezkedése és tervezett funkcióik
Table 1. Location of reservoirs and their intended functions

	Tározó 1.	Tározó 2.	Tározó 3.	Tározó 4.
Elhelyezkedés és fenékszint	Pázmándi út (145 mBf)	Lovasberényi út (203 mBf)	borászati fennsík (190 mBf)	Csúcsos-hegy (198 mBf)
Tározó vízfelszíne	2,8 ha (28 000 m ²)	0,5 ha (5 000 m ²)	1,5 ha (15 000 m ²)	0,75 ha (7 500 m ²)
Tározó hasznos vízmélysége	5 m	5 m	5 m	6 m
Tározó max. víztérfogata	140 000 m ³	25 000 m ³	75 000 m ³	45 000 m ³
A tározó elsődleges funkciója	1. Árvízcsúcs csökkentés és csapadékvíz tározás 2. Alsó tározó és vízpótló létesítmény	1. Villámárvíz szabályzás, csúcs hozam csökkentés és víztározás; 2. Energia- tározás	1. Energia-tározás (felső tározó) 2. Szőlőterület öntözése	1. Energia-tározás (kiegészítő felső tározó)
A tározó másodlagos funkciója	3. Rekreáció és turizmus; 4. Mikroklíma javítás és hősziget hatás csökkentés	3. Vadállomány itatása, vadgazdálkodás; 4. Erdészeti tevékenység támogatása; 5. Rekreáció, vadmegfigyelési pont	3. Borászat technológiai vízellátása (kék-zöld infrastruktúrákon újrahasznosítva) 4. Rekreáció és turizmus; 5. Mikroklíma javítás	2. Szőlő és gyümölcsös öntözés; 3. Vadállomány, vadgazdálkodás és itatás; 4. Kiskerti növénytermesztés támogatása
Magassági elrendezés 1. tározóhoz képest				

MÓDSZERTAN

Jelen kutatásban egy módszertant készítettünk dombvidéki települések számára kisméretű szivattyús vízerőművek megvalósításához. A szivattyúzáshoz szükséges energiát a helyi napelemek, míg a szükséges vizet a csapadékvíz visszatartása és a vízgazdálkodás biztosítja. A megfelelő földrajzi adottságokkal rendelkező települések előzetesen megtervezhetik az energiatározós rendszert, a járulékos másodlagos előnyök, a társadalmi szükségletek és a környezetvédelem gazdasági potenciáljának figyelembevételével, csökkentve a klímaváltozás várható negatív hatásait. A szivattyús vízenergia-rendszer főbb összetevői: alsó és felső víztározók, szivattyú- és turbinarendszerek, csőhálózatok, energiaellátás és rendszervezelés.

A hidrológiai számítások az öntözéshez, az itatáshoz és a tározók elhelyezéséhez kapcsolódó folyamatok bemutatásához szükséges. A lineáris energetikai modellek a napenergia termelést és az áramfogyasztást kapcsolják össze. A nemlineáris hidrodinamikai modell a csőáramlás és a szivattyú működés veszteségeit veszik számításba. Az optimalizáláshoz kombinált - lineáris és nemlineáris - módszertant dolgoztunk ki. A többcélú optimalizálás segít egyensúlyt teremteni a hasznok és ráfordítások között a különböző víz- és energia-felhasználók esetében. Nyomottvízes rendszerekben a sűrűlódás és a szivattyú működése teszi ki a legnagyobb üzemeltetési költségeket, ezért az optimalizáláshoz alkalmazott MATLAB megoldó célja a nyomásvesztés és az energiafogyasztás minimalizálása (Makaremi és társai 2017). A jó szivattyúüzemelés minimális napi kapcsolást használ, ami csökkenti az üzemeltetési költségeket és a befektetés megtérülését. A szivattyús vízenergia tározó rendszer előzetes tervezését, a többcélú hasznosítást és optimalizálást a 2. ábra mutatja

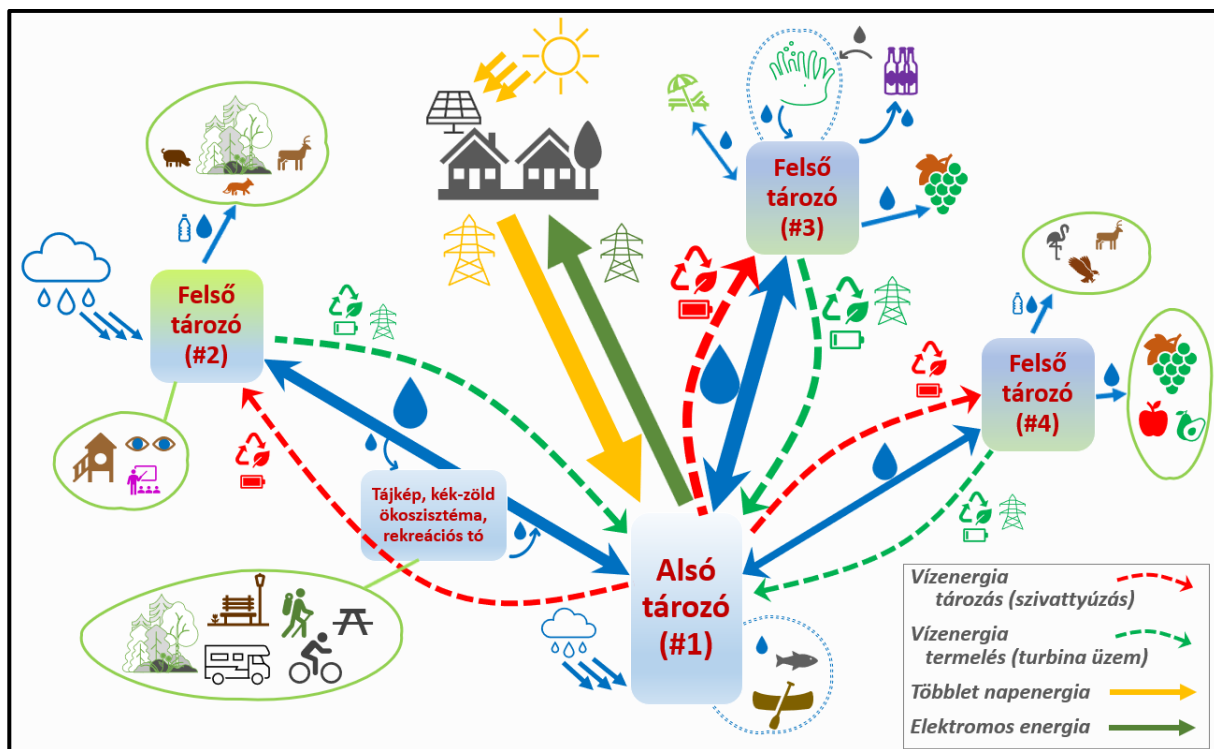
be. A modell ugyanakkor nem terjed ki az üzemeltetési feladatokhoz kapcsolódó szabályozási funkciókra.

A rendszert három fő energiaáram hajtja: a vízenergia-potenciál változása, a besugárzott napenergia változása és a fogyasztók energiaigénye. Ezek egymástól függenek; a több napenergia és energiatermelés növeli a vízben tárolt potenciális energiát. A napenergia többeltrésze (a fogyasztói igényen felül) energiát szállít a szivattyúkhoz (narancssárga nyíl). Ezzel az energiával a szivattyúk a vizet az alsó tározóból (1) a felső tározókba (2,3,4) emelik, ahol napokig, hetekig vagy akár évszakon átívelően is tárolni képesek. Az ábrán a piros nyilak az energia tárolást, míg a kék nyilak a víz fizikai mozgását jelzik. Amikor a fogyasztási igény meghaladja a napenergia-termelést, a felső tározókból kivett víz meghajtja a turbinákat – helyzeti energia kinetikussá alakul (zöld nyilak) –, majd elektromos energiává (sötétzöld nyíl).

A zöld energiatárolás mellett a rendszer csapadékvíz-gazdálkodást is biztosít. A településhatáron történő árhlámcsúcs-csökkentés a belterületi villámárvizek kockázatát is jelentősen csökkenti. Ezért a vízenergia hasznosításának első és legfontosabb lépése a csapadékesemények vizsgálata, a csúcs hozam mérséklése. A település külterületén található magasabb területeken a csapadékvíz visszatartása kettős célt szolgál: villámárvízi kockázat mérséklése és vízenergia tárolása. A kettős funkció csökkentheti a tározó megtérülési idejét, miközben számos előnnyel jár. Jelen kutatásban a 2. számú tározó hatékonyan valósítja meg ezt a kettős funkciót, míg a 1. számú tározó a településen belül gyűjti össze a csapadékvizet, a párolgási veszteségek kompenzálása és az öntözési igények biztosítása érdekében (kék esőcseppek a 2. ábrán). Az ábra a vízkészletek másodlagos hasznosítását is bemutatja, továbbá az

ikonok méretei – kék esőcseppek, kék felhők, piros-zöld akkumulátorok, nagyfeszültségű hálózatok –, valamint a nyílak vastagságai utalnak az energia- és vízmennyiségi

nagyságrendekre. Például az évente az 1. és 4. tározó között mozgatott víz mennyisége elmarad mind az 1. és 2., mind az 1. és 3. tározó között mozgatott víz mennyiségétől.



2. ábra. A többcélú víztározók módszertani bemutatása
Figure 2. Methodological presentation of multipurpose reservoirs

Csapadékvíz gazdálkodás

A szivattyús tározórendszer működését javítja a természetes hozzáfolyás, a lefolyások betározása, így az árhullám csúcsok mérséklése. Az így készletezett víz bővíti a lehetséges másodlagos funkciókat, miközben csökkenti a rendszer megtérülési idejét. A jelen kutatásban végzett becsléseket javasolt felülvizsgálni a megvalósítási tanulmány során, mivel az alulbecsülte a lefolyást, így az energiatárolási potenciált is. A tározók közül az 1. és 2. számú kifejezetten a lefolyó vizek összegyűlekezését szolgálják, így szerepük a villámárvízi kockázatok mérséklésében és csapadékvíz-gazdálkodásban jelentős. A település dombvidéki jellege és kis területe miatt négy csoportba soroltuk a részvízgyűjtőket: 1. közutak, főutak és járdák; 2. külterületi erdőterületek; 3. külterületi szántó és művelt földterület; és 4. lakókerti övezetek. A számításhoz használt méretek és lejtési adatok a QGIS-3.28.2-Firenze (URL18), a Google Earth-9.177.0 (URL19) segítségével kerültek meghatározásra. A lefolyások és a vízhozamok meghatározására a racionális módszert alkalmaztuk, amelyben az utak és járdák C lefolyási együtthatóját egységesen 0,9-re, az erdős területekét, valamint a szántó és művelt területekét 0,2-re állítottuk, ahogy a belterületi családi házas területekét is. A csapadékesemények az OMSZ adatbázisában érhetők el (URL4). A 2002.01.01. és 2022.12.31. között napi eseményekből számítottunk átlagos havi és éves csapadékmennyiségeket, és ez alapján határoztuk meg a nyári aszályos időszakokban az öntözési igényeket. A terület- és csapadékadatokból számított lefolyás meg-

határozása Excel-ben történt. A tározók kellő térfogattal rendelkeznek még extrém zivatar esetén is a lefolyó vízmennyiség befogadására.

A vízigények kielégítése szempontjából a víztározók két fő funkcióbba sorolhatók: energia (tárolás és termelés) és kiegészítő szolgáltatások. A szolgáltatások közé tartozik: a gazdasági előnyök növelése (a mezőgazdasági területek öntözésével a hozamok növelése), az aszály vadvilágra gyakorolt hatásainak enyhítése (a vadon élő állatok itatása), a társadalmi jólét növelése, valamint a biológiai sokszínűség (kék-zöld folyosók és kapcsolódó tavak táplálása).

A kiválasztott mezőgazdasági területen szőlőültetvény található, amelynek öntözése szükséges a vegetációs időszakban. A szőlőtőkék tervezett öntözése május 1-től szeptember 30-ig tart. A nyári csúcsideszakokban a levelek párolgása jelentősen megnő, havonta akár 20-25 cm víz is elpárologhat, ezért az öntözési ütemterv a következők szerint alakul: májusban, júniusban és szeptemberben minden második nap (havi 15 nap), júliusban és augusztusban pedig naponta (havi 30-31 nap), kivéve az esős napokat. A forró évszakban a vízigény a termőhajtások esetében kb. 0,017-0,023 m³ négyzetméterenként hetente, amit a számításban 0,003 m³-nek vettünk öntözési ciklusonként, míg a nem termő hajtások esetében 0,0015 m³-nek. A 3. ábra mutatja be és foglalja össze az öntözött területek méretét, főbb jellemzőit és a település külterületén való elhelyezkedésüket (pirossal lehatárolt területek).



3. ábra. A tervezett öntözendő területek és a vaditató elhelyezkedése
Figure 3. Location of the planned irrigated areas and the water trough

A település északi részén egy új vadrezervátum és vadászterület került kialakításra az erdőn belül. A terület kerítéssel körülhatárolt a vadon élő állatok védelme és az emberek biztonsága érdekében, megakadályozva az állatok vándorlását. A nyári aszályos időszakban sok állat jellemzően a közeli Velencei-tóhoz látogatott inni, de a bekerített területen tartózkodók nem férhetnek hozzá ehhez a vízforráshoz, ami rontja a populáció egészségét és szaporodási képességét. Az állatok számára szükséges a jobb vízhozáférés. Az egyik hatékony megoldás egy itatórészt, egy oldalsó zóna kialakítása a 2. számú tározónál a vadon élő állatok itatására (Mioduszewski 2012). A szarvasok átlagosan napi 3-5 liter vizet, a vaddisznók 15-20 litert, a kisebb vadak pedig 0,5-1 litert igényelnek. A 2018-as adatok szerint a vadászterületen kb. 3400 szarvas, 800 vaddisznó és 250 kisebb vad él (URL13). A vadrezervátum ezen populációk körülbelül egytizedét tartja fenn, ami meghatározza a fajlagos itatási célú vízigényt.

A kék-zöld folyosó fenntartásához, a kisebb tavak és vízfolyások vízellátásához szükséges vízmennyiség kb. 1,5-2 l/s, azaz kb. 6-7 m³/h, így a teljes napi igény 150 m³. A víz nagy része a felső 2. számú tározóból származik, és az alsó 1. számú tározóba folyik, így a vízvesztesség - főként a felszíni vízkészlet beszívargás okozta csökkenése miatt - becslések szerint 20-25%, azaz napi 30 m³.

Energia tározás

A szivattyús vízenergia tározós rendszer szén-dioxidmentes működése érdekében, a használt energiának megújuló forrásból kell származnia. Bár a szélerőenergia hatékony megoldás lenne a radiális szivattyúk üzemeltetéséhez a közvetlen forgómozgás miatt, a szélerőművek jelenleg korlátozottan elérhetők, ezért a napenergia az elsődleges energiaforrás. Nadapon magas a napelemes rendszerek elterjedtsége, ami megfelelő alapot biztosít egy szivattyús-tározós rendszer fenntartható energiaellátásához. Az éves napenergia termelés a Google Earth és e-kozmű rendszerek napelem kataszterek alapján került meghatározásra,

feltételezve, hogy a jelenleg használatban lévő napelemek átlagos területe kb. 1,5 m², névleges teljesítményük pedig 400 W (Kálmán és Bene 2024). A lehatárolt felületekből arányosítva, egész számra kerekítéssel kiszámítható a napelem panelek száma és az egységteljesítménnyel felszorozva a tényleges napelem-termelési potenciál meghatározható. Egy mért napelemes rendszer napi időszámát alapul véve, az inverter hatásfokával és a rendszer tájolási tényezőjével korrigálva a teljes település szintű napelem termelési időszám meghatározható. A villamosenergia felhasználást a lakosok és a lakóépületek száma alapján lehet megbecsülni. Az átlagos energiafogyasztás a háztartásonkénti létszámtól függően változik, statisztikai adatok alapján az egy fős háztartás havonta kb. 120 kWh-t, a két fős háztartás 180 kWh-t, míg a négy fős háztartás 200 kWh-t fogyaszt. A négyfős családi ház jellemzően havi 230 kWh villamos energiát használ, a fűtési energián felül (Kálmán és társai 2024). Amennyiben egy ingatlan elektromos fűtésre támaszkodik, a fogyasztása ennek megfelelően növekszik. A közműtérkép (URL1) adataiból kiszűrhetők a gázhálózatra nem csatlakoztatott ingatlanok, amelyekről feltételezhető, hogy villamos energiát használnak fűtésre, amely így növeli a valós villamos-energia felhasználást.

A tározók létrehozásának elsődleges célja a település villamosenergia ellátás-biztonságának és stabilitásának javítása és a villamos energia igényének megújuló, zöld energiával történő kielégítése, így a rendszernek a napsütéses időben termelt többlet napenergiát szükséges tárolnia. A szivattyús vízenergia tározók alkalmasak mind a túltermelés tárolására, mind a betárolt energia később történő felhasználására. A legnagyobb veszteséget a hidrodinamikai csőszűrlődások és a szivattyúk veszteségei jelentik, amelyek nemlineáris egyenletek. A veszteségek olyan főbb tényezőktől függenek, mint a csőátmérők és csőjellemzők, valamint az áramlási sebességek. Az optimalizálás egy iteratív megoldóval történt Matlab-ban, általunk elkészített programmal. Egyszerűsítésként a nyomott

csöveket egyenesnek, a belépési-kilépési keresztmetszeteikenél veszteségmentesnek vettük fel. Az optimalizálásnál az áramlási sebességet 1-10 m/s közötti tartományra állítottuk; megcélózva a szivattyús vízerőművek esetében alkalmazott 1-5 m/s csőáramlási sebesség értékeket (Thapa és társai 2016). A rendszer 1D a cső középvonalára mentén, a csőfal merev és a vízsűrűség állandónak tekintett (Gureczky és társai 2022). A szállítómagasság a tározók közötti mBf szintkülönbségből adódik, ahol az egyszerűsítés érdekében állandó értékkel számoltunk és valamennyi tározó esetében a középszinthez tartozó vízfelszín magasságot használtuk, szemben a folyamatosan változó magasságkülönbséggel. A középszint alkalmazásával a változó szintkülönbséghez képest kialakuló teljesítmény alul- és felülbecslés kiegyenlítődik – telített, illetve alacsony vízszintű tározói esetek – és így az ebből adódó hiba az eredményre minimális hatással van. A víztetés hatásának minimalizálása érdekében egy lassan nyitó/záró mechanizmussal ellátott térfogatáram-szabályzó elem beépítése szükséges, mint amilyen például a motoros tolózárr vagy a forgószáras szelep az áramlási sebesség hirtelen változásainak megakadályozására a nyomócsőben (Adamkowski és társai 2008). A lassú nyitás ellenére a maximális kimeneti teljesítmény gyorsan elérhető marad. Az indítási és leállási veszteségek csökkentése érdekében, hogy a csőhálózat folyamatosan telítve legyen, a rendszerbe visszacsapó szelepek beépítése is javasolt. Ugyan a nagyobb csőátmérők növelik a turbinák energiatermelését (Putra és társai 2022), a csőhálózatban tartózkodó víztérfogat növekedés miatt a szivattyúzási hatékonyságra negatívan hatnak, míg a kisebb csőátmérők növelik a nyomásvesztést, így a csőátmérő optimalizálása kiemelten fontos.

A víztározók maximális energiátároló kapacitása a 1. egyenlettel számítható, míg az éves energiamérleg a 2. egyenlettel. A víz felső tározókba történő szivattyúzása energiátárolást jelent, ami veszteséges, energiaigényes folyamat. Napsütéses időben a termelt napenergia egy része helyben felhasználásra kerül, a többit a szivattyúk segítségével a felső tározókba. A tározók maximális vízenenergia tárolókapacitása (kWh-ban), a betárolható maximális zöldenergia mennyisége: (1) egyenlet és az éves energiamérleg meghatározása, amely a fogyasztók által közvetlenül fel nem használt napenergia azon része, amely szivattyúzásra – és így vízenenergia, mint zöldenergia betárolásra – fordítható, napi bontásban: (2) egyenlet:

$$C_{\text{tár}} = \sum_{i=2}^4 \frac{\rho \cdot g \cdot H_i \cdot V_i}{3600 \cdot 10^3} \quad (1)$$

$$PL_{\text{sziv}} = \sum [(P_{\text{napelem}} - C_{\text{napelem}}) + |C_{\text{napelem}}| \cdot (1 - f_{\text{évszak}})] \cdot \eta \quad (2)$$

ahol $C_{\text{tár}}$ [kWh] a felső tározók tárolókapacitása; ρ [kg/m³] a víz sűrűsége, amely 1 000 kg/m³; g [m/s²] a gravitációs gyorsulás, amely 9,81 m/s²; H_i [m] az alsó és az i -edik felső tározó közötti magasságkülönbség ($i=\{2;3;4\}$), azaz a tényleges vízmagasság; V_i [m³] a hasznos vízmennyiség, amely az i -edik tározóból a nyomócső és a turbinán keresztül áramolhat; PL_{sziv} [kWh] a szivattyúk energiavesztésének összege; P_{napelem} [kWh] a napi napenergia-termelés; C_{napelem} [kWh] a helyi közvetlen napenergia-fogyasztás, naponta; $f_{\text{évszak}}$ [-] egy energiafelhasználási tényező, amely a tározókból származó vízenenergia-felhasználás arányát

jelöli (az érték $f=\{\text{nyár}=0,7; \text{ősz/tavaszi}=0,5; \text{tél}=0,3\}$); η [-] a szivattyú hatásfoka.

Gazdasági értékelés

A szivattyús vízenenergia bekapcsolásával a település energiamixe megváltozik, az energiaigénye nagyobb részben zöld energiaforrásból kerülne kielégítésre, ezáltal a szén-dioxid kibocsátás változik. Az energiamix változása közvetlen energiaauditál (DEA) került értékelésre, amelyhez a számított eredmények és a szakirodalmi adatok adtak segítséget. Jelenleg az energiaigény kisebb részben a helyi napenergia-termelésből, nagyobb részben pedig a villamos átviteli hálózatról kerül kielégítésre. Ezek arányának ismerete mellett meghatározható a teljes energiafelhasználás [kWh] megoszlása és a villamosenergia egységár ismeretében pénzben [HUF] kifejezhető. A kiterjesztett vizsgálat környezeti hatásvizsgálat is végezhető, hiszen az energiamix változással a CO₂ kibocsátás [kg-ban] is módosul. A karbon-lábnyom eltérő valamennyi energiaforrás esetében, a napelemes energiatermelés CO₂ kibocsátása 0,03–0,04 kgCO₂/kWh, míg a szivattyús vízerőmű kibocsátása 0,05–0,09 kgCO₂/kWh (URL11). Magyarország 2024-es energiamixe alapján a becsült CO₂ kibocsátási tényező 0,24–0,25 kgCO₂/kWh között van (URL6). Az energiatermelés szénlábnyomai (CLCO₂) a vizsgált esetekben a 3. egyenlettel kerültek kiszámításra:

$$CL_{CO_2} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i \cdot ET_i}{E_{\text{total}}} \quad \text{ahol } E_{\text{total}} = \sum E_i \quad (3)$$

ahol E_i a különböző energiamixhez tartozó éves villamosenergia-termelés (kWh-ban), ET_i az emissziós tényező napenergia esetén 0,04 kgCO₂/kWh, vízenenergia esetén 0,08 kgCO₂/kWh és az átviteli hálózatról származó villamosenergia esetén kb. 0,25 kgCO₂/kWh. A CO₂ kibocsátás semlegesítési egységköltsége pedig kb. 28 Ft/kgCO₂.

A rendszer pénzügyi értékelése egy kombinált jelenérték-meghatározás alapú gazdasági-környezeti módszerrel (NPV_{lcca, cba}) történt a 4. egyenlettel, amely tartalmazza (1) a vízenenergia-tároló rendszer beruházási, karbantartási és üzemeltetési költségeit 50 éves időhorizonton egy diszkontált életciklus-költségelemzésben (LCCA), valamint (2) a különböző energiaforrások használatával és így a változó villamosenergia bekerülési árakból származó üzemeltetési költségmegtakarítást (Ft/kWh), és a CO₂ kibocsátás semlegesítési költségeinek csökkenését.

$$NPV_{lcca, cba} = I + \sum_1^t \frac{OP \cdot (1+p)^{t-1}}{(1+i)^t} + \sum_1^t \frac{MT \cdot (1+p)^{t-1}}{(1+i)^t} + \sum_1^t \frac{P_{e-mix}}{(1+i)^t} \pm \sum_1^t \frac{NCO_{2t}}{(1+i)^t} \pm \sum_1^t \frac{INC_k}{(1+i)^t} \quad (4)$$

ahol I a kezdeti beruházási költsége, valamint a napelemek feldísz (25. évi) rendszer cseréjének költsége (Ft); OP a kiindulási éves üzemeltetési költség (Ft), amely a „p” áremelkedés hatására változik a teljes vizsgált időszakban, MT az éves karbantartási költség (Ft), amely a „p” áremelkedés hatására változik a teljes vizsgált időszakban; P_{e-mix} a felhasznált energiamix egységára (Ft/kWh); i a finanszírozás kamatlába (3,0%/év); p az áremelkedés, az inflációs ráta (2,0%/év); t a vizsgált élettartam (50 év); INC_k az állam által nyújtott támogatás vagy büntetés, valamint az egyéb célokra felhasznált víz értékesítéséből származó

éves többletbevétel, a másodlagos vízhasználók hozzájárulása (+ ha támogatás/bevétel; - ha adó/bírság); Az NCO₂, az éves kibocsátott CO₂ semlegesítési költsége (+ semlegesítés esetén; - abszorpció esetén).

EREDMÉNYEK

A tározott csapadékvíz többcélú felhasználása csökkenti egy település globális kihívásoknak való kitettségét, beleértve az éghajlatváltozás káros, negatív hatásait. A település felett lefolyó csapadékvíz visszatartása a víz- és földenergia-gazdálkodást segítheti. A tározó kialakítása költségkímélőbbé válósítható meg a többcélú felhasználás miatt. Jelen kutatásban ezt a funkciót a 2. számú tározó látja el. A tározó feltöltését részben a csapadékvíz-visszatartás, részben pedig az alsó, 1. számú tározóból történő szivattyús töltés biztosítja.

Csapadékvíz-gazdálkodás

A tervezett szivattyús-tározó rendszer kvázi zárt vízkörforgás mellett működik, a víz az alsó-felső tározók közötti szabályozott áramlásával. A rendszer azonban külső vízellátást is igényel a másodlagos felhasználások, például az itatás, valamint a párolgásból eredő veszteségek kompenzálására. A feltöltés, valamint a vízpótlás elsődleges vízforrása a lefolyó, valamint a tározókra hulló csapadékvíz, amelyhez szükséges a helyi hidrológiai események megismerése. A tározók kettős célt szolgálnak: egyrészt a nappal termelt többlet napenergia tárolását - energia kiegyensúlyozás -, másrészt az őszi, téli és tavaszi többlet vizek visszatartását - vízkészlet gazdálkodás - az éghajlatváltozás okozta aszálykárok mérséklése érdekében. A vizsgált 20 éves időszakban a 35315-ös

számú MetStation állomáson mért átlagos éves csapadékmennyiség az átlag alatti, mindössze 532 mm. A nyári időszakban (122 nap) mindössze 12-15 olyan nap van, amikor a napi csapadékmennyiség eléri a legalább 5 mm-t. A növénytermesztés védelme és a biztonságos termés hozam érdekében az öntözés szükségessége növekszik. A racionális módszerhez a település és környezete részvízgyűjtőkre lett osztva, hogy meghatározható legyen az éves maximálisan visszatartható csapadékvíz mennyisége. Ennek megfelelően a lefolyásból évente rendelkezésre álló összes csapadékvíz 62 815 m³. Az ebből a 2. sz. felső tározó felé kormányozható mennyiség 10 812 m³, míg a fennmaradó mennyiséget, azaz 52 003 m³ az 1. sz. alsó tározó tudja kezelni. Ez jelentős vízmennyiség a település erősen dombvidéki jellege, valamint a nagy kiterjedésű erdős, mezőgazdasági és szőlészeti területek miatt. Az alvízgyűjtők lejtése 5,0-18,3% között változik, és a település területének kb. 60%-áról a lefolyás gravitációsan az 1. számú víztározó felé irányul, amely egy lokális medence.

Vízigények

Az öntözést a június 1. és szeptember 30. közötti időszakra határoztuk meg; a 3.2. fejezetben leírt öntözési ütemterv szerint. Egy teljesen csapadékmentes nyári időszak esetén az öntözési napok elméleti maximuma 92. Ezzel szemben az elmúlt évtized csapadékidőszorai alapján az öntözési napok száma 52-63 nap között változott, beleértve a 2020-as évek szélsőségesen aszályos nyarait is. A négy megjelölt szőlővel borított terület öntözési vízigénye, a legszárazabb év öntözési, itatási gyakoriságához szükséges mennyiségeket a 2. táblázat foglalja össze.

	Napi itatási igény / öntözési ciklusonkénti vízigény	Teljes nyári időszak vízigénye (63 öntözési nap / 4 havi itatás)	Nyári időszakon kívüli (okt-máj) itatási / öntözési vízigény
Szőlőtábla 1	52,5 m ³	3 308 m ³	0 m ³
Szőlőtábla 2	- m ³	- m ³	0 m ³
Szőlőtábla 3	171 m ³	10 773 m ³	0 m ³
Szőlőtábla 4	126 m ³	7 938 m ³	0 m ³
Őz-szarvas	1,2 m ³	146 m ³	219 m ³
Vaddisznó	1,5 m ³	183 m ³	273 m ³
Kistestű vadak	0,2 m ³	24 m ³	36 m ³
Összesen	352,4 m ³	22 372 m ³	528 m ³
Mindösszesen:		23 252,4 m ³	

2. táblázat. Öntözési és itatási célú vízhasználatok a felső tározókból

Table 2. Water use for irrigation and drinking purposes from the upper reservoirs

Az éves átlagos öntözési és itatási vízigény kb. 23 000 m³. Ezt egy gravitációs elosztórendszer juttatja a 3. számú tározóból a szőlőtövekhez, illetve közvetlenül elérhető 2. számú tározóból. Ezek tervezett kapacitása meghaladja az éves másodlagos célú vízigényt, így biztosítva a megfelelő vízellátást, miközben ellátja az elsődleges energetikai célú funkciókat. A kettős funkcióval a tározók közös előnyöket teremthetnek a helyi közösségnek és környezetének. A tározók a szélsőséges eseményeket is kezelik, a maximális kapacitás elérése esetén túlfolyón keresztül a többlet lefolyik egy közeli csatornában az 1. sz. tározó felé, így megtartva vizet.

Energiatározás

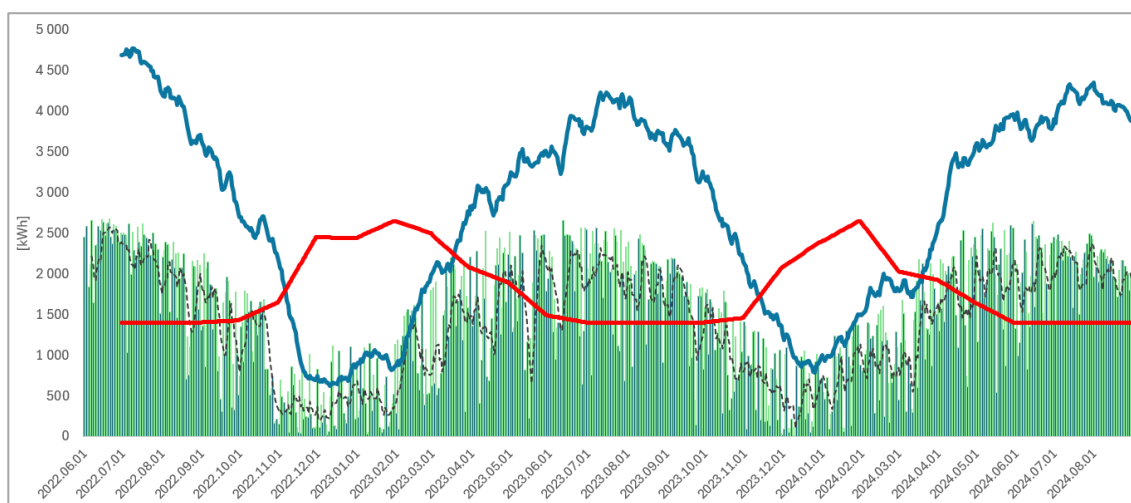
A településen meglévő és a térképen beazonosított napelempanelok alapján meghatározásra került a terület teljes napenergia-termelési kapacitása. A lehatárolt napelemes felületek és a panelenkénti becsült átlagos 1,5 m² méretből

és 400 W teljesítményből 1 086 darab napelem panel adódott, amelyek névleges, település szintű pillanatnyi teljesítménye 434,4 kW. Bár a település évente több mint 2 000 napsütéses órát élvez, ami elméletileg közel 900 MWh éves napelem termelési kapacitást eredményezhetne, a tényleges teljesítmény a változó körülmények miatt – téli alacsonyabb beesési szög, túl meleg idő, hóborítottság stb. — lényegesen alacsonyabb, mindössze 487,6 MWh a vizsgált két év átlagában. A téli napi napenergia-termelés nagyjából a nyári szint egyötöde-hatoda, annak ellenére, hogy a nappali órák számában a különbség ezen évszakok között kevesebb, mint 50%.

A tényleges települési szintű termelés meghatározásához egy működő, 10,2 kW-os napelemes rendszer szolgált referenciaként, valós rögzített teljesítményadatokkal. Az adatok skálázásával és a vonatkozó veszteségtényezők alkalmazásával készült el a településszintű becslés a

tényleges napenergia-termelésről, amit a 4. ábra szemléltet. A zöld oszlopok a napi termelést jelölik, a szürke

pontvonal pedig a 7 napos mozgóátlagot, kiemelve a napenergia ingadozását.



4. ábra. A napelemes energiatermelés napi bontásban (zöld) és annak 7-napos mozgóátlaga (szürke), a villamosenergia-fogyasztás 30 napos mozgóátlaga (piros), valamint a napelem-kapacitások megkétszerezésével elérhető energiatermelés 30-napos mozgóátlaga (kék)
Figure 4. Daily solar energy production (green) and its 7-day moving average (gray), 30-day moving average of electricity consumption (red), and 30-day moving average of energy production achievable by doubling solar capacity (blue)

A két vizsgált év közötti éves energiatermelés mennyiségének különbsége alig több, mint 3%. Az ábra összehasonlítja a teljes napenergia-termelés (szürke vonal) és a háztartások energiafelhasználásának 30 napos mozgóátlagát, beleértve az elektromos fűtési igényeket is (piros vonal). Nyáron a napenergia-termelés meghaladja a helyi igényeket, míg télen a fogyasztás a rendelkezésre álló megújuló energiát. Ideális esetben a nyári többlet napenergiát hatékony energiátárolási megoldásokkal lehetne tárolni télire. A termelési és keresleti görbék alatti területek integrálásával számszerűsíthető a jelenlegi éves napenergia-termelés, és összehasonlítható a teljes villamosenergia-fogyasztással. A jelenlegi napelemes kapacitás jelentős, de mégsem elegendő a település egész éves energiaigényének fedezésére. A kiegyensúlyozott energiaellátás eléréséhez a napelemes energiatermelés 40%-os növelésére lenne szükség. A becslés ideális, veszteségmentes körülményeket feltételez. A valóságban a tárolás hiánya még nagyobb, kb. megduplázott kapacitásnövekedést (kék vonal) igényelne és szezonális tárolást, a teljes energiafüggetlenség eléréséhez. További napelem telepítésekkel a rendszer, illetve a tározó mérete és a vízmérleg-számítások alapján kielégíthetné az egész éves energiaigényt.

Rendszer kialakítás

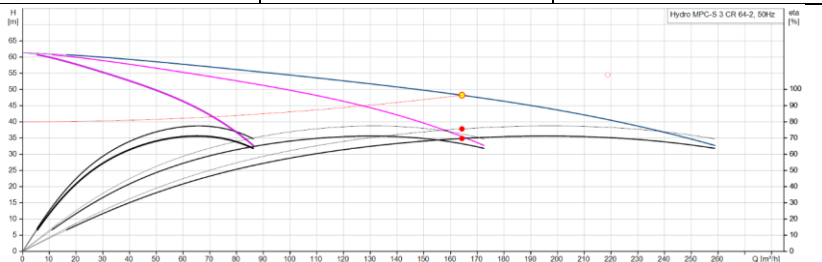
A tervezett szivattyús vízenenergia tározó rendszer egy alsó és három többfunkciós felső tározót tartalmaz. Az ezeket összekötő csővezeték átmérőit, az áramlási sebességeket, a vízhozamokat és egyéb peremfeltételeket részben a helyi adottságok, részben az elvárt energiatermelés határozza meg. Az irodalmi ajánlások alapján a csőáramlási sebességre $v = 1-4$ m/s érték, a település energiafogyasztási függvénye alapján pedig a vízhozamra $Q = 0,03-0,3$ m³/s érték lett megadva. A tervezett vízhozamok tározónként részben eltérőek az energiatermelő kapacitások és felhasználói igények alapján, így a 2., 4. sz. tározók esetében $Q = \{0,03 \text{ m}^3/\text{s}; 0,06 \text{ m}^3/\text{s}; 0,12 \text{ m}^3/\text{s}; 0,18 \text{ m}^3/\text{s}\}$, míg a 3. sz. tározó esetében $Q = \{0,06 \text{ m}^3/\text{s}; 0,12 \text{ m}^3/\text{s}; 0,18 \text{ m}^3/\text{s}; 0,3 \text{ m}^3/\text{s}\}$ értékeket kapott. A tervezett módszertan differenciál-

tan optimalizálja a különböző energiatermeléseket, a lakosság változó villamosenergia-felhasználási igényei alapján. Csőátmérőkre 200-300 mm adódott a különböző tározók esetén, amely megfelel az előzetesen meghatározott betározási és termelési vízhozam-kritériumoknak, a legkisebb hidrodinamikai veszteség mellett. A veszteség tartalmazza a szivattyúk dinamikus hidrosztatikai nyomásesését, a csővezeték súrlódása által okozott nyomásvesztéseket az alsó-felső tárolók közötti csőszakaszban, továbbá a csövek töltési idejének csökkentését, a szivattyúk hatásfokának növekedése és a beruházási költségek csökkentése érdekében. A tározók között 2 szivattyú telepítésével csökkenthető az egy szivattyúra jutó emelési magasság, ami kedvező hatással van a beruházási költségekre és a szivattyú üzempontjára, azaz a hatásfokára. A beállított paraméterek alapján a rendszerhez illeszkedő szivattyúkat a 3. táblázat foglalja össze, a szivattyúk a Grundfos online adatbázisából kerültek kiválasztásra (URL3). A szivattyúk működése miatti számított teljes éves energiavesztés 217 728 kWh.

A vízenenergia-potenciál növelés - a felső tározókba történő készletezés - késő tavasszal, kora nyáron zajlik, amikor jelentős napenergia-többlet van; csak május-június-július hónapokban 220 204 kWh. Ráadásul ezen időszakban elegendő esővíz áll rendelkezésre az alsó tározóban, hogy a felsők feltöltésre kerülhessenek. A tervezett víztározókkal a jelenlegi napelem-kapacitások április elejétől szeptember végéig kiegyensúlyozhatják a termelést és a fogyasztást a 2022. június 1. és 2024. október 31. közötti időszak napi napenergia-termelési adatok alapján, majd szeptember végétől energiatermelő funkcióra vált, mivel a 7 napos energiamérleg mozgóátlaga negatívvá válik, és az is marad tavaszig. Ezáltal az ingatlanokon elérhető jelenlegi napelem-kapacitás 228 705 kWh víztározó-kapacitást igényelne, hogy éves szinten kiszolgálja a villamosenergia-igényeket. Ezzel szemben a tervezett rendszer maximális energiátárolási képessége - a 3 felső tározó kapacitása - 18 468,6 kWh (4. táblázat), ami egy nagyságrenddel kisebb, mint amit az egész éves működés megkövetel.

3. táblázat. Szivattyú és rendszer jellemzők

Table 3. Pump and system characteristics

	Tározó #2	Tározó #3	Tározó #4
Szállítómagasság	69 m	54,5 m	59,5 m
H dinamikus (csővez.súrl. vesz.)	14,5 m	12 m	10 m
H statikus (tározó magasság kül.)	54,5 m	42,5 m	49,5 m
Térfogatáram	60,74 l/s	61,31 l/s	61,31 l/s
Áramlási sebesség	0,84 m/s	0,85 m/s	0,85 m/s
Szivattyú típus	Hydro MPC-S 3 CR64-2 U2 D-C-P-A	Hydro MPC-S 4 CR64-2 U2 D-P-B-A	Hydro MPC-S 4 CR64-2 U2 D-P-B-A
Hatásfok (szivattyú+motor)	70,6%	62,8%	62,8%
Jelleggörbék			

4. táblázat. A tervezett szivattyú víztározó rendszer teljes energiatároló képessége

Table 4. Total energy storage capacity of the designed pump storage system

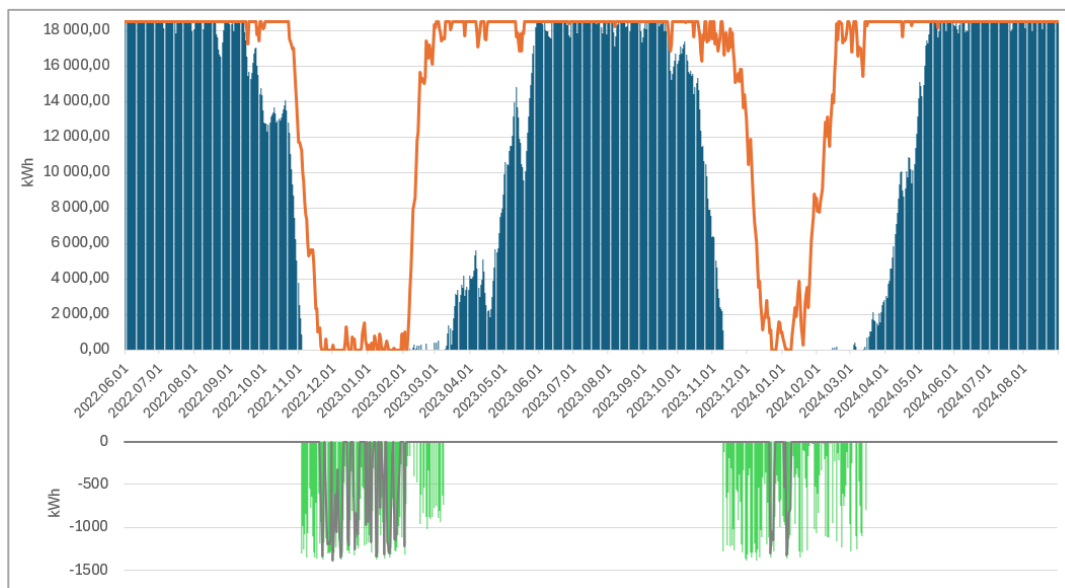
	Tározó #2	Tározó #3	Tározó #4
Hasznos térfogat	25 000 m ³	75 000 m ³	45 000 m ³
Átl. szintkülönbség	54,5 m	42,5 m	49,5 m
Max. energia tároló képesség	3 712,8 kWh	8 685,9 kWh	6 069,9 kWh
Teljes energia	18 468,6 kWh		

A tervezett tárolókapacitás tízszeresére növelése – kb. 25 hektár vízfelület és 1,5 millió m³ víztérfogat – a meglévő napelemekkel történő egész éves üzemeltetés fenntartása érdekében irreális. Ezzel szemben a napelempanel megduplázásával gyökeresen megváltoztatható a termelés-fogyasztás és a tárolás energiamérlege. A tervezett tározók energiakiegyenlítő hatása a megduplázott napelemes termelési kapacitással nagymértékben megnő és a szükséges tárolókapacitás 25 234 kWh-ra csökken. A meglévő napenergia-termelés 7 napos átlaga április elején jelentősen megnő, és tartósan a helyi fogyasztási szintek felett marad. Ennek eredményeként a felső víztározók teljes feltöltődéséhez szükséges 4 hetes intervallum legkésőbb május közepére eltelik, így a tárolók május 31-ig biztosan teljesen feltöltött állapotba kerül. Az 5. ábra mutatja a felső tározók napi energiaszintjét és annak változását (kék-jelenlegi; narancssárga-duplázott napelem kapacitás) és a szükséges külső villamosenergia-pótlás mértékét (zöld-jelenlegi; szürke-duplázott napelem kapacitás) június 1-től kezdődően, az elmúlt 2 év tényleges napenergia-termelése és villamosenergia-fogyasztása alapján.

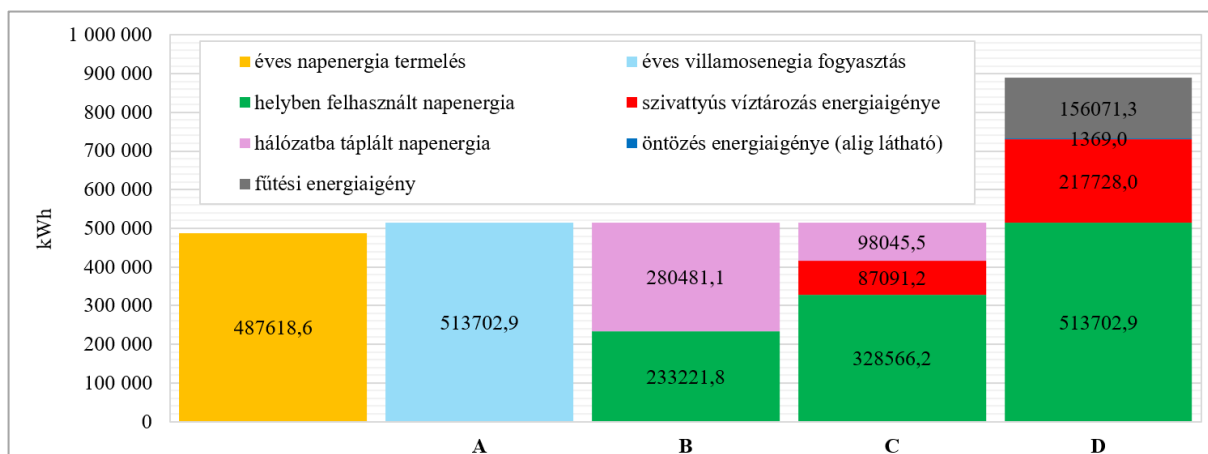
Ez már egy fenntartható üzemeltetést tesz lehetővé, külső energiaforrásból történő pótlás nélkül is. A 25,2 MWh (szükséges tárolókapacitás megduplázott napelemekkel) és a 18,5 MWh (tervezett tárolókapacitás) közötti

különbség részben kiegészíthető az 1. sz. tározóban lévő természetes lefolyás visszatartásával. Továbbá a napelemes kapacitások további növelésével, esetleg a tározók kismértékű bővítésével, vagy éppenséggel a szivattyúk hatásfokának további javításával. A meglévő napelemes kapacitás duplázása közel egy nagyságrenddel csökkenti a külső villamosenergia-forrásokból származó szükséges energiaellátást. A település teljes éves villamosenergia-fogyasztása 513 703 kWh. A meglévő napelemes kapacitásokkal a napi külső forrásból történő energiapótlás évente átlagosan 98 046 kWh, a teljes igény 19,1%-a, míg a megduplázott napelemes kapacitással átlagosan 27 697 kWh, a teljes igény 5,4%-a lenne.

Jelenleg a település nem rendelkezik energiatároló rendszerrel. A megtermelt napenergia jelentős része az átviteli hálózatba kerül és a településen kívül felhasználásra, vagy túlermelési időszakban lekapcsolással elvesz, így a teljes termelés csupán részben támogatja a helyi klímacélokot és a zöld átállást. Habár a jelenlegi teljes éves napelem-termelés közel azonos a teljes éves villamosenergia-fogyasztással, annak csak kis része hasznosul helyben közvetlenül. A meglévő napelem-termelés forgatókönyveit a 6. ábra mutatja be, a szivattyús-energiatároló rendszerrel történő kiegészítéssel és a napelemes kapacitás megduplázásával.



5. ábra. A felső tározókban tárolt energia napi bontásban a meglévő napelemes kapacitásokkal (kék) és tervezett napelem-kapacitás duplázás esetén (narancs); valamint az átviteli hálózatról kiegészítendő villamosenergia-igény (alsó ábra, zöld és szürke)
Figure 5. Daily breakdown of energy stored in the upper reservoirs with existing solar panel capacities (blue) and planned solar panel capacity doubling (orange); and the electricity demand to be supplemented from the transmission network (bottom figure, green and grey)



6. ábra. Napelemes és vízenergiatermelési változatok, valamint a település energiaigénye
Figure 6. Solar and hydroelectric power generation options and the energy demand of the settlement

A település energiafogyasztását, valamint napenergia- és tervezett vízenergia-termelését négy különböző forgatókönyv szerint vizsgáltuk. Jelenleg a meglévő éves napenergia-termelés kb. 487,6 MWh (narancs oszlop), míg a teljes éves villamosenergia-fogyasztása fűtés nélkül kb. 513,7 MWh (A, világoskék oszlop). Ezek megközelítőleg azonos nagyságrendűek, így ezen adatok alapján a település energetikailag önálló lehetne. A napelemek működési jellege miatt azonban a termelés rendkívül ingadozó, és gyakran eltér a fogyasztási igényektől. Emiatt a ténylegesen megtermelt napenergiának csak egy része, 233,2 MWh (B, zöld oszlop) hasznosítható közvetlenül, a fennmaradó rész, 280,5 MWh betáplálásra kerül az elosztó villamosenergia-hálózatba, vagy egyszerűen elvész. A jelenlegi, energiatárolás nélküli helyzetet a B változat mutatja be. Amennyiben a tervezett többcélú víztározók megvalósulnak, C változat, az energiamérleg megváltozik, és nagyobb arányban – 328,6 MWh – hasznosul helyben a megtermelt napenergia, és kevesebb villamosenergia-vásárlásra – 98 MWh – van szükség a

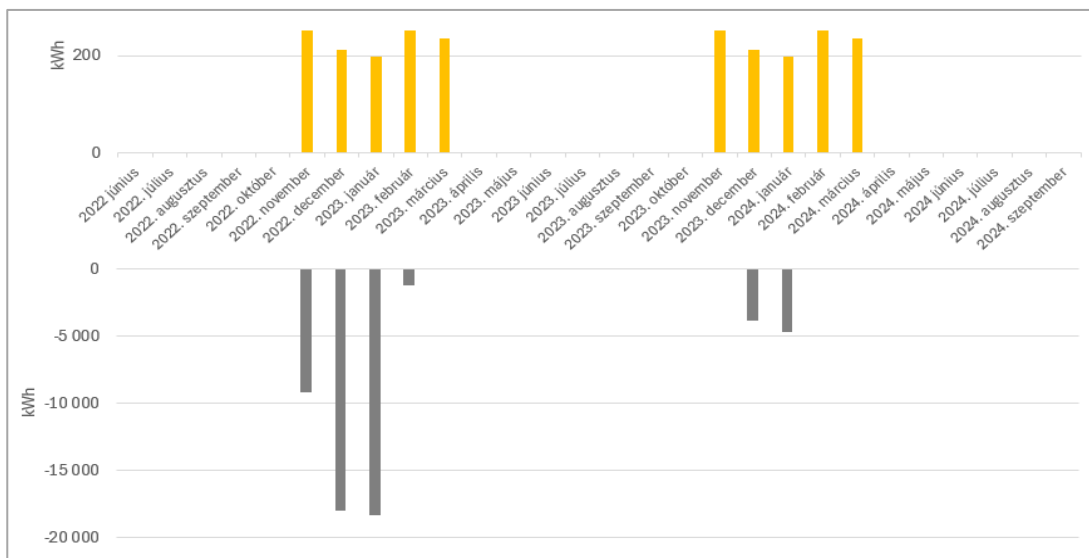
hálózatról. Bár a szivattyús víztározók üzemeltetése javítja a zöldenergia helyi hasznosítási arányát és csökkenti a szénlábnyomot, a rendszer működtetése energiát igényel. Ez a rendszer átlagosan évi 87,1 MWh-t használ, amit a C változat piros oszlopa jelöl.

A víztározók tervezett többcélú hasznosításával az éves energiafogyasztás megnő, és kétszeresen meghaladja a meglévő termelést. A fő energiafogyasztók: 1. a település teljes éves villamosenergia-fogyasztása; 2. a szivattyúzásból, a vízenergia-tárolási funkcióból eredő energiavesztesség; 3. a háztartások teljes éves fűtési energiája és az öntözési igényből származó szivattyúzási energia. A napelemes termelési kapacitás megduplázása – 975,2 MWh, D. változat – és a tervezett szivattyús-tározós rendszerrel történő összekapcsolással egész évben önfenntartó, kvázi szigetüzemű, zöldenergia termelési-fogyasztási egyensúly alakítható ki. Ebben a változatban a vízenergia rendszer üzemeltetésének éves energiaigénye 217,7 MWh, ami a felső és alsó tározók közötti vízmozgatás – csősúrlódás, radiális

szivattyúk üzemeltetés – üzemkörülményeiből adódik. Az energiamérlegben ez a veszteség napelemes termeléssel fedezhető, így zöldenergiával kielégíthető.

Az energiamérlegre jótékony hatással van a csapadékok megfelelő kormányzása, a tározóba irányítása a téli

hónapokban. A 7. ábra mutatja a rendszer ezen kiegészítését (szürke), amely 1 089,9 kWh-val képes javítani az energiamérleget. Hasonlóan, a felső tározók vízszintjének 50 cm-rel történő emelésével 1 859,2 kWh-val javítható a rendszer éves energiamérlege.



7. ábra. A napelemes-vízenergia rendszerből hiányzó felhasználói teljesítmény igény (sárga) és annak lehetséges pótlása csapadékvíz gazdálkodással (szürke)

Figure 7. Missing user power demand from the solar-hydro system (yellow) and its possible replacement with rainwater management (gray)

A 6. ábrán bemutatott 4 vizsgált eset eltérő éves energiamix és villamosenergia-igényt szemléltet, amelyek eltérő CO₂ lábnyomot és villamosenergia-költséget jelentenek. Az átviteli hálózatról származó villamosenergia egységára 70 Ft/kWh, míg a helyi napenergia-termelés becsült egységára 12 Ft/kWh, a helyi vízerőművekből származó pedig 19 Ft/kWh. A jelenlegi működési formában – részben helyi napenergia-ellátás (233 222 kWh/év), részben az

átviteli rendszerből történő vásárlás (280 481 kWh/év) – közel 80 t CO₂-t bocsát ki évente. A napelemes rendszerek telepítését megelőző időkből, amikor a villamosenergia beszerzés kizárólag az átviteli hálózatról történt (kb. 128 t CO₂/év), a CO₂ kibocsátás láthatóan érdemben csökkent. Mindazonáltal a szivattyús vízerőmű létesítésével és a napelemek bővítésével további jelentős javulás érhető el, amint azt az 5. táblázat mutatja.

5. táblázat. A villamosenergia igények éves CO₂ kibocsátása és a villamosenergia összköltsége
Table 5. The CO₂ emission of electricity demand and total electricity costs annually

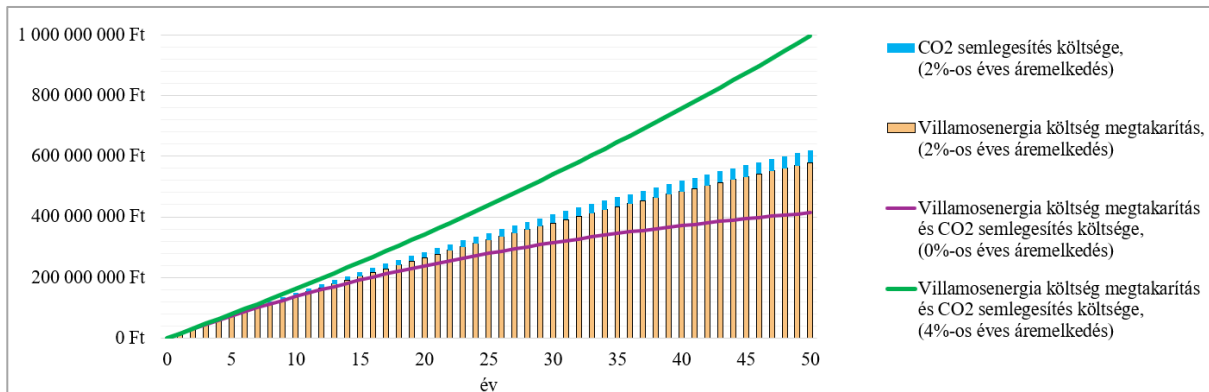
	A változat	B változat	C változat	D változat
Átviteli hálózat használata	128 426 kgCO ₂ (42 612 eFt)	70 120 kgCO ₂ (23 266 eFt)	48 347 kgCO ₂ (16 042 eFt)	-
Napelemes rendszer használata	-	9 329 kgCO ₂ (2 764 eFt)	12 812 kgCO ₂ (3 796 eFt)	17 587 kgCO ₂ (5 210 eFt)
Szivattyús vízenergia rendszer használata	-	-	7 628 kgCO ₂ (1 883 eFt)	23 210 kgCO ₂ (5 729 eFt)
Éves összes CO₂	128 426 kgCO ₂	79 449 kgCO ₂	68 787 kgCO ₂	40 797 kgCO ₂
Éves teljes költség	42 612 eFt	26 030 eFt	21 721 eFt	10 939 eFt

A tározók és a szivattyús vízenergia rendszer létesítésével csökkenthető az éves villanyszámla és a település CO₂ kibocsátása is, ami a napelemes kapacitások megkezdésével tovább javítható. Az A változatban szereplő kizárólag az átviteli hálózatról történő villamosenergia beszerzéshez képest a D változat esetében az éves villamosenergia ráfordítás közel 70%-kal, az éves CO₂ kibocsátás pedig 75%-kal csökkenthető. Utóbbit a jelenlegi állapottal

(B változat) összevetve, környezeti szempontból a CO₂ kibocsátás a felére csökkenthető – évente 39 tCO₂-vel kevesebb –, gazdasági szempontból pedig az éves villanyszámla közel 60%-kal csökkenthető, évi 15 millió forint megtakarítással. Az 50 éves élettartam során megtakarítható költségeket a 8. ábra szemlélteti. A B és a D változatok között elérhető közvetlen villamosenergia-költség megtakarítás mértékét a narancssárga oszlopok mutatják –

átlagos 2%-os évenkénti áremelkedés esetén –, amelyhez hozzáadódik az alacsonyabb CO₂ kibocsátás miatt elérhető semlegesítés elmaradt költsége. A kettő együttesen közel 620 millió forint diszkontált összeget jelent az 50 éves időtartam alatt. Változatelemzésként megvizsgálásra került az eltérő áremelkedési ráta alkalmazása. Az 50 éves élettartam során végig változatlan villamosenergia árakat feltételezve – azaz 0%-os áremelkedés mellett, amely igen valószínűtlen forgatókönyv –, a D változattal

így is kb. 413 millió forint megtakarítás lenne elérhető. Ugyanakkor évi 4%-os átlagos áremelkedési ütem mellett az 50 évre vetített diszkontált megtakarítás csupán a közvetlen energiaköltségen és a zöldenergia használata miatti kisebb volumenű CO₂ semlegesítésen kb. 997 millió forintnak felelne meg, változatlan energiaigények mellett. Amennyiben ekkora összegű fenntartható energetikai fejlesztés valósulna meg, a befektetés még az esetben is megtérülne.

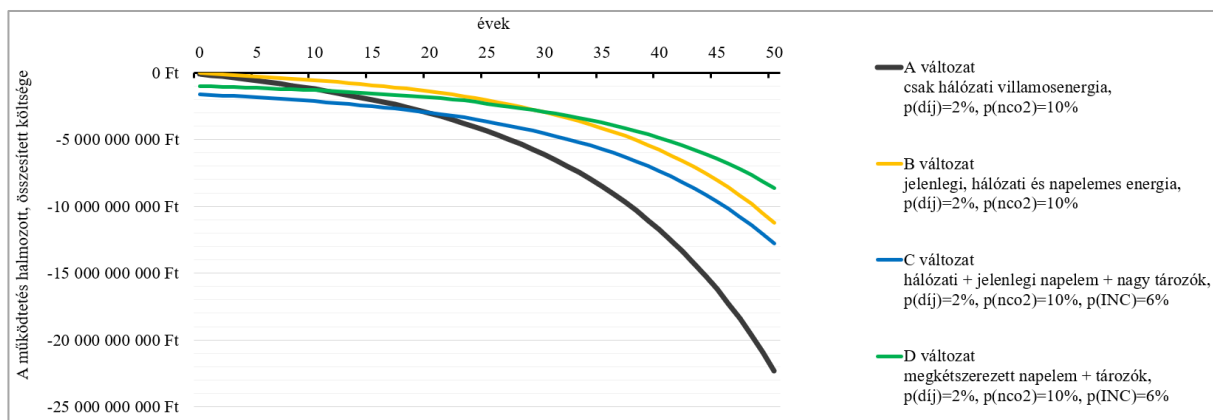


8. ábra. A napelemes-vízenergia-rendszerrel elérhető környezeti (csökkent CO₂ semlegesítési) és pénzügyi (csökkent egységnyi villamosenergia költség) megtakarítás a B és D változatok között, eltérő árnövekedési ráta esetén

Figure 8. The environmental (reduced CO₂ neutralization) and financial (reduced unit electricity cost) savings achieved with the implementation of the solar-hydropower system between B and D energy-mix variants, under different price growth rates

A szivattyús vízenergetikai beruházások évtizedes megtérülési idővel rendelkeznek. Ugyanakkor a közvetlen hatások figyelembevételével, mint például a napenergia és a vízenergia termelés alacsonyabb CO₂ lábnyoma és így alacsonyabb semlegesítési költsége – az átviteli hálózathoz vételezett részben fosszilis alapú villamosenergiához képest –, a fejlesztés megtérülési ideje csökkenthető. Továbbá, amennyiben a multifunkciós víztározók másodlagos hasznosításából származó előnyök is értékelésre kerülnek, a megtérülési idő tovább csökkenthető. Ezek a másodlagos hasznosítások társadalmi és környezeti

előnyökkel is járnak, így lerövidítik a zöldenergia fejlesztések – mint a kombinált napelemes szivattyús vízenergia rendszerek – megtérülési idejét. A 9. ábra bemutatja, hogy az 50 éves élettartamon vizsgálva a 4. változatot egy pénzügyi-társadalmi-gazdasági diszkontált értékelési modellben (LCCA), a napelemes-szivattyús energiamix (D változat, zöld görbe) felülteljesíti a másik 3 változathoz képest. A hagyományos, kizárólag az átviteli hálózathoz vételezett villamosenergia használata a legkevésbé fenntartható (szürke görbe), hiszen beruházási költségek nélkül is rövid időn belül költségesebbé válik.



9. ábra. A 4 energiamix változat (A, B, C, D) gazdasági-környezeti elemzése az 50 éves élettartamon az LCCA módszerrel

Figure 9. The financial and environmental assessment of the 4 energy-mix scenario (A, B, C, D) over the 50-year lifetime, using the LCCA quantification method

ÖSSZEFOGLALÓ

A meglévő magas napelemes zöldenergia termelő kapacitásokra építve dombvidéki településeken, csapadékvíz-gazdálkodással és energiatárolással egy integrált, fenntartható erőforrás-gazdálkodás alakítható ki, amely növeli az éghajlatváltozás és villamosenergia ellátás kihívásaival

szembeni ellenálló képességet. A szivattyús vízenergia tározó rendszer hatékonyan hasznosítja a napenergiát és az összegyülekező csapadékvizet települési szinten, egész évben az energiaigények kielégítésére, valamint másodlagos célokra, mint a mezőgazdasági öntözés, a vadon élő állatok itatása és a rekreáció. A tározók a villámárvízi kockázatok

csökkentésén túl energiatárolást és vízkészlet gazdálkodást is biztosítani tudnak. A rendszer ellensúlyozni képes a csapadékmennyiség és a napenergia-termelés szezonális ingadozásait. Továbbá a többcélú felhasználású tározók számos előnnyel járnak, amelyek növelik a rendszer gazdasági és ökológiai értékét, csökkentve a befektetés megtérülési idejét és javítva fenntarthatóságát.

A szivattyús-tározó rendszerrel a napenergia túltermelés helyben tárolható, így csökkentve a hálózat terhelését és stabilizálva a csúcsidőszakokban a villamosenergia-elátást, ami közvetett módon bevételt generálhat más fenntartható projektek finanszírozására. A napelemes és szivattyús vízenenergia tározó rendszerek országos kiterjesztése – a meglévő és tervezett atomerőművekkel együtt – önfenntartó energia-infrastruktúrához vezethet, minimalizálva a fosszilis energiahordozókon és az importált energiától való függőséget. A napelemes infrastruktúra és a tározókapacitás bővítése növelni képes a hosszútávú ellenállóképességet, az alacsonyabb energiaköltségen keresztül javítja a helyi versenyképességet és meglévő irányítástechnikai megoldásokkal támogatható (URL20). A kedvező adottságokkal rendelkező területeket előnyben részesítő, szakaszos megközelítés elengedhetetlen a környezeti, társadalmi és gazdasági igények kielégítése érdekében. Ehhez azonban jelentős közösségi részvételre van szükség annak biztosítására, hogy a rendszer megfeleljen a helyi igényeknek és társadalmi elfogadottságot nyerjen.

IRODALOMJEGYZÉK

Abbass, K., Qasim, M.Z., Song, H. Murshed, M., Mahmood, H., Jounis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science Pollution Resources*, vol. 29, pp. 42539-42559, <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>

Adamkowski, A., Krzemianowski, Z., Janicki, W. (2008). Flow Rate Measurement Using the Pressure Time Method in a Hydropower Plant Curved Penstock. Conference: 7th International Conference On Hydraulic Efficiency Measurements IGHEM, Milan, Italy. <https://doi.org/10.1115/1.3078794>

Ajayi, O., Ojo, O., Vasel, A. (2019). On the need for the development of low wind speed turbine generator system. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 331, paper 012062, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/331/1/012062>

Ansorena R.R., de Vilder, L.H., Prasasti, E.B., Aouad, M., De Luca, A., Geisseler, B., Terheiden, K., Scanu, S., Miccoli A., Roeber, V., Marence, M., Moll, R., Bricker, J.D., Goseberg, N. (2022). Low-head pumped hydro storage: A review on civil structure designs, legal and environmental aspects to make its realization feasible in seawater. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 160, paper 112281, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112281>

Ashurov, K.B., Abdurakhmanov, B.M., Iskandarov, S.C., Turdalieva, T.K., Salimboeva, A.M., Adilova, M.M., Abdusaidova, I.J. (2019). Solving the Problem of Energy Storage for Solar Photovoltaic Plants (Review). *Applied Solar Energy*, vol. 55, pp. 119-125. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19020038>

Bocca R. (2024). Negative energy price record in Europe, and other top energy stories. *World Economic Forum*, kiadva: 2024. szept. 23, <https://www.weforum.org/stories/2024/09/negative-energy-price-record-in-europe-and-other-top-energy-stories/>

Chanda, P. (2023). Distributed pumped hydro storage - case study. online: <https://energycentral.com/c/cp/distributed-pumped-hydro-storage—case-study>

Dimitriev, O., Yoshida, T, Sun, H. (2020). Principles of solar energy storage. *Energy Storage*, vol. 2, e96. <https://doi.org/10.1002/est2.96>

Feng, B., Zhang, Y., Bourke, R. (2021). Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models. *National Hazards*, vol. 106, pp. 613-627. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04480-0>

Flaminio, S., Reynard, E. (2023). Multi-purpose use of hydropower reservoirs: Imaginaries of Swiss reservoirs in the context of climate change and dam relicensing. *Water Alternatives*, vol. 16(2), pp. 705-729. <https://www.wateralternatives.org/>

Gonzalez, J.M., Olivares, M.A., Medellín-Azuara, J., Moreno, R. (2020). Multi-purpose Reservoir Operation: a Multi-Scale Tradeoff Analysis between Hydropower Generation and Irrigated Agriculture. *Water Resources Management*, vol. 34, pp. 2837-2849. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02586-5>

Gurecky, W., Wang, H., Ou, S. (2022). One Dimensional Penstock Flow Models for Hydropower Digital Twin. United States. <https://doi.org/10.2172/1894197>

Gutiérrez-Bahamondes, J.H., Mora-Meliá, D., Iglesias-Rey, P.L., Martínez-Solano, F.J., Salgueiro, Y. (2021). Pumping Station Design in Water Distribution Networks Considering the Optimal Flow Distribution between Sources and Capital and Operating Costs. *Water*, vol. 13, pp. 3098. <https://doi.org/10.3390/w13213098>

Haasnoot, M., van Aalst, M., Rozenberg, J. Dominique, K., Metthews, J., Bouwer, L. M., Kind, J., Poff, N.L.R. (2020). Investments under non-stationarity: economic evaluation of adaptation pathways. *Climatic Change*, vol. 161, pp. 451-463. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02409-6>

Jurasz, J., Piasecki, A., Hunt, J. Zheng, W., Ma, T., Kies, A. (2022). Building integrated pumped-storage potential on a city scale: An analysis based on geographic information systems. *Energy*, vol. 242, paper 122966. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122966>

Kálmán, A., Bene, K. (2023). Optimized Implementation of Nature-based Solutions for Sustainable Economic Benefits in a Watershed with Water Deficit – a Case Study in Hilly Settlements of Lake Velence. *Chemical Engineering Transactions*, vol. 107, pp. 265-270.

Kálmán, A., Bene, K. (2025). Multi-purpose Utilization of Rainwater in a Hilly Settlement Near Lake Velence. *Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering*, pp. 910-920. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80512-7_89

Kálmán, A., Bakonyi, A., Chappon, M., Bene, K., (2024). Optimizing interbasin water transfer for sustainable energy management and multipurpose water

utilization. ISCAMÉ - 10th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, Debrecen, Hungary. <https://doi.org/10.4028/p-jaWpD3>

Kálmán, A., Bene, K. (2024). Multi-Purpose Utilization of Rainwater in a Hilly Settlement near Lake Velence. Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, KOD 2024: the 12th International Conference, pp. 194-195. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80512-7_89

Kishore, R., Marin, A., Priya, S. (2014). Efficient Direct-Drive Small-Scale Low-Speed Wind Turbine. Energy Harvesting and Systems, vol. 1. <https://doi.org/10.1515/ehs-2014-0004>

Kishore, T.S., Patro, E.R., Harish, V.S.K.V., Haghighi, A.T. (2021). Comprehensive Study on the Recent Progress and Trends in Development of Small Hydropower Projects. Energies, vol. 14, paper 2882. <https://doi.org/10.3390/en14102882>

Lahlali, R., Taoussi, M., Laasli, S.E., Gachara, G., Ez-zouggar, R., Belabess, Z., Aberkani, K., Assouguem, A., Meddich, A., El Jarroudi, M., Barka, E.A. (2024). Effects of climate change on plant pathogens and host-pathogen interactions. Crop and Environment, vol. 3(3), pp. 159-170. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2024.05.003>

Maetens, W., Masante, D., Barbosa, P., Rossi, L., Wens, M., de Moel, H., Van Loon, A., Cotti, D., Sabino S., Anne-Sophie, Hagenlocher, M., Bláhová, M., Blauhut, V., Szillat, K., Stahl, K., Toreti, A. (2024). The European Drought Observatory for Resilience and Adaptation (EDORA). European Commission

Makaremi, Y., Haghighi, A., Ghafouri, H.R. (2017). Optimization of Pump Scheduling Program in Water Supply Systems Using a Self-Adaptive NSGA-II; a Review of Theory to Real Application. Water Resource Management, vol. 31, pp. 1283-1304. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1577-x>

Mioduszeński, W. (2012). Small water reservoirs – their function and construction. Journal of Water and Land Development, vol. 17, pp. 45-52. <https://doi.org/10.2478/v10025-012-0032-x>

Mlilo, N., Brown, J., Ahfock, T. (2021). Impact of intermittent renewable energy generation penetration on the power system networks – A review. Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy, vol. 6, paper 25. <https://doi.org/10.1007/s40866-021-00123-w>

Morabito, A., Guilherme, de O.S., Hendrick, P. (2019). Deriaz pump-turbine for pumped hydro energy storage and micro applications. Journal of Energy Storage, vol. 24, paper 100788. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100788>

Owusu, S., Cofie, O., Mul, M., Barron, J. (2022). The Significance of Small Reservoirs in Sustaining Agricultural Landscapes in Dry Areas of West Africa: A Review. Water, vol. 14, paper 1440. <https://doi.org/10.3390/w14091440>

Papadakis, C. N., Fafalakis, M., Katsaprakakis, D. (2023). A Review of Pumped Hydro Storage Systems. Energies, vol. 16, paper 4516. <https://doi.org/10.3390/en16114516>

Pinke, Z., Ács, T., Kalicz, P., Kern, Z., Jambor, A. (2024). Hotspots in the EU-27 and Economic Consequences of the 2022 Spring-Summer Drought. EuroChoices, vol. 23, pp. 28-33. <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12423>

Putra, Y.S., Noviani, E., Muhandi, M. (2022). Numerical Study of The Effect of Penstock Dimensions on a Microhydro System using a Computational Fluid Dynamics Approach. International Journal of Renewable Energy Development, vol. 11(2), pp. 491-499. <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.42343>

Sharifi, A. (2021). Co-benefits and synergies between urban climate change mitigation and adaptation measures: A literature review. Science of The Total Environment, vol. 750, paper 141642. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141642>

Souček, J., Nowak, P., Kantor, M., Veselý, R. (2023). CFD as a Decision Tool for Pumped Storage Hydropower Plant Flow Measurement Method. Water, vol. 15, p. 779. <https://doi.org/10.3390/w15040779>

Stocks, M., Stocks, R., Lu, B., Cheng, C., Blakers, A. (2021). Global Atlas of Closed-Loop Pumped Hydro Energy Storage. Joule, vol. 5, pp. 270-284. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.11.015>

Thapa, D., Luintel, M., Bajracharya, T. (2016). Flow Analysis and Structural Design of Penstock Bifurcation of Kulekhani III HEP. Conference: Proceedings of IOE Graduate Conference, Kathmandu, Nepal

Woś, K., Radoń, R., Tekielak, T., Wrzosek, K., Pieron, Ł., Piórecki, M. (2022). Role of Multifunctional Water Reservoirs in the Upper Vistula Basin in Reducing Flood Risk. Water, vol. 14, paper 4025. <https://doi.org/10.3390/w14244025>

URL1. E-KOZMU Egységes Elektronikus Közműhálózati Nyilvántartás, online: <https://ekozmu.e-epites.hu/ekozmu/#/nyitoidal>

URL2. Energy statistics - an overview. European Commission, online: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview

URL3. Grundfos – Szivattyú választó alkalmazás, 2025, online: <https://product-selection.grundfos.com/>

URL4. HungaroMet, Magyar Meteorológiai Szolgálat adatbázis, online: <https://odp.met.hu/>

URL5. International Solar Alliance - ISA (2023). World Solar Technology Report 2023". online: https://isa.int/uploads/publication_pdf/171992431789dd61fd0137a8789f047aac775c99.pdf

URL6. International Renewable Energy Agency (IRENA): Energy Profile, Hungary. [Online]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Statistics/Statistical_Profiles/Europe/Hungary_Europe_RE_SP.pdf

URL7. KDTVIZIG, Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság, online: www.kdtvizig.hu

URL8. Kékboldogó - Velence-tavi munkacsoport jelentés (2022). Javaslat a Velencei-tó fenntartható vízpótlására.

Kék Bolygó Klímavédelmi Alapítvány 2022; online: www.kekbolygoalapitvany.hu

URL9. KSH – Központi Statisztikai Hivatal (KSH), részletes településadattár, online: <https://www.ksh.hu/>

URL10. Meteoblue, Meteorológiai Adatbázis. online: <https://www.meteoblue.com/>

URL11. NREL, National Renewable Energy Laboratory: Life Cycle Assessment of New Closed-Loop Pumped Storage Hydropower Facilities, online: <https://www.nrel.gov/water/life-cycle-assessment-closed-loop-pumped-storage-hydropower-facilities>

URL12. NWRM, Natural Water Retention Measures, online: <https://www.nwrn.eu/>

URL13. OVA (2018). Országos Vadgazdálkodási Adattár - Velencei vadgazdálkodási tájegység (511). online: http://ova.info.hu/tajegyseg_terv/511_VGTT-20220411.pdf

URL14. SPE (2023). SolarPower Europe, Global Market Outlook For Solar Power 2023-2027, online: <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2023-2027>

<https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2023-2027>

URL15. Statista, Electricity consumption by region, online: <https://www.statista.com/statistics/688164/world-wide-consumption-of-electricity-by-region>

URL16. VIZUGY, Országos Vízügyi Főigazgatóság – Vízügyi Honlap, Velencei tó. online: <https://www.vizugy.hu/index.php?module=content&programelemid=44>

URL17. VKKI (2010). Vízügyi és Környezetvédelmi Központi Igazgatóság, 1-14. Velencei-tó. online: http://www2.vizeink.hu/files3/1_14_Velencei_to_VGT_terv.pdf

URL18. Open-Source, QGIS, software version. QGIS-3.28.2-Firenze. online: <https://qgis.org/en/site/about/index.html>

URL 19. Open-Source, Google Earth, version. Google Earth-9.117.0. online: <https://earth.google.com/web>

URL 20. Bábolna Energiaközösség, online: <https://babeenergia.hu/>

A SZERZŐK



KÁLMÁN ATTILA okleveles áramlástechnikai gépészmérnök (BME) és okleveles környezeti közgazdász (Corvinus) diplomái után 2021 óta a Széchenyi István Egyetem építőmérnöki PhD hallgatója és a Közlekedés-építési és Vízmérnöki Tanszéken 2022 óta egyetemi tanársegéd. A kutatási területe az integrált települési vízgazdálkodás és a természet-alapú megoldások alkalmazási lehetőségei, a víztérk meghatározása. Az iparban önkormányzatok részére ITVT elkészítését végzi, valamint egészségügyi intézmények vízgépészetével, műtői víztisztító rendszerek fejlesztésével foglalkozik. Mint orvostechnológus, sterilvíz előállító rendszereket tervez és azok gyártását felügyeli. Az idén az MIT (Boston) a témában elért innovációját sikeresnek értékelte, így megkezdheti a prototípus fejlesztését.



BENE KATALIN okleveles építőmérnök (BME), 1991-ben szerzett MSc diplomát vízépítőmérnöki szakon a University of South Carolina-n, majd ugyanitt 1996-ban PhD-fokozatot. A doktori fokozat megszerzését követően posztdoktori kutatóként és oktatóként dolgozott a University of South Carolina-n. 2011 óta a Széchenyi István Egyetem Közlekedésépítési és Vízmérnöki Tanszékének docense, valamint a Vízgazdálkodási Kutatócsoport vezetője. A VEAB Vízgazdálkodási Munkabizottságának elnöke, továbbá számos hazai és nemzetközi kutatási projekt (Horizon, KEHOP) szakmai vezetője. 2015 óta a Magyar Tudományos Akadémia köztestületi tagja.



FENNTARTHATÓSÁG. KIÁLLÍTÁS. ÉLMÉNY.
Vasúttörténeti Park | 2026. február 25. – március 29.

Harmadik alkalommal került megrendezésre a **Planet Budapest** rendezvény, a fenntarthatóságot, a környezet védelmét és a bolygónk jövőjét a középpontba állító kiállítás, melynek helyszíne ezúttal a Vasúttörténeti Park. A rendezvény számos, a vízzel kapcsolatos szakmai találkozónak is helyet adott.

A VÍZ JÖVŐJE – GLOBÁLIS VÍZÜGYI KIHÍVÁSOK, INNOVATÍV VÁLASZOK 2026. február 27.

Afrika, Európa és Ázsia vezető vízügyi szereplőit vonzotta Magyarországra a Planet Budapest 2026 keretében a Hungarian Water Partnership által szervezett „A víz jövője” című nemzetközi konferencia, ahol 20 ország 300 képviselője vett részt. A konferencia egyértelműen megmutatta, hogy a vízbiztonság globális ügy, amely csak határokon átívelő együttműködéssel kezelhető.

